



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT)

***“Comparativa entre los métodos pseudoestático
y dinámico para la estabilidad de taludes
mediante el Método de Elementos finitos. Caso
de Estudio: Terremoto de Bahía de Caráquez
(2016)”***

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del título de:
MAGÍSTER EN GEOTECNIA

LUIS DAVID ÁVILA OÑATE

GUAYAQUIL – ECUADOR
AÑO: 2021

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, a quienes les debo todo. Gracias por sus consejos.

A la Escuela Superior Politécnica del Litoral, por brindarme la oportunidad de cursar este programa de Maestría de calidad.

A mi tutor, el Ingeniero Jaime Bojorque por su invaluable guía durante el desarrollo de este trabajo.

A Isabel Núñez, por su invaluable contribución al desarrollo de este trabajo.

DEDICATORIA

A Dios, a mi papá, a mi mamá y a mis hermanos...

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

LUIS DANILO DÁVILA, M.Sc.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

JAIME BOJORQUE, Ph.D.

TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE APELLIDO

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad y la autoría del contenido de este trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOI realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual.

Luis David Ávila Oñate

RESUMEN

El análisis de taludes ha sido uno de los puntos centrales de interés para los ingenieros geotécnicos durante el siglo pasado y el presente. En los países con una actividad sísmica considerable, como es el caso de Ecuador, además del análisis de taludes bajo condiciones estáticas, se vuelve necesario evaluar el comportamiento de los mismos bajo la acción sísmica. Para ello, se tienen dos enfoques: el primero es el de realizar un análisis estático tradicional incluyendo la acción sísmica como fuerza lateral equivalente que desestabilice el talud, el otro enfoque es el de realizar un análisis dinámico, evaluando la respuesta del talud en el tiempo.

En el presente trabajo, se han realizado varios análisis de estabilidad de taludes ante la acción de cargas laterales obtenidas del terremoto de Pedernales del 16 de abril del 2016 siguiendo el enfoque pseudoestático al aplicar una carga lateral equivalente (Método de Equilibrio Límite, LEM) y siguiendo el enfoque dinámico al aplicar los registros de aceleraciones haciendo uso del Método de Elementos Finitos (Método de Elementos Finitos, FEM).

Para los Análisis pseudoestáticos, se ha empleado el software Geostudio Slope/W, incluyendo una fuerza desestabilizadora proporcional al PGA de cada registro obtenido un Factor de Seguridad (FS) al realizar el análisis tradicional de estabilidad taludes por equilibrio límite. En el Análisis Dinámico, se ha empleado el software Bentley Plaxis 2D, aplicando el registro dinámico de aceleraciones y obteniendo la respuesta dinámica de los taludes (desplazamientos) en función del tiempo.

Con el objeto de comparar metodologías que tienen enfoques completamente distintos, se ha realizado un análisis de sensibilidad, valorando qué parámetros inciden mayormente en los resultados obtenidos mediante un método y evaluando cómo estos influyen en el otro.

Los resultados evidencian que es recomendable incluir el análisis dinámico, especialmente cuando hay presencia de material cohesivo, puesto que el enfoque pseudoestático no logra abarcar ciertos parámetros que pueden llegar a influir enormemente en los resultados.

Palabras clave: Análisis de Taludes, Análisis Pseudoestático, Análisis Dinámico, Registros acelerográficos, Terremoto de Pedernales del 16 de abril de 2016, PLAXIS.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo General.....	2
1.3.2. Objetivos Específicos	3
1.4. Alcance	3
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Principios de la Ingeniería Geotécnica Sísmica	5
2.2. Sismicidad en el Ecuador.....	7
2.3. Registros acelerográficos.....	7
2.4. Terremoto del 16 de abril de 2016	8
2.5. Estabilidad de taludes	10
2.6. Estabilidad de Taludes ante cargas sísmicas	12
2.6.1. Análisis Pseudoestático.....	13
2.6.2. Análisis Dinámico por medio de Elementos finitos.....	14
2.7. Software PLAXIS® 2D Connect Edition.....	15
2.8. Tipos de Cálculo	16
2.9. Fundamento Teórico del Método de Elementos Finitos aplicado a casos dinámicos (Bentley Systems, Incorporated, 2021)	17
2.9.1. Ecuaciones básicas del comportamiento dinámico.....	17
2.9.2. Condiciones de borde.....	18
2.9.2.1. Bordes Viscosos	18
3. METODOLOGÍA	19
3.1. Descripción General.....	19
3.2. Parámetros de Cálculo.....	21
3.2.1. Parámetros Geométricos.....	21
3.2.2. Parámetros de suelo y Modelo Constitutivo	21
3.3. Análisis Pseudoestático	22

3.3.1. Registros acelerográficos	22
3.3.2. Coeficiente pseudoestático.....	27
3.4. Análisis Dinámico	28
3.4.1. Parámetros generales	28
3.4.2. Parámetros de la malla.....	28
3.4.3. Condiciones de borde.....	28
3.4.4. Parámetros sísmicos	29
3.4.5. Etapas de cálculo y tipos de análisis.....	29
4. RESULTADOS.....	31
4.1. Análisis Pseudoestático	31
4.2. Análisis Dinámico.....	38
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	47
6. BIBLIOGRAFÍA	48
7. ANEXOS	50

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Placas tectónicas (Fuente: Servicio Geológico de los Estados Unidos, USGS).	6
Ilustración 2. Epicentros de los principales sismos registrados entre los años 2000 y 2008 (Fuente: Observatorio Tectónico del Instituto Tecnológico de California).	6
Ilustración 3. Contexto Sísmico del Ecuador y esquema del Terremoto de Pedernales (Fuente: IG-EPN).	7
Ilustración 4. Registros acelerográficos del terremoto del 16 de abril de 2016 (Fuente: IG-EPN).	9
Ilustración 5. Terraplén de carretera en Manabí colapsado debido al Terremoto del 16 de abril de 2016 (Fuente: Diario La República).	10
Ilustración 6. Esquema de falla de un talud (Abramson, 2002).	11
Ilustración 7. Esquema del Análisis Pseudoestático (Jia, 2017).	13
Ilustración 8. Mapa del Ecuador con las ubicaciones de los registros del Sismo del 16 de abril del 2016 (Fuente: Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional).	19
Ilustración 9. Mapa de Peligro Sísmico del Ecuador (Fuente: Norma Ecuatoriana de Construcción NEC-2015).	20
Ilustración 10. Ejemplo de registro acelerográfico (Fuente: IG-EPN).	22
Ilustración 11. Registro acelerográfico APED-E.	24
Ilustración 12. Registro acelerográfico APO1-N.	24
Ilustración 13. Registro acelerográfico AMNT-N.	25
Ilustración 14. Registro acelerográfico AGY2-N.	25
Ilustración 15. Registro acelerográfico AMIL-E.	26
Ilustración 16. Registro acelerográfico ACUE-E.	26
Ilustración 17. Registro acelerográfico ALJ1-N.	27
Ilustración 18. Discretización aplicada en PLAXIS.	28
Ilustración 19. Registros acelerográficos del Terremoto del 16 de abril de 2016 importados en PLAXIS®.	29
Ilustración 20. Parámetros implementados para el Análisis Dinámico en PLAXIS.	30
Ilustración 21. Superficie de falla obtenida para el Talud #1 (Geostudio Slope/W)	31
Ilustración 22. Resultados obtenidos para el talud de Altura=10m y pendiente=30°.	33
Ilustración 23. Resultados obtenidos para el talud de Altura=8m y pendiente=30°.	33
Ilustración 24. Resultados obtenidos para el talud de Altura=8m y pendiente=45°.	34
Ilustración 25. Resultados obtenidos para el talud de Altura=6m y pendiente=30°.	34
Ilustración 26. Resultados obtenidos para el talud de Altura=6m y pendiente=45°.	35
Ilustración 27. Resultados obtenidos para el talud de Altura=6m y pendiente=60°.	35
Ilustración 28. Resultados obtenidos para el talud de Altura=4m y pendiente=30°.	36
Ilustración 29. Resultados obtenidos para el talud de Altura=4m y pendiente=45°.	36
Ilustración 30. Resultados obtenidos para el talud de Altura=4m y pendiente=60°.	37
Ilustración 31. Puntos de control seleccionados para evaluar el comportamiento del Talud Modelo No. 182.	38
Ilustración 32. Desplazamientos obtenidos en el Modelo No. 179 con un valor de E=2 MPa.	39
Ilustración 33. Desplazamientos obtenidos en el Modelo No. 179 con un valor de E=10 MPa.	39
Ilustración 34. Desplazamientos obtenidos en el Modelo No. 179 con un valor de E=25 MPa.	40
Ilustración 35. Desplazamientos obtenidos en el Modelo No. 179 con un valor de E=100 MPa.	40
Ilustración 36. Desplazamientos obtenidos en el Modelo No. 179 con un valor de E=250 MPa.	41
Ilustración 37. Desplazamientos obtenidos en el Modelo No. 179 con un valor de E=500 MPa.	41
Ilustración 38. Variación de la Respuesta de desplazamientos en función del Módulo de Young (E) en la corona del Talud No. 179.	42

<i>Ilustración 39. Distorsión en la malla del talud No. 107 (H=6m, Ángulo=60º, Suelto Tipo 1, Registro APO1-N).</i>	43
<i>Ilustración 40. Desplazamientos calculados para el Talud #107 (H=6m, Ángulo=60º, Suelto Tipo 1, Registro APO1-N).</i>	43
<i>Ilustración 41. Respuesta del Talud No. 141 (H=4m, Ángulo=30º, Suelto Tipo 3) ante la excitación sísmica del Registro de aceleraciones APED-E (Pedernales).</i>	44
<i>Ilustración 42. Respuesta del Talud No. 84 (H=6m, Ángulo=30º, Suelto Tipo 3) ante la excitación sísmica del Registro de aceleraciones ALJ1-N (Loja).</i>	44
<i>Ilustración 43. Respuesta del Talud No. 103 (H=6m, Ángulo=45º, Suelto Tipo 3: v=0.25) ante la excitación sísmica del Registro de aceleraciones AMIL-E (Milagro).</i>	45
<i>Ilustración 44. Respuesta del Talud No. 103 (H=6m, Ángulo=45º, Suelto Tipo 3: v=0.35) ante la excitación sísmica del Registro de aceleraciones AMIL-E (Milagro).</i>	46

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Parámetros Geométricos de taludes a analizar.</i>	21
<i>Tabla 2. Parámetros de resistencia utilizados en el Modelo</i>	21
<i>Tabla 3. Registros acelerográficos seleccionados para el análisis (Fuente: IG-EPN).</i>	23
<i>Tabla 4. Valores de coeficientes pseudoestáticos obtenidos</i>	27
<i>Tabla 5. Valores orientativos del Módulo de Young para suelos (Fuente: Tabla D.23 del Código Técnico de Edificación español).</i>	42

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La Ingeniería Civil, la más antigua de las disciplinas no militares de la ingeniería, ha constituido una pieza fundamental en el progreso de la humanidad. Por medio del empleo de ciencias como las Matemáticas y la Física, se han desarrollado técnicas y procedimientos para el diseño, construcción y mantenimiento de infraestructuras que han permitido el progreso del ser humano, no sólo en el ámbito tecnológico, sino también en la calidad de vida.

Una de las subdisciplinas de la Ingeniería Civil es la Geotecnia, la cual se encarga del estudio las características mecánicas del terreno sobre el cual se va a cimentar infraestructuras como puentes, edificios, carreteras, etc. Además, se encarga de establecer el tipo de fundación requerida, así como del mejoramiento del suelo requerido.

La Ingeniería Geotécnica, mediante el uso de conceptos geológicos, geofísicos, hidráulicos y de mecánica de sólidos, busca reducir la incertidumbre que conlleva la caracterización de un medio heterogéneo como el suelo, con el objetivo clave de lograr fiabilidad y seguridad, sin perder de vista los parámetros económicos y funcionales.

Un aspecto importante para la Ingeniería Geotécnica es la estabilidad de taludes. Diversos tipos de proyectos como carreteras, presas y edificaciones contemplan su uso, por lo que lograr un diseño adecuado de taludes es un desafío clave.

Un buen número de fallas de taludes han ocurrido durante sismos, por ello, en zonas sísmicamente activas se debe evaluar la estabilidad sísmica de taludes y laderas, como es el caso del Ecuador. Los efectos de los fenómenos sísmicos dependen de la magnitud y distancia al epicentro (Kramer, 1996).

El mecanismo físico inducido por el movimiento sísmico al talud es muy complicado e incluye todas las complejidades del análisis estático de estabilidad de taludes más otras complejidades asociadas con la propagación de ondas sísmicas y resistencia dinámica de los suelos y rocas. Por ello, el análisis geotécnico de estabilidad sísmica puede ser muy complejo (Coduto, 1999).

El 16 de abril de 2016, ocurrió en la ciudad de Bahía de Caráquez un terremoto de $M_w=7.8$ que afectó severamente al litoral ecuatoriano. La Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC), organismo adjunto a Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) capturó los registros acelerográficos en diversos puntos del Ecuador, lo cual ha permitido realizar análisis de diversa índole (Singaucho, 2016). Este sismo, provocó serios daños en diversas infraestructuras como edificaciones, muelles, puentes y taludes.

Durante un evento sísmico, la estabilidad en un talud puede disminuir de diferentes maneras (Kramer, 1996):

- i) las ondas sísmicas generan esfuerzos adicionales al talud;
- ii) los desplazamientos del suelo generados por las ondas sísmicas pueden ser lo suficientemente grandes como para romper los enlaces entre las partículas del suelo, por lo tanto, la reducción de resistencia del suelo; y
- iii) en suelos sueltos, el efecto de la carga cíclica puede dar lugar a la compactación. Si la presión de agua no puede ser eliminada lo suficientemente rápido, la presión de poro aumentará, generando la falla del suelo.

Debido a la complejidad del análisis de taludes bajo cargas sísmicas, diversos métodos se han desarrollado para captar los mecanismos físicos generados durante un sismo que afectan a los taludes, como el método pseudoestático, Newmark o dinámicos a través de modelos numéricos por elementos finitos o diferencias finitas, entre otros.

1.2. Justificación

Las consecuencias del terremoto del Ecuador del 16 de abril de 2016 aún siguen latentes en la memoria de los ecuatorianos, pues diversos esfuerzos se siguen realizando para mitigar los efectos de eventos similares en un futuro. Además del avance en el diseño estructural sismorresistente, es importante no descuidar el aspecto geotécnico sísmico, pues, a fin de cuentas, es donde se asentarán las obras de infraestructuras. Los taludes están presentes en muchas de estas obras, por lo que su comportamiento bajo la acción de cargas sísmicas debe estudiarse bajo condiciones locales, de tal forma que se pueda predecir su desempeño ante eventos sísmicos futuros.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Realizar análisis de estabilidad de taludes ante las cargas laterales obtenidas del terremoto de Pedernales del 16 de abril de 2016, por medio de la aplicación de una carga lateral equivalente en el Análisis Pseudoestático (Equilibrio Límite, LEM) y por medio de la aplicación de los registros de aceleraciones en el Método Dinámico (Elementos Finitos, FEM), evaluando bajo qué parámetros son más sensibles los resultados obtenidos siguiendo cada enfoque.

1.3.2. Objetivos Específicos

- I. Evaluar la estabilidad de taludes parametrizados ante una carga lateral equivalente utilizando el método pseudoestático (Método de Equilibrio Límite, LEM).
- II. Evaluar la estabilidad de los taludes parametrizados ante la aplicación de registros acelerográficos, mediante el Método Dinámico por Elementos Finitos (FEM).
- III. Analizar los resultados obtenidos mediante el método pseudoestático y Dinámico, e identificar los parámetros ante los cuales los resultados son más sensibles.

1.4. Alcance

El presente trabajo de investigación está organizado de la siguiente manera:

Capítulo I – Introducción:

En este capítulo se da a conocer la definición de los conceptos básicos para el trabajo de titulación, dando una introducción al fenómeno de la estabilidad de taludes y la problemática que representa, además, se establecen los objetivos que se esperan alcanzar.

Capítulo II – Marco Teórico:

En capítulo dos se presentan las bases de la ingeniería geotécnica sísmica, la sismicidad del Ecuador y las generalidades del terremoto de Pedernales del 16 de abril del 2016, del cual se hacen uso sus registros acelerográficos para el desarrollo de este trabajo. Además, se discuten los principios que rigen los diferentes métodos de estabilidad de taludes, haciendo hincapié en la estabilidad ante cargas laterales, se presentan los principios matemáticos que rigen en el Método Pseudoestático y el Método Dinámico. Adicionalmente, se presenta una introducción al Programa PLAXIS® y sus particularidades con respecto a las condiciones de borde, las cuales serán de particular importancia en el análisis dinámico.

Capítulo III - Metodología:

En el desarrollo de este capítulo se detalla la metodología a utilizar, la cual se divide en tres etapas: en la primera se seleccionan y procesan los registros acelerográficos a utilizar, en la segunda etapa se calcula el coeficiente k_h en función del PGA de los registros seleccionados, para finalmente, en la tercera etapa, definir las características geométricas y geomecánicas a utilizar en el procesamiento de los modelos, los cuales se harán en los programas de cálculo correspondientes.

Capítulo IV – Resultados:

En el desarrollo de este capítulo se presentan los resultados obtenidos por ambos métodos (pseudostático y dinámico), se discuten los resultados y se presentan los parámetros que inciden el comportamiento de los taludes por ambos métodos.

Capítulo V – Conclusiones y Recomendaciones:

En el desarrollo de este capítulo se detallan las conclusiones a las que se llegan a partir de los resultados obtenidos y se realizan recomendaciones con respecto al cálculo de estabilidad de taludes ante cargas laterales, haciendo énfasis en el método dinámico.

Anexos:

En este apartado se anexan los resultados obtenidos para todos los análisis de estabilidad mediante el método pseudostático y dinámico, sumando en total 189 modelos por cada método.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Principios de la Ingeniería Geotécnica Sísmica

La Ingeniería Geotécnica Sísmica puede ser definida como una subespecialidad dentro del campo de la Ingeniería Geotécnica que trata el diseño y construcción de proyectos con el objetivo de resistir los efectos sísmicos. Por ello, además de requerir un dominio de los principios básicos de la Geotecnia, se requiere conocimientos de la Geología, Sismología e Ingeniería Sísmica, entre otros (Day, 2002).

La Ingeniería Geotécnica Sísmica es una disciplina relativamente joven, la mayoría de su desarrollo se ha dado en los últimos 40-50 años, la mayoría de los profesionales dedicados a este campo tienen también destreza en la ingeniería Estructural o Geotécnica, un hecho que es reflejado en la práctica (Kramer, 1996).

Aun cuando los principales avances en el campo se han dado hasta hace relativamente poco tiempo, los terremotos han despertado especial interés a través de los siglos, existen registros escritos de hace más de 3000 años en China que hablan de sus desastrosos efectos, así mismo, hay registros en Japón y en la región mediterránea de hace más de 1600 años, aun así, comparada con los millones de años en que los movimientos sísmicos han estado ocurriendo, la experiencia del ser humano con ellos, es relativamente corta. Hoy en día, cientos de millones de personas están expuestas a un significativo riesgo sísmico, tanto para sus propiedades (que pueden llegar a perjuicios económicos de miles de millones de dólares) como para su propia vida. Así mismo, sigue siendo imposible prever la ocurrencia de un sismo, pero han existido avances en la mitigación sus efectos, evitando pérdida de vidas, y daños en las infraestructuras (Kramer, 1996).

A partir del terremoto de San Fernando (1971), miles de eventos sísmicos se han captado, registrado y puestos a disponibilidad de la comunidad científica, lo que ha permitido estudiar cómo afectan parámetros como: distancia a la falla, magnitud, aceleración pico, entre otros (Bozorgnia & Vitelmo V., 2004).

La teoría de la tectónica de placas ha contribuido enormemente a la comprensión de los terremotos. Según esta teoría, la superficie de la tierra se encuentra dividida en placas, las cuales están conformadas por la corteza y la parte más rígida del manto superior. La Ilustración 1 muestra el mapa global de placas tectónicas, la Ilustración 2 muestra las ubicaciones de los epicentros de grandes terremotos. Al comparar ambas ilustraciones, es evidente que las ubicaciones de la gran mayoría de los terremotos corresponden a los límites entre las placas (Day, 2002).

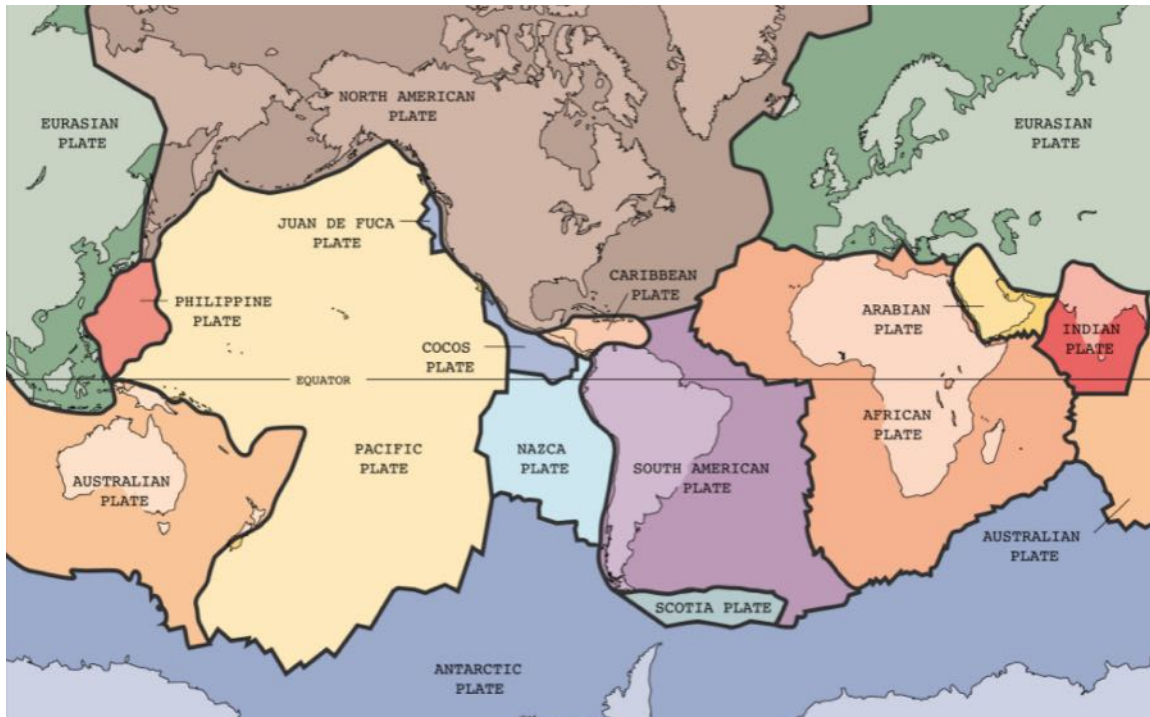


Ilustración 1. Placas tectónicas (Fuente: Servicio Geológico de los Estados Unidos, USGS).

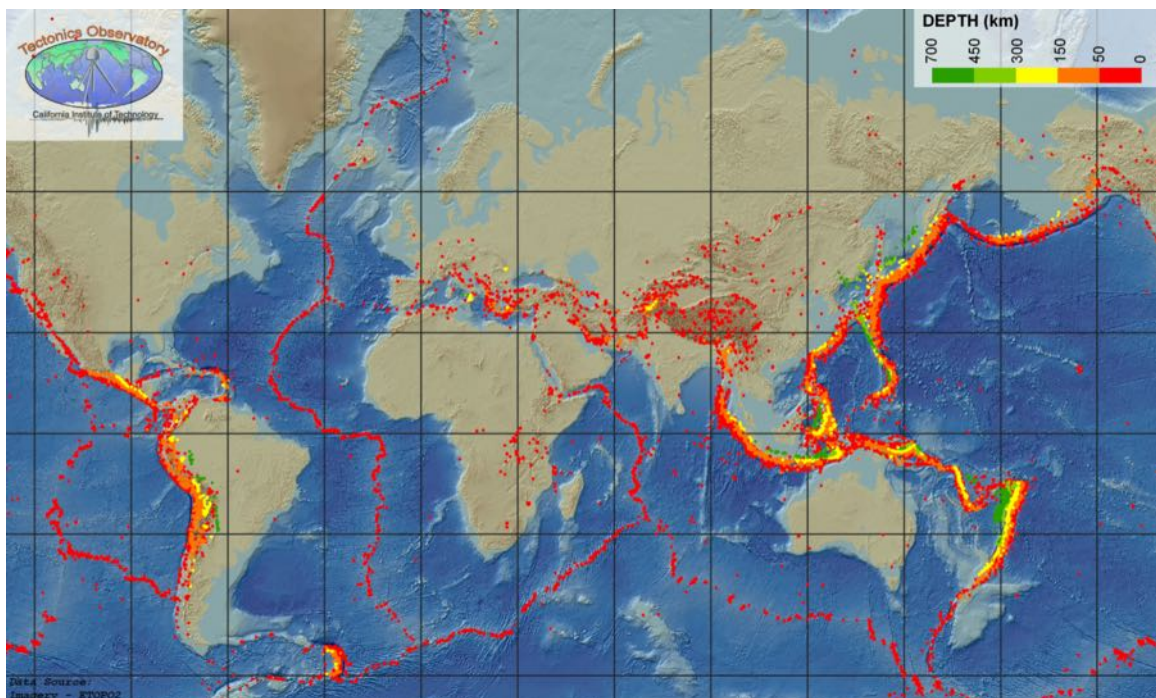


Ilustración 2. Epicentros de los principales sismos registrados entre los años 2000 y 2008 (Fuente: Observatorio Tectónico del Instituto Tecnológico de California).

Dependiendo de la dirección de movimiento de las placas, existen tres tipos de bordes de placa: bordes divergentes, bordes convergentes y bordes transformantes. En la costa pacífica de Sudamérica, existe un borde convergente que produce la subducción de la placa Nazca debajo de la placa sudamericana, lo cual da origen a la gran cantidad de sismos de diferente magnitud e intensidad de países como Colombia, Ecuador, Perú y Chile (Yepes, et al., 2016).

2.2. Sismicidad en el Ecuador

La actividad sísmica del Ecuador tiene dos principales orígenes: la subducción de la Placa de Nazca debajo de la Placa sudamericana, y de tipo cortical. En esta zona existe un fuerte rozamiento que ocasiona una gran acumulación de energía elástica, que, al ser liberada mediante una rotura abrupta, propaga las ondas sísmicas que dan origen a los terremotos que afectan al Ecuador. El proceso de acumulación y liberación de energía se repite a lo largo del tiempo e históricamente debido a su gran magnitud han ocasionado grandes daños como los casos de los terremotos de 1906, 1942, 1958, 1987, 1998 y 2016. En la Ilustración 3 se muestran las principales fallas que producen sismos en el Ecuador, también se muestra el esquema del terremoto de Pedernales, el cual se originó por la subducción de la placa Nazca con respecto a la Sudamericana, la cual tiene un movimiento relativo de 58 mm/año (IG-EPN, 2020).

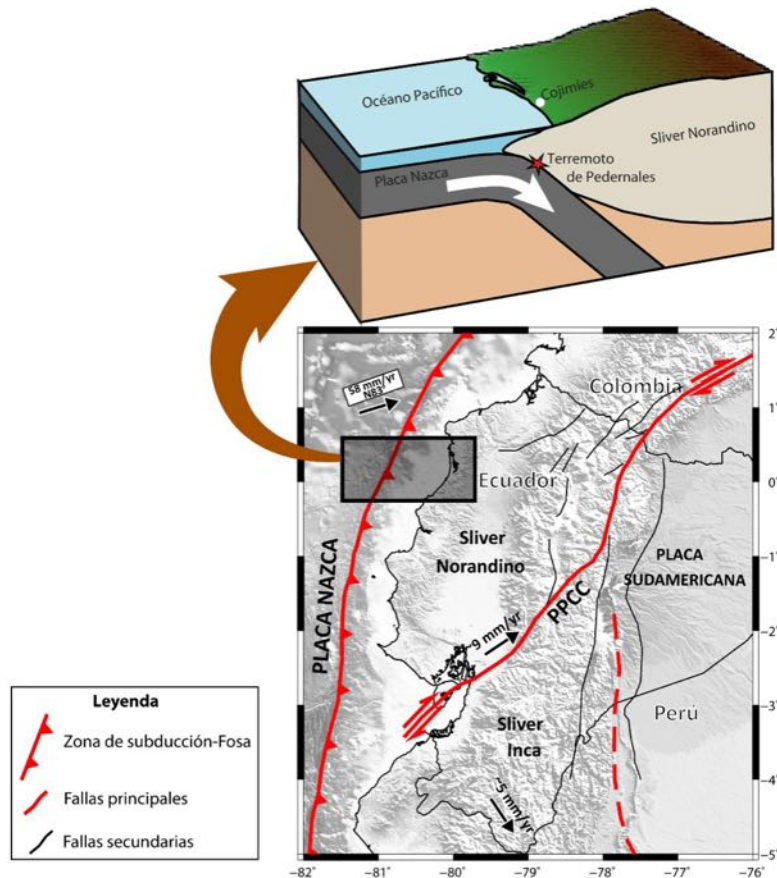


Ilustración 3. Contexto Sísmico del Ecuador y esquema del Terremoto de Pedernales (Fuente: IG-EPN).

2.3. Registros acelerográficos

Para propósitos de la ingeniería, la variación en el tiempo de la aceleración del terreno es la forma más útil de definir el movimiento del terreno durante un sismo. La aceleración del terreno aparece en la ecuación diferencial que rige la respuesta de un sistema ante la excitación sísmica. Así, para una aceleración del terreno dada, el problema a resolver se define por completo para un sistema

de 1 grado de libertad (1GDL) con propiedades conocidas de masa, rigidez y amortiguamiento. El instrumento básico para registrar las componentes tridimensionales del movimiento del terreno durante un sismo es el acelerógrafo de movimiento fuerte, que se activa con la llegada de las primeras ondas del sismo. El instrumento básico para registrar las componentes tridimensionales del movimiento del terreno durante un sismo es el acelerógrafo de movimiento fuerte, que se activa con la llegada de las primeras ondas del sismo (Chopra, 2017).

En Ecuador, el monitoreo de la actividad sísmica está a cargo del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional que a través de la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC) tiene repartidos una serie de acelerógrafos en las principales ciudades del Ecuador (Singaicho, Laurendeau, Viracucha, & Ruiz, 2016).

2.4. Terremoto del 16 de abril de 2016

El sábado 16 de abril del 2016 a las 6:47 PM (GMT -5), se registró un sismo de 4.8 en la escala de Magnitud de Momento ($M_w=4.8$) en Cojimíes (Manabí), este movimiento sísmico fue el preludio de un terremoto de magnitud 7.8 con epicentro en la ciudad de Pedernales, que sacudió fuertemente al litoral ecuatoriano 11 minutos después. Este sismo afectó seriamente a varias localidades del Ecuador, especialmente a las provincias de Manabí y Esmeraldas. En este evento sísmico, la rotura se generó a 20 km de profundidad, extendiéndose 110 km a lo largo de las costas de Esmeraldas de Manabí. Luego del evento, se registraron más de 3000 réplicas (IG-EPN, 2020).

En los días posteriores a la catástrofe que significó este terremoto, el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, luego de procesar los datos, dio a conocer los registros acelerográficos de 29 estaciones que estuvieron operativas durante el evento. Siendo la provincia de Manabí la más afectada, donde el registro más cercano al epicentro (APED, Pedernales) presentó una aceleración máxima de 1.06g (Singaicho, Laurendeau, Viracucha, & Ruiz, 2016).

En la Ilustración 4 se muestra el mapa de intensidades ocasionadas por el terremoto de Pedernales (2016), se pueden observar los registros acelerográficos para diversas localidades que fueron captados por los acelerógrafos de la RENAC, lo cual brinda una idea del efecto ocasionado en cada ciudad durante este evento sísmico.

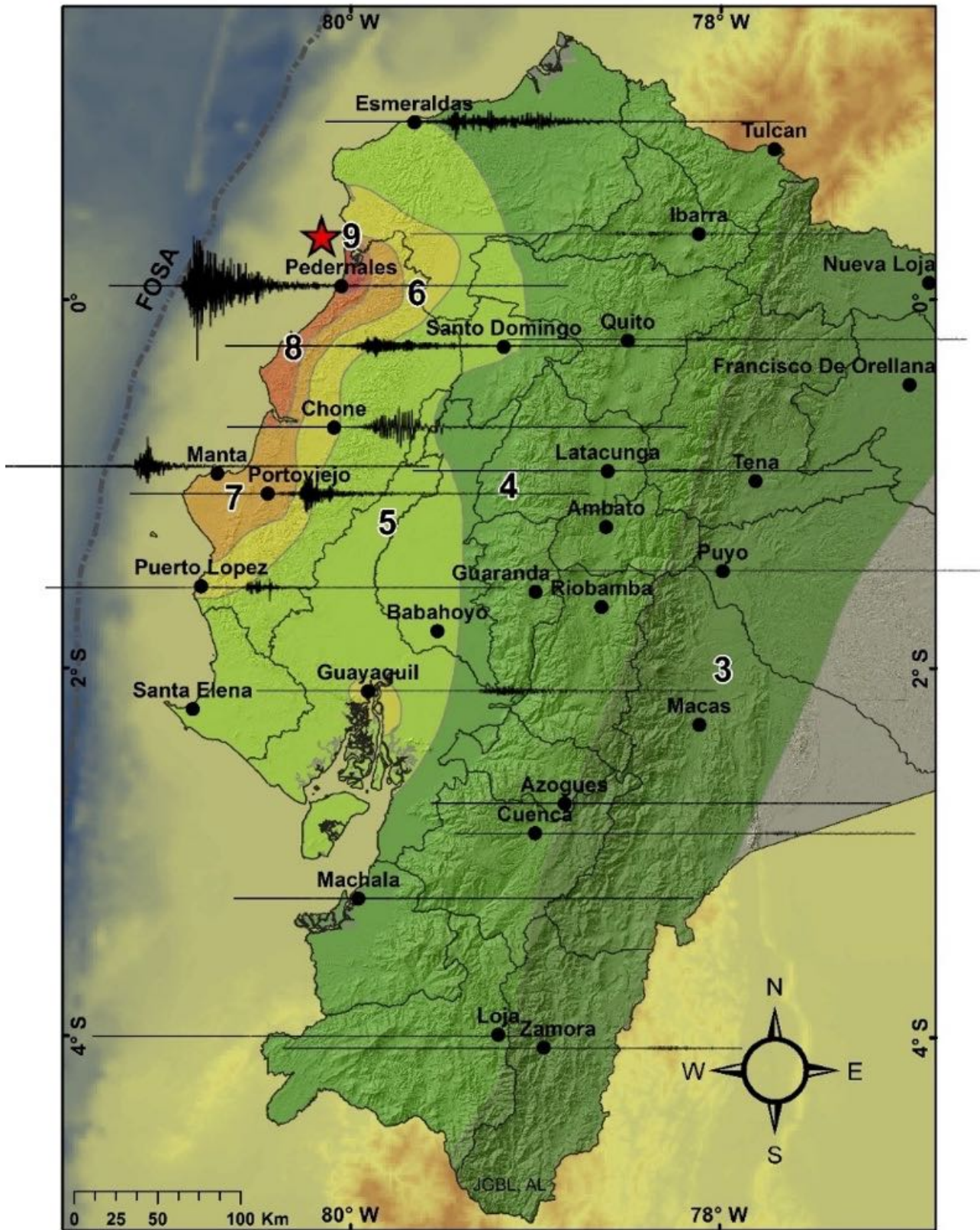


Ilustración 4. Registros acelerográficos del terremoto del 16 de abril de 2016 (Fuente: IG-EPN).

El terremoto del 16 de abril y sus réplicas ocasionaron cientos de fatalidades, además, decenas de miles de personas que se quedaron sin hogar. El impacto económico estimado del terremoto fue de alrededor de 354 millones de dólares, según cifras oficiales (Instituto Nacional de Estadística y Censos INEC, 2017). Los daños en la infraestructura fueron especialmente notables, habiendo severos daños en edificaciones, puentes e incluso en carreteras, especialmente en la Provincia de Manabí. También se presentaron casos de inestabilidad en taludes, cuyo colapso, al formar éstos parte de obras de infraestructura como puentes o terraplenes de carretera, dejó incomunicados muchos ejes viales durante semanas, como es el caso mostrado en la Ilustración 5, donde se observa un tramo de carretera colapsado en Chacras, Manabí.



Ilustración 5. Terraplén de carretera en Manabí colapsado debido al Terremoto del 16 de abril de 2016 (Fuente: Diario La República).

2.5. Estabilidad de taludes

Se puede definir un talud como una superficie de suelo (o roca) expuesto que se sitúa en un ángulo con respecto a la horizontal, la pendiente puede ser natural o conformada, y si esta es lo suficientemente pronunciada, ocurrirá una falla en la pendiente, es decir, la fuerza motriz supera la resistencia del suelo al corte a lo largo de la superficie de rotura compleja (Das, 2013).

Al ser parte, en muchos casos, de diferentes proyectos de infraestructura, se requiere que los ingenieros comprueben la estabilidad de los taludes implicados, lo que implica la determinación y comparación del corte desarrollado a lo largo de la superficie de falla más probable respecto a la resistencia al corte del suelo, dicho esquema de falla se muestra en la Ilustración 6. El cálculo de estabilidad

conlleva una serie de variables como la estratificación, filtraciones, selección parámetros de resistencia al corte, y selección de superficie de deslizamiento que lo vuelven una tarea compleja (Das, 2013).

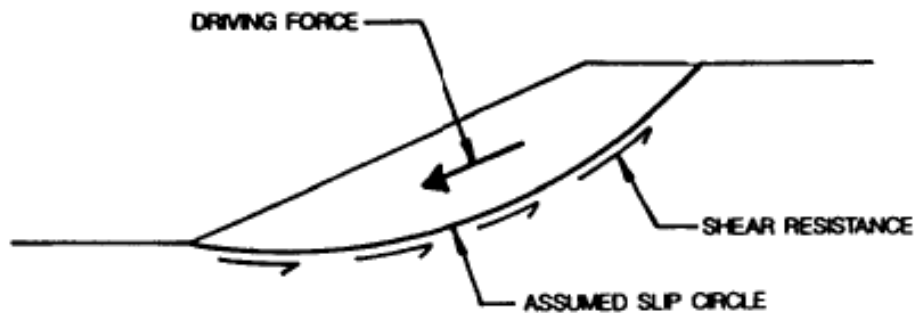


Ilustración 6. Esquema de falla de un talud (Abramson, 2002).

El cálculo de estabilidad de taludes es un problema estáticamente indeterminado, por lo que para su resolución se han desarrollado diversos enfoques para resolver este planteamiento, hoy en día los métodos más utilizados siguen siendo los basados en el Método de Equilibrio Límite (LEM, Limit Equilibrium Method), los cuales en su mayoría están basados en la técnica de las dovelas, las cuales pueden ser verticales, horizontales o inclinadas. Existen diversos métodos de equilibrio límite como: Fellenius (1927), Bishop (1950), Morgenstern-Price (1965), Spencer (1967), y Janbu (1973), entre sus principales características se encuentran (Cheng & Lau, 2014):

- a) El cuerpo deslizante sobre la superficie de falla se divide en un número finito de dovelas o rebanadas, las cuales usualmente están orientadas verticalmente.
- b) La resistencia al corte de la superficie de falla se moviliza al mismo ritmo en todos los puntos de la potencial superficie de falla, llevando el bloque que se desliza a un estado límite.
- c) Se emplean supuestos sobre las fuerzas entre dovelas para que el problema se convierta en determinado.
- d) El factor de seguridad es calculado a partir de ecuaciones de equilibrio límite.

Una desventaja del método de Equilibrio Límite es que no provee información acerca de los esfuerzos y deformaciones que ocurren en el talud. En un talud natural, es posible que grandes esfuerzos residuales se desarrollen a diversos puntos del bloque de falla mientras se alcanza la resistencia cortante última en la superficie de deslizamiento, el empleo de otros métodos, como el de Elementos Finitos (FEM, Finite Element Method) permite evaluar el comportamiento progresivo de falla, incluso la condición posterior a la falla, lo cual no es posible con los métodos clásicos (Cheng & Lau, 2014).

2.6. Estabilidad de Taludes ante cargas sísmicas

El colapso de taludes es uno de los daños colaterales más impactantes causados por terremotos, durante un sismo la aceleración del terreno es capaz de inducir grandes fuerzas desestabilizadoras de naturaleza cíclica en taludes, simultáneamente, la resistencia al corte del suelo puede reducirse debido a cargas transitorias y al exceso de presión de poros. El efecto combinado de cargas sísmicas y el cambio en la resistencia al corte resulta en una reducción general de la estabilidad del talud. En general, se han propuesto varios métodos para evaluar la estabilidad de taludes ante cargas sísmicas (Houston et al., 1987), los más utilizados, en orden de complejidad, son los siguientes:

- a. Método Pseudoestático
- b. Método de desplazamientos de Newmark
- c. Análisis Dinámico por Elementos Finitos

Debido a su fácil implementación, los métodos pseudoestático y de Newmark son los más utilizados en la práctica. Debe resaltarse que ambos métodos son adecuados cuando se puede asumir que la resistencia al corte es constante durante el evento sísmico. El Método de Elementos Finitos es complejo y requiere varios ensayos para identificar los parámetros a utilizar en el modelo constitutivo, sin embargo, el mayor desarrollo computacional está volviendo más accesible su implementación (Abramson, 2002).

Es importante acotar que, para tornar el análisis indeterminado en determinado, los métodos convencionales de equilibrio límite generalmente hacen suposiciones sobre las fuerzas entre dovelas, presumiendo que el factor de seguridad es el mismo a lo largo de toda la superficie de falla al considerarse el bloque deslizante rígido. Estas suposiciones no parecen razonables debido a que los esfuerzos reales actuando a lo largo de la superficie de deslizamiento son aproximados, y a que la localización de la superficie crítica de deslizamiento depende de la forma asumida por el analista, además, en los casos observados en la realidad, el suelo a lo largo de la superficie no falla simultáneamente (Jia, 2017).

Otra consideración importante para tener en cuenta en los métodos de equilibrio límite, es que cuando se tiene presencia de suelo cohesivo duro en la corona del talud y de suelo granular denso en el fondo, se puede producir superficies de deslizamientos casi verticales. En estos casos se recomienda modelar grietas en tensión en la parte superior del talud para nivelar el ángulo de salida en el extremo inferior de la superficie de deslizamiento, esto es algo que es comúnmente ignorado debido a la falta de entendimiento acerca de las limitaciones de los métodos de estabilidad de taludes, los cuales pueden resultar en factores de seguridad engañosos (Jia, 2017).

2.6.1. Análisis Pseudoestático

El Análisis pseudoestático consiste en añadir una fuerza horizontal que representa un sismo al análisis tradicional de Equilibrio Límite (LEM), dicho esquema se muestra en la Ilustración 7, donde F_h representa la acción sísmica horizontal. El bloque deslizante (área encerrada entre la cara del talud y la superficie de falla) es dividido en una serie de dovelas para el correspondiente análisis. La carga sísmica, simplificada como una fuerza estática horizontal aplicada al bloque deslizante (normalmente se suele ignorar la carga vertical), normalmente está representada por coeficientes sísmicos que están en el rango de 0.05g a 0.5g, dependiendo de los códigos de diseño (Jia, 2017).

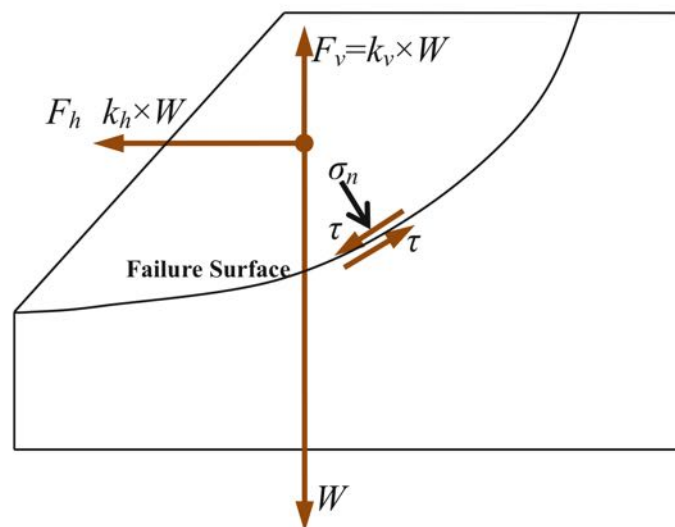


Ilustración 7. Esquema del Análisis Pseudoestático (Jia, 2017).

Debido a que los taludes de suelo no son rígidos, la aceleración pico generada durante un sismo es de corta duración, y a que el movimiento sísmico se asume permanente y unidireccional, los coeficientes sísmicos usados en la práctica generalmente corresponden a valores de aceleración debajo de los anticipados.

Normalmente se toma el centro de gravedad de la potencial superficie de deslizamiento como el punto donde se aplican las fuerzas equivalentes, sin embargo, esta suposición es válida solamente si las aceleraciones son constantes en todo el bloque de suelo, lo cual en la mayoría de los casos, no es cierto (la aceleración pico suele incrementarse por efecto del suelo desde el fondo hasta la cresta del talud, por tanto, la localización correcta estaría encima del centro de gravedad), sin embargo, esta suposición es relativamente conservadora para la mayoría de los casos (Jia, 2017).

Según Kramer (1996), el método deja de ser conservador cuando hay una reducción de más del 15% en la resistencia cortante dinámica, lo cual ha sido corroborado en algunos casos de estudio en presas, donde a pesar de que el

factor de seguridad en el análisis pseudoestático parece ser seguro, existieron indicios de inestabilidad debido a sismos previos.

Las fuerzas inerciales que representan los efectos sísmicos, F_H y F_V , pueden ser descritas como:

$$F_h = \frac{a_h \cdot W}{g} = k_h \cdot W$$

Ecuación 1

$$F_v = \frac{a_v \cdot W}{g} = k_v \cdot W$$

Ecuación 2

Donde a_h y a_v son las aceleraciones pseudoestáticas, k_h y k_v son coeficientes sísmicos adimensionales y W es el peso del bloque que se desliza. Las magnitudes de las aceleraciones pseudoestáticas son seleccionadas en función de los movimientos sísmicos esperados, el factor de seguridad se calcula como:

$$FS = \frac{\text{Fuerzas Resistentes}}{\text{Fuerzas Desestabilizadoras}} = \frac{c \cdot l_{ab} \cdot [(W - F_v) \cdot \cos \beta - F_h \cdot \sin \beta] \cdot \tan \phi}{(W - F_v) \cdot \sin \beta + F_h \cdot \cos \beta}$$

Ecuación 3

Entre las limitantes de este método está que no es muy preciso cuando existen grandes presiones de poros o cuando la degradación de la resistencia al corte por efecto del movimiento sísmico es mayor al 15%. Análisis forenses realizados por Seed (1979) han demostrado la no fiabilidad de este método bajo estas condiciones. Si bien el empleo de este método es atractivo por su sencillez, el desarrollo de métodos más realistas como los basados en deformaciones permanentes, han comenzado a desplazar a este método (Kramer, 1996).

2.6.2. Análisis Dinámico por medio de Elementos finitos

El Método de Elementos Finitos permite predecir la magnitud y patrón de esfuerzos, deformaciones, y presión de poros en taludes. Mediante el uso de este análisis se puede considerar el comportamiento no lineal del suelo, complejas condiciones de borde, geometrías irregulares, y una variedad de situaciones constructivas. Sin embargo, todas las ventajas asociadas al uso de esta técnica se ven contrastadas por el tiempo que toma formular el problema, la caracterización de las características del material, interpretación de resultados y el requerimiento de mayores recursos computacionales. La precisión de este método depende fundamentalmente de que el modelo utilizado represente lo mejor posible el comportamiento real del suelo. Entre las ventajas que se tiene

al utilizar este método en análisis de estabilidad de taludes, se tiene (Kramer, 1996):

- Permite calcular esfuerzos, deformaciones, y presión de poros en taludes en cualquier instante de tiempo.
- Permite analizar las diversas etapas de un proyecto, incluyendo etapas posteriores a la construcción, como la consolidación del suelo y la visualización de cómo se disipa el exceso de presión de poros.
- Se puede utilizar para estimar la probabilidad de agrietamiento, fracturas hidráulicas, fallas locales y estabilidad general del talud.

El análisis de estabilidad por elementos finitos requiere la definición de condiciones iniciales, comportamiento esfuerzo deformación, secuencia de carga, etc. Para el caso de taludes naturales, es necesario especificar el estado de esfuerzos inicial previo a la carga, esto debido a que es un método incremental (Duncan, 1996).

Con el objeto de explotar todas las capacidades del Método de Elementos Finitos, diversas empresas han desarrollado numerosos programas informáticos, como GEO5 MEF, Midas GTS NX, o PLAXIS®, los cuales permiten resolver problemas geotécnicos a través del uso de este Método. Dichos programas permiten modelar masas de suelo bajo diversos parámetros, ejecutando poderosos modelos en cuestión de minutos (dependiendo de la capacidad del ordenador), algo impensable hasta hace unas cuantas décadas.

2.7. Software PLAXIS® 2D Connect Edition

PLAXIS® 2D es un software de Elementos Finitos desarrollado por Bentley Systems y la Universidad Tecnológica de Delft para el cálculo bidimensional de deformaciones, esfuerzos, y flujo subterráneo en masas de suelo.

El software consta de dos componentes que se presentan como dos programas independientes, pero que están relacionados: Input y Output. Como sus nombres indican, en el primero se ingresan los parámetros necesarios para proceder con el cálculo, mientras que en el Output se visualizan los resultados.

El componente Input de PLAXIS®, consta de cinco secciones: Soils, Structures, Mesh, Flow Conditions y Staged Construction. Las Unidades, dimensiones del espacio de trabajo, tipo de Modelo (Plane Strain/Axisymmetric) y tipo de elementos finitos (6/15 nodos) son definidos en la ventana de Propiedades de Proyecto.

Los materiales se pueden crear y asignar a las regiones del suelo utilizando las opciones de Material (Material Set Options), ahí se pueden definir parámetros del suelo, tipo de drenaje, modelo constitutivo, filtración y condiciones de flujo

subterráneo. En la sección de malla, la geometría se divide en elementos finitos (formando una malla) con el tamaño deseado, el nivel freático se puede agregar a la sección de condiciones de flujo. Finalmente, se crean etapas de cálculo (Construction Stages) de acuerdo con el propósito del análisis (Bentley Systems, Incorporated, 2021).

2.8. Tipos de Cálculo

PLAXIS® ofrece cuatro tipos de cálculo que pueden ser implementadas en las fases de cálculo (Construction Stages):

- Plastic Calculation: Se selecciona para realizar un análisis elastoplástico en el que no es necesario tener en cuenta la reducción del exceso de la presión de poros con el tiempo. Aunque se puede especificar un intervalo de tiempo, un cálculo plástico no tiene en cuenta los efectos del tiempo, excepto cuando se utiliza el Modelo "Soft Soil Creep Model". Para suelos arcillosos saturados se puede utilizar un cálculo plástico para un comportamiento sin drenaje. La consolidación no es considerada.
- Consolidation Analysis: Se selecciona cuando es necesario analizar la disipación del exceso de la presión de poros en suelos arcillosos saturados en función del tiempo. PLAXIS® permite análisis de consolidación elastoplástico. En general, se realiza un análisis de consolidación sin cargas adicionales después de un cálculo de plástico no drenado. Aunque también es posible aplicar cargas durante un análisis de consolidación.
- Dynamic Analysis: Se recomienda para infraestructuras donde un colapso debido a eventos sísmicos conlleva un alto nivel de riesgo, este análisis implica la estimación de deformaciones debido a la acción de cargas dinámicas en el tiempo.
- ϕ -c Reduction: También denominado Análisis por Factor de Seguridad, se obtiene reduciendo los parámetros de resistencia del suelo, cohesión y ángulo de fricción para el modelo de Mohr-Coulomb. Se puede realizar después de cada fase de cálculo individual y, por tanto, para cada etapa de construcción. Se debe tener en cuenta que una fase de reducción ϕ -c no se puede utilizar como condición inicial para otra fase de cálculo porque termina en un estado de falla.

Para un análisis de estabilidad de taludes mediante un análisis tiempo-historia, es necesario el empleo de un Cálculo Dinámico, el cual permite ingresar un registro sísmico de aceleraciones y evaluar la respuesta del talud durante todo el intervalo de tiempo de dicho registro.

2.9. Fundamento Teórico del Método de Elementos Finitos aplicado a casos dinámicos (Bentley Systems, Incorporated, 2021)

A continuación, se muestran los fundamentos teóricos del Método de Elementos Finitos (MEF) usados por el Programa PLAXIS®.

2.9.1. Ecuaciones básicas del comportamiento dinámico

La ecuación básica de movimiento (dependiente del tiempo) de un volumen bajo la influencia de una carga (dinámica) es:

$$\mathbf{M}\ddot{\underline{u}} + \mathbf{C}\dot{\underline{u}} + \mathbf{K}\underline{u} = \underline{F}$$

Ecuación 4

M es la matriz de masa, **u** es el vector de desplazamiento, **C** es la matriz de amortiguación, **K** es la matriz de rigidez y **F** es el vector de carga. El desplazamiento, velocidad y aceleración, pueden variar con el tiempo. En esta ecuación, **Ku=F** corresponde a la deformación estática, sin embargo, puede ser utilizada para análisis dinámicos.

La matriz **C** representa la amortiguación. La amortiguación de un material se produce por fricción o por deformaciones irreversibles (plasticidad o viscosidad). A mayor plasticidad, mayor disipación de energía. Para determinar la matriz de amortiguación, se requieren parámetros adicionales que son difíciles de determinar a partir de pruebas. En la formulación de Elementos Finitos, **C** a menudo se formula como una función de las matrices de masa y rigidez (amortiguamiento de Rayleigh) (Zienkiewicz y Taylor, 1991; Hughes, 1987), tal como se muestra en la Ecuación 5:

$$\mathbf{C} = \alpha_R \mathbf{M} + \beta_R \mathbf{K}$$

Ecuación 5

La limitante de la determinación de la matriz de amortiguamiento son los coeficientes de Rayleigh α_R y β_R . Cuando la contribución de **M** es dominante (por ejemplo, $\alpha_R = 0.01$ y $\beta_R = 0.001$) se amortiguan más vibraciones de baja frecuencia, y cuando la contribución de **K** es dominante (por ejemplo, $\alpha_R = 0.001$ y $\beta_R = 0.01$) se amortiguan más vibraciones de alta frecuencia.

El ajuste estándar de PLAXIS® es: $\alpha_R = \beta_R = 0$

2.9.2. Condiciones de borde

En el caso de un análisis estático, los desplazamientos prescritos se introducen en los bordes del modelo de elementos finitos. Estos pueden ser completamente libres o restringidos en una o dos direcciones. Particularmente, los bordes verticales de una malla son a menudo límites no físicos (sintéticos) que están lo suficientemente alejados para que no influyan en la deformación del modelo. Para el caso dinámico, los bordes deberían estar aún más alejados, con el objeto de evitar que las ondas de tensión se reflejen y provoquen distorsiones en los resultados. Sin embargo, esto requiere elementos adicionales y, por tanto, mayores recursos y tiempo de cálculo.

Para la implementación de efectos dinámicos en PLAXIS®, se utilizarán bordes absorbentes modelados mediante amortiguadores viscosos.

2.9.2.1. Bordes Viscosos

Los bordes viscosos son condiciones de frontera en las cuales se aplica un amortiguador en lugar de aplicar restricciones en una determinada dirección. Dicho amortiguamiento asegura que un incremento de esfuerzos en la frontera del modelo sea absorbido por el amortiguador, minimizando el rebote de ondas. La componente normal es absorbida de acuerdo con la Ecuación 6 y la componente de corte es absorbida de acuerdo con la Ecuación 7.

$$\sigma_n = -C_1 \cdot \rho \cdot V_p \cdot \dot{u}_x$$

Ecuación 6

$$\tau = -C_2 \cdot \rho \cdot V_s \cdot \dot{u}_y$$

Ecuación 7

Donde ρ es la densidad, V_p es la onda de presión (primaria) y V_s es la onda de corte (secundaria), \dot{u}_x y \dot{u}_y son las velocidades horizontal y vertical, respectivamente. C_1 y C_2 son coeficientes de relajación que controlan el efecto absorbente. Aunque no está del todo establecido un criterio preciso para determinar los valores de estos coeficientes, PLAXIS® sugiere el uso de $C_1=1$ y $C_2=0.25$. De todas formas, debido a que no es posible determinar con precisión el efecto de absorción de las ondas de corte, se recomienda ubicar los bordes laterales lo suficientemente alejados.

3. METODOLOGÍA

3.1. Descripción General

Como paso previo a la construcción de los modelos, será necesario profundizar acerca de lo que se espera encontrar, los objetivos se definen previamente para que la toma de decisiones a lo largo de la preparación del modelo ayude a garantizar predicciones suficientemente precisas, en el caso de la estabilidad de taludes, se espera obtener las deformaciones del suelo, por lo que se elegiría los modelos constitutivos que producen predicciones precisas de la deformación del suelo para las condiciones del sitio y las pruebas de parámetros se centrarían en obtener parámetros de rigidez para el suelo (Lees, 2016).

En términos generales, se divide el desarrollo del trabajo en tres etapas:

En la primera etapa, se obtendrán y se procesarán los registros acelerográficos obtenidos de las 29 estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos operativas durante el sismo del 16 abril de 2016 (Singaicho, 2016), las cuales se muestran en la Ilustración 8, dichos datos tienen un formato con una estructura y unidades propias del Instituto Geofísico, por lo que deben ser reestructurados conforme los requerimientos de PLAXIS®.

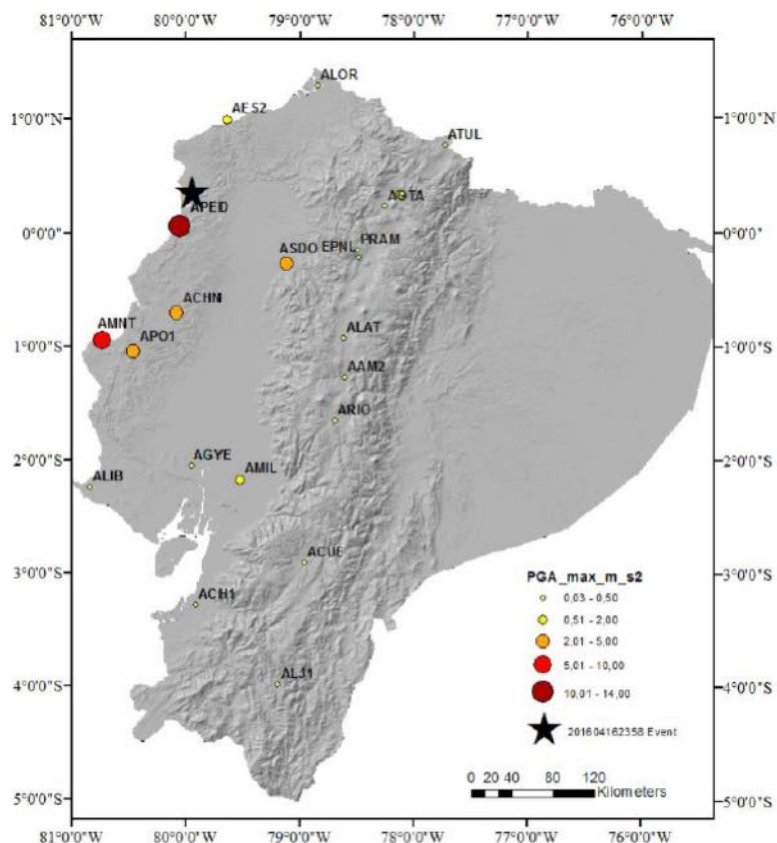


Ilustración 8. Mapa del Ecuador con las ubicaciones de los registros del Sismo del 16 de abril del 2016 (Fuente: Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional).

Luego se seleccionarán algunos de los registros característicos, tomando como referencia el mapa de peligro sísmico del Ecuador, el cual se muestra en la Ilustración 9.

En la segunda etapa, se seleccionarán los parámetros pseudoestáticos para cada una de las estaciones de la primera etapa, para lo cual se calculará el Peak Ground Acceleration (PGA) de cada registro, el cual provee el coeficiente sísmico de aceleración de cualquier punto del Ecuador, dicho coeficiente servirá para ingresar la fuerza estática equivalente en el talud.

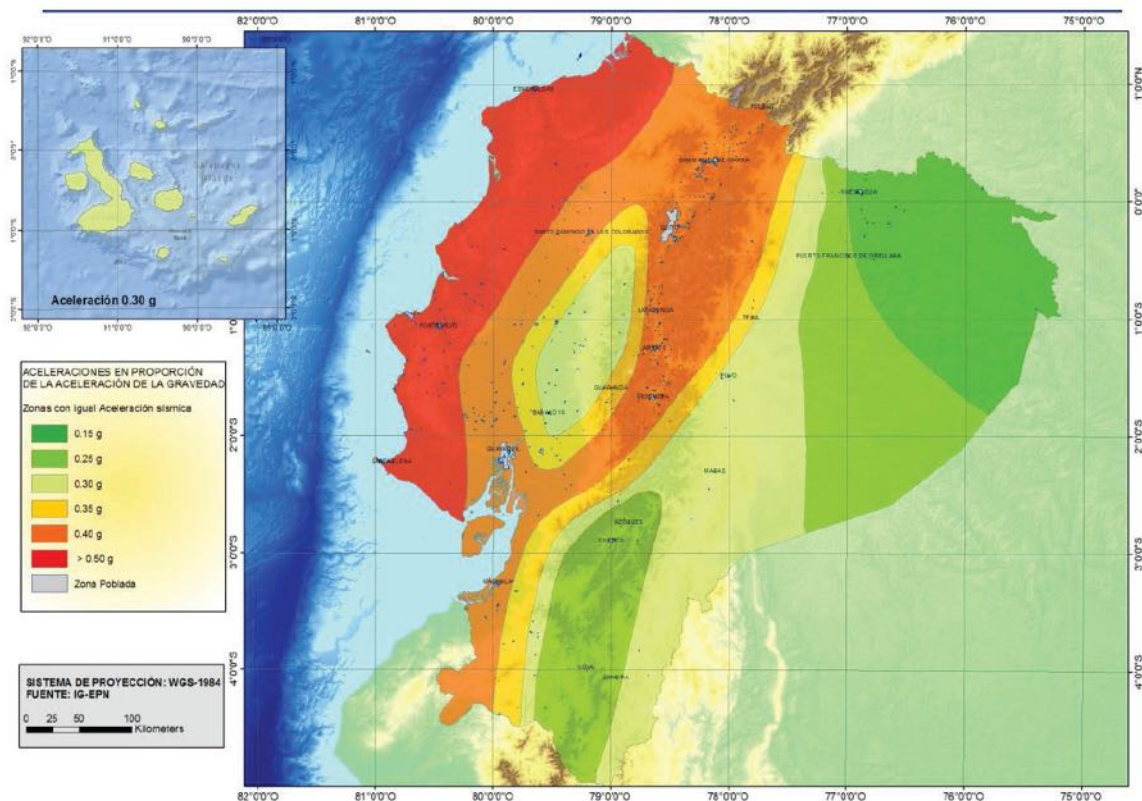


Ilustración 9. Mapa de Peligro Sísmico del Ecuador (Fuente: Norma Ecuatoriana de Construcción NEC-2015).

En la tercera etapa, con los parámetros dinámicos y pseudoestáticos ya definidos, se evaluará la estabilidad de los taludes de la Tabla 1. Se realizan dos modelaciones numéricas por cada uno de los taludes propuestos: La primera modelación se hará siguiendo el enfoque pseudoestático en el software Geostudio Slope/W®, y la segunda modelación seguirá el enfoque dinámico utilizando el Software PLAXIS®.

3.2. Parámetros de Cálculo

Se modelarán 9 taludes homogéneos con diferentes alturas, y ángulos de inclinación, adicionalmente, con el objetivo de evaluar la sensibilidad de los parámetros de geotécnicos, se proponen 3 tipos de suelo, dando como resultado 27 modelos.

3.2.1. Parámetros Geométricos

Las dimensiones geométricas utilizadas para modelar los taludes se muestran en la Tabla 1, se han propuesto una serie de taludes con diferentes alturas y diferentes pendientes, para el caso de los taludes de mayor altura, se han seleccionado ángulos con una inclinación menor, mientras que, conforme disminuye la altura, se prueban ángulos mayores.

Tabla 1. Parámetros Geométricos de taludes a analizar.

Talud	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Altura [m]	10	8	8	6	6	6	4	4	4
Ángulo [°]	30	30	45	30	45	60	30	45	60

3.2.2. Parámetros de suelo y Modelo Constitutivo

Con el objetivo de simplificar el desarrollo del trajo, se modelará el suelo como un material perfectamente elastoplástico, siguiendo el criterio de falla de Mohr-Coulomb; los parámetros de suelo se muestran en la Tabla 2, los cuales se tomaron del artículo *Stability analysis of soil slopes based on strain information* (Wang, Zhang, Gao, Liu, & Böhlke, 2020). Dichos parámetros tienen carácter netamente ilustrativo y no son representativos de algún tipo de suelo en específico.

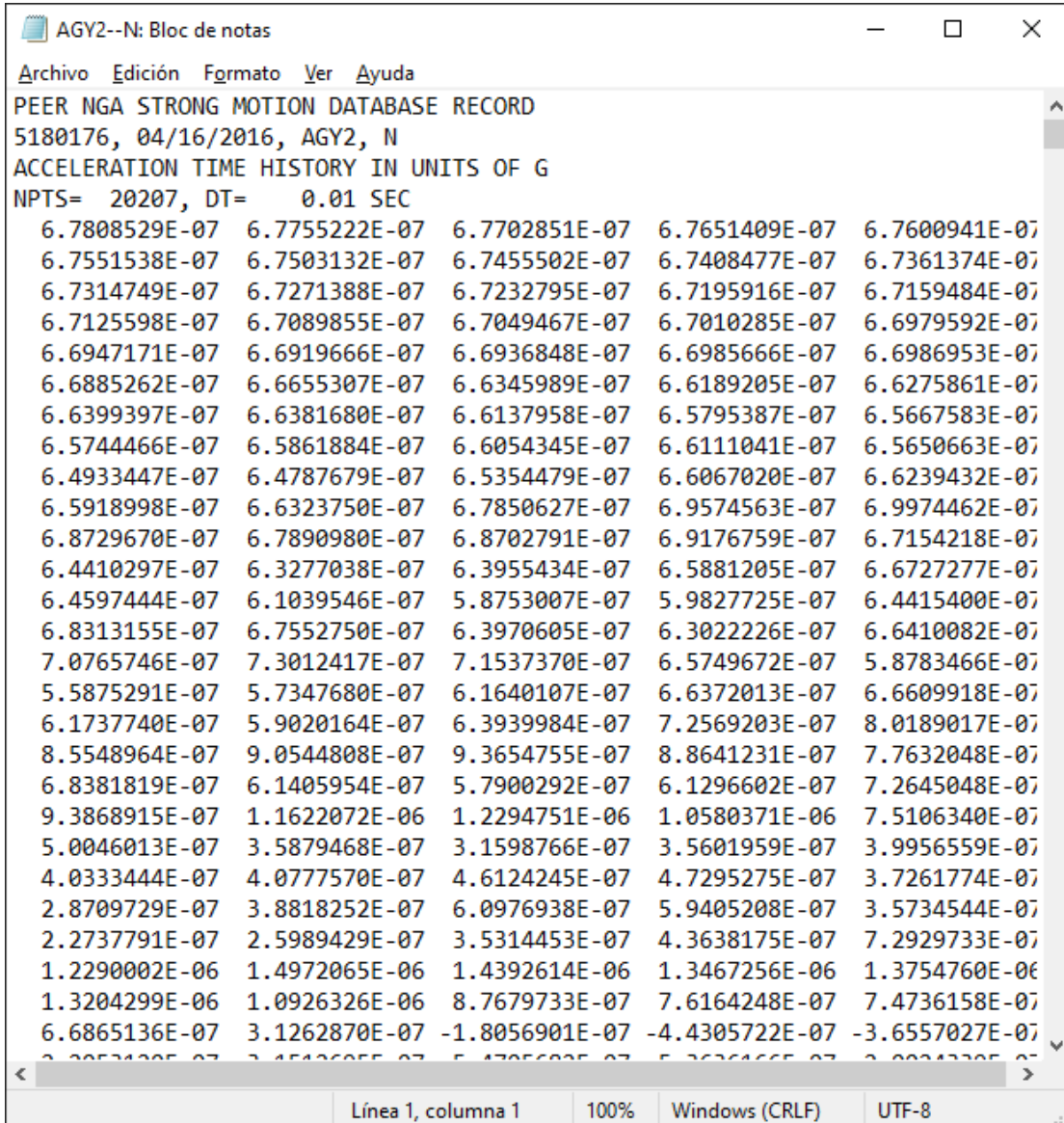
Tabla 2. Parámetros de resistencia utilizados en el Modelo

Tipo de Suelo	γ [kN-m ⁻³]	c [kPa]	ϕ	E [MPa]	ν
Suelo 1	20	12.5	25	100	0.333
Suelo 2	15	20	24	2	0.35
Suelo 3	20	11	28	15	0.25

3.3. Análisis Pseudoestático

3.3.1. Registros acelerográficos

Los registros sísmicos de aceleración del terremoto del 16 de abril de 2016 fueron proporcionados por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN) para su uso con propósitos académicos, investigativos y/o de mitigación de desastres. Los registros son proporcionados en formato .AT2, para cada componente ortogonal y además de los valores de aceleración en unidades de gravedad, se tiene información del intervalo de lectura y las características de la estación, tal como se muestra en la Ilustración 10.



```
AGY2--N: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
PEER NGA STRONG MOTION DATABASE RECORD
5180176, 04/16/2016, AGY2, N
ACCELERATION TIME HISTORY IN UNITS OF G
NPTS= 20207, DT= 0.01 SEC
6.7808529E-07 6.7755222E-07 6.7702851E-07 6.7651409E-07 6.7600941E-07
6.7551538E-07 6.7503132E-07 6.7455502E-07 6.7408477E-07 6.7361374E-07
6.7314749E-07 6.7271388E-07 6.7232795E-07 6.7195916E-07 6.7159484E-07
6.7125598E-07 6.7089855E-07 6.7049467E-07 6.7010285E-07 6.6979592E-07
6.6947171E-07 6.6919666E-07 6.6936848E-07 6.6985666E-07 6.6986953E-07
6.6885262E-07 6.6655307E-07 6.6345989E-07 6.6189205E-07 6.6275861E-07
6.6399397E-07 6.6381680E-07 6.6137958E-07 6.5795387E-07 6.5667583E-07
6.5744466E-07 6.5861884E-07 6.6054345E-07 6.6111041E-07 6.5650663E-07
6.4933447E-07 6.4787679E-07 6.5354479E-07 6.6067020E-07 6.6239432E-07
6.5918998E-07 6.6323750E-07 6.7850627E-07 6.9574563E-07 6.9974462E-07
6.8729670E-07 6.7890980E-07 6.8702791E-07 6.9176759E-07 6.7154218E-07
6.4410297E-07 6.3277038E-07 6.3955434E-07 6.5881205E-07 6.6727277E-07
6.4597444E-07 6.1039546E-07 5.8753007E-07 5.9827725E-07 6.4415400E-07
6.8313155E-07 6.7552750E-07 6.3970605E-07 6.3022226E-07 6.6410082E-07
7.0765746E-07 7.3012417E-07 7.1537370E-07 6.5749672E-07 5.8783466E-07
5.5875291E-07 5.7347680E-07 6.1640107E-07 6.6372013E-07 6.6609918E-07
6.1737740E-07 5.9020164E-07 6.3939984E-07 7.2569203E-07 8.0189017E-07
8.5548964E-07 9.0544808E-07 9.3654755E-07 8.8641231E-07 7.7632048E-07
6.8381819E-07 6.1405954E-07 5.7900292E-07 6.1296602E-07 7.2645048E-07
9.3868915E-07 1.1622072E-06 1.2294751E-06 1.0580371E-06 7.5106340E-07
5.0046013E-07 3.5879468E-07 3.1598766E-07 3.5601959E-07 3.9956559E-07
4.0333444E-07 4.0777570E-07 4.6124245E-07 4.7295275E-07 3.7261774E-07
2.8709729E-07 3.8818252E-07 6.0976938E-07 5.9405208E-07 3.5734544E-07
2.2737791E-07 2.5989429E-07 3.5314453E-07 4.3638175E-07 7.2929733E-07
1.2290002E-06 1.4972065E-06 1.4392614E-06 1.3467256E-06 1.3754760E-06
1.3204299E-06 1.0926326E-06 8.7679733E-07 7.6164248E-07 7.4736158E-07
6.6865136E-07 3.1262870E-07 -1.8056901E-07 -4.4305722E-07 -3.6557027E-07
3.0053430E-07 3.4543605E-07 5.4705600E-07 5.3034465E-07 3.0034330E-07
Línea 1, columna 1 100% Windows (CRLF) UTF-8
```

Ilustración 10. Ejemplo de registro acelerográfico (Fuente: IG-EPN).

Con el objetivo de minimizar el tiempo de cálculo, de los 58 registros acelerográficos obtenidos, se han escogido 7 registros de diferentes ciudades importantes del Ecuador, los cuales se han muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Registros acelerográficos seleccionados para el análisis (Fuente: IG-EPN).

No.	Ciudad	Estación	Distancia epicentral (Km)	Zona Sísmica (NEC-15)
1	Pedernales	APED-E	36	VI
2	Portoviejo	APO1-N	167	VI
3	Manta	AMNT-N	171	VI
4	Guayaquil	AGY2-N	286	V
5	Milagro	AMIL-E	288	IV
6	Cuenca	ACUE-E	381	II
7	Loja	ALJ1-N	492	II

Como se evidencia en la Ilustración 10, los datos están organizados en columnas, lo que dificulta su visualización y posterior ingreso en el software, por lo que se ha desarrollado un macro en Microsoft Excel que reordena los datos en una sola columna. Además, sabiendo el intervalo de lectura del acelerógrafo, se procede a graficar la aceleración versus el tiempo, lo que permite identificar visualmente el máximo valor de aceleración (Peak Ground Acceleration, PGA), obteniéndose los registros gráficos que se muestran a continuación:

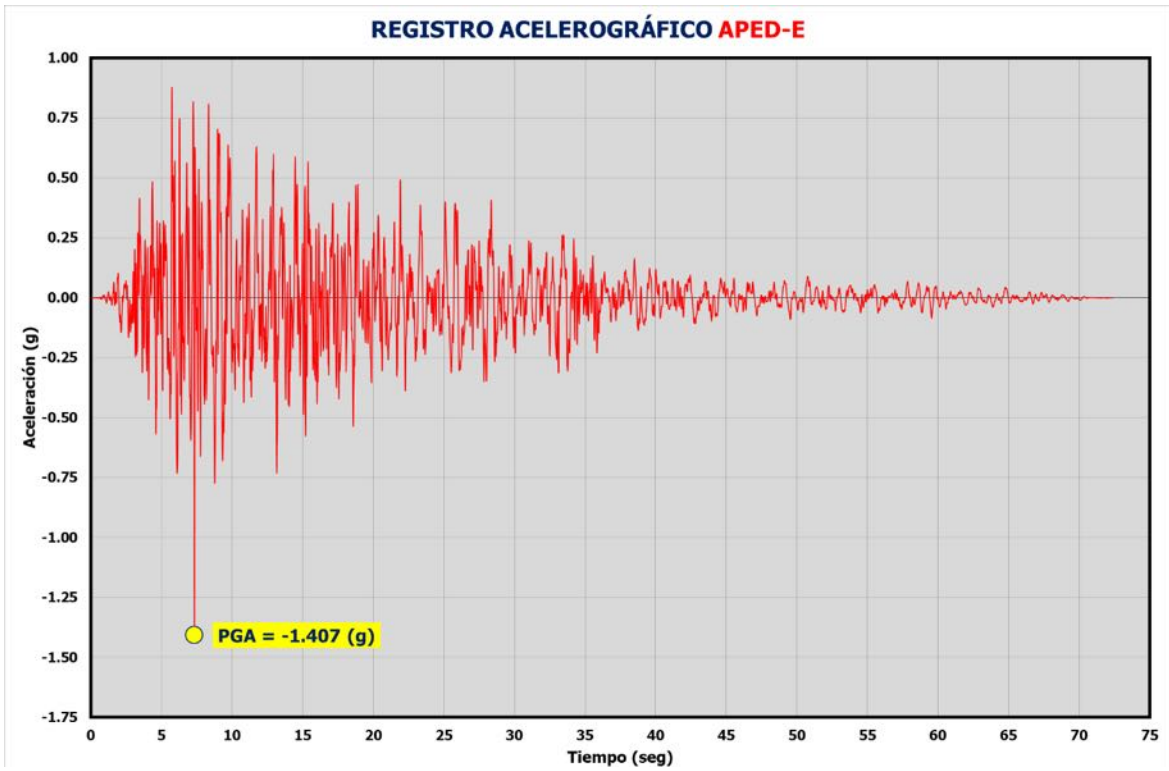


Ilustración 11. Registro acelerográfico APED-E.

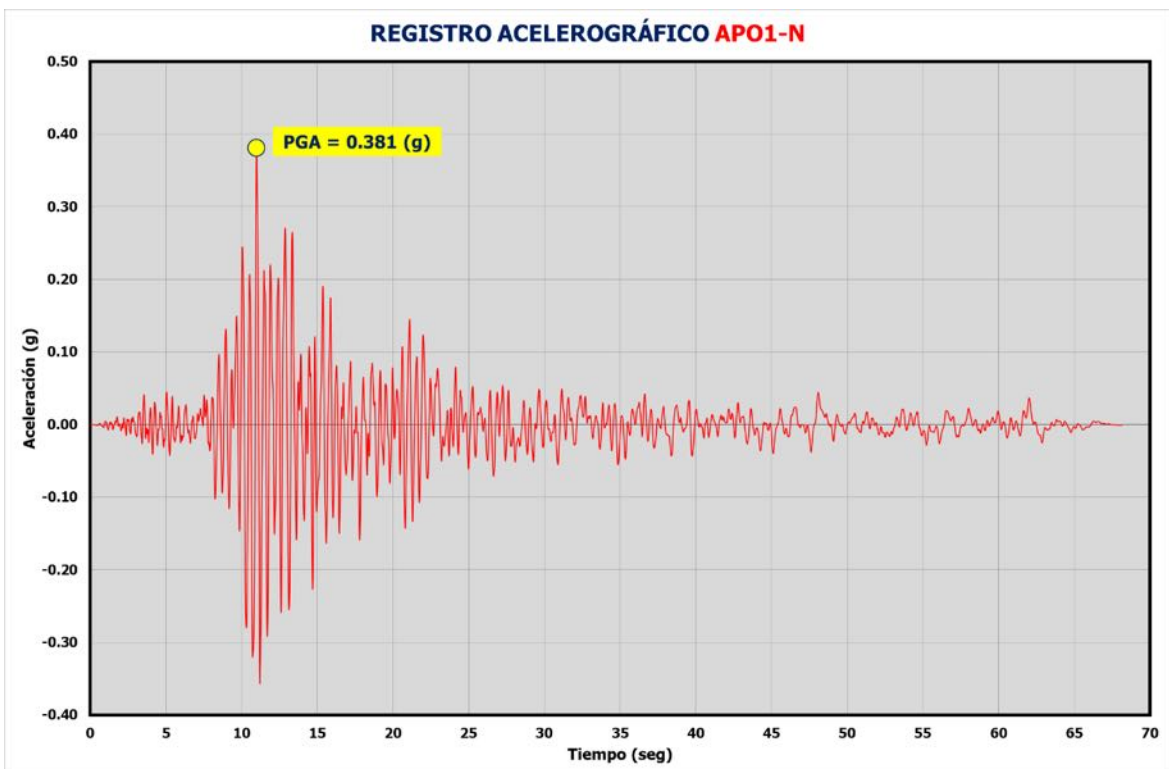


Ilustración 12. Registro acelerográfico APO1-N.



Ilustración 13. Registro acelerográfico AMNT-N.

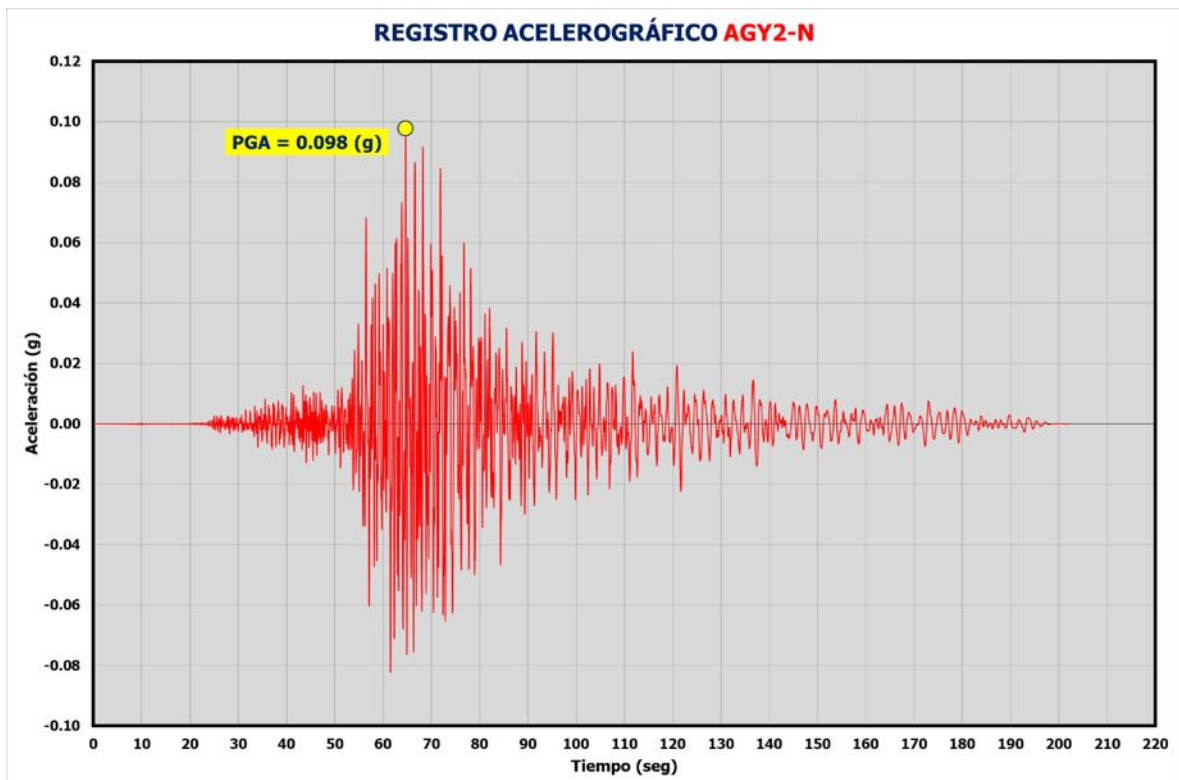


Ilustración 14. Registro acelerográfico AGY2-N.

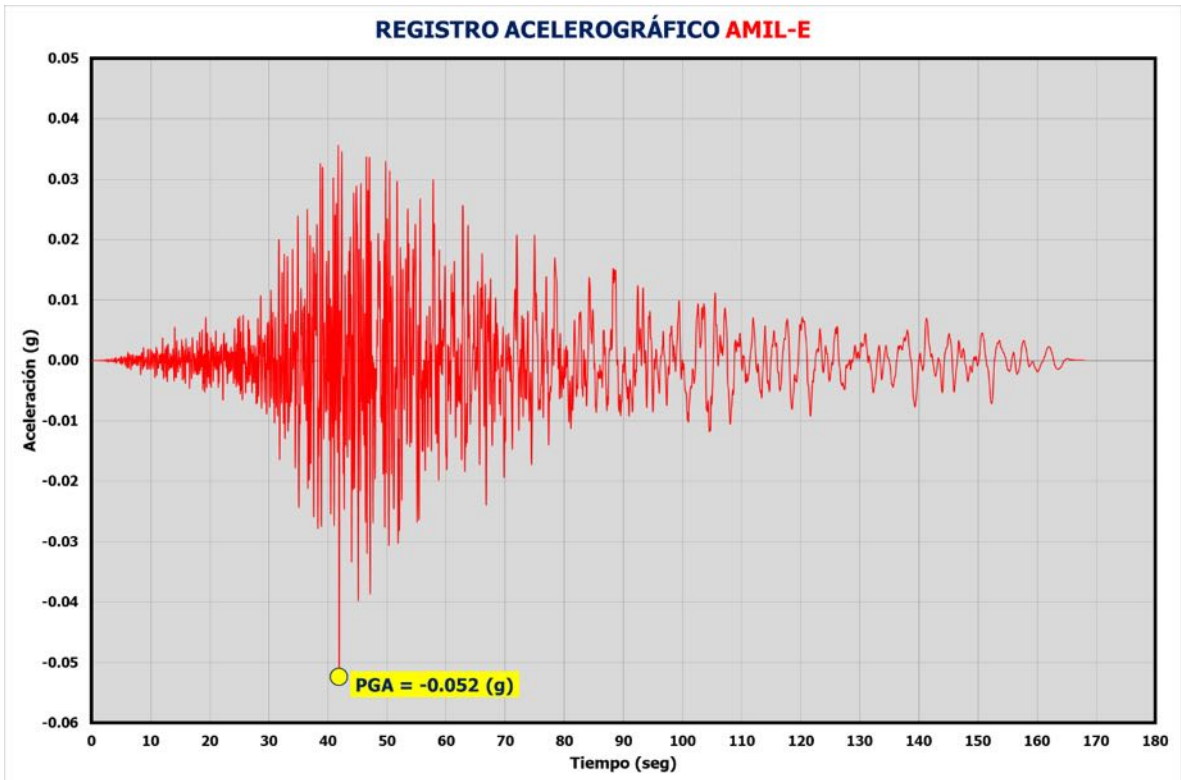


Ilustración 15. Registro acelerográfico AMIL-E.

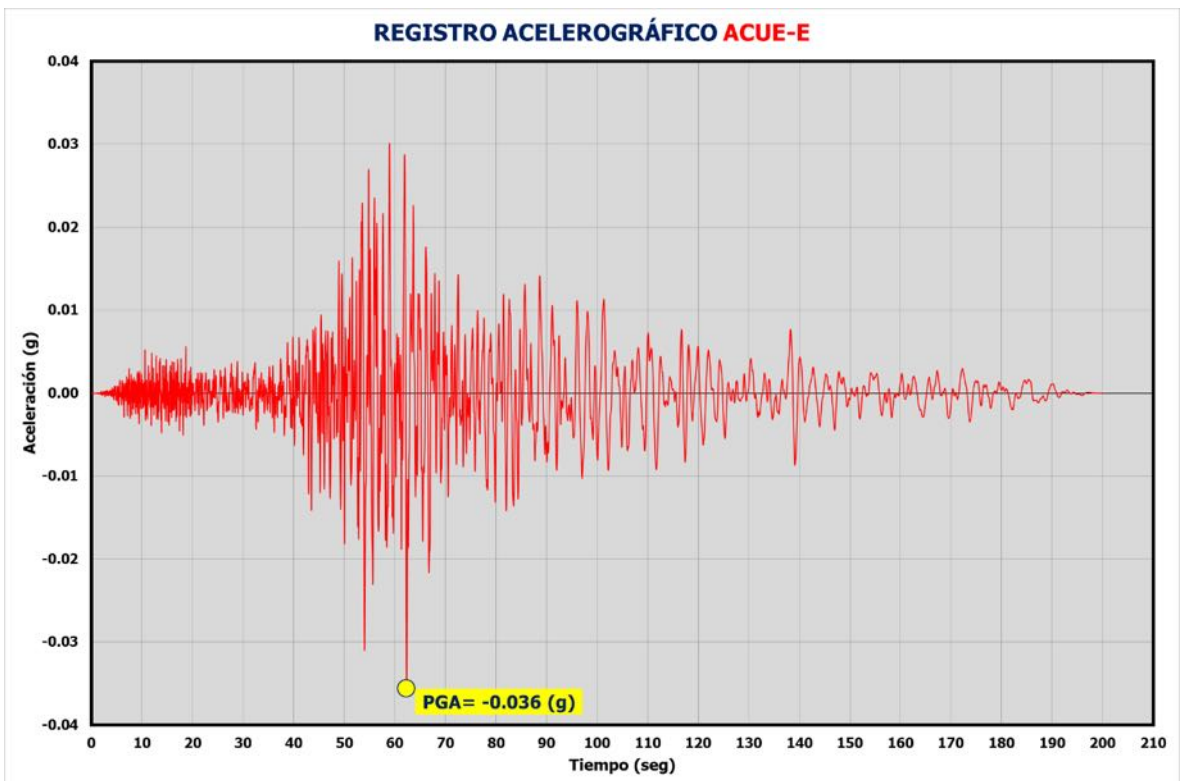


Ilustración 16. Registro acelerográfico ACUE-E.

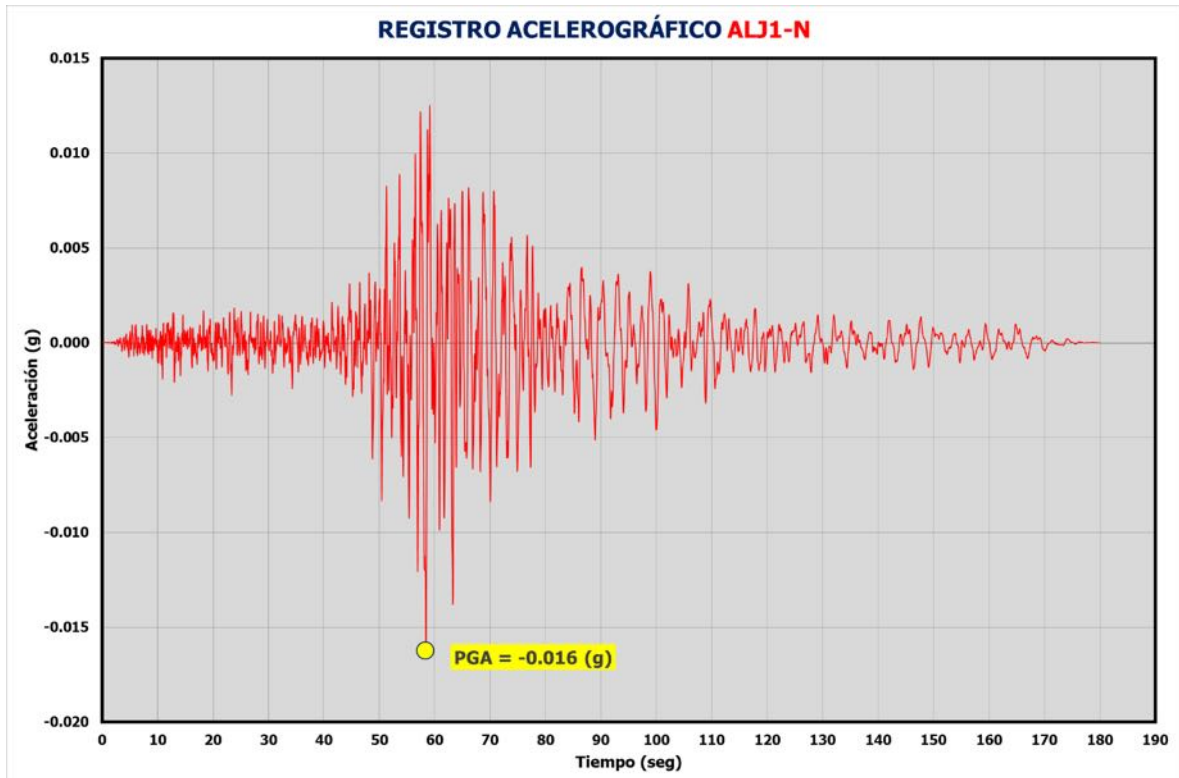


Ilustración 17. Registro acelerográfico ALJ1-N.

3.3.2. Coeficiente pseudoestático

Para el presente trabajo se ha considerado tomar el coeficiente pseudoestático (k_h), como el 60% del PGA, según la NEC, como se muestra en la Ecuación 8. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4.

$$k_h = 0.6(PGA)$$

Ecuación 8

Tabla 4. Valores de coeficientes pseudoestáticos obtenidos

No.	CIUDAD	ESTACIÓN	DISTANCIA EPICENTRAL (Km)	PGA (g)	k_h 0.6(PGA)
1	Pedernales	APED-E	36	1.407	0.84
2	Portoviejo	APO1-N	167	0.381	0.23
3	Manta	AMNT-N	171	0.525	0.32
4	Guayaquil	AGY2-N	286	0.098	0.06
5	Milagro	AMIL-E	288	0.052	0.03
6	Cuenca	ACUE-E	381	0.036	0.02
7	Loja	ALJ1-N	492	0.016	0.01

3.4. Análisis Dinámico

3.4.1. Parámetros generales

Los taludes se modelarán en PLAXIS® conforme a la configuración de un modelo de deformaciones planas (Plane Strain), el cual asume que el modelo es de longitud infinita en sentido normal a la sección plana de análisis, por definición, la deformación fuera del plano es cero. Los elementos se toman como elementos triangulares de 15 nodos, los cuales involucran una integración numérica de 12 puntos gaussianos, lo cual proporciona apropiados resultados de esfuerzos.

3.4.2. Parámetros de la malla

Con el objeto de evaluar los efectos sísmicos en el talud, se discretizará el modelo mediante la generación de una malla del tipo “fine”, reduciendo su tamaño aún más en las zonas circundantes al talud, las cuales son de interés en este estudio, tal como se muestra en la Ilustración 18.

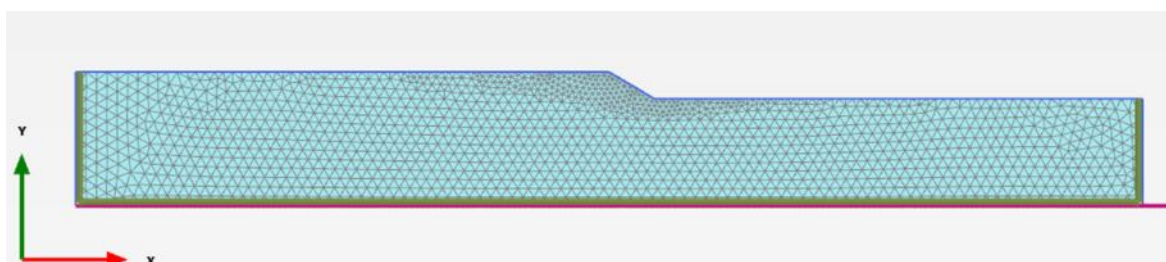


Ilustración 18. Discretización aplicada en PLAXIS.

3.4.3. Condiciones de borde

Los laterales del modelo constarán de amortiguadores viscosos con el objeto de caracterizar fronteras absorbentes que disipen las ondas de tensión y no las reflejen hacia el interior de la masa de suelo. Además, los bordes horizontales se ubicarán lo suficientemente lejos del talud con el objeto de reducir su influencia. Los coeficientes de relajación C_1 y C_2 , siguiendo la recomendación del Manual de PLAXIS®, se tomarán como 1 y 0.25, respectivamente.

En los modelos, el borde superior está totalmente libre, mientras que borde inferior se restringen los desplazamientos verticales, permitiendo solo el desplazamiento horizontal, de tal forma que los efectos de la carga sísmica puedan representarse adecuadamente.

3.4.4. Parámetros sísmicos

Para el análisis dinámico, la carga dinámica del sismo está representada por la aplicación de registros acelerográficos aplicados en la base, a través de la herramienta “Line Displacement” de PLAXIS®, tal como se muestra en Ilustración 19.

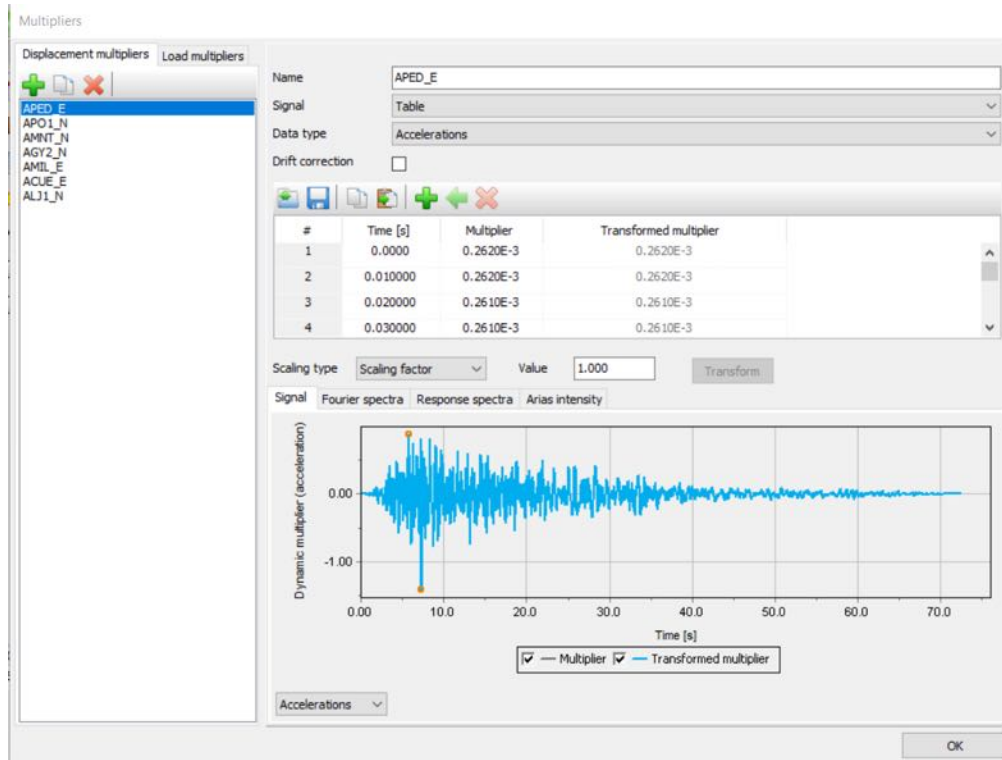


Ilustración 19. Registros acelerográficos del Terremoto del 16 de abril de 2016 importados en PLAXIS®.

Los registros acelerográficos provistos por el IG-EPN son de lecturas obtenidas a nivel de superficie, por lo que su magnitud se ve amplificada en mayor o menor medida de acuerdo con las características del suelo. El registro de aceleraciones a nivel de la superficie es mayor que el que se obtendría en profundidad, por lo que el procedimiento preciso sería el de realizar una deconvolución al registro de aceleraciones a nivel de suelo para llevarlo a nivel de roca. En todo caso, con el objetivo de simplificar el trabajo, se ha aplicado directamente en la base del modelo los registros a nivel superficial.

3.4.5. Etapas de cálculo y tipos de análisis

El flujo de trabajo en PLAXIS® contempla la definición de fases, la cuales son de gran utilidad para analizar las etapas constructivas que se tienen en el desarrollo de un proyecto de infraestructura. Puesto que el alcance de este trabajo contempla, exclusivamente, el análisis de estabilidad de taludes, se han definido

solo 2 fases: la primera se trata de la fase inicial, donde actúa exclusivamente la carga por gravedad y están activados solo los parámetros de suelo, en la segunda fase se activa la carga sísmica y se realiza el análisis dinámico. Cabe acotar que, en el caso de analizar un talud excavado o en el caso de analizar el reforzamiento de un talud, habría que definir fases adicionales.

Siendo el comportamiento dinámico del talud de especial interés en este trabajo, el tipo de análisis seleccionado en la Etapa 2 es el de "Dynamic", el cual es adecuado para evaluar la respuesta del talud ante la acción del registro acelerográfico de entrada. En esta fase, también se consideran las condiciones de borde propuestas en el punto 3.4.3, finalmente, en la opción Dynamic Time Interval, se toma la duración total de cada registro (Ilustración 20).

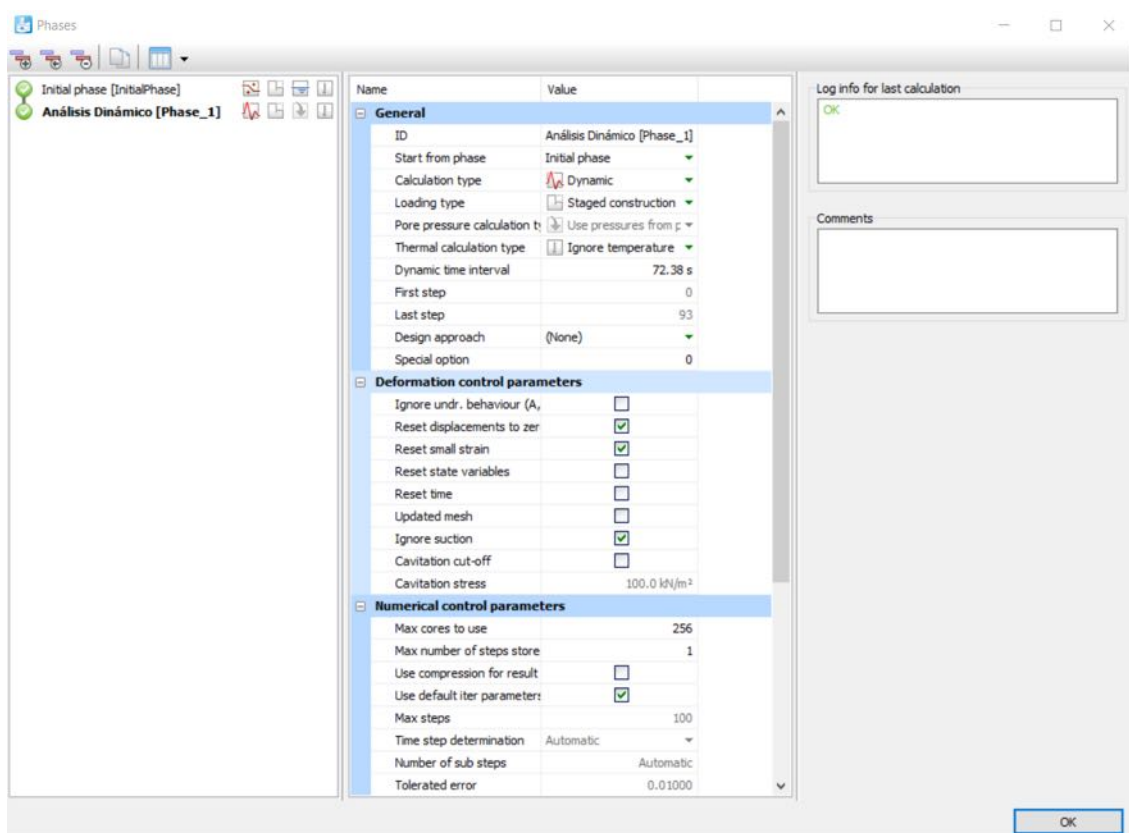


Ilustración 20. Parámetros implementados para el Análisis Dinámico en PLAXIS.

4. RESULTADOS

4.1. Análisis Pseudoestático

Para los análisis pseudoestáticos se utilizó el Software Geostudio Slope/W, a pesar de que el software permite realizar el análisis de estabilidad por varios métodos, se seleccionó el Método de Equilibrio Límite de Bishop debido a su sencillez y resultados confiables. Adicionalmente, con el objeto de simplificar los cálculos, se asume que el agua no incidirá en los cálculos, por tanto, no se ha considerado el nivel freático. Para incluir el efecto de la carga sísmica en el análisis de estabilidad, se han utilizado los valores de coeficiente k_h obtenidos en la Tabla 4.

Debido a los parámetros geométricos y de resistencia propuestos, en total se han modelado 189 taludes. Para cada uno de ellos, el software calcula una serie de superficies de falla, aquella con el menor factor de seguridad, se considera la superficie de falla crítica, un ejemplo se muestra en la Ilustración 21, donde se observa la potencial superficie de falla para el talud No. 1 ($H=10$ m, $\text{Ángulo}=30^\circ$, Suelo Tipo 1, y $k_h=0.84$), el Factor de Seguridad (FS) para este caso es de 0.471, lo cual significa que, bajo estas condiciones, el talud ha fallado.

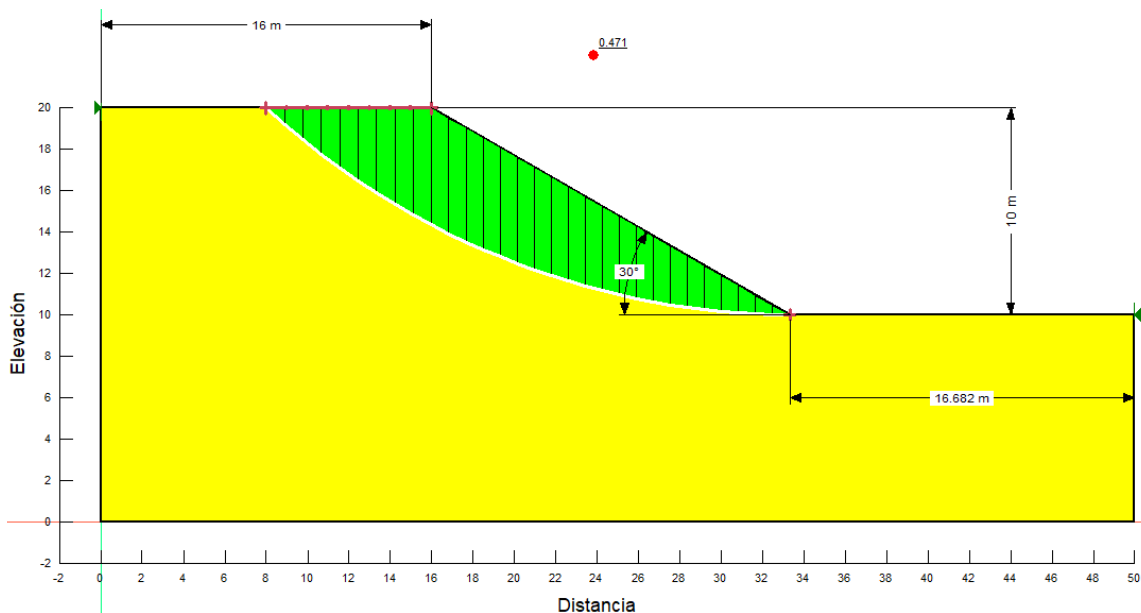


Ilustración 21. Superficie de falla obtenida para el Talud #1 (Geostudio Slope/W)

Para una mejor visualización de los resultados, estos se muestran en 9 grupos de tablas en función de las geometrías de taludes propuestas, éstas además están acompañadas de una gráfica que muestra la variación del Factor de Seguridad (FS) en función del Coeficiente Pseudoestático (k_h) para los 3 tipos

de suelos propuestos en la Tabla 2, adicionalmente, se señalan en rojo los taludes con Factor de Seguridad menor a 1.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, que muestra los resultados obtenidos para el grupo de taludes con Altura=10 m y pendiente=30°, se distinguen en color azul (Suelo Tipo 1), verde (Suelo Tipo 2) y naranja (Suelo Tipo 3) los tipos de suelo ingresados en cada modelo y los factores de seguridad obtenidos. La Ilustración 22 muestra gráficamente cómo varía el FS con respecto al valor del coeficiente k_h , se observan valores máximos (1.556, 2.078 y 1.630, según cada tipo de suelo) para el menor valor de k_h ingresado (Loja, $k_h=0.01$), en contraste, los valores mínimos (0.471, 0.664 y 0.487) se obtienen con el mayor valor de k_h (Pedernales, $k_h=0.01$).

Similar comportamiento en el resto de grupo de taludes, en general, y como cabría esperar, se observa una relación inversamente proporcional entre el Factor de seguridad y el PGA, mientras mayor es el PGA, menor es el Factor de Seguridad y viceversa. Esta correlación se da en todos los grupos de taludes sin distinción de su geometría. De igual forma, el factor de seguridad tiende a disminuir conforme incrementa la altura y el ángulo de inclinación del talud, teniendo ligeramente mayor incidencia el ángulo de inclinación.

Adicionalmente, y siguiendo la lógica, los menores valores de FS se dan con las geometrías más desfavorables (mayor pendiente, mayor altura), el caso más crítico es el del grupo de modelos con H= 6 m y pendiente de 60° (Ilustración 27), en contraste, se obtienen los mayores valores de FS con la geometría más favorable (H=4m y pendiente=30°, Ilustración 28).

En todos los grupos de taludes modelados, el tipo de suelo con el que se obtienen mayores factores de seguridad es Suelo Tipo 2 ($\gamma=15 \text{ kN/m}^3$, $c=20 \text{ kPa}$, $\phi=24^\circ$, $E=2 \text{ MPa}$, $\nu=0.35$), cabe destacar que debido a la naturaleza del análisis y al modelo constitutivo, en el Software Geostudio Slope/W solo se ingresaron los parámetros del peso específico, cohesión y ángulo de fricción. Los resultados obtenidos para el factor de seguridad con este tipo de suelo son considerablemente mayores a los obtenidos con los otros dos tipos de suelo, entre los cuales no se tienen grandes diferencias. El factor que más destaca en la selección de parámetros propuestos para el Suelo tipo 2, es el de la cohesión, por lo que se puede inferir que, además del ángulo de fricción, el factor de seguridad es especialmente sensible a esta propiedad. No se encontró que el peso específico ejerza especial influencia en los resultados, al menos para el rango de valores utilizados.

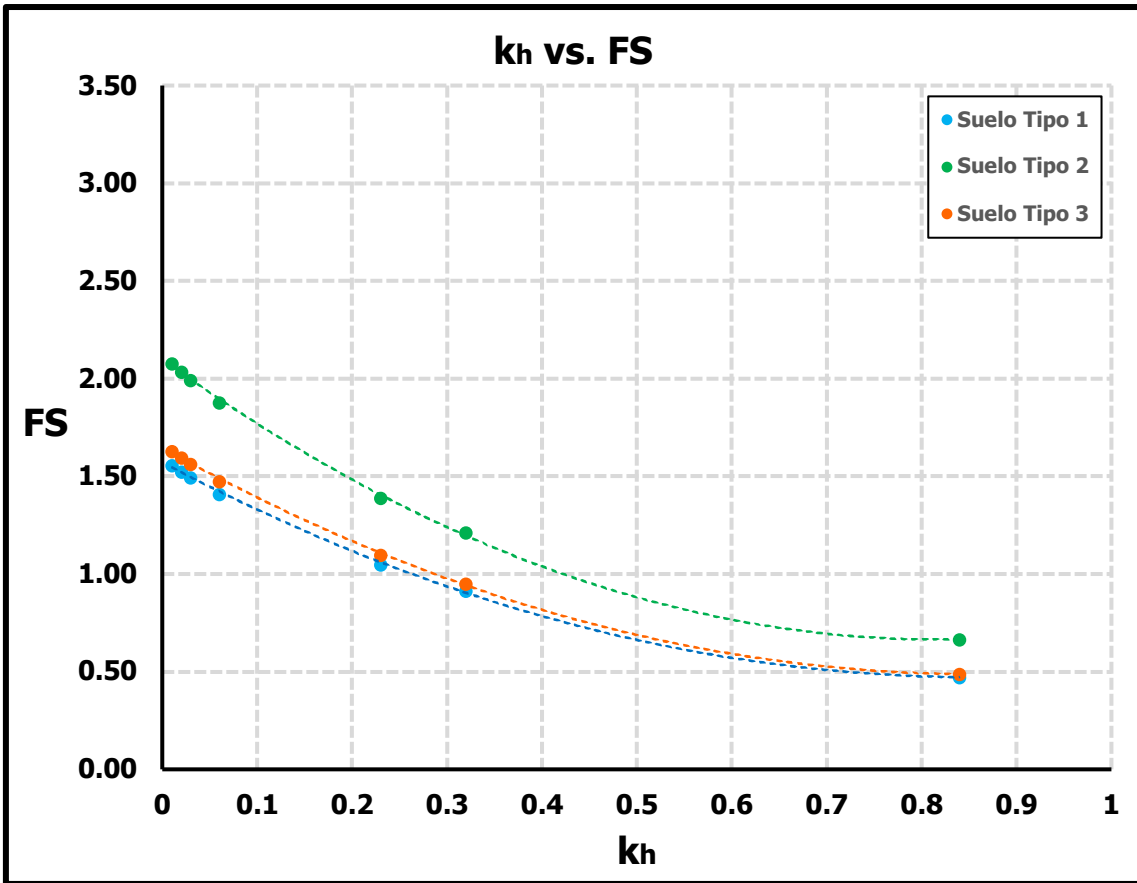


Ilustración 22. Resultados obtenidos para el talud de Altura=10m y pendiente=30°.

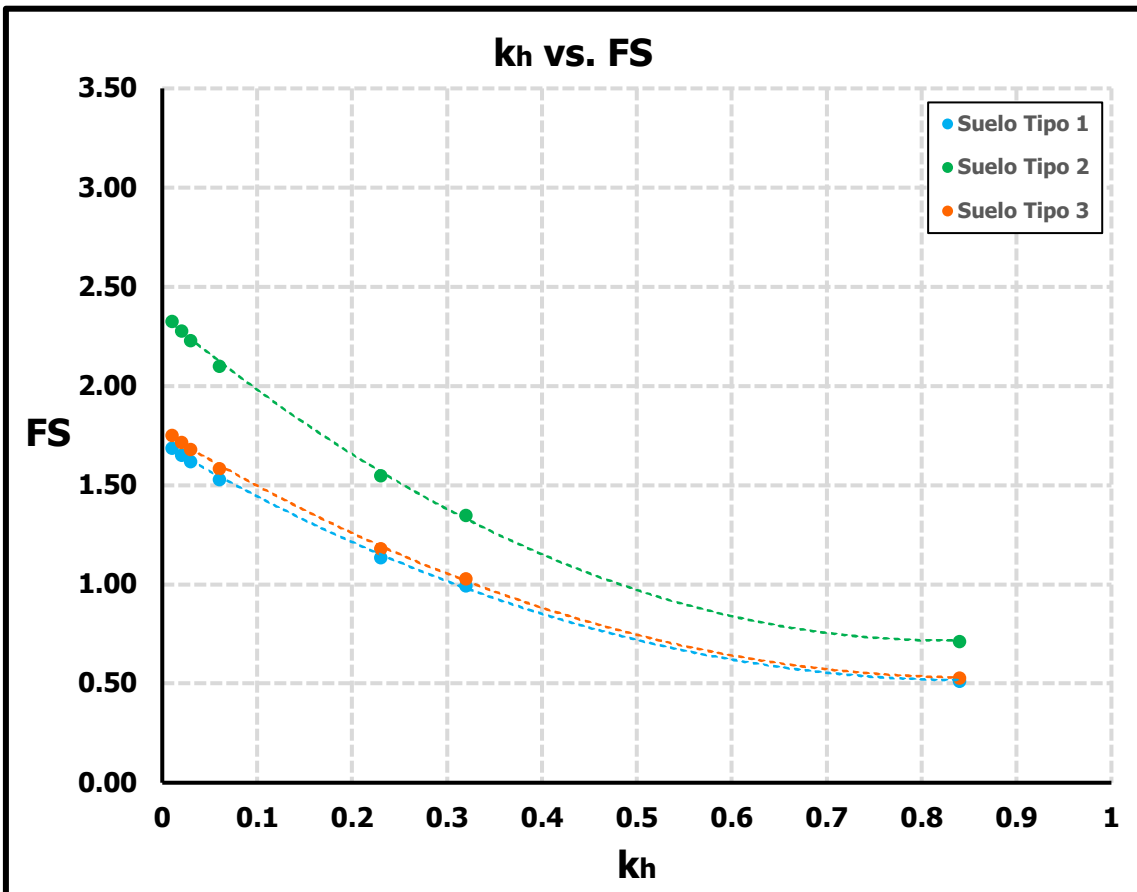


Ilustración 23. Resultados obtenidos para el talud de Altura=8m y pendiente=30°.

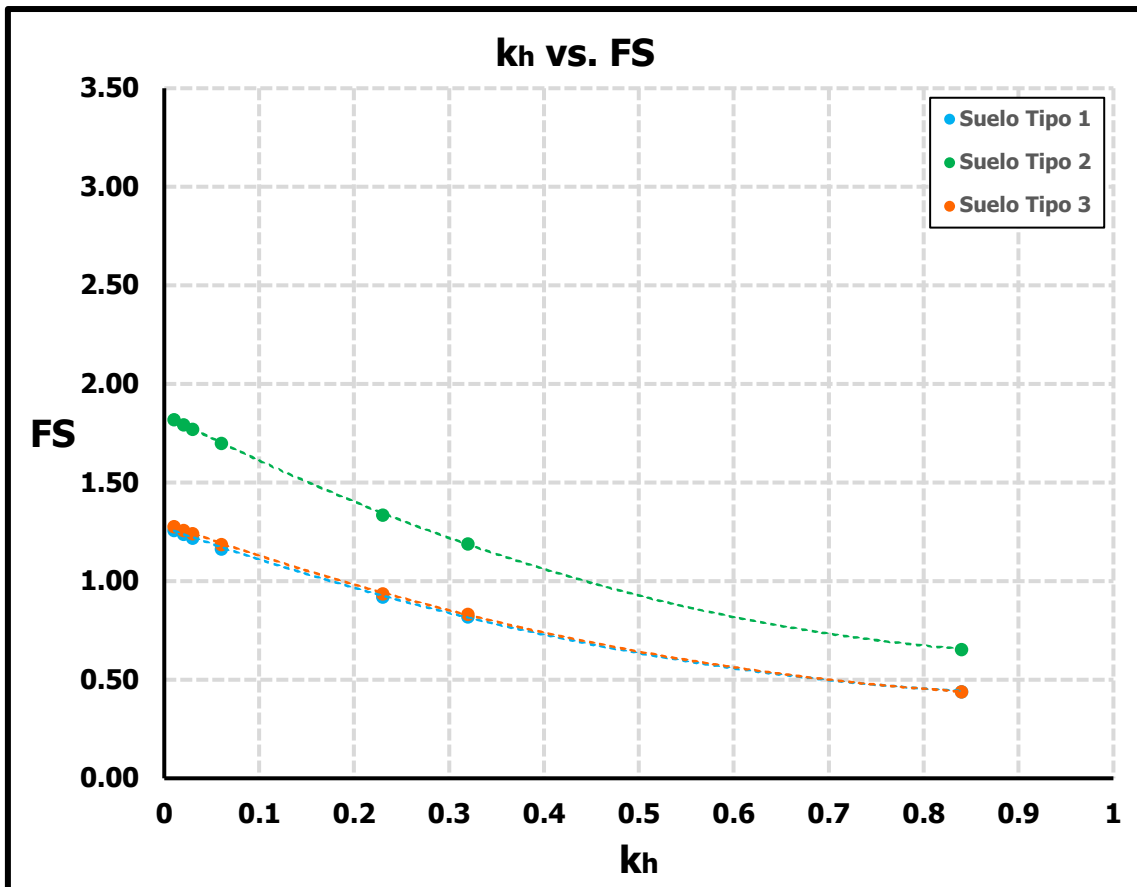


Ilustración 24. Resultados obtenidos para el talud de Altura=8m y pendiente=45°.

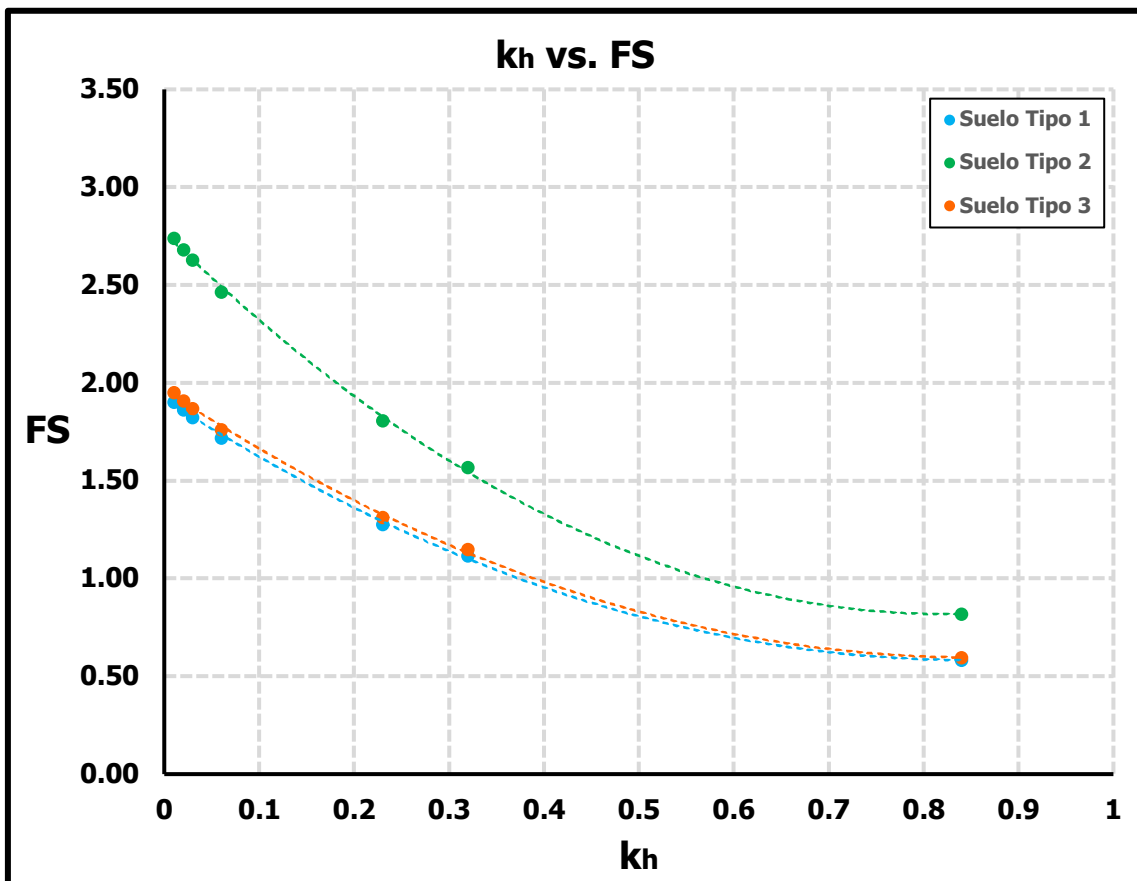


Ilustración 25. Resultados obtenidos para el talud de Altura=6m y pendiente=30°.

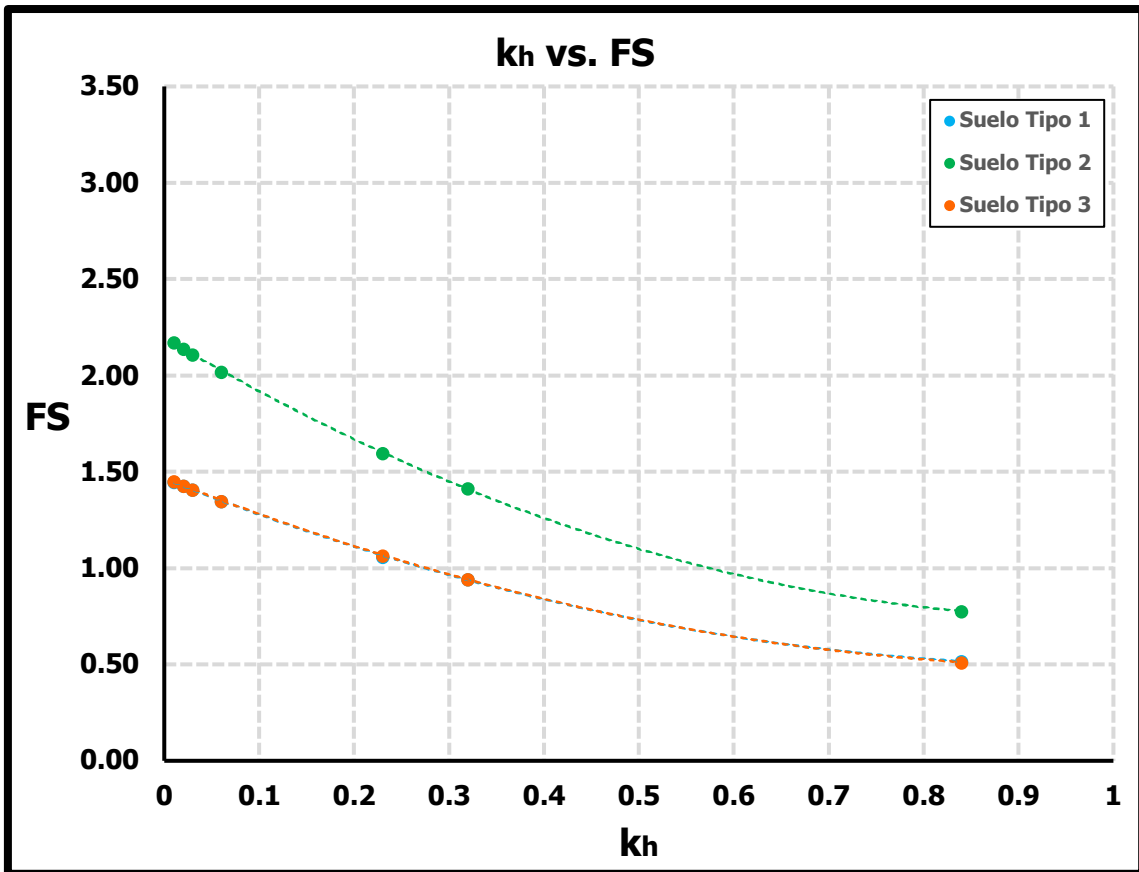


Ilustración 26. Resultados obtenidos para el talud de Altura=6m y pendiente=45°.

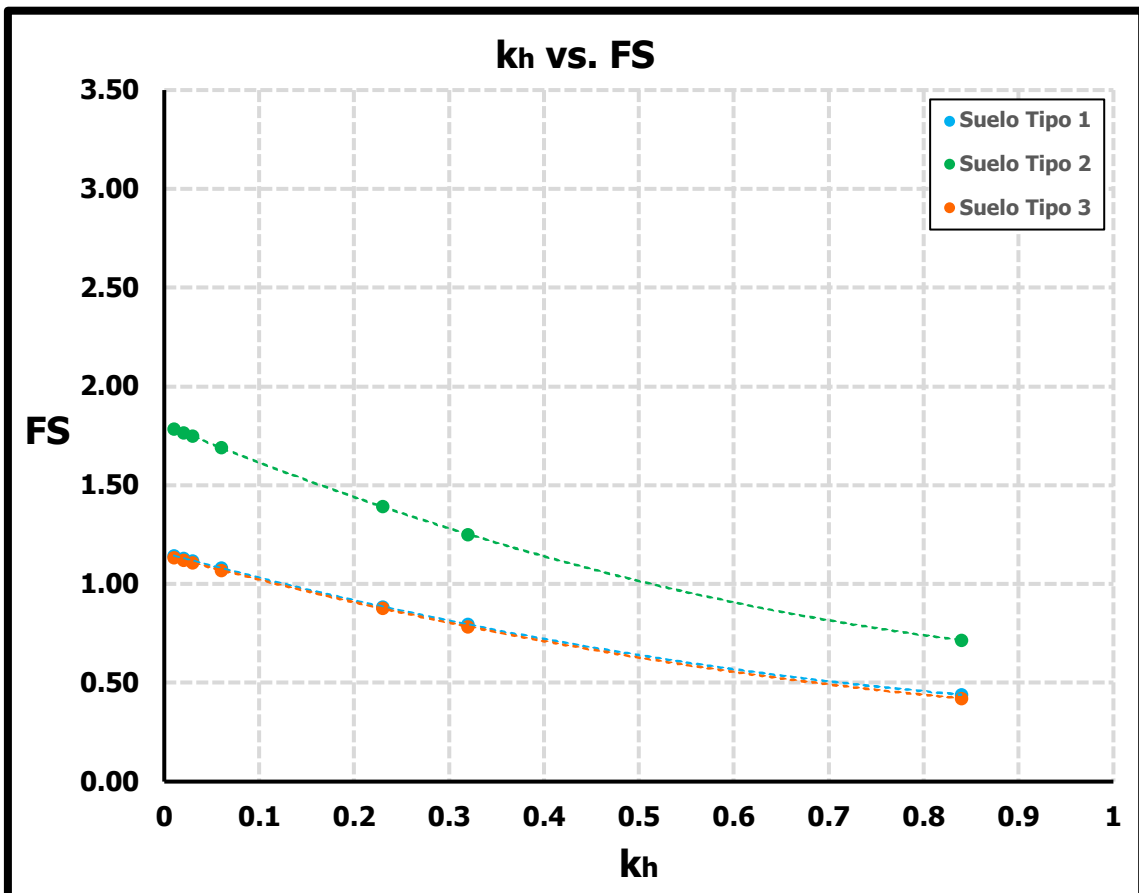


Ilustración 27. Resultados obtenidos para el talud de Altura=6m y pendiente=60°.

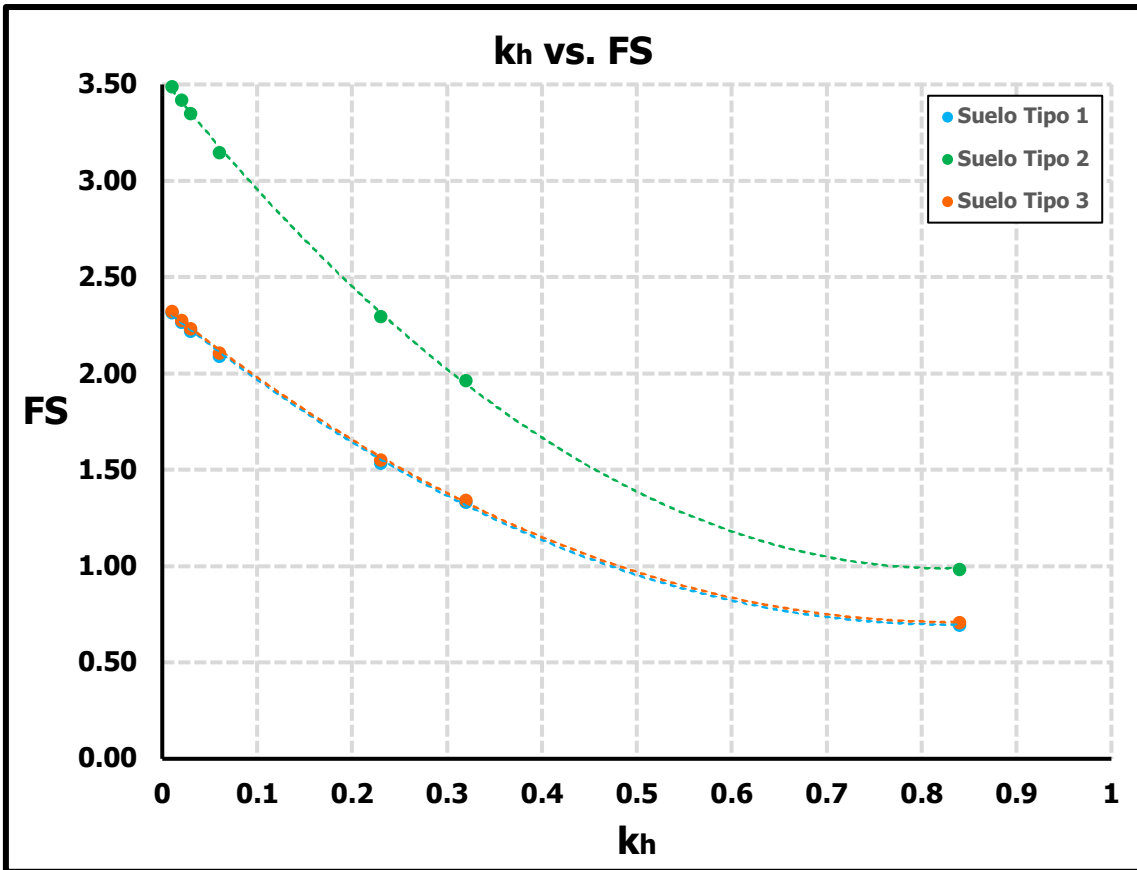


Ilustración 28. Resultados obtenidos para el talud de Altura=4m y pendiente=30°.

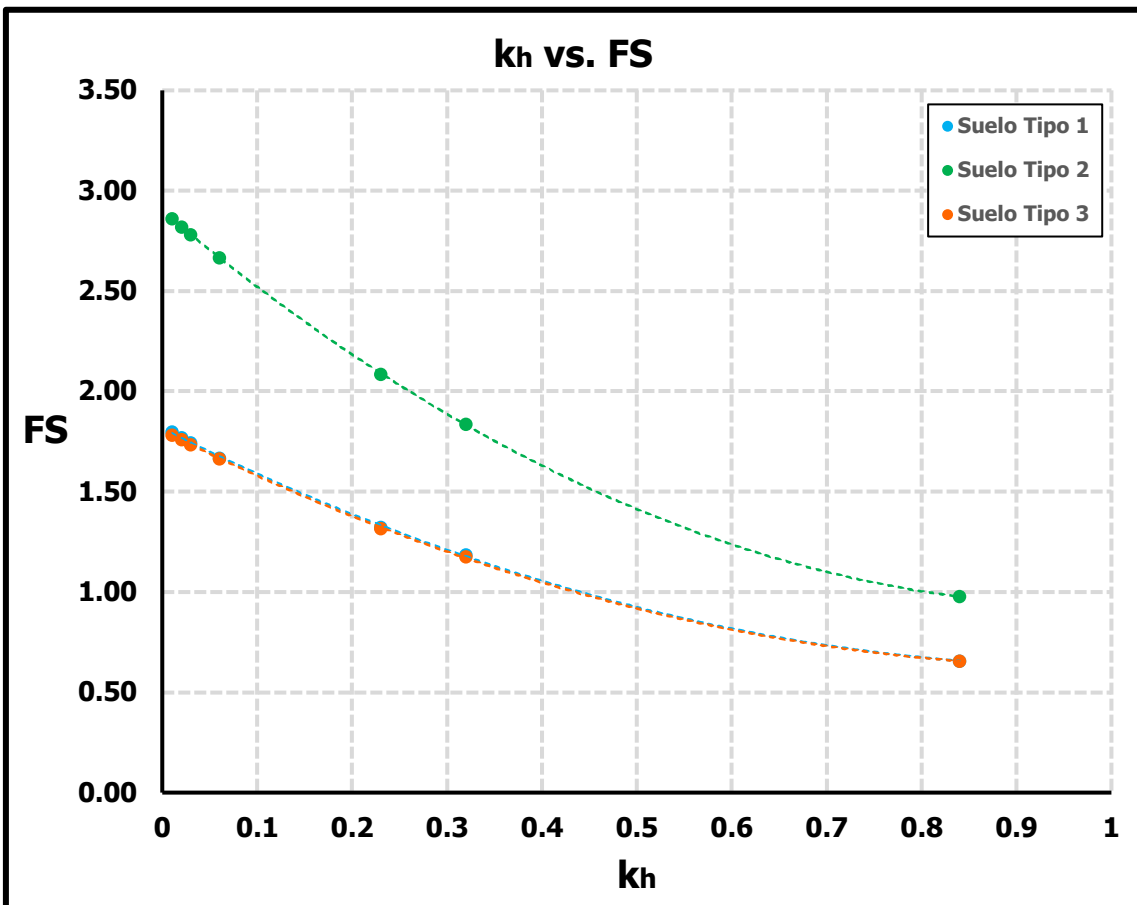


Ilustración 29. Resultados obtenidos para el talud de Altura=4m y pendiente=45°.

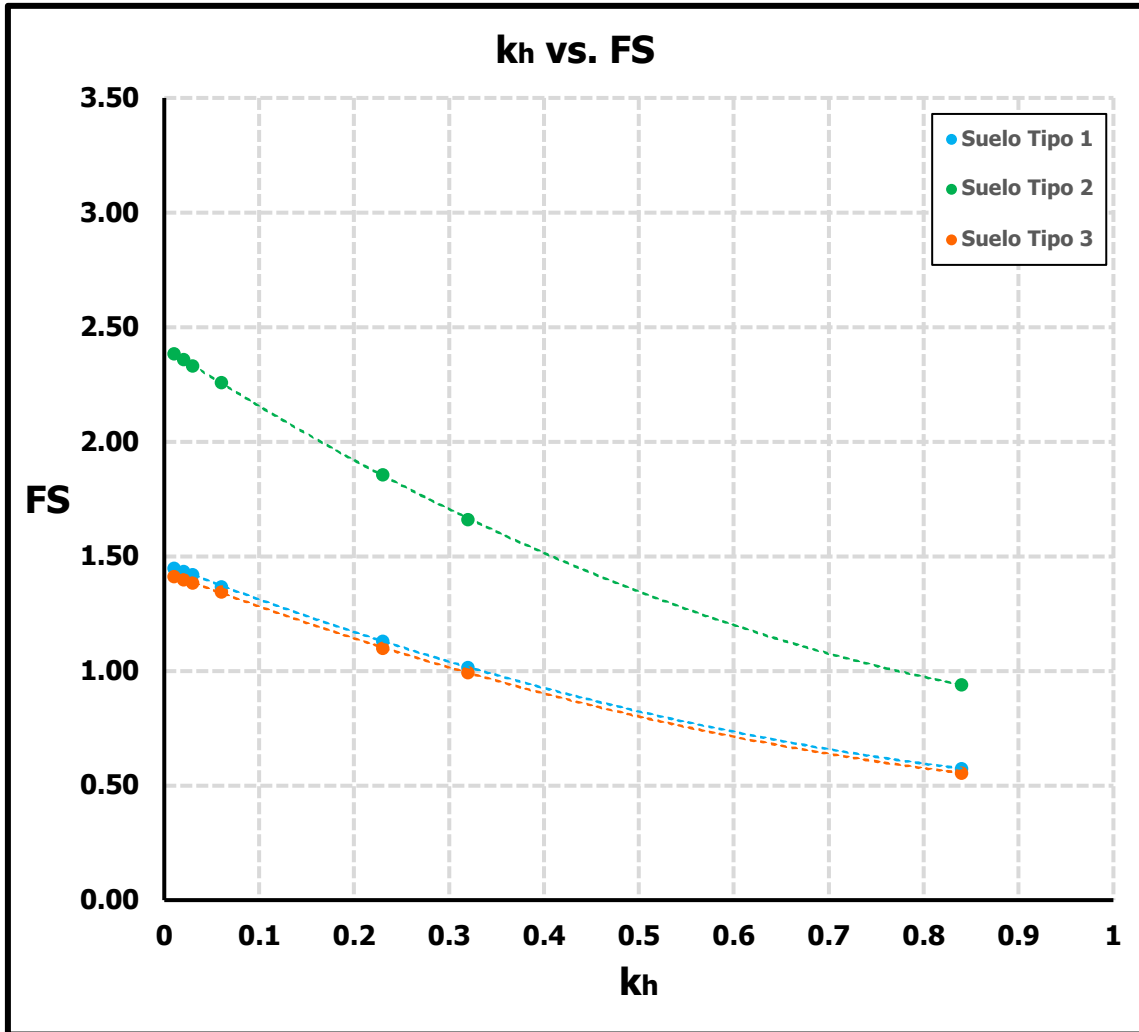


Ilustración 30. Resultados obtenidos para el talud de Altura=4m y pendiente=60°.

4.2. Análisis Dinámico

Se procesaron 189 modelos cada uno con diferentes propiedades geométricas, propiedades del suelo y diferentes registros aplicados, los mismos se adjuntan en el apartado de Anexos. Para cada modelo procesado se seleccionaron 3 puntos de control (Ilustración 31) con el fin de evaluar el comportamiento de cada uno en el tiempo.

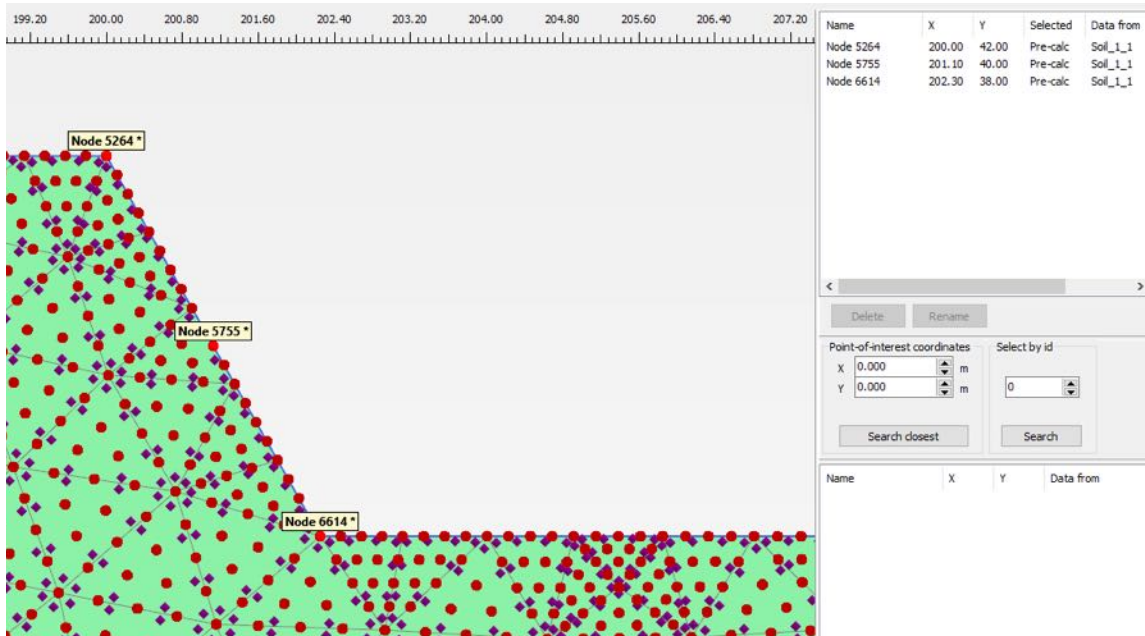


Ilustración 31. Puntos de control seleccionados para evaluar el comportamiento del Talud Modelo No. 182.

Los puntos seleccionados corresponden a la corona, el centro y la base del talud. Procesados los modelos, los resultados permiten apreciar lo siguiente:

- Al contrario de lo observado en el análisis estático, los desplazamientos mayores se obtienen con el suelo tipo 2 ($\gamma=15 \text{ kN/m}^3$, $c=20\text{kPa}$, $\phi=24^\circ$, $E=2\text{MPa}$, $\nu=0.35$). Los desplazamientos calculados por PLAXIS son tan grandes para todos los taludes, que hacen pensar que difícilmente los taludes se mantendrían estables, incluso para sismos con PGA bajos (Cuenca y Loja). El parámetro característico propuesto en este tipo de suelo es el del Módulo de Young (E), el cual tiene un valor de 2 MPa, mucho menor que los valores propuestos en los otros tipos de suelo. Con el objetivo de verificar la influencia de esta propiedad en los resultados, en el Modelo No. 179 (H=4m, Ángulo=60°, Registro AGY2-N) se calcularon los desplazamientos obtenidos con los valores de E=2, 10, 25, 100, 250, 500 MPa (Ilustraciones 32-37, respectivamente).

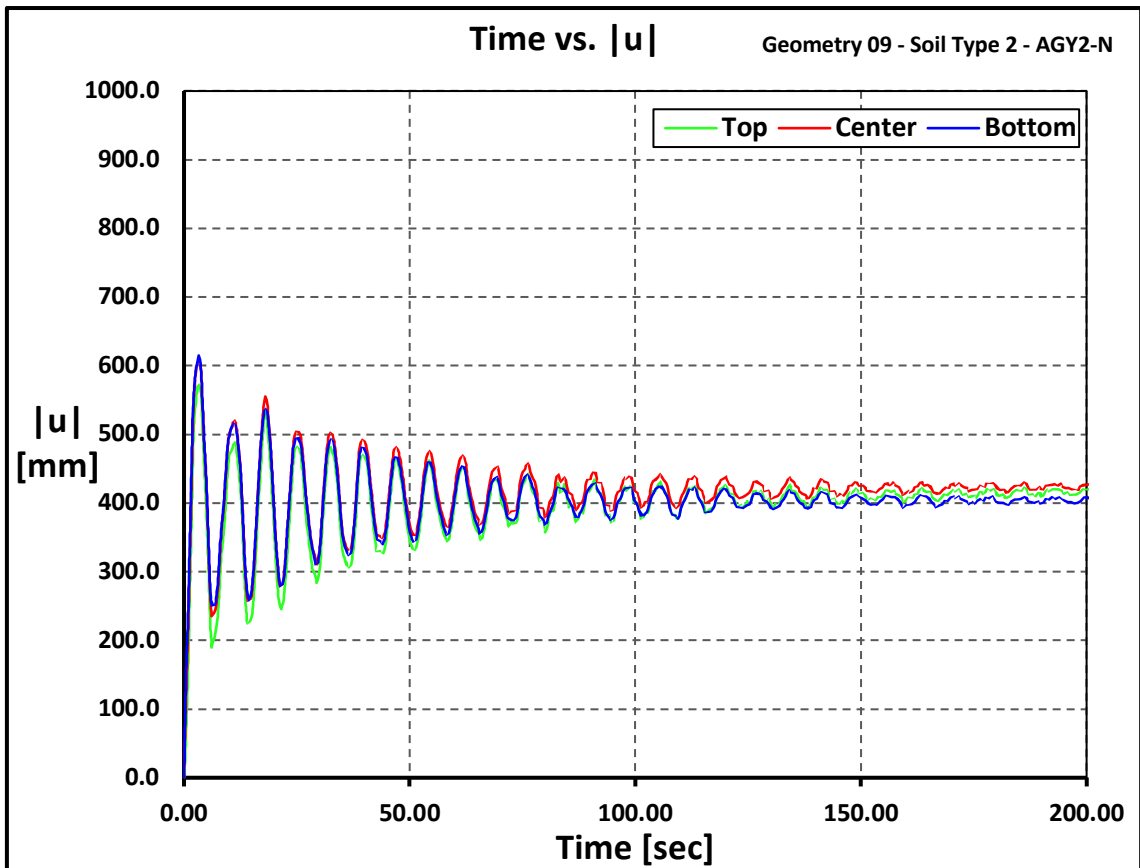


Ilustración 32. Desplazamientos obtenidos en el Modelo No. 179 con un valor de $E=2$ MPa.

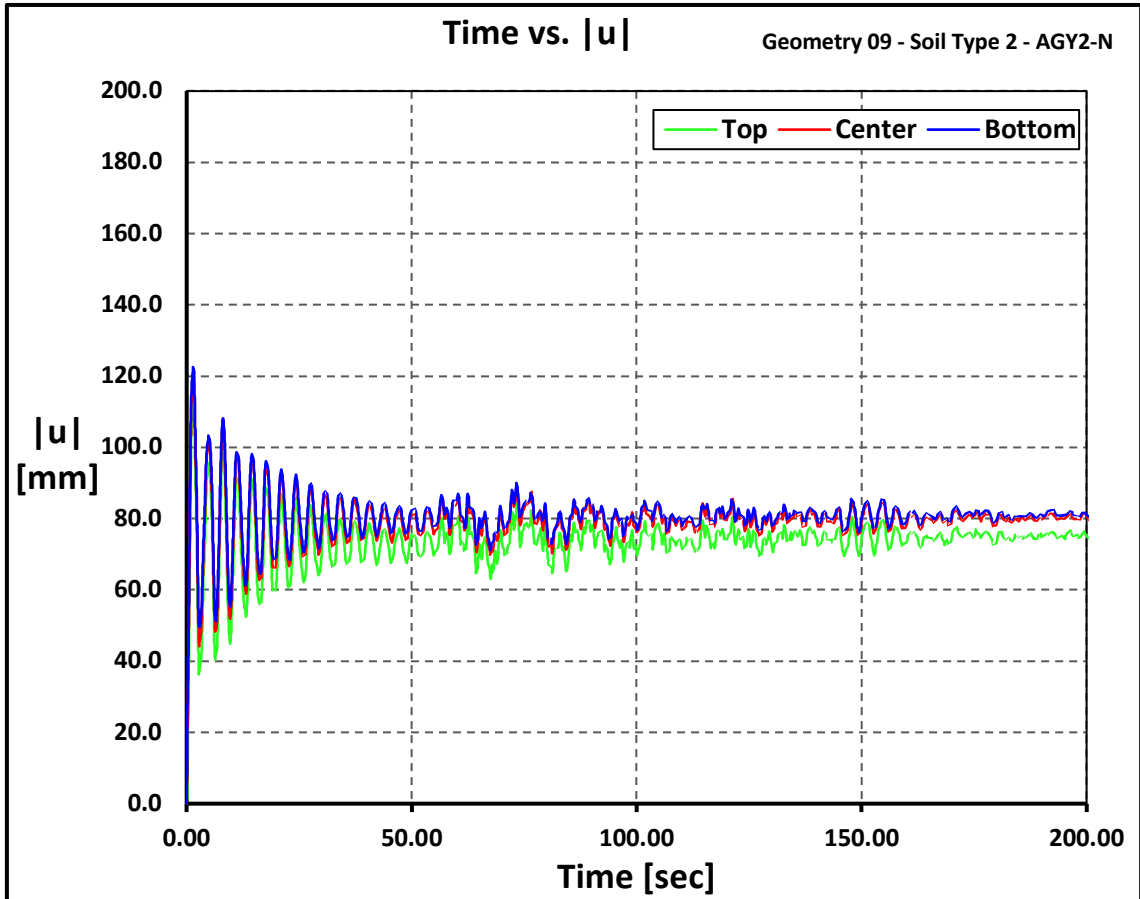


Ilustración 33. Desplazamientos obtenidos en el Modelo No. 179 con un valor de $E=10$ MPa.

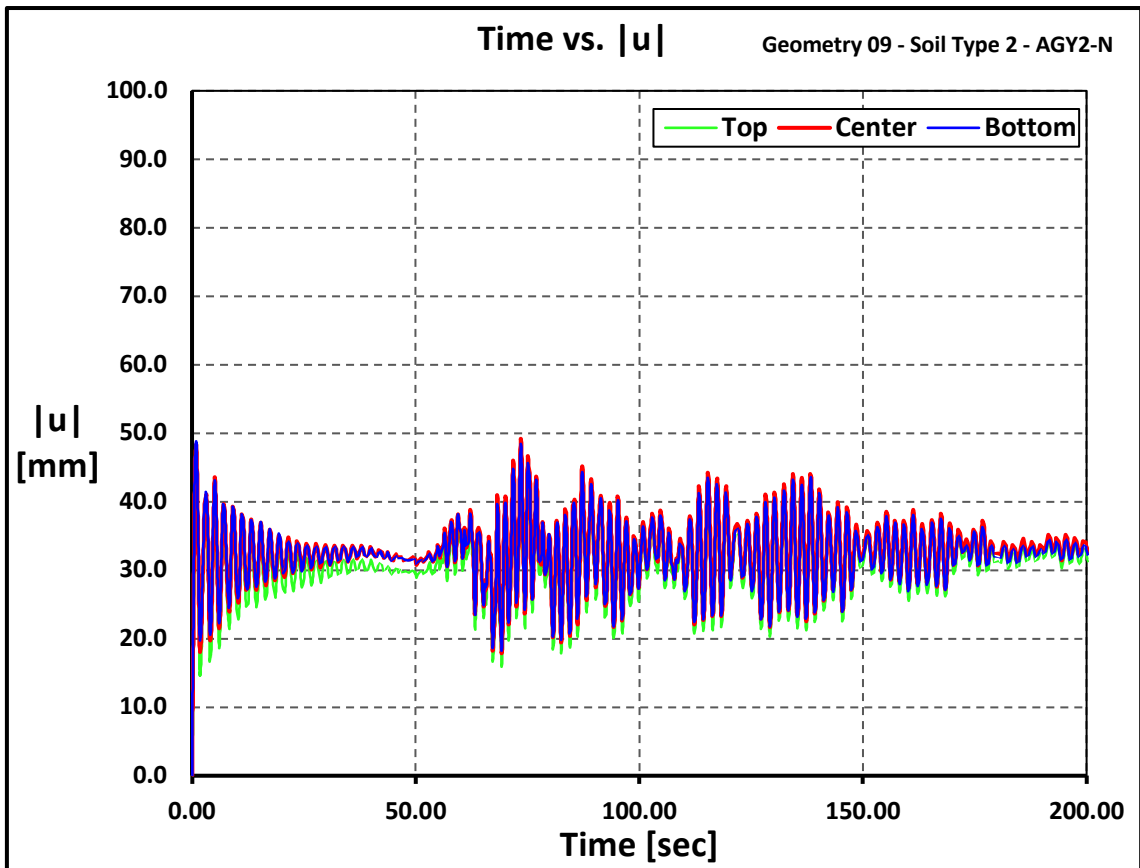


Ilustración 34. Desplazamientos obtenidos en el Modelo No. 179 con un valor de $E=25$ MPa.

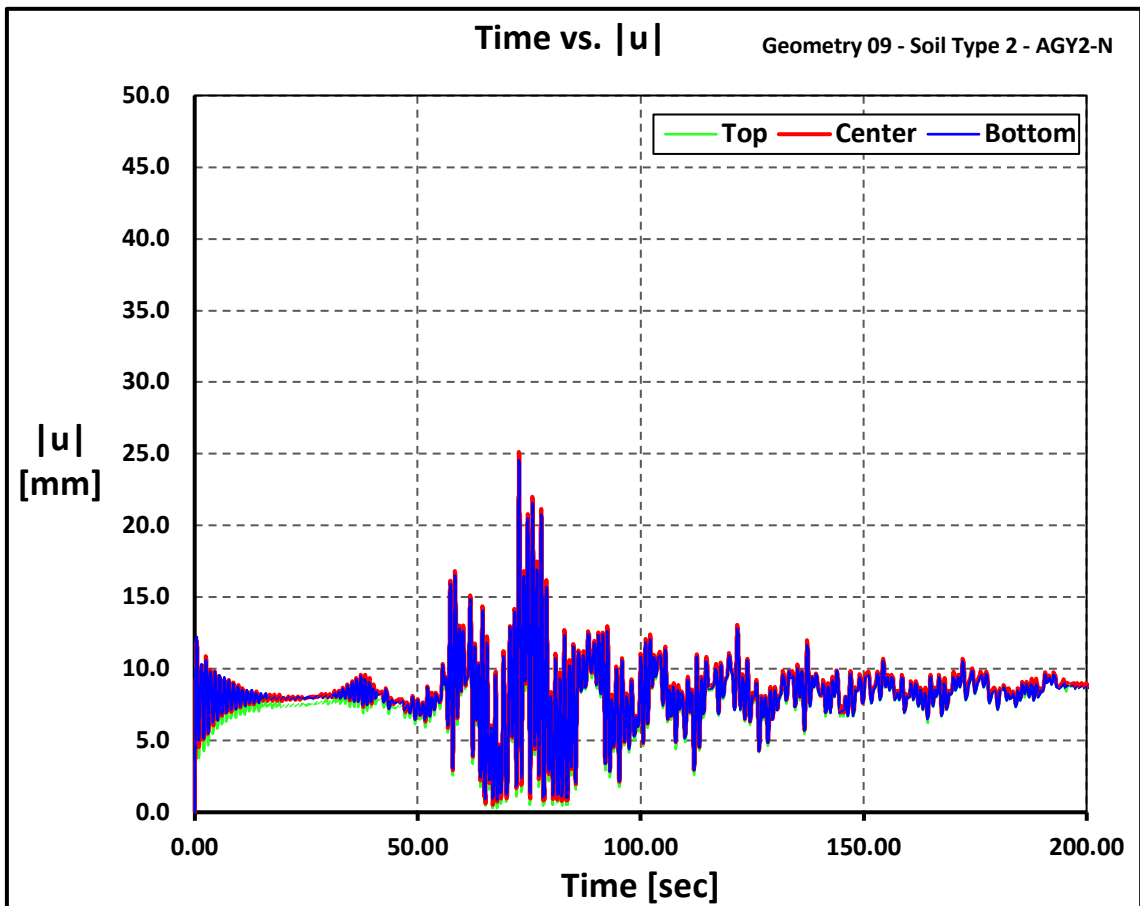


Ilustración 35. Desplazamientos obtenidos en el Modelo No. 179 con un valor de $E=100$ MPa.

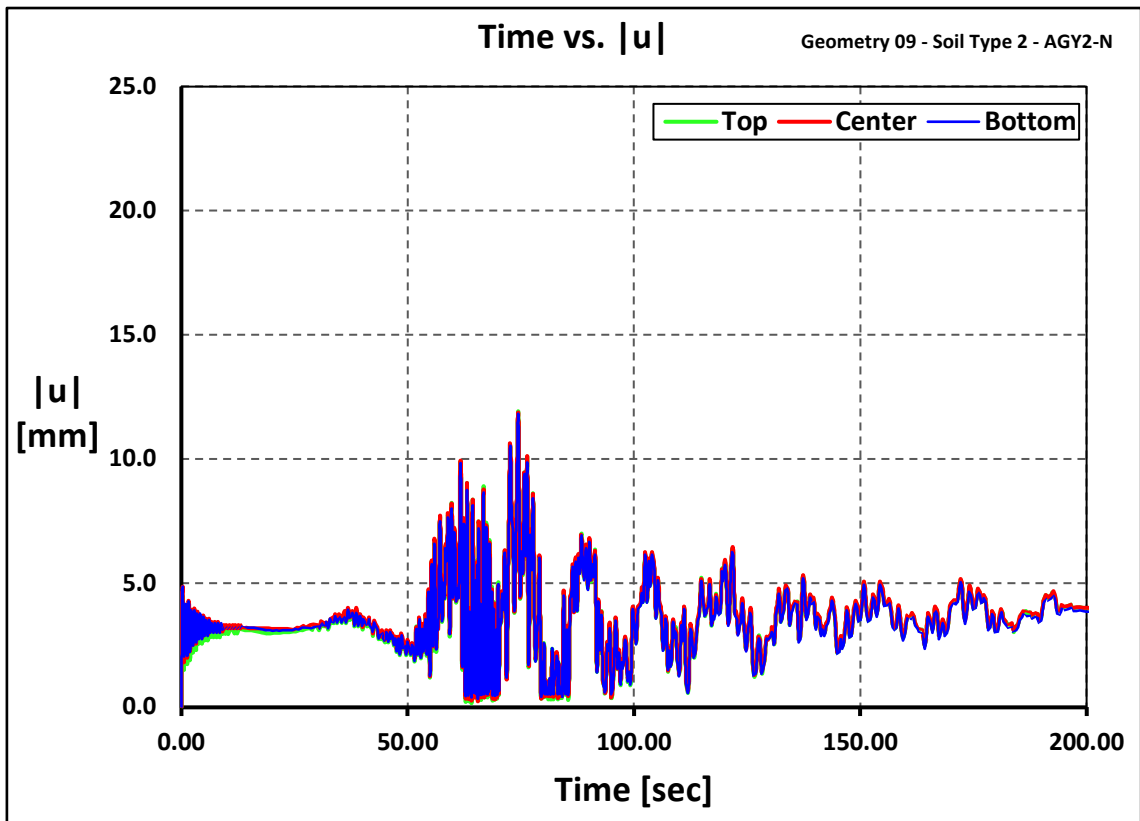


Ilustración 36. Desplazamientos obtenidos en el Modelo No. 179 con un valor de $E=250$ MPa.

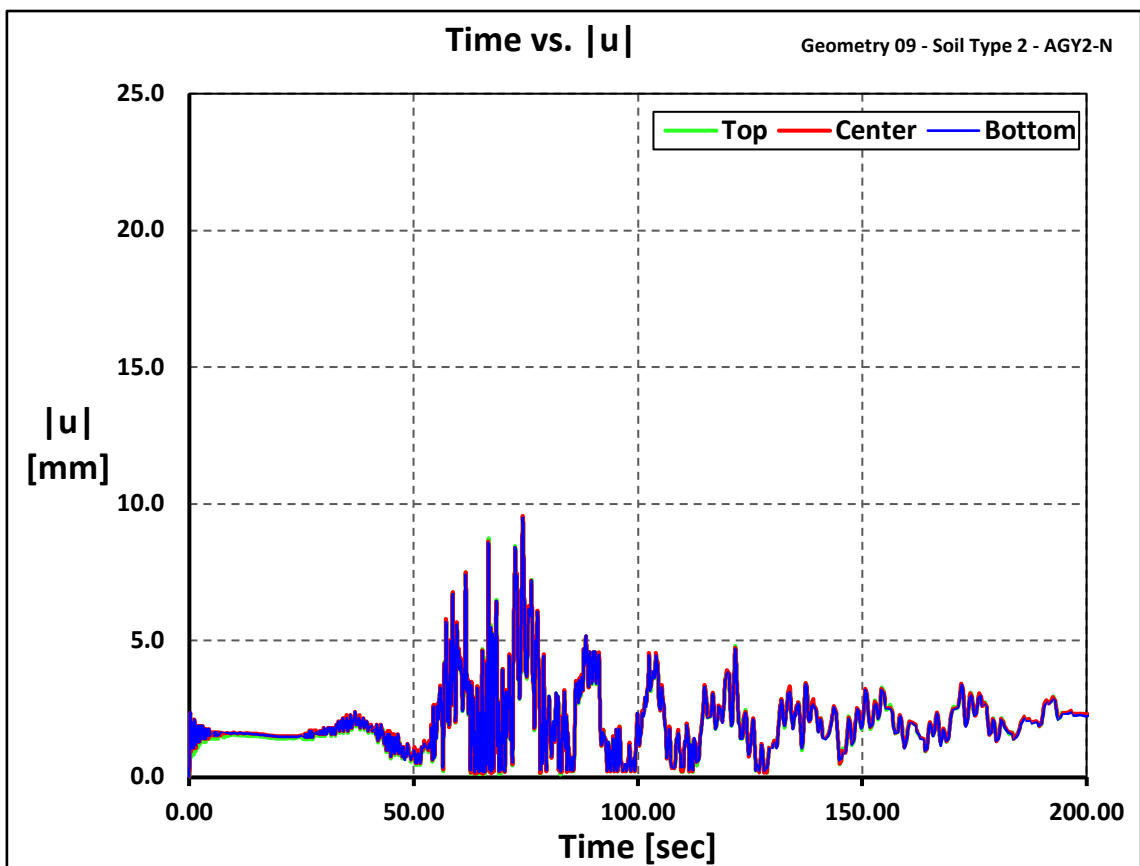


Ilustración 37. Desplazamientos obtenidos en el Modelo No. 179 con un valor de $E=500$ MPa.

La Ilustración 38 recoge los resultados obtenidos para la variación del Módulo de Young (E), notándose que es un parámetro especialmente sensible a la hora de calcular la respuesta de desplazamientos en taludes. Es aún más crítico con valores de E menores a 25 MPa, donde se observa una variación muy pronunciada. Tomando como referencia la Tabla 5, obtenida de la normativa española Código Técnico de Edificación (CTE), se identifica que este rango corresponde a suelos blandos o muy blandos.

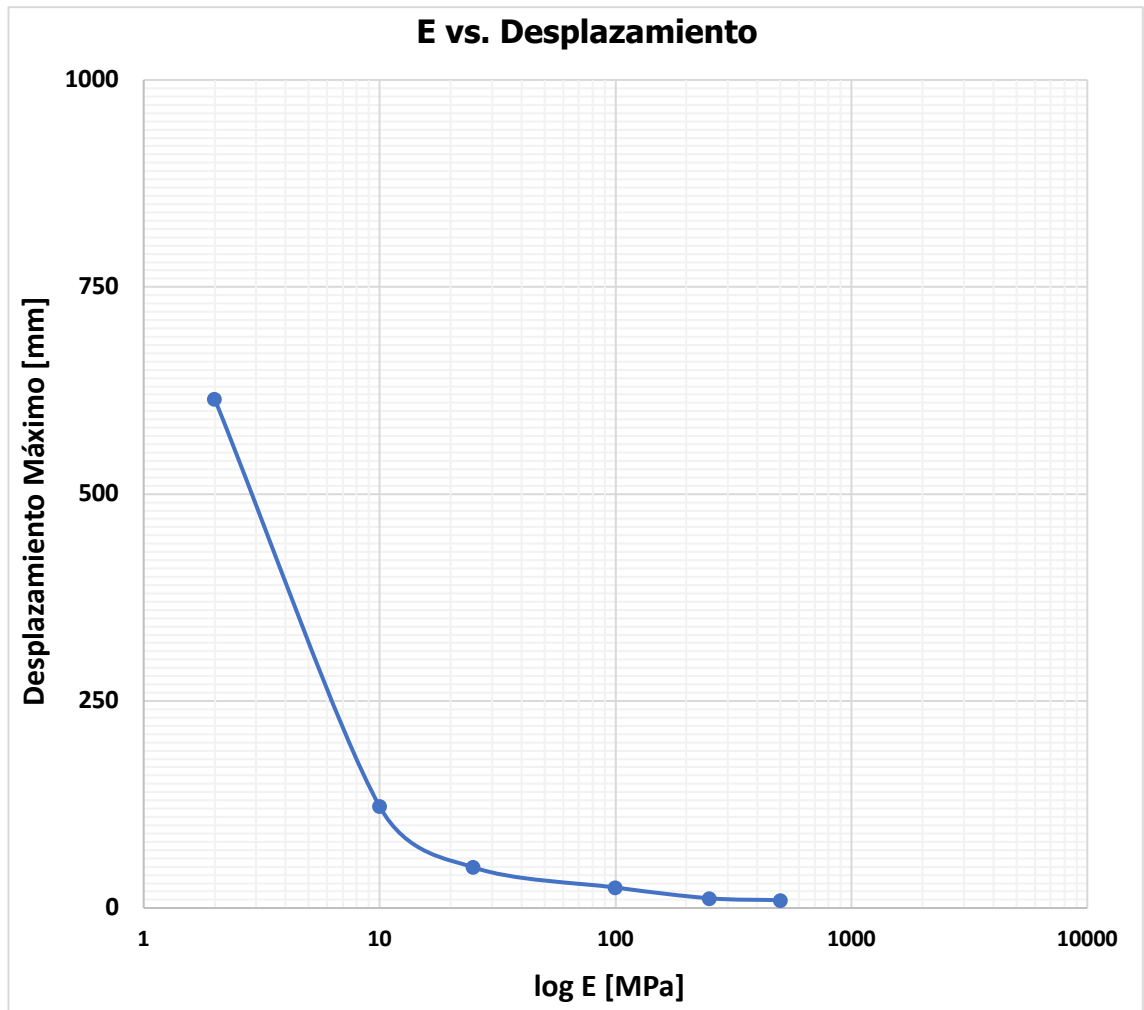


Ilustración 38. Variación de la Respuesta de desplazamientos en función del Módulo de Young (E) en la corona del Talud No. 179.

Tabla 5. Valores orientativos del Módulo de Young para suelos (Fuente: Tabla D.23 del Código Técnico de Edificación español).

Tipo de suelo	N _{SPT}	q _u (kN/m ²)	E (MN/m ²)
Suelos muy flojos o muy blandos	< 10	0 - 80	< 8
Suelos flojos o blandos	10 - 25	80 - 150	8 - 40
Suelos medios	25 - 50	150 - 300	40 - 100
Suelos compactos o duros	50 - Rechazo	300 - 500	100 - 500
Rocas blandas	Rechazo	500 - 5.000	500 - 8.000
Rocas duras	Rechazo	5.000 - 40.000	8.000 - 15.000
Rocas muy duras	Rechazo	> 40.000	>15.000

- Para los taludes más empinados, como es el caso de los taludes con la Geometría No. 6 (Altura 6 m y ángulo de inclinación 60°) se observa una predisposición a que se desplace mayormente la corona y el punto central del talud con respecto a su base, dando lugar a un movimiento que tiende al volteo, tal como se muestra en la Ilustración 39, donde se puede apreciar la deformación en la malla generada en PLAXIS, esto se corrobora con los valores de desplazamientos mostrados en la gráfica de la Ilustración 40. Dicho efecto se observó en todos los taludes con la misma geometría, sin distinción del tipo de suelo o registro aplicado.

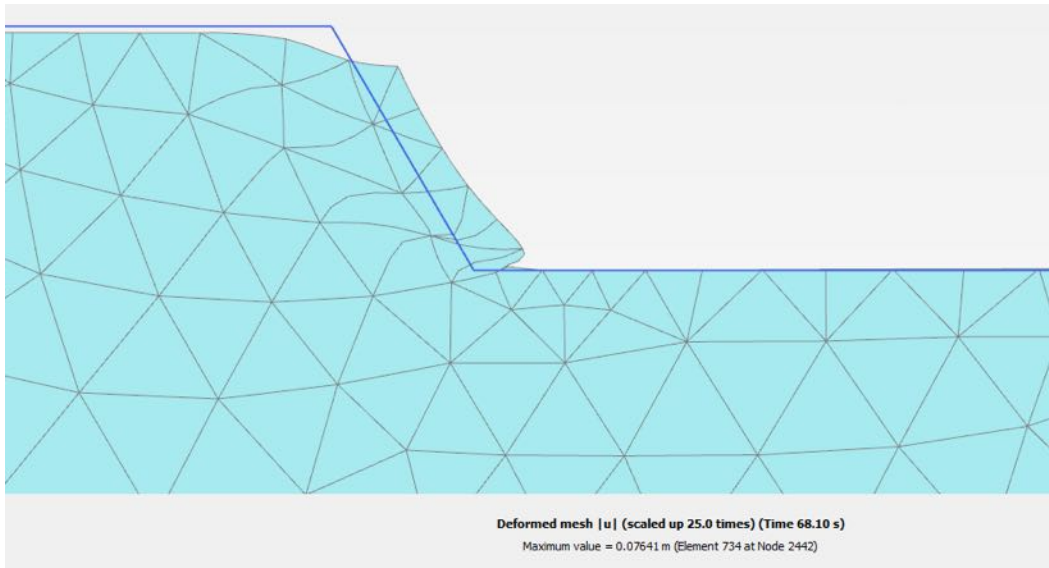


Ilustración 39. Distorsión en la malla del talud No. 107 (H=6m, Ángulo=60°, Suelto Tipo 1, Registro APO1-N).

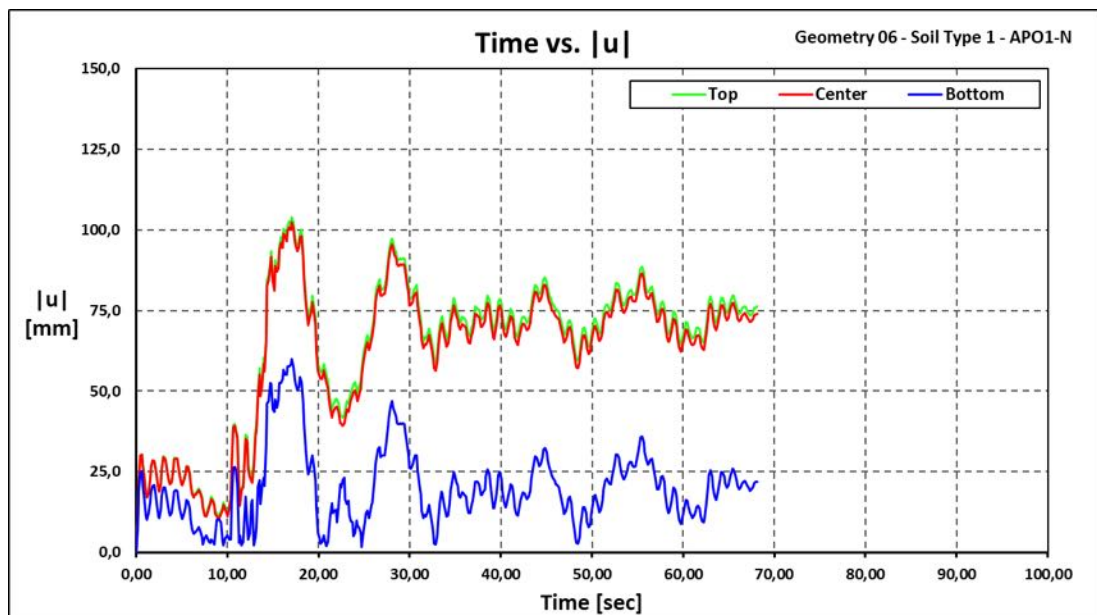


Ilustración 40. Desplazamientos calculados para el Talud #107 (H=6m, Ángulo=60°, Suelto Tipo 1, Registro APO1-N).

- Obviando en el caso del Suelo Tipo 2, para los sismos con PGA altos (especialmente Pedernales) se observa un comportamiento errático, es decir, se tienen cambios bruscos en intervalos cortos de tiempo. Por otro lado, para los sismos con PGA bajos se observa un comportamiento más sinusoidal, similar al de un movimiento armónico. Esto se puede explicar debido a que, ante grandes aceleraciones, la respuesta del talud está fuertemente influenciada por la excitación sísmica (Ilustración 41), mientras que, para valores de aceleración bajos, el amortiguamiento dado por los parámetros de resistencia del suelo empieza a ejercer influencia, dando como resultado un comportamiento que en ciertos tramos se asemeja al de una vibración libre (Ilustración 42).

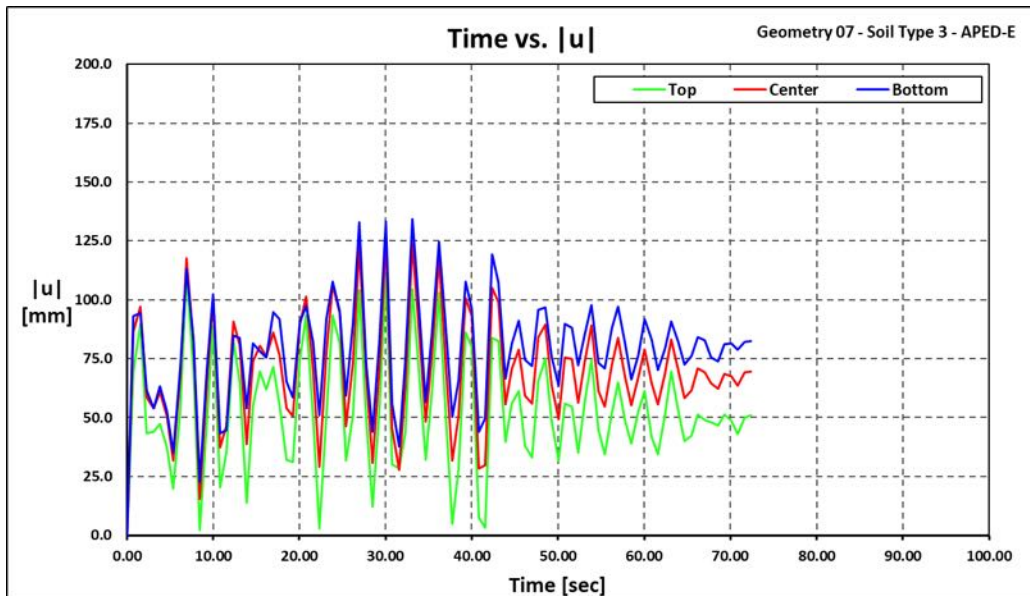


Ilustración 41. Respuesta del Talud No. 141 ($H=4m$, $\text{Ángulo}=30^\circ$, Suelto Tipo 3) ante la excitación sísmica del Registro de aceleraciones APED-E (Pedernales).

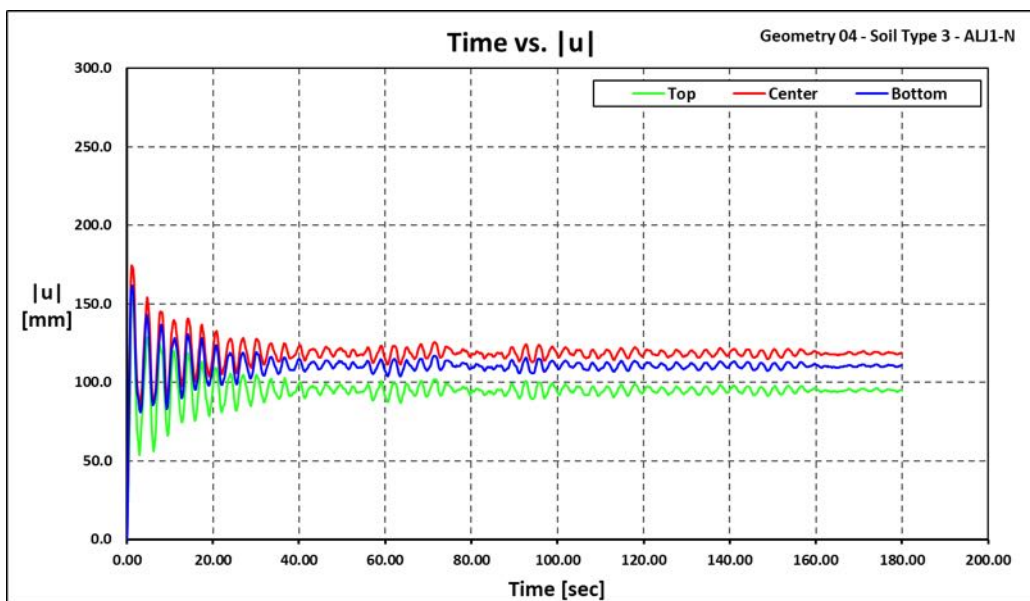


Ilustración 42. Respuesta del Talud No. 84 ($H=6m$, $\text{Ángulo}=30^\circ$, Suelto Tipo 3) ante la excitación sísmica del Registro de aceleraciones ALJ1-N (Loja).

- En general, se notó que el coeficiente de Poisson no tiene gran relevancia en la respuesta de los taludes (al menos para el rango de valores típicos en suelos). Sin embargo, con el objeto de comprobar la sensibilidad de este parámetro, se tomó el Talud No. 103, y se cambió el valor del coeficiente de Poisson (ν). La gráfica de la Ilustración 43 muestra la respuesta del Talud No. 103 ($H=6\text{m}$ y pendiente de 45°) utilizando un coeficiente de Poisson de 0.25. Se observa que la magnitud de los desplazamientos del talud se encuentra entre 100 y 125 mm, con un pico máximo de 175 mm al principio del registro. Tomando el mismo modelo, variando exclusivamente el coeficiente de Poisson de 0.25 a 0.35, se obtiene la respuesta mostrada en la gráfica de la Ilustración 44, donde el orden de magnitudes de desplazamientos absolutos se reduce levemente, pero sin que esto signifique grandes diferencias en los resultados. Variar el valor de coeficiente de Poisson a un valor mucho mayor (o mucho menor) no se consideró necesario puesto que el rango utilizado se considera que son los valores típicos propios de los suelos.

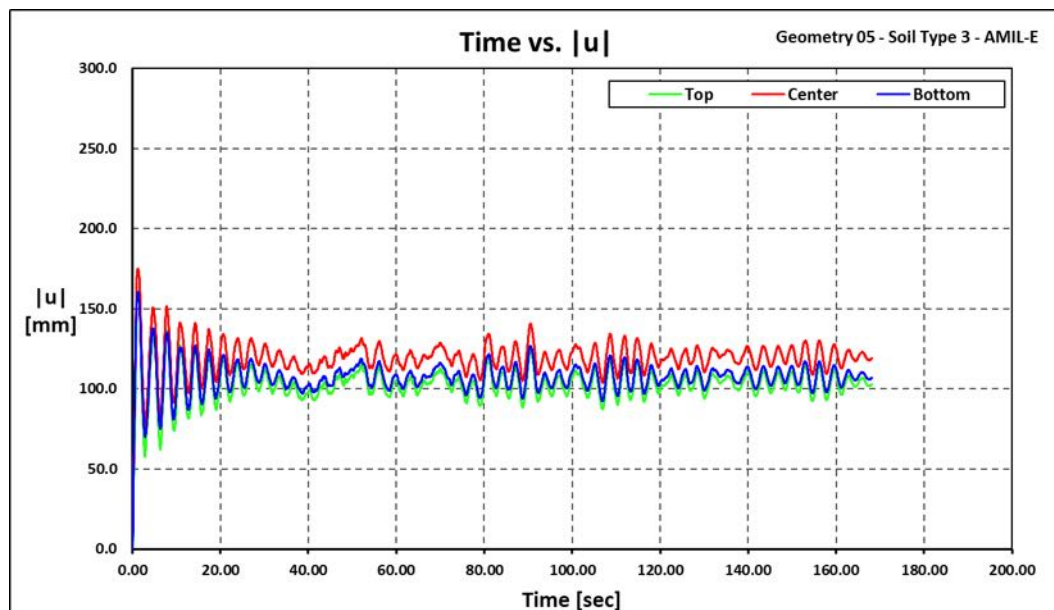


Ilustración 43. Respuesta del Talud No. 103 ($H=6\text{m}$, $\text{Ángulo}=45^\circ$, Suelto Tipo 3: $\nu=0.25$) ante la excitación sísmica del Registro de aceleraciones AMIL-E (Milagro).

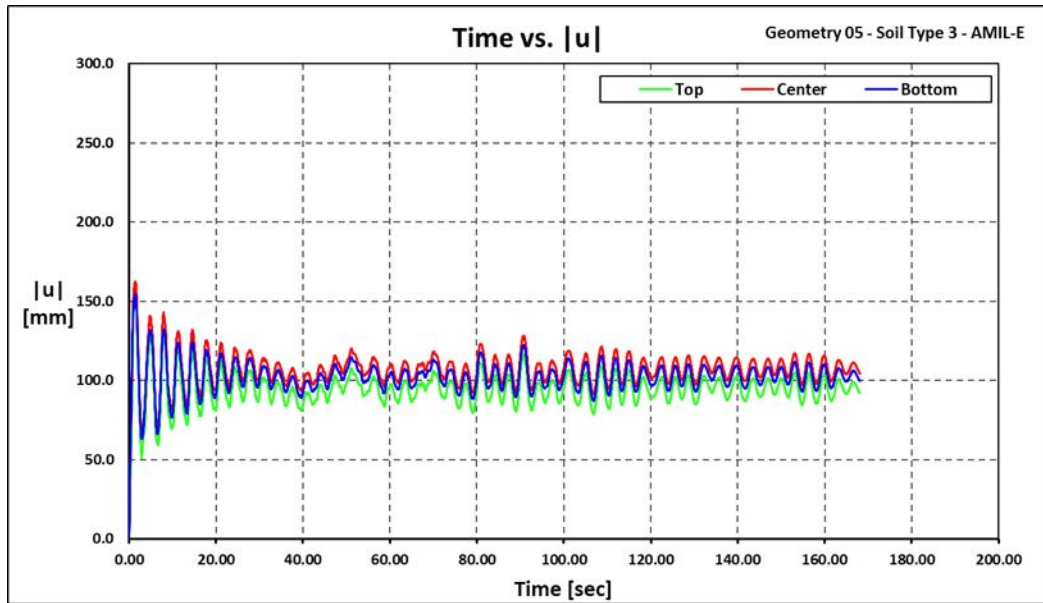


Ilustración 44. Respuesta del Talud No. 103 ($H=6m$, $\text{Ángulo}=45^\circ$, Suelto Tipo 3: $\nu=0.35$) ante la excitación sísmica del Registro de aceleraciones AMIL-E (Milagro).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base a los diferentes análisis y resultados se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones.

En el presente trabajo se comparó los métodos dinámico y pseudoestático de análisis de estabilidad, evaluando cómo los parámetros de resistencia del suelo, sismo (acelerograma) y geometría influyen en los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos reflejan la necesidad de realizar análisis de estabilidad de taludes más detallados, como es el caso del análisis dinámico, además es imprescindible realizar una adecuada caracterización geotécnica del suelo. No realizar análisis más detallados puede llevar a subestimar la estabilidad de taludes ante la acción de cargas sísmicas.

El análisis pseudoestático de estabilidad de taludes, puede llevar a resultados inexactos, ya que pocos parámetros pueden ser ingresados cuando se utiliza el Modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. De la misma forma, en el análisis dinámico, una selección incorrecta de los parámetros de resistencia del suelo puede conllevar a grandes imprecisiones.

Un factor clave en los análisis dinámicos es el del Módulo de Young. En este trabajo se demostró la gran influencia que este tiene en los resultados obtenidos, llegando su influencia a superar incluso a la propia acción sísmica y a la geometría del talud, en lo que refiere a desplazamientos.

Adicionalmente, mediante el análisis dinámico, se pudo evaluar la respuesta del talud ante diferentes niveles de intensidad sísmica, notándose como ante registros con gran intensidad la respuesta del talud depende en gran manera de las aceleraciones impuestas, mientras que conforme baja la intensidad, los parámetros del suelo empiezan a ejercer influencia y amortiguar el movimiento.

Finalmente, se observó que existen parámetros de resistencia del suelo que tienen menor influencia, como es el caso del coeficiente de Poisson.

Se recomienda incluir análisis dinámicos de estabilidad de taludes, especialmente en el caso de taludes conformados por suelos blandos, además se recomienda realizar una adecuada caracterización geotécnica del suelo, ya que los parámetros ingresados en el este tipo de análisis tienen gran influencia en los resultados.

Finalmente, con el objeto de validar el Modelo de Mohr-Coulomb en la estabilidad de taludes mediante métodos dinámicos, se recomienda realizar más pruebas mediante el uso de otros modelos constitutivos, como el Hardening Soil o el HS-Small.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Wang, Z., Zhang, W., Gao, X., Liu, H., & Böhlke, T. (2020). Stability analysis of soil slopes based on strain information. *Acta Geotechnica*, 15(11), 3121-3134. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-00985-x>
- Day, R. W. (2002). *Geotechnical earthquake engineering handbook*. McGraw-Hill.
- Coduto, D. (1999), *Geotechnical Engineering. Principles and Practices*, Editorial Prentice Hall, EEUU.
- Bozorgnia, Y., & Bertero, V. V. (Eds.). (2004). *Earthquake engineering: From engineering seismology to performance-based engineering*. CRC Press.
- Kramer, S. (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Editorial Prentice Hall, EEUU.
- Lees, A. (2016). *Geotechnical finite element analysis: A practical guide*. The Institution of Civil Engineers, United Kingdom.
- Cheng, Y. M. (2014). *Slope Stability Analysis and Stabilization: New Methods and Insight*, Second Edition. CRC Press.
- Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering (Fifth edition)*. Pearson.
- Bentley Systems, Incorporated. (2021). *Plaxis Connect Edition V21 Manuals*. Plaxis bv.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *Norma Ecuatoriana de Construcción. Peligro Sísmico. Diseño Sismoresistente*. Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- Singaicho J. C., Laurendeau A., Viracucha C., Ruiz M., 2016. Observaciones del sismo del 16 de abril de 2016 de magnitud Mw 7.8, Intensidades y Aceleraciones. Sometido a la Revista Politécnica.

- Sanhueza Plaza, C., & Rodríguez Cifuentes, L. (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista de la construcción*, 12, 17-29.
- Yepes, H., Audin, L., Alvarado, A., Beauval, C., Aguilar, J., Font, Y., & Cotton, F. (2016). A new view for the geodynamics of Ecuador: Implication in seismogenic source definition and seismic hazard assessment. AGU Publications.
- Das, B. (2013). *Fundamentals of Geotechnical Engineering*. Stamford, CT: Cengage Learning.
- Abramson, L. W. (2002). *Slope Stability and Stabilization*. New York: Wiley.
- IG-EPN. (2020). Cuatro años después del terremoto de Pedernales: Un testimonio sobre el peligro sísmico en el Ecuador. Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.
- Jia, J. (2017). *Soil Dynamics and Foundation Modeling*. New York: Springer.
- Duncan, J. M. (1996). State of the Art: Limit equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 577-596.
- Ministerio de Fomento. (2019). Documento Básico SE-C: Seguridad estructural – Cimientos. Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre (BOE 27-diciembre-2019).

7. ANEXOS

Resultados Análisis Pseudoestático

No.	Altura [m]	Ángulo [°]	Suelo	g [kN/m ³]	c [kPa]	f [°]	kh	FS
1	10	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.84	0.471
2	10	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.23	1.049
3	10	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.32	0.916
4	10	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.06	1.410
5	10	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.03	1.495
6	10	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.02	1.525
7	10	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.01	1.556
8	10	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.84	0.664
9	10	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.23	1.390
10	10	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.32	1.213
11	10	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.06	1.879
12	10	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.03	1.994
13	10	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.02	2.035
14	10	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.01	2.078
15	10	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.84	0.487
16	10	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.23	1.099
17	10	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.32	0.952
18	10	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.06	1.476
19	10	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.03	1.565
20	10	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.02	1.597
21	10	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.01	1.630
22	8	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.84	0.516
23	8	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.23	1.138
24	8	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.32	0.994
25	8	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.06	1.530
26	8	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.03	1.622
27	8	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.02	1.655
28	8	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.01	1.689
29	8	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.84	0.716
30	8	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.23	1.551
31	8	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.32	1.350
32	8	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.06	2.102
33	8	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.03	2.233
34	8	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.02	2.281
35	8	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.01	2.330
36	8	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.84	0.530
37	8	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.23	1.182
38	8	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.32	1.030
39	8	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.06	1.586
40	8	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.03	1.682
41	8	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.02	1.717
42	8	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.01	1.753

Resultados Análisis Pseudoestático

No.	Altura [m]	Ángulo [°]	Suelo	g [kN/m ³]	c [kPa]	f [°]	kh	FS
43	8	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.84	0.442
44	8	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.23	0.921
45	8	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.32	0.821
46	8	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.06	1.167
47	8	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.03	1.221
48	8	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.02	1.240
49	8	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.01	1.259
50	8	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.84	0.656
51	8	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.23	1.338
52	8	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.32	1.193
53	8	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.06	1.700
54	8	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.03	1.772
55	8	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.02	1.797
56	8	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.01	1.823
57	8	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.84	0.440
58	8	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.23	0.937
59	8	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.32	0.833
60	8	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.06	1.189
61	8	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.03	1.242
62	8	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.02	1.260
63	8	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.01	1.279
64	6	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.84	0.582
65	6	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.23	1.278
66	6	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.32	1.115
67	6	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.06	1.719
68	6	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.03	1.824
69	6	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.02	1.861
70	6	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.01	1.900
71	6	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.84	0.818
72	6	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.23	1.805
73	6	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.32	1.568
74	6	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.06	2.465
75	6	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.03	2.627
76	6	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.02	2.682
77	6	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.01	2.739
78	6	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.84	0.595
79	6	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.23	1.312
80	6	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.32	1.148
81	6	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.06	1.762
82	6	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.03	1.870
83	6	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.02	1.909
84	6	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.01	1.949

Resultados Análisis Pseudoestático

No.	Altura [m]	Ángulo [°]	Suelo	g [kN/m ³]	c [kPa]	f [°]	kh	FS
85	6	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.84	0.516
86	6	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.23	1.059
87	6	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.32	0.944
88	6	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.06	1.347
89	6	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.03	1.407
90	6	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.02	1.427
91	6	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.01	1.448
92	6	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.84	0.776
93	6	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.23	1.597
94	6	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.32	1.414
95	6	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.06	2.018
96	6	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.03	2.109
97	6	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.02	2.140
98	6	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.01	2.173
99	6	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.84	0.512
100	6	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.23	1.065
101	6	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.32	0.944
102	6	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.06	1.348
103	6	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.03	1.408
104	6	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.02	1.429
105	6	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.01	1.451
106	6	60	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.84	0.440
107	6	60	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.23	0.884
108	6	60	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.32	0.796
109	6	60	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.06	1.081
110	6	60	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.03	1.117
111	6	60	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.02	1.130
112	6	60	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.01	1.142
113	6	60	Suelo tipo 2	15	20	24	0.84	0.716
114	6	60	Suelo tipo 2	15	20	24	0.23	1.392
115	6	60	Suelo tipo 2	15	20	24	0.32	1.251
116	6	60	Suelo tipo 2	15	20	24	0.06	1.690
117	6	60	Suelo tipo 2	15	20	24	0.03	1.749
118	6	60	Suelo tipo 2	15	20	24	0.02	1.767
119	6	60	Suelo tipo 2	15	20	24	0.01	1.785
120	6	60	Suelo tipo 3	20	11	28	0.84	0.421
121	6	60	Suelo tipo 3	20	11	28	0.23	0.876
122	6	60	Suelo tipo 3	20	11	28	0.32	0.785
123	6	60	Suelo tipo 3	20	11	28	0.06	1.069
124	6	60	Suelo tipo 3	20	11	28	0.03	1.107
125	6	60	Suelo tipo 3	20	11	28	0.02	1.120
126	6	60	Suelo tipo 3	20	11	28	0.01	1.134

Resultados Análisis Pseudoestático

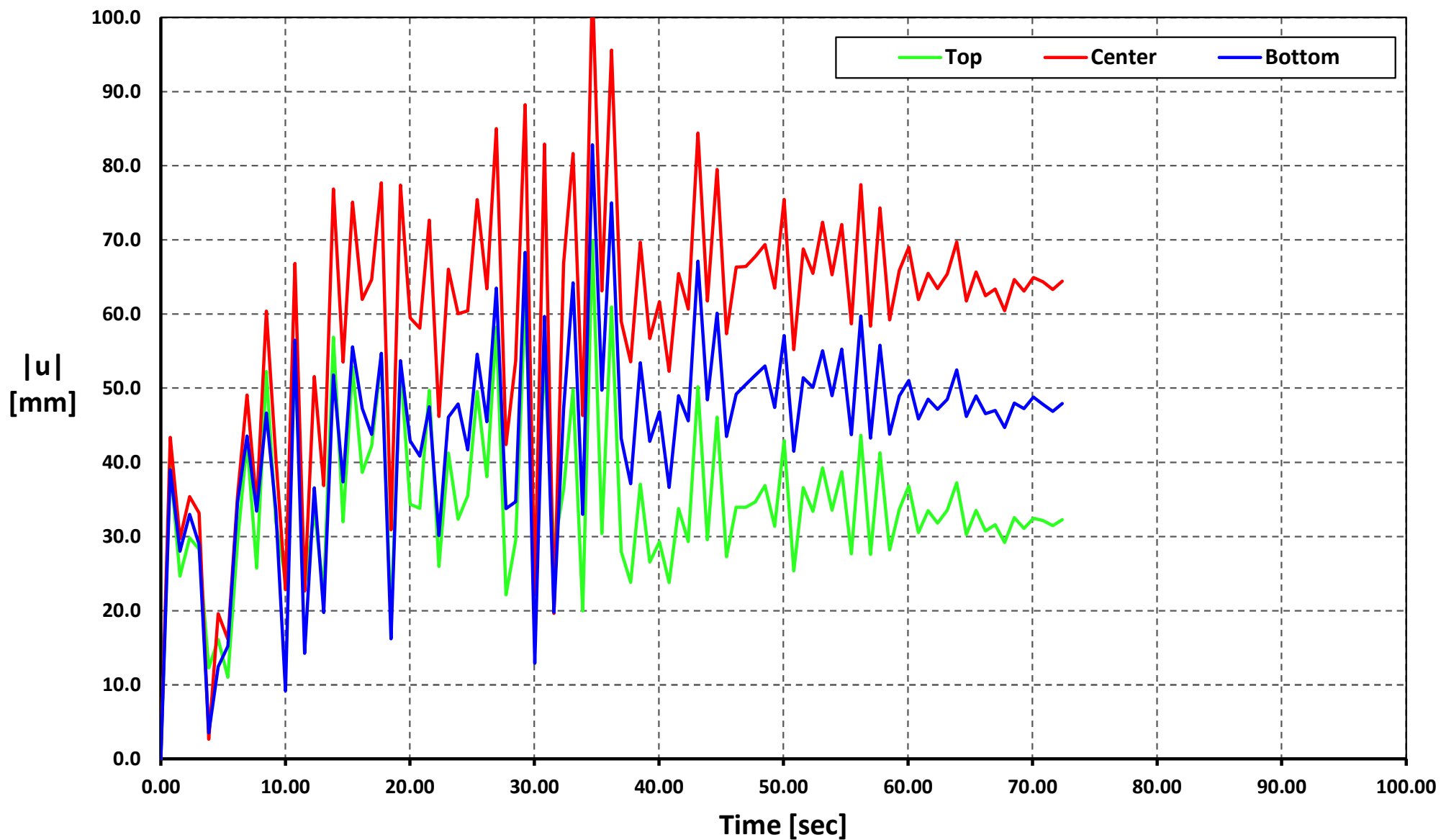
No.	Altura [m]	Ángulo [°]	Suelo	g [kN/m ³]	c [kPa]	f [°]	kh	FS
127	4	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.84	0.696
128	4	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.23	1.537
129	4	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.32	1.335
130	4	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.06	2.092
131	4	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.03	2.223
132	4	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.02	2.270
133	4	30	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.01	2.318
134	4	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.84	0.987
135	4	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.23	2.299
136	4	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.32	1.965
137	4	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.06	3.149
138	4	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.03	3.351
139	4	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.02	3.420
140	4	30	Suelo tipo 2	15	20	24	0.01	3.492
141	4	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.84	0.709
142	4	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.23	1.553
143	4	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.32	1.345
144	4	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.06	2.110
145	4	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.03	2.234
146	4	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.02	2.278
147	4	30	Suelo tipo 3	20	11	28	0.01	2.324
148	4	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.84	0.656
149	4	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.23	1.323
150	4	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.32	1.186
151	4	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.06	1.667
152	4	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.03	1.743
153	4	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.02	1.770
154	4	45	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.01	1.798
155	4	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.84	0.976
156	4	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.23	2.085
157	4	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.32	1.837
158	4	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.06	2.665
159	4	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.03	2.780
160	4	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.02	2.820
161	4	45	Suelo tipo 2	15	20	24	0.01	2.861
162	4	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.84	0.655
163	4	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.23	1.314
164	4	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.32	1.175
165	4	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.06	1.664
166	4	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.03	1.734
167	4	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.02	1.758
168	4	45	Suelo tipo 3	20	11	28	0.01	1.782

Resultados Análisis Pseudoestático

No.	Altura [m]	Ángulo [°]	Suelo	g [kN/m ³]	c [kPa]	f [°]	kh	FS
169	4	60	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.84	0.574
170	4	60	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.23	1.130
171	4	60	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.32	1.017
172	4	60	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.06	1.369
173	4	60	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.03	1.420
174	4	60	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.02	1.436
175	4	60	Suelo tipo 1	20	12.5	25	0.01	1.450
176	4	60	Suelo tipo 2	15	20	24	0.84	0.940
177	4	60	Suelo tipo 2	15	20	24	0.23	1.857
178	4	60	Suelo tipo 2	15	20	24	0.32	1.662
179	4	60	Suelo tipo 2	15	20	24	0.06	2.259
180	4	60	Suelo tipo 2	15	20	24	0.03	2.333
181	4	60	Suelo tipo 2	15	20	24	0.02	2.359
182	4	60	Suelo tipo 2	15	20	24	0.01	2.385
183	4	60	Suelo tipo 3	20	11	28	0.84	0.554
184	4	60	Suelo tipo 3	20	11	28	0.23	1.099
185	4	60	Suelo tipo 3	20	11	28	0.32	0.993
186	4	60	Suelo tipo 3	20	11	28	0.06	1.346
187	4	60	Suelo tipo 3	20	11	28	0.03	1.386
188	4	60	Suelo tipo 3	20	11	28	0.02	1.400
189	4	60	Suelo tipo 3	20	11	28	0.01	1.414

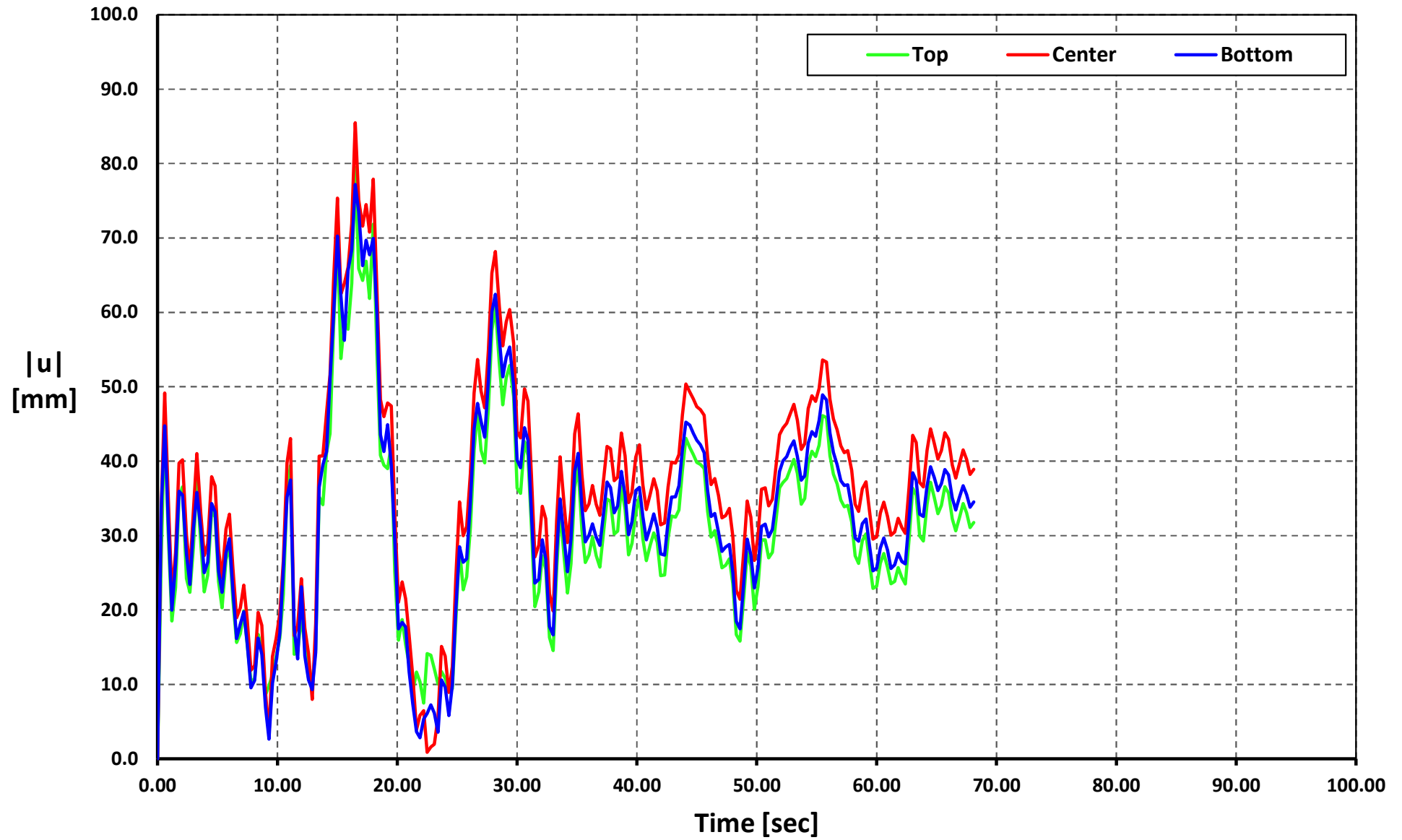
Time vs. |u|

Geometry 01 - Soil Type 1 - APED-E



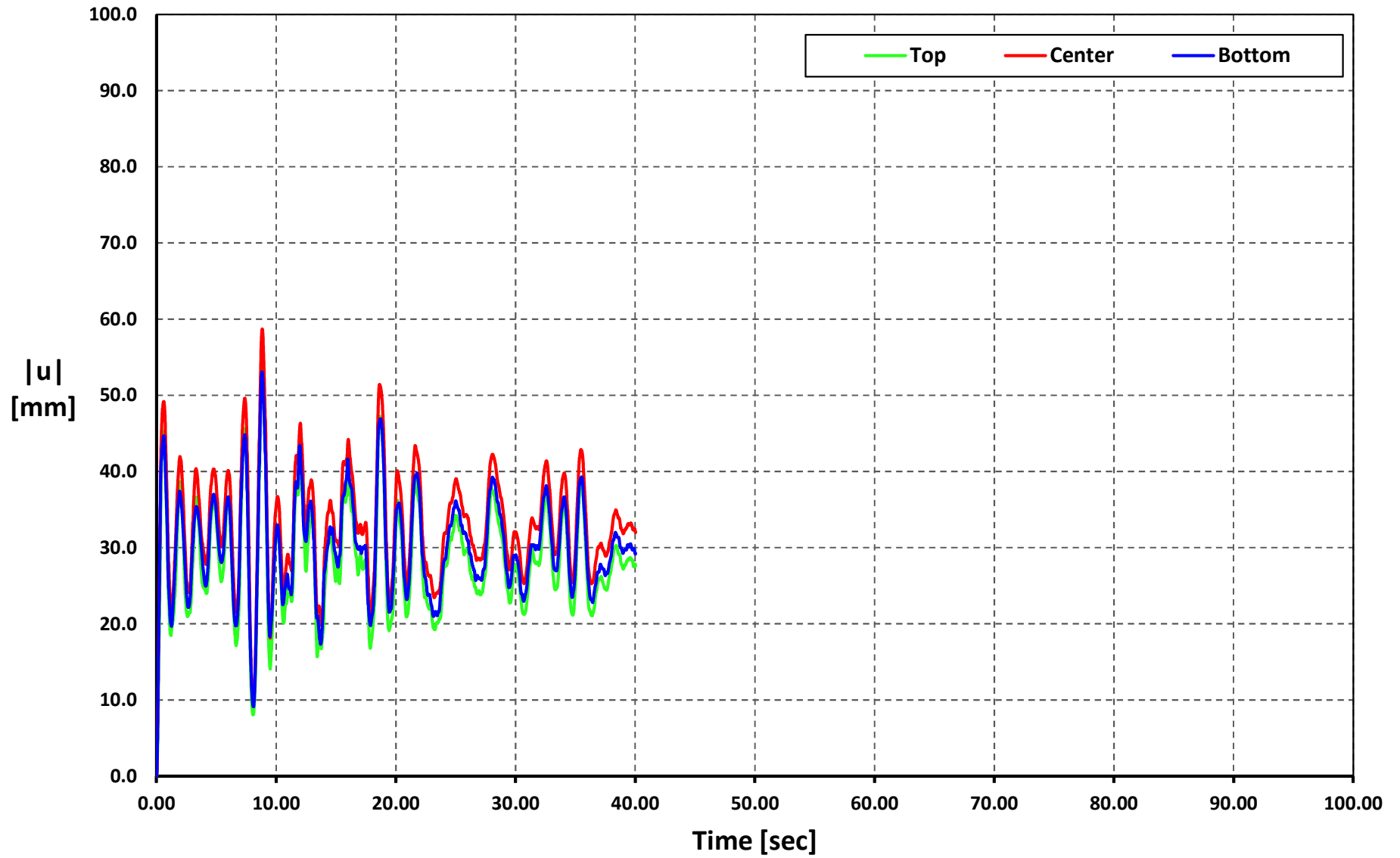
Time vs. |u|

Geometry 01 - Soil Type 1 - APO1-N



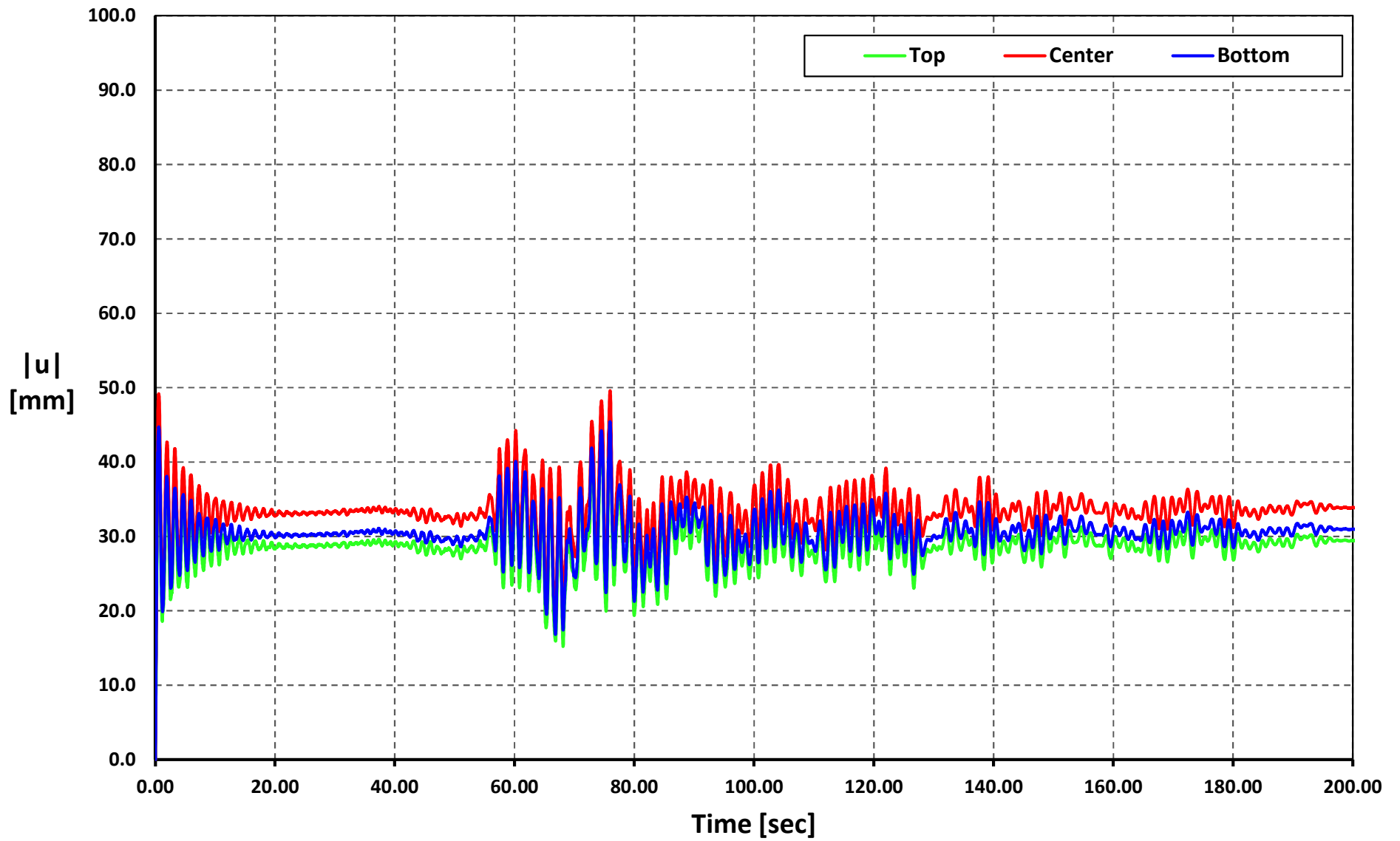
Time vs. |u|

Geometry 01 - Soil Type 1 - AMNT-N



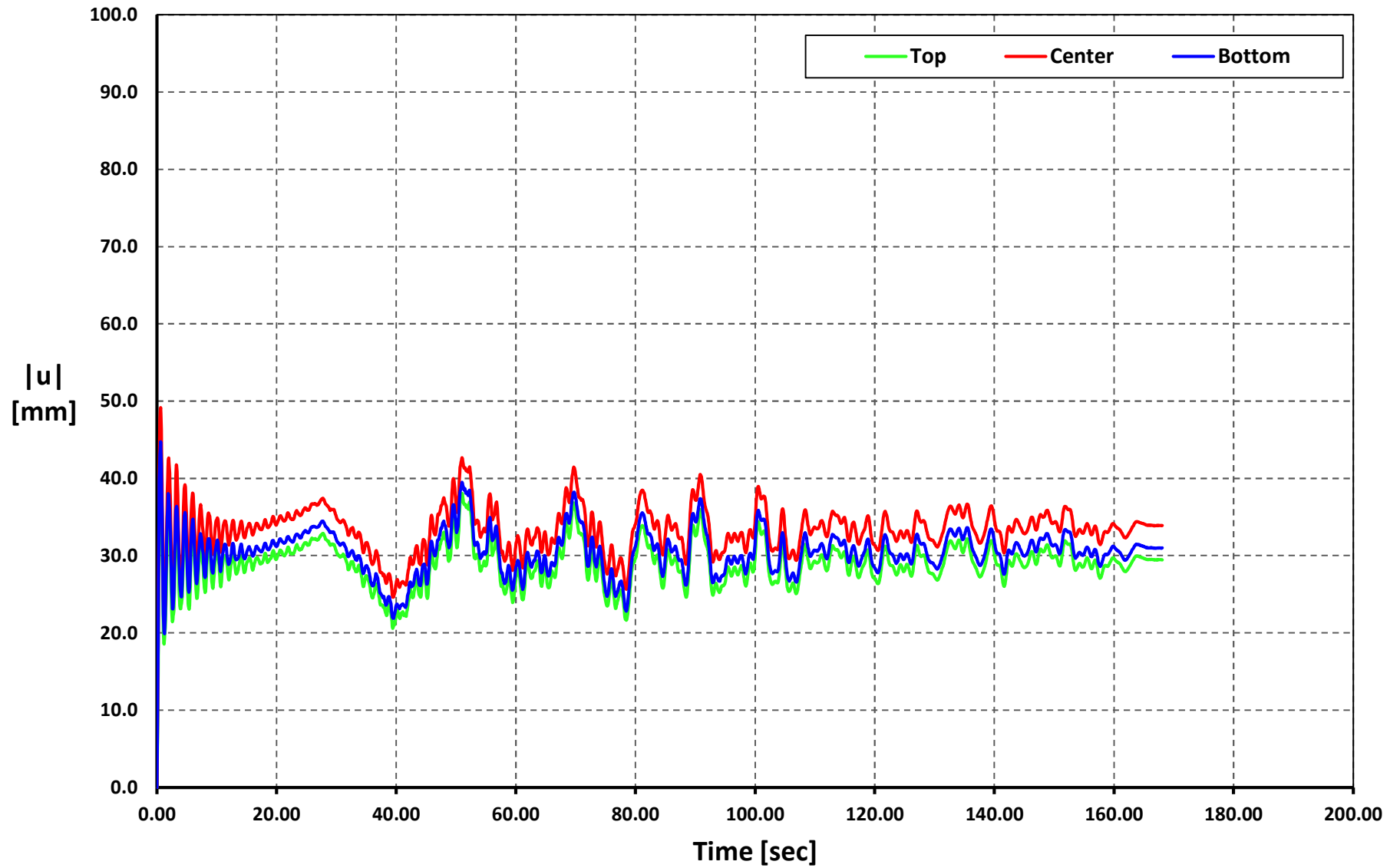
Time vs. |u|

Geometry 01 - Soil Type 1 - AGY2-N



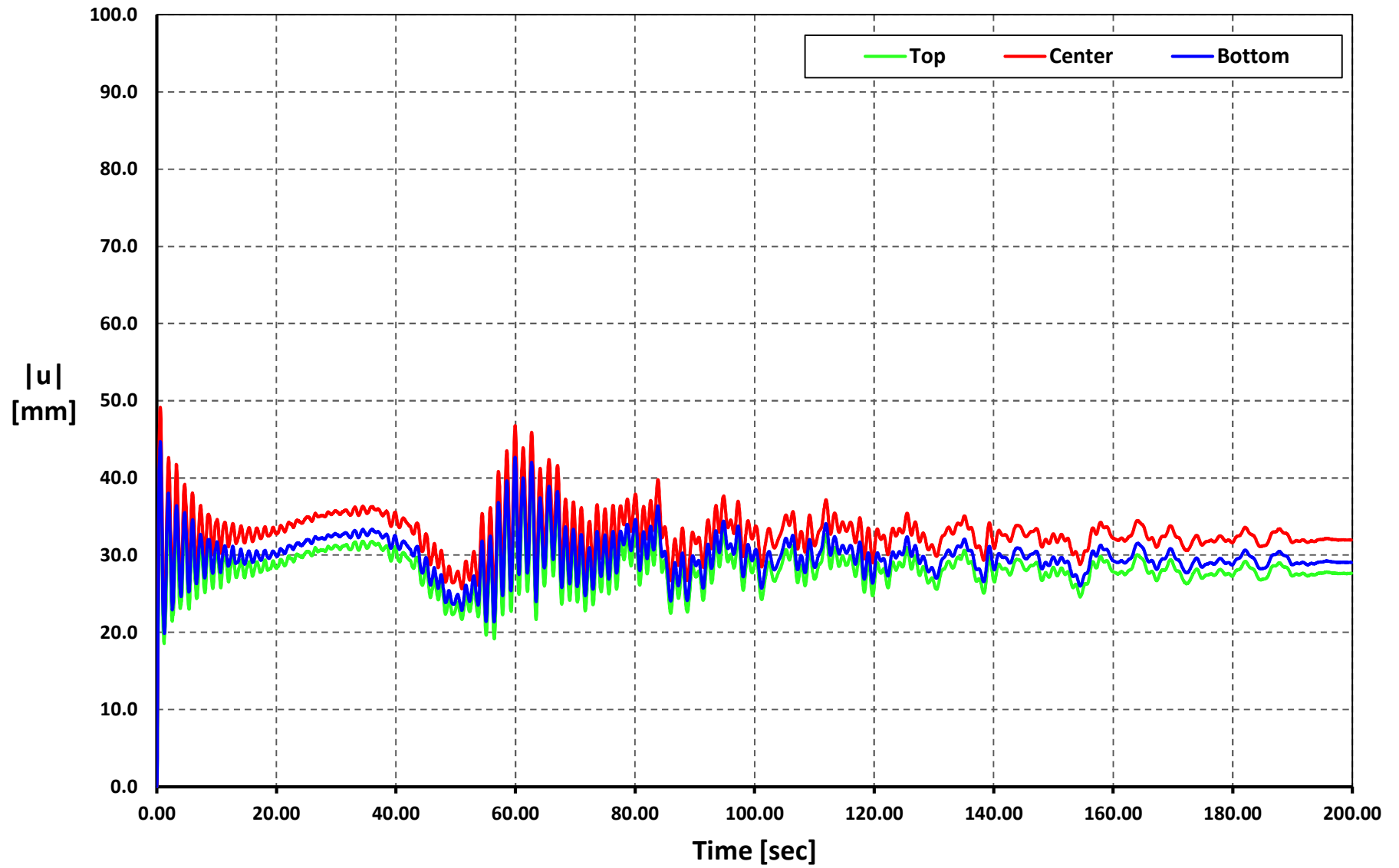
Time vs. $|u|$

Geometry 01 - Soil Type 1 - AMIL-E



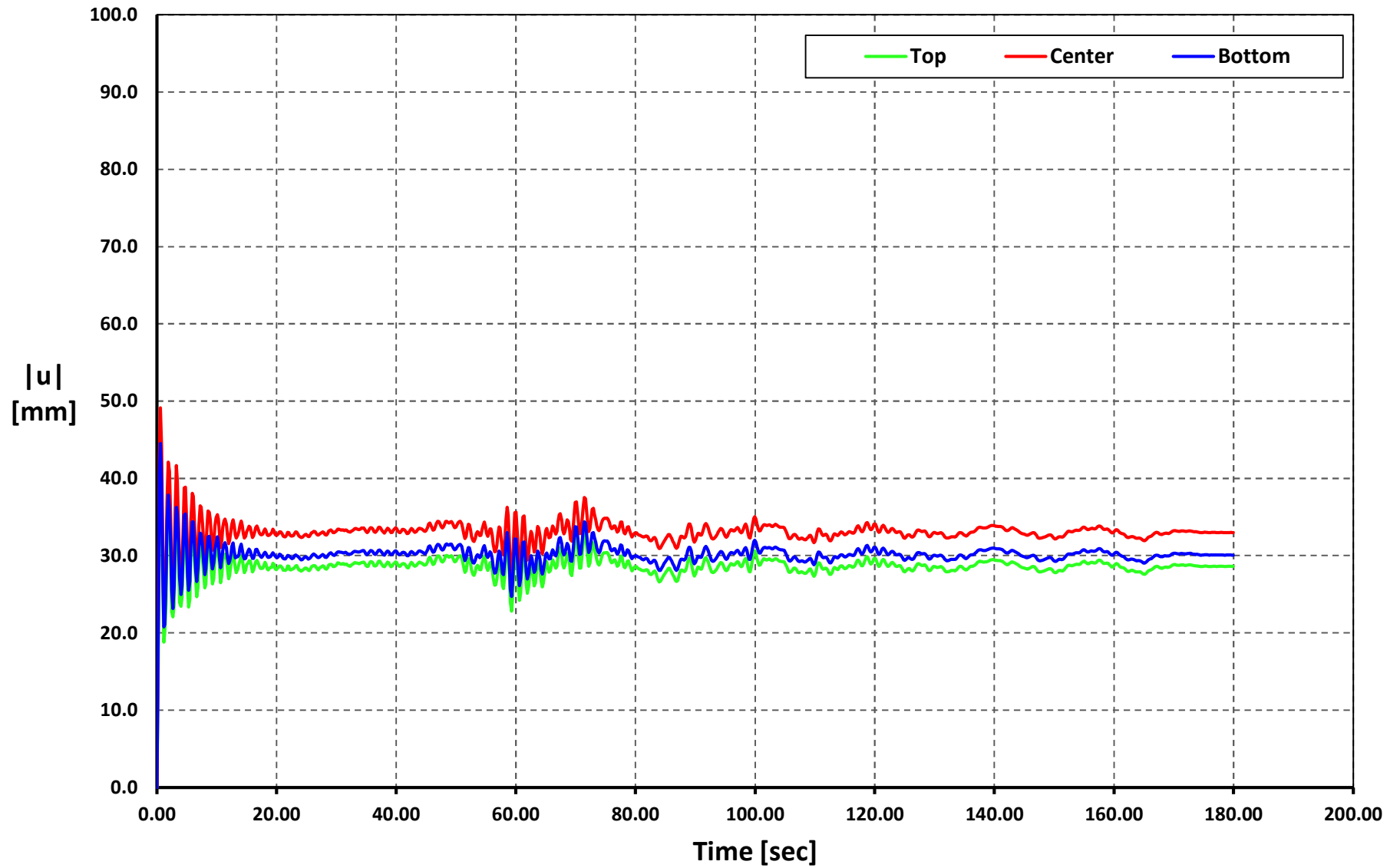
Time vs. |u|

Geometry 01 - Soil Type 1 - ACUE-E



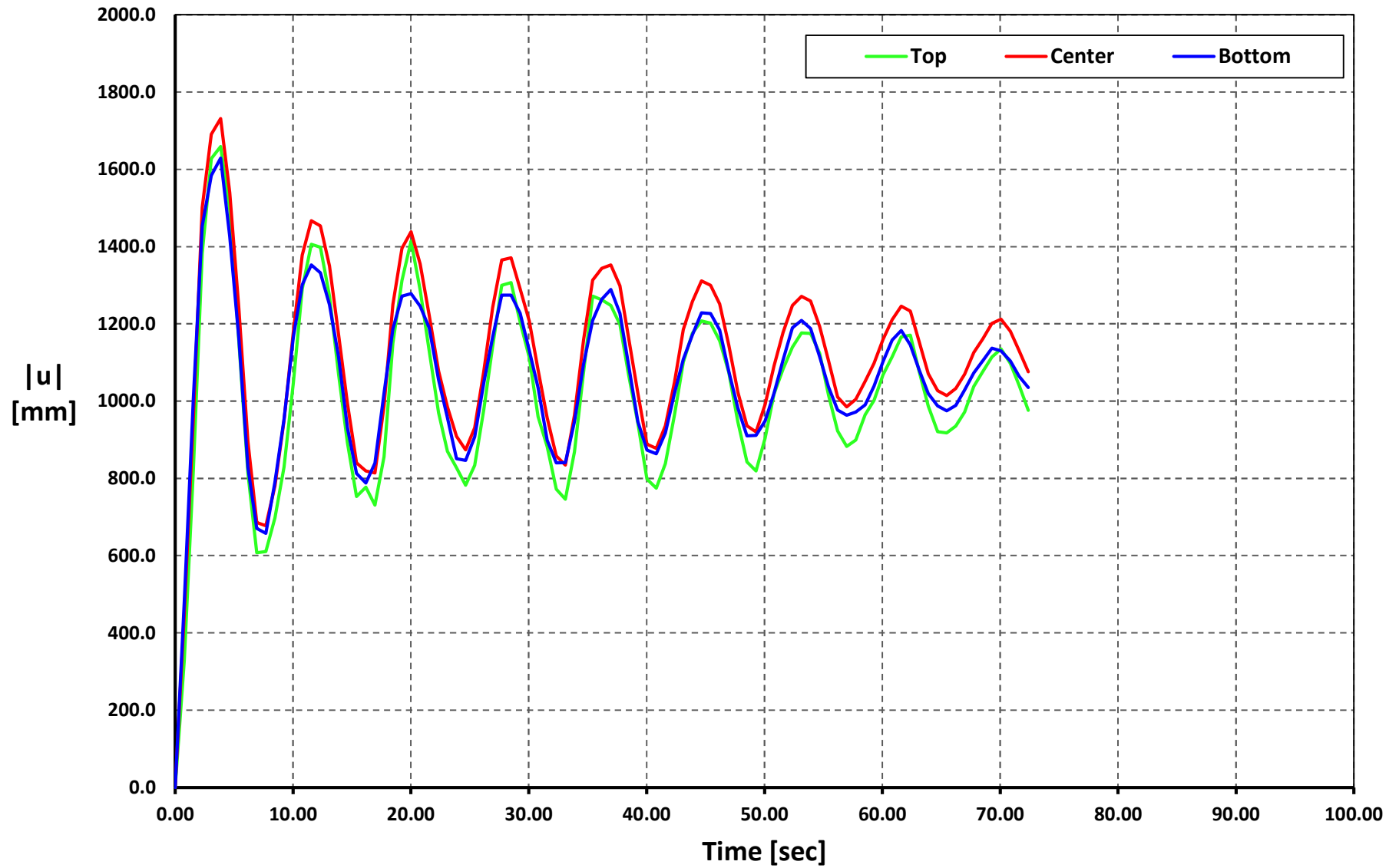
Time vs. $|u|$

Geometry 01 - Soil Type 1 - ALJ1-N



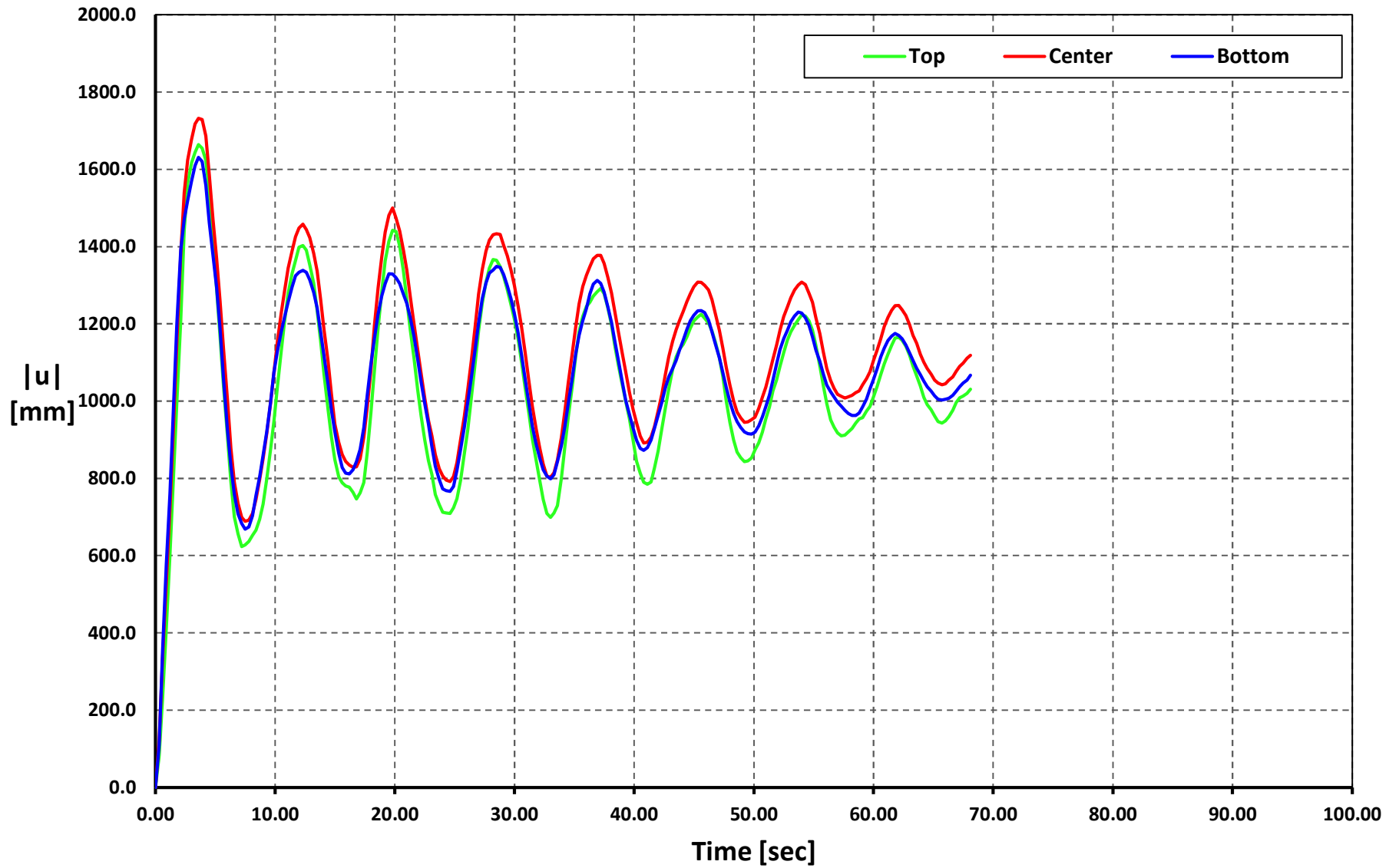
Time vs. $|u|$

Geometry 01 - Soil Type 2 - APED-E



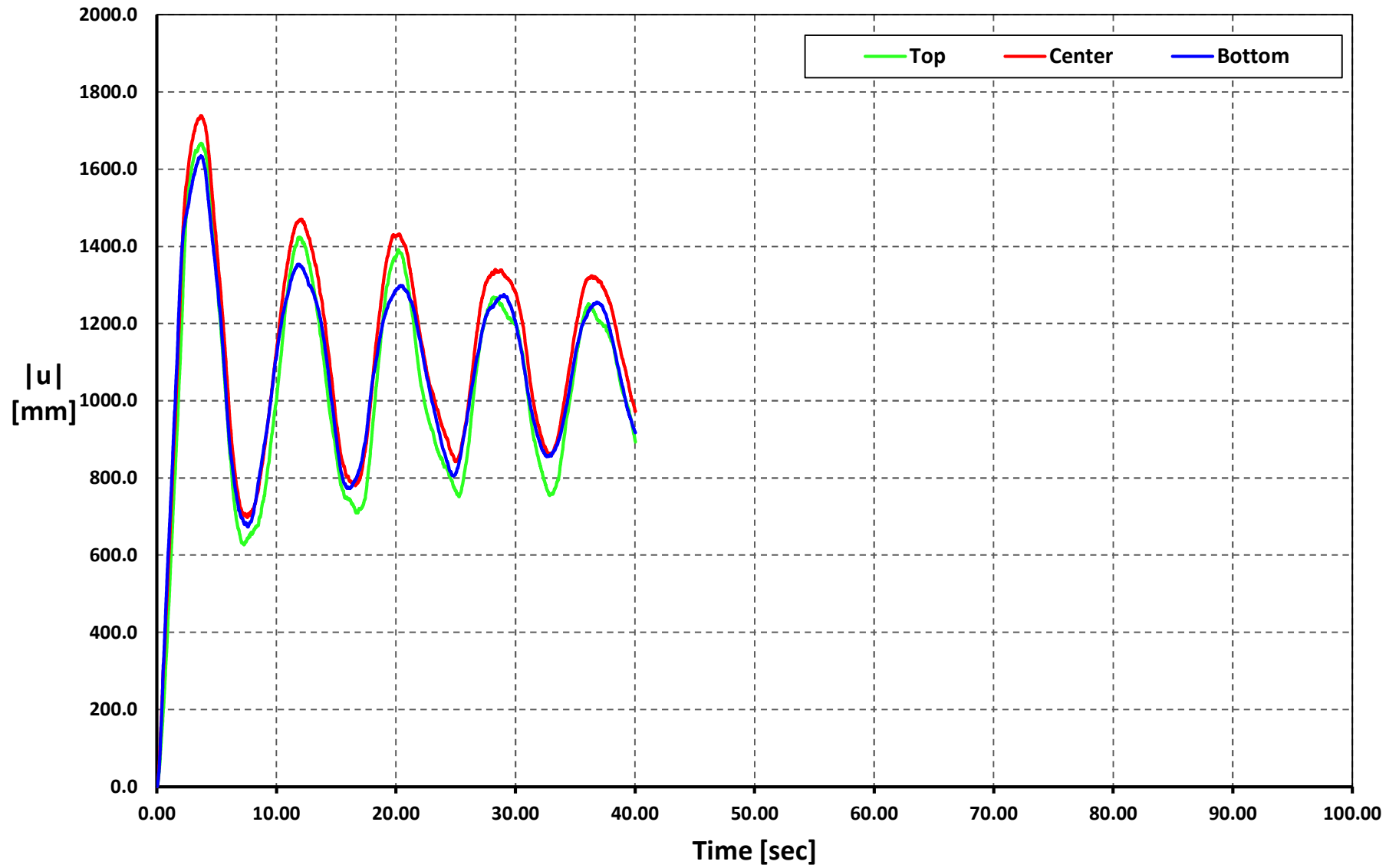
Time vs. |u|

Geometry 01 - Soil Type 2 - APO1-N



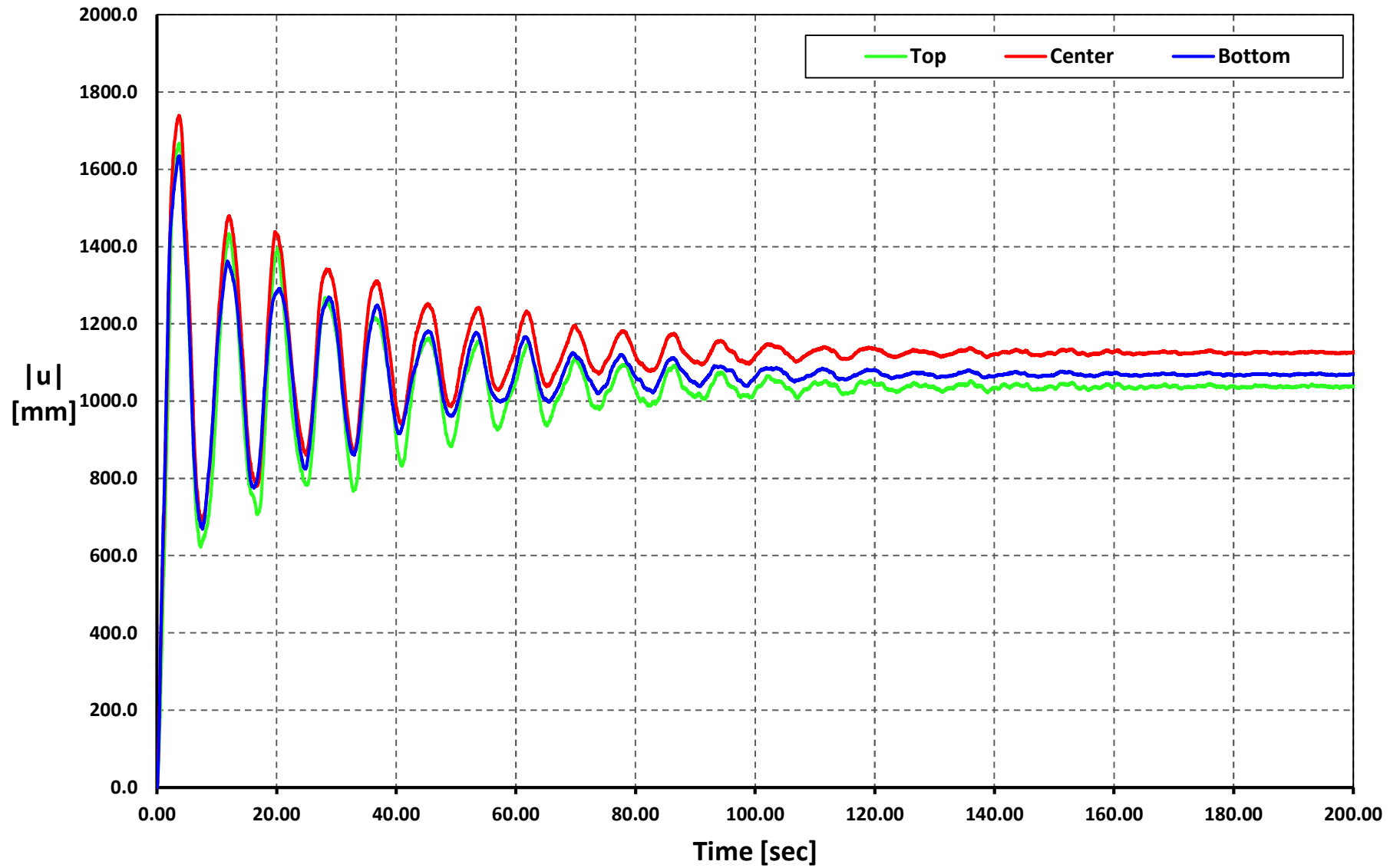
Time vs. |u|

Geometry 01 - Soil Type 2 - AMNT-N



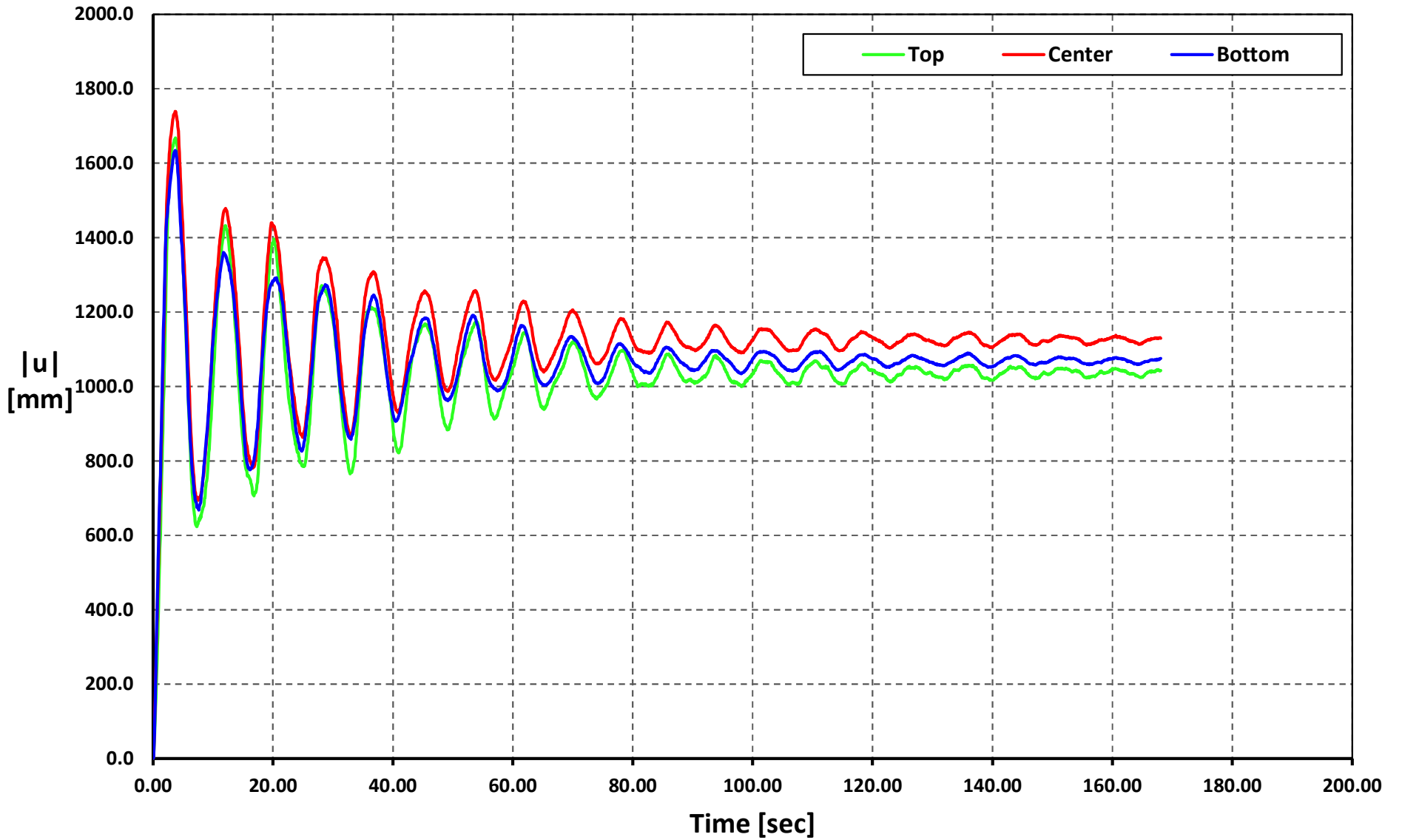
Time vs. $|u|$

Geometry 01 - Soil Type 2 - AGY2-N



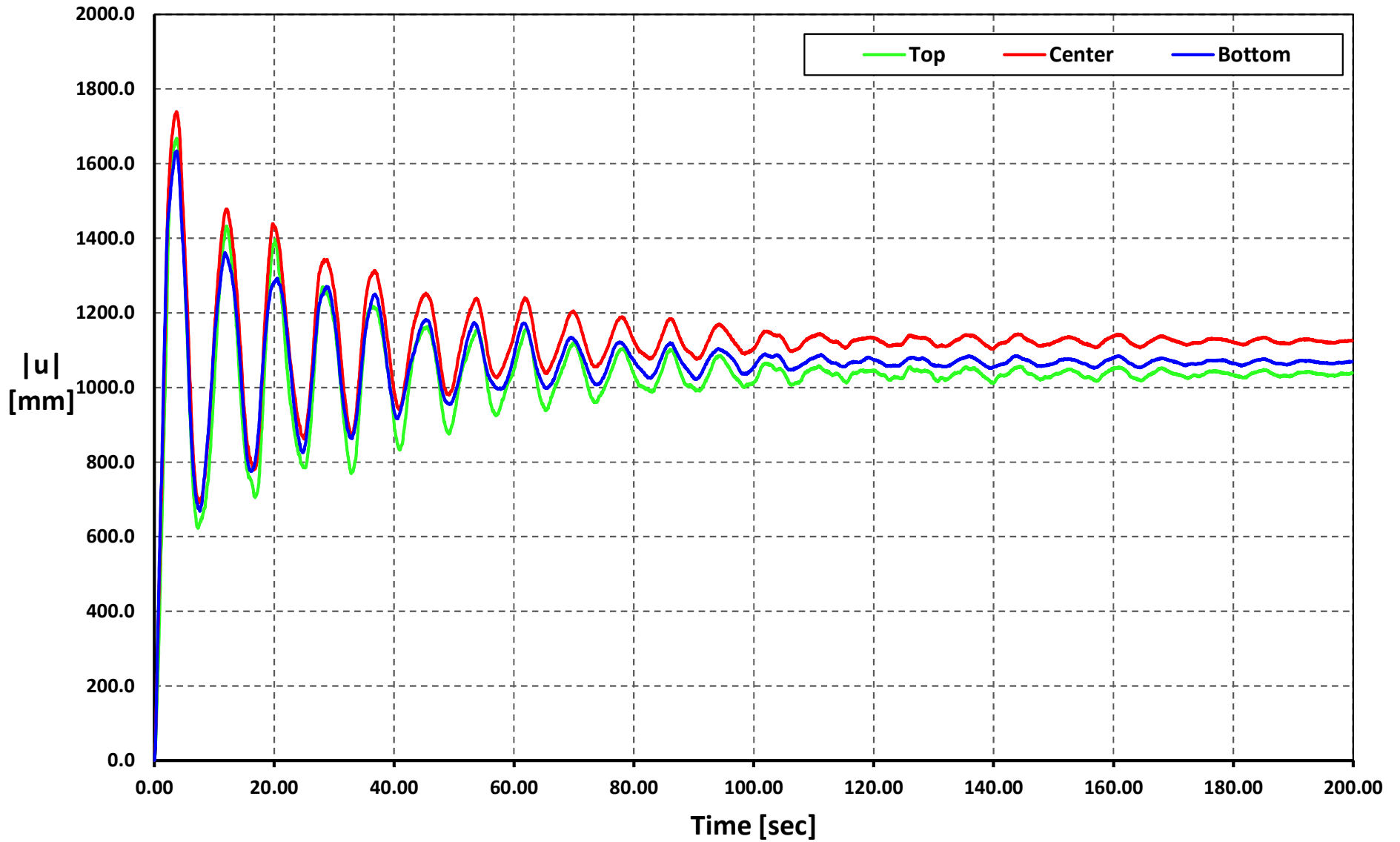
Time vs. |u|

Geometry 01 - Soil Type 2 - AMIL-E



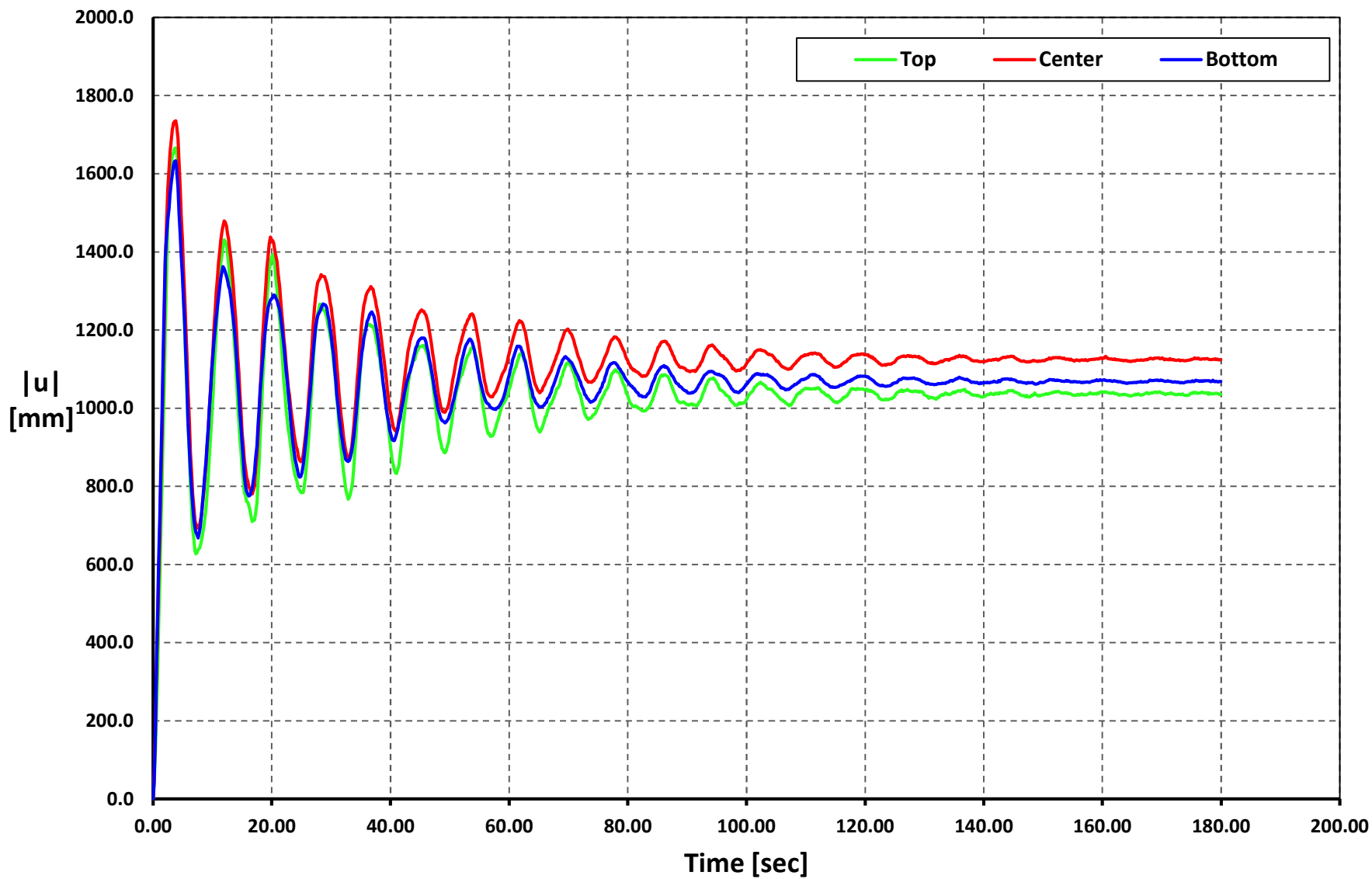
Time vs. |u|

Geometry 01 - Soil Type 2 - ACUE-E



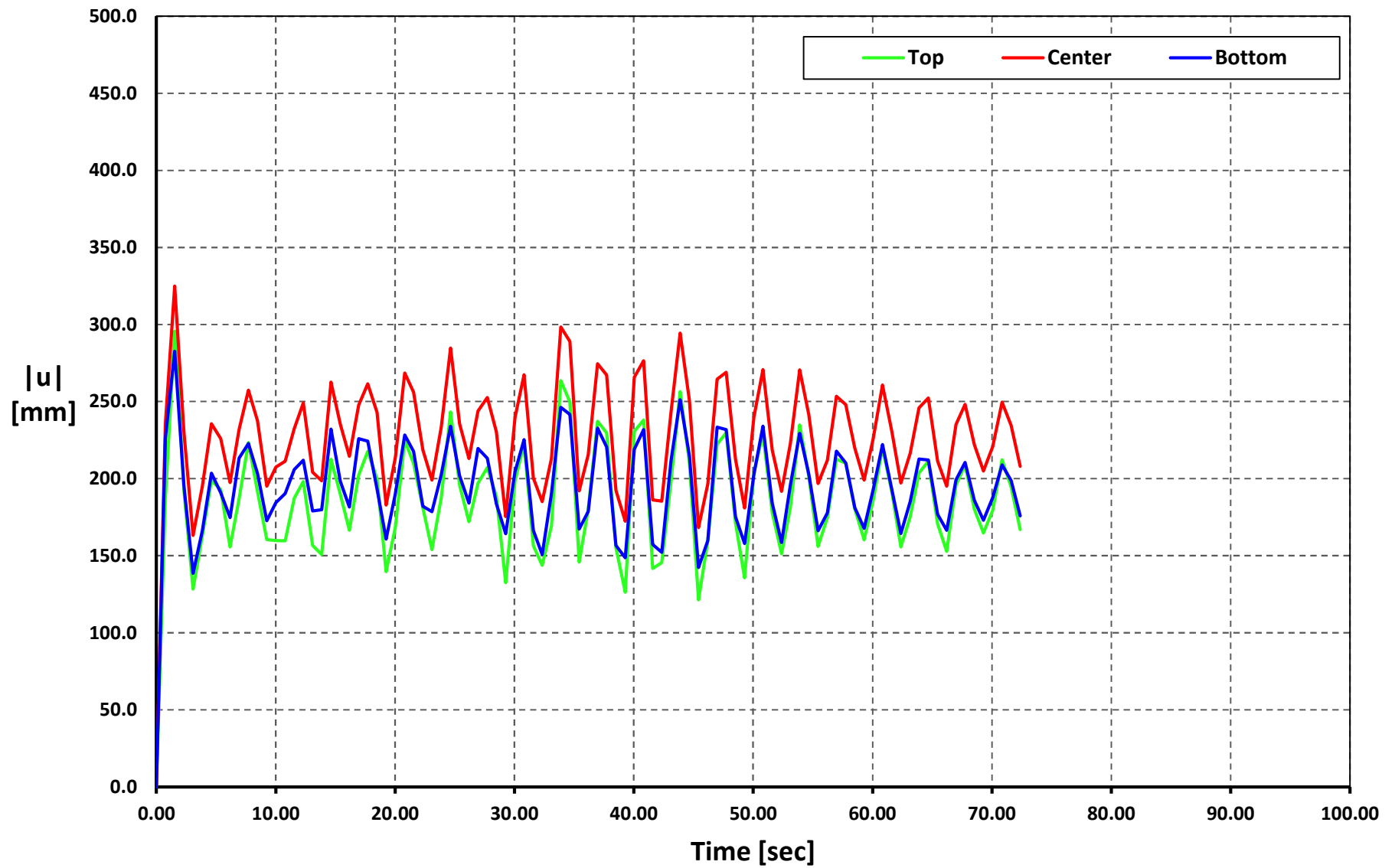
Time vs. $|u|$

Geometry 01 - Soil Type 2 - ALJ1-N



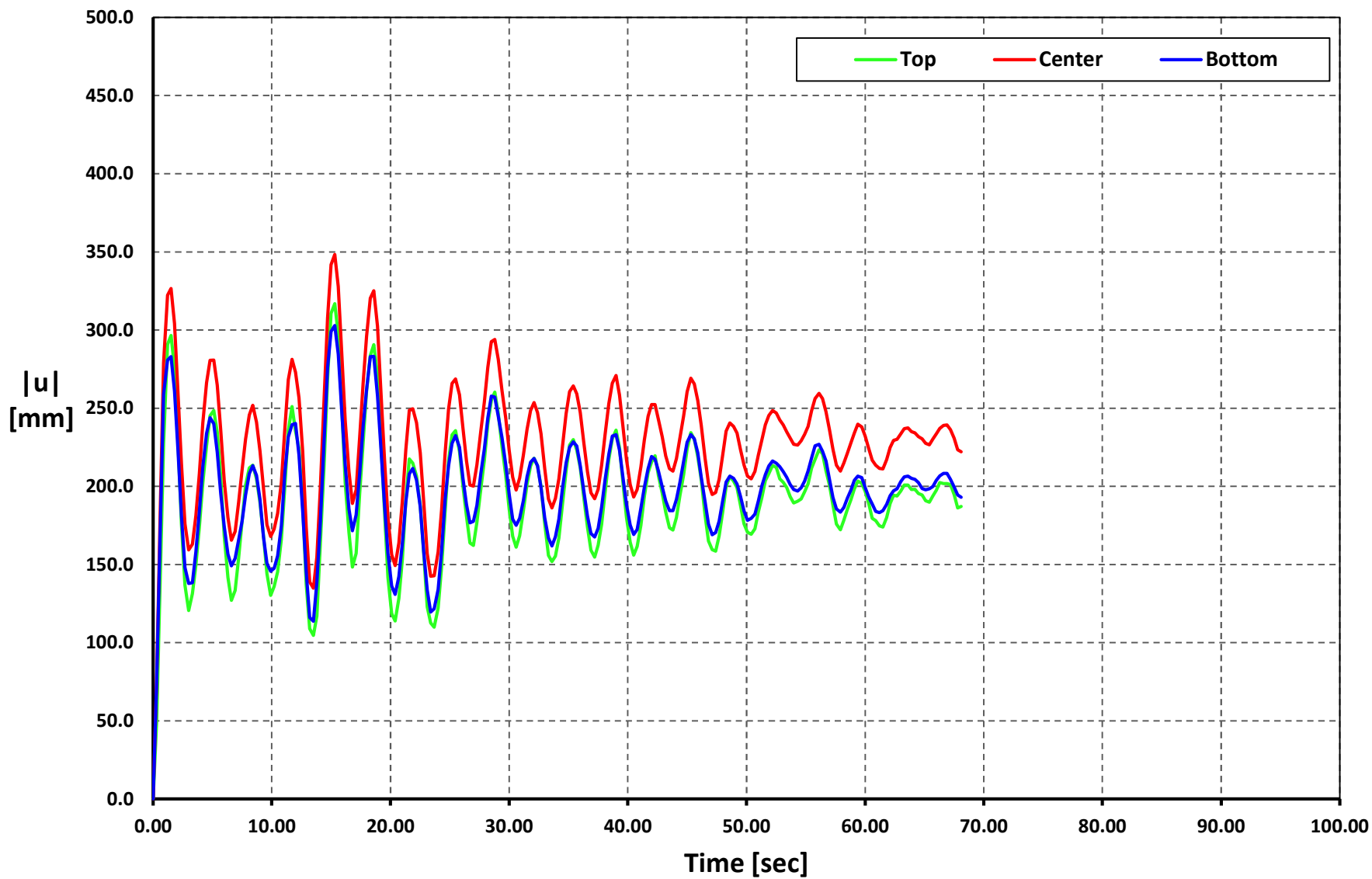
Time vs. |u|

Geometry 01 - Soil Type 3 - APED-E



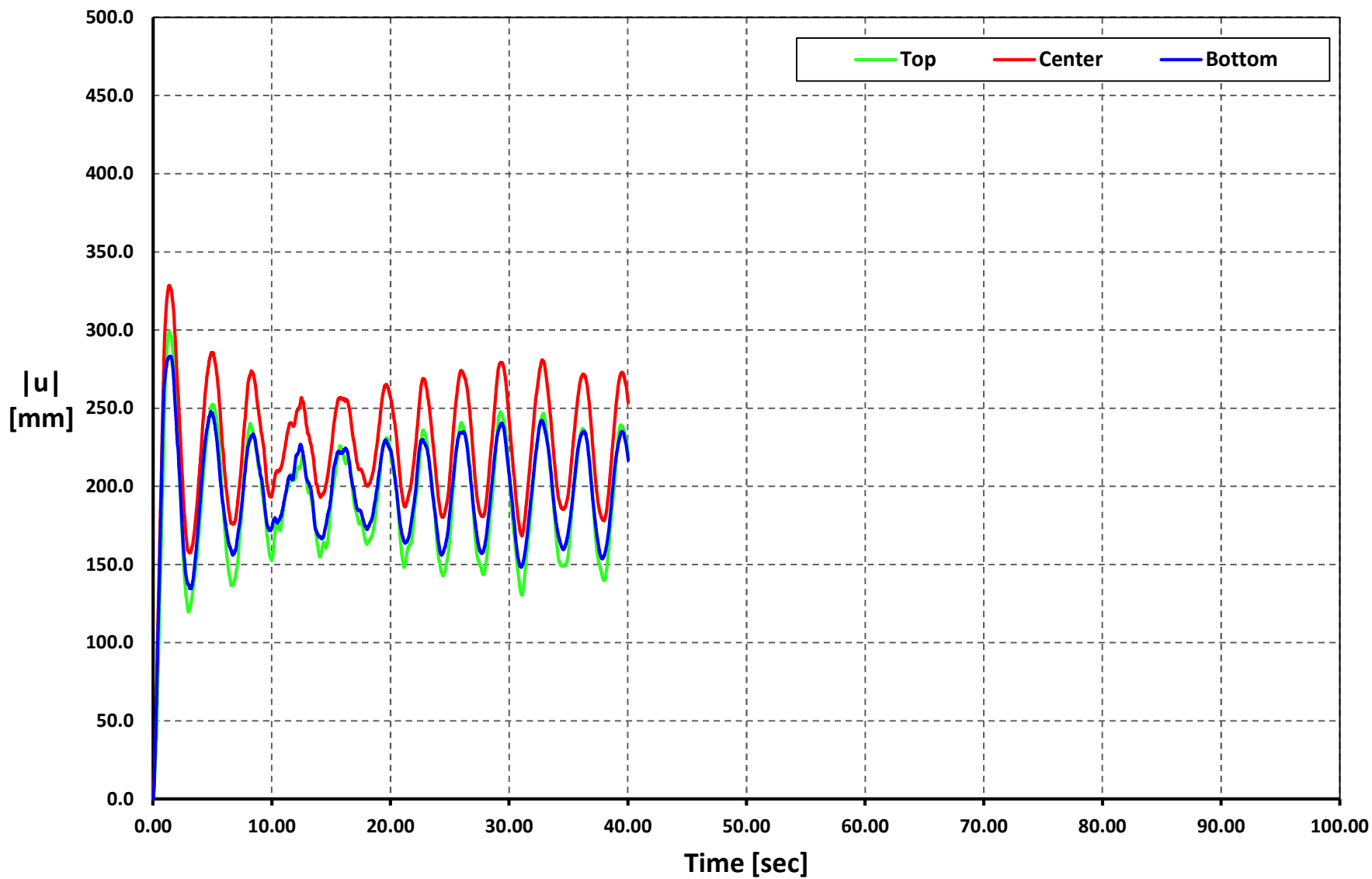
Time vs. $|u|$

Geometry 01 - Soil Type 3 - APO1-N



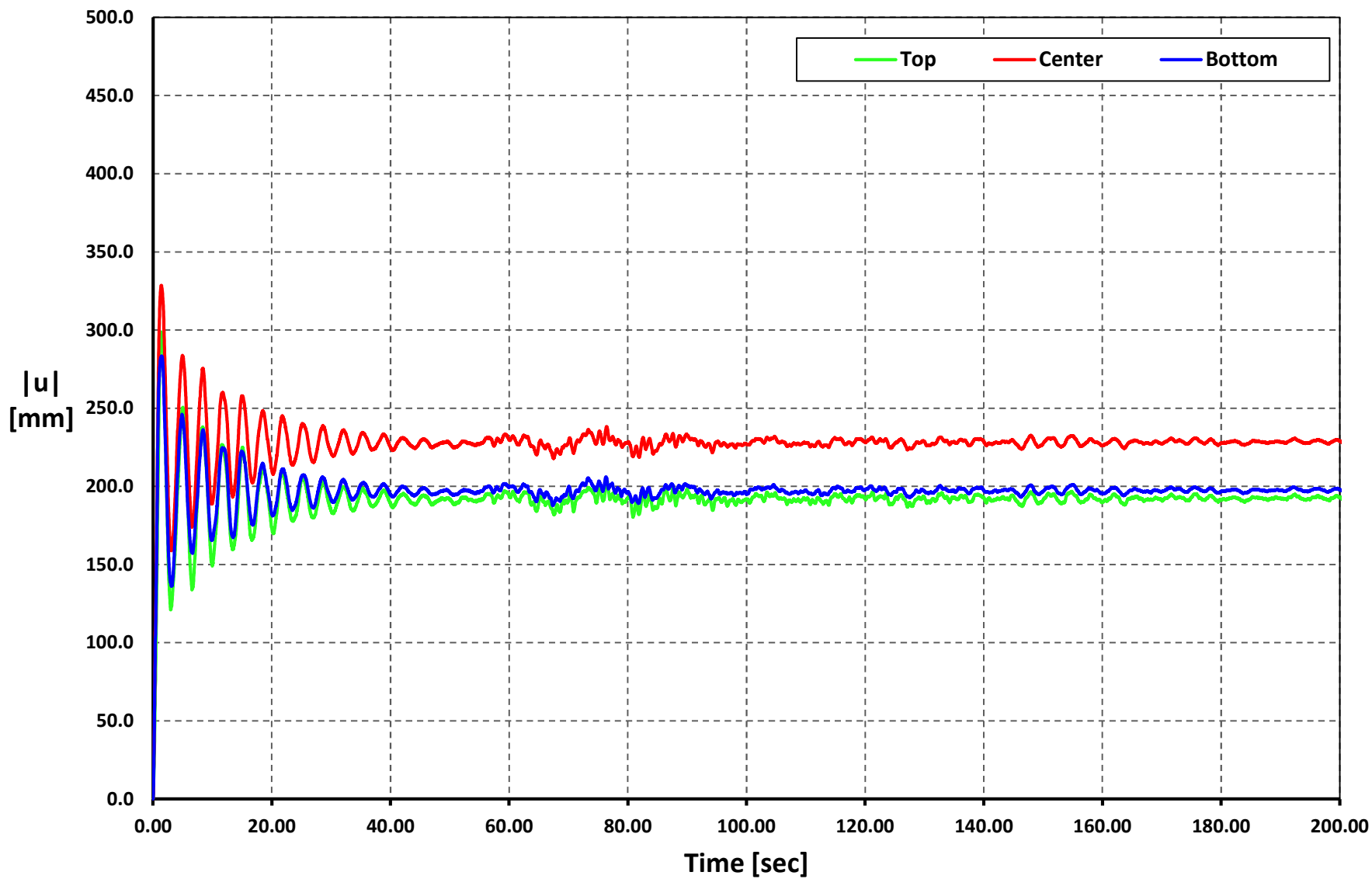
Time vs. |u|

Geometry 01 - Soil Type 3 - AMNT-N



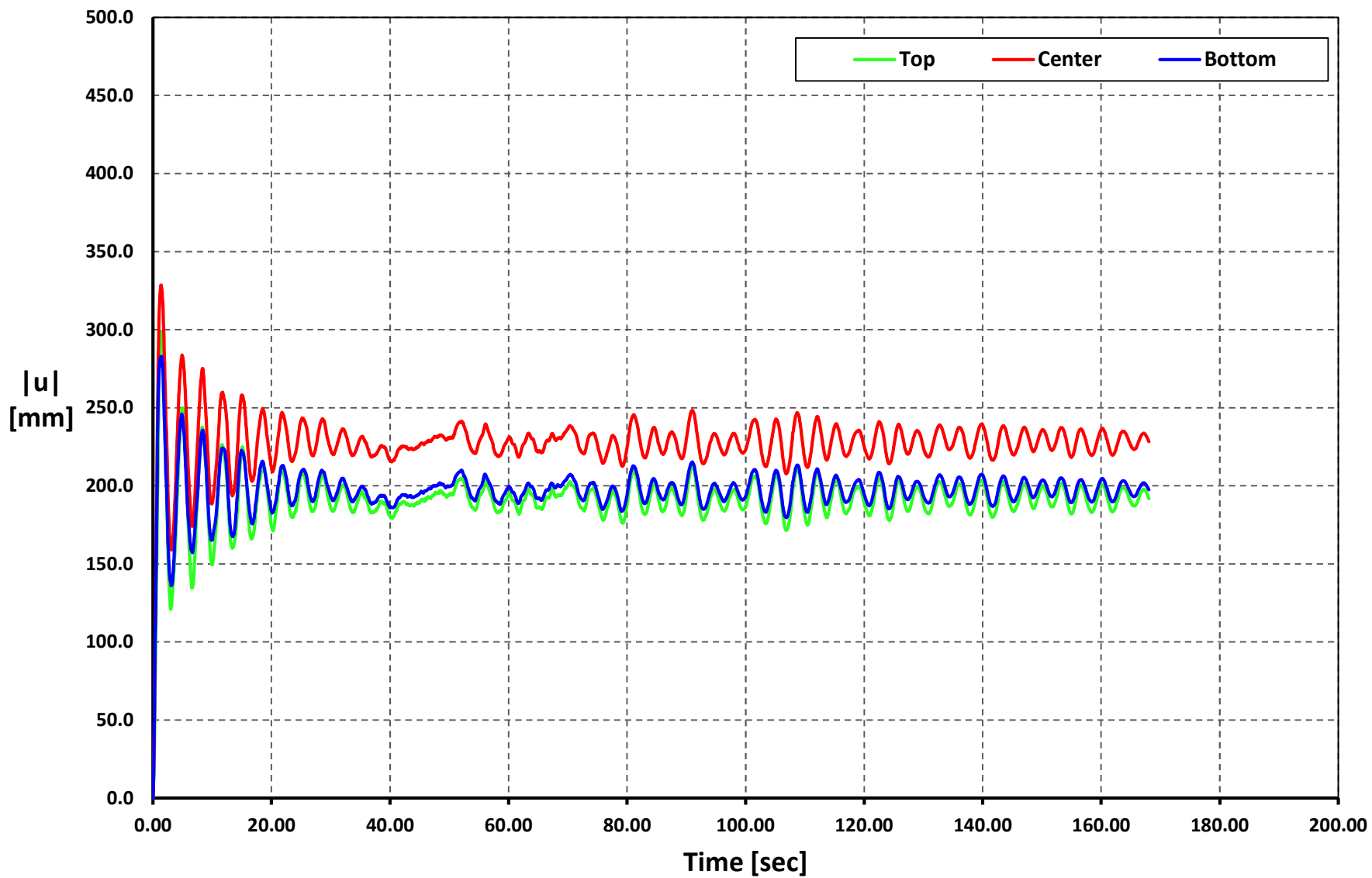
Time vs. $|u|$

Geometry 01 - Soil Type 3 - AGY2-N



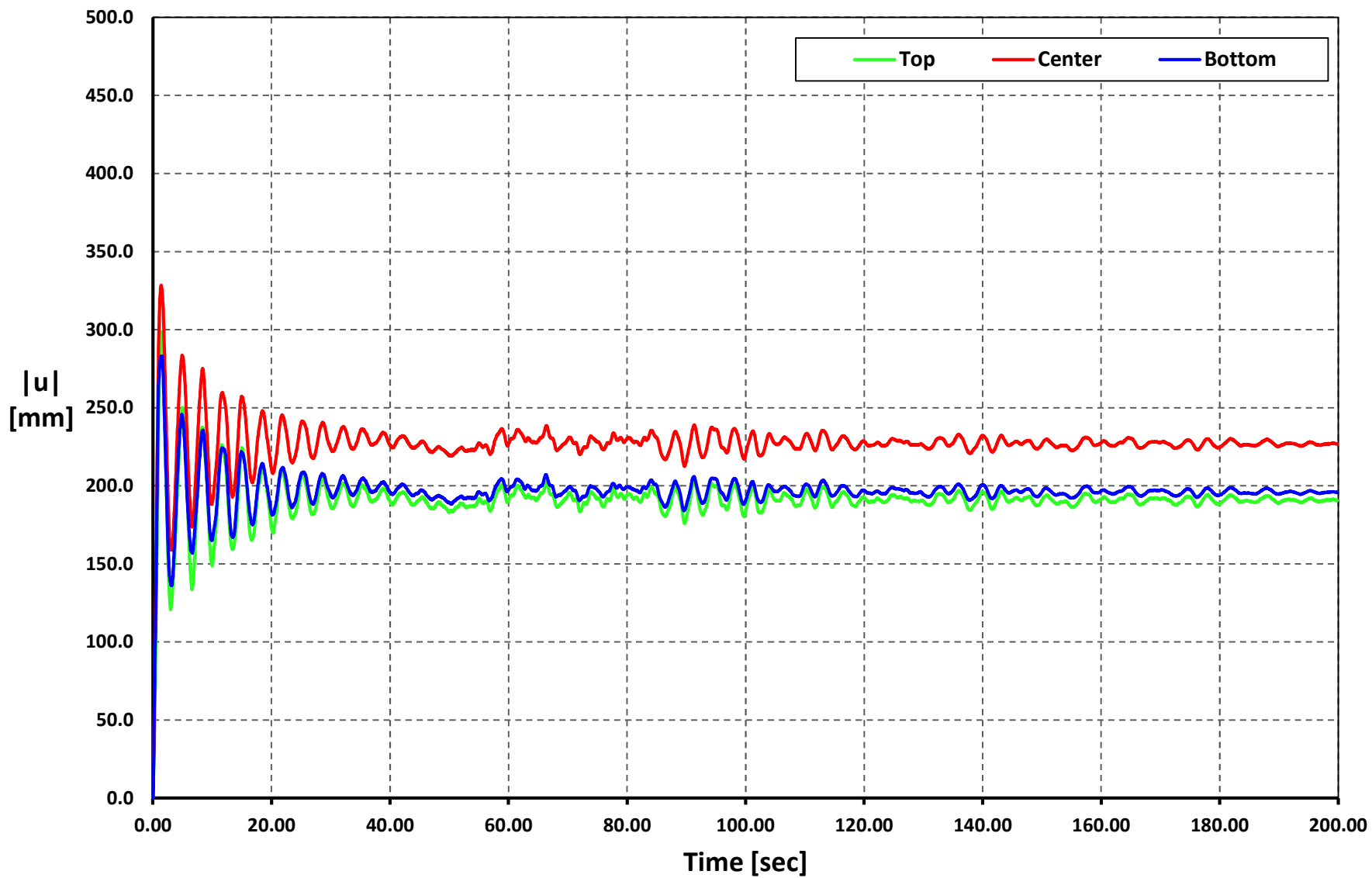
Time vs. $|u|$

Geometry 01 - Soil Type 3 - AMIL-E



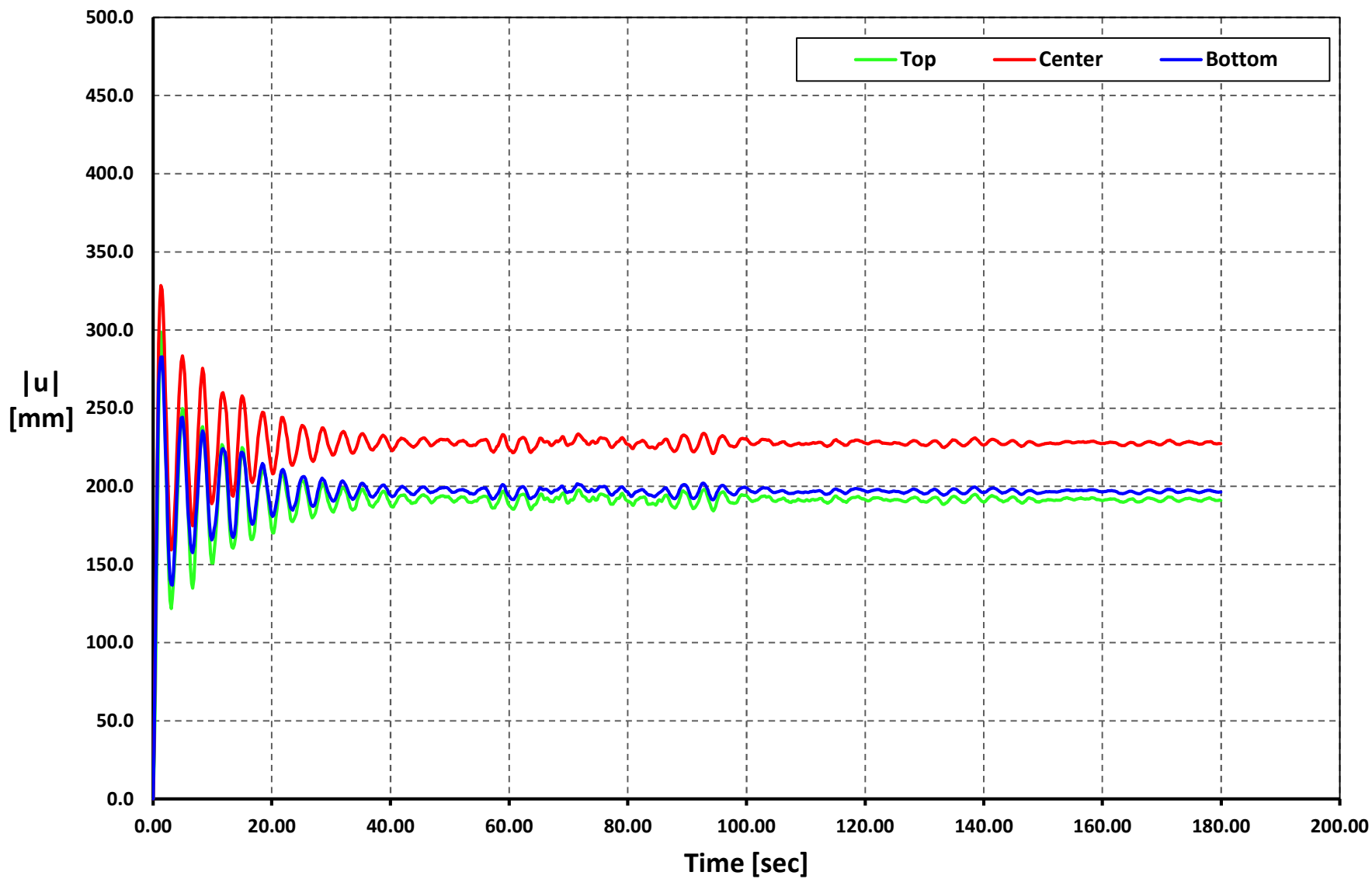
Time vs. $|u|$

Geometry 01 - Soil Type 3 - ACUE-E



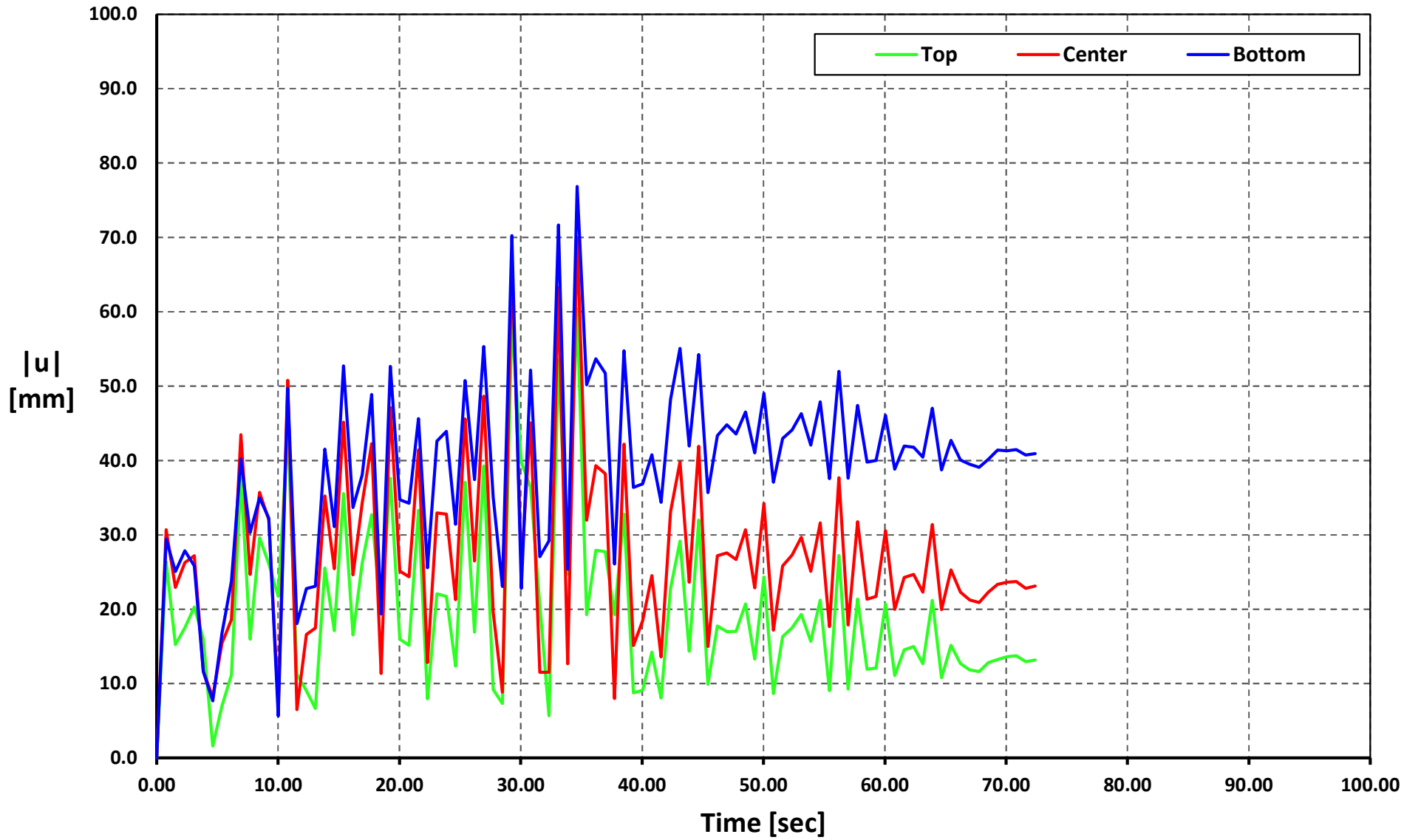
Time vs. $|u|$

Geometry 01 - Soil Type 3 - ALJ1-N



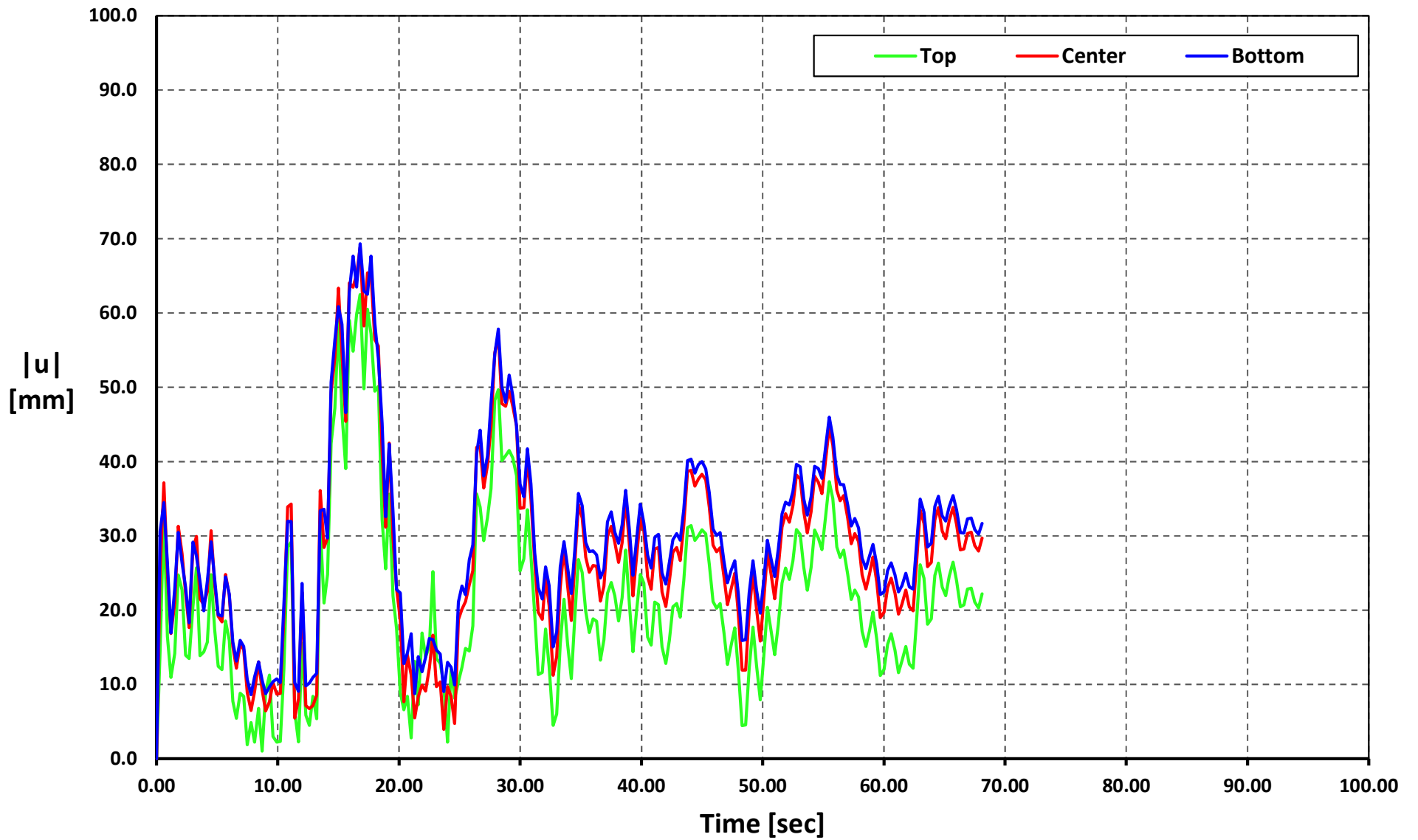
Time vs. |u|

Geometry 02 - Soil Type 1 - APED-E



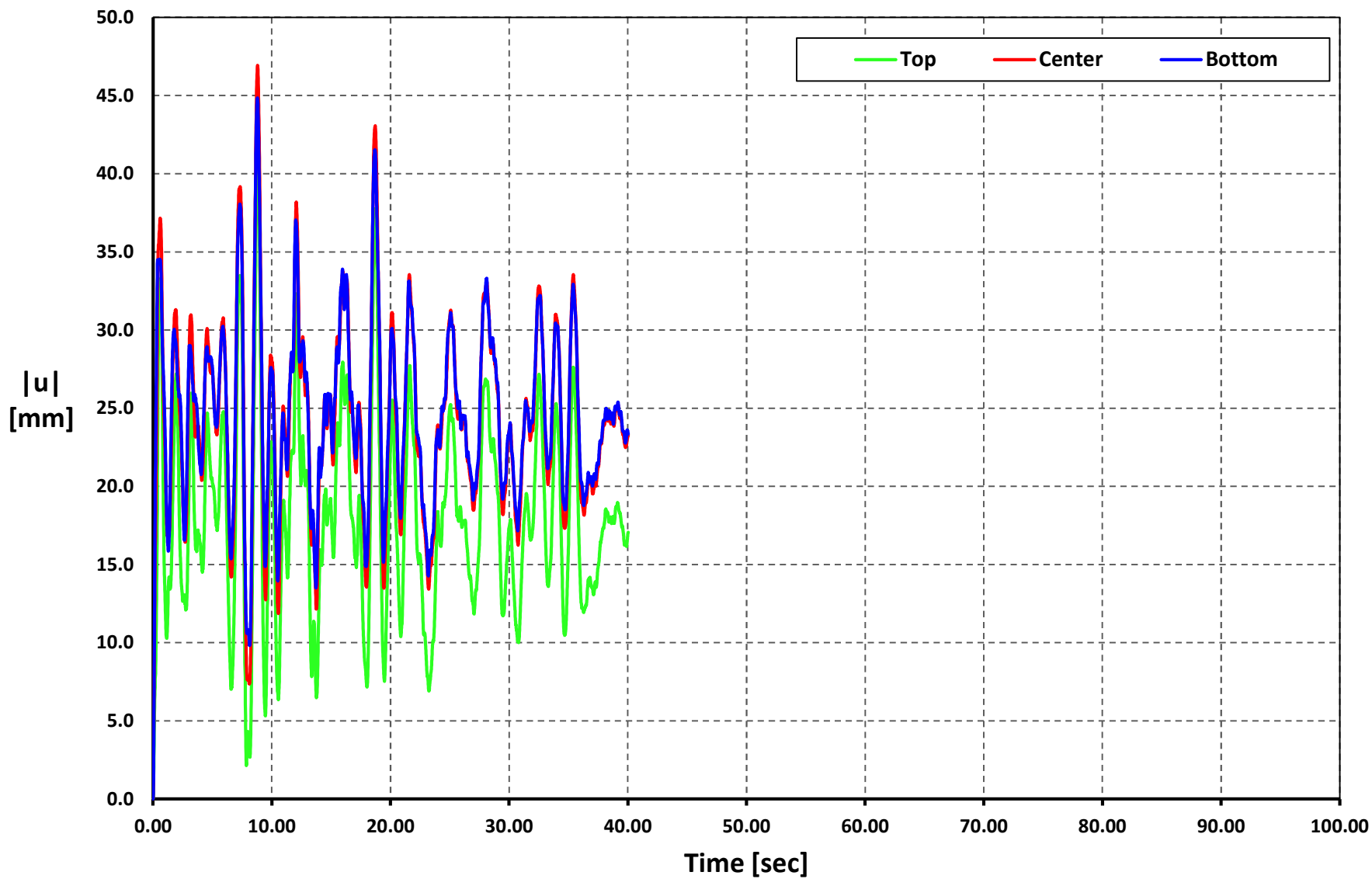
Time vs. |u|

Geometry 02 - Soil Type 1 - APO1-N



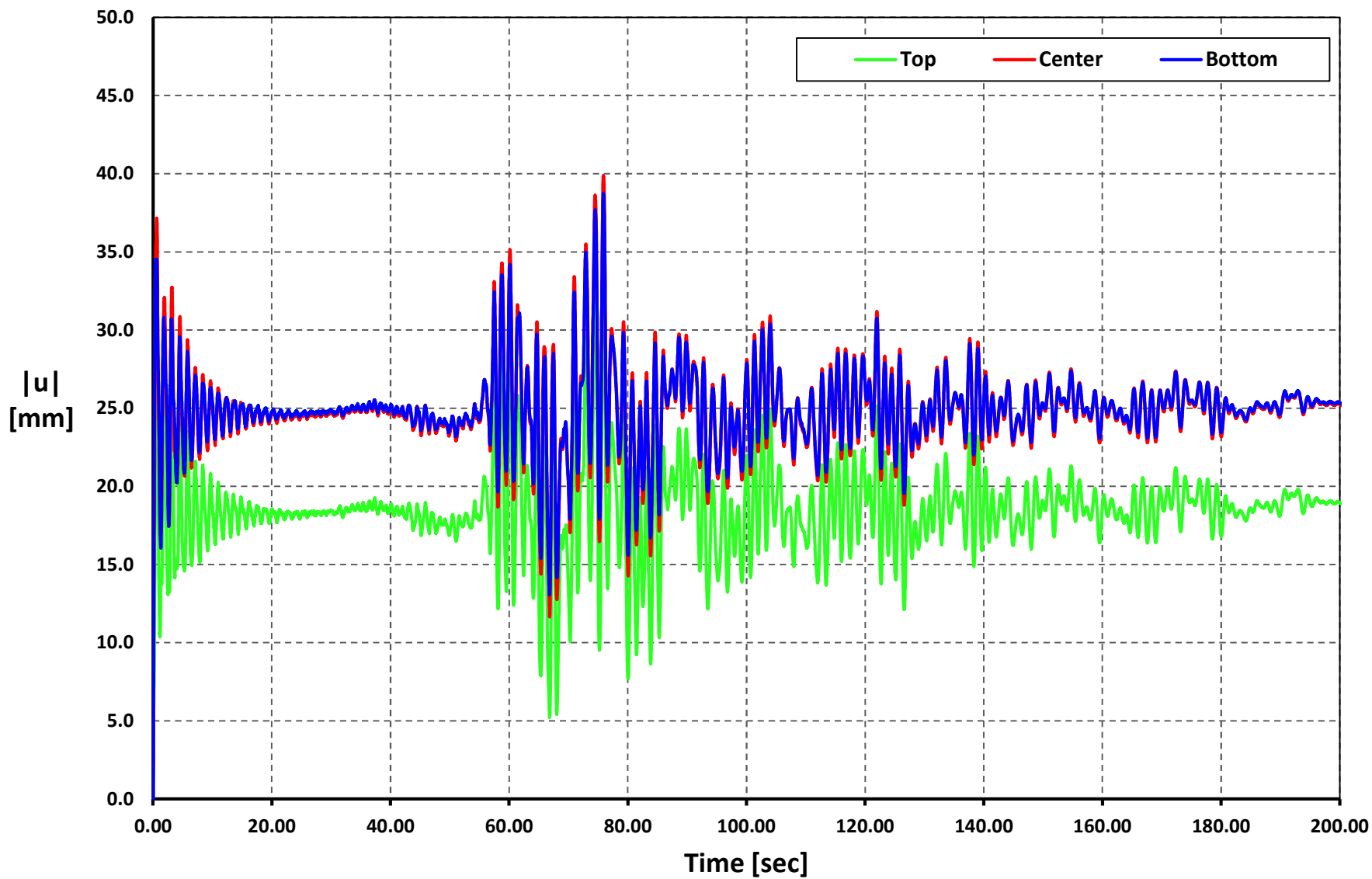
Time vs. |u|

Geometry 02 - Soil Type 1 - AMNT-N



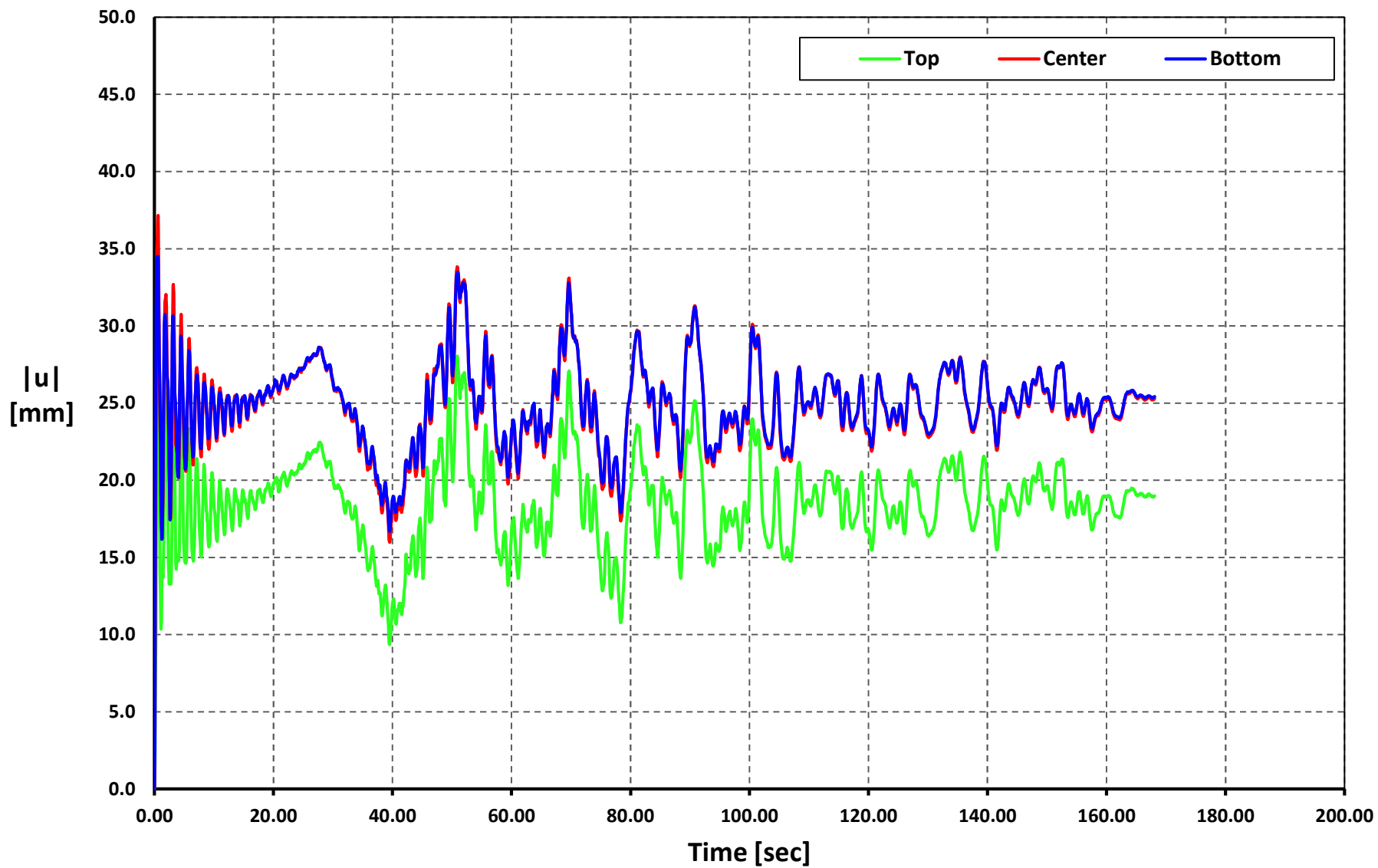
Time vs. $|u|$

Geometry 02 - Soil Type 1 - AGY2-N



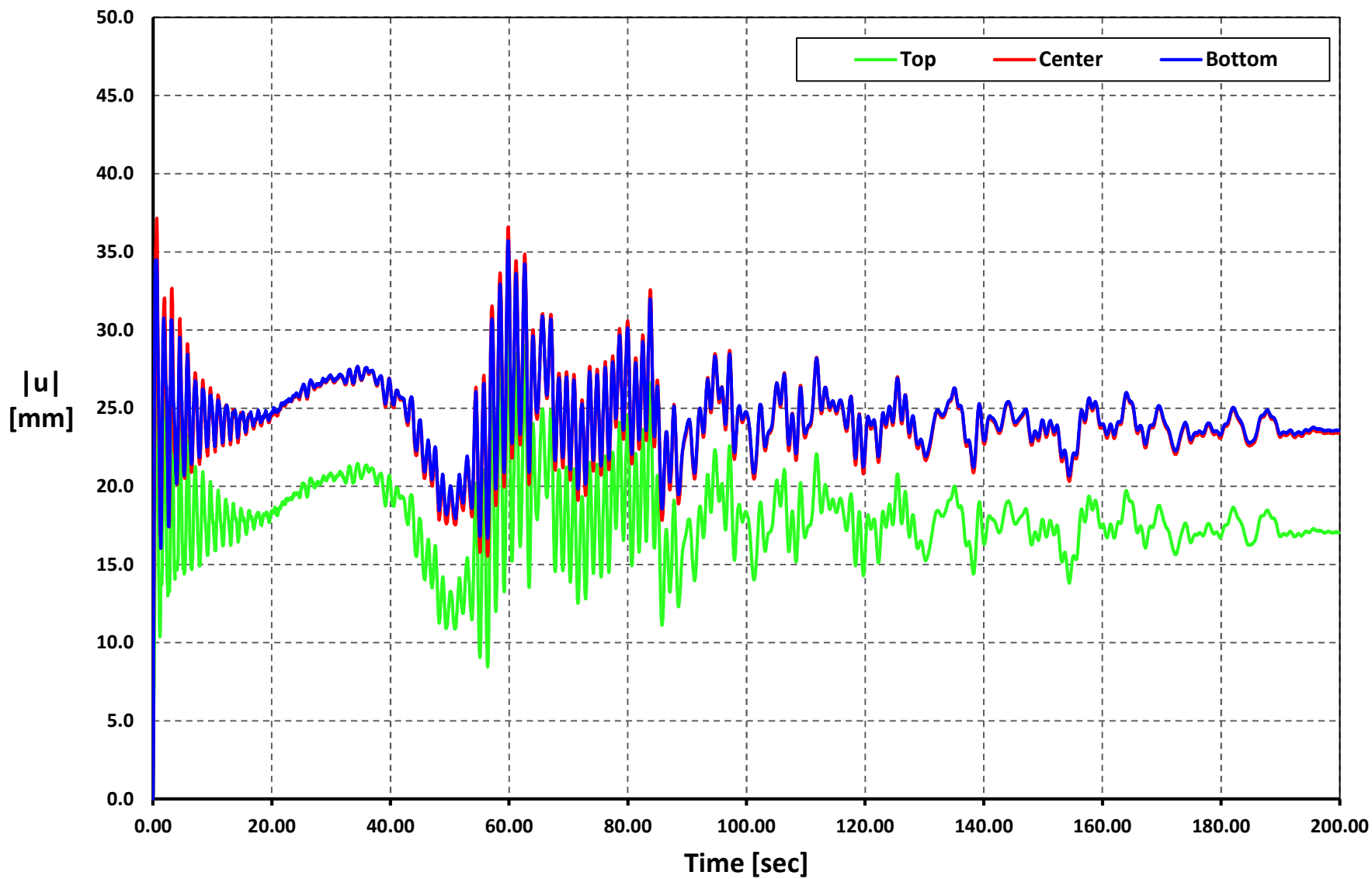
Time vs. |u|

Geometry 02 - Soil Type 1 - AMIL-E



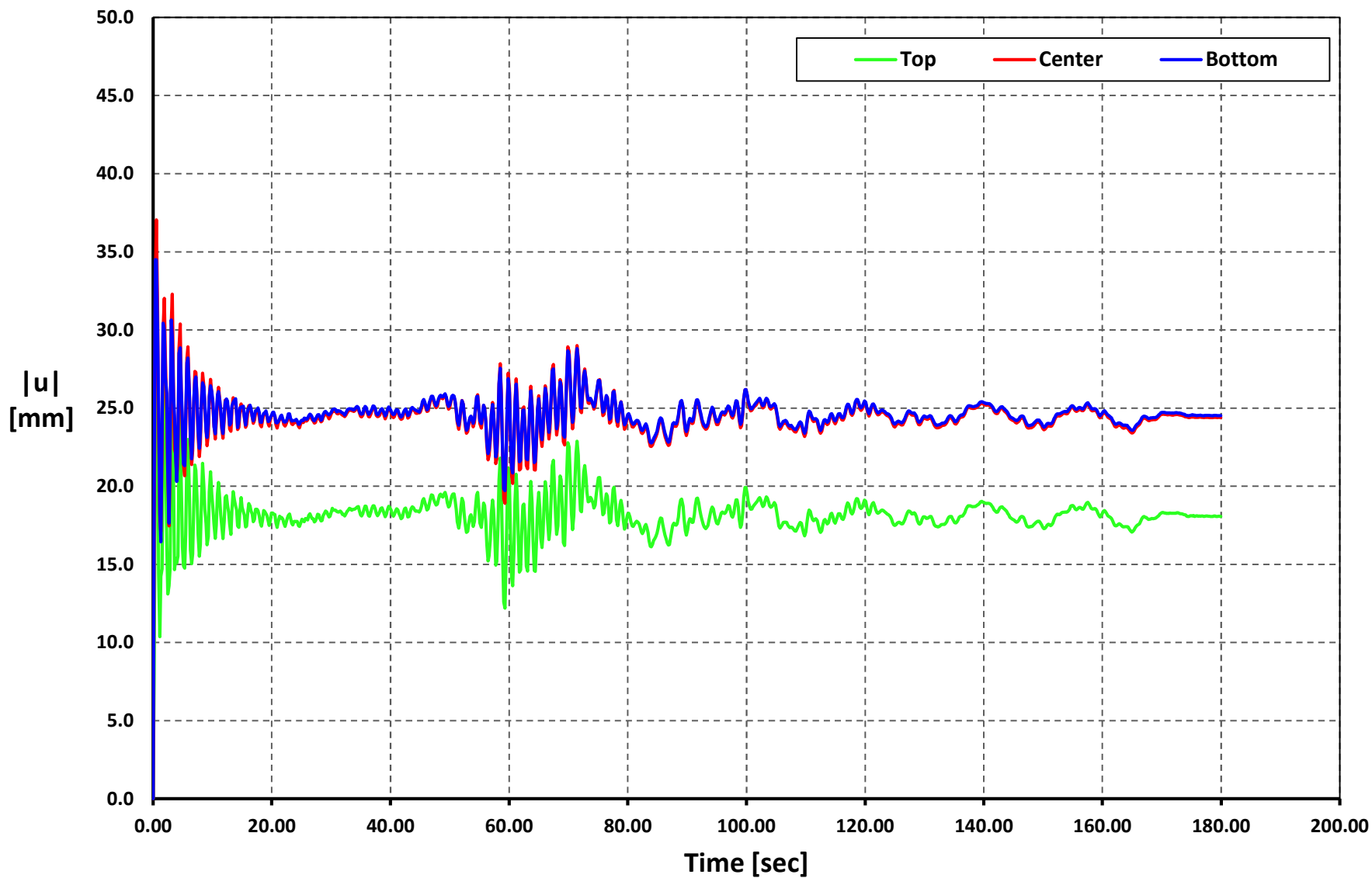
Time vs. $|u|$

Geometry 02 - Soil Type 1 - ACUE-E



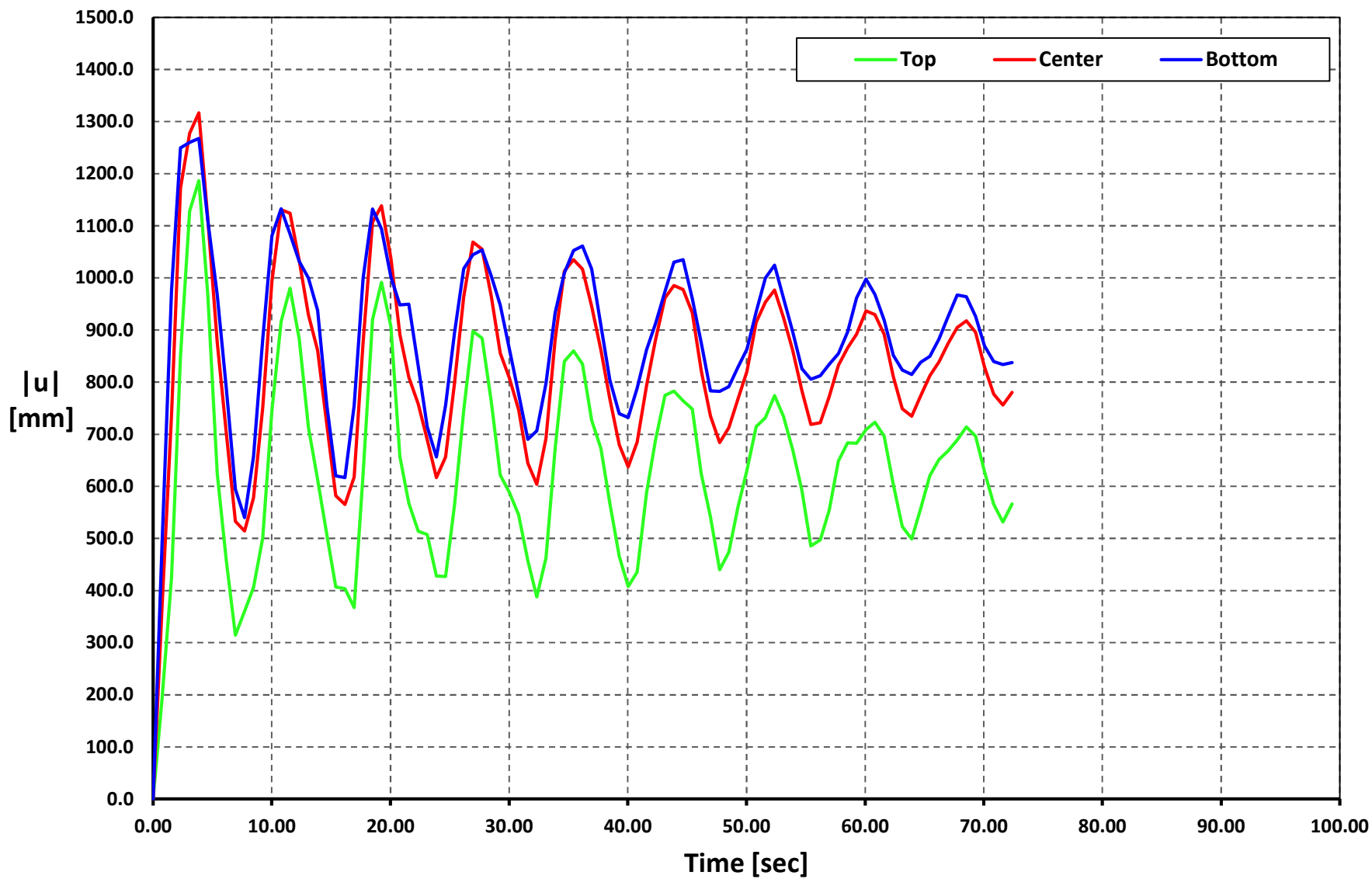
Time vs. |u|

Geometry 02 - Soil Type 1 - ALJ1-N



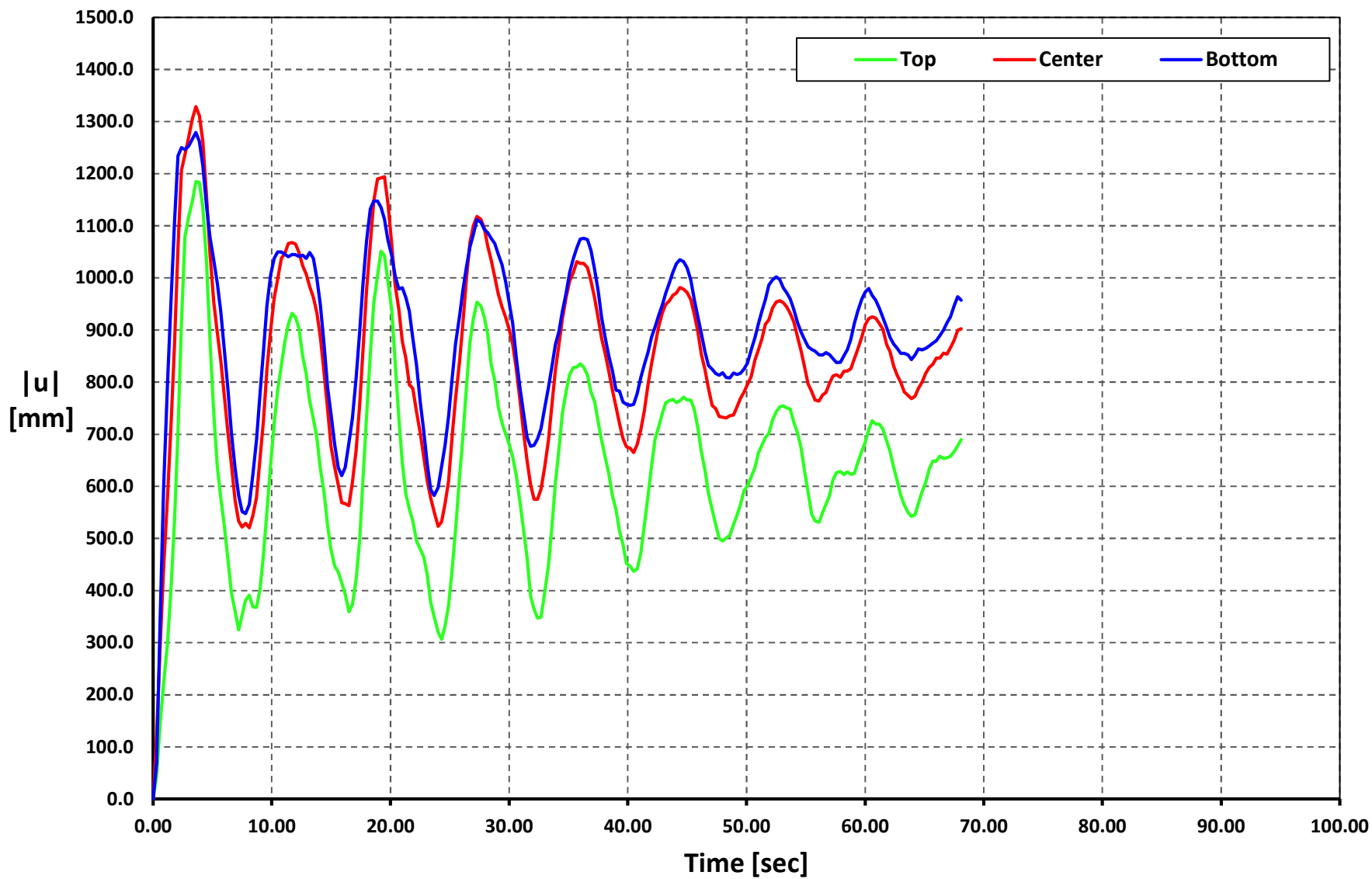
Time vs. |u|

Geometry 02 - Soil Type 2 - APED-E



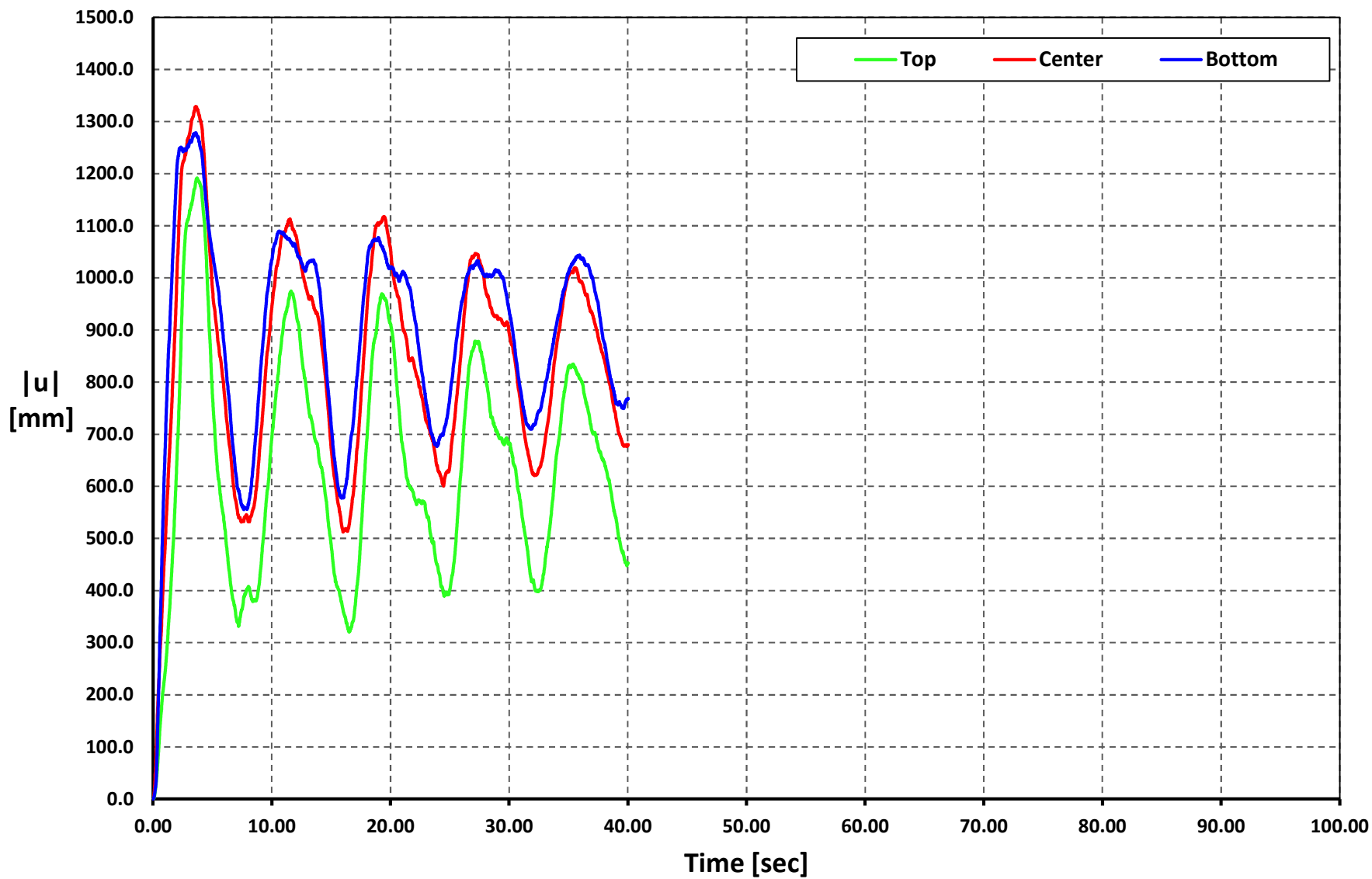
Time vs. $|u|$

Geometry 02 - Soil Type 2 - APO1-N



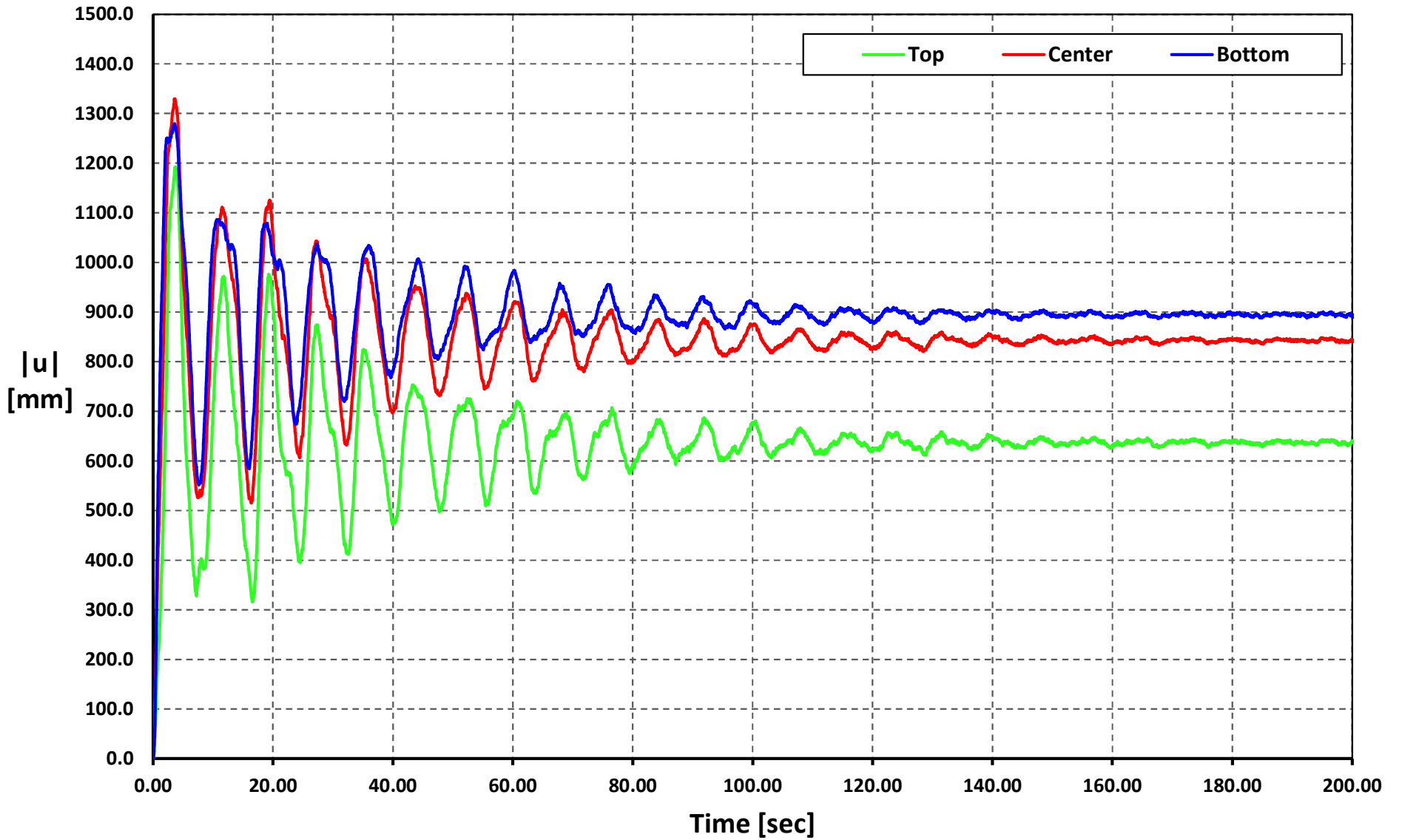
Time vs. |u|

Geometry 02 - Soil Type 2 - AMNT-N



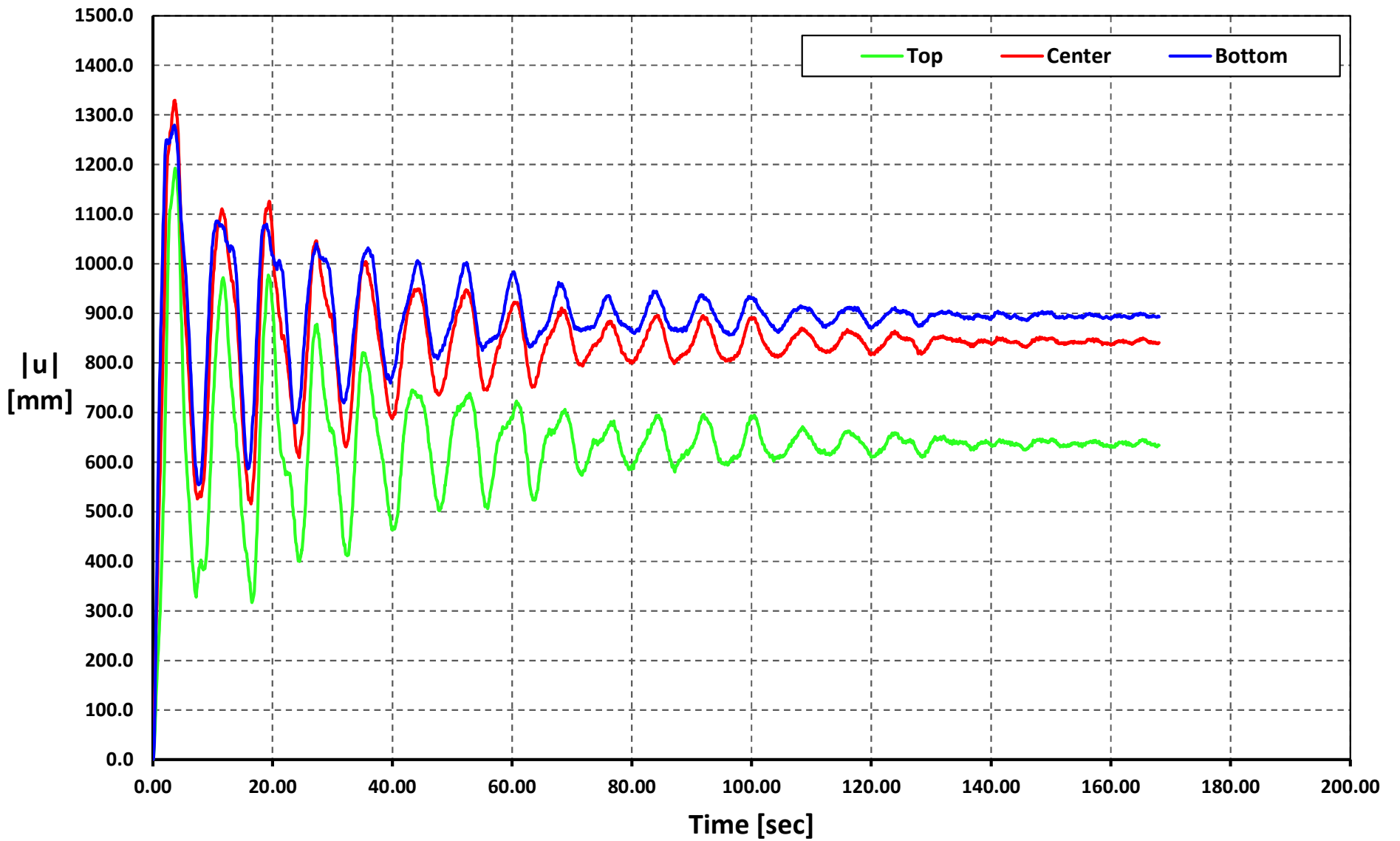
Time vs. |u|

Geometry 02 - Soil Type 2 - AGY2-N



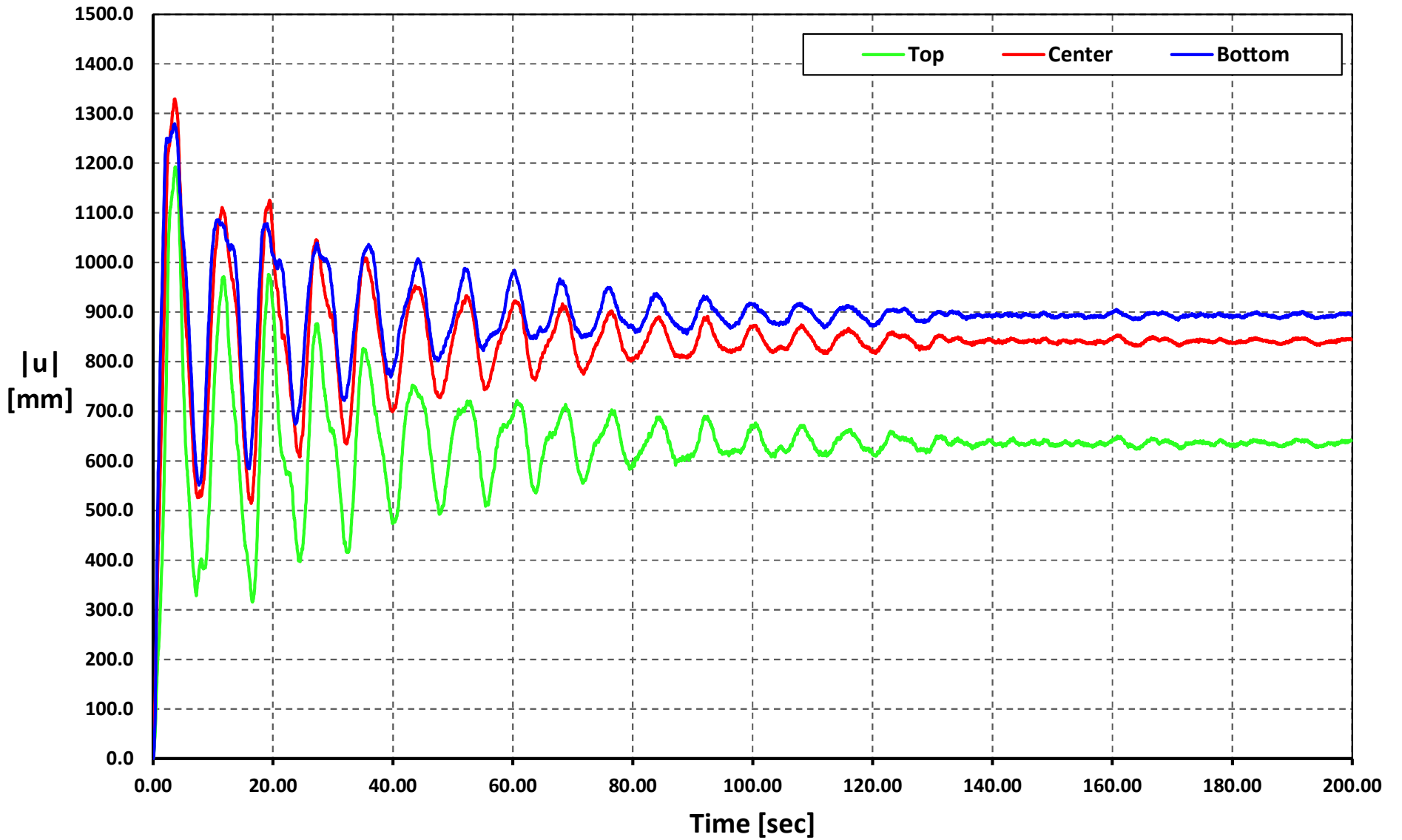
Time vs. |u|

Geometry 02 - Soil Type 2 - AMIL-E



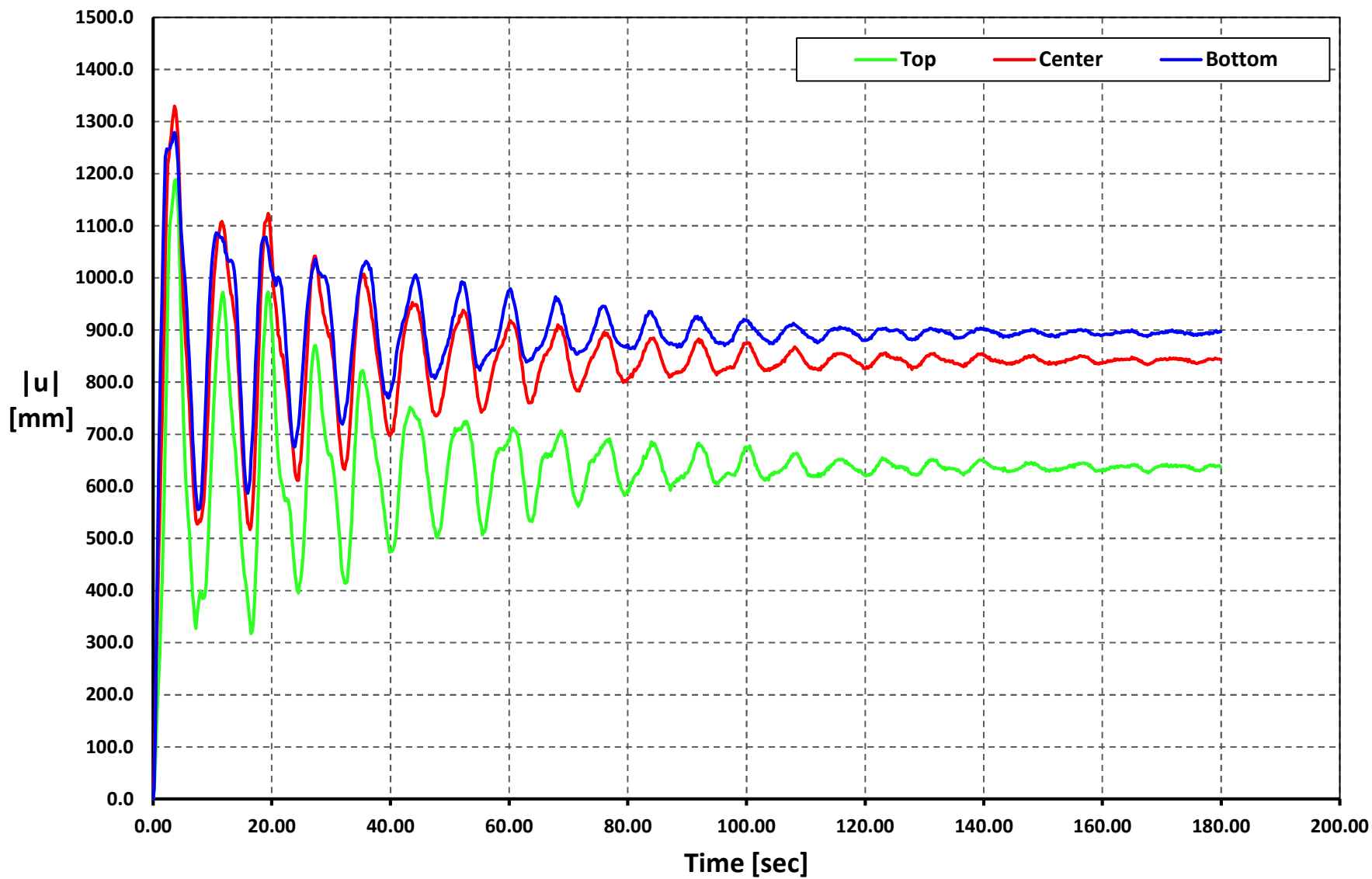
Time vs. |u|

Geometry 02 - Soil Type 2 - ACUE-E



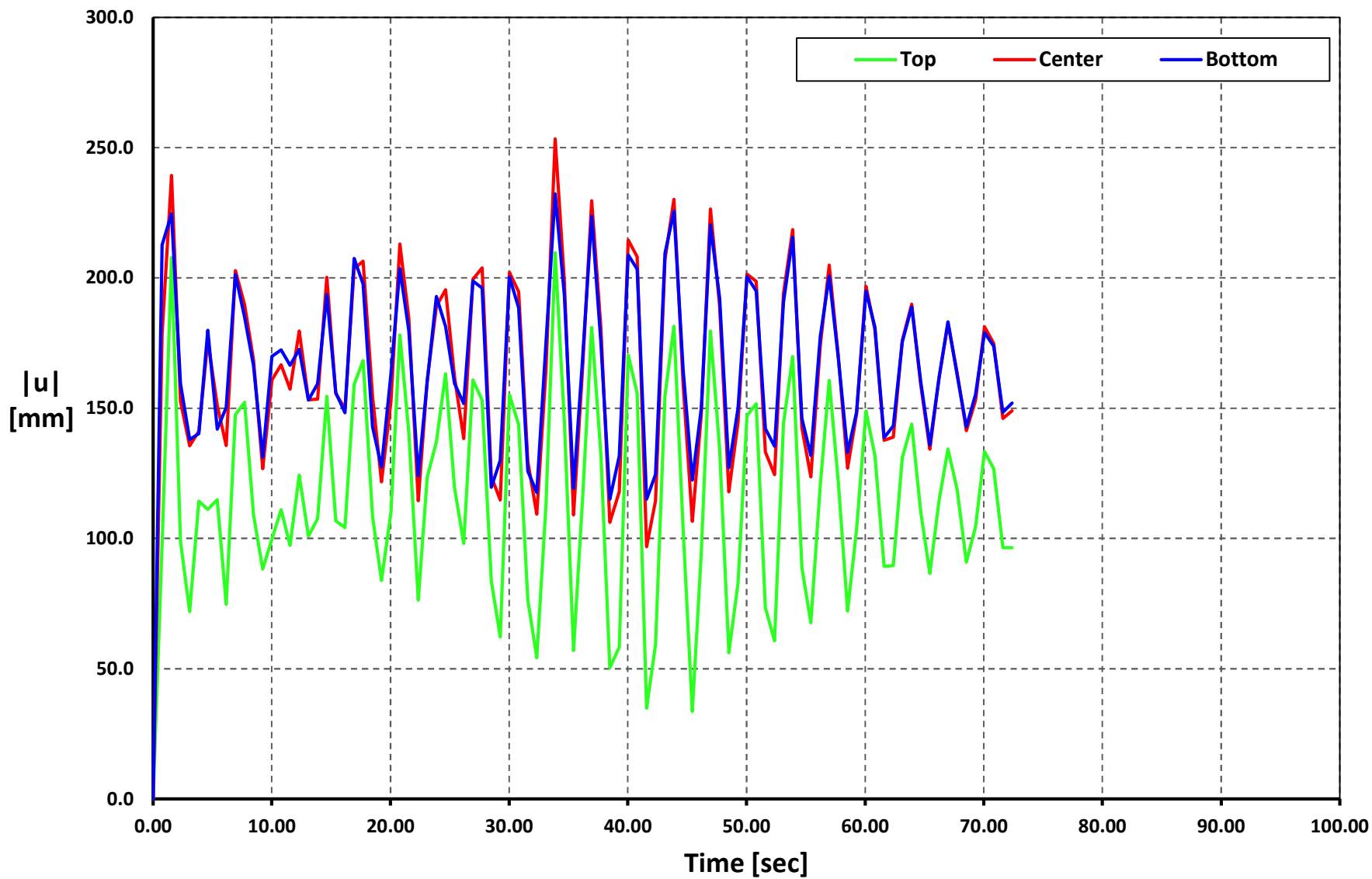
Time vs. |u|

Geometry 02 - Soil Type 2 - ALJ1-N



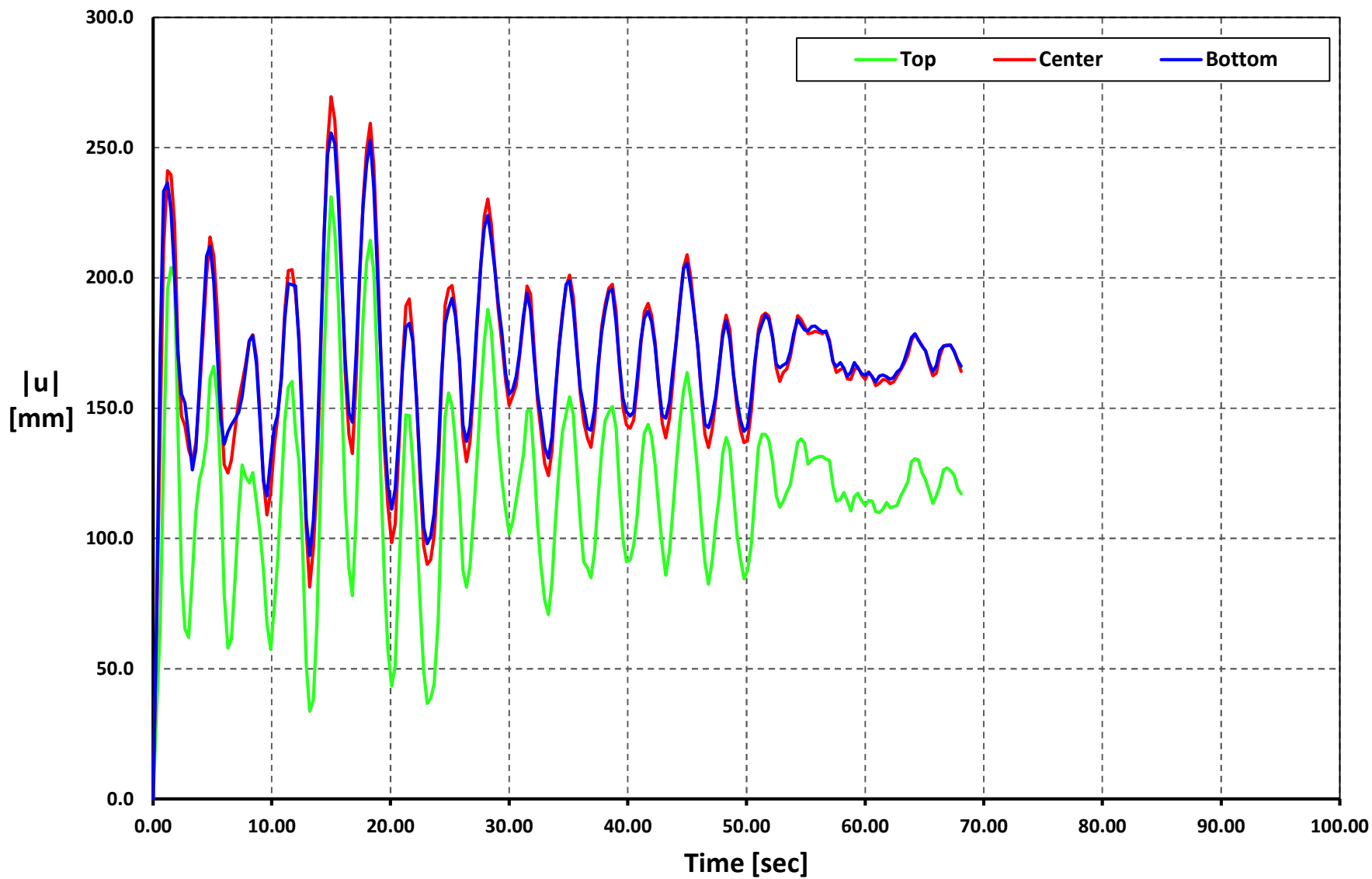
Time vs. |u|

Geometry 02 - Soil Type 3 - APED-E



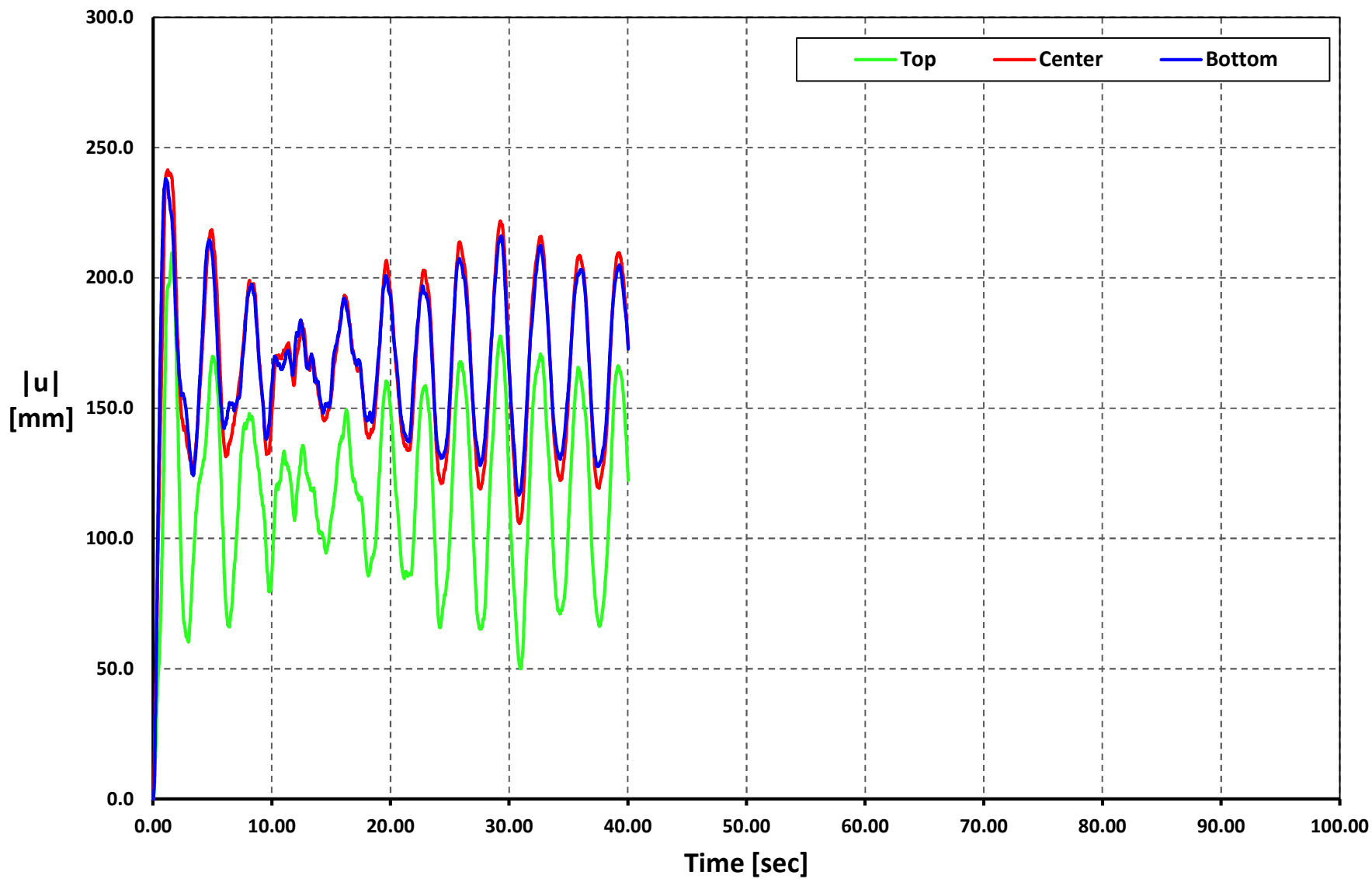
Time vs. |u|

Geometry 02 - Soil Type 3 - APO1-N



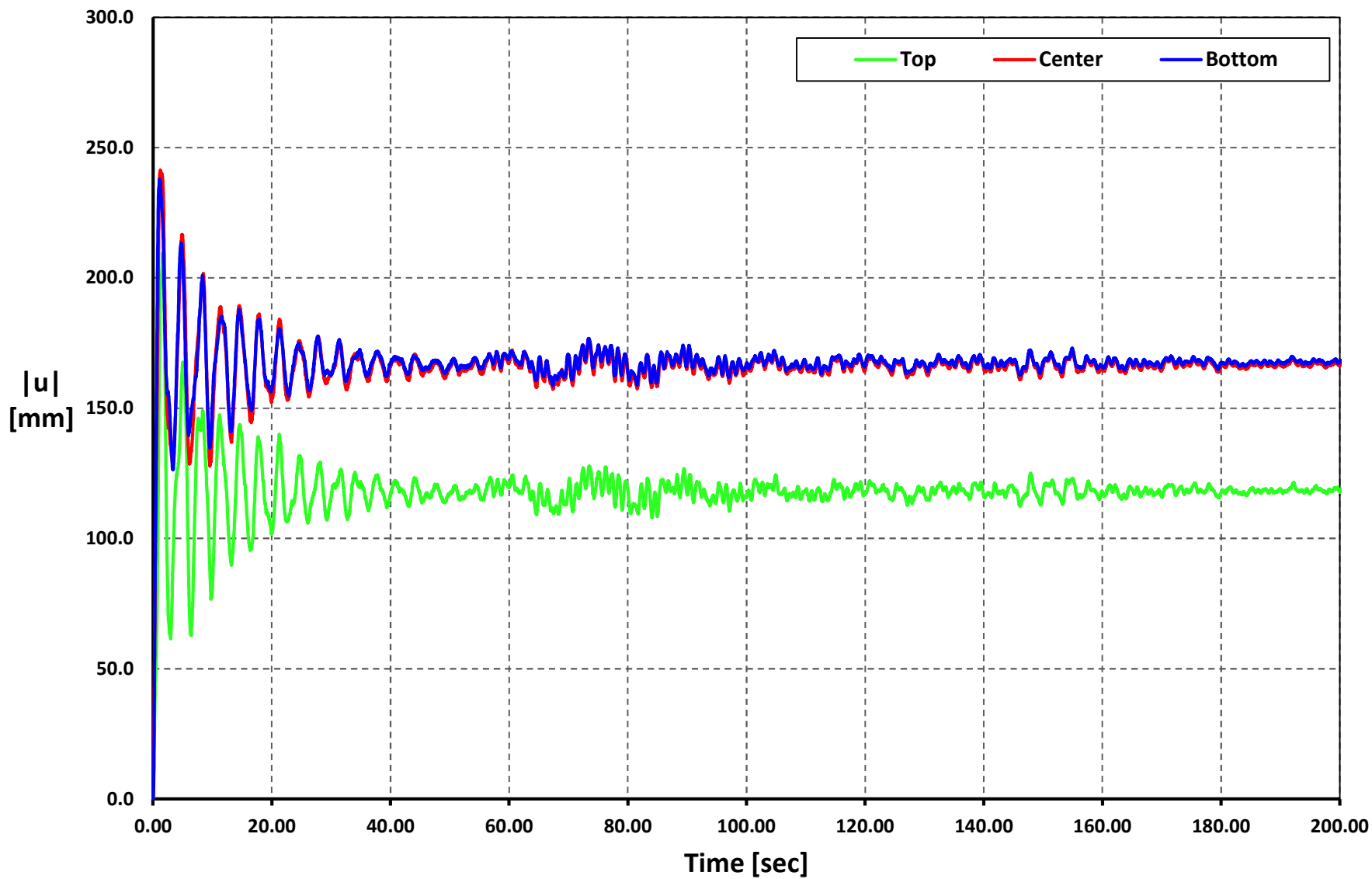
Time vs. |u|

Geometry 02 - Soil Type 3 - AMNT-N



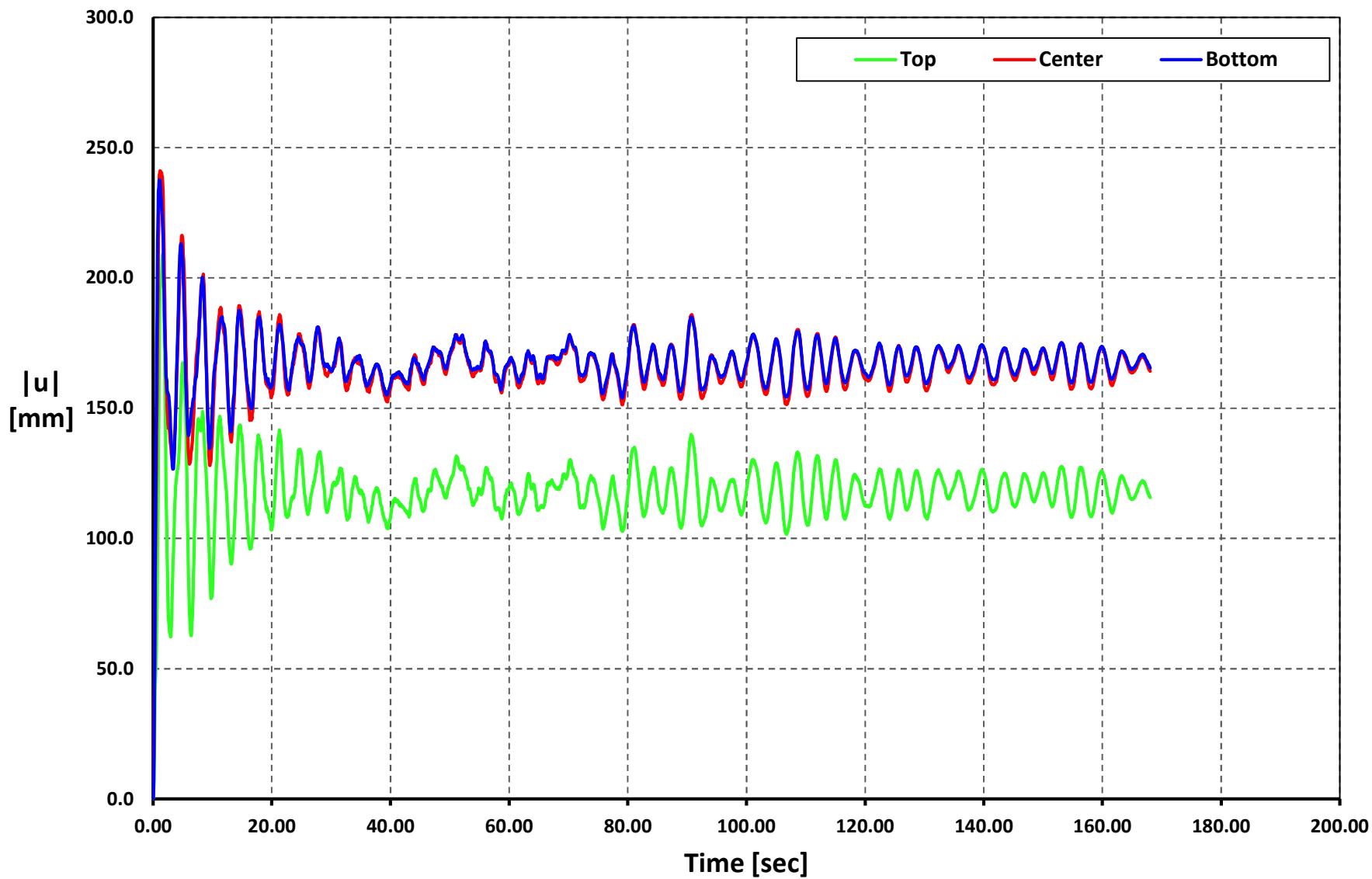
Time vs. $|u|$

Geometry 02 - Soil Type 3 - AGY2-N



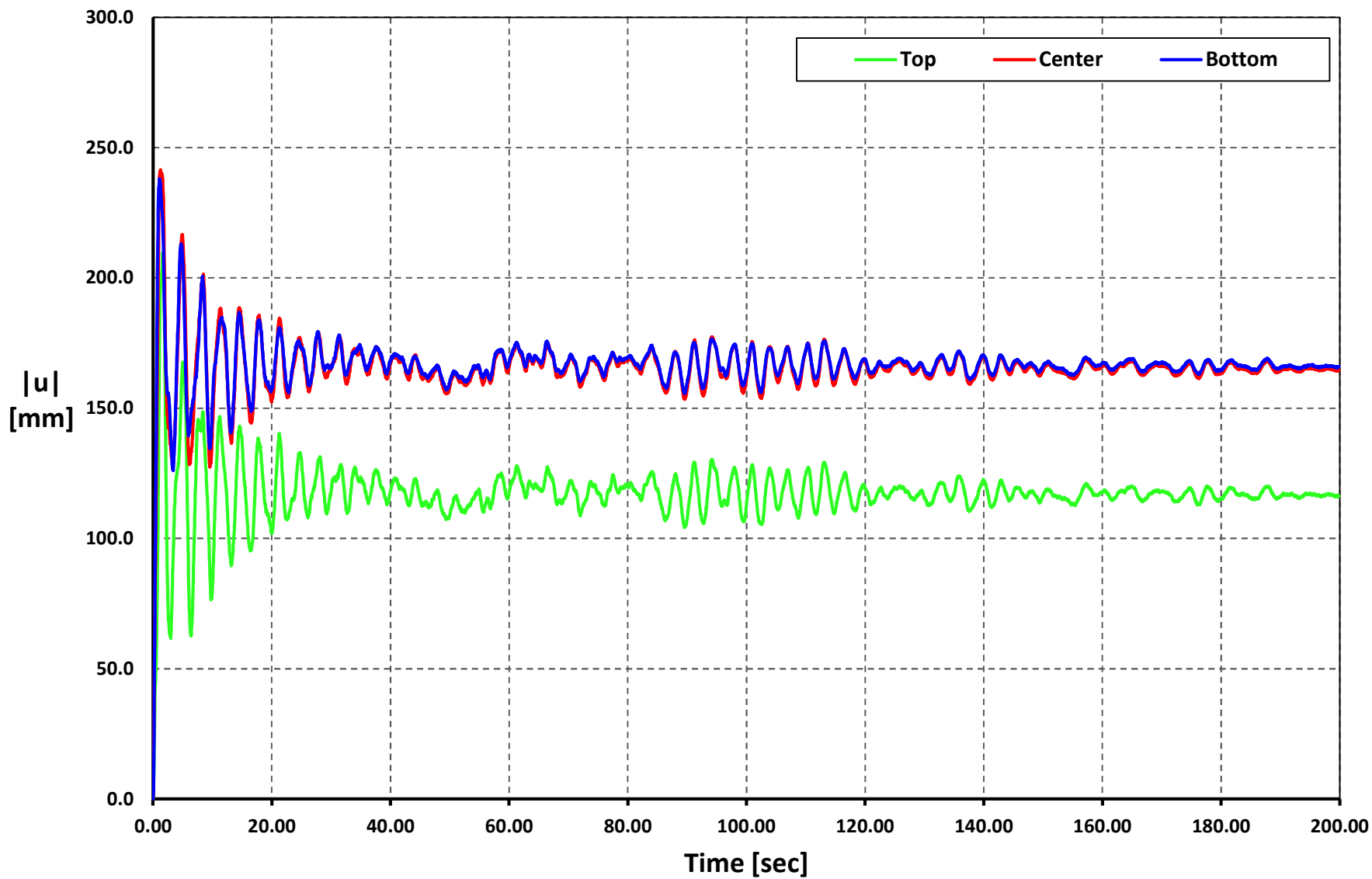
Time vs. |u|

Geometry 02 - Soil Type 3 - AMIL-E



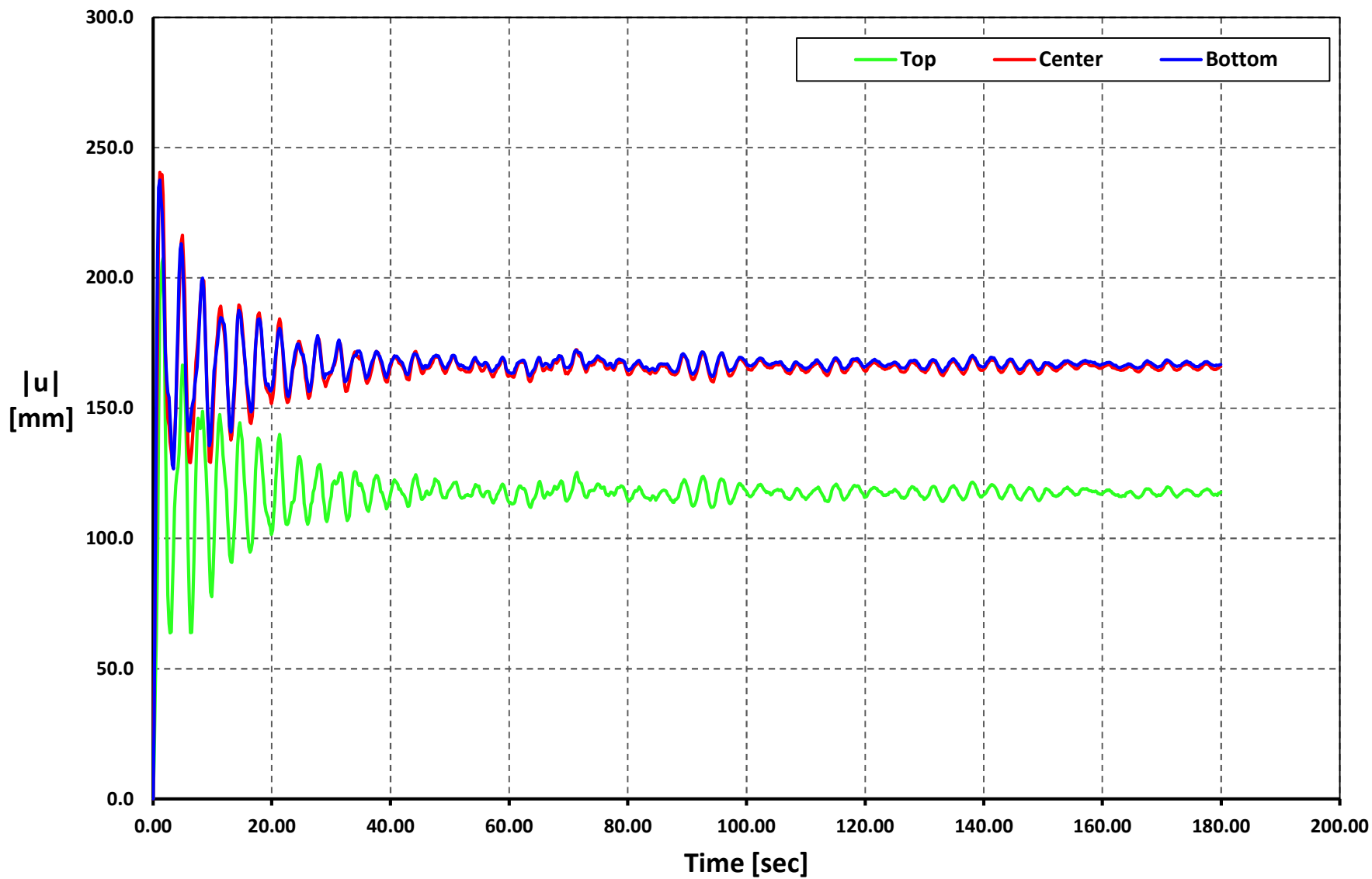
Time vs. $|u|$

Geometry 02 - Soil Type 3 - ACUE-E



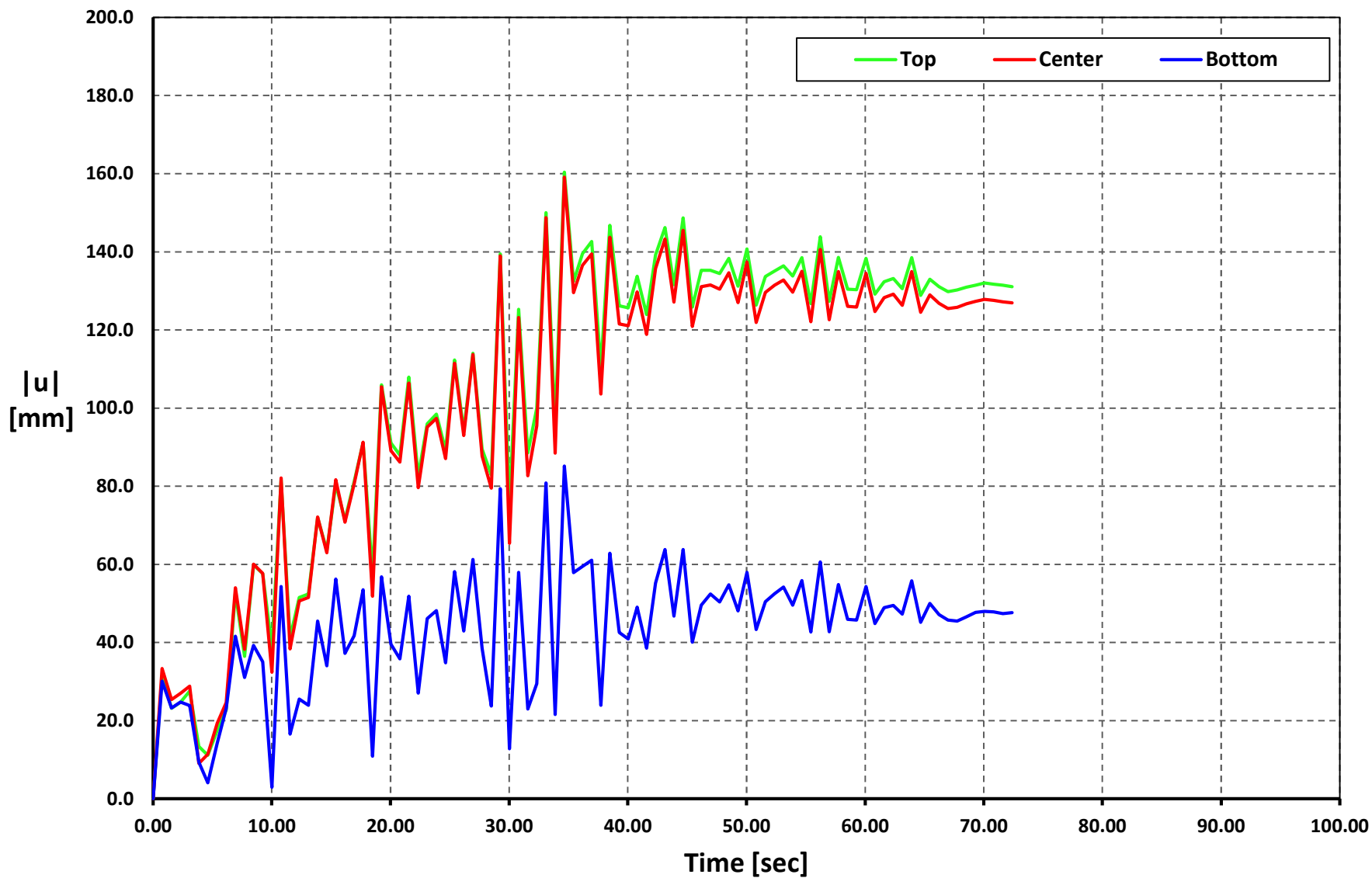
Time vs. |u|

Geometry 02 - Soil Type 3 - ALJ1-N



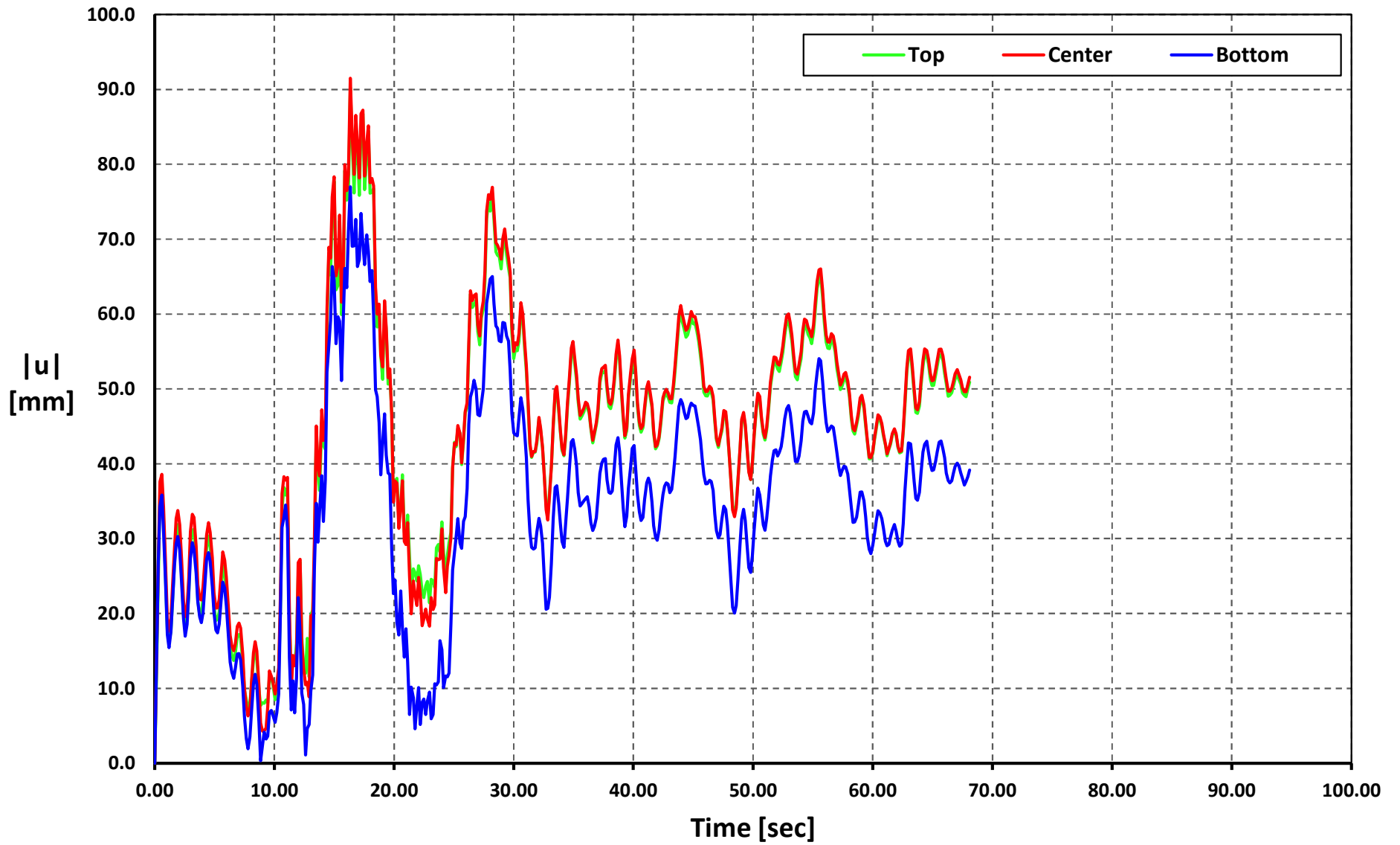
Time vs. |u|

Geometry 03 - Soil Type 1 - APED-E



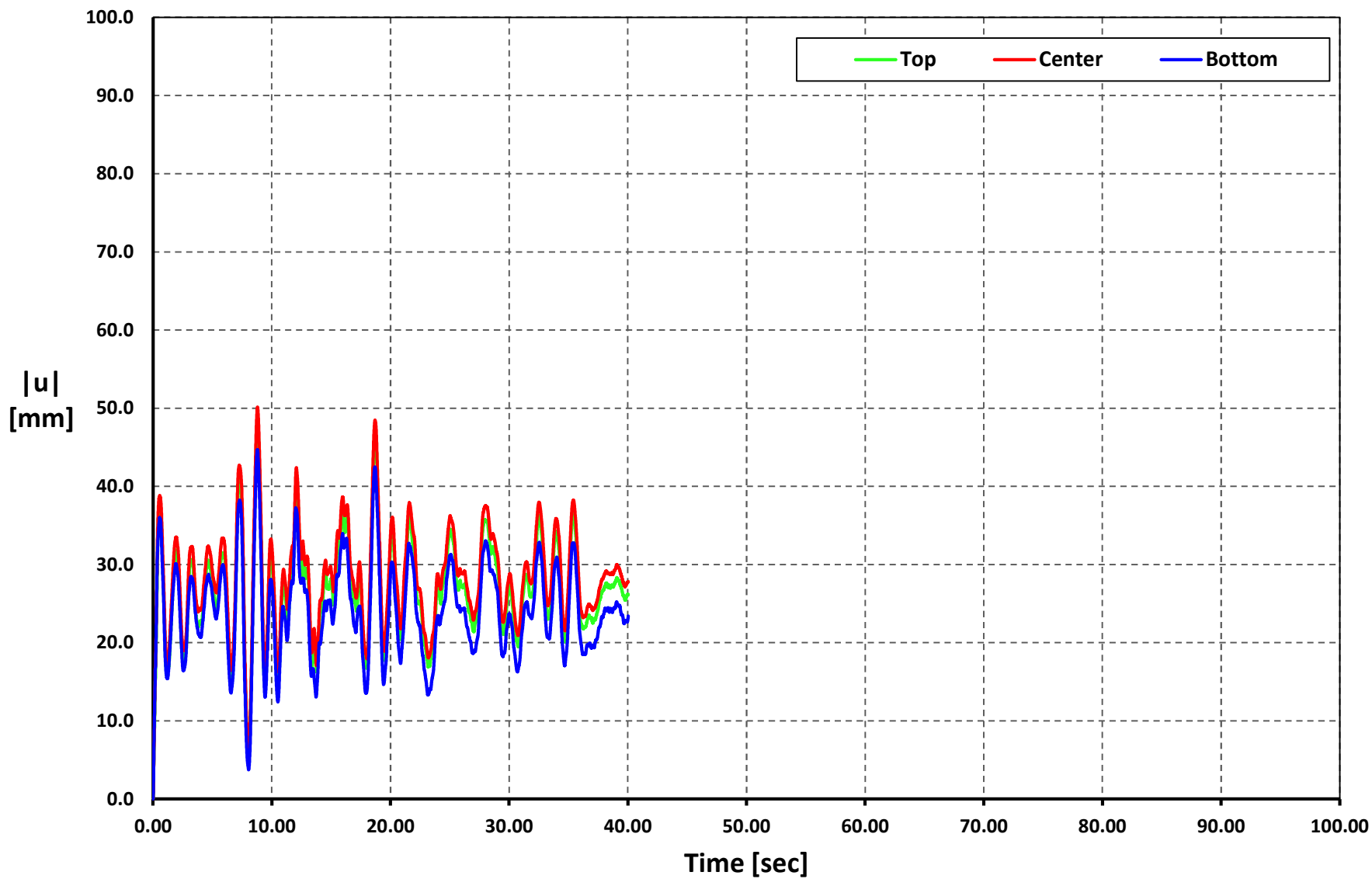
Time vs. |u|

Geometry 03 - Soil Type 1 - APO1-N



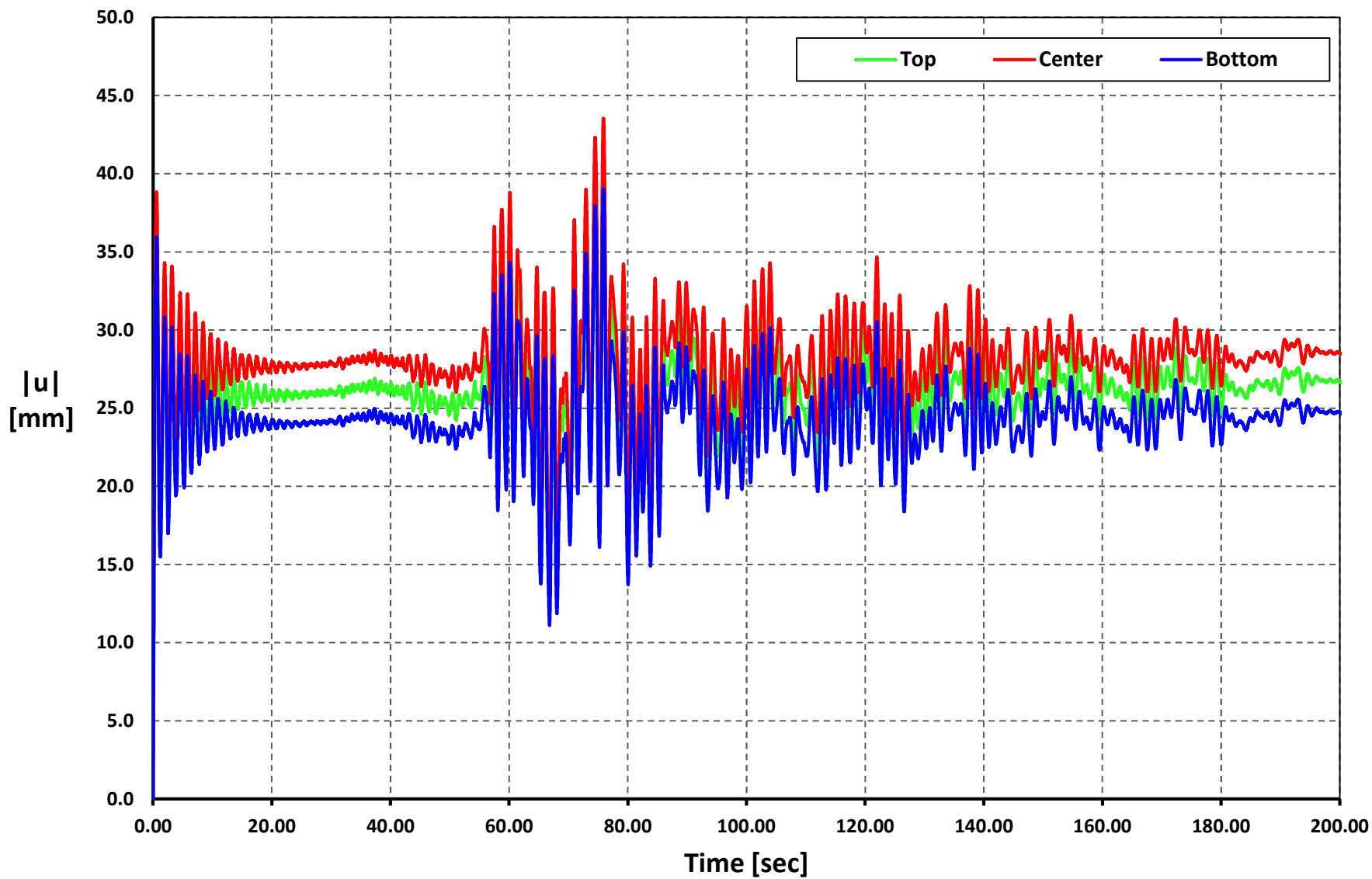
Time vs. |u|

Geometry 03 - Soil Type 1 - AMNT-N



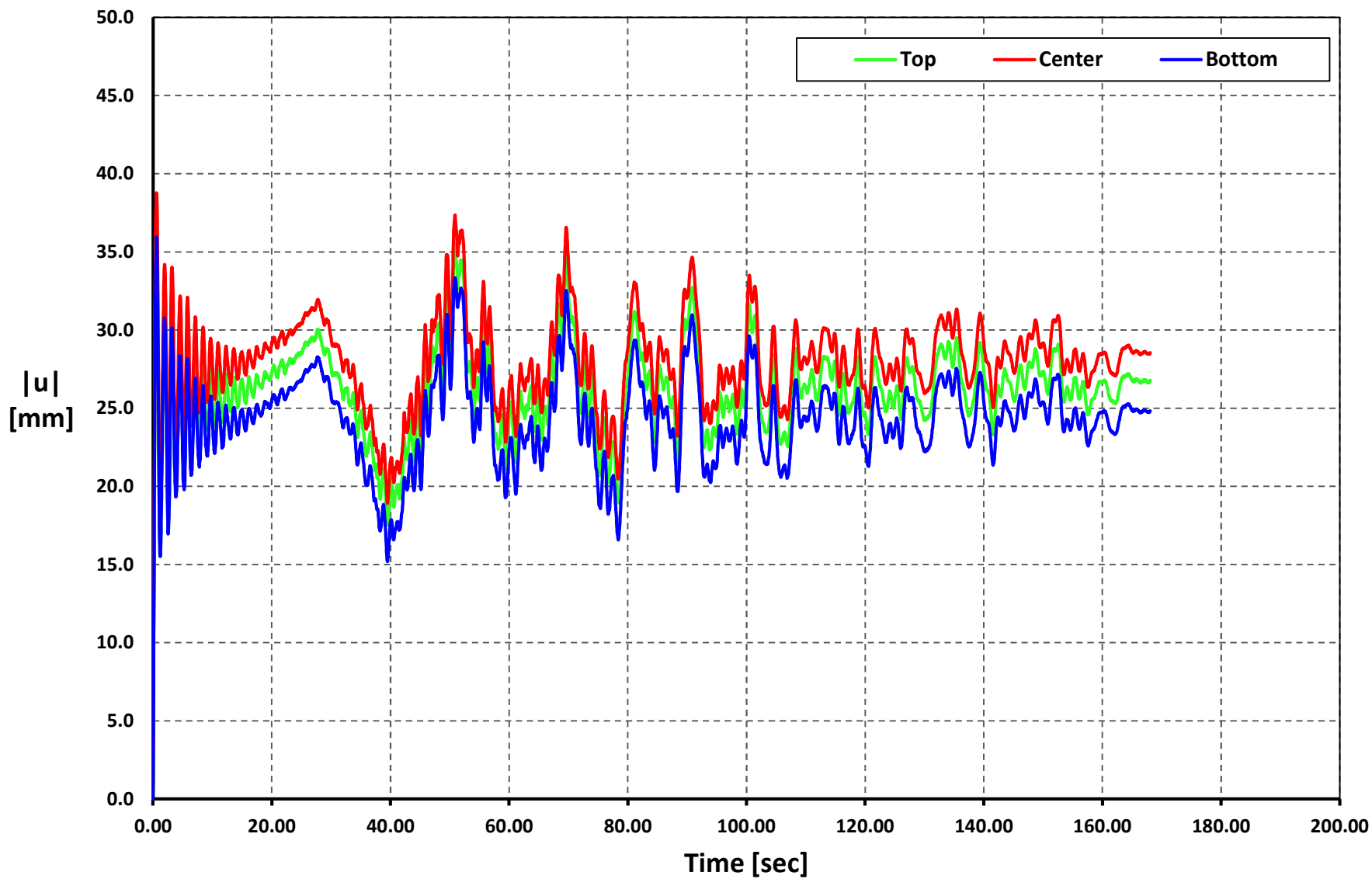
Time vs. $|u|$

Geometry 03 - Soil Type 1 - AGY2-N



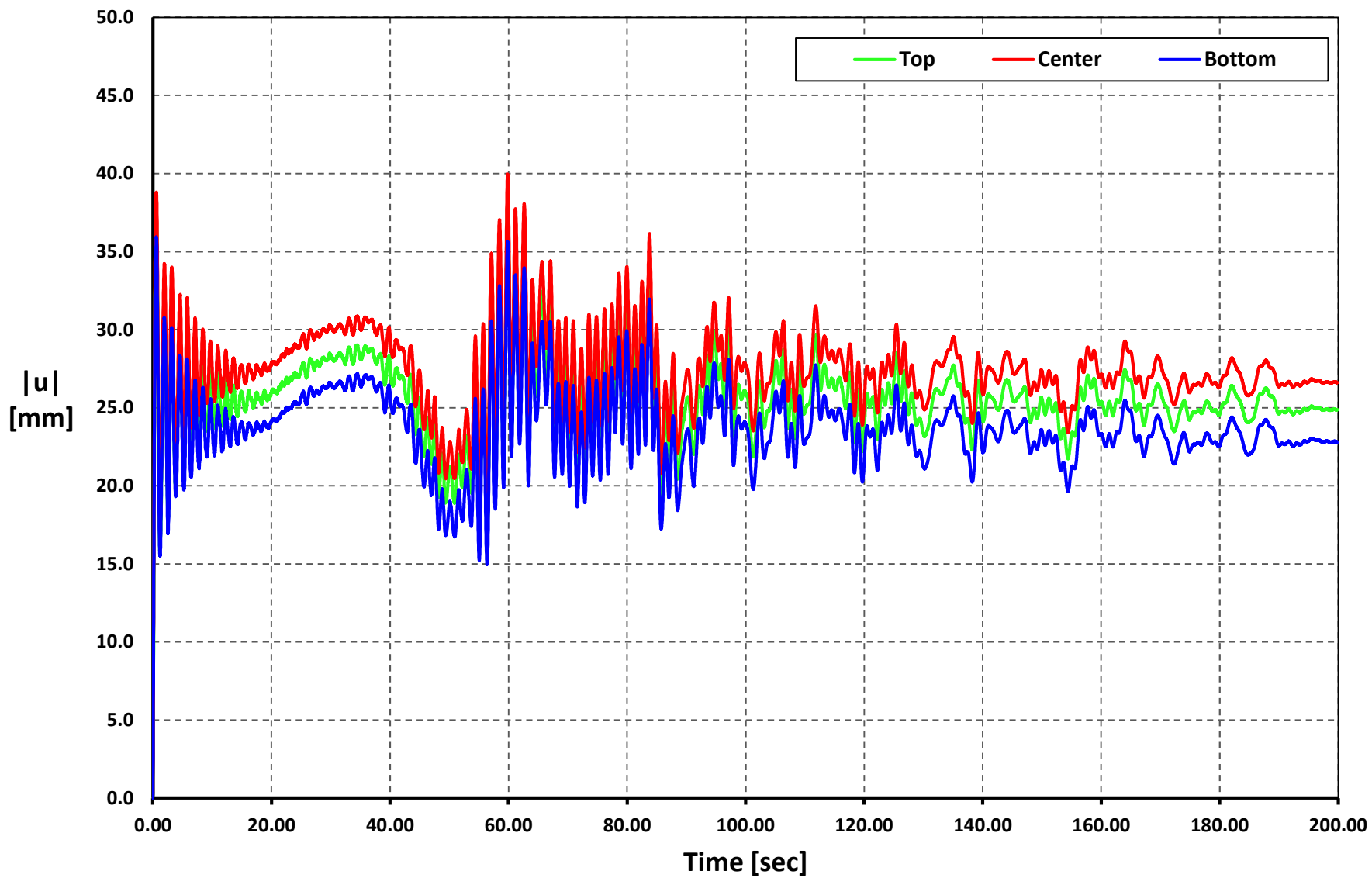
Time vs. $|u|$

Geometry 03 - Soil Type 1 - AMIL-E



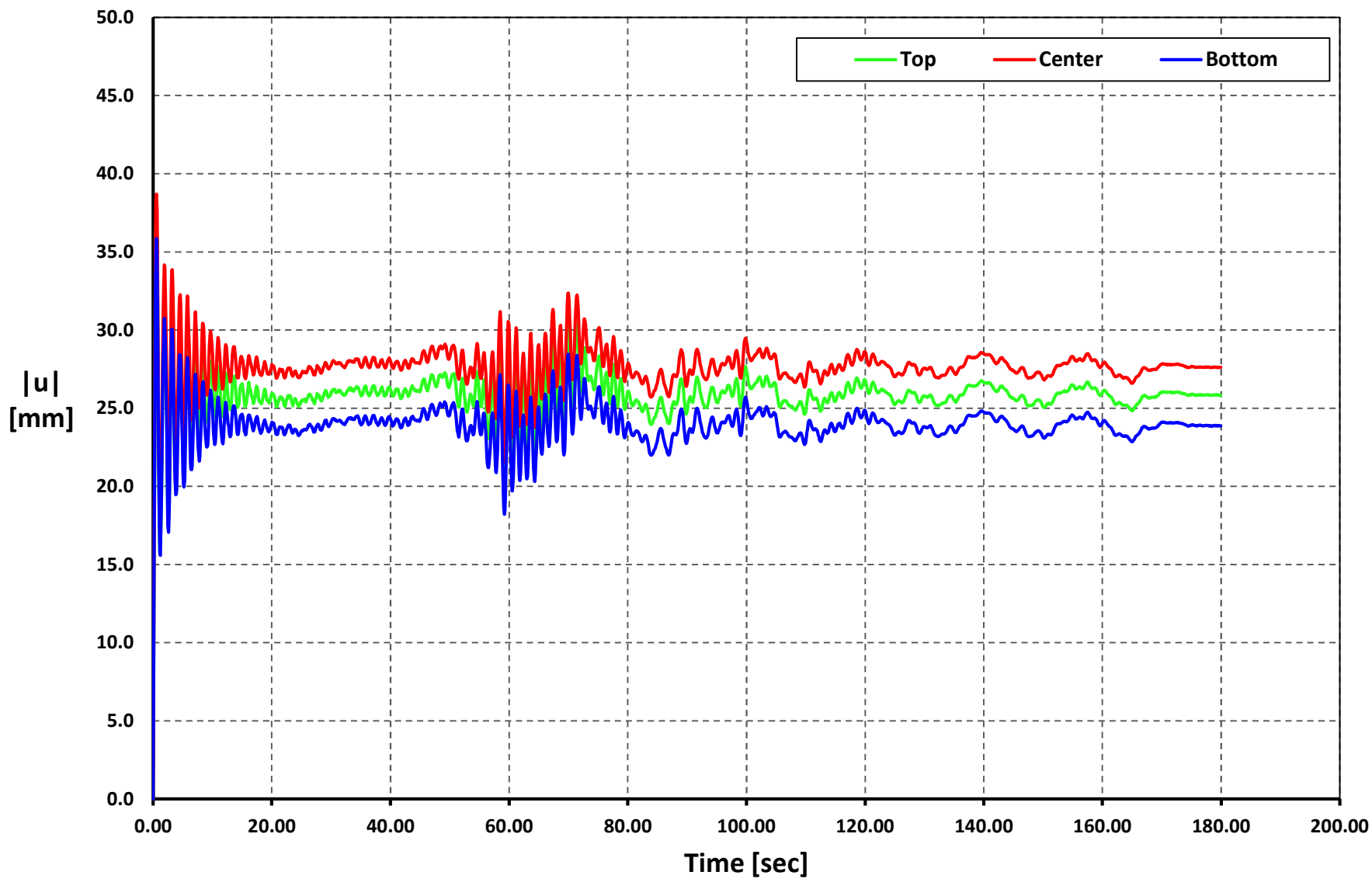
Time vs. $|u|$

Geometry 03 - Soil Type 1 - ACUE-E



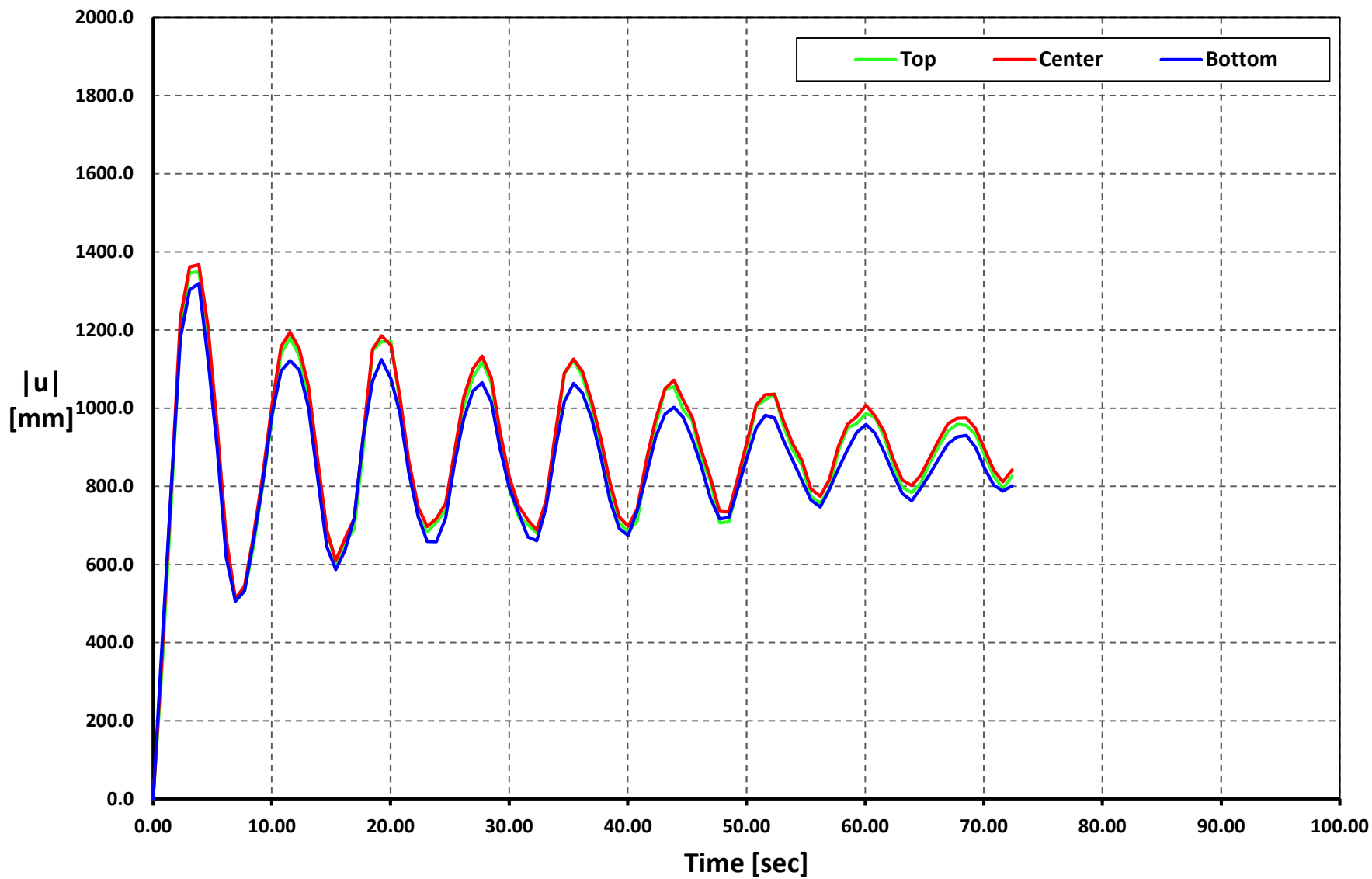
Time vs. $|u|$

Geometry 03 - Soil Type 1 - ALJ1-N



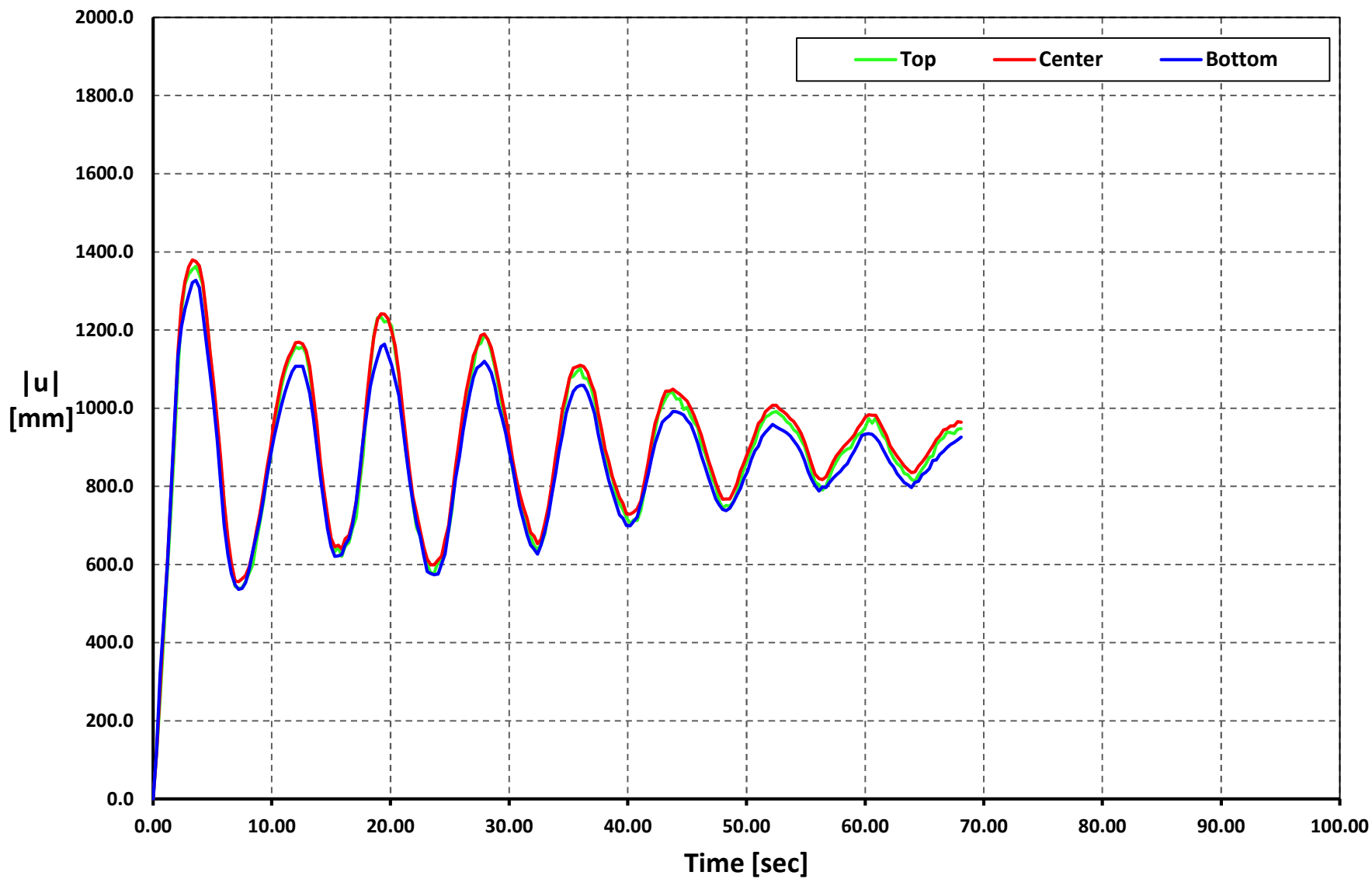
Time vs. |u|

Geometry 03 - Soil Type 2 - APED-E



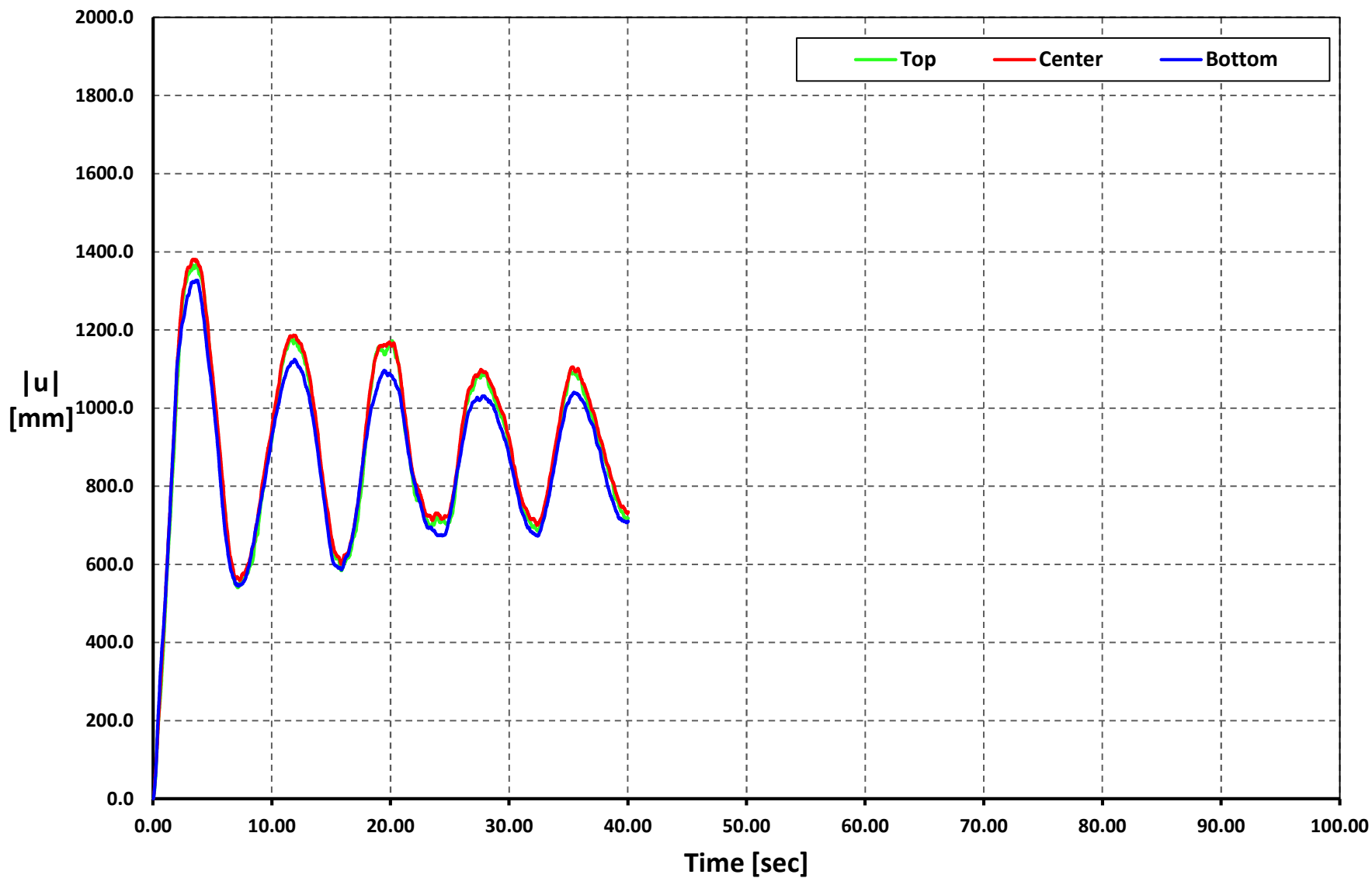
Time vs. $|u|$

Geometry 03 - Soil Type 2 - APO1-N



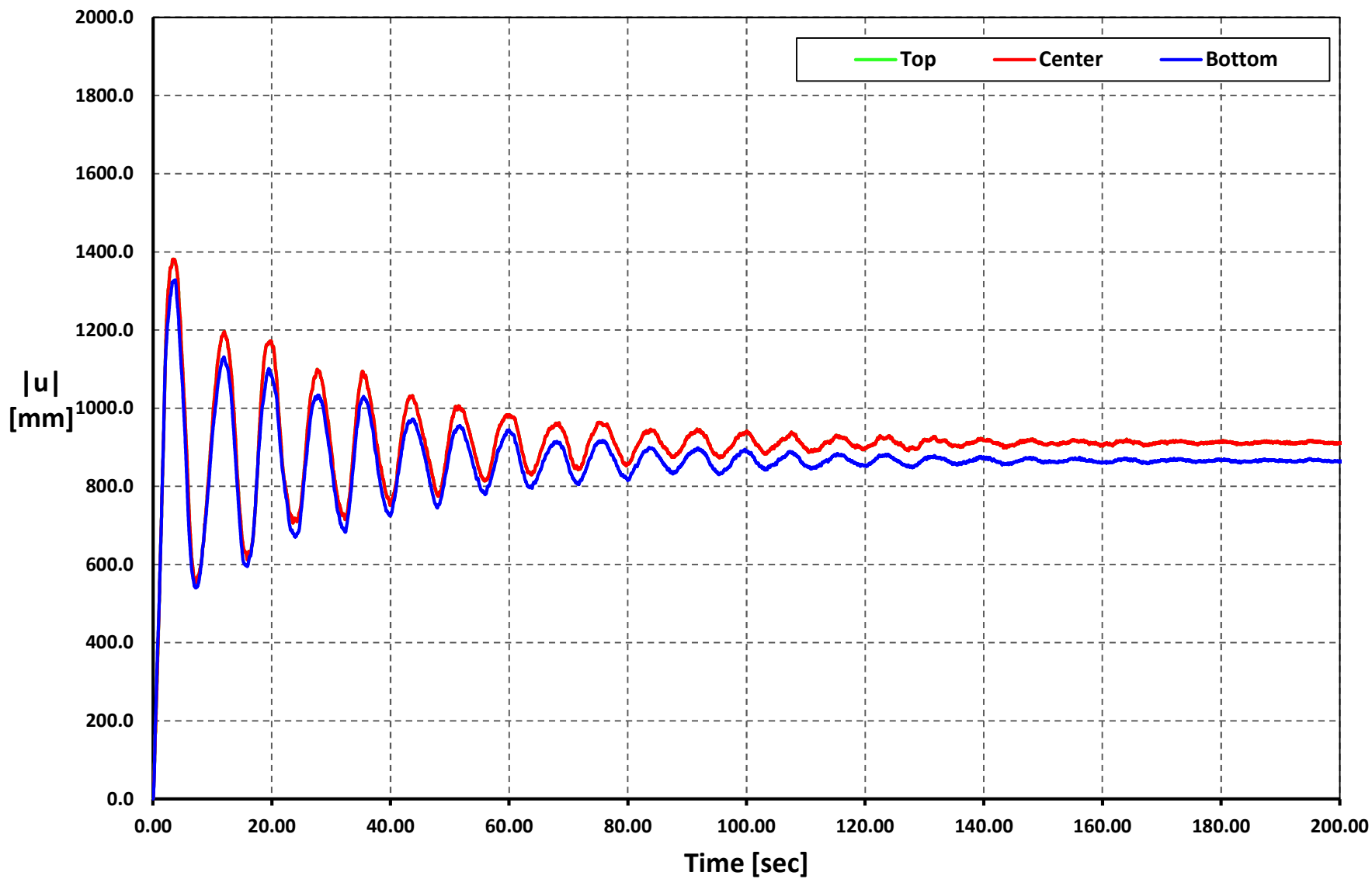
Time vs. |u|

Geometry 03 - Soil Type 2 - AMNT-N



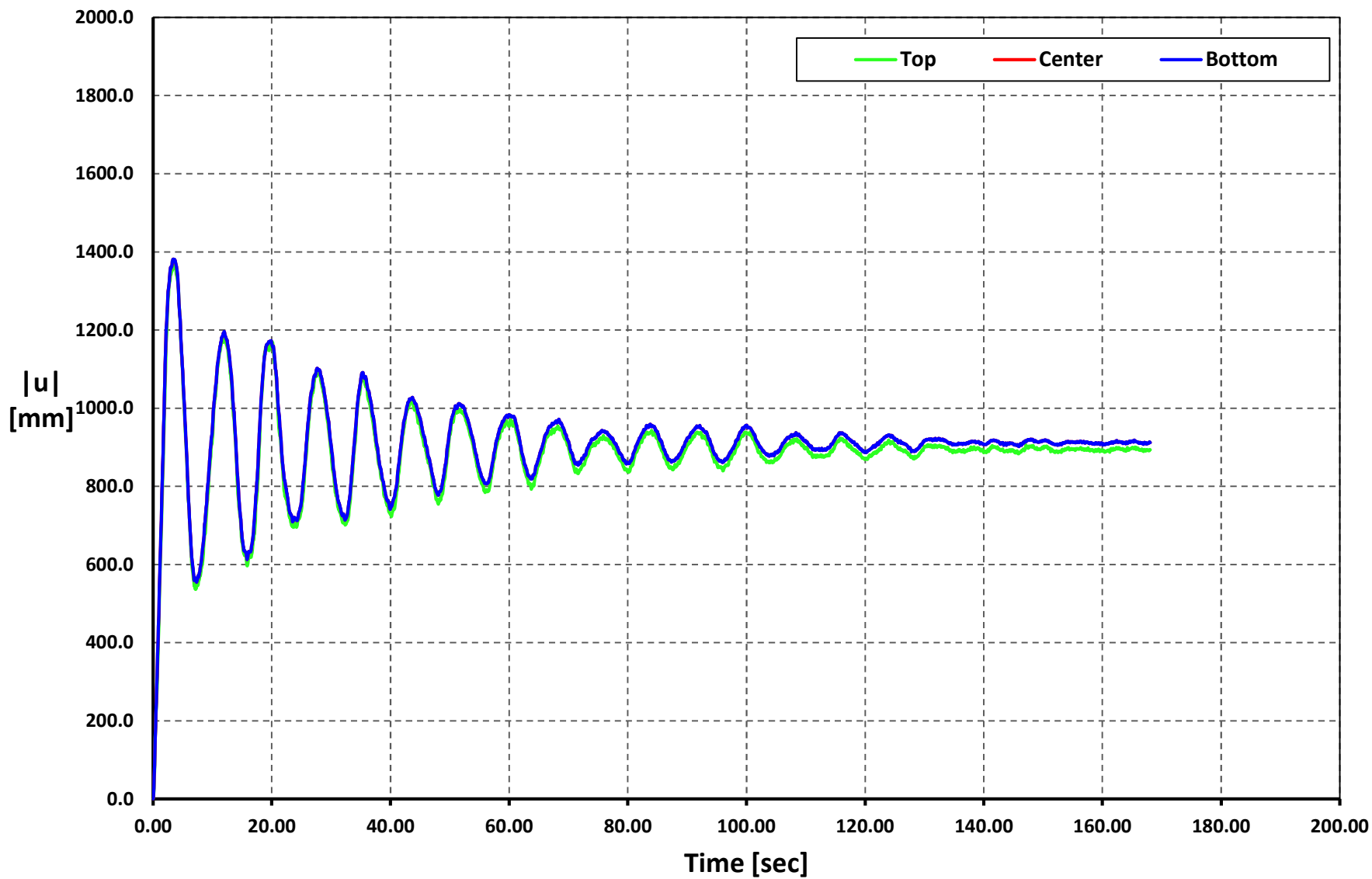
Time vs. |u|

Geometry 03 - Soil Type 2 - AGY2-N



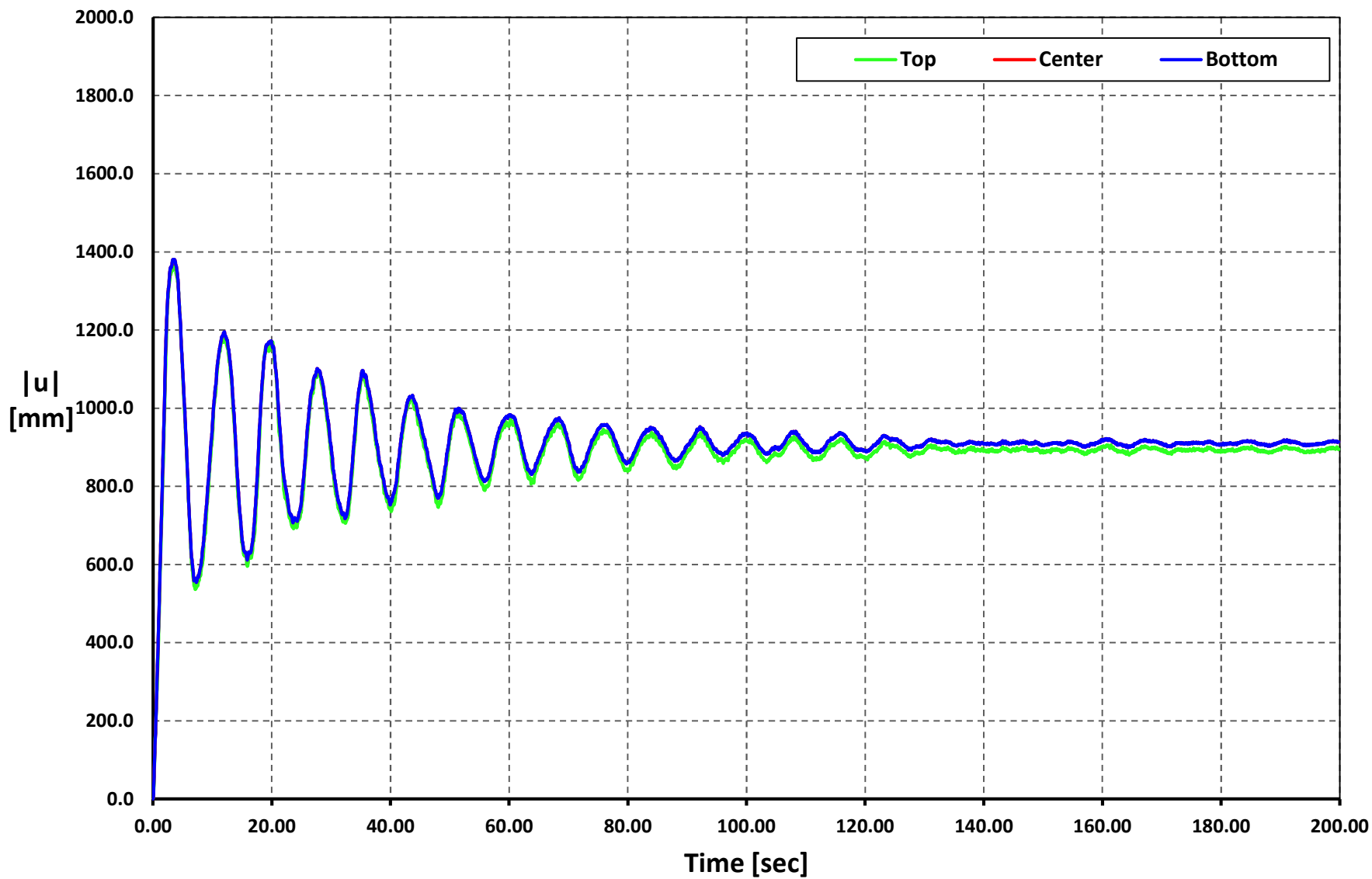
Time vs. |u|

Geometry 03 - Soil Type 2 - AMIL-E



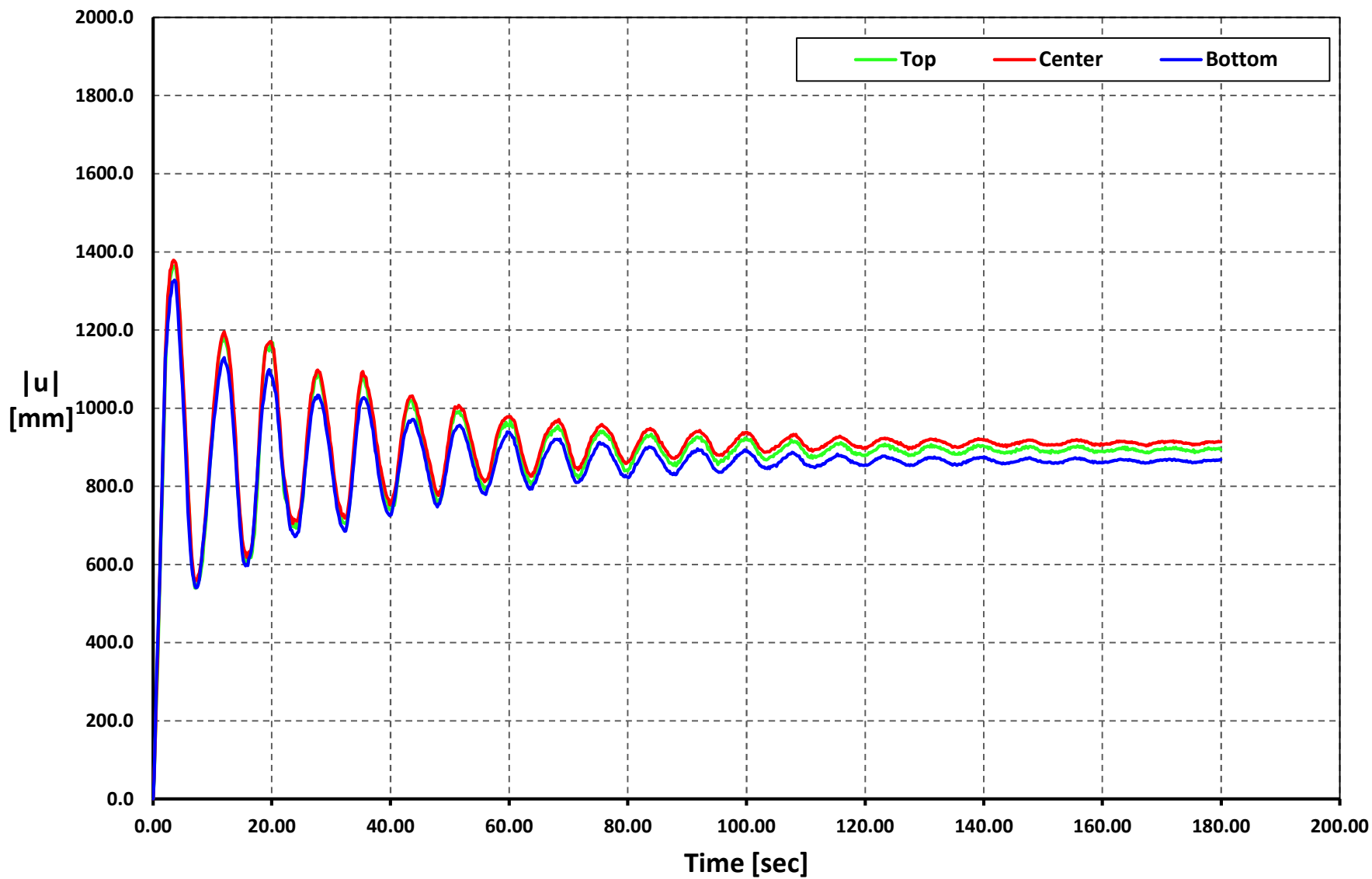
Time vs. |u|

Geometry 03 - Soil Type 2 - ACUE-E



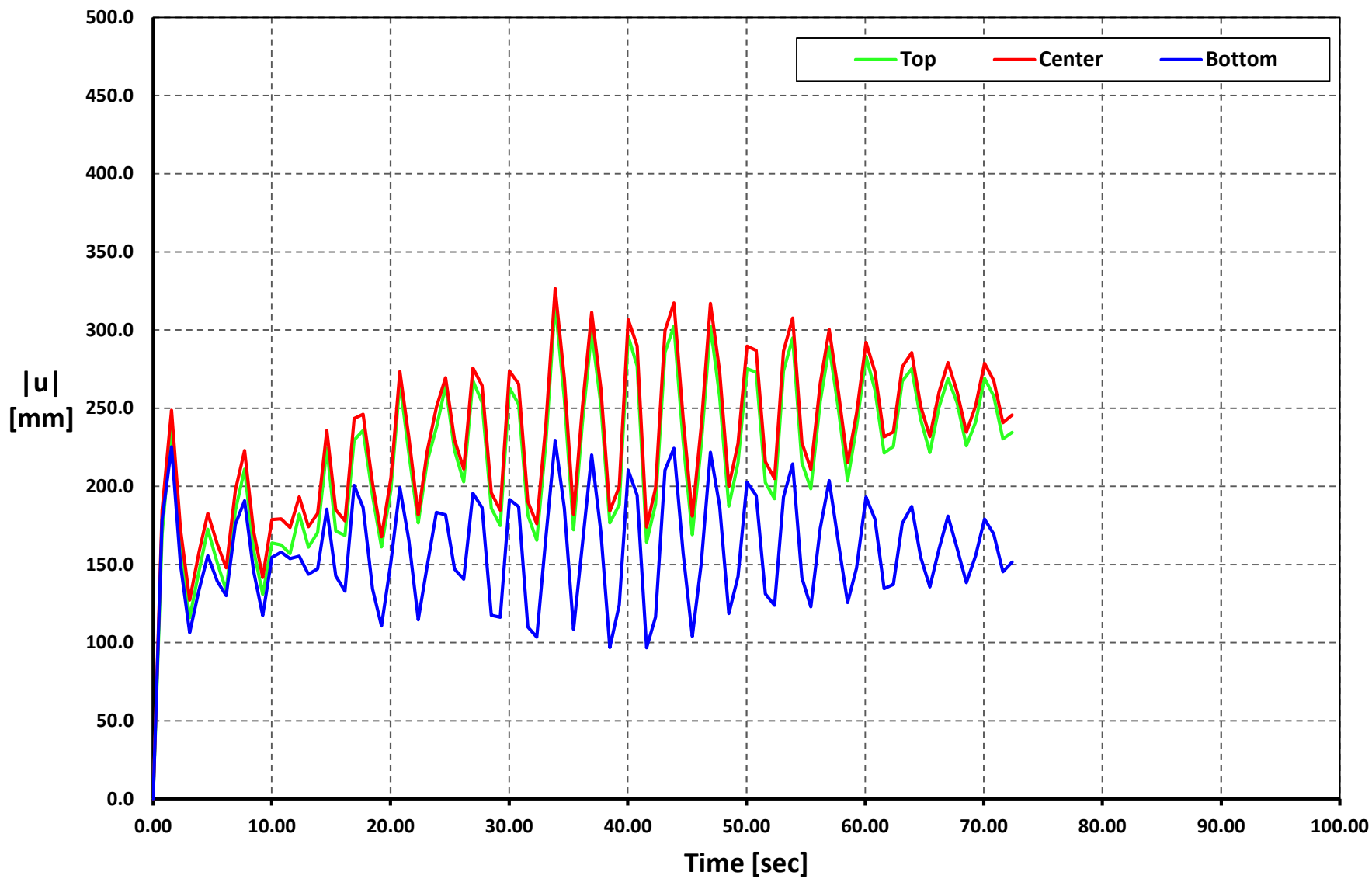
Time vs. |u|

Geometry 03 - Soil Type 2 - ALJ1-N



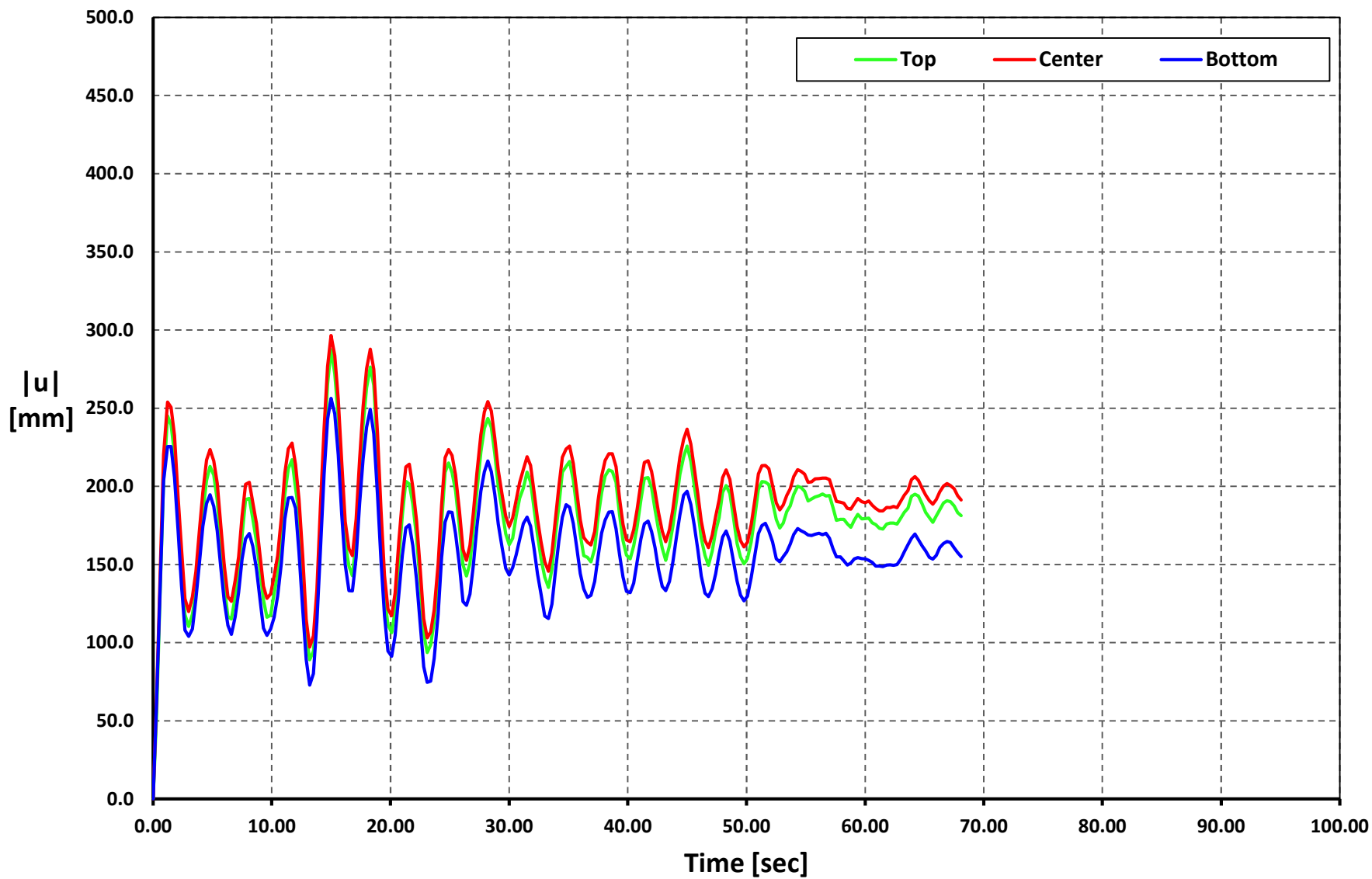
Time vs. |u|

Geometry 03 - Soil Type 3 - APED-E



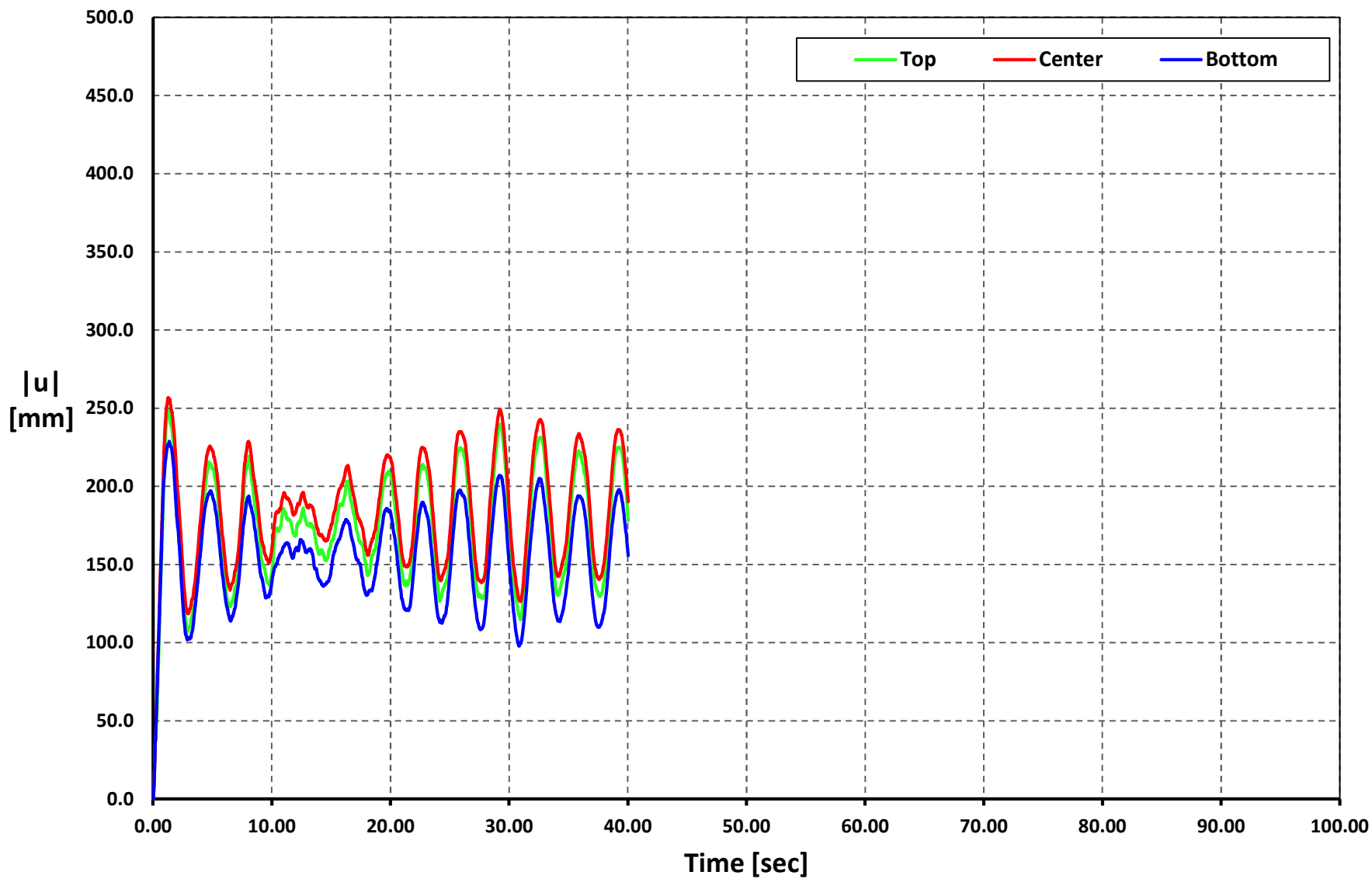
Time vs. $|u|$

Geometry 03 - Soil Type 3 - APO1-N



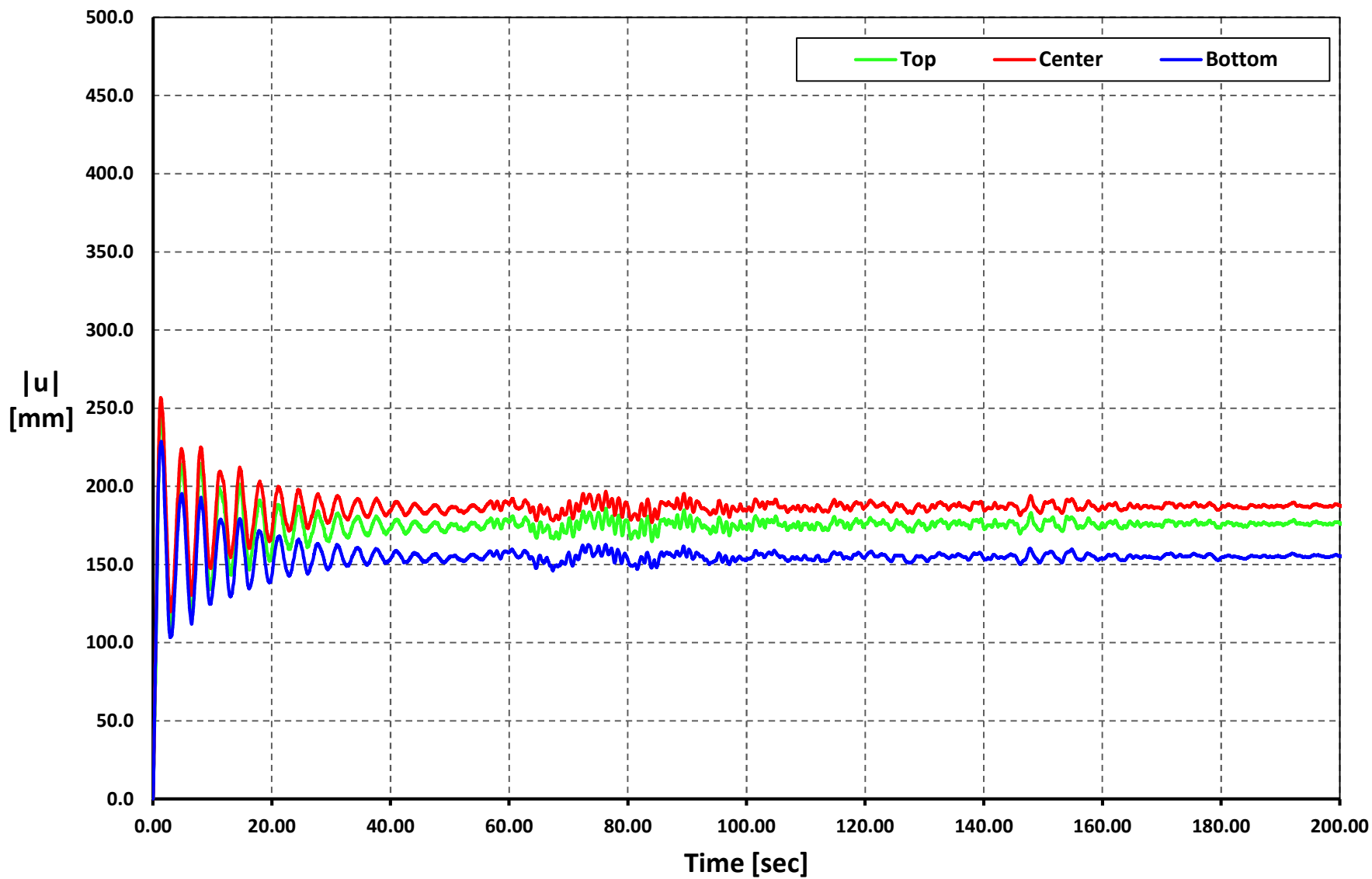
Time vs. |u|

Geometry 03 - Soil Type 3 - AMNT-N



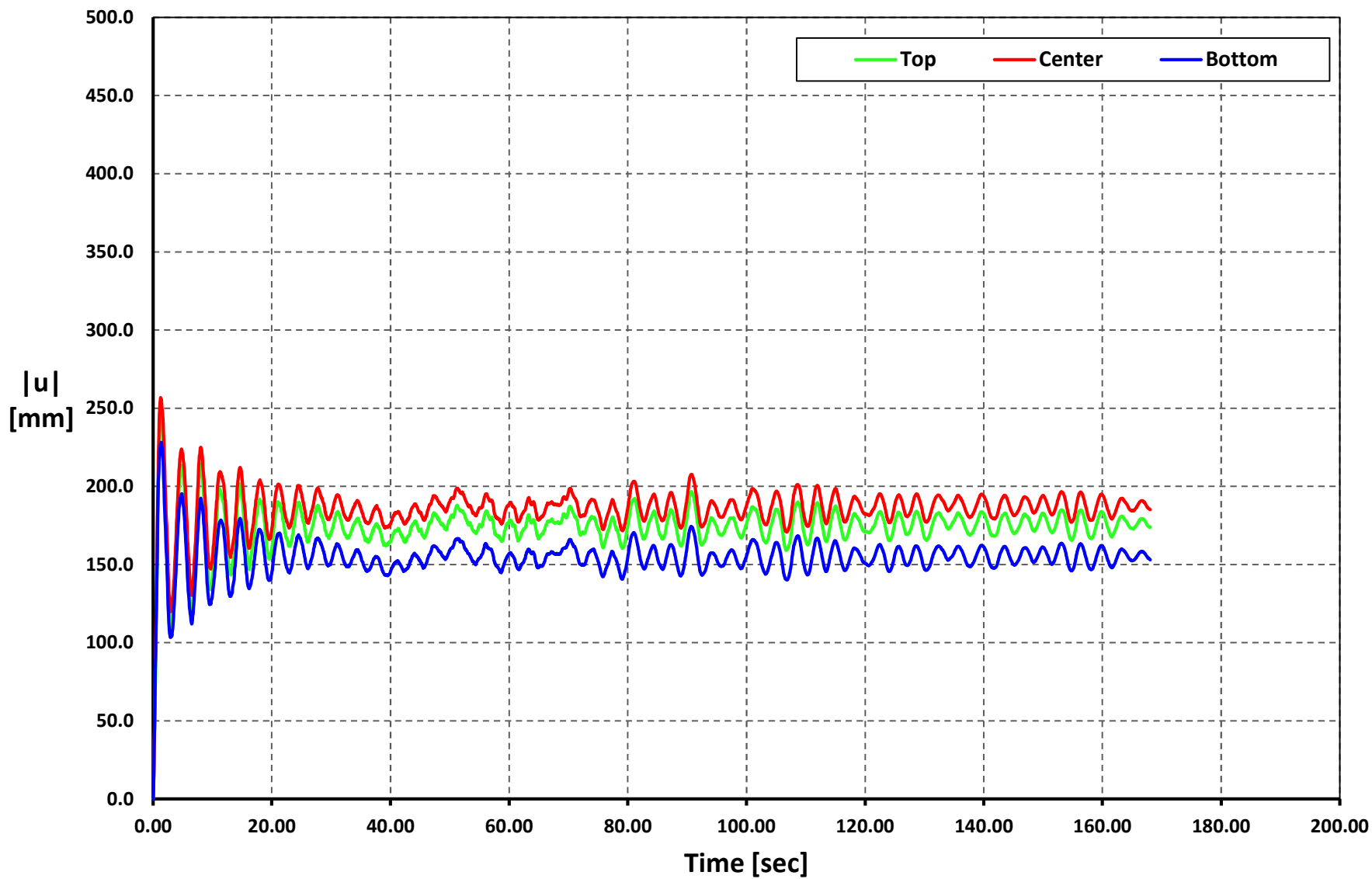
Time vs. $|u|$

Geometry 03 - Soil Type 3 - AGY2-N



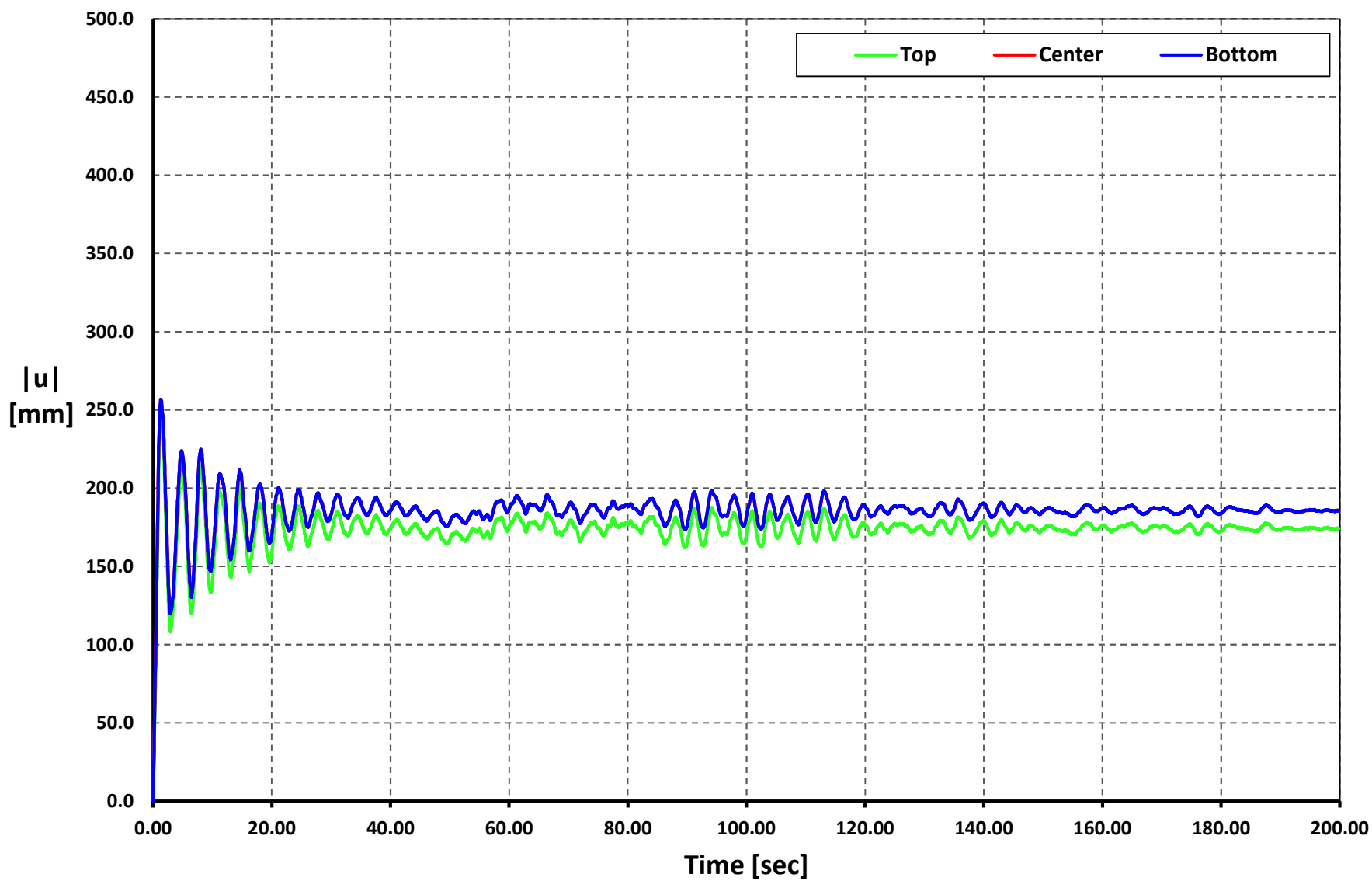
Time vs. |u|

Geometry 03 - Soil Type 3 - AMIL-E



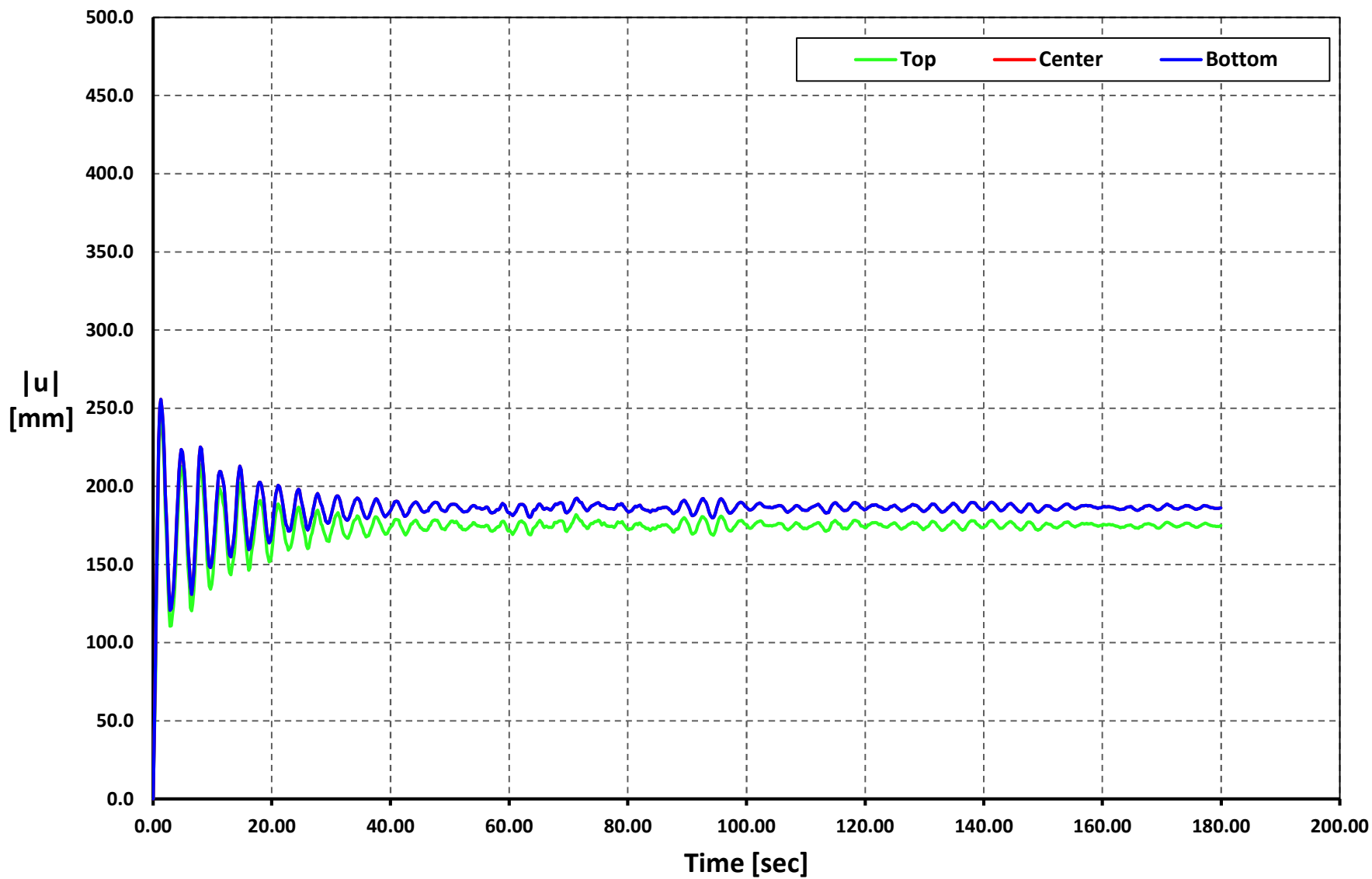
Time vs. $|u|$

Geometry 03 - Soil Type 3 - ACUE-E



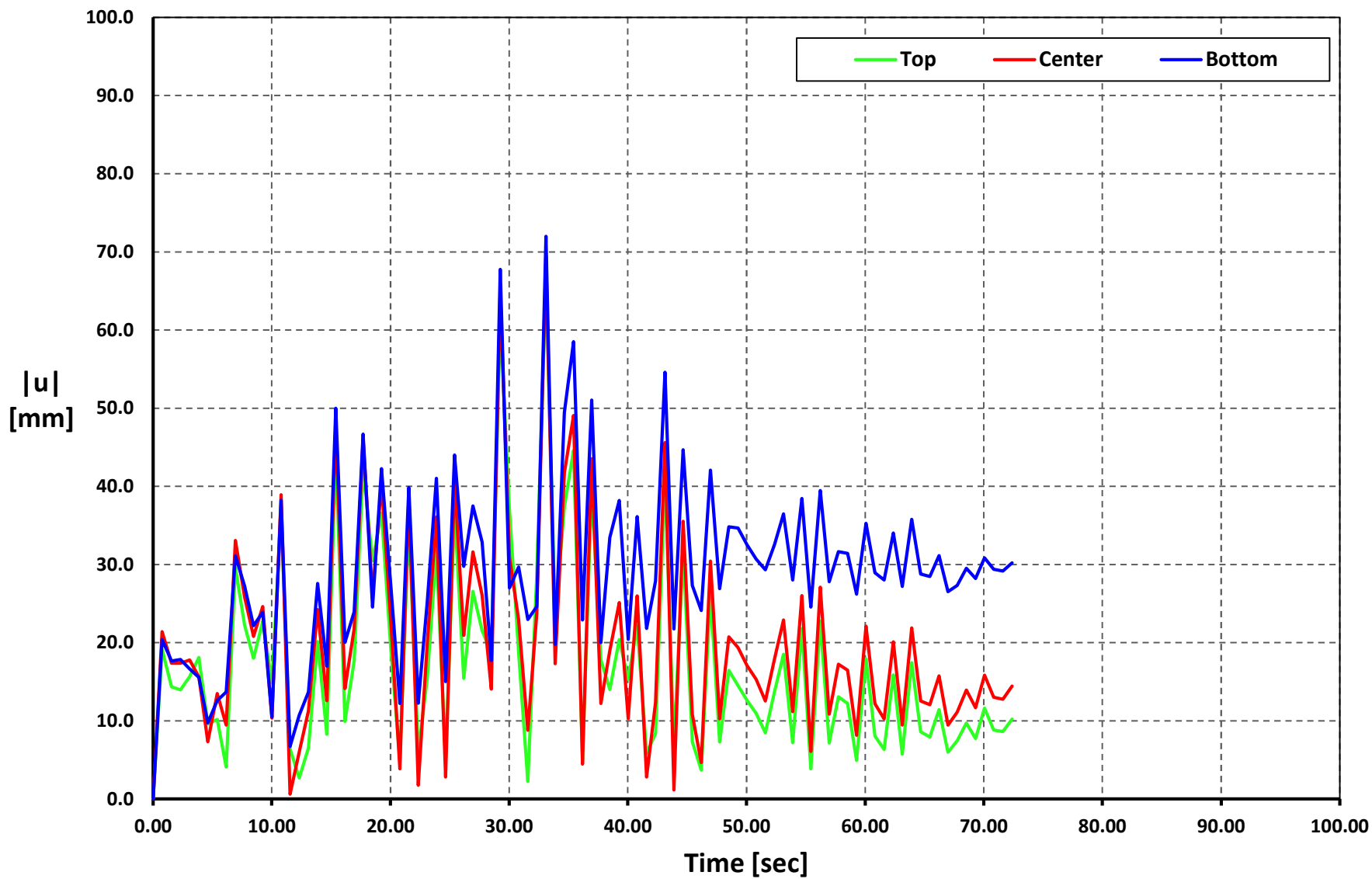
Time vs. |u|

Geometry 03 - Soil Type 3 - ALJ1-N



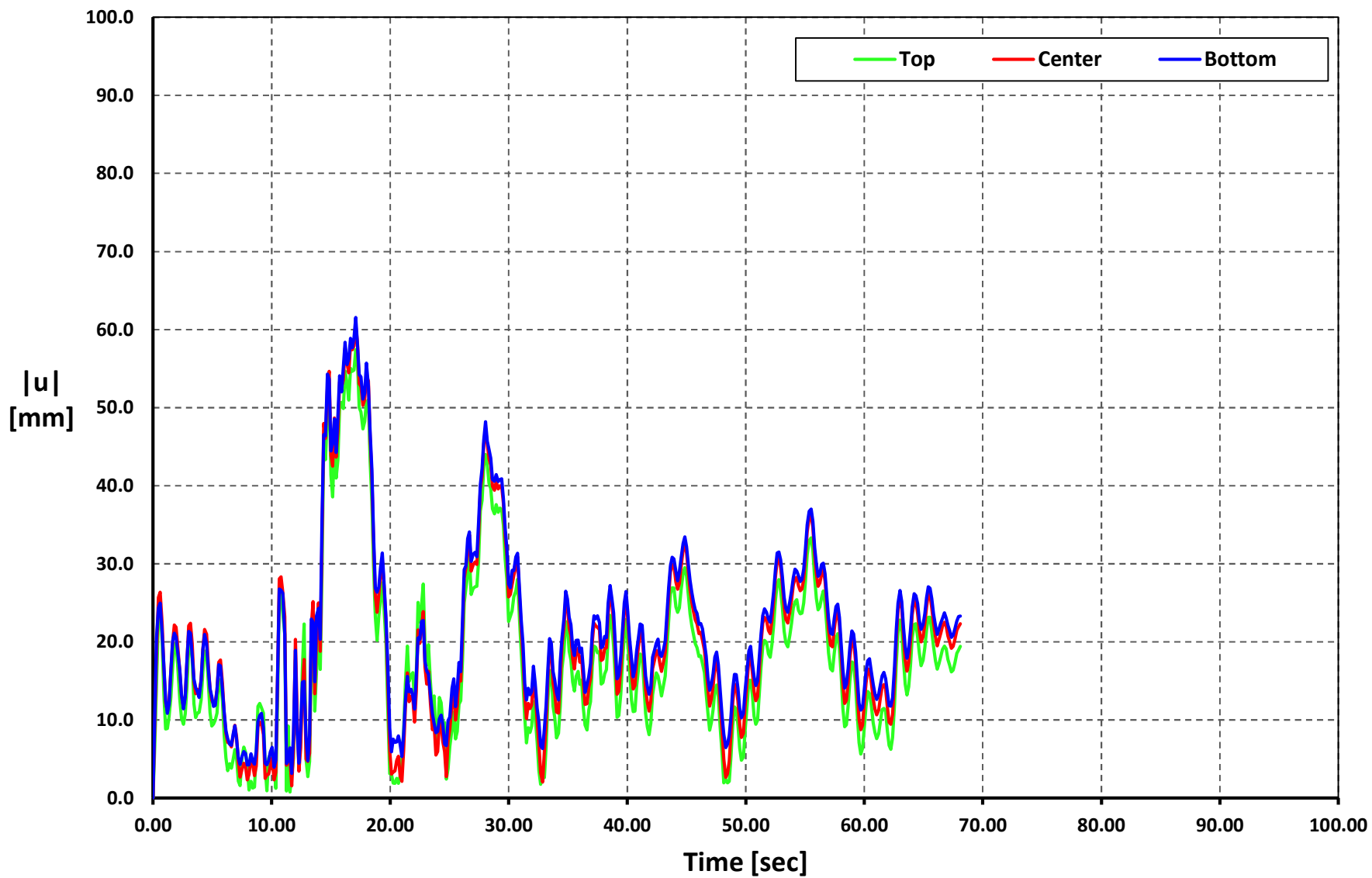
Time vs. |u|

Geometry 04 - Soil Type 1 - APED-E



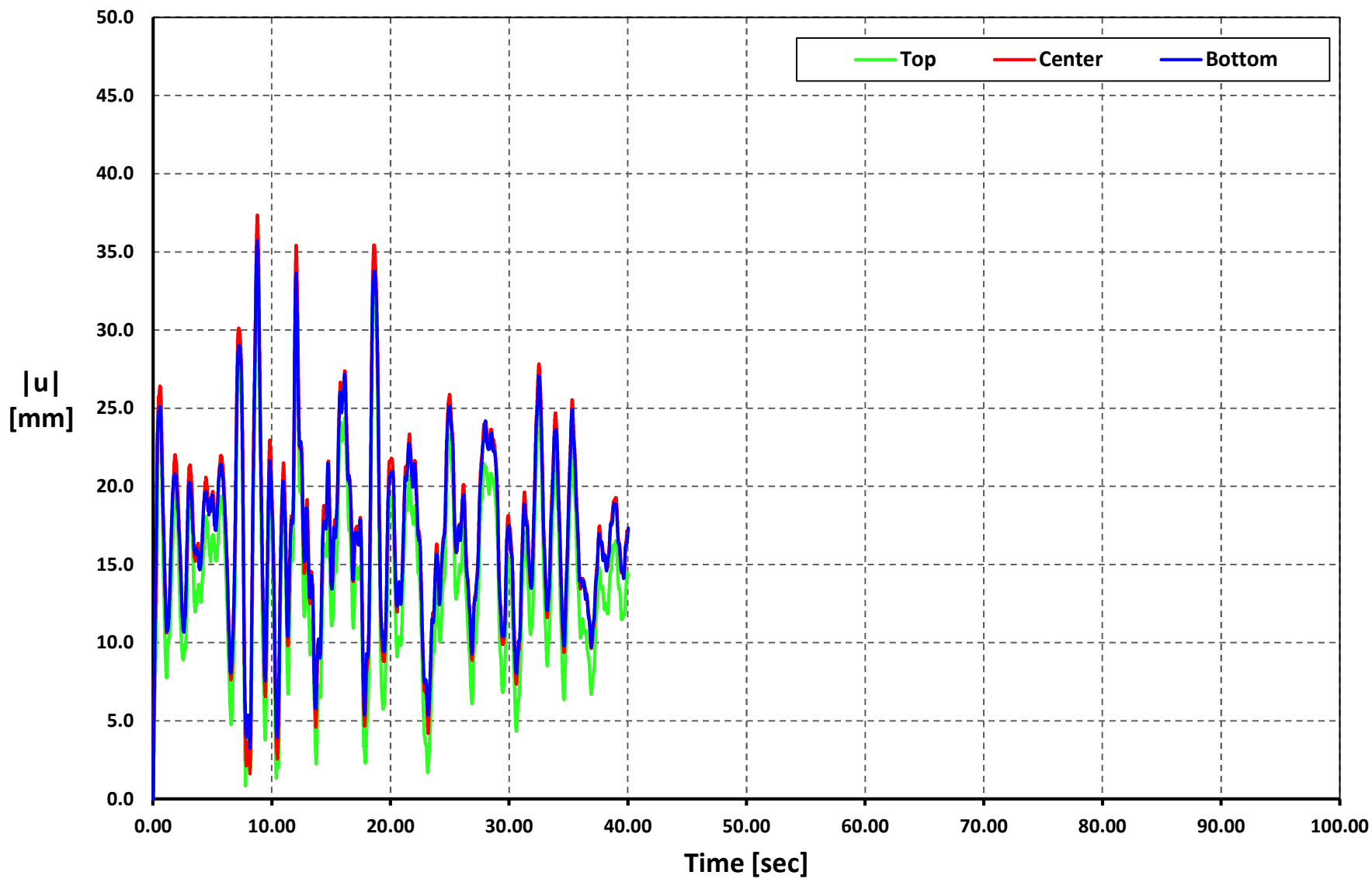
Time vs. |u|

Geometry 04 - Soil Type 1 - APO1-N



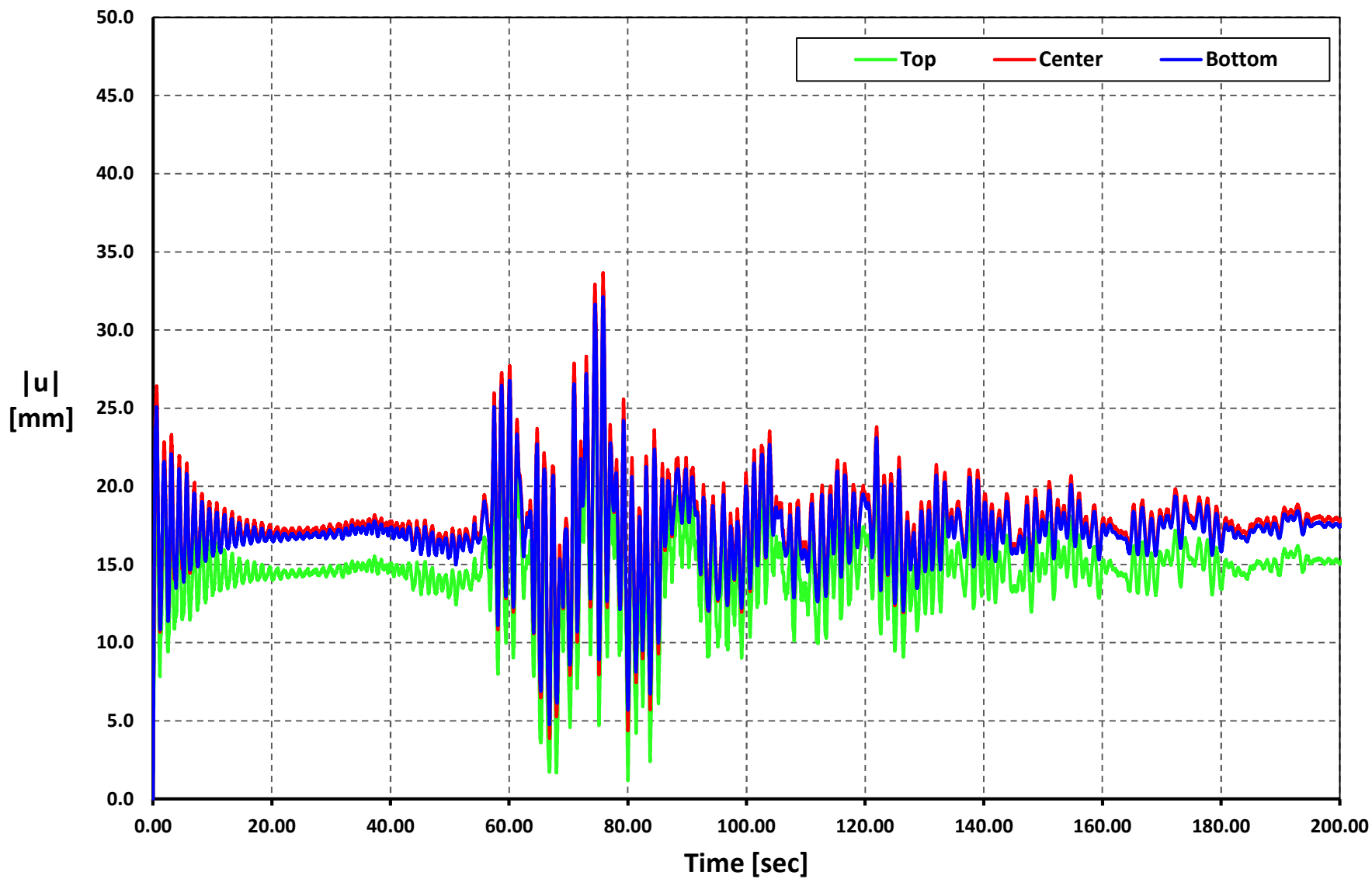
Time vs. |u|

Geometry 04 - Soil Type 1 - AMNT-N



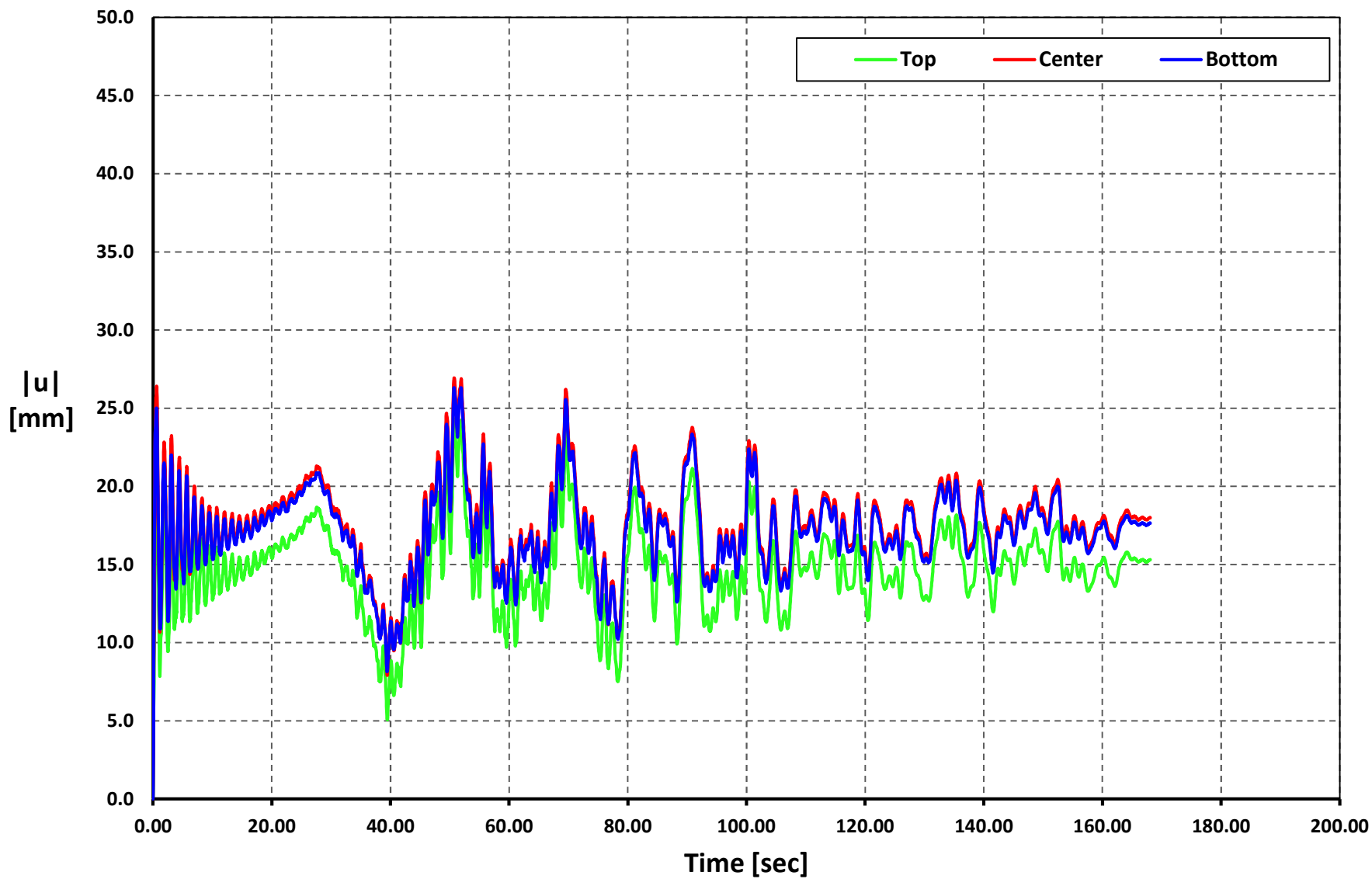
Time vs. $|u|$

Geometry 04 - Soil Type 1 - AGY2-N



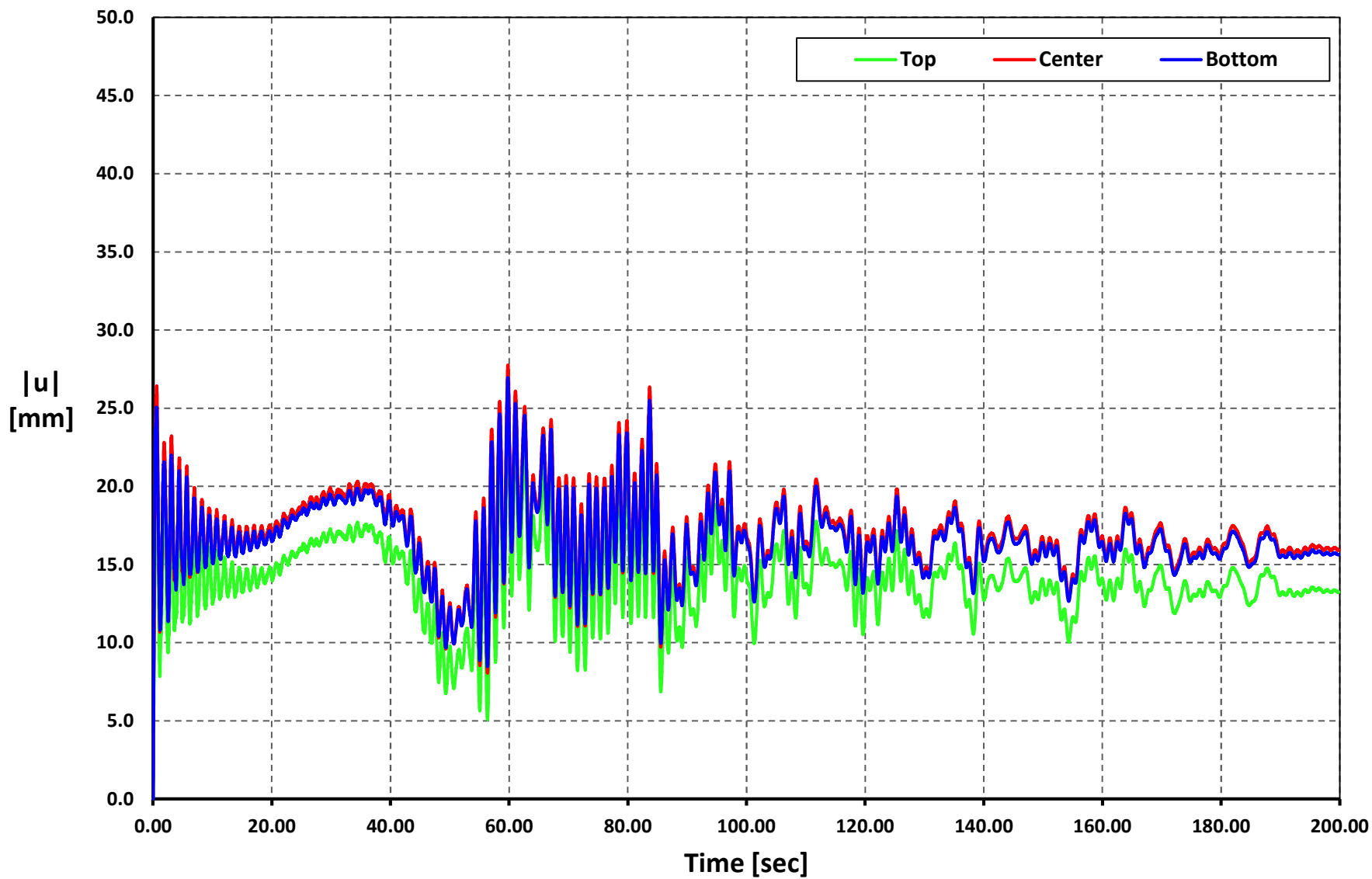
Time vs. $|u|$

Geometry 04 - Soil Type 1 - AMIL-E



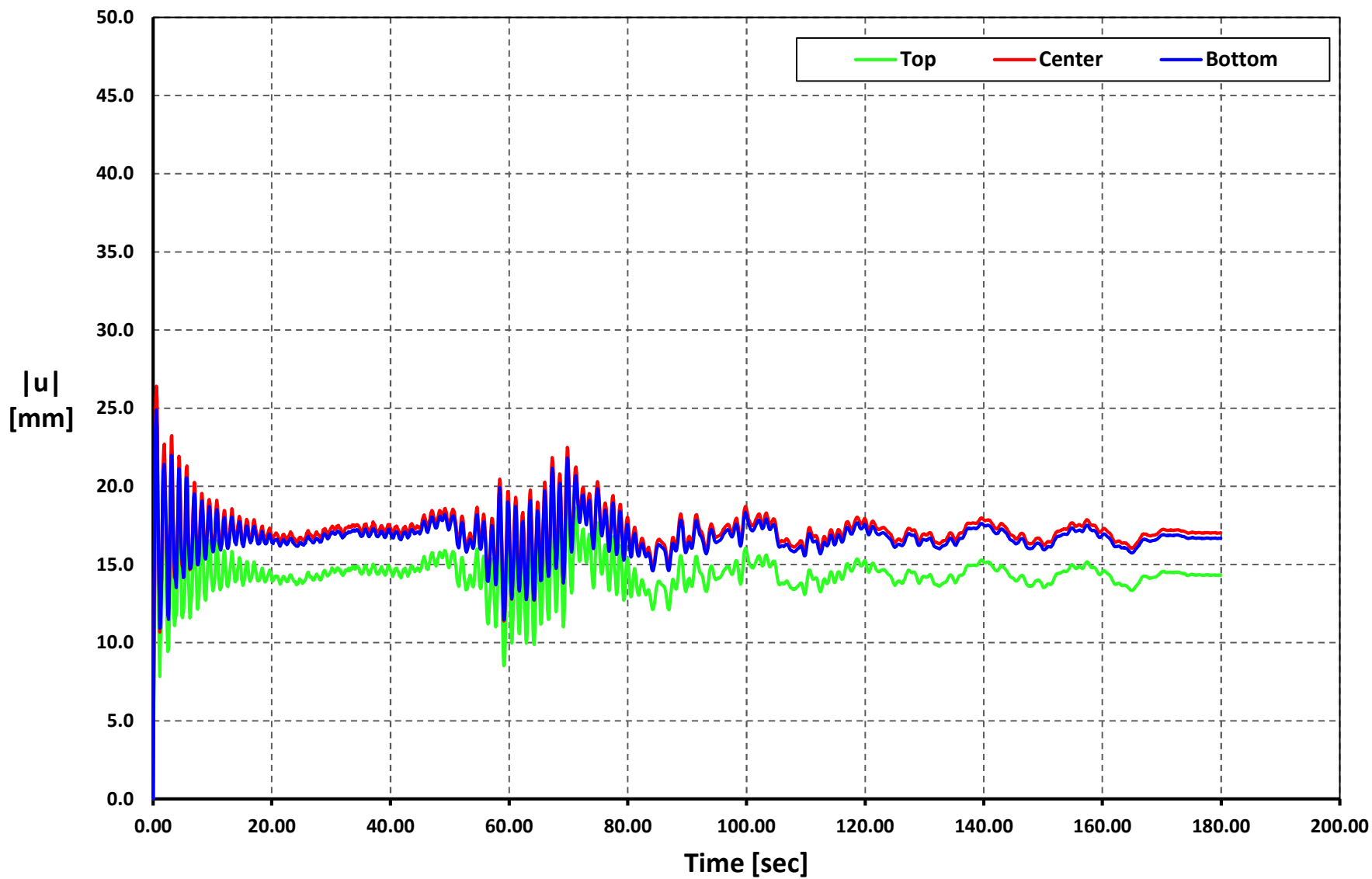
Time vs. $|u|$

Geometry 04 - Soil Type 1 - ACUE-E



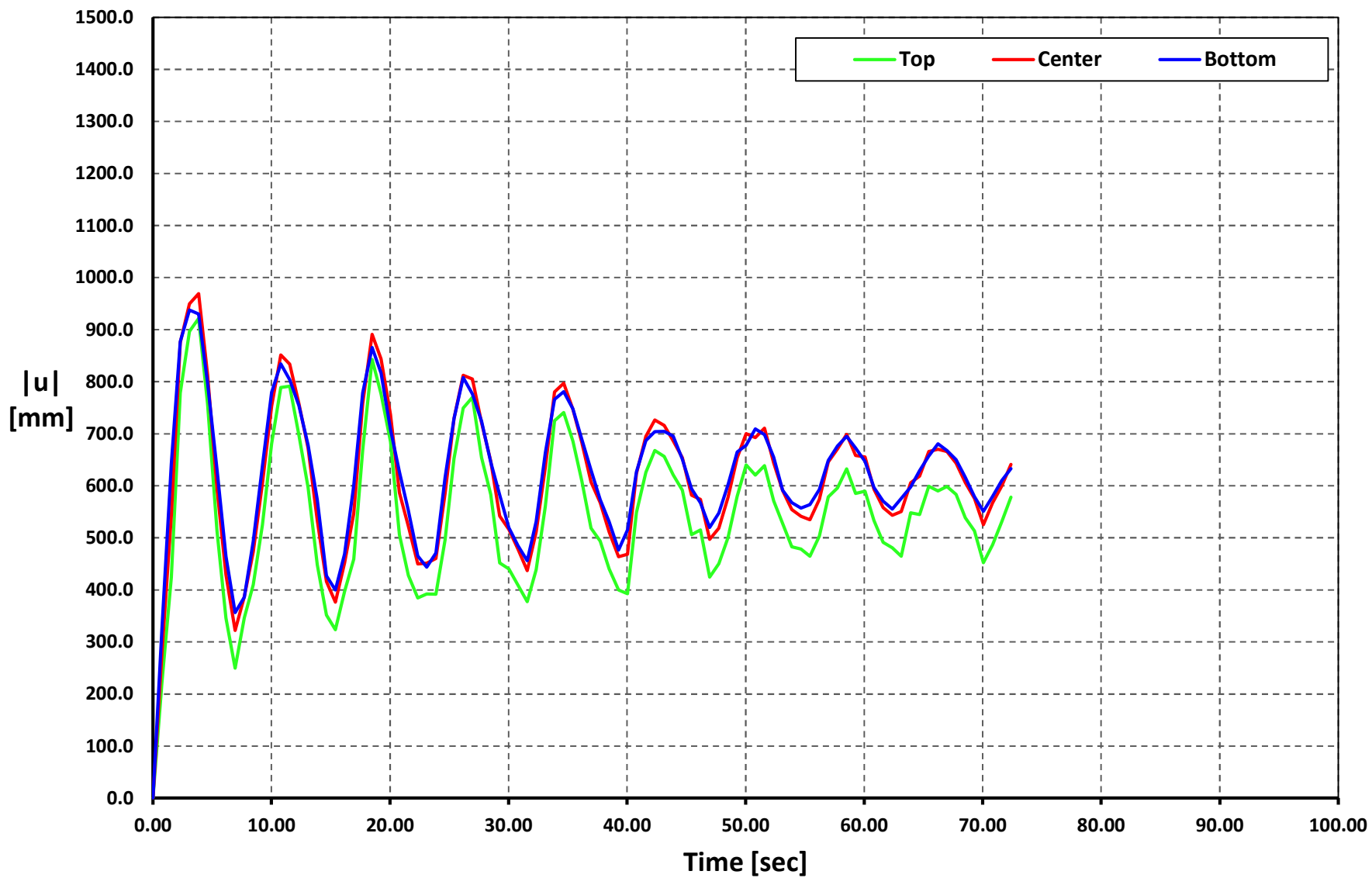
Time vs. |u|

Geometry 04 - Soil Type 1 - ALJ1-N



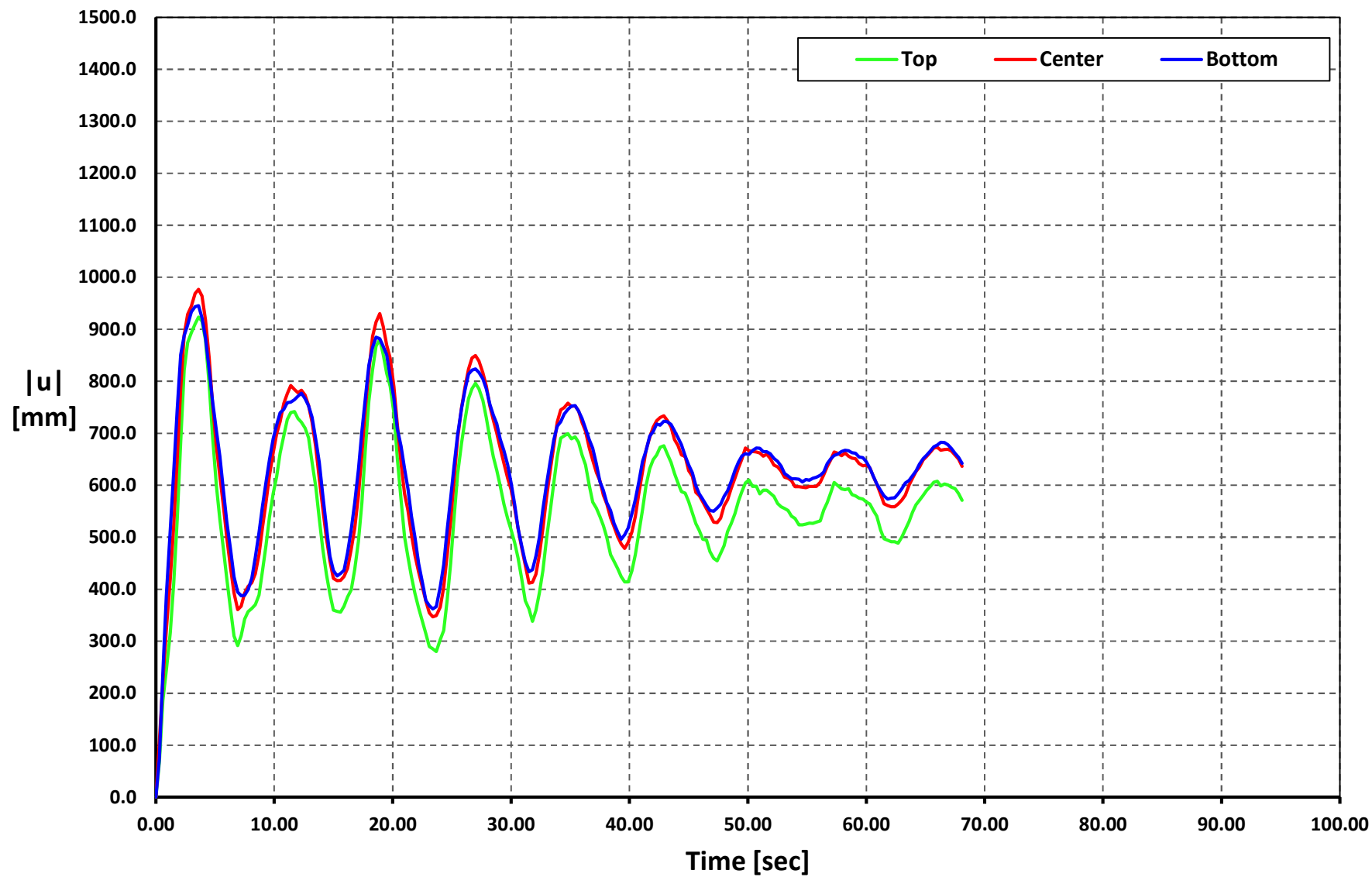
Time vs. |u|

Geometry 04 - Soil Type 2 - APED-E



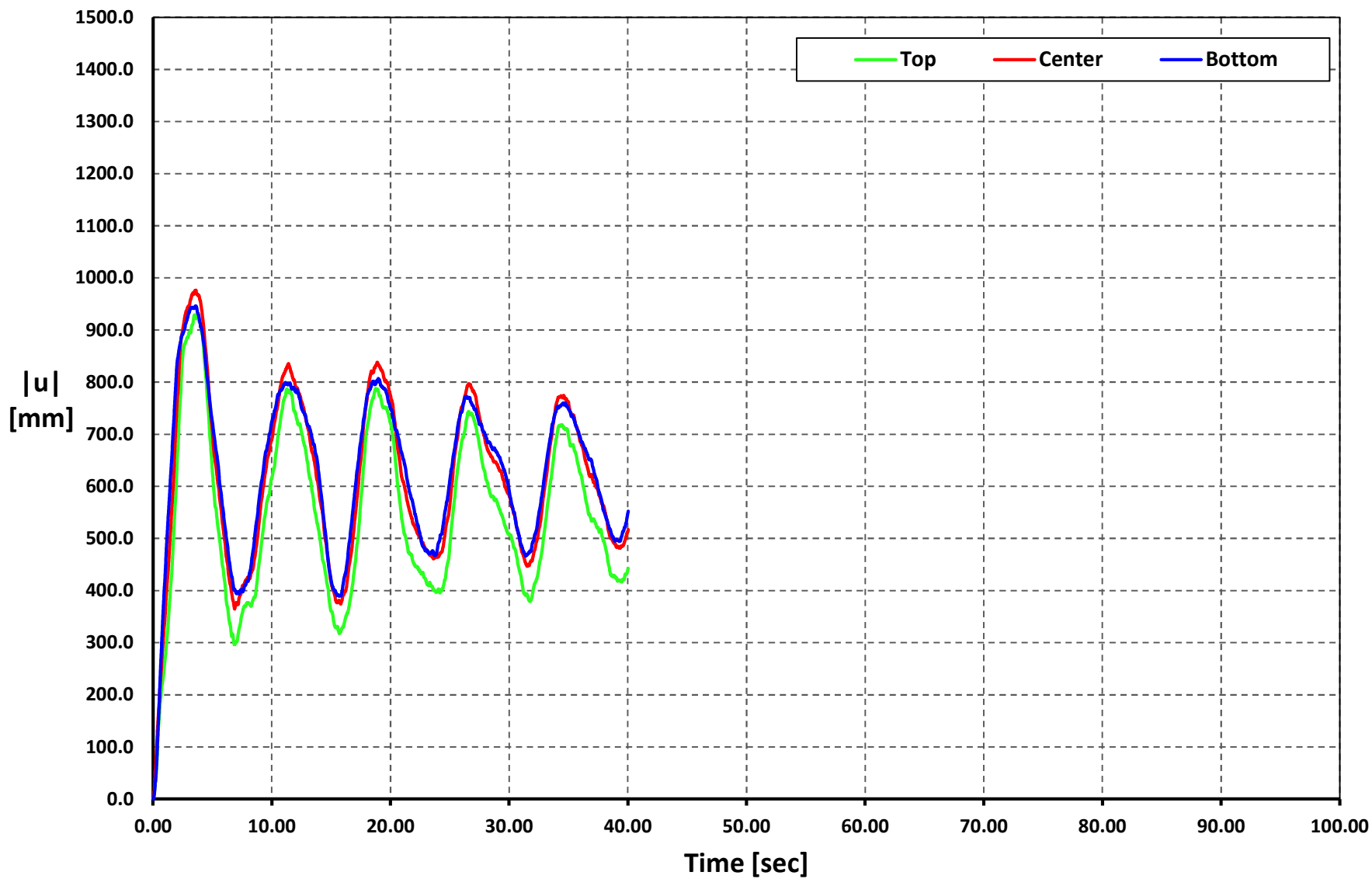
Time vs. $|u|$

Geometry 04 - Soil Type 2 - APO1-N



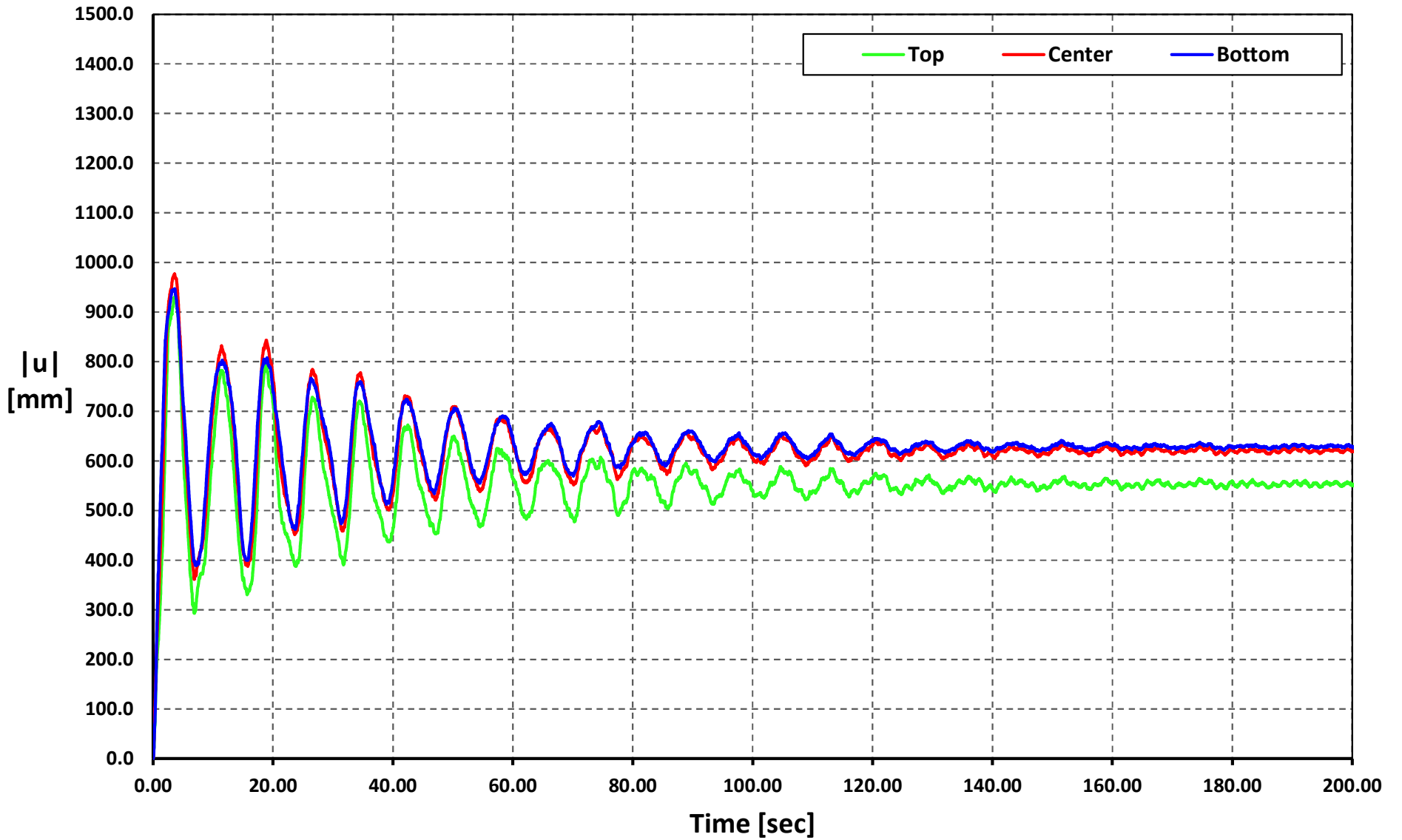
Time vs. |u|

Geometry 04 - Soil Type 2 - AMNT-N



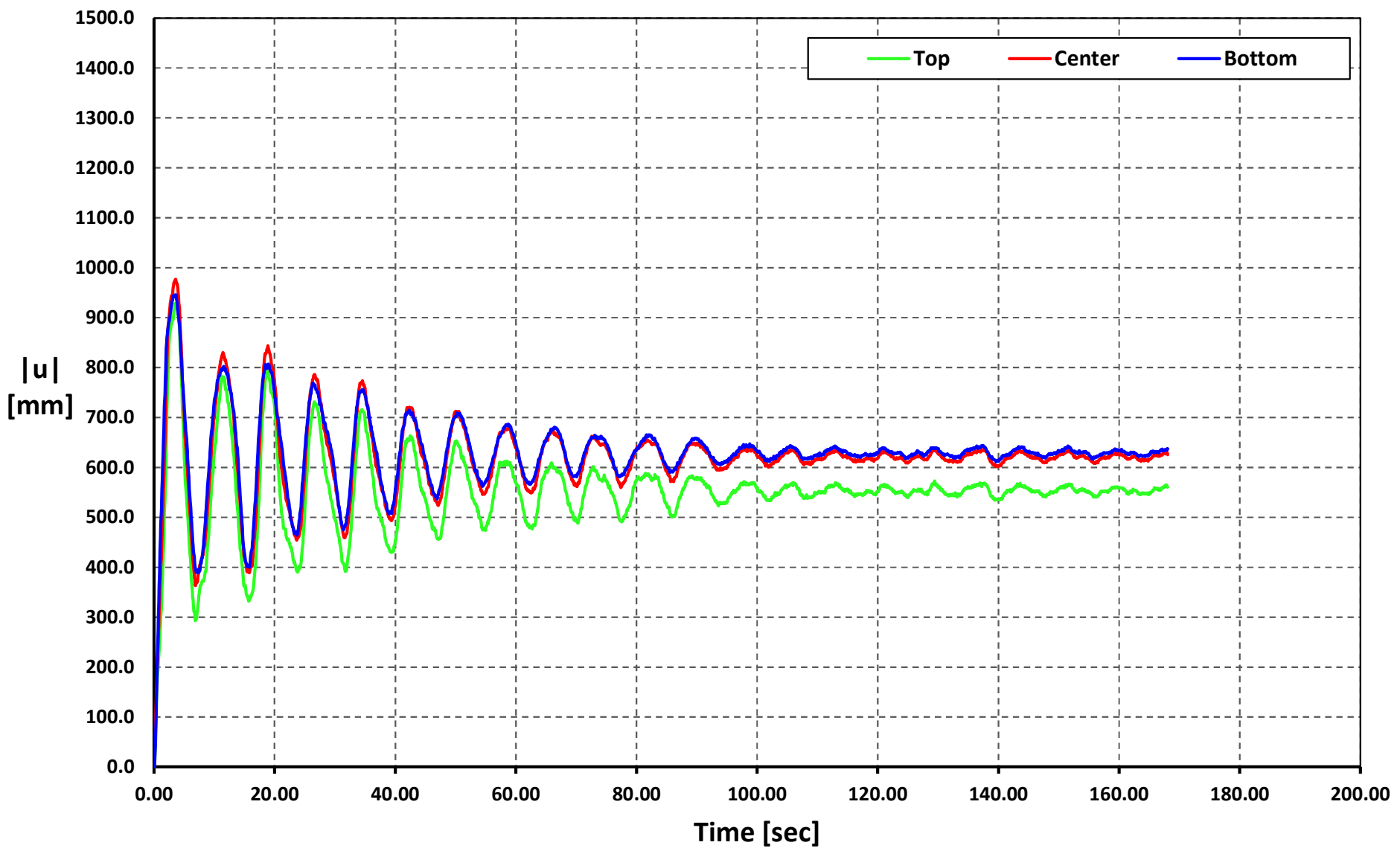
Time vs. |u|

Geometry 04 - Soil Type 2 - AGY2-N



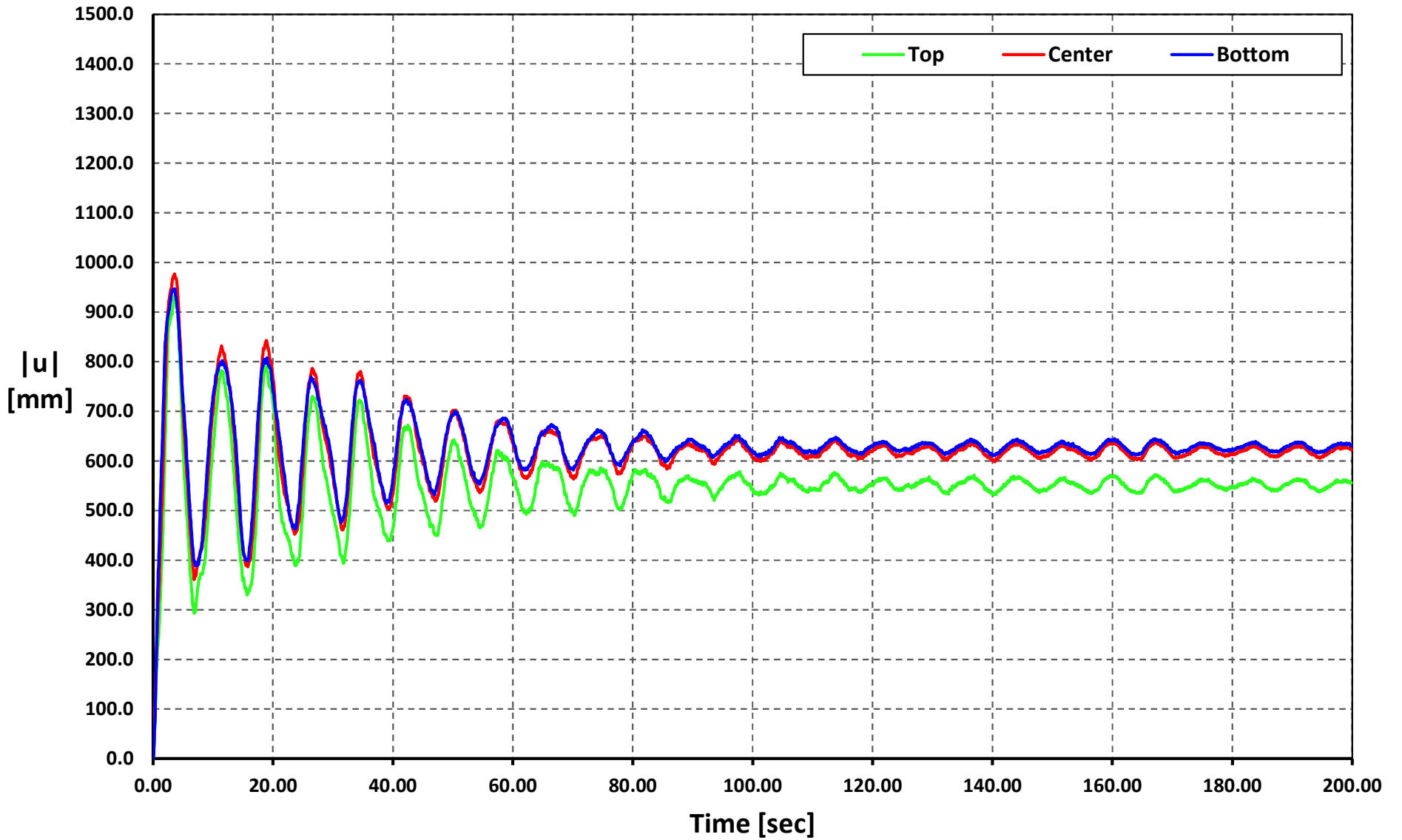
Time vs. |u|

Geometry 04 - Soil Type 2 - AMIL-E



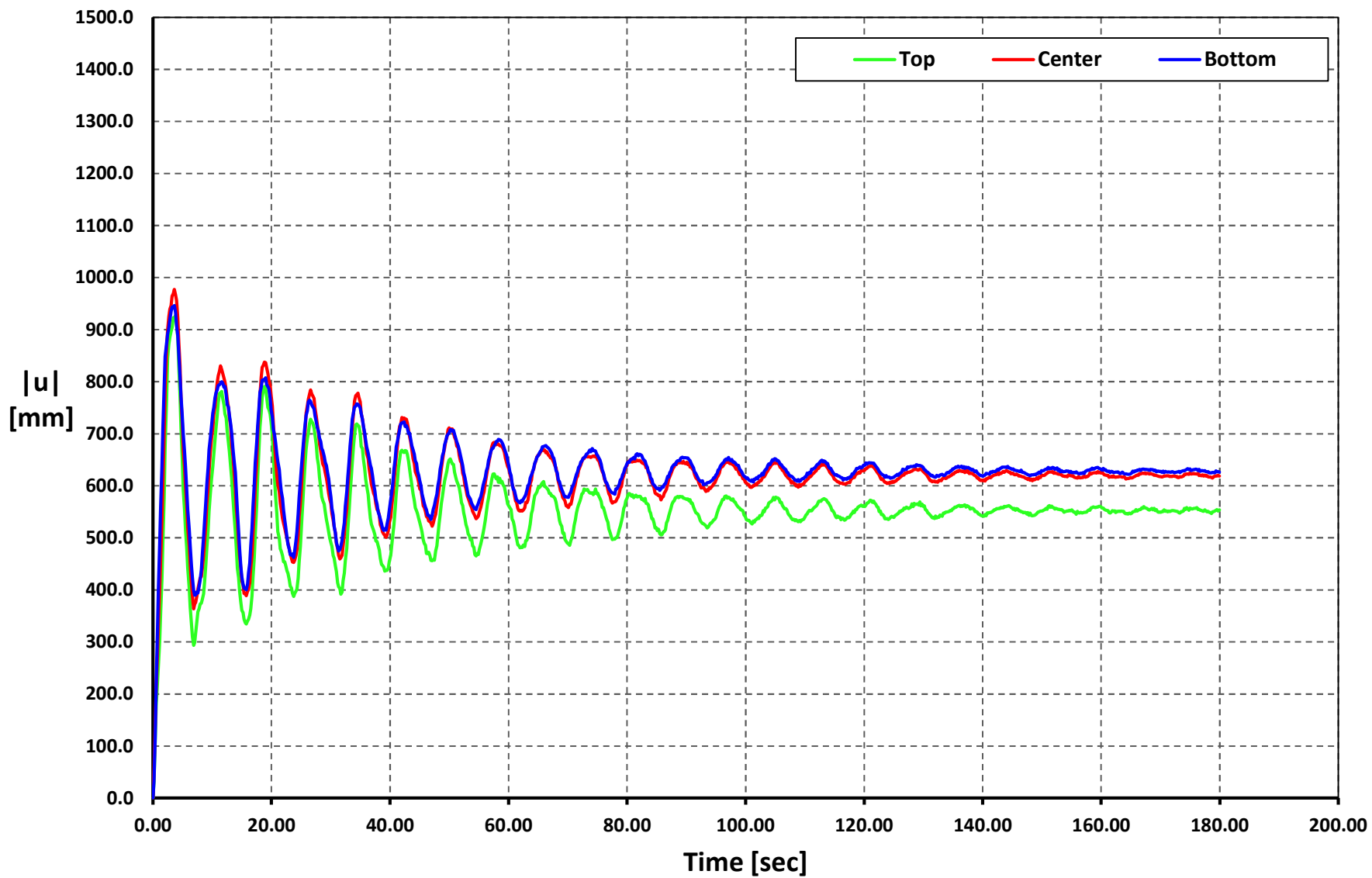
Time vs. |u|

Geometry 04 - Soil Type 2 - ACUE-E



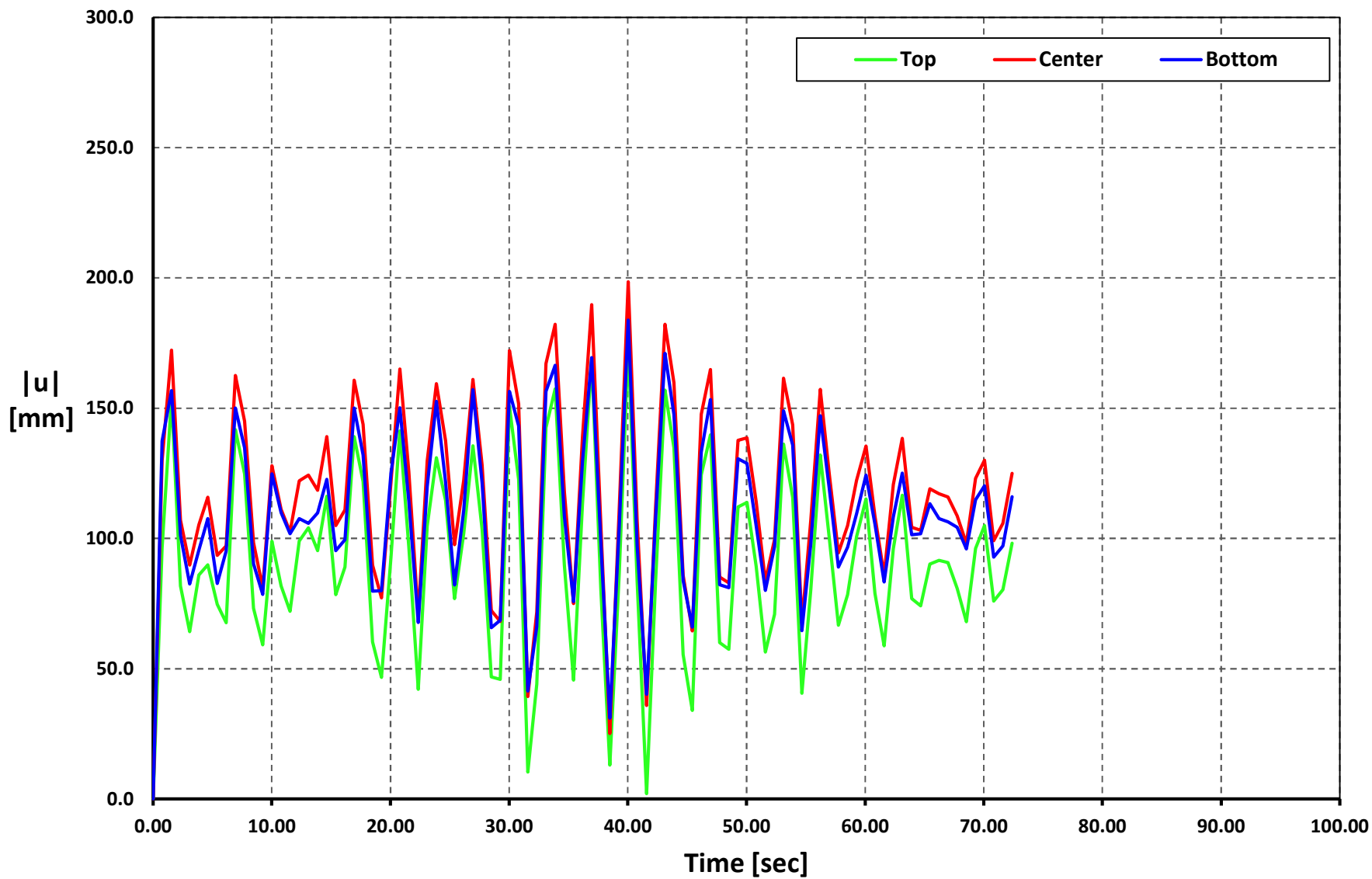
Time vs. $|u|$

Geometry 04 - Soil Type 2 - ALJ1-N



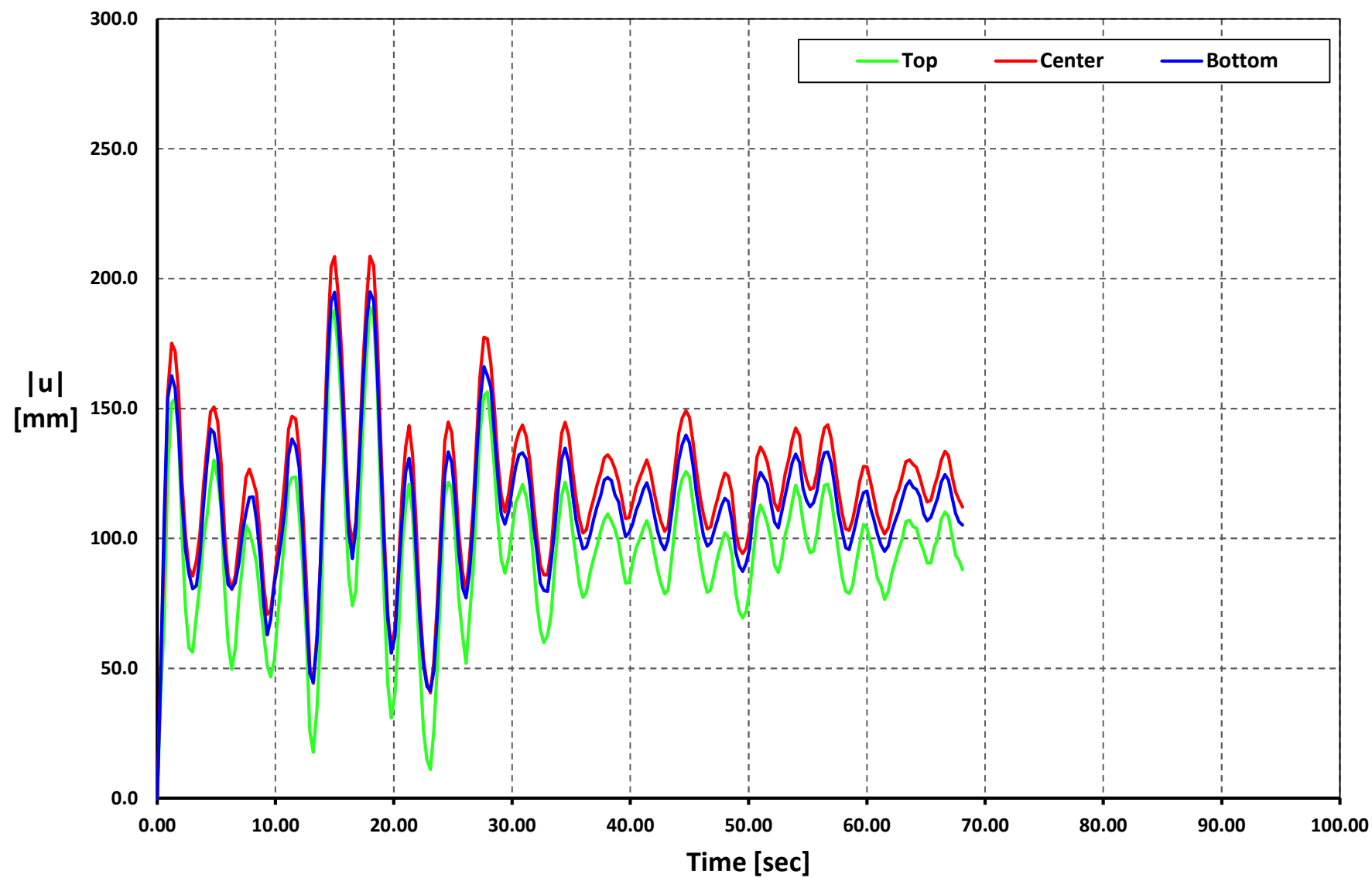
Time vs. |u|

Geometry 04 - Soil Type 3 - APED-E



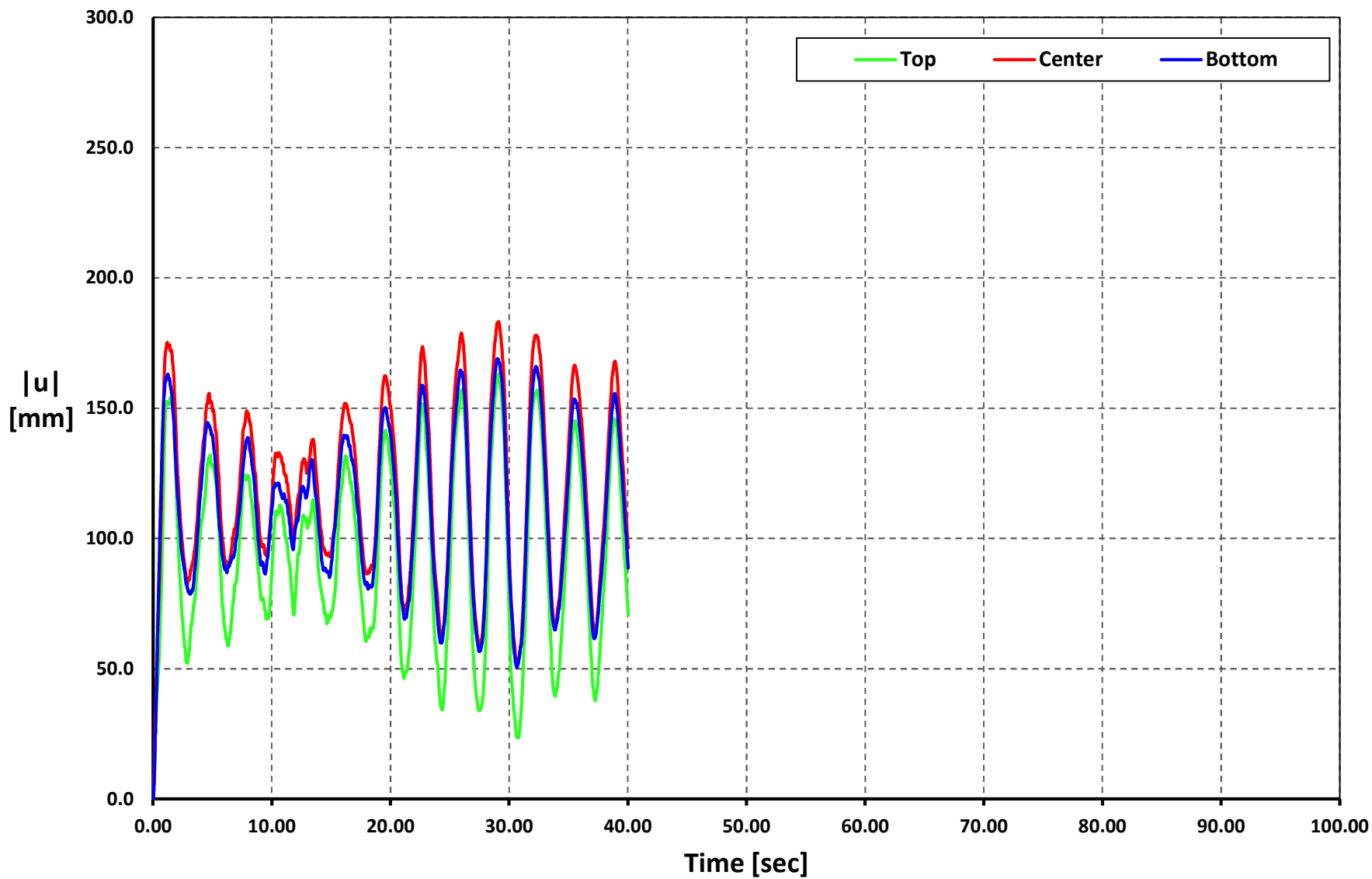
Time vs. $|u|$

Geometry 04 - Soil Type 3 - APO1-N



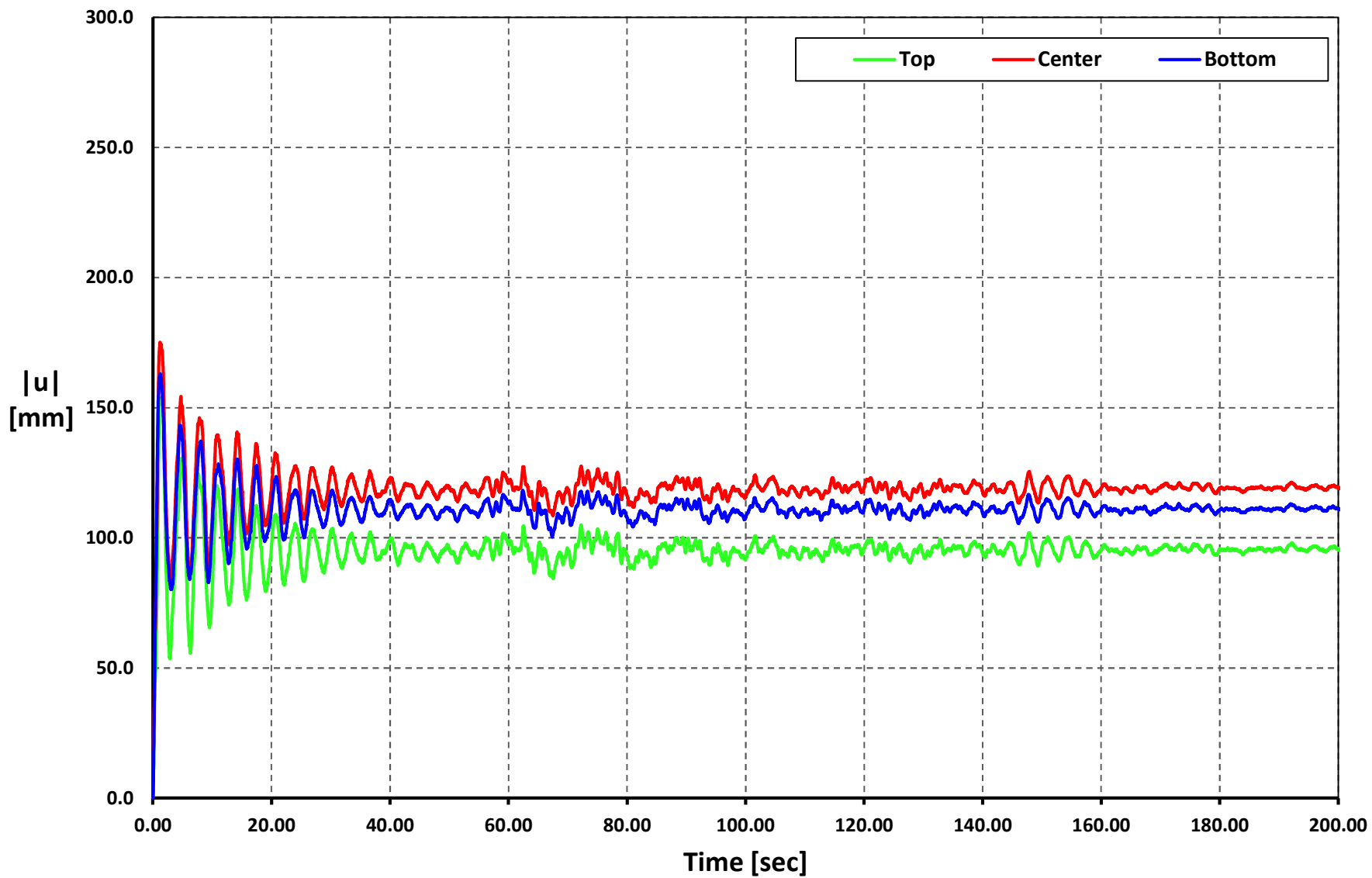
Time vs. |u|

Geometry 04 - Soil Type 3 - AMNT-N



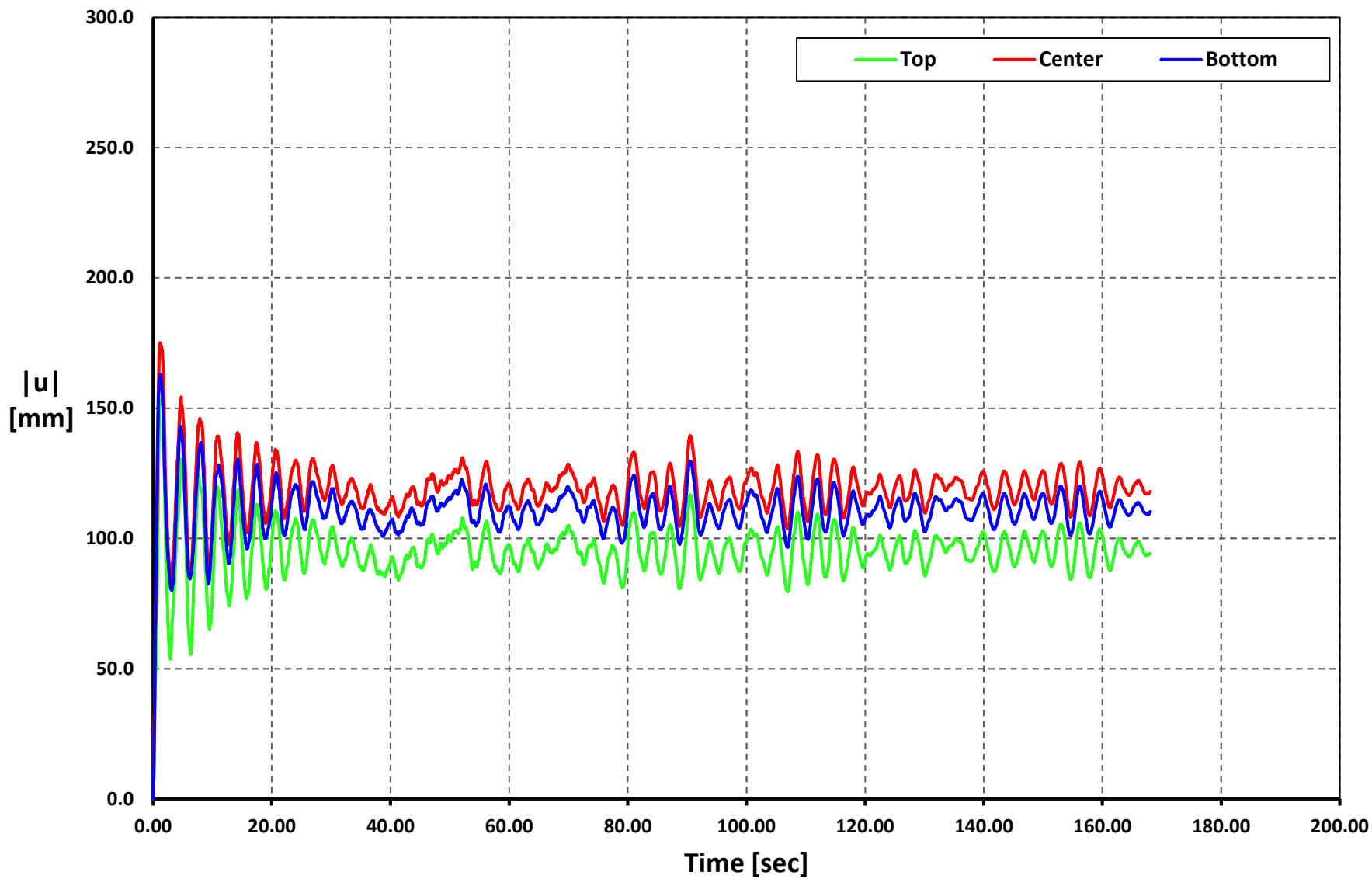
Time vs. $|u|$

Geometry 04 - Soil Type 3 - AGY2-N



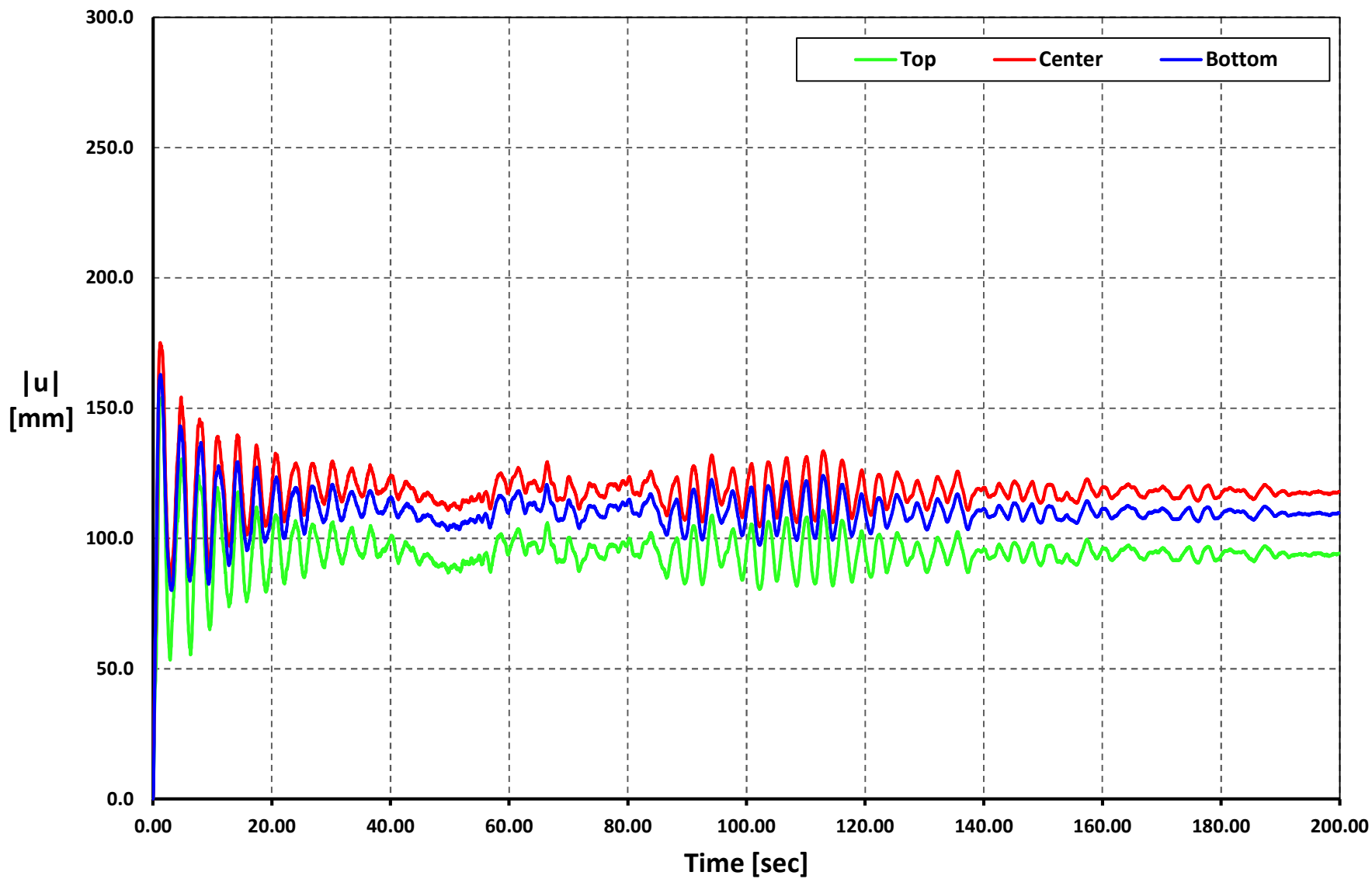
Time vs. $|u|$

Geometry 04 - Soil Type 3 - AMIL-E



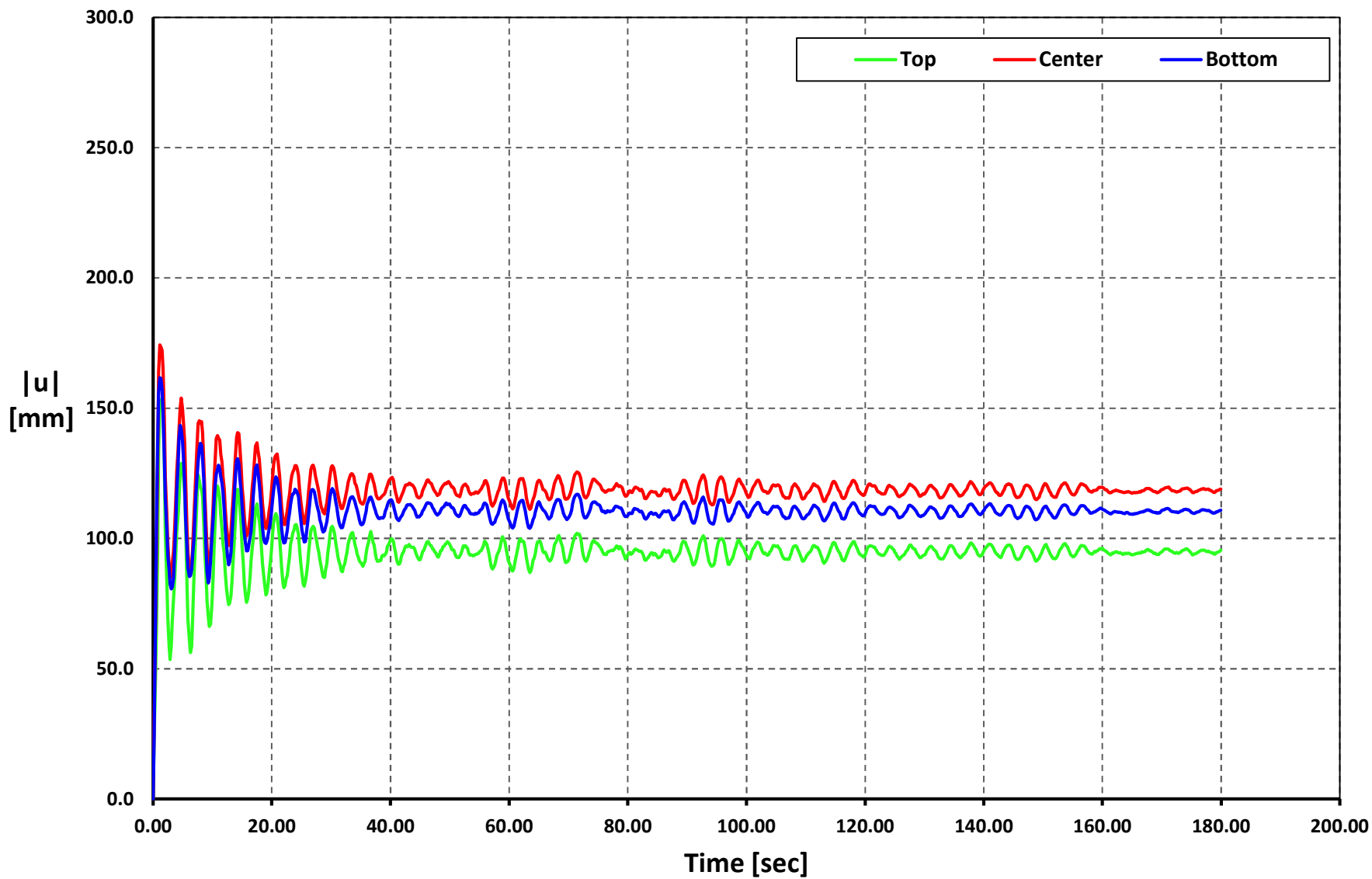
Time vs. |u|

Geometry 04 - Soil Type 3 - ACUE-E



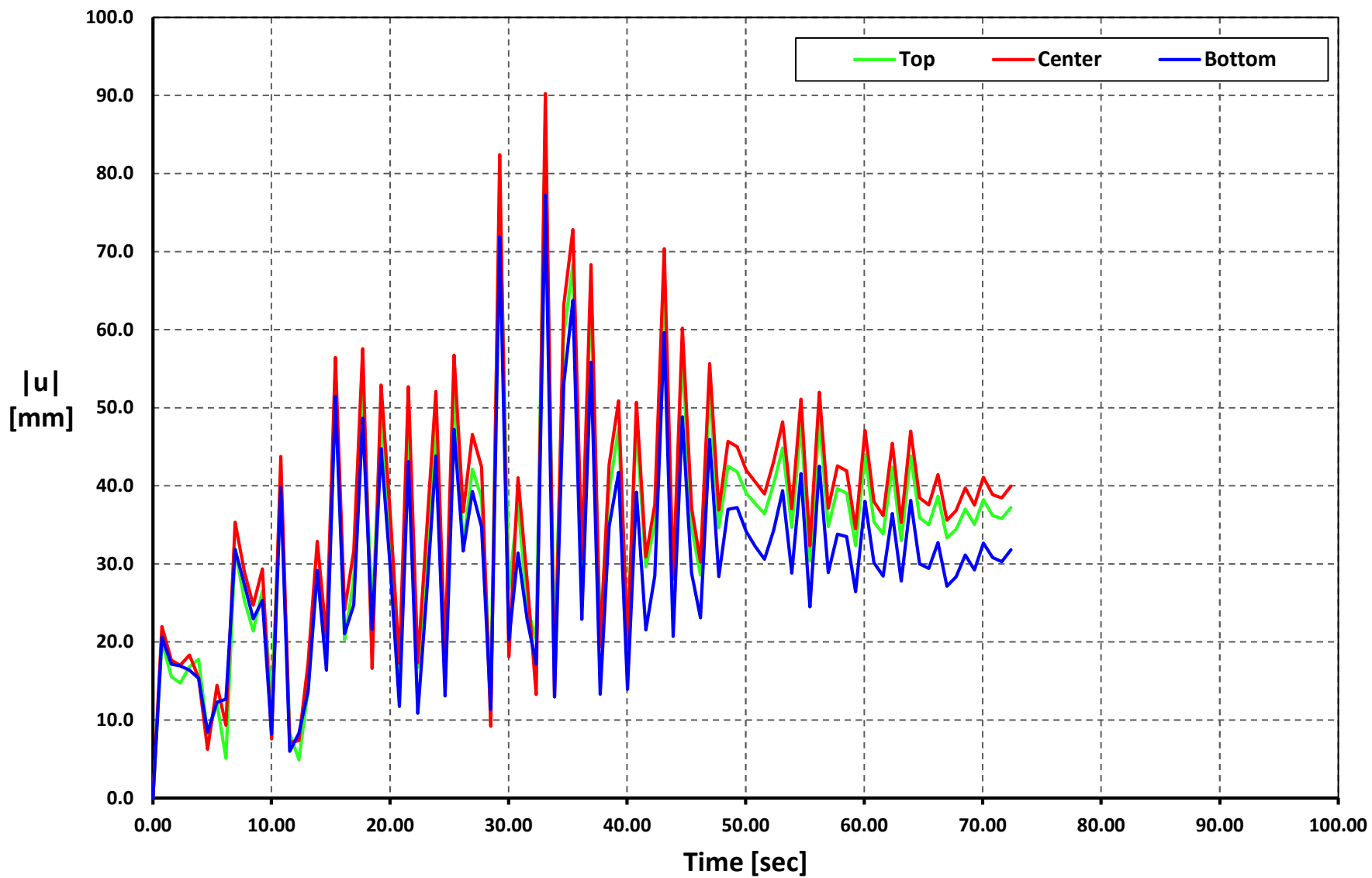
Time vs. $|u|$

Geometry 04 - Soil Type 3 - ALJ1-N



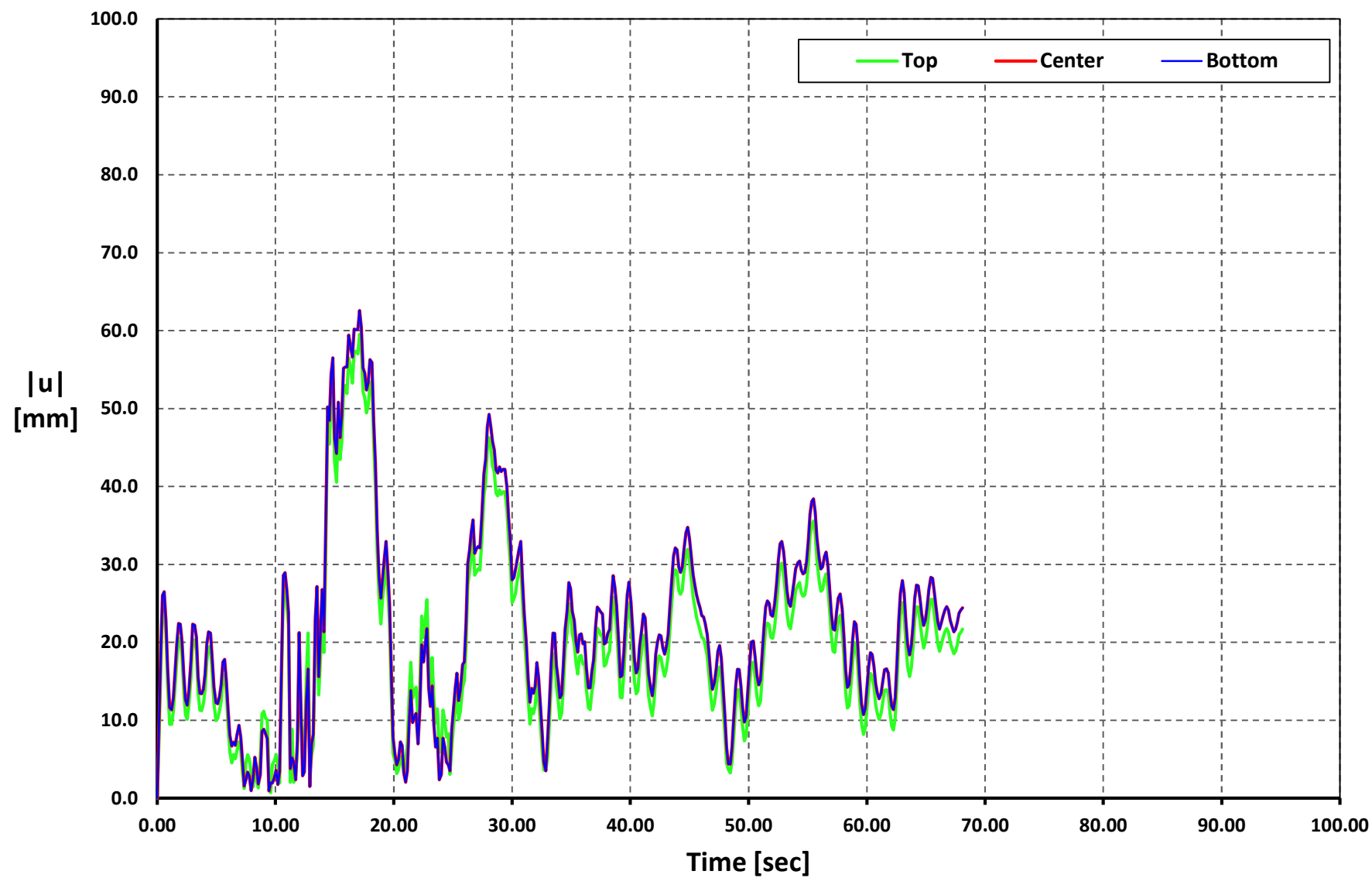
Time vs. |u|

Geometry 05 - Soil Type 1 - APED-E



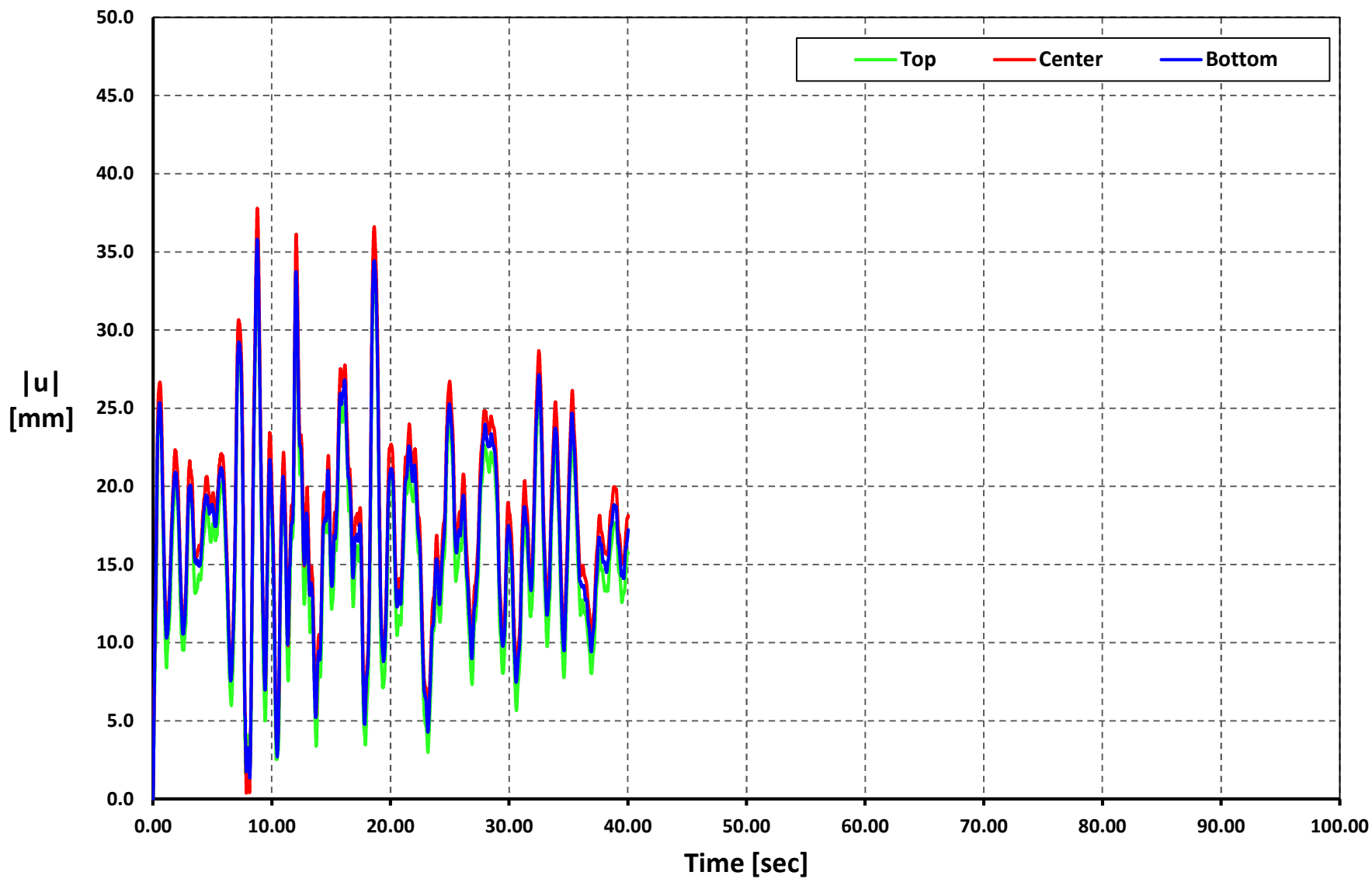
Time vs. $|u|$

Geometry 05 - Soil Type 1 - APO1-N



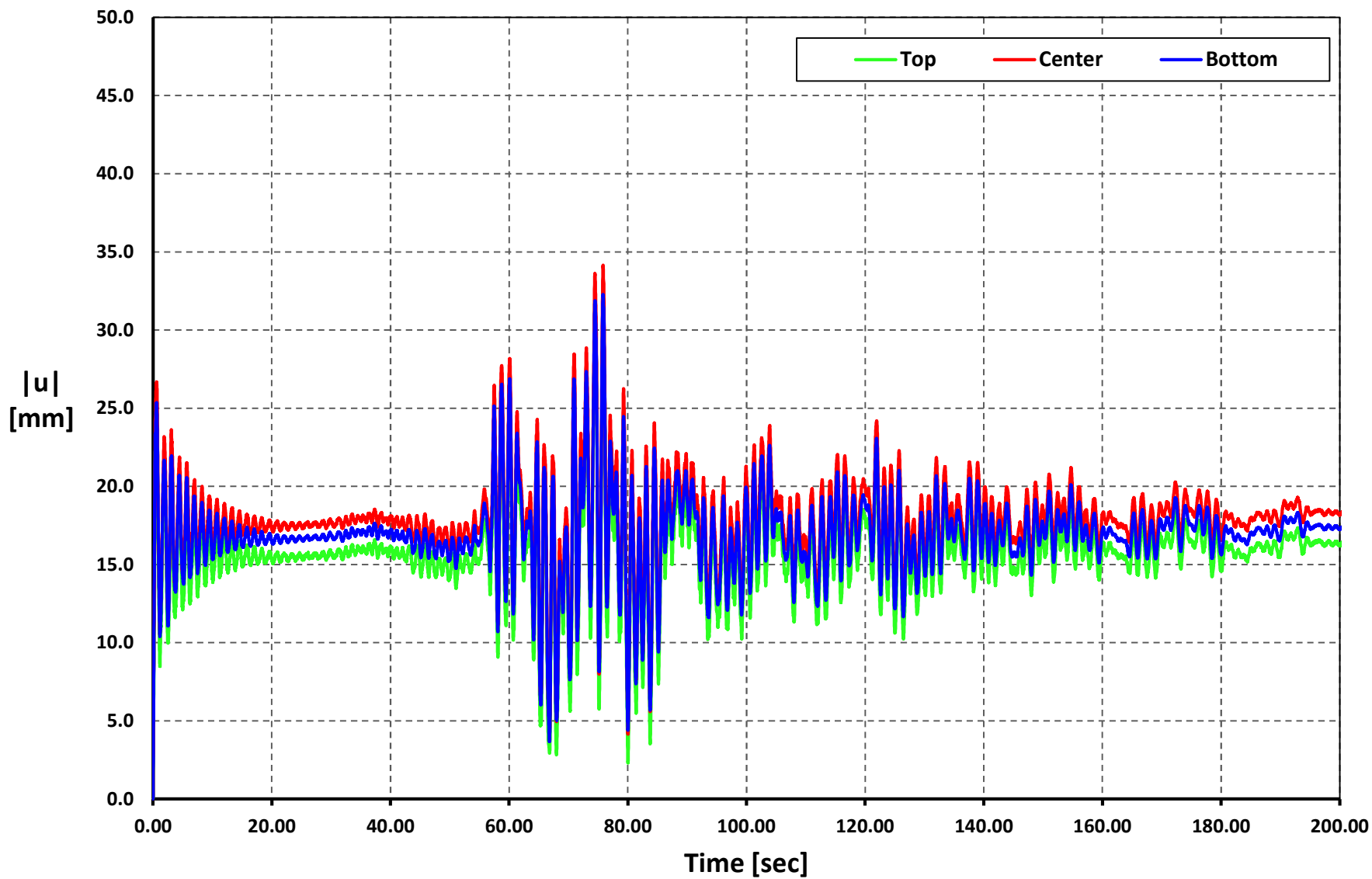
Time vs. $|u|$

Geometry 05 - Soil Type 1 - AMNT-N



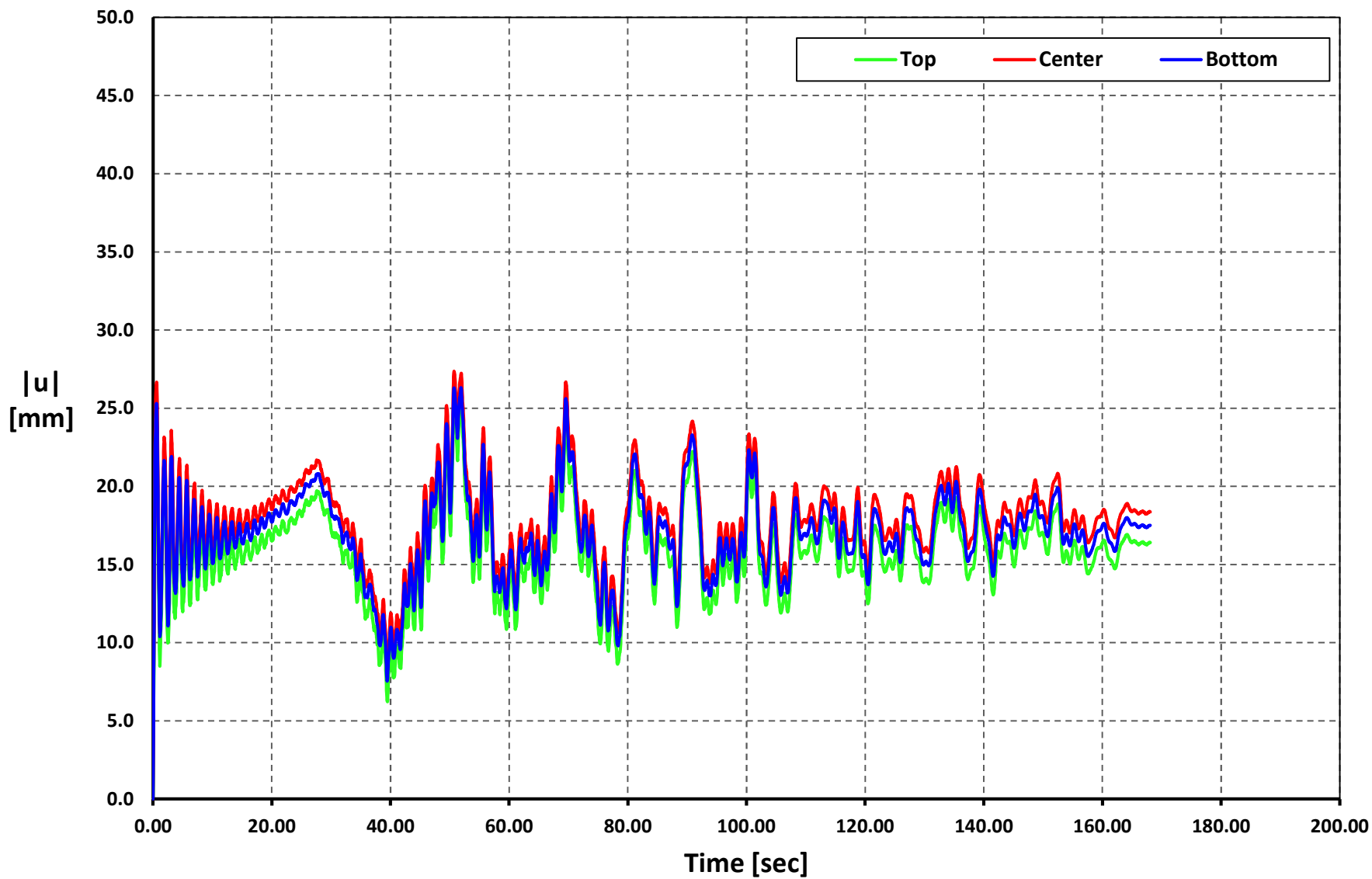
Time vs. $|u|$

Geometry 05 - Soil Type 1 - AGY2-N



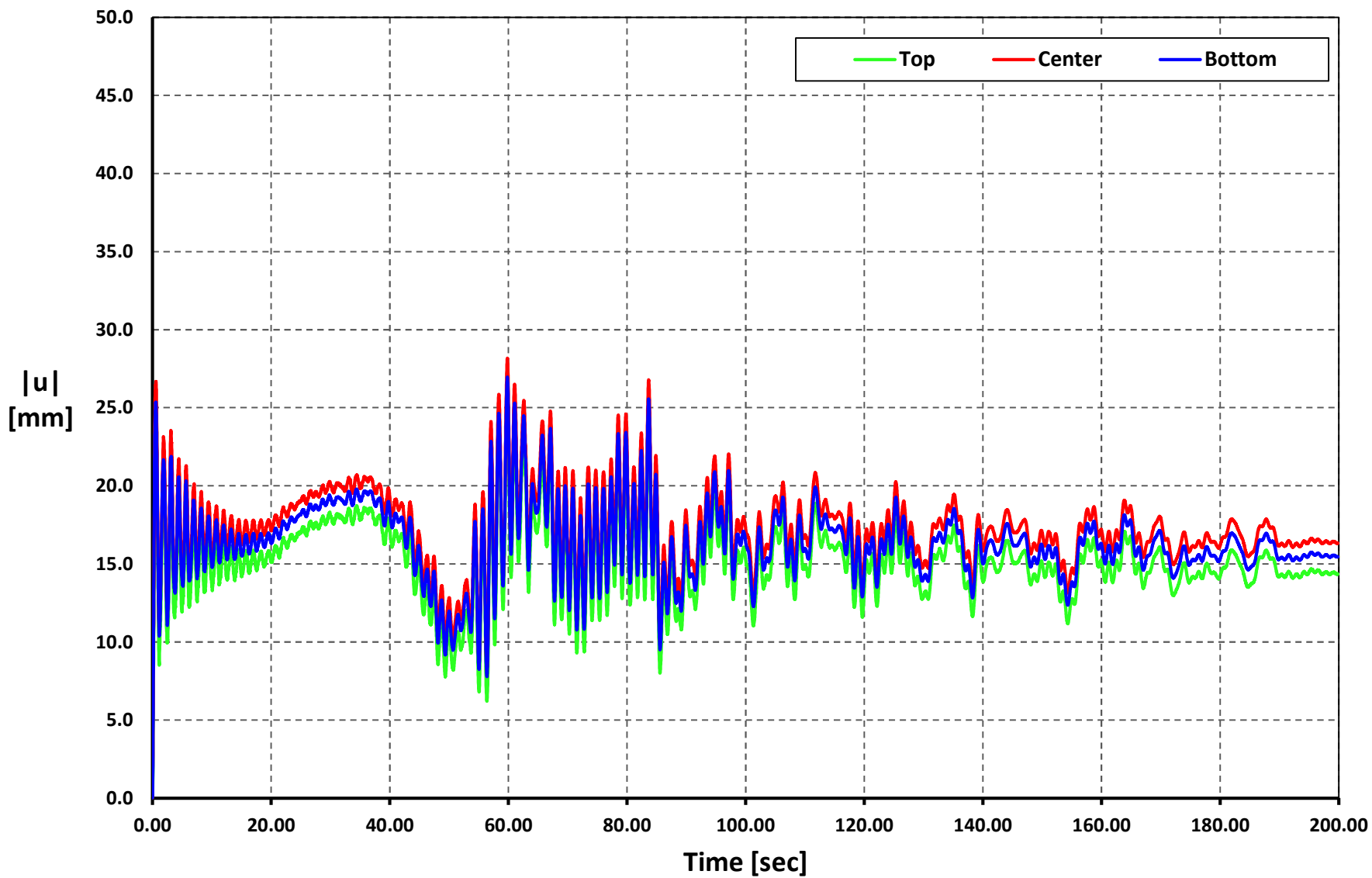
Time vs. $|u|$

Geometry 05 - Soil Type 1 - AMIL-E



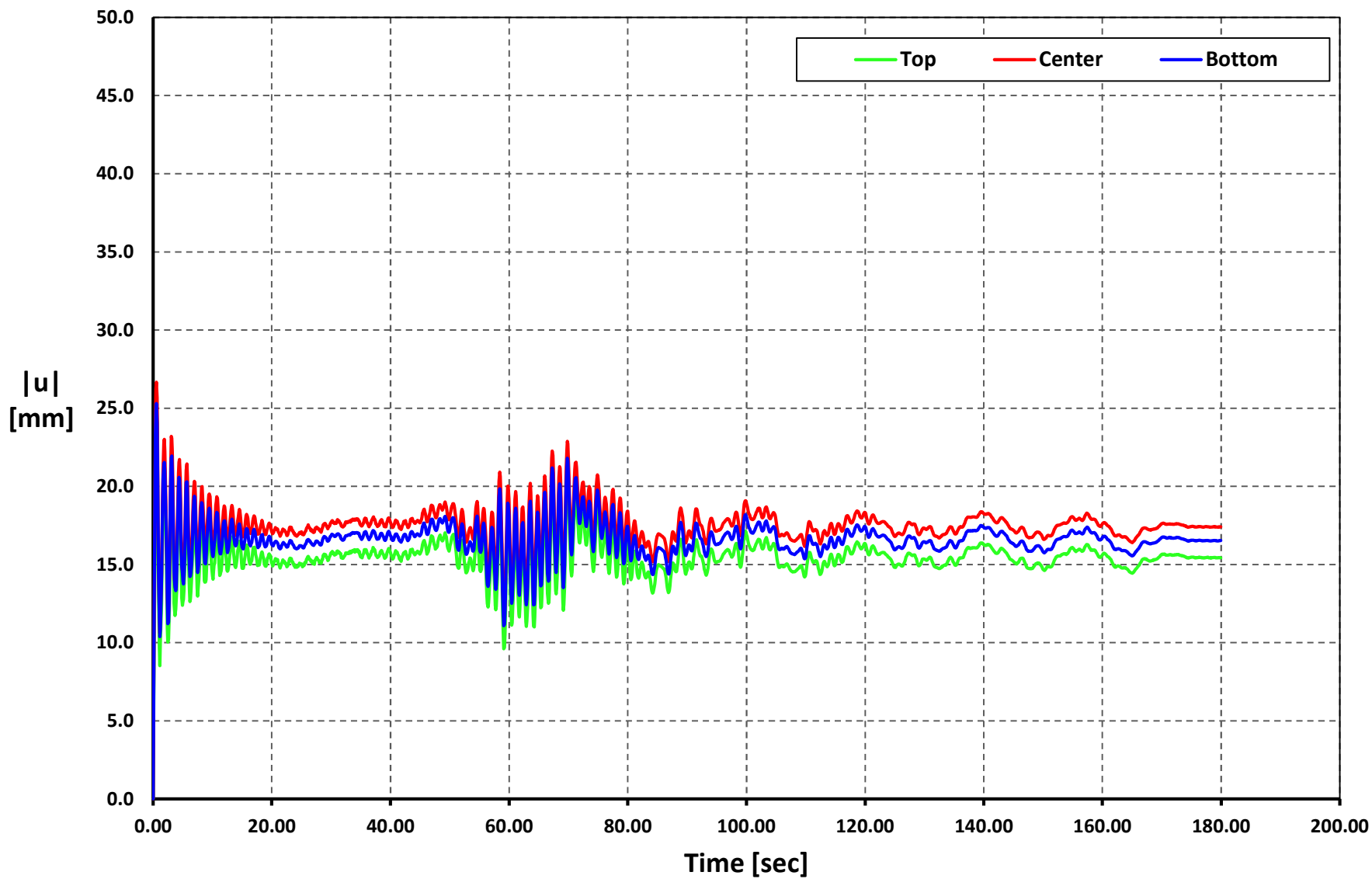
Time vs. $|u|$

Geometry 05 - Soil Type 1 - ACUE-E



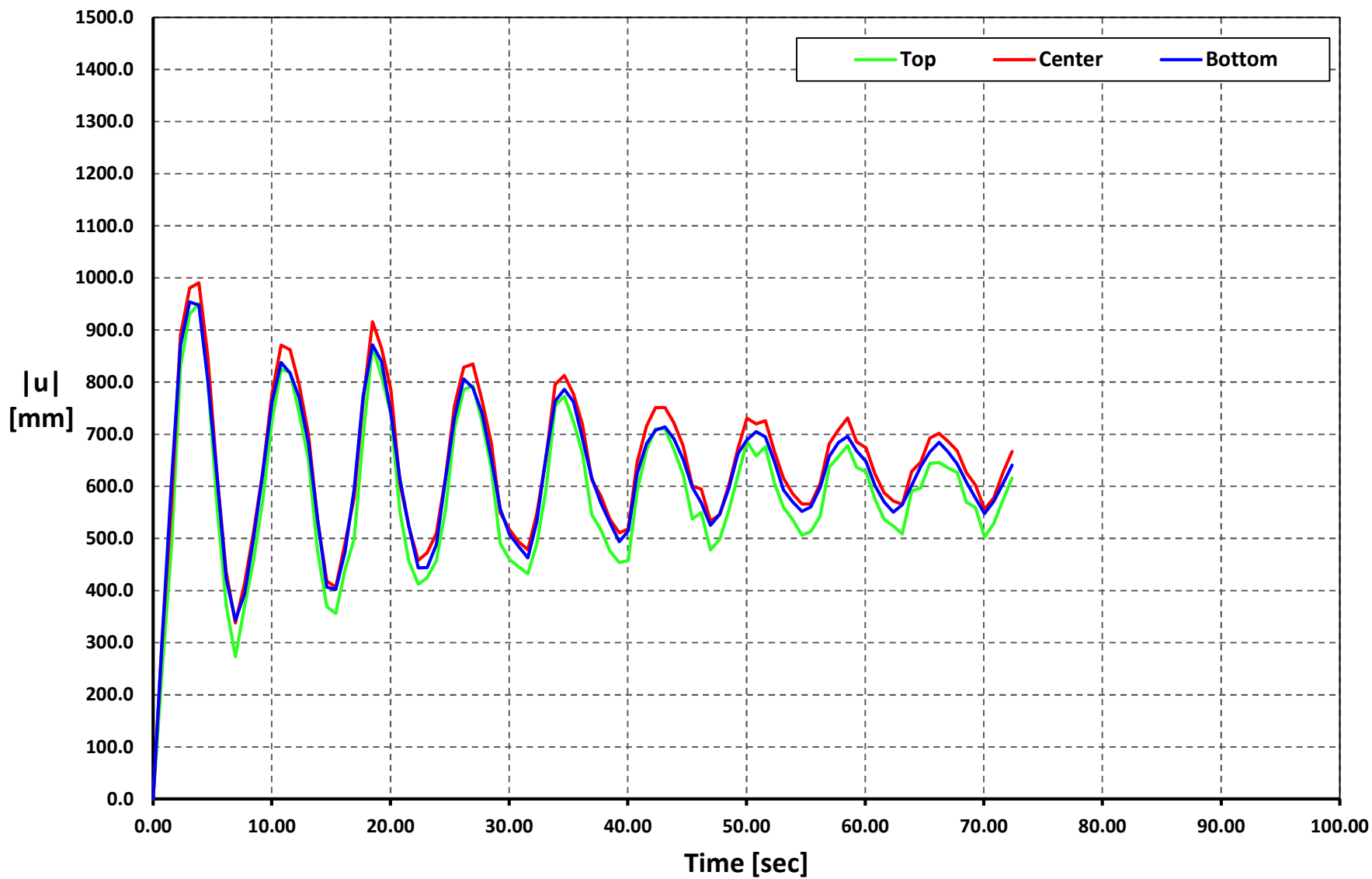
Time vs. |u|

Geometry 05 - Soil Type 1 - ALJ1-N



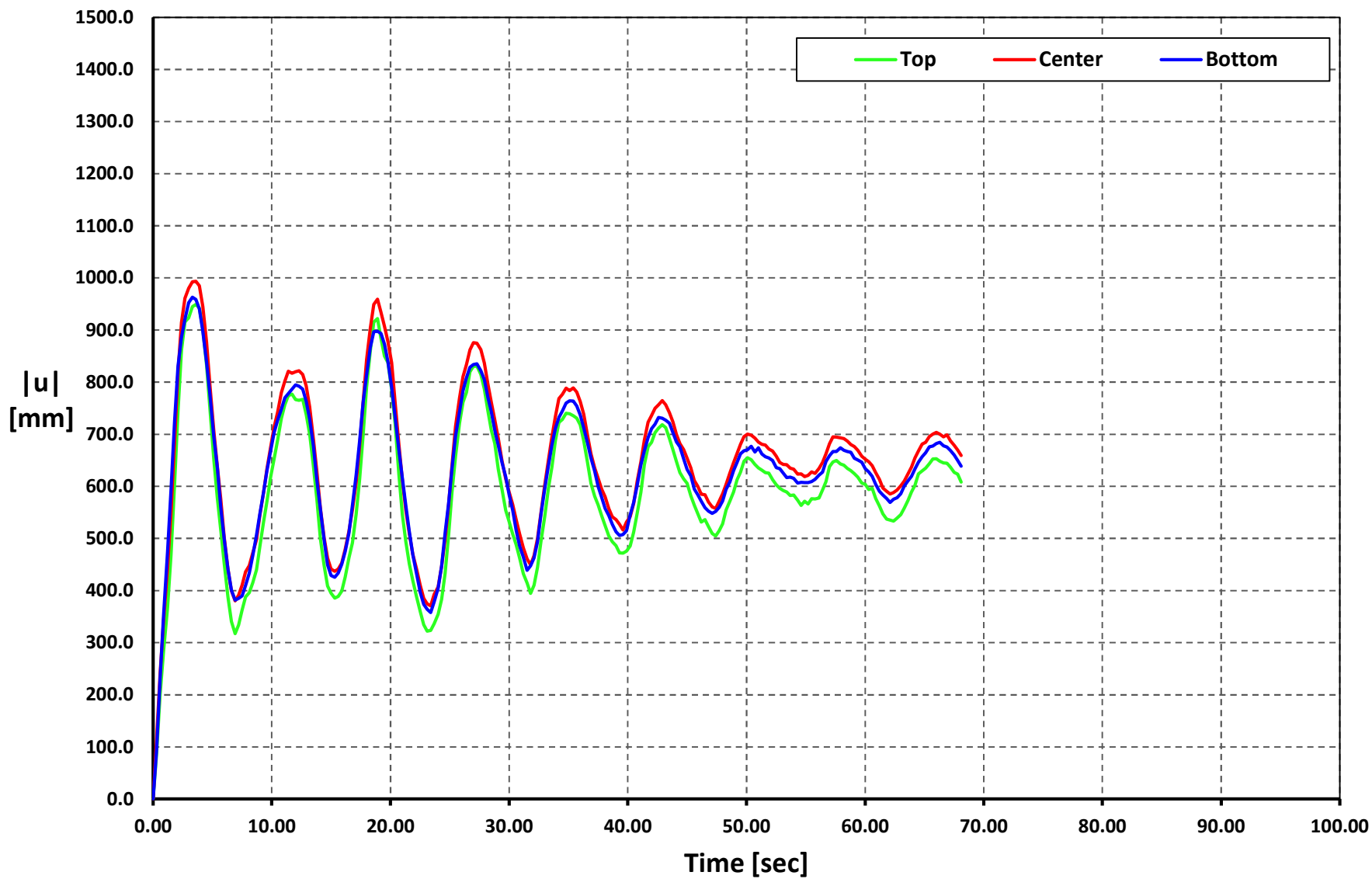
Time vs. $|u|$

Geometry 05 - Soil Type 2 - APED-E



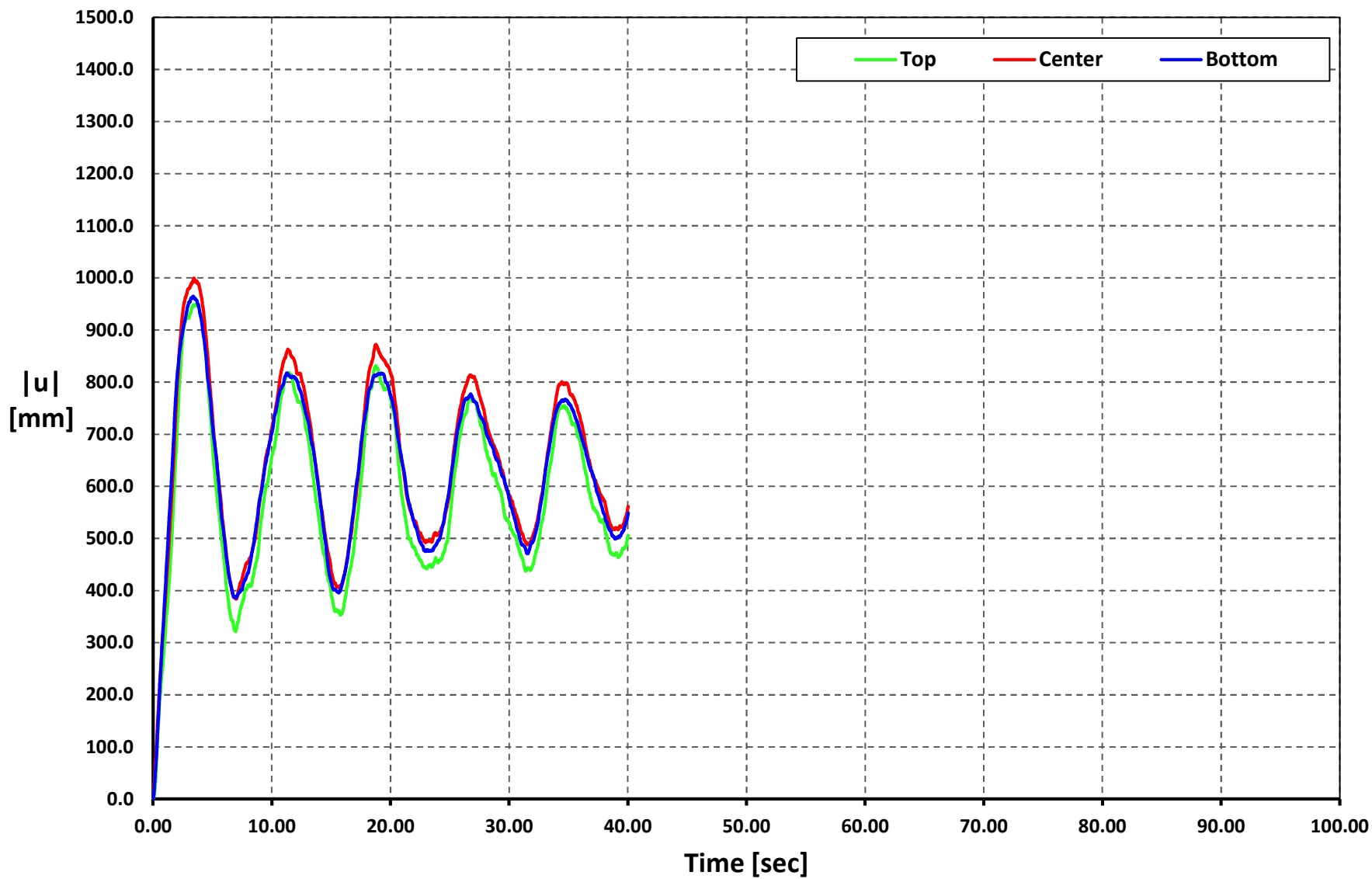
Time vs. $|u|$

Geometry 05 - Soil Type 2 - APO1-N



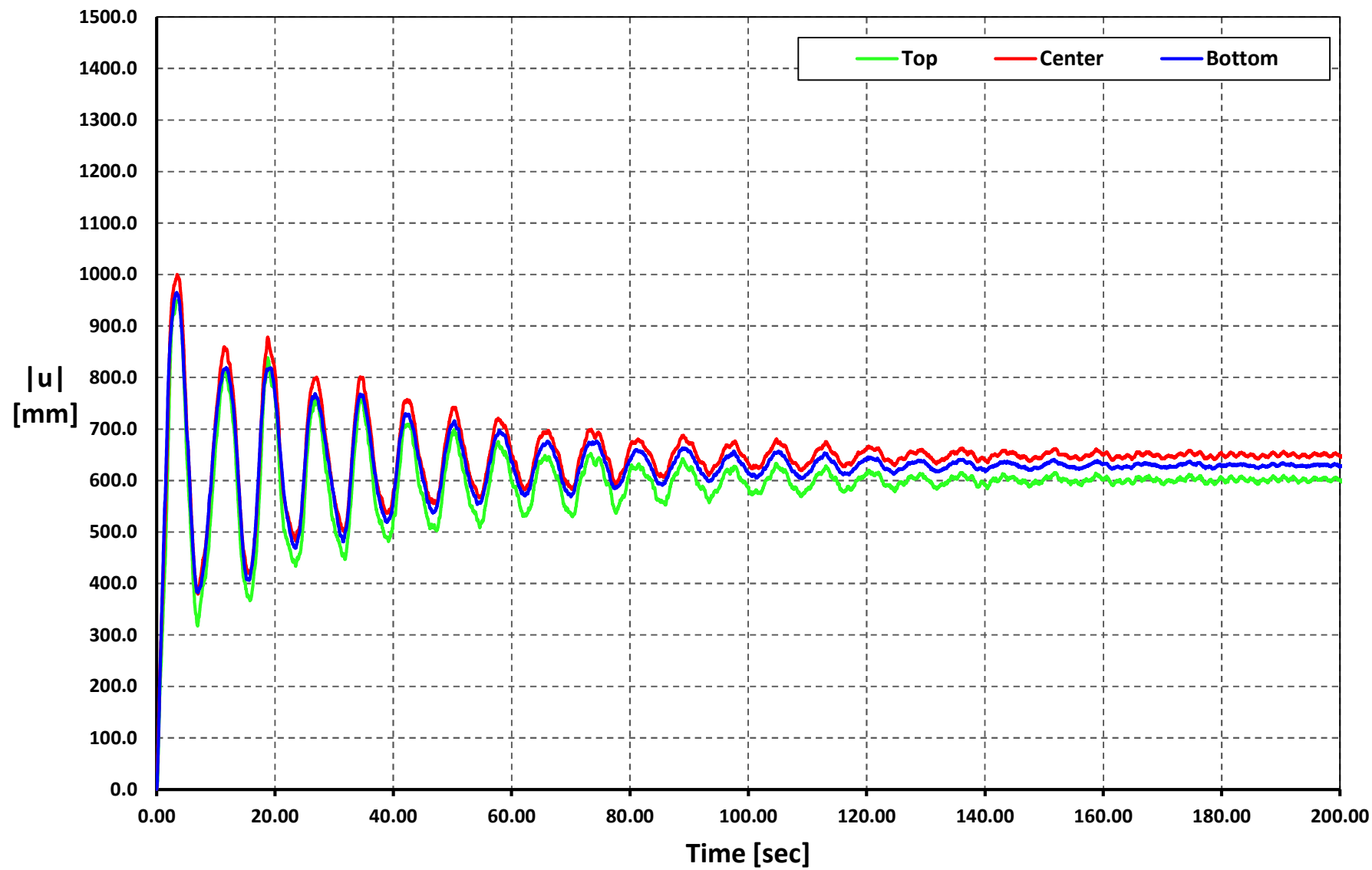
Time vs. |u|

Geometry 05 - Soil Type 2 - AMNT-N



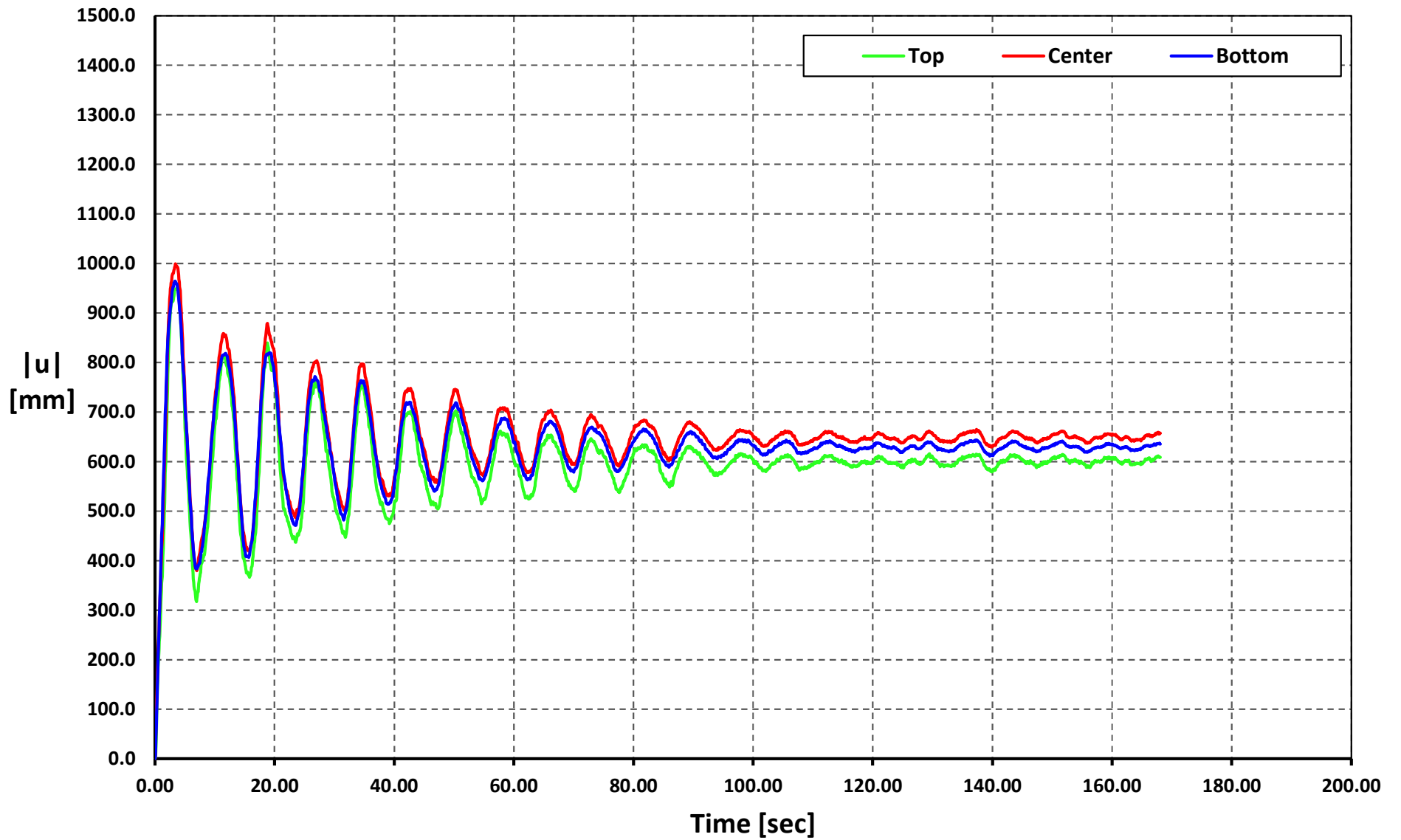
Time vs. $|u|$

Geometry 05 - Soil Type 2 - AGY2-N



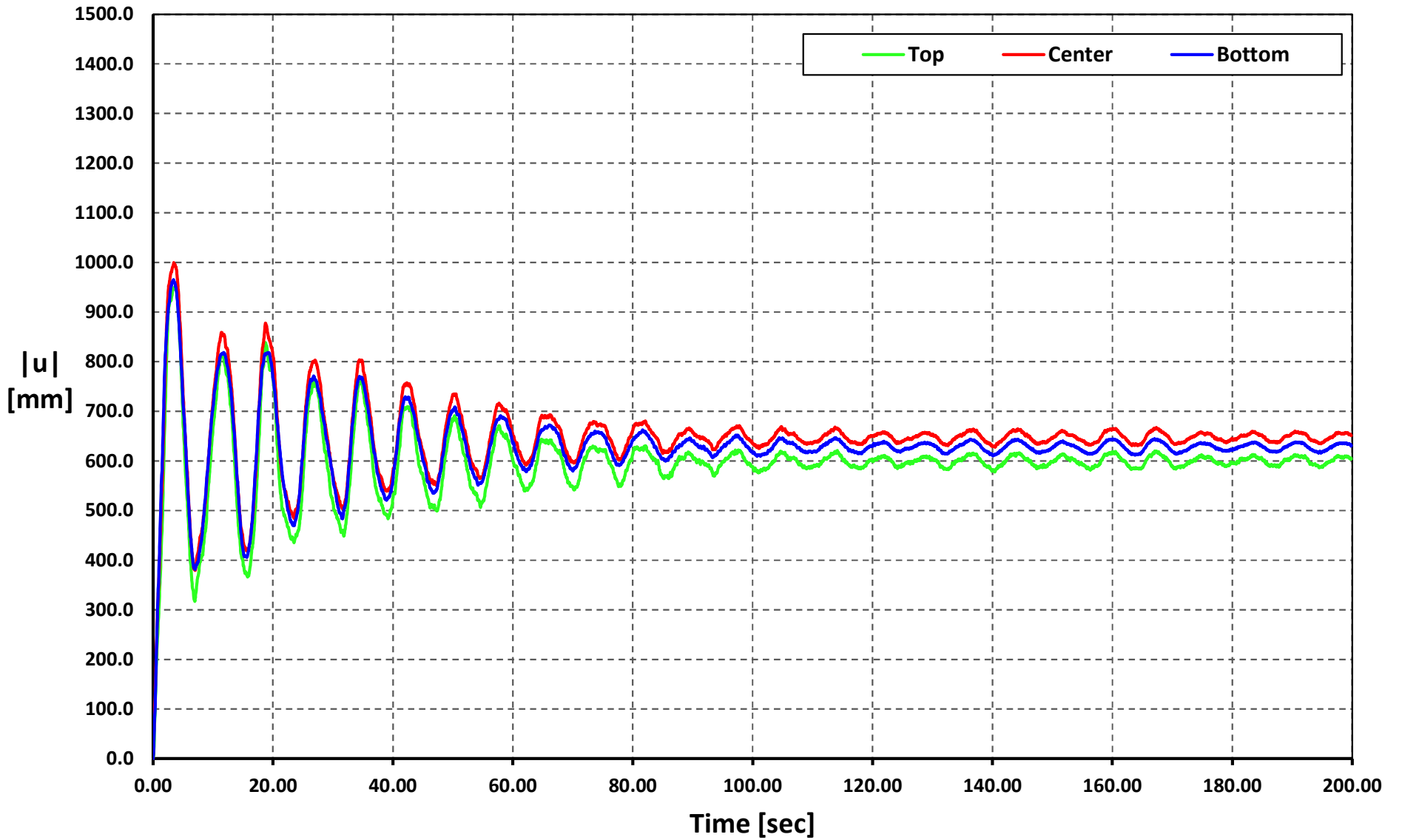
Time vs. |u|

Geometry 05 - Soil Type 2 - AMIL-E



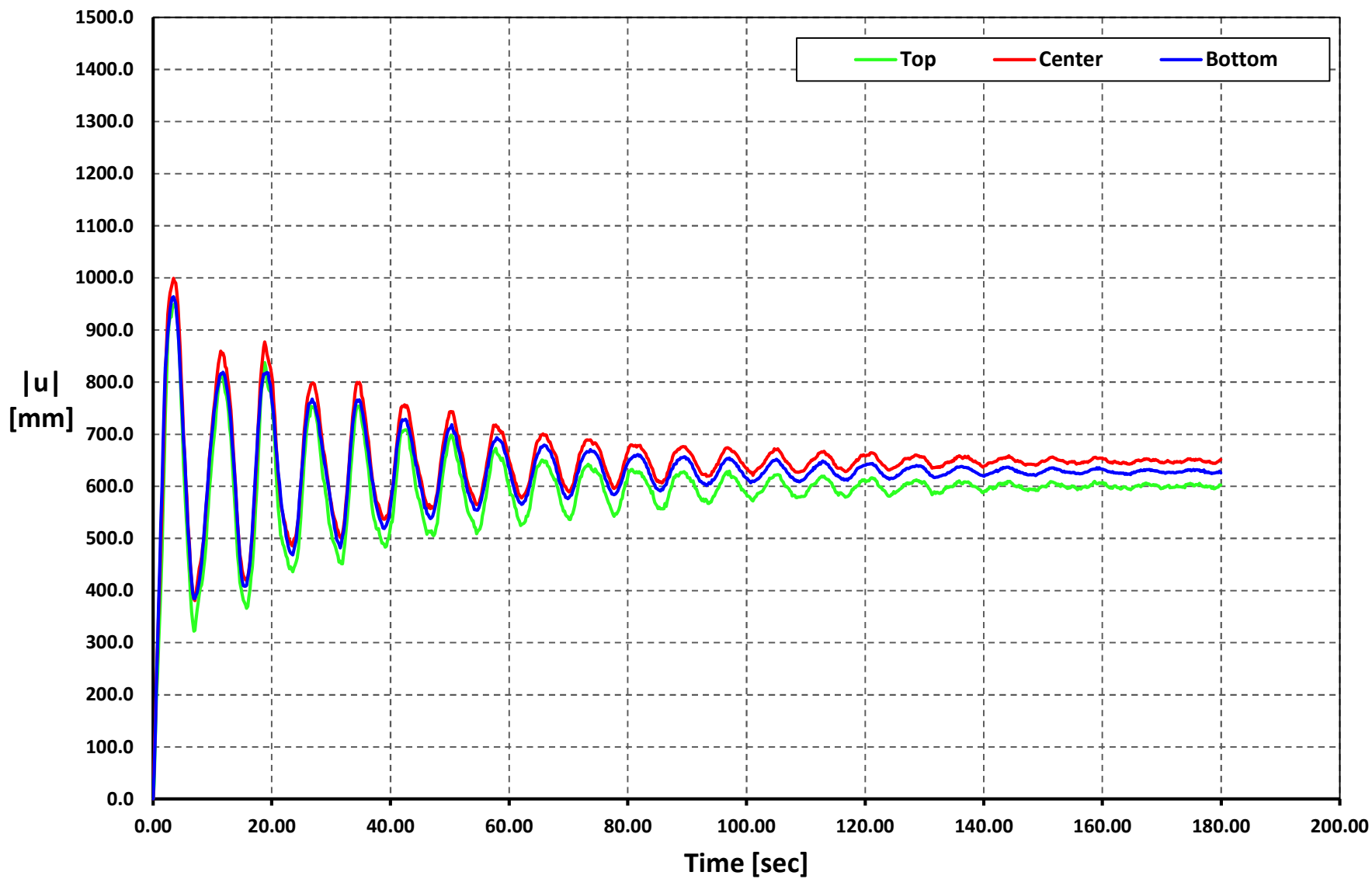
Time vs. |u|

Geometry 05 - Soil Type 2 - ACUE-E



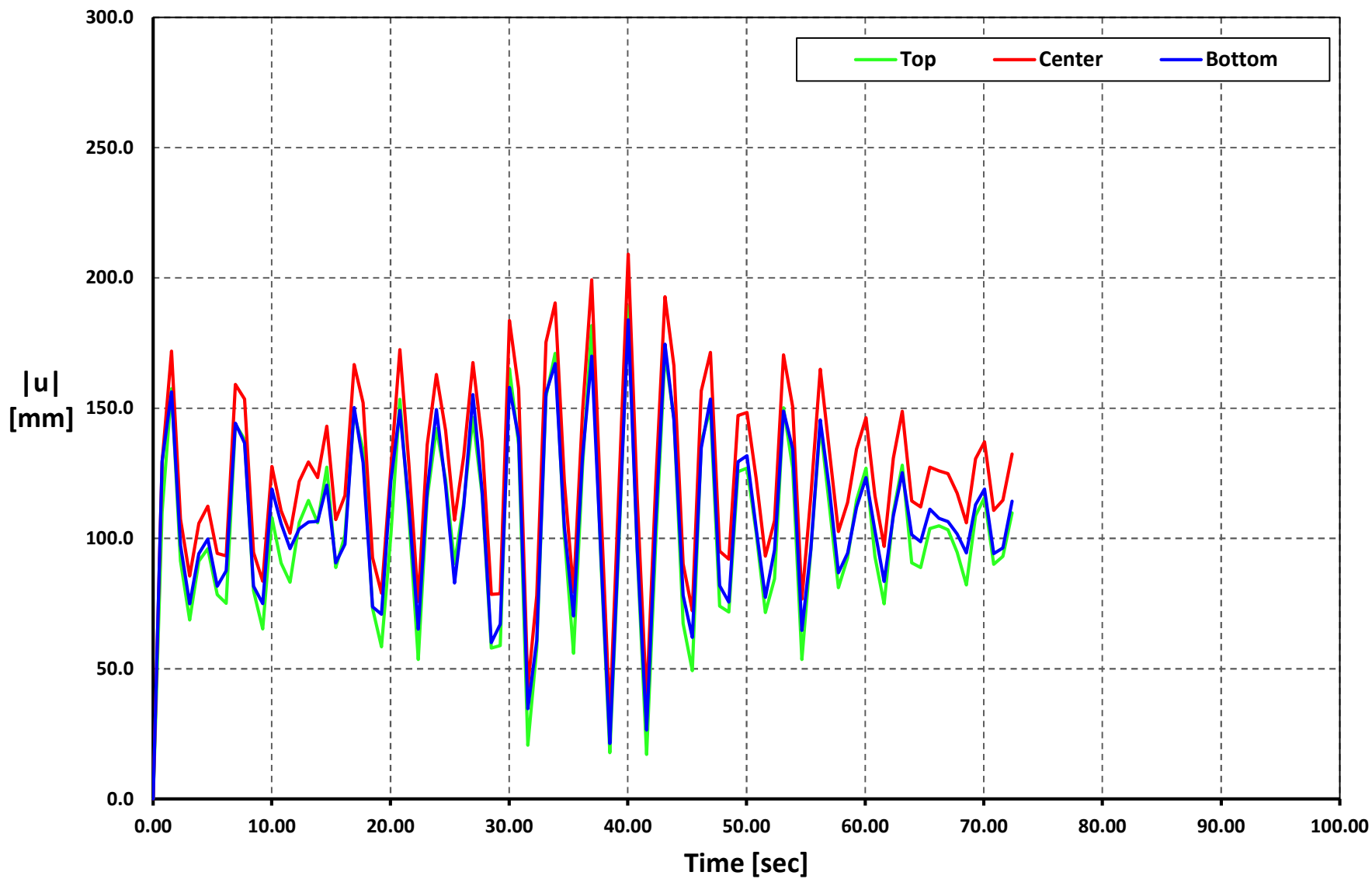
Time vs. $|u|$

Geometry 05 - Soil Type 2 - ALJ1-N



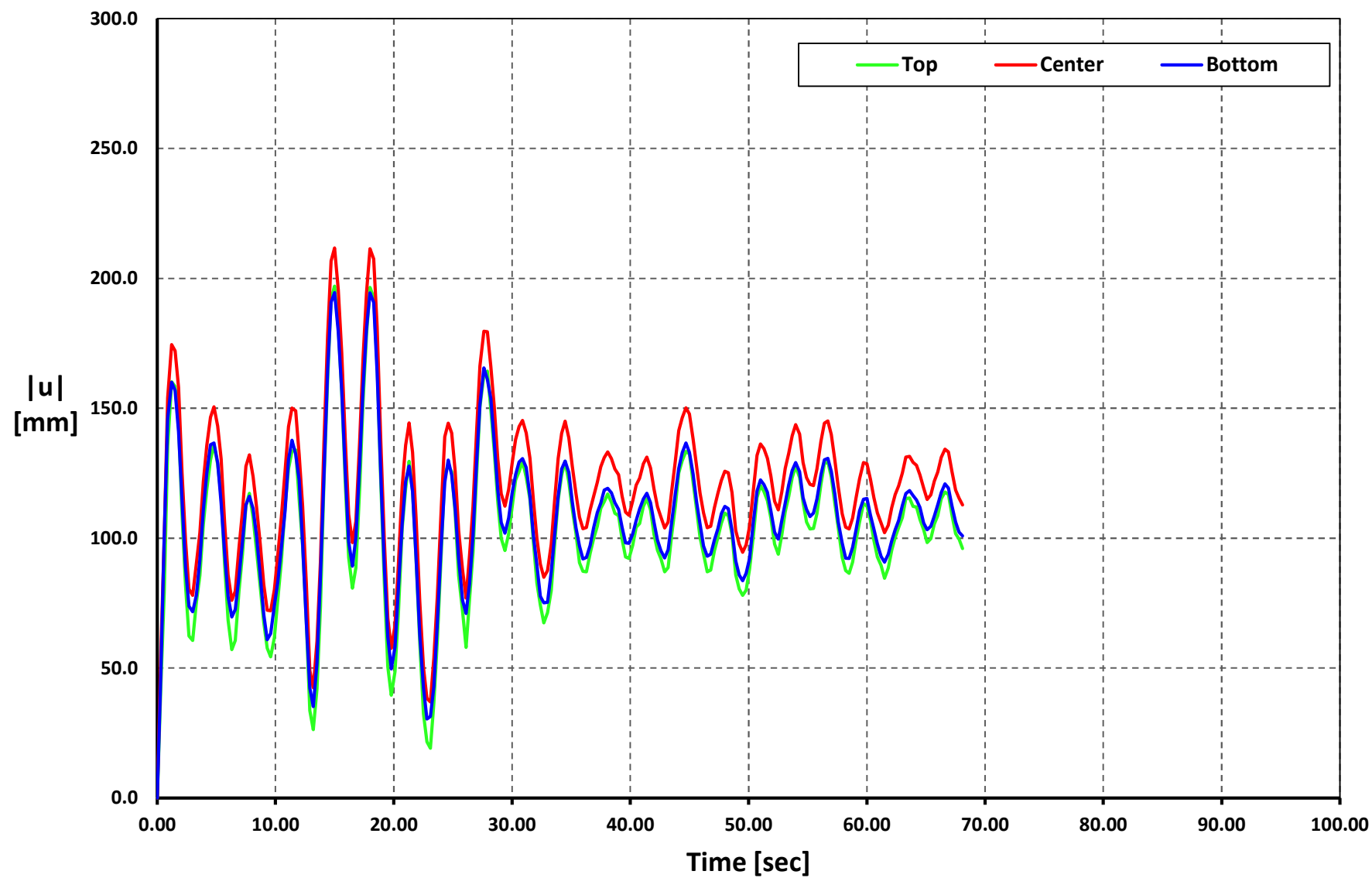
Time vs. |u|

Geometry 05 - Soil Type 3 - APED-E



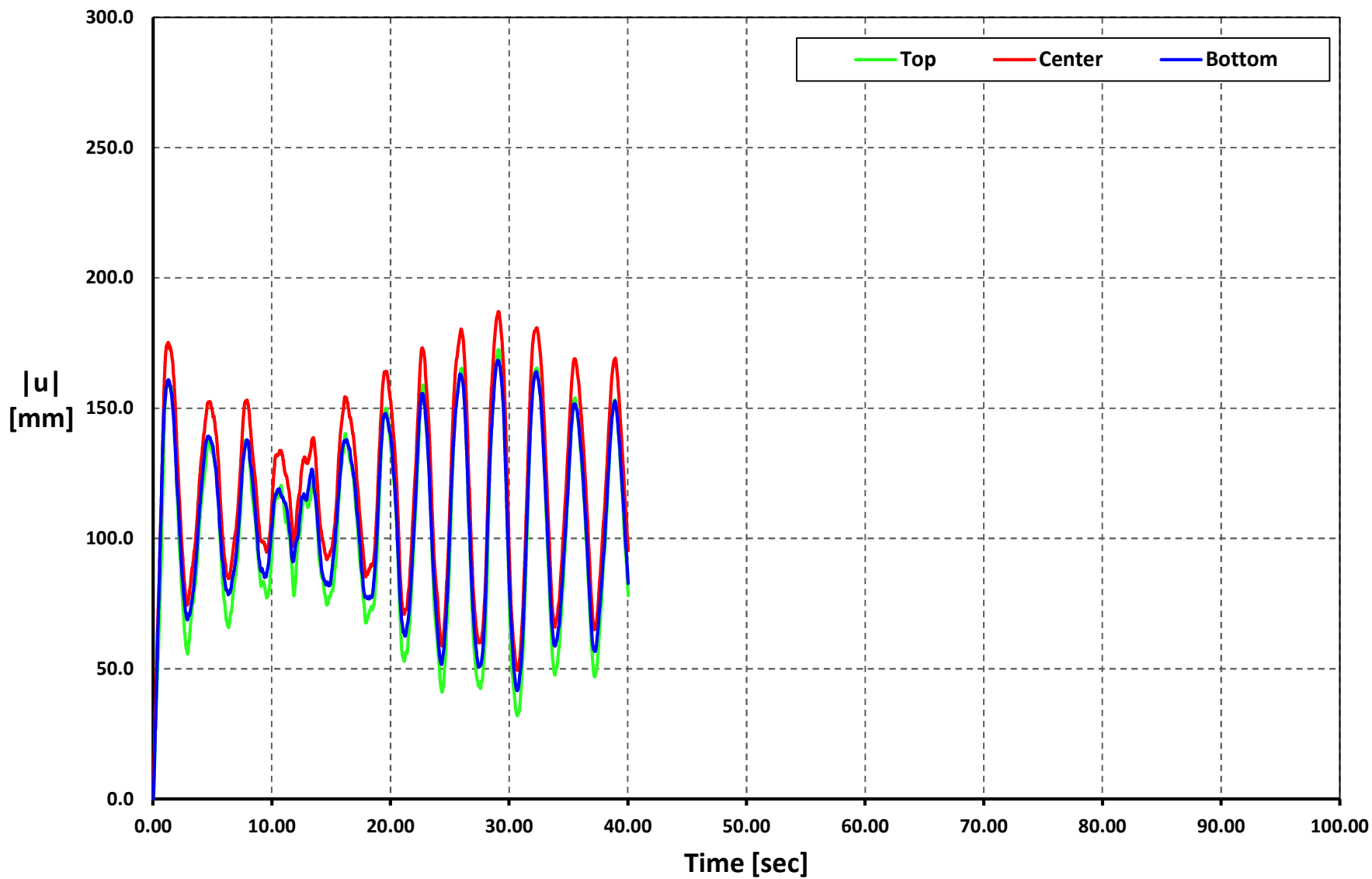
Time vs. $|u|$

Geometry 05 - Soil Type 3 - APO1-N



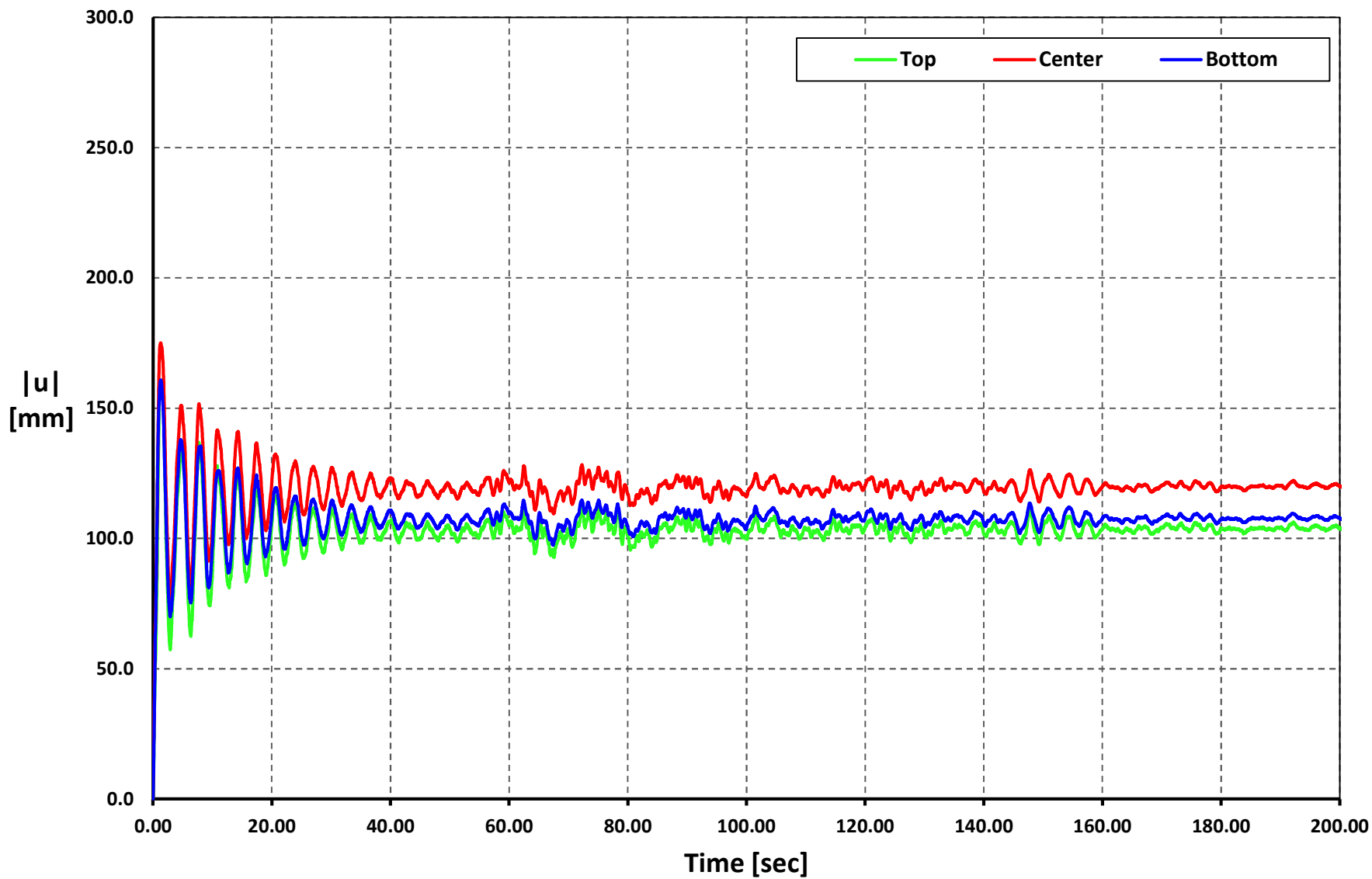
Time vs. |u|

Geometry 05 - Soil Type 3 - AMNT-N



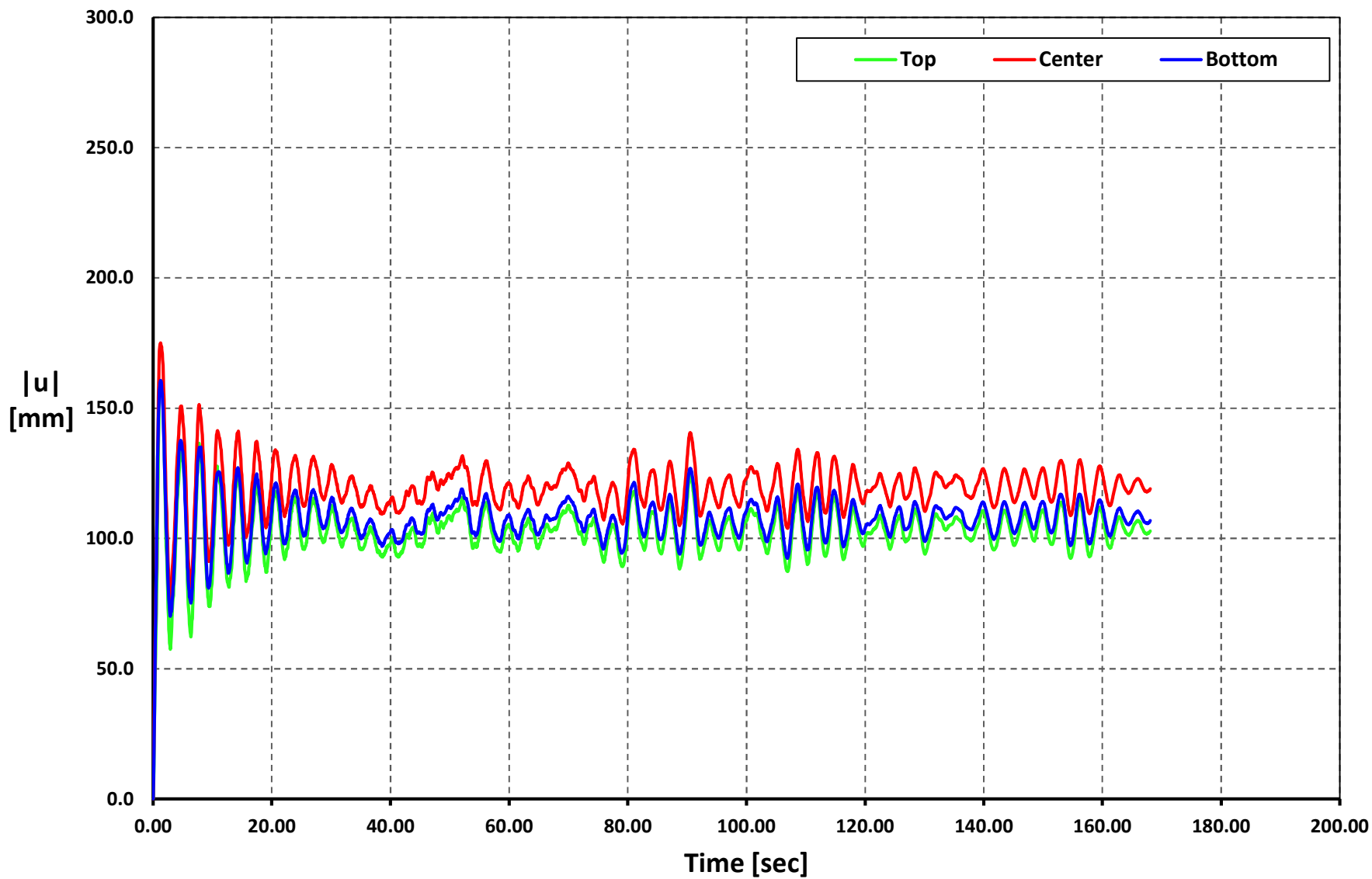
Time vs. $|u|$

Geometry 05 - Soil Type 3 - AGY2-N



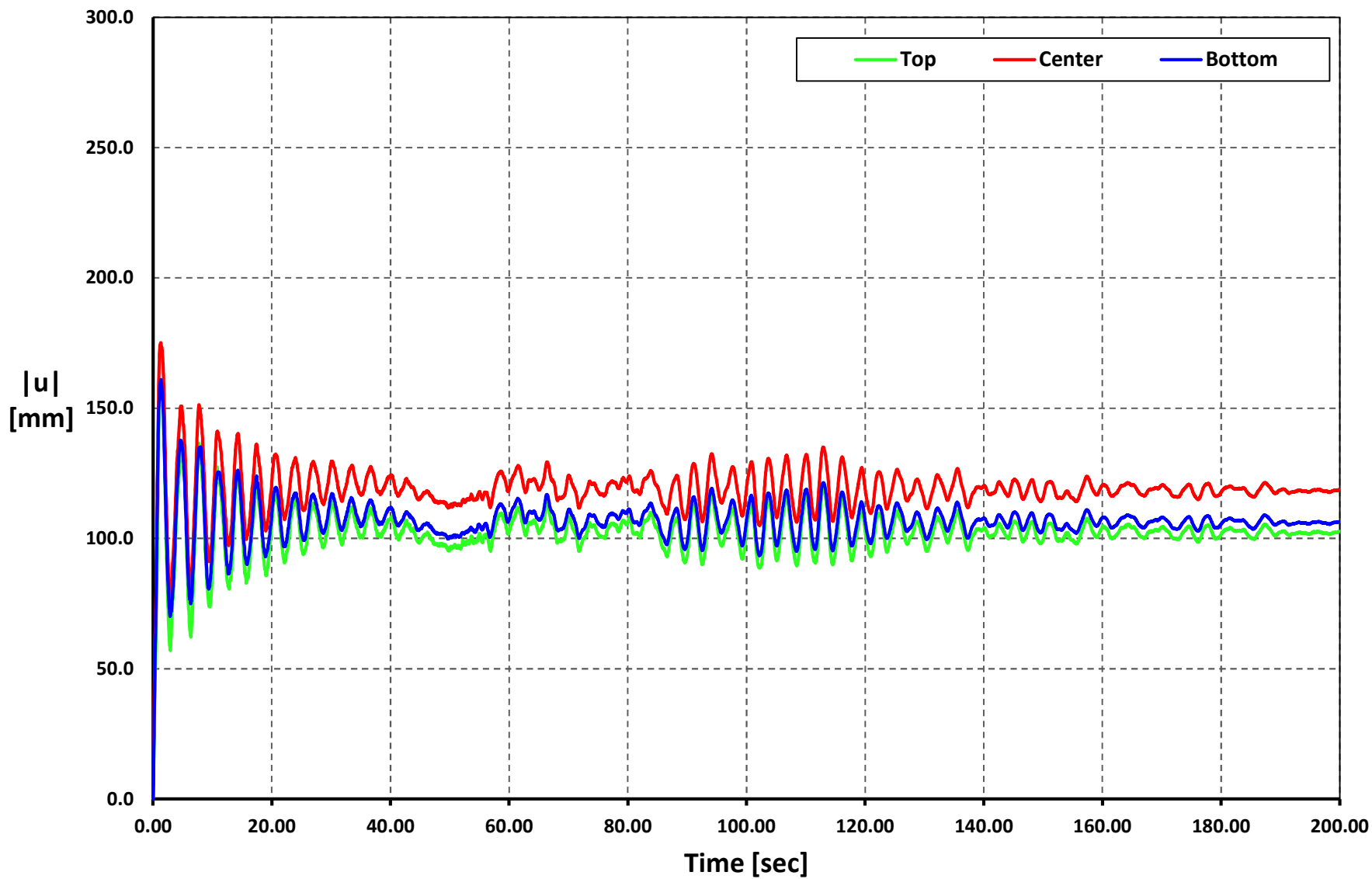
Time vs. $|u|$

Geometry 05 - Soil Type 3 - AMIL-E



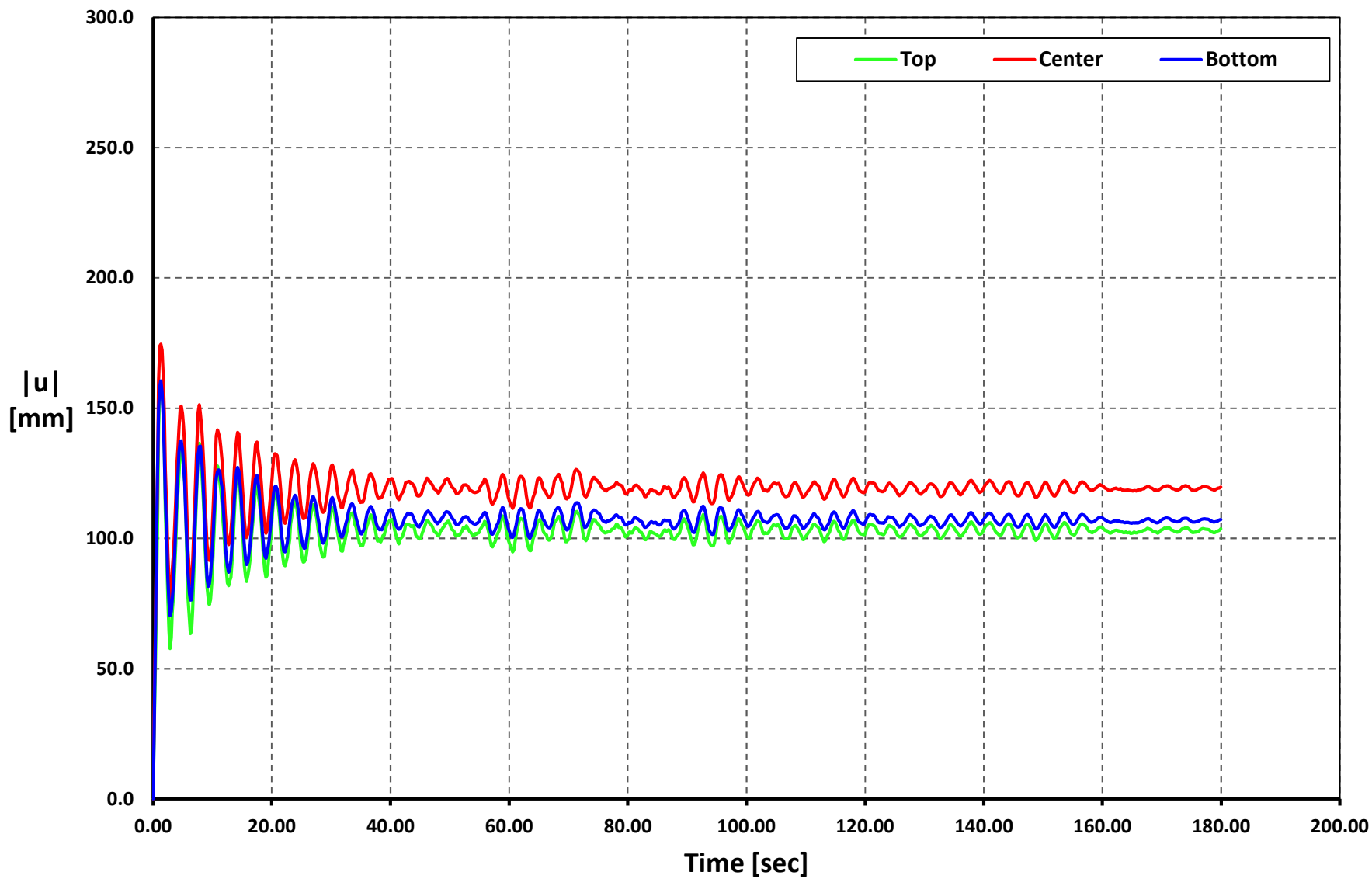
Time vs. $|u|$

Geometry 05 - Soil Type 3 - ACUE-E



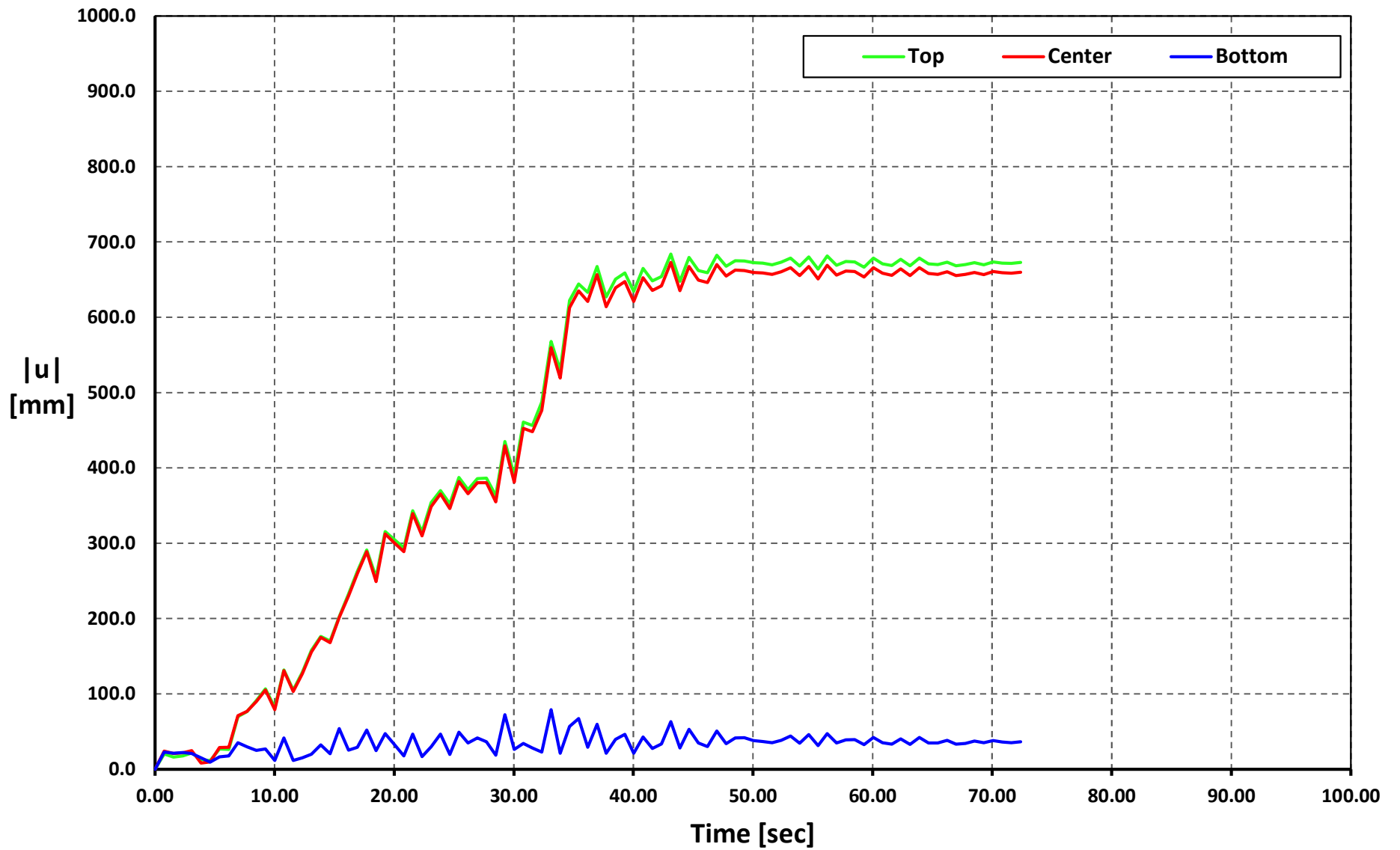
Time vs. $|u|$

Geometry 05 - Soil Type 3 - ALJ1-N



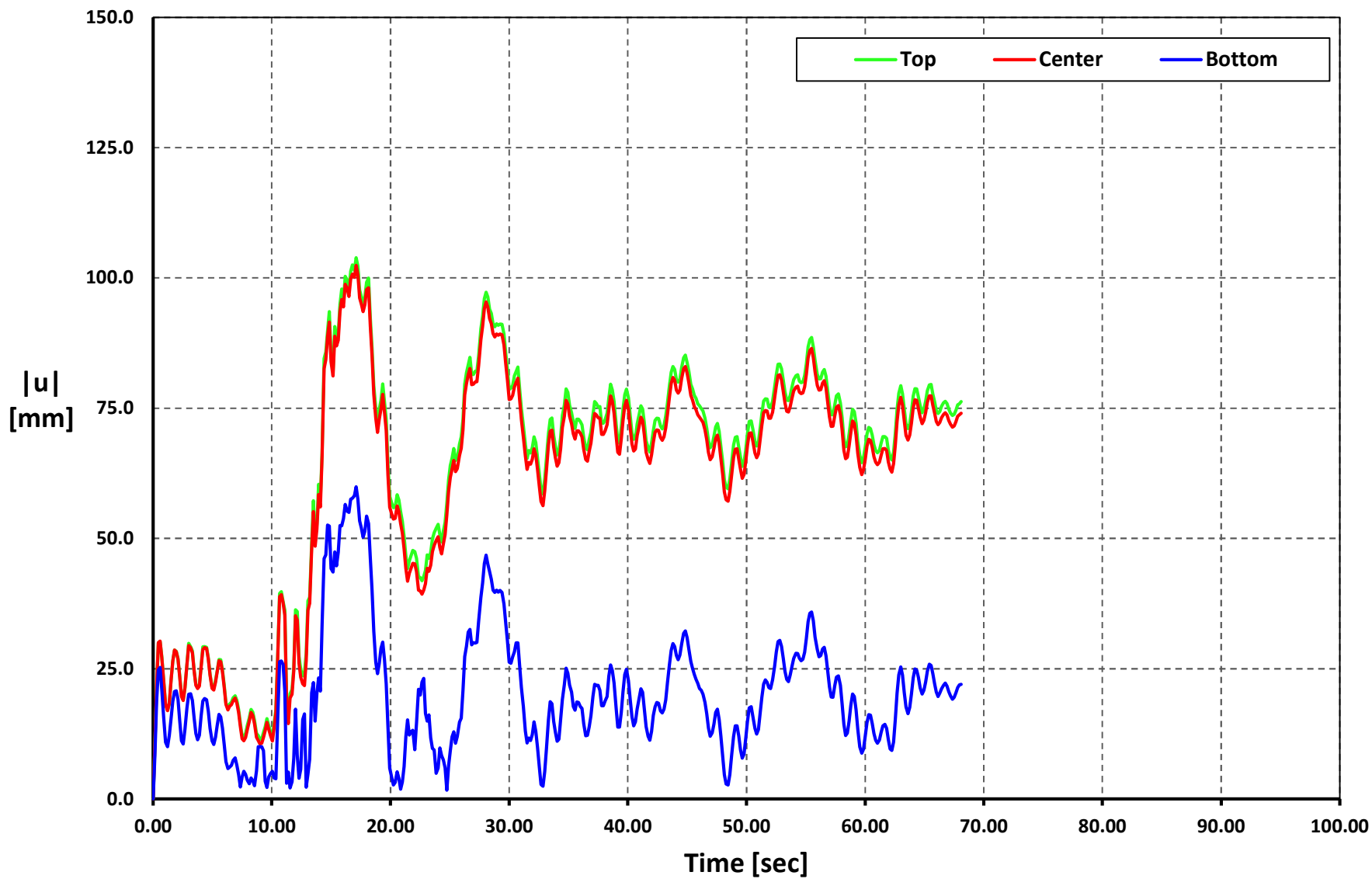
Time vs. |u|

Geometry 06 - Soil Type 1 - APED-E



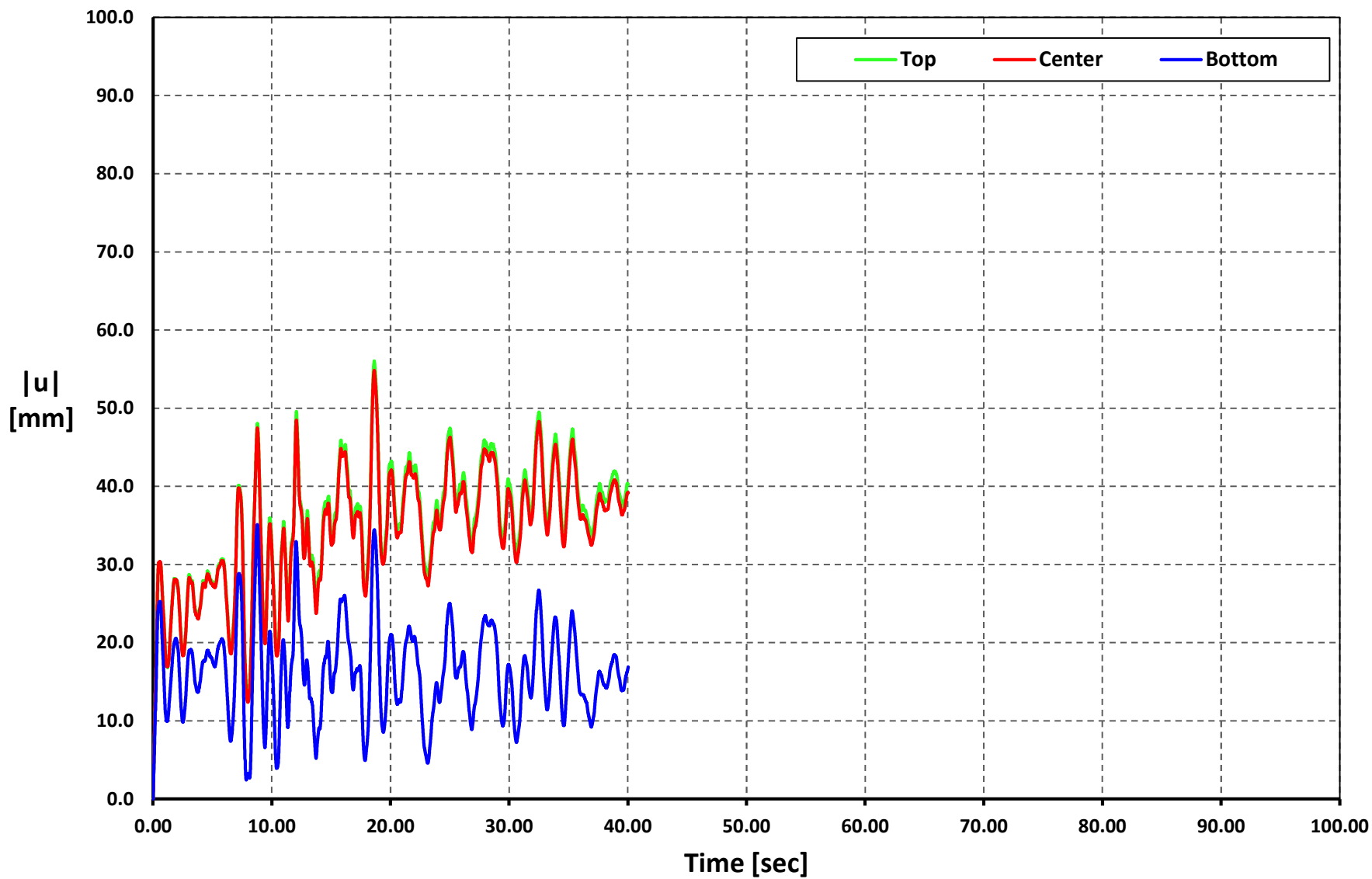
Time vs. |u|

Geometry 06 - Soil Type 1 - APO1-N



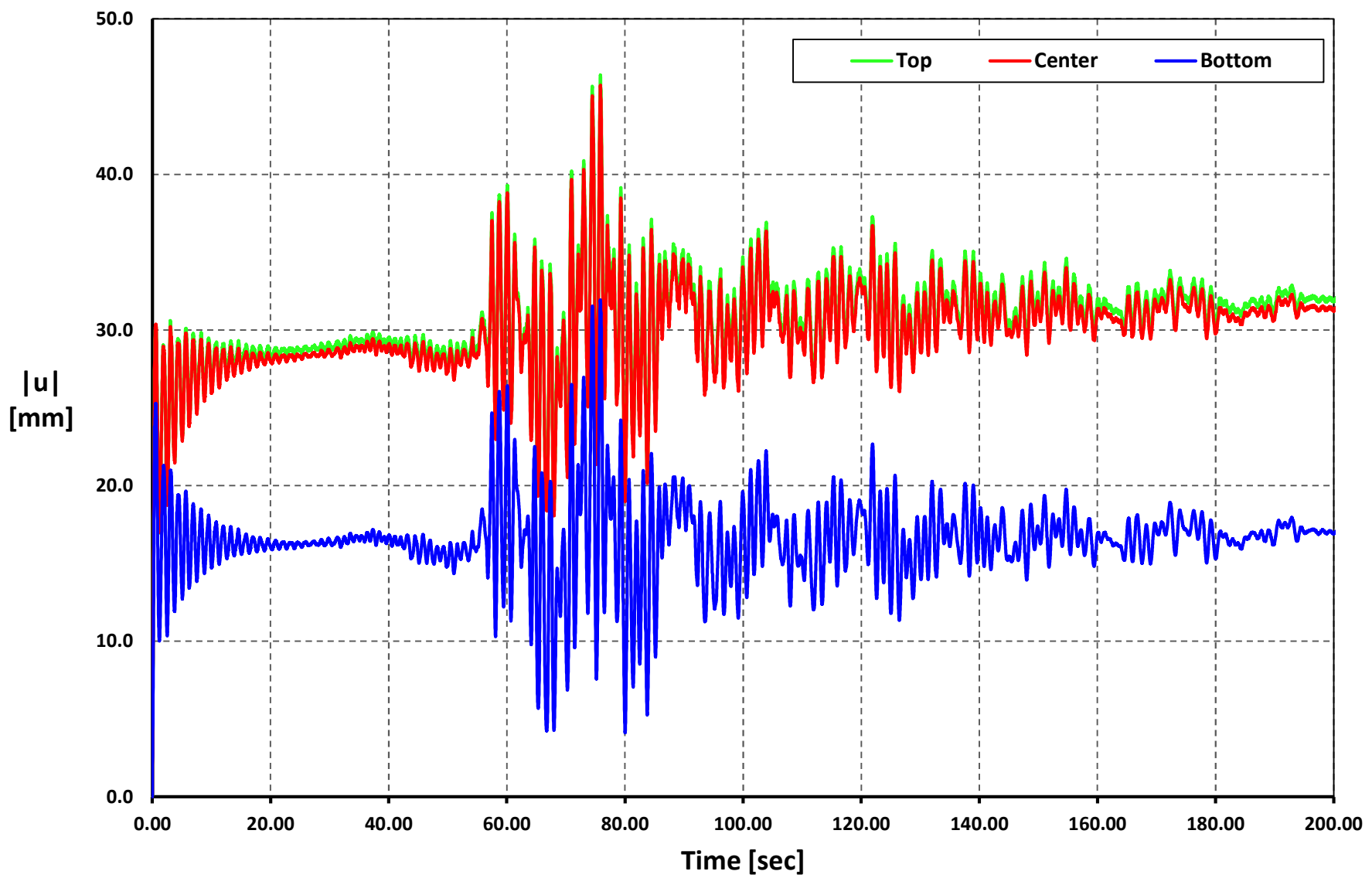
Time vs. |u|

Geometry 06 - Soil Type 1 - AMNT-N



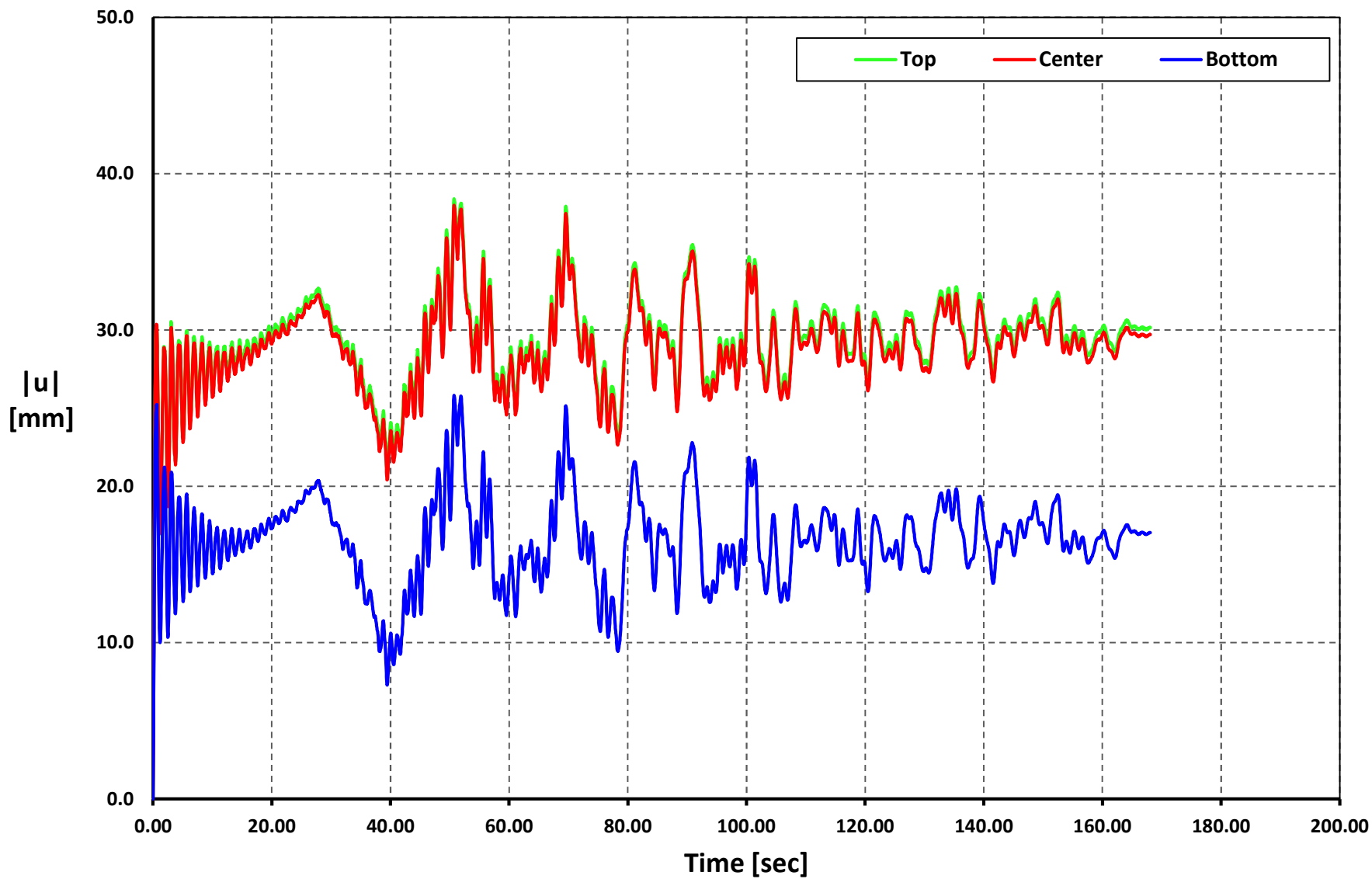
Time vs. |u|

Geometry 06 - Soil Type 1 - AGY2-N



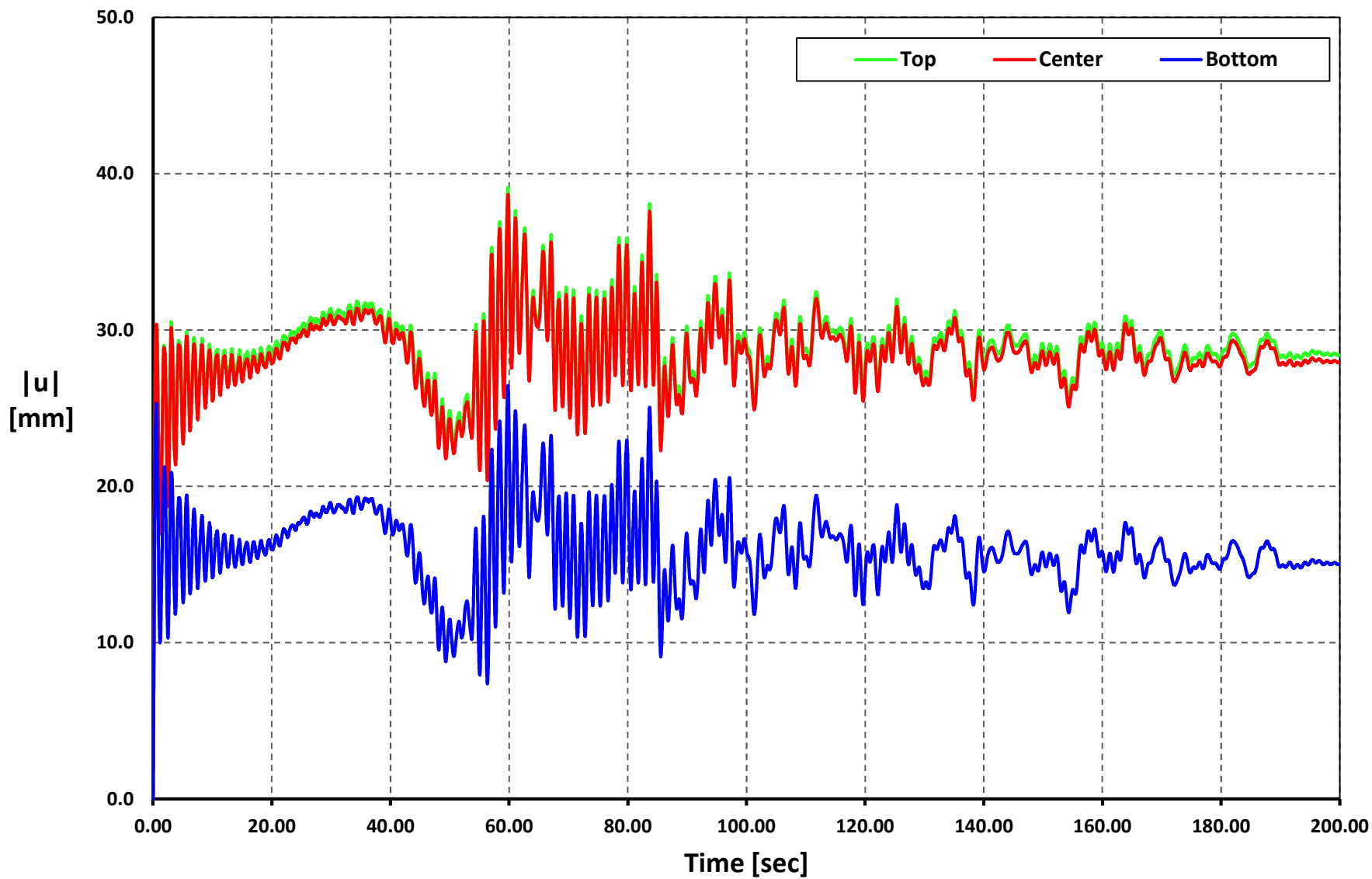
Time vs. |u|

Geometry 06 - Soil Type 1 - AMIL-E



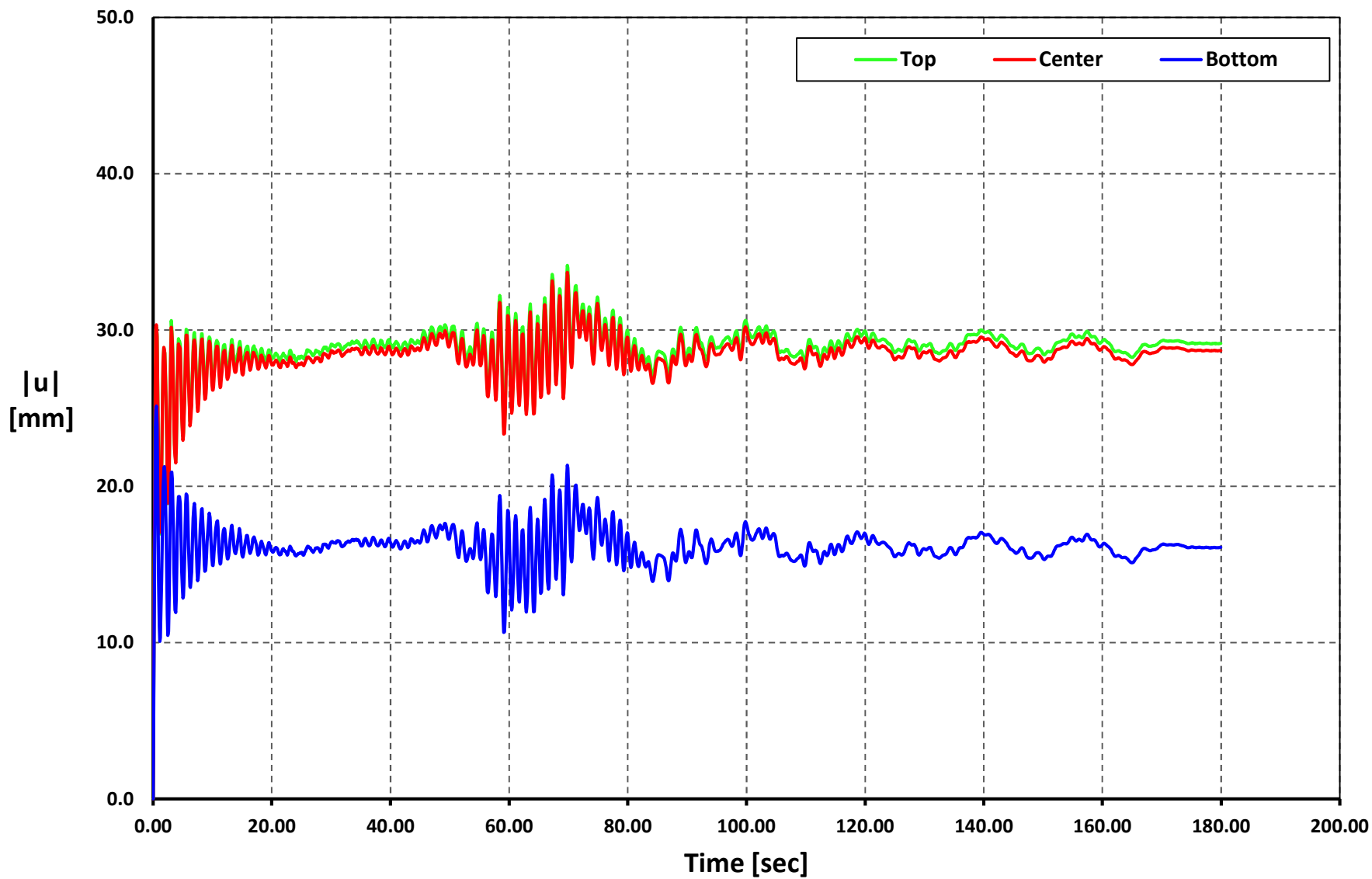
Time vs. $|u|$

Geometry 06 - Soil Type 1 - ACUE-E



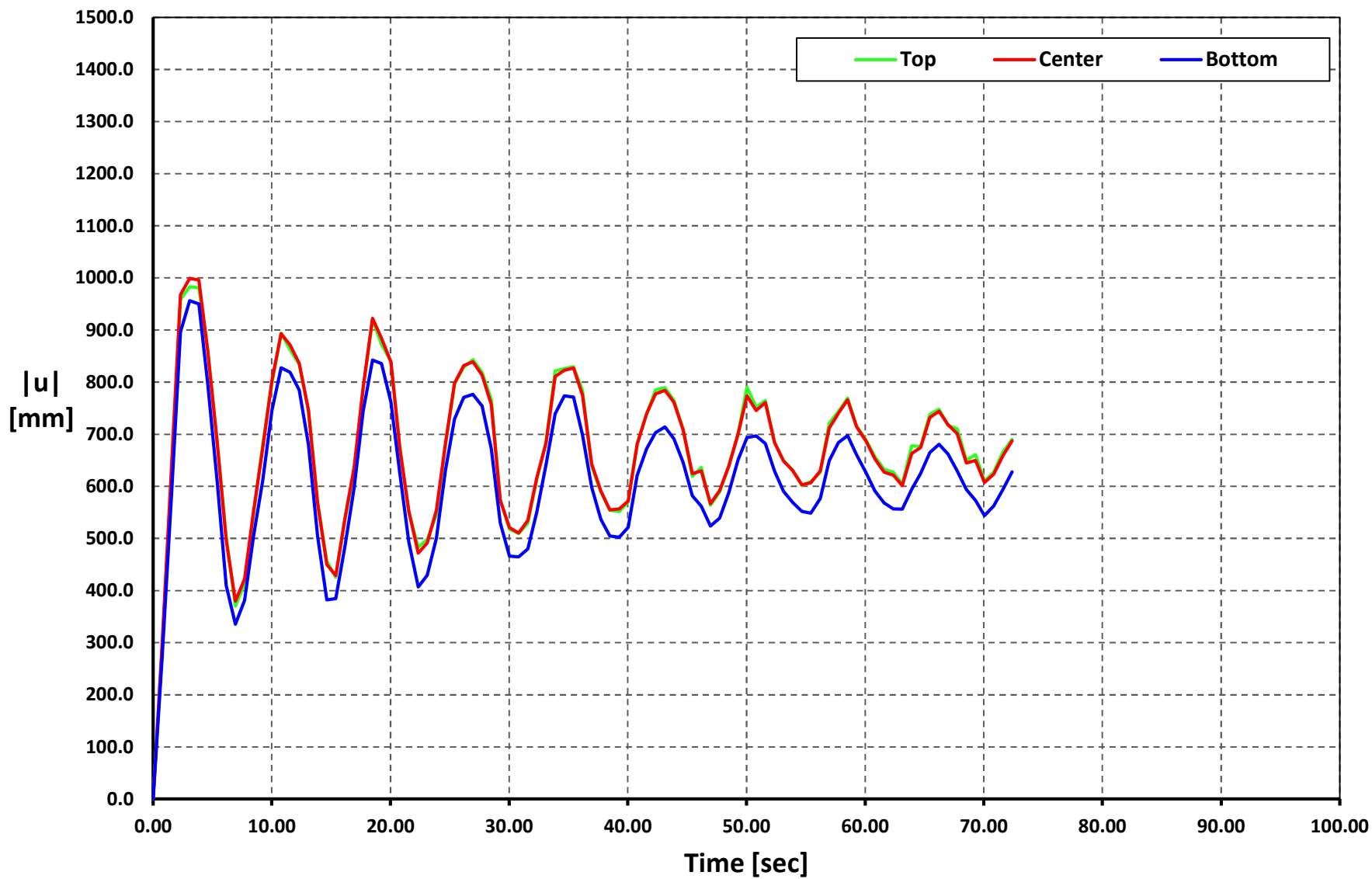
Time vs. $|u|$

Geometry 06 - Soil Type 1 - ALJ1-N



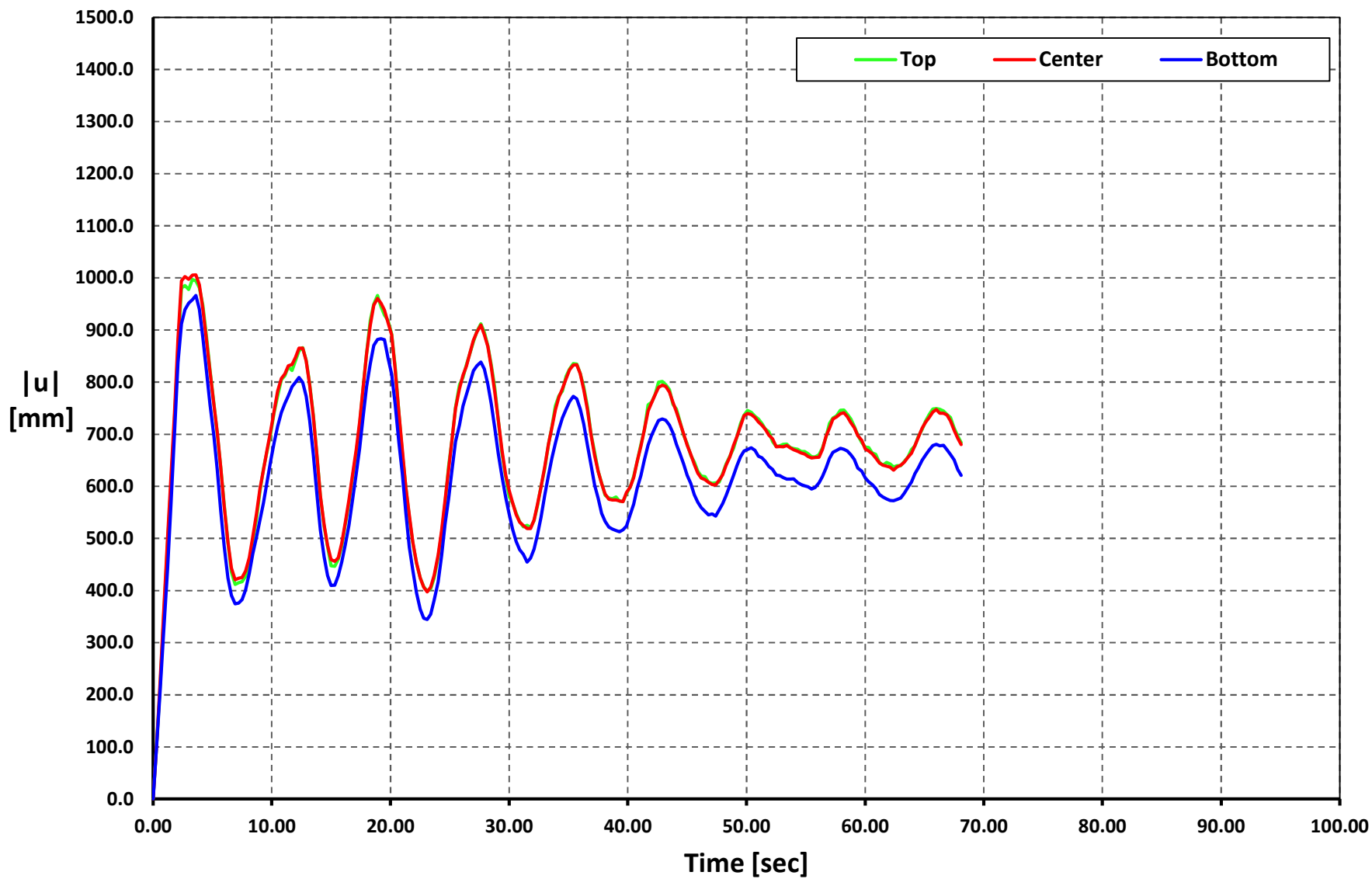
Time vs. $|u|$

Geometry 06 - Soil Type 2 - APED-E



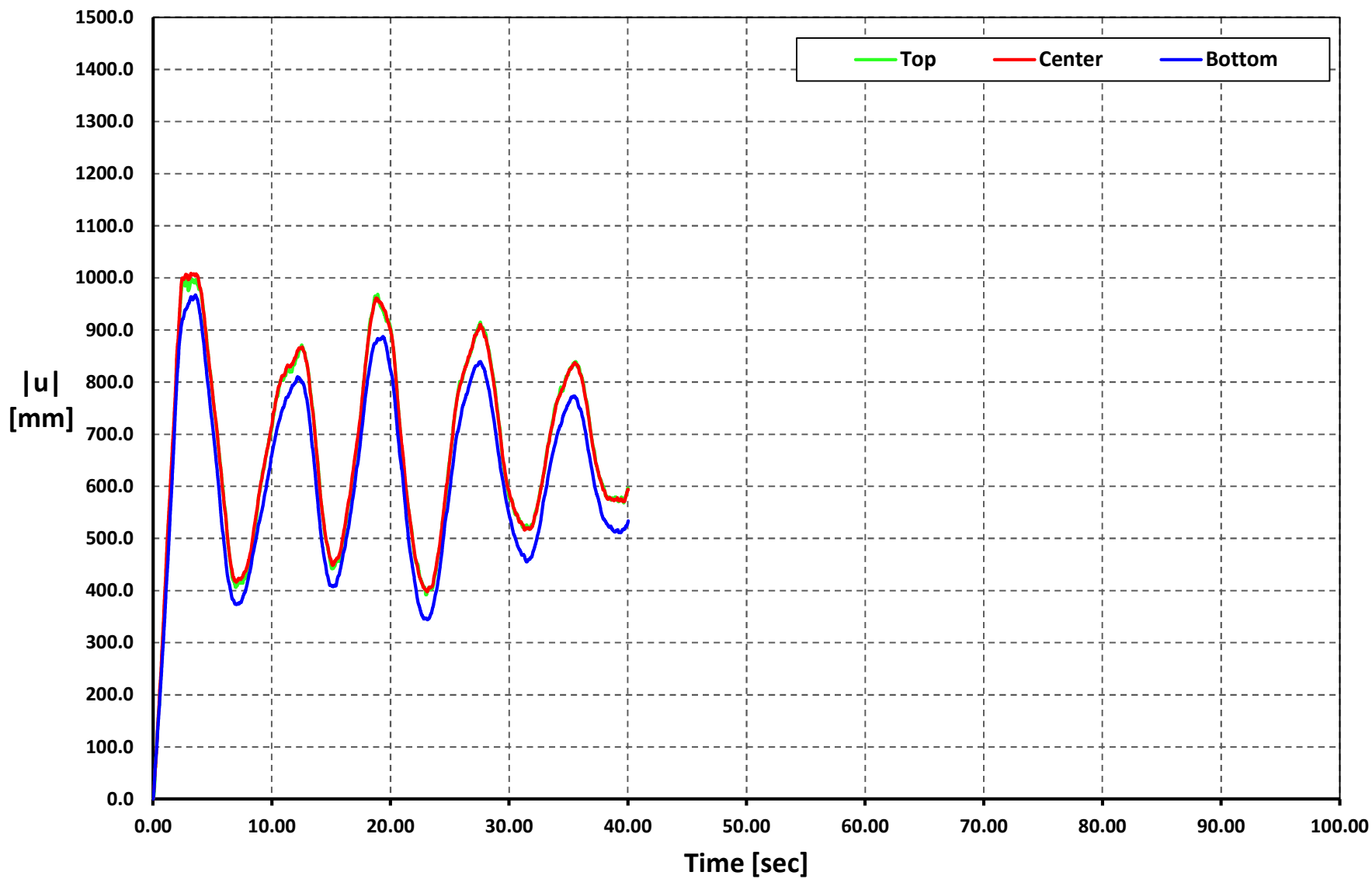
Time vs. $|u|$

Geometry 06 - Soil Type 2 - APO1-N



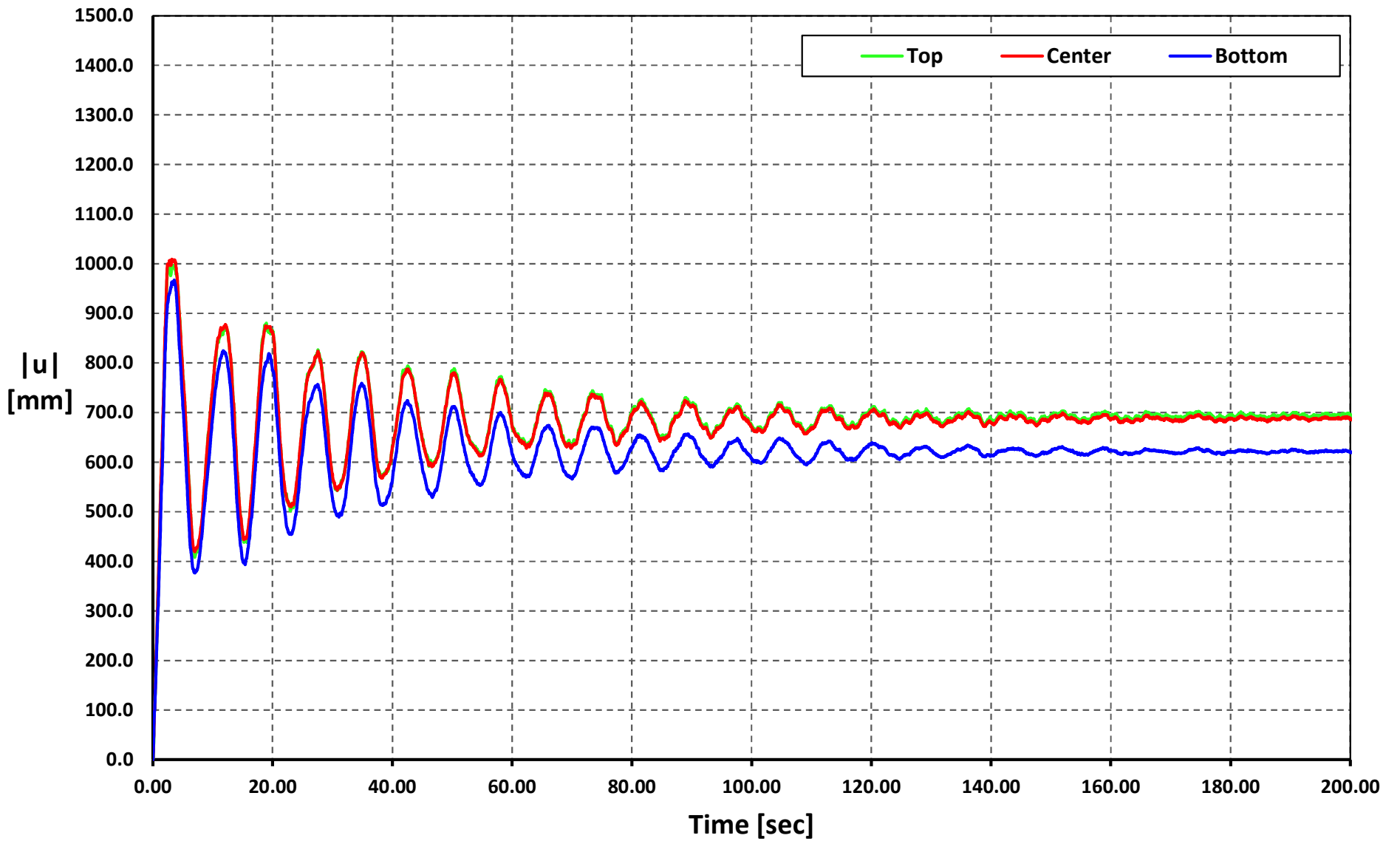
Time vs. |u|

Geometry 06 - Soil Type 2 - AMNT-N



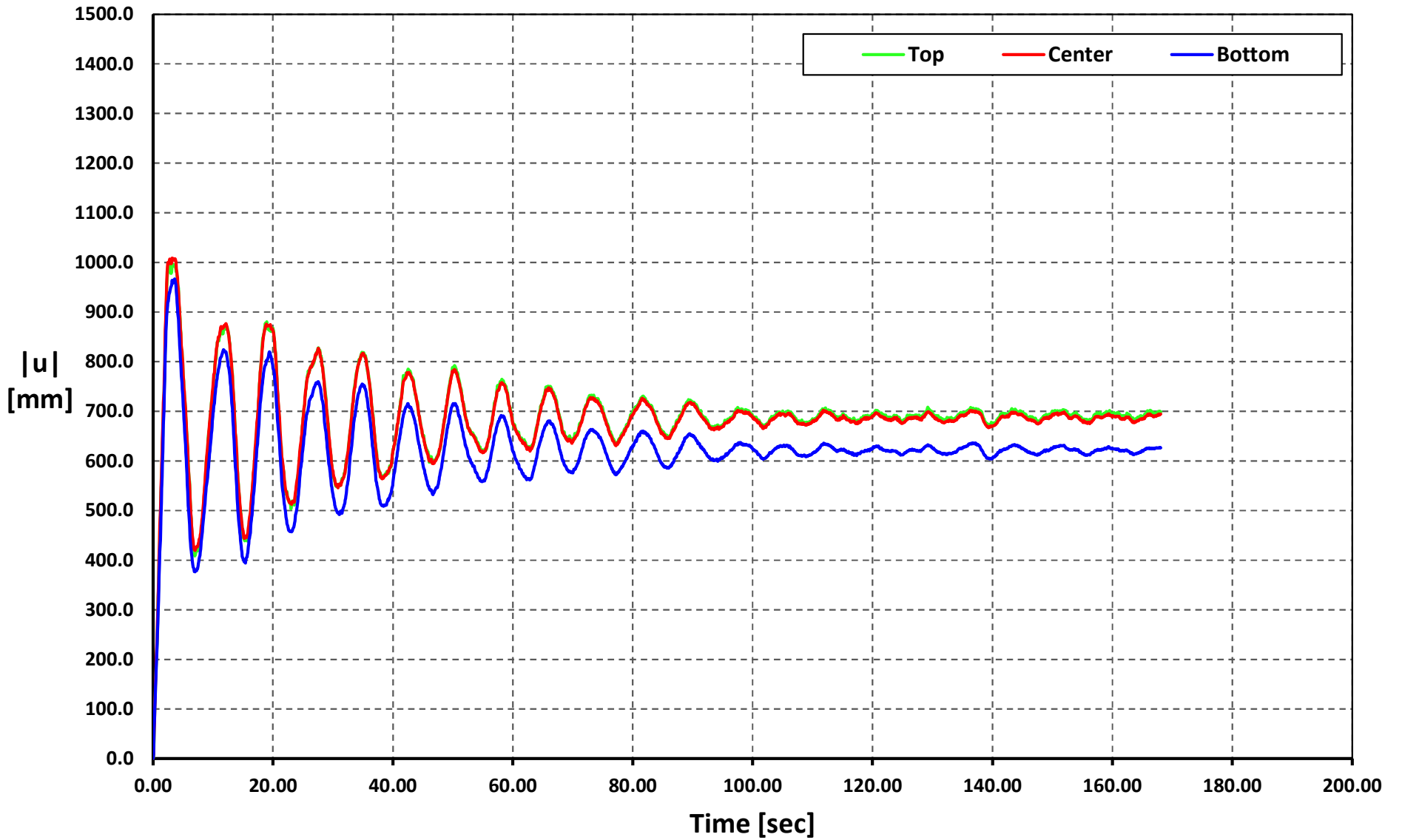
Time vs. |u|

Geometry 06 - Soil Type 2 - AGY2-N



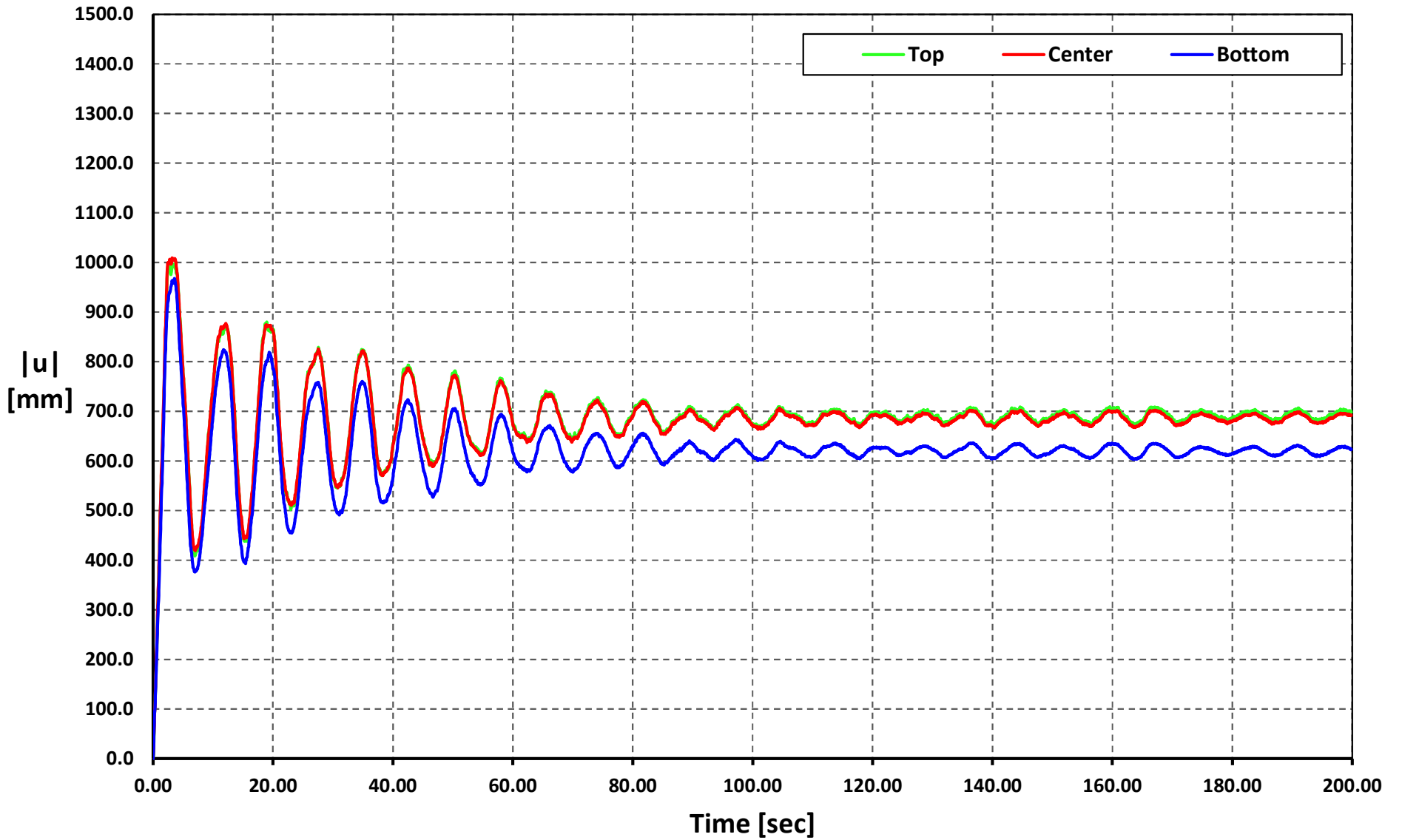
Time vs. |u|

Geometry 06 - Soil Type 2 - AMIL-E



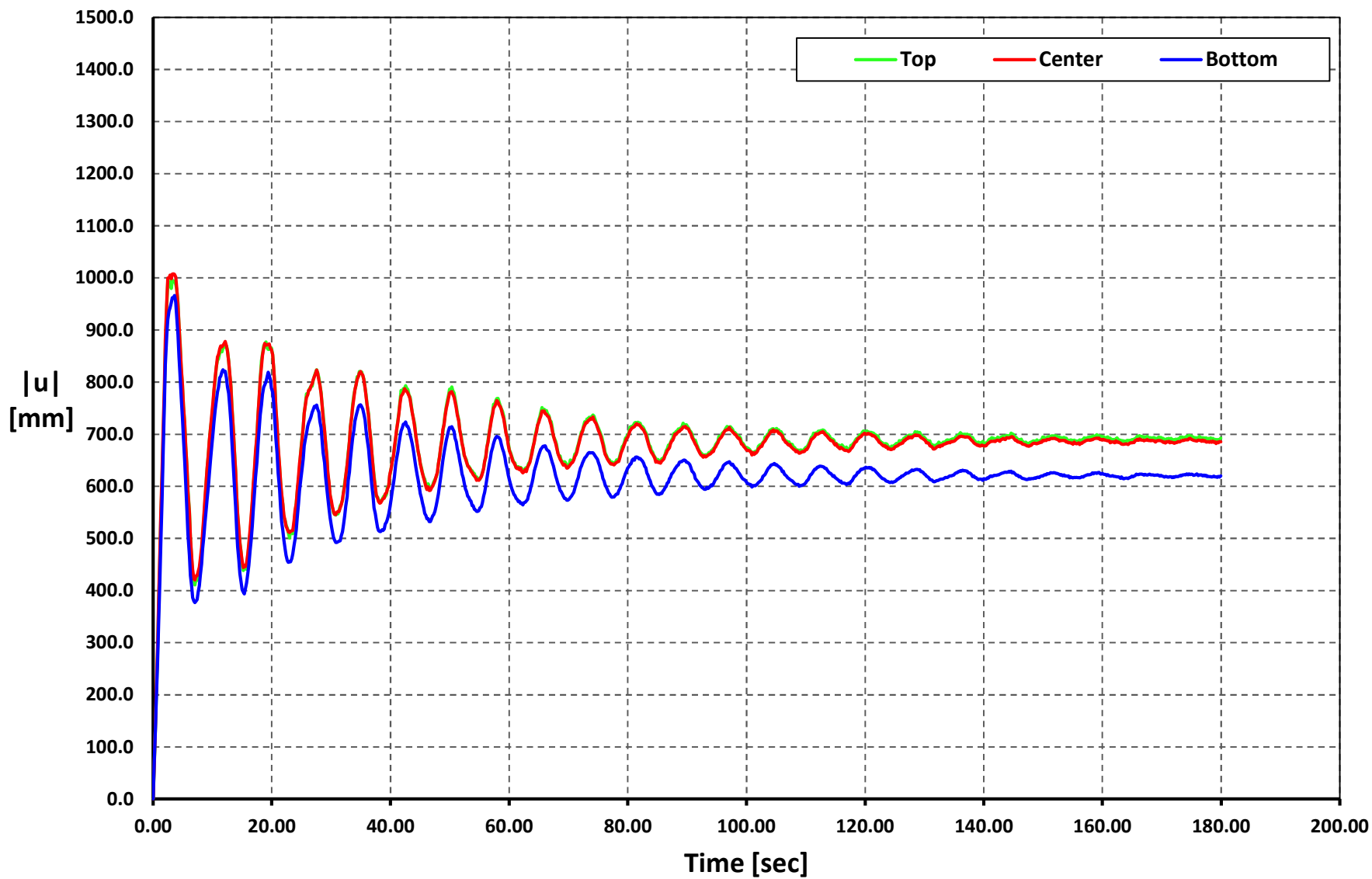
Time vs. |u|

Geometry 06 - Soil Type 2 - ACUE-E



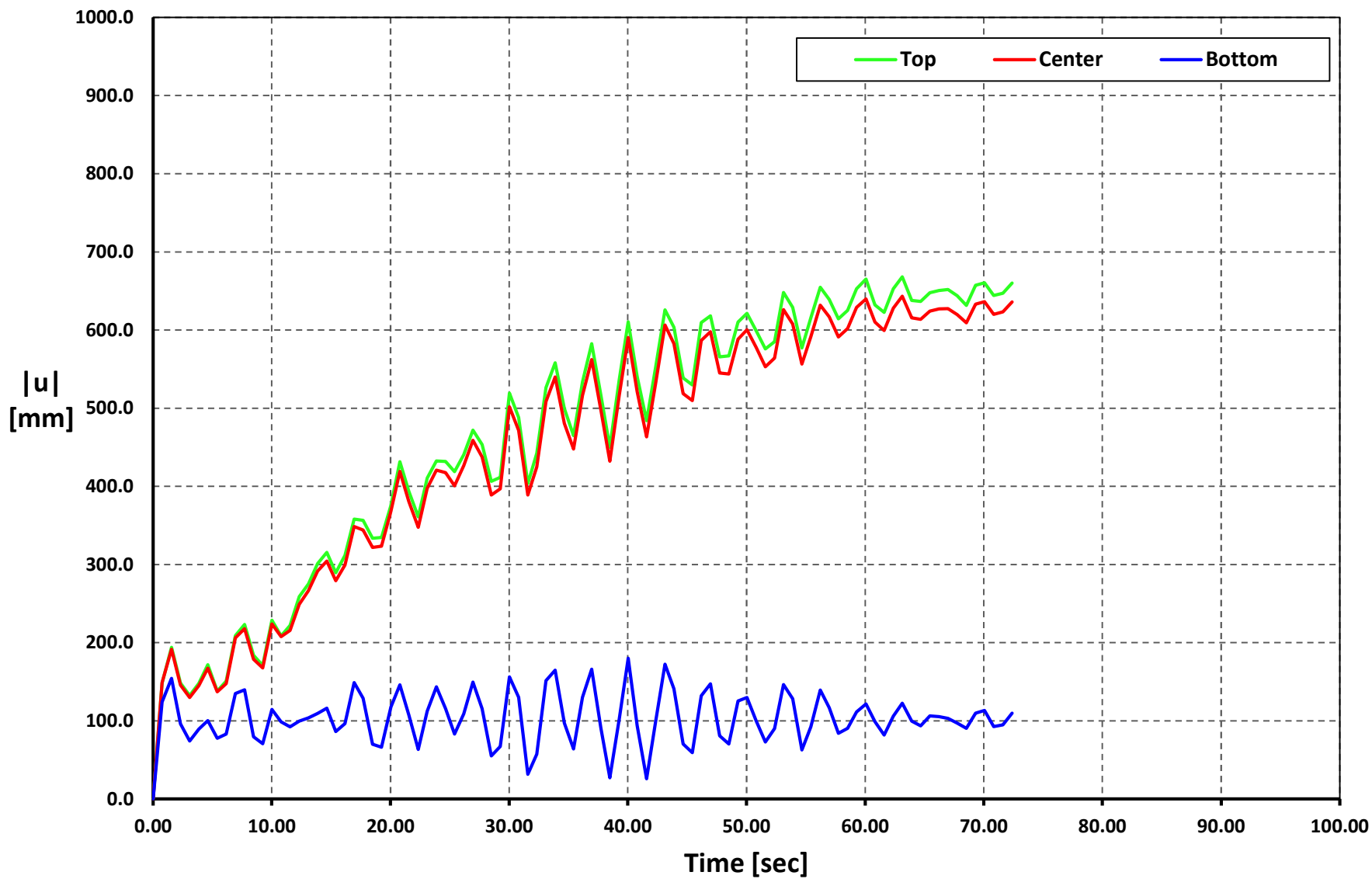
Time vs. |u|

Geometry 06 - Soil Type 2 - ALJ1-N



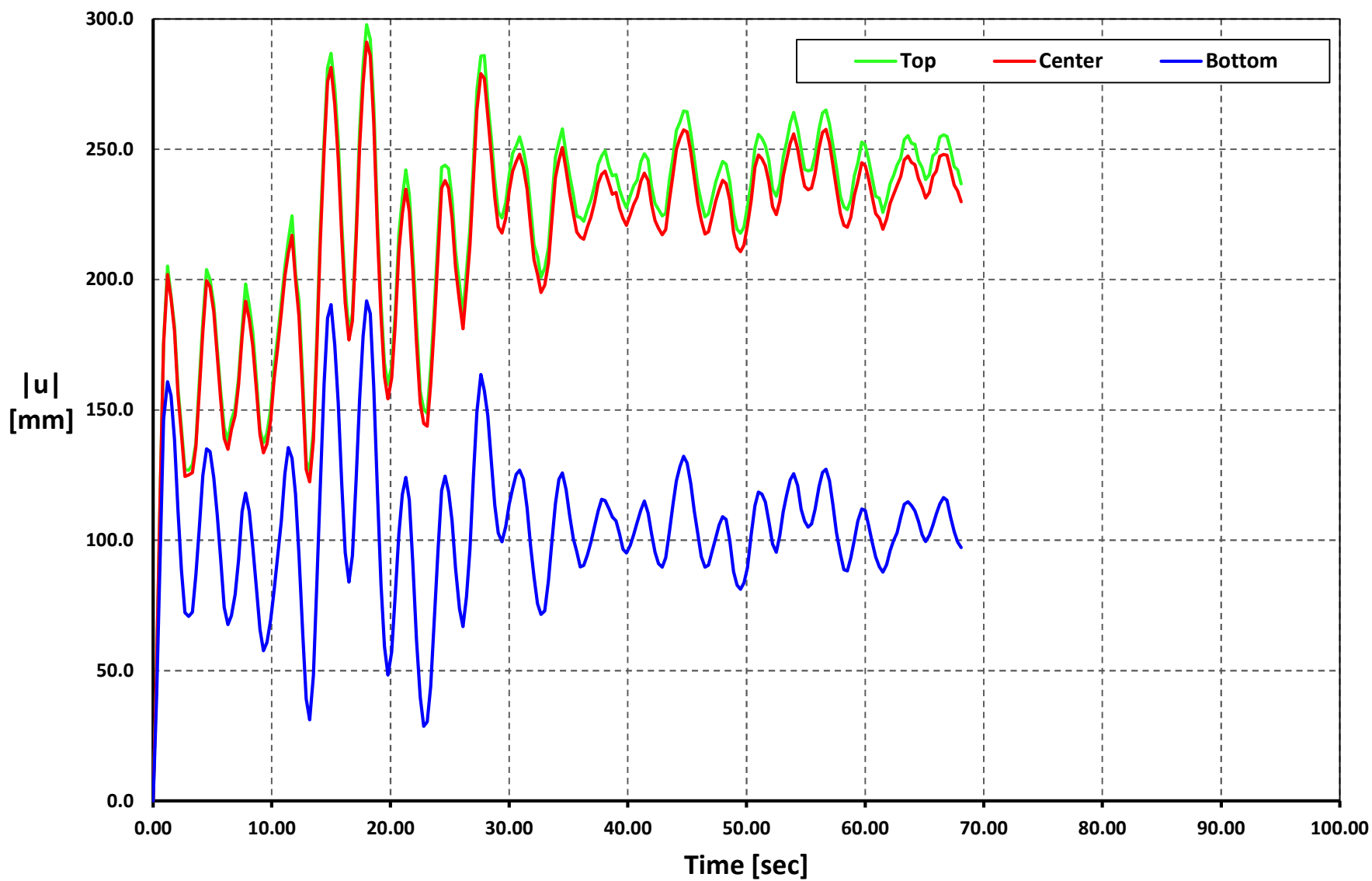
Time vs. |u|

Geometry 06 - Soil Type 3 - APED-E



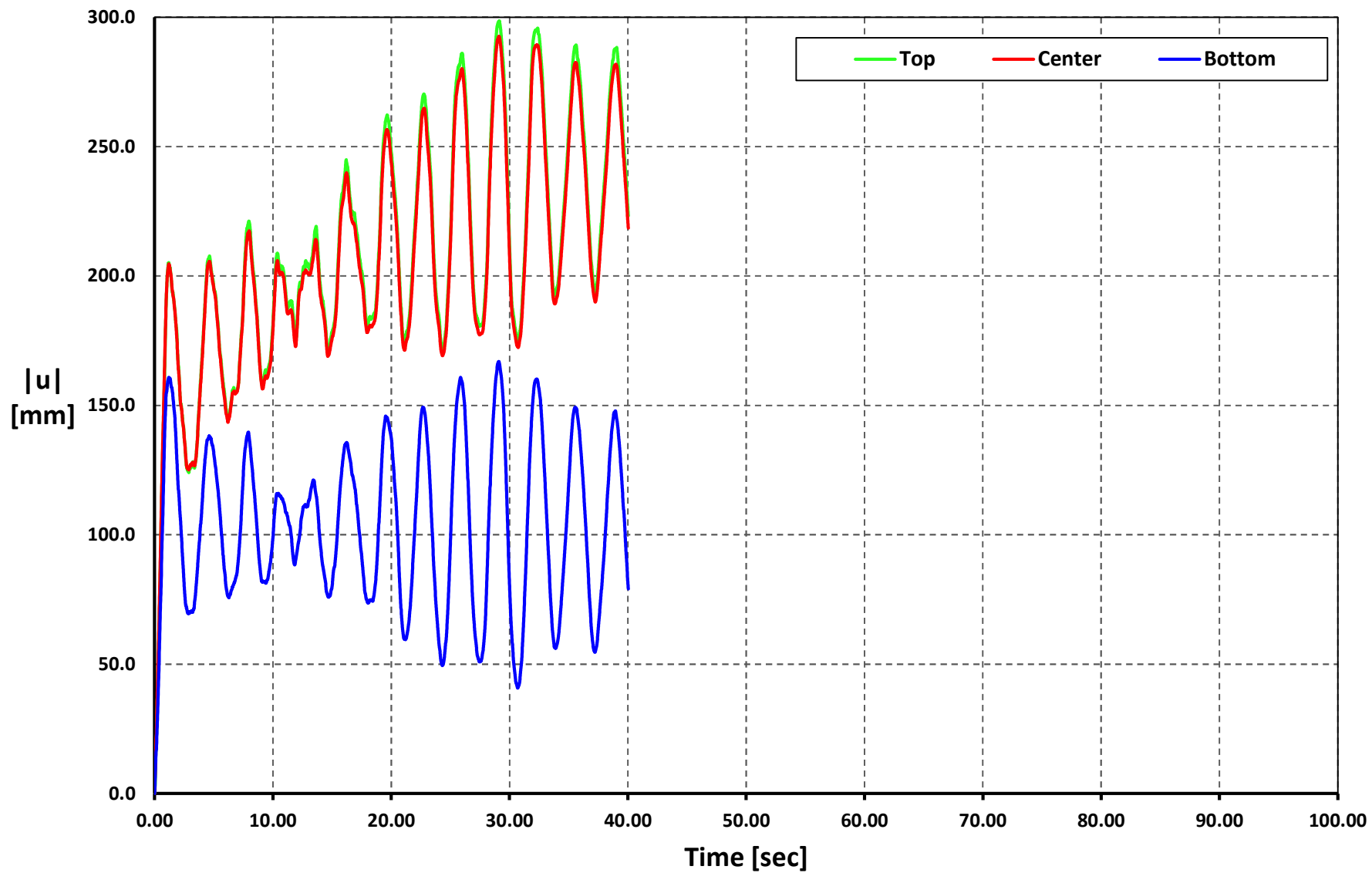
Time vs. |u|

Geometry 06 - Soil Type 3 - APO1-N



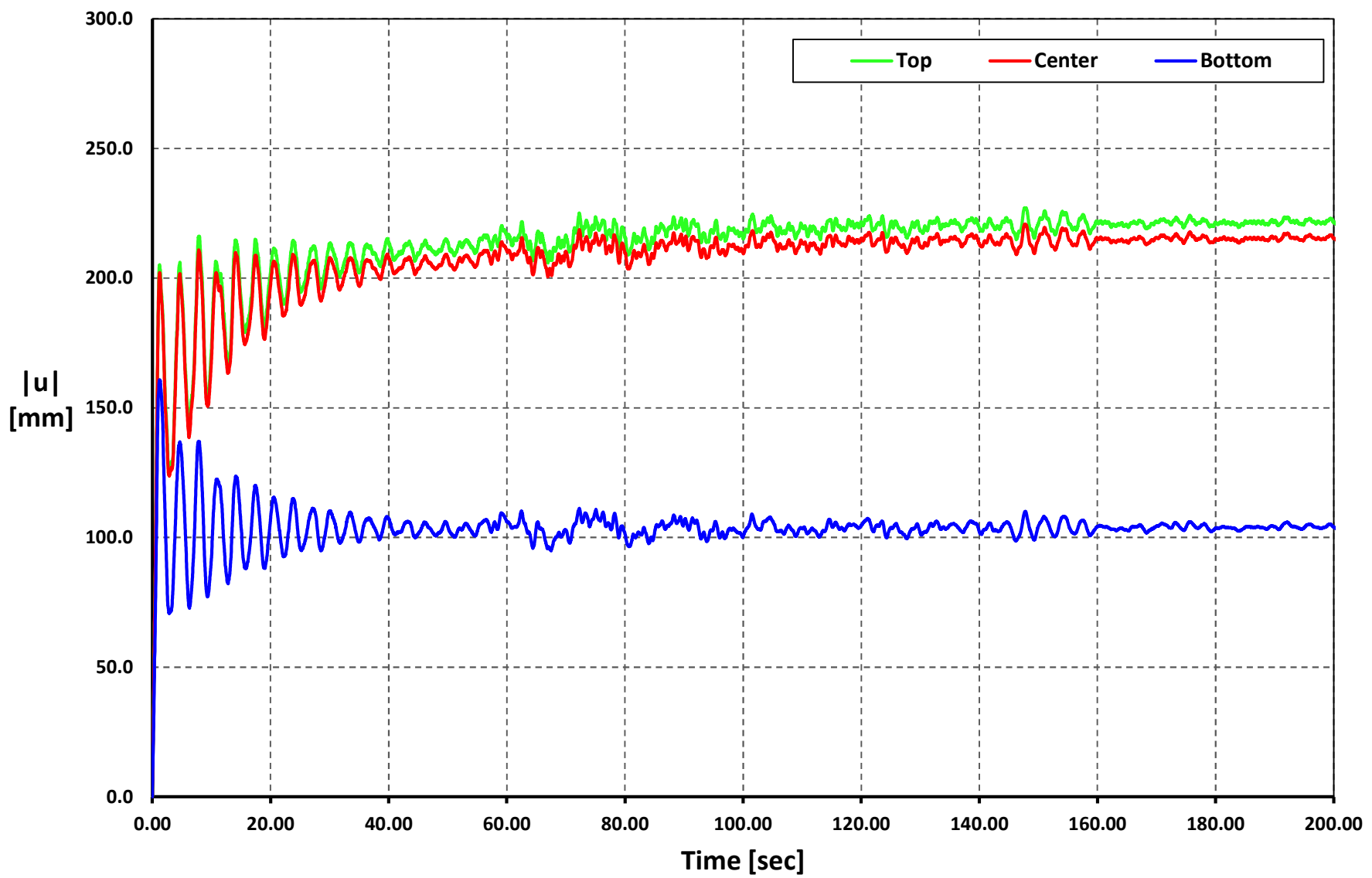
Time vs. |u|

Geometry 06 - Soil Type 3 - AMNT-N



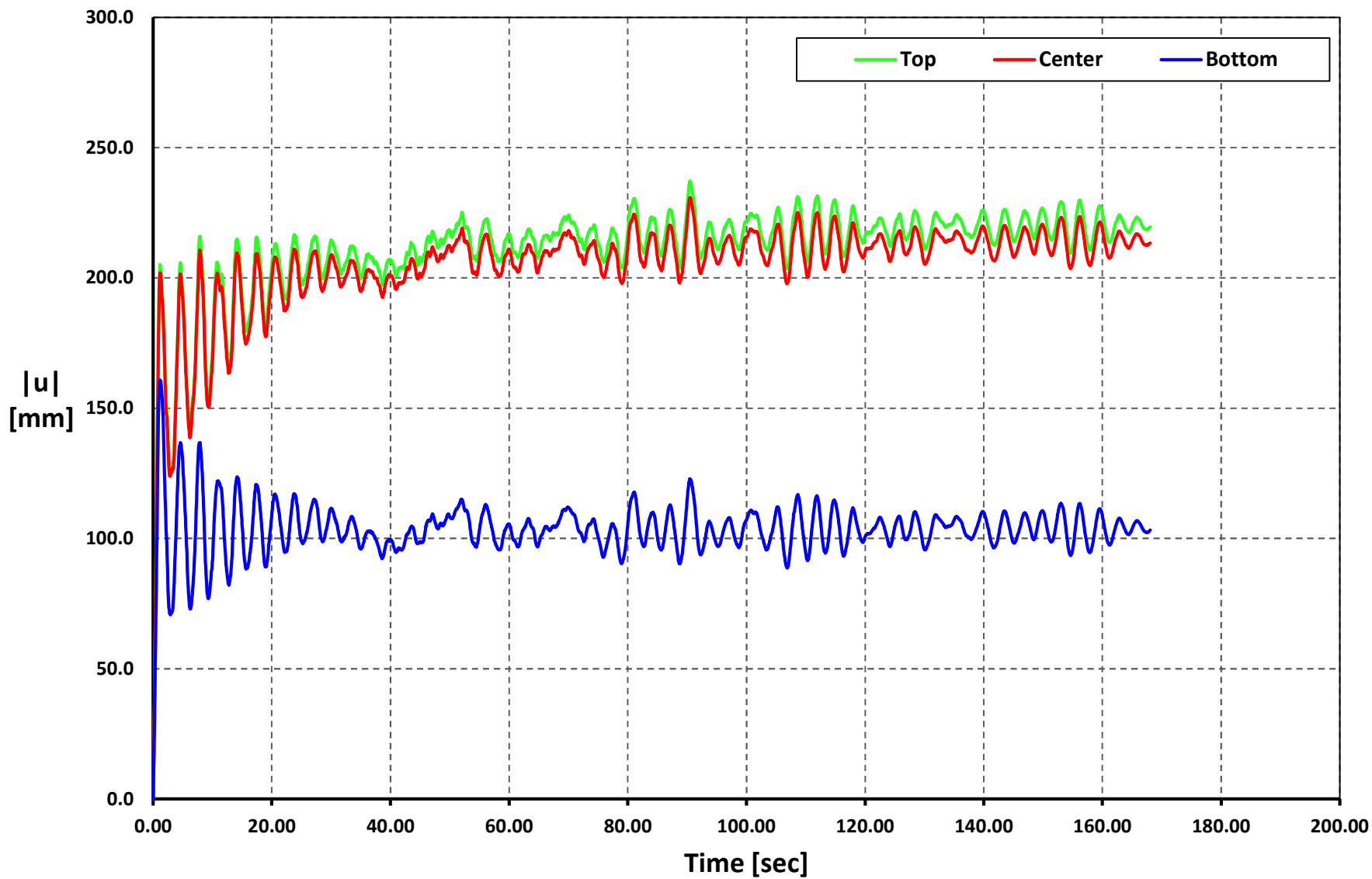
Time vs. $|u|$

Geometry 06 - Soil Type 3 - AGY2-N



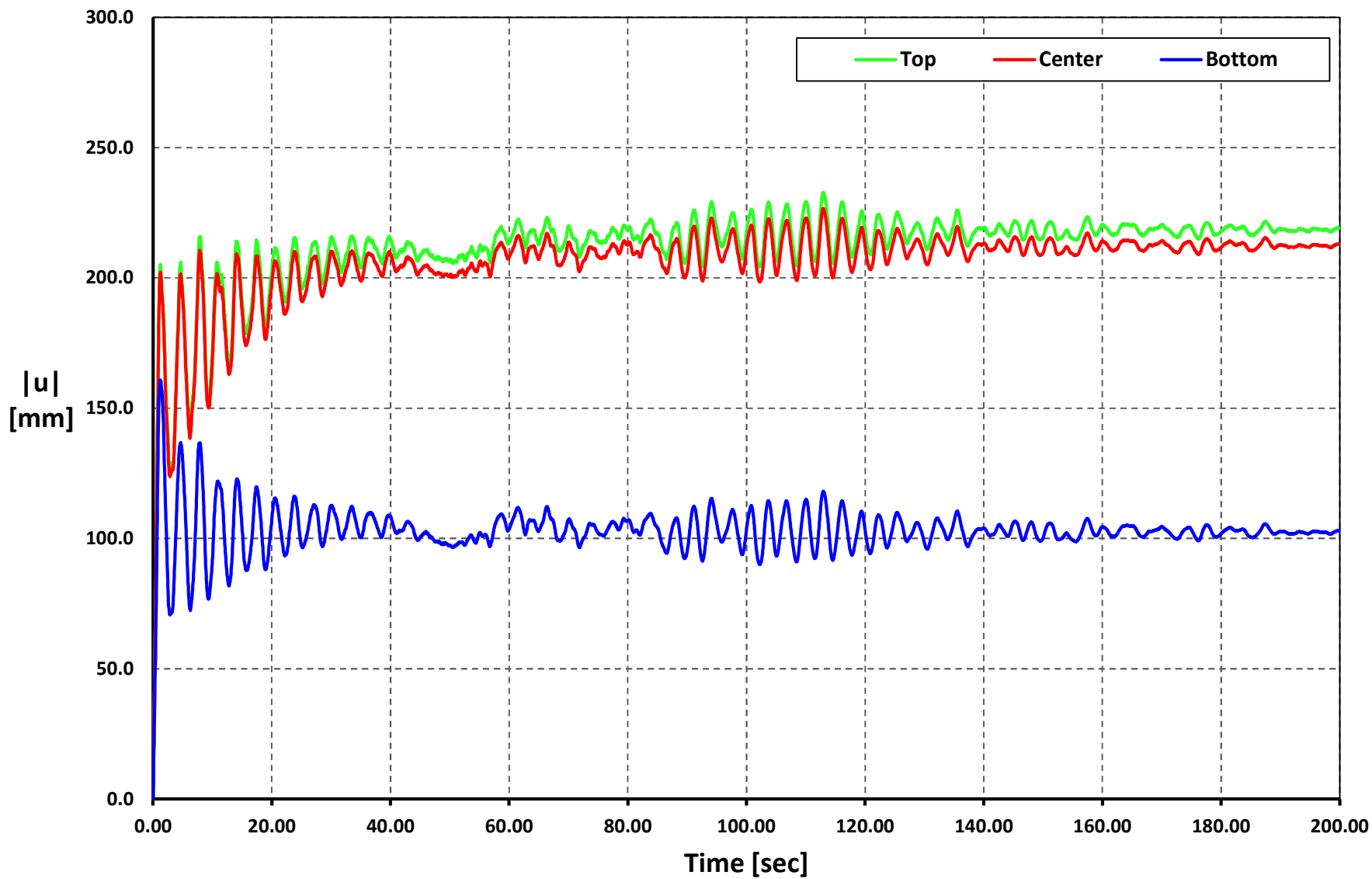
Time vs. |u|

Geometry 06 - Soil Type 3 - AMIL-E



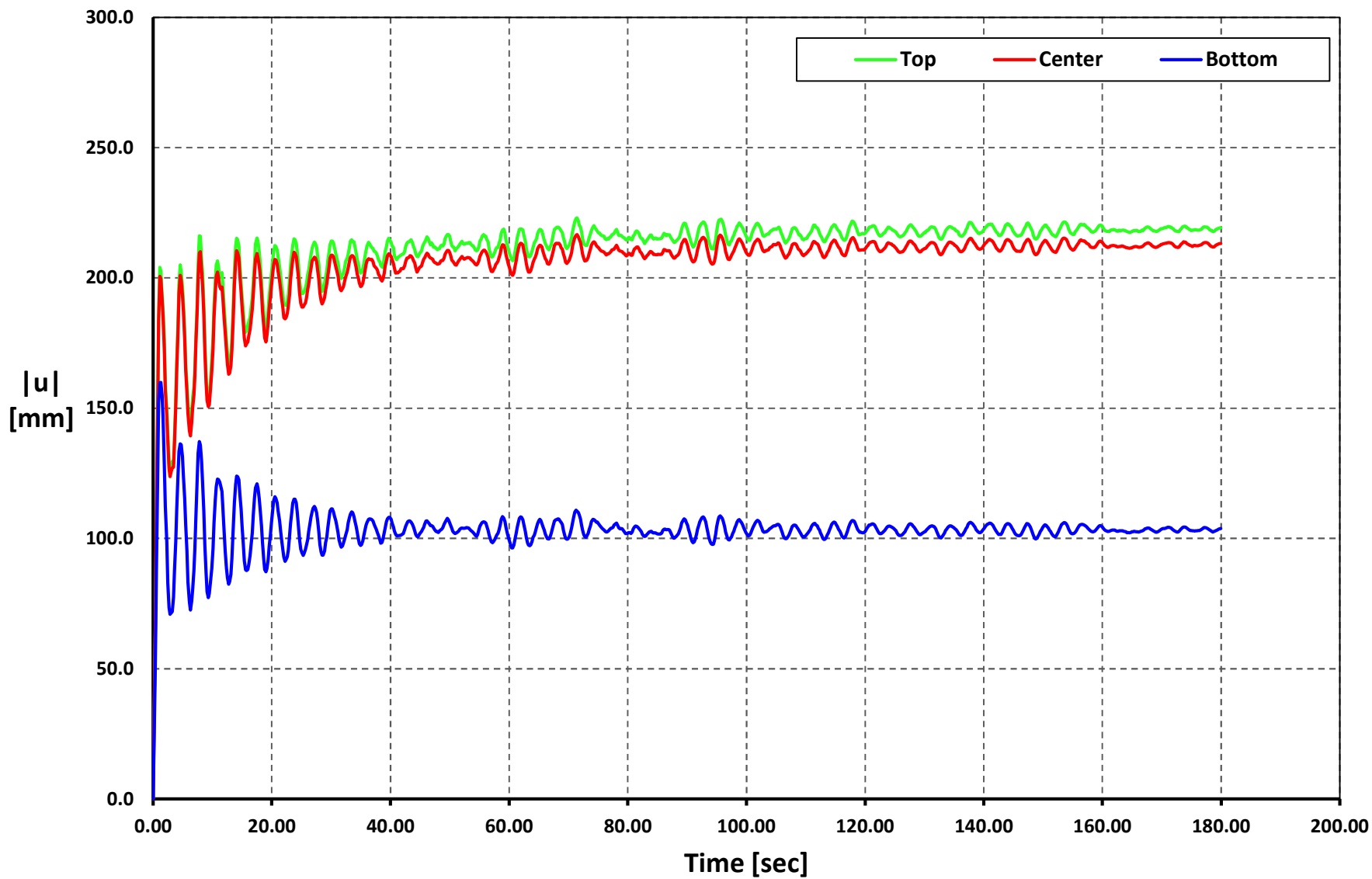
Time vs. $|u|$

Geometry 06 - Soil Type 3 - ACUE-E



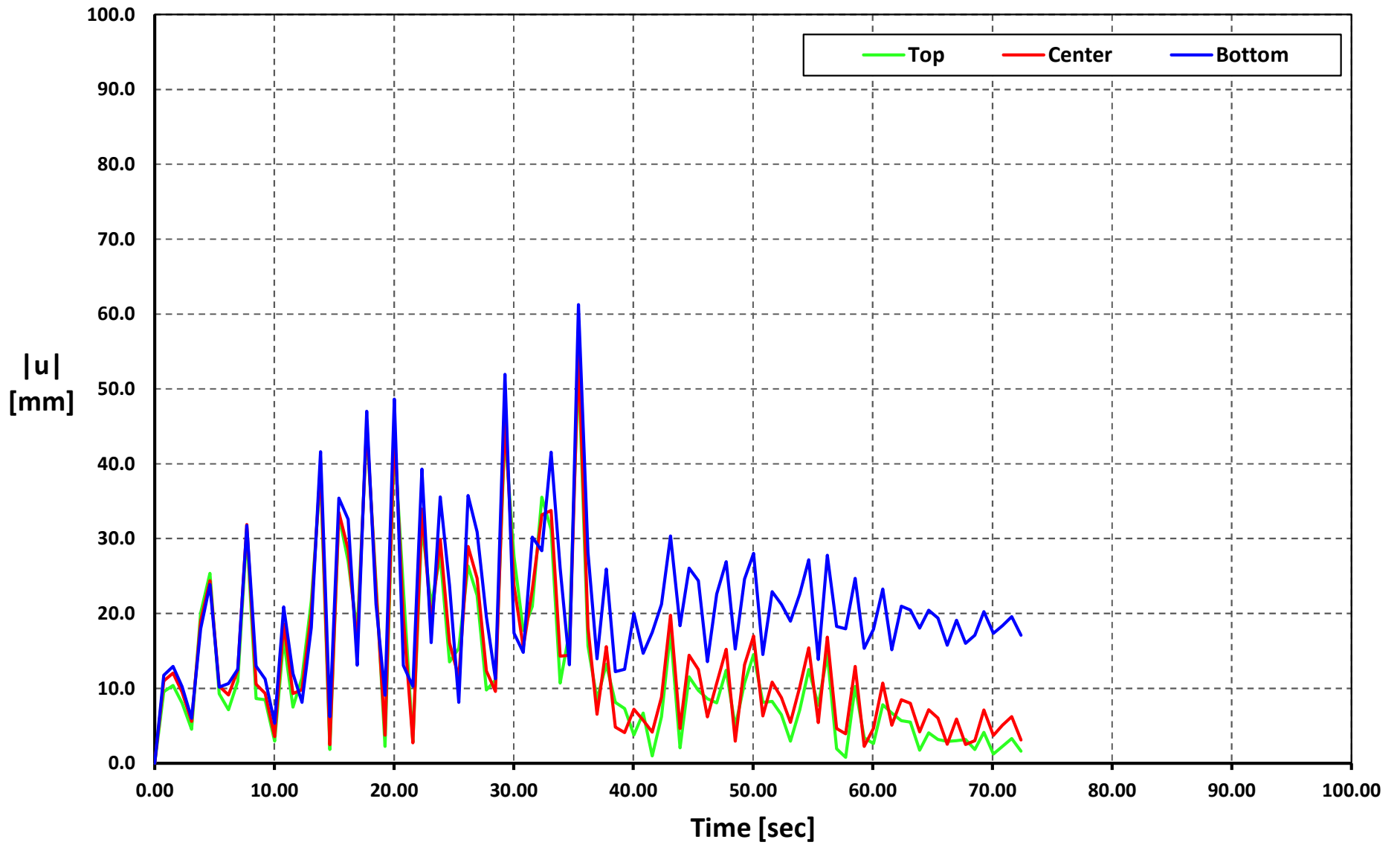
Time vs. $|u|$

Geometry 06 - Soil Type 3 - ALJ1-N



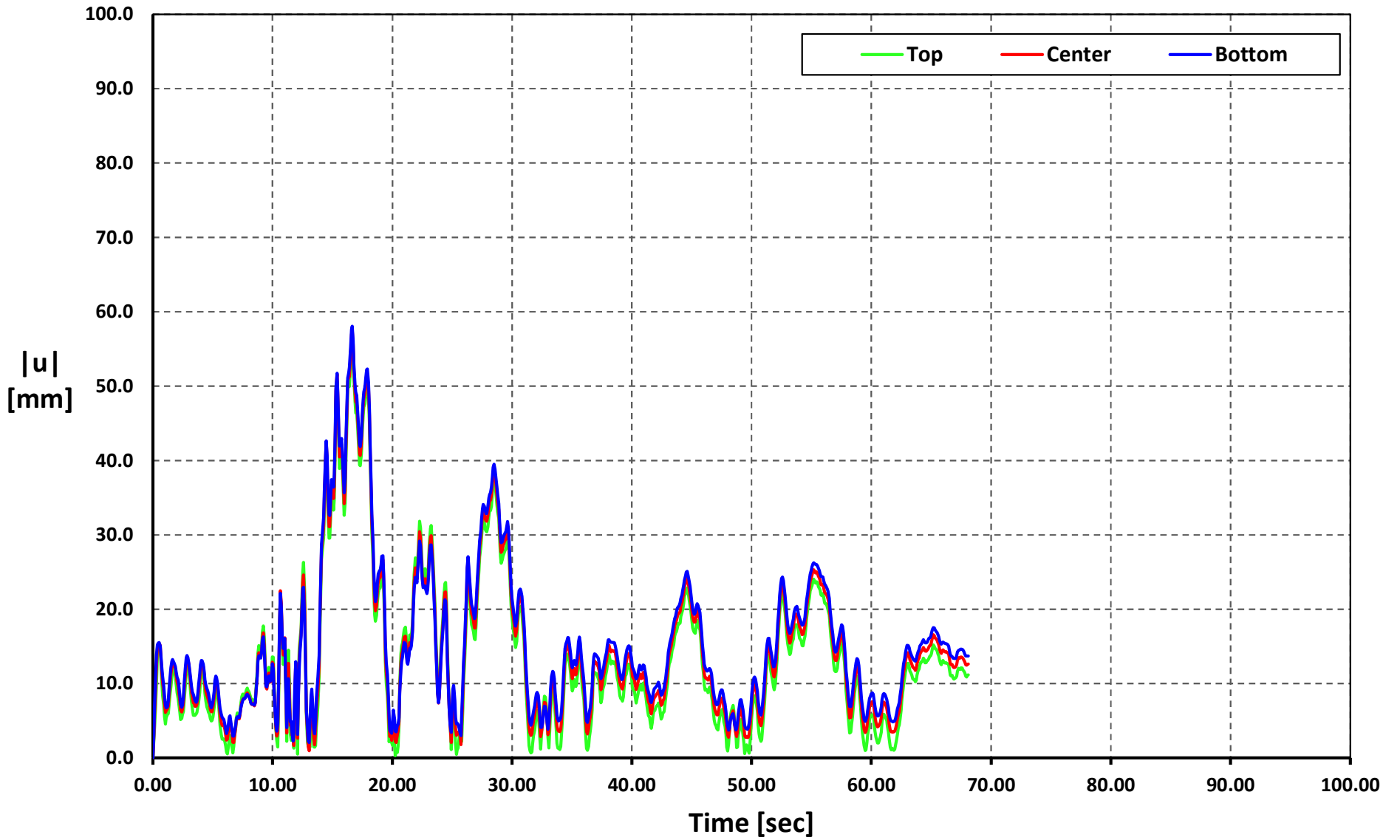
Time vs. |u|

Geometry 07 - Soil Type 1 - APED-E



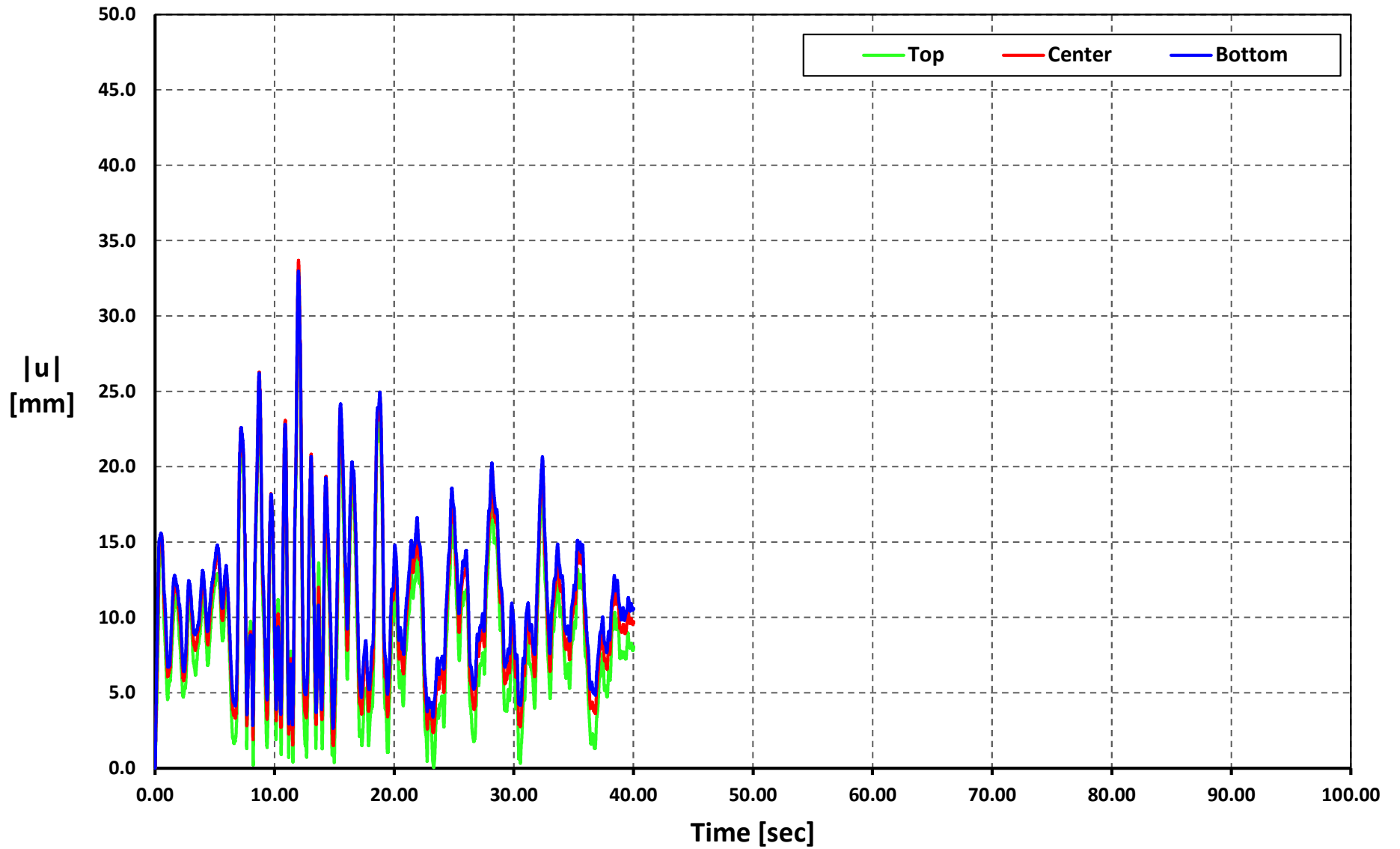
Time vs. |u|

Geometry 07 - Soil Type 1 - APO1-N



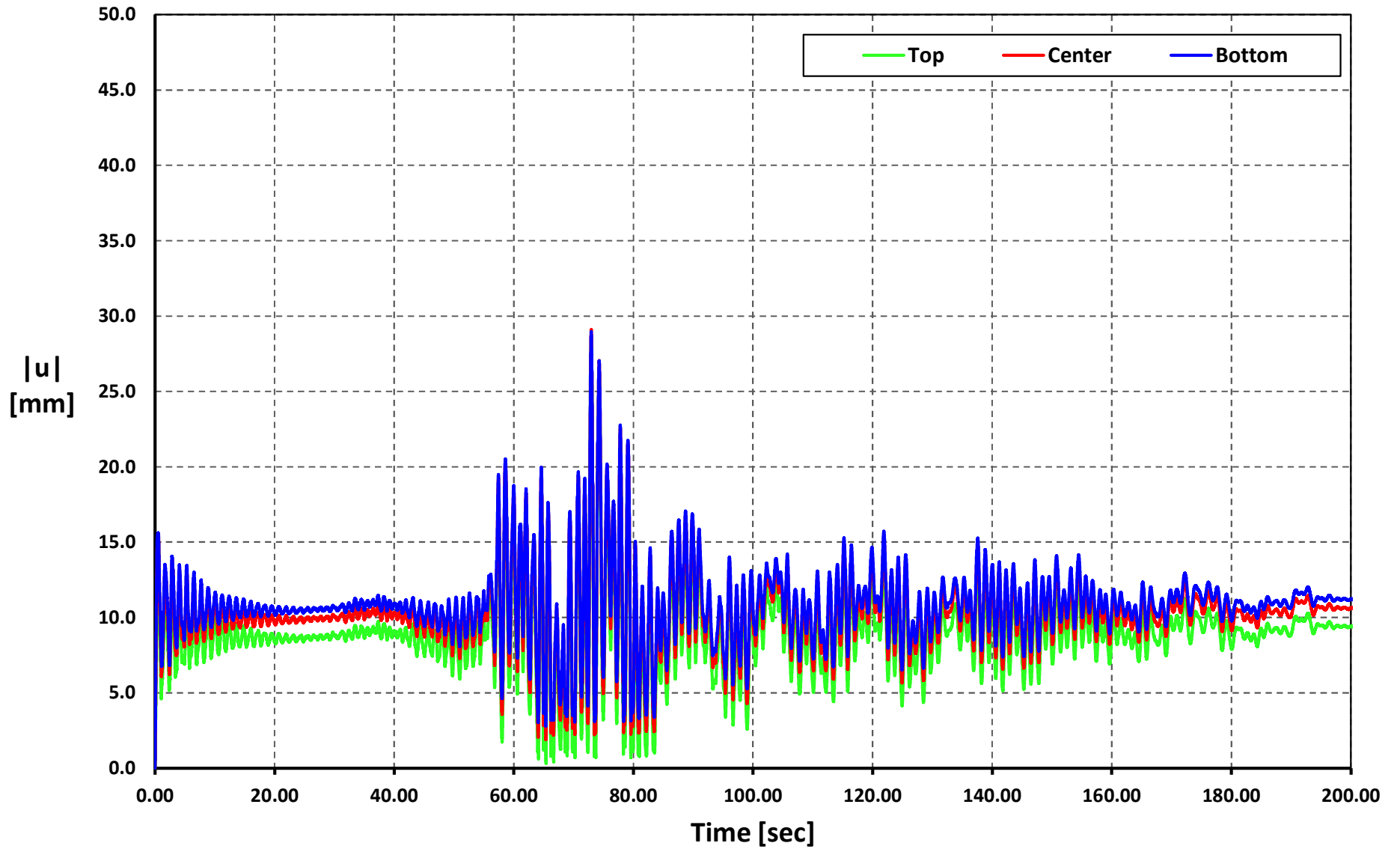
Time vs. $|u|$

Geometry 07 - Soil Type 1 - AMNT-N



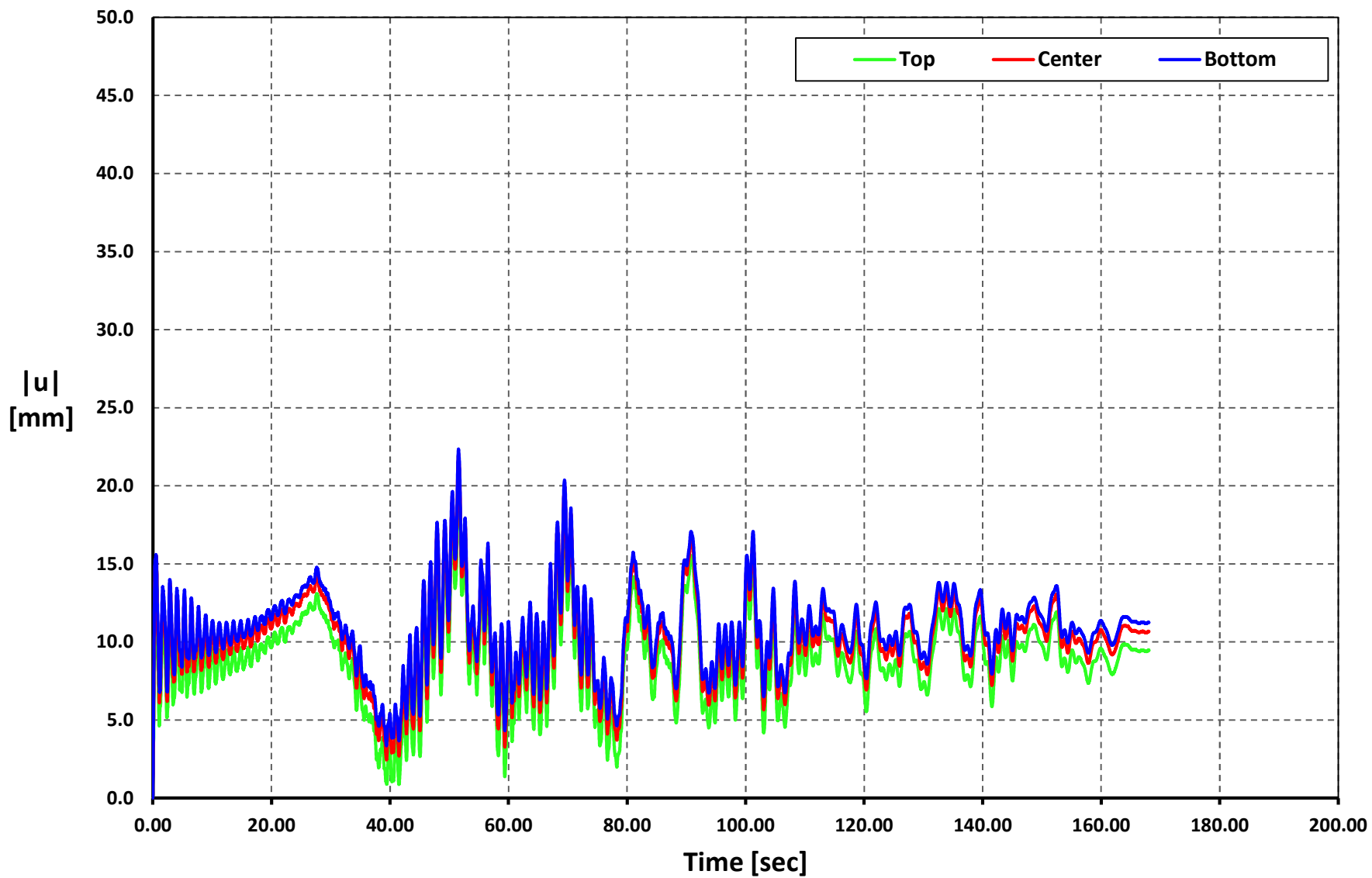
Time vs. $|u|$

Geometry 07 - Soil Type 1 - AGY2-N



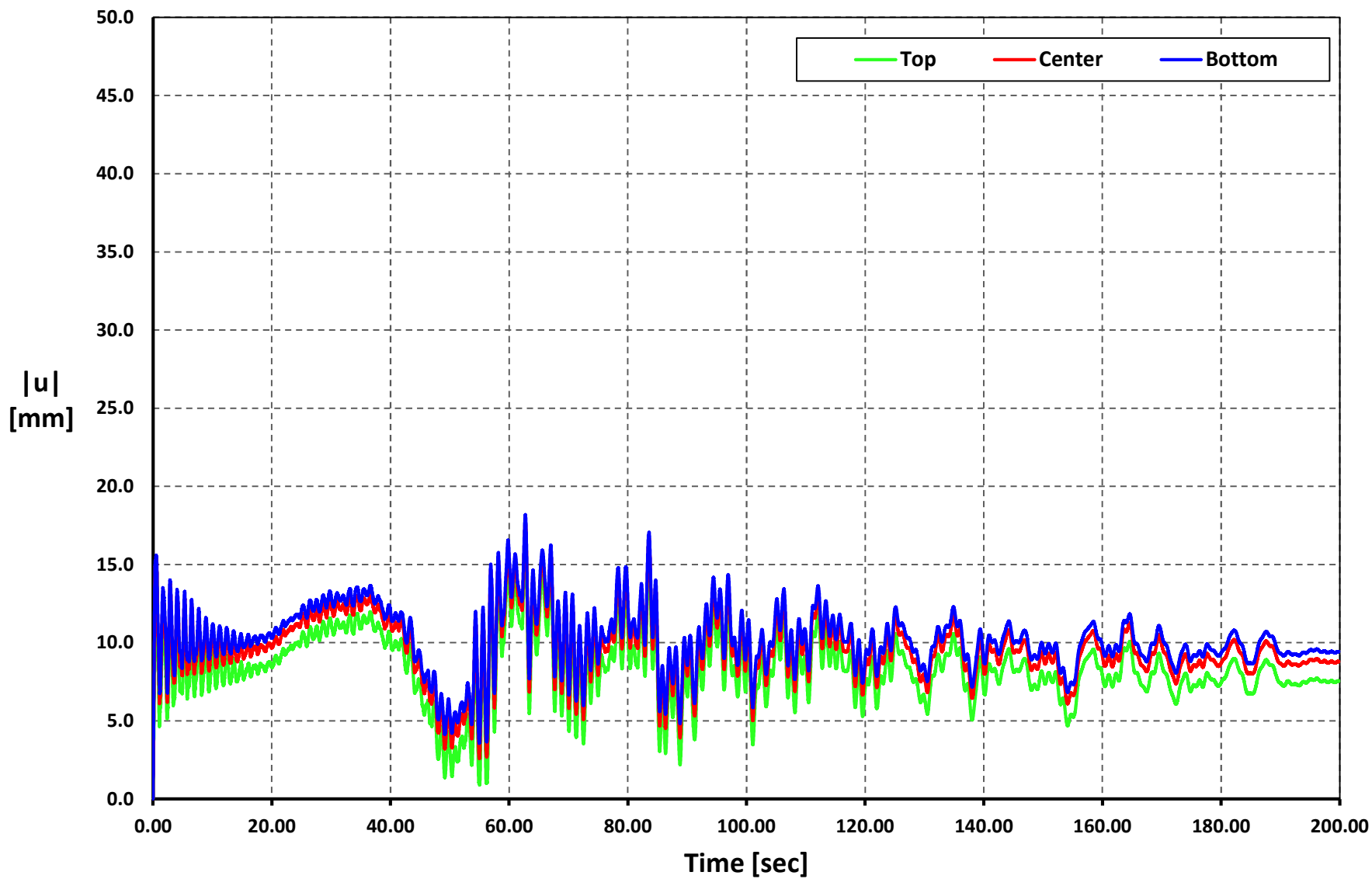
Time vs. $|u|$

Geometry 07 - Soil Type 1 - AMIL-E



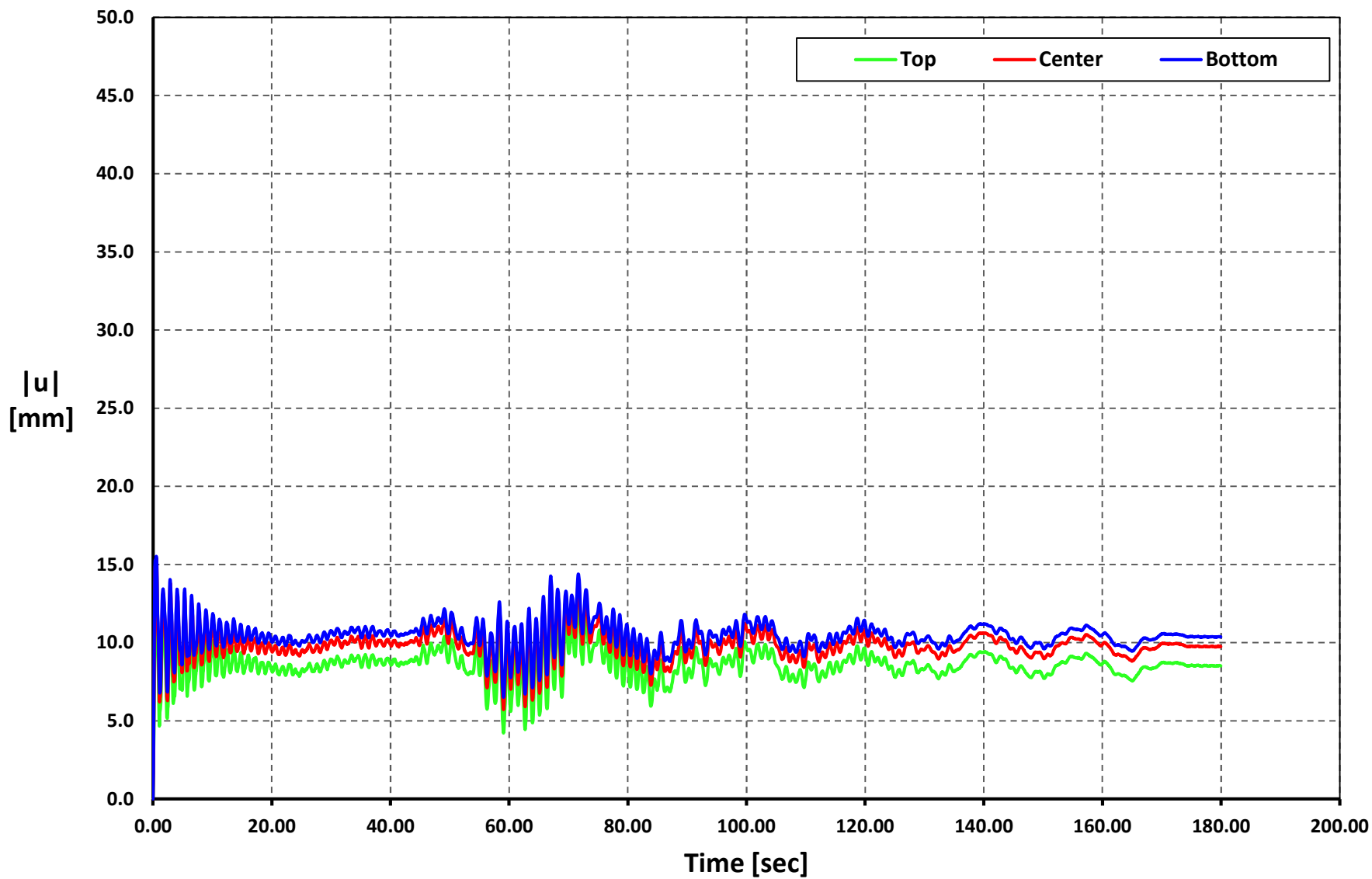
Time vs. $|u|$

Geometry 07 - Soil Type 1 - ACUE-E



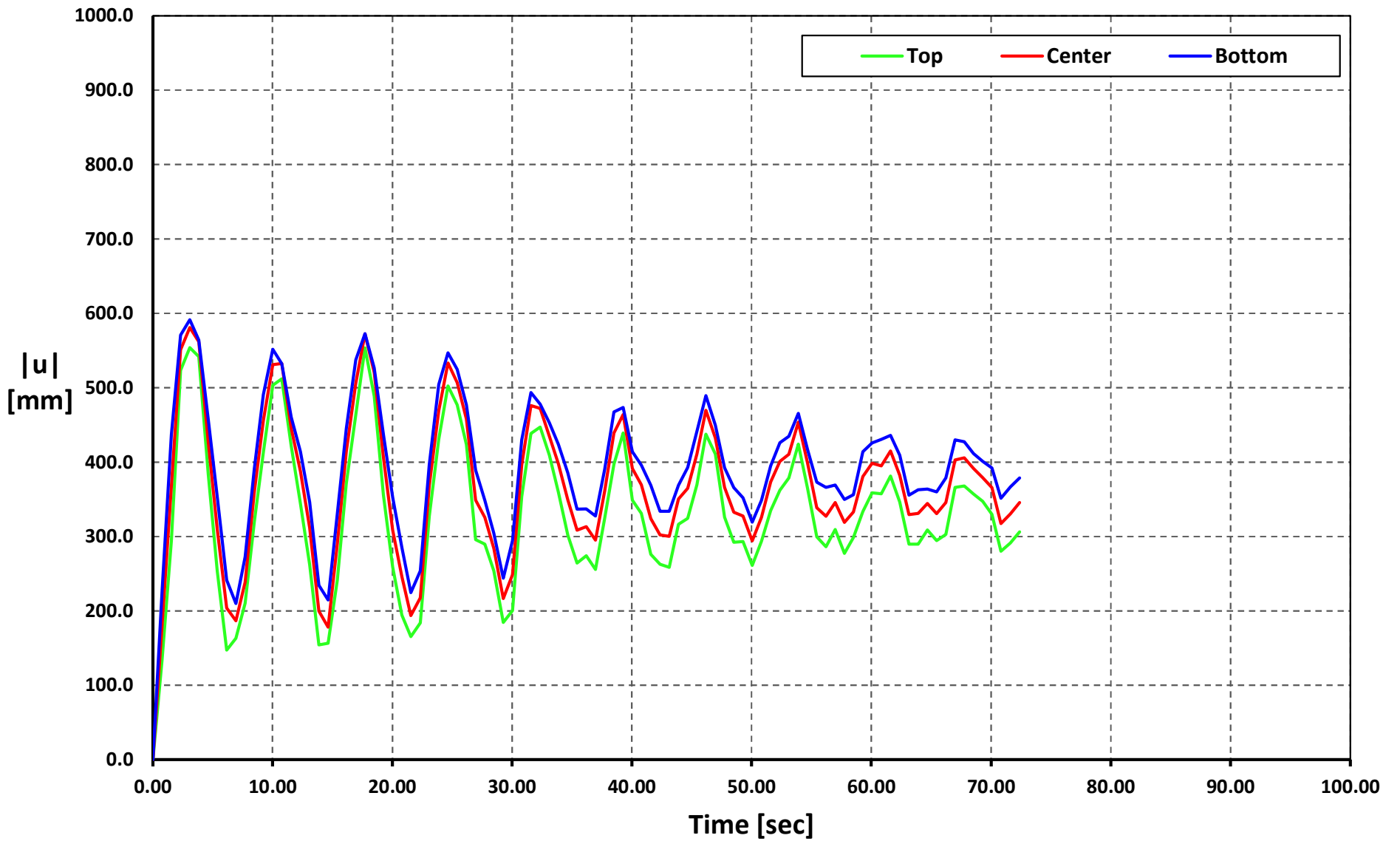
Time vs. $|u|$

Geometry 07 - Soil Type 1 - ALJ1-N



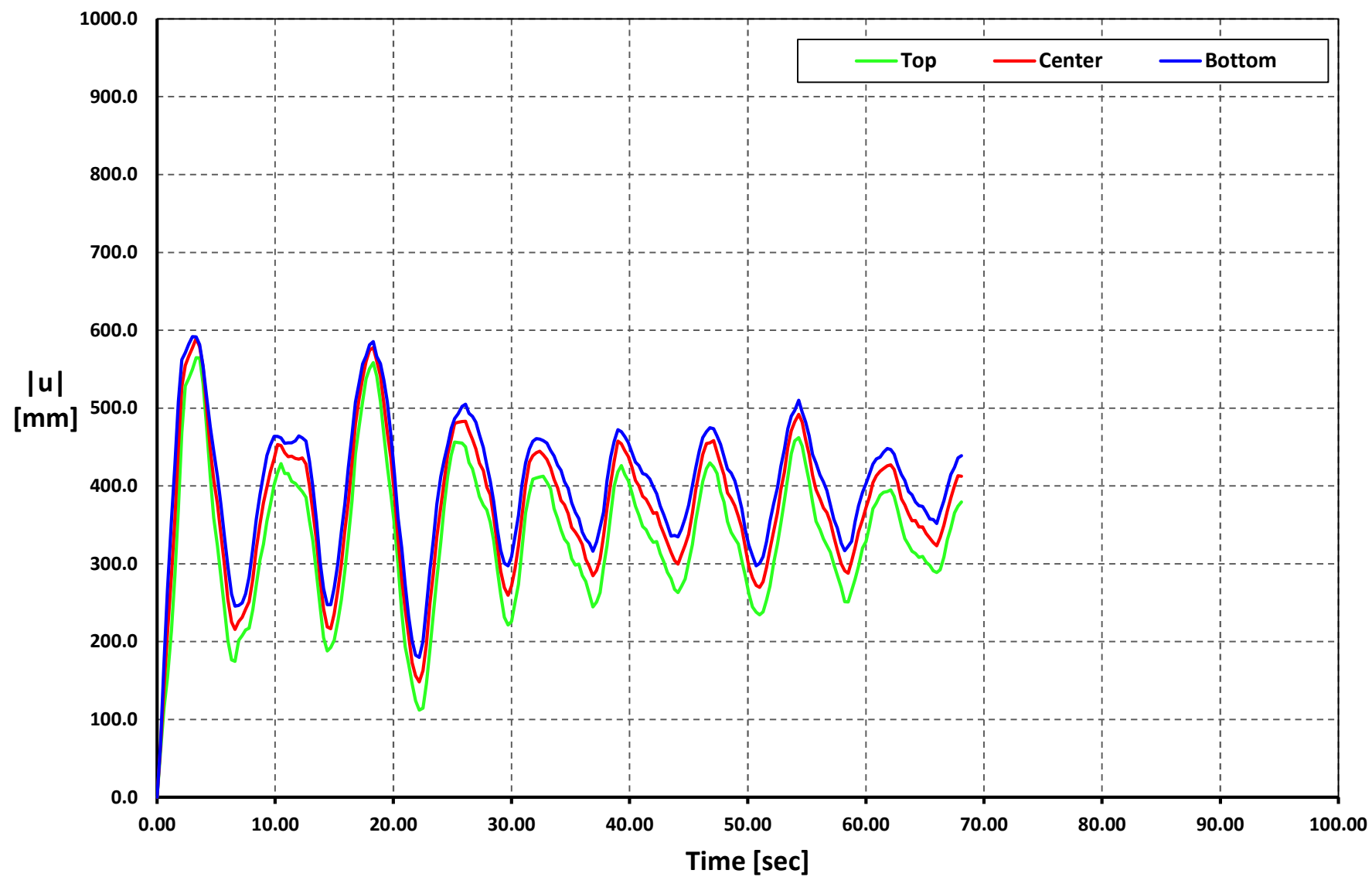
Time vs. |u|

Geometry 07 - Soil Type 2 - APED-E



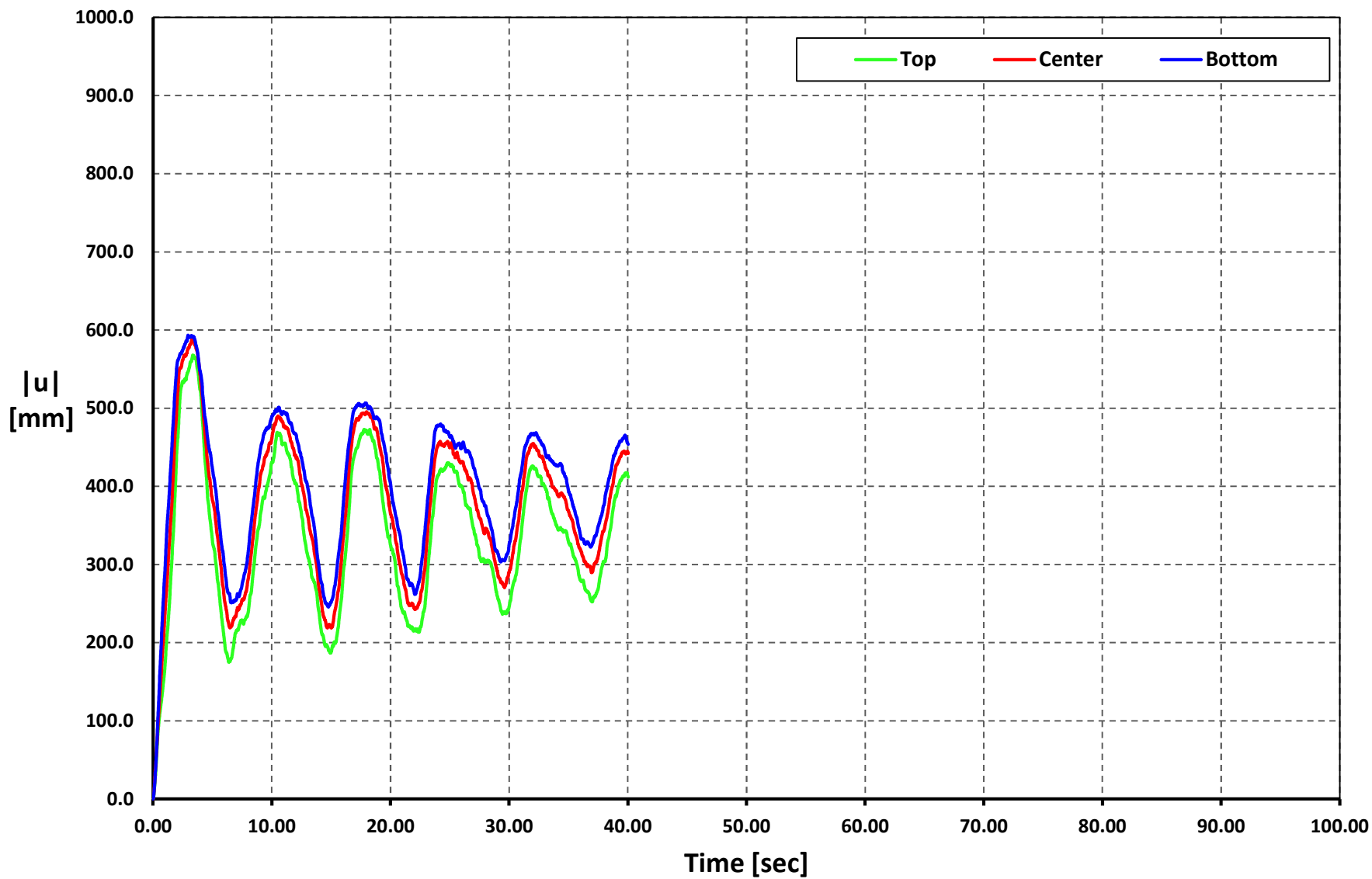
Time vs. |u|

Geometry 07 - Soil Type 2 - APO1-N



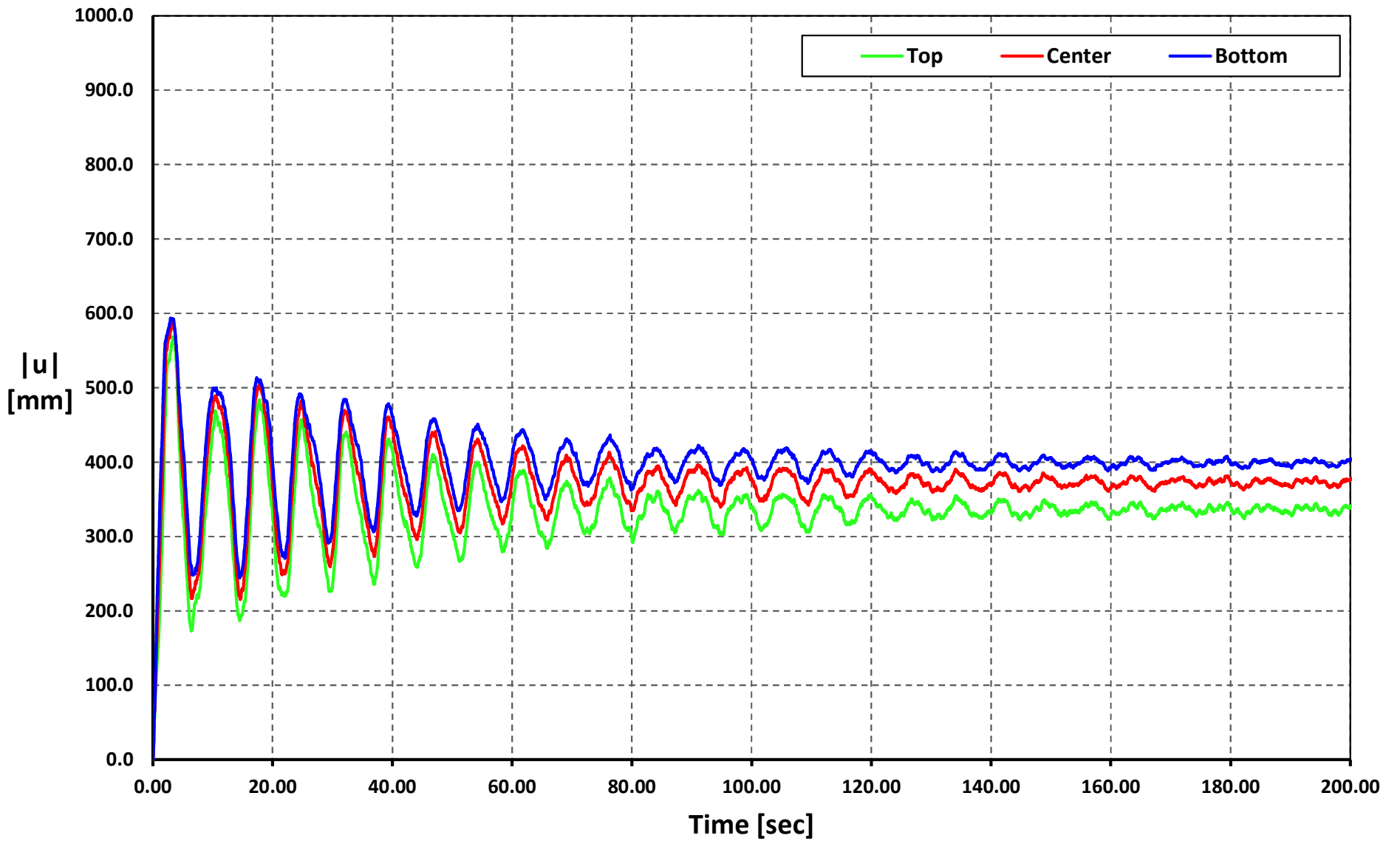
Time vs. |u|

Geometry 07 - Soil Type 2 - AMNT-N



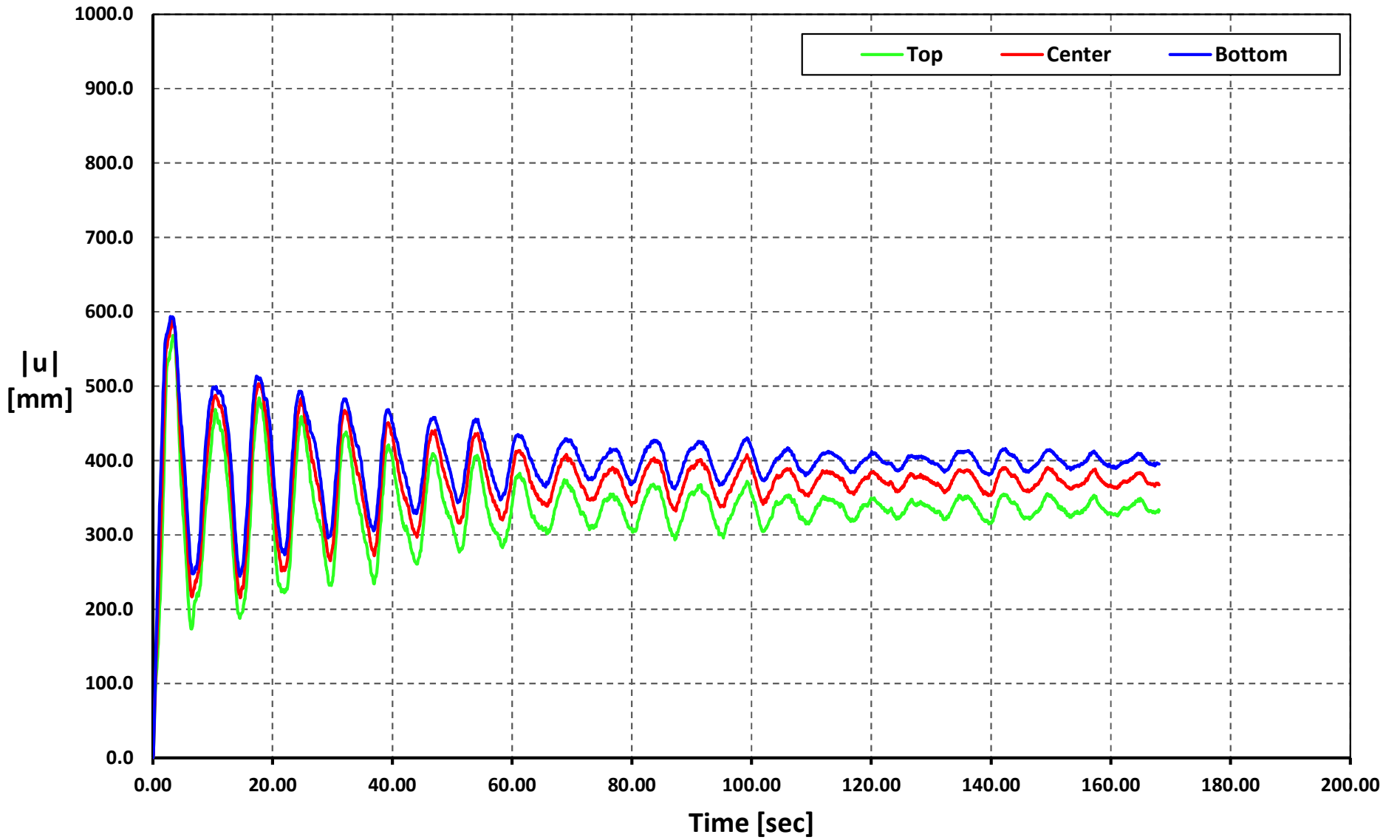
Time vs. |u|

Geometry 07 - Soil Type 2 - AGY2-N



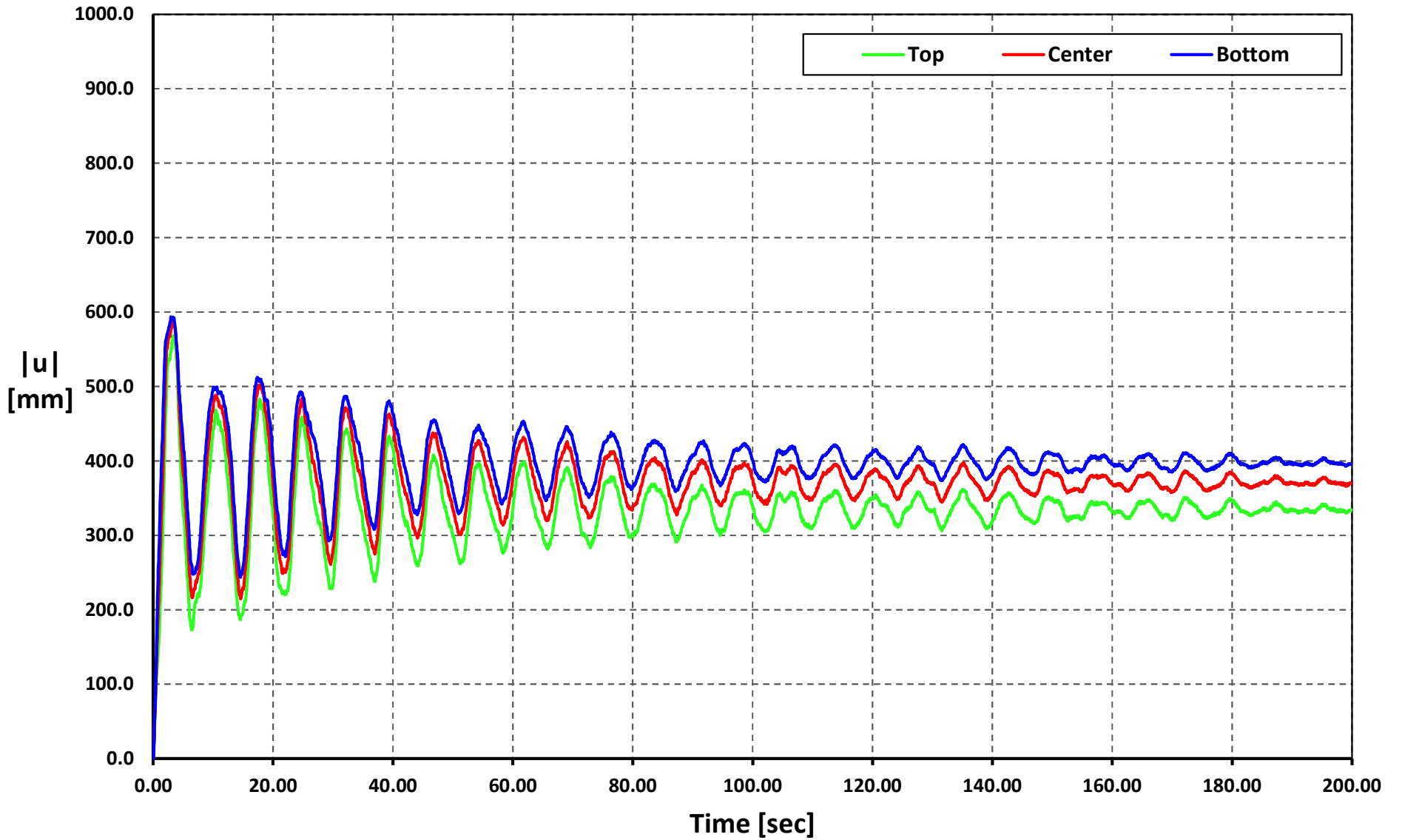
Time vs. |u|

Geometry 07 - Soil Type 2 - AMIL-E



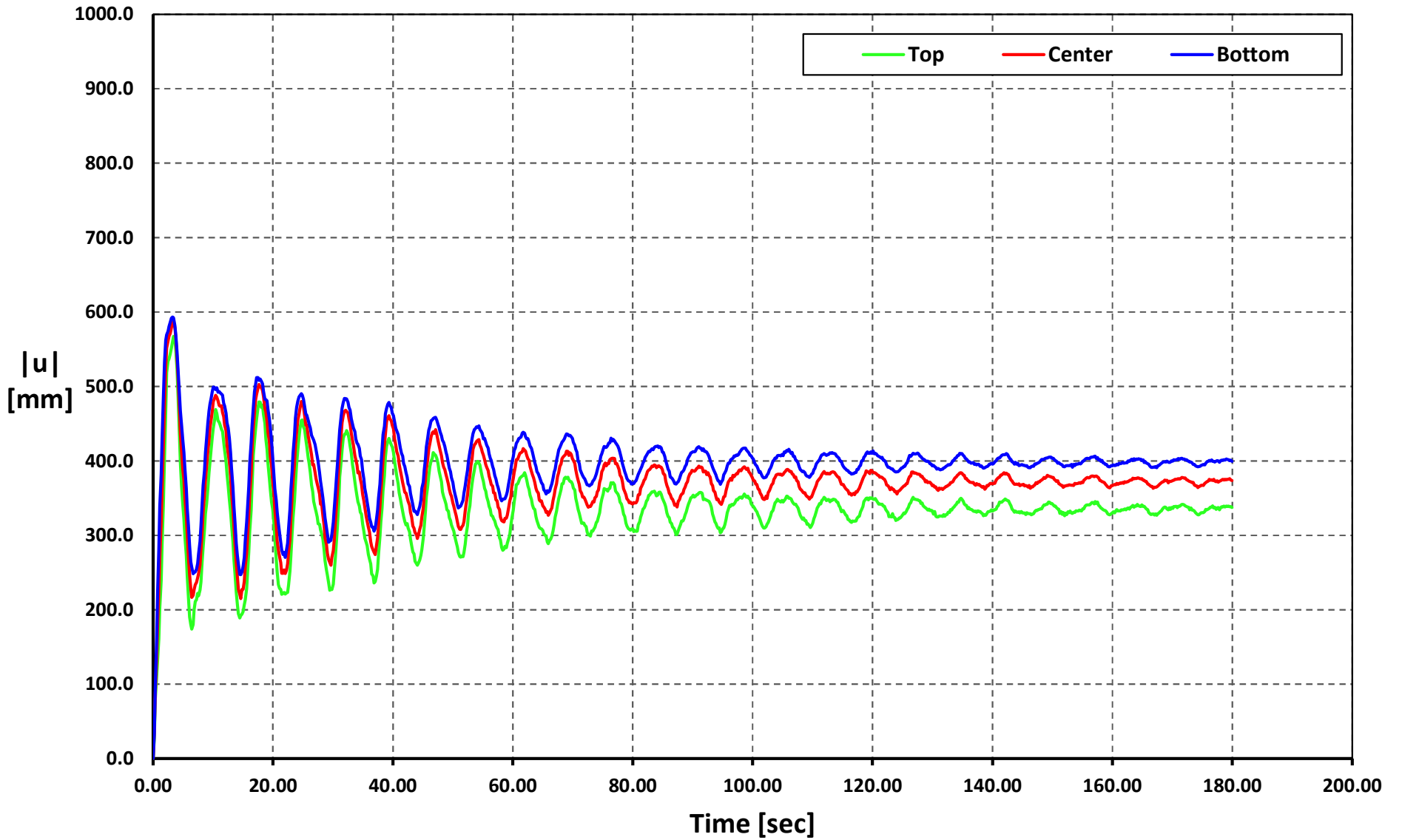
Time vs. |u|

Geometry 07 - Soil Type 2 - ACUE-E



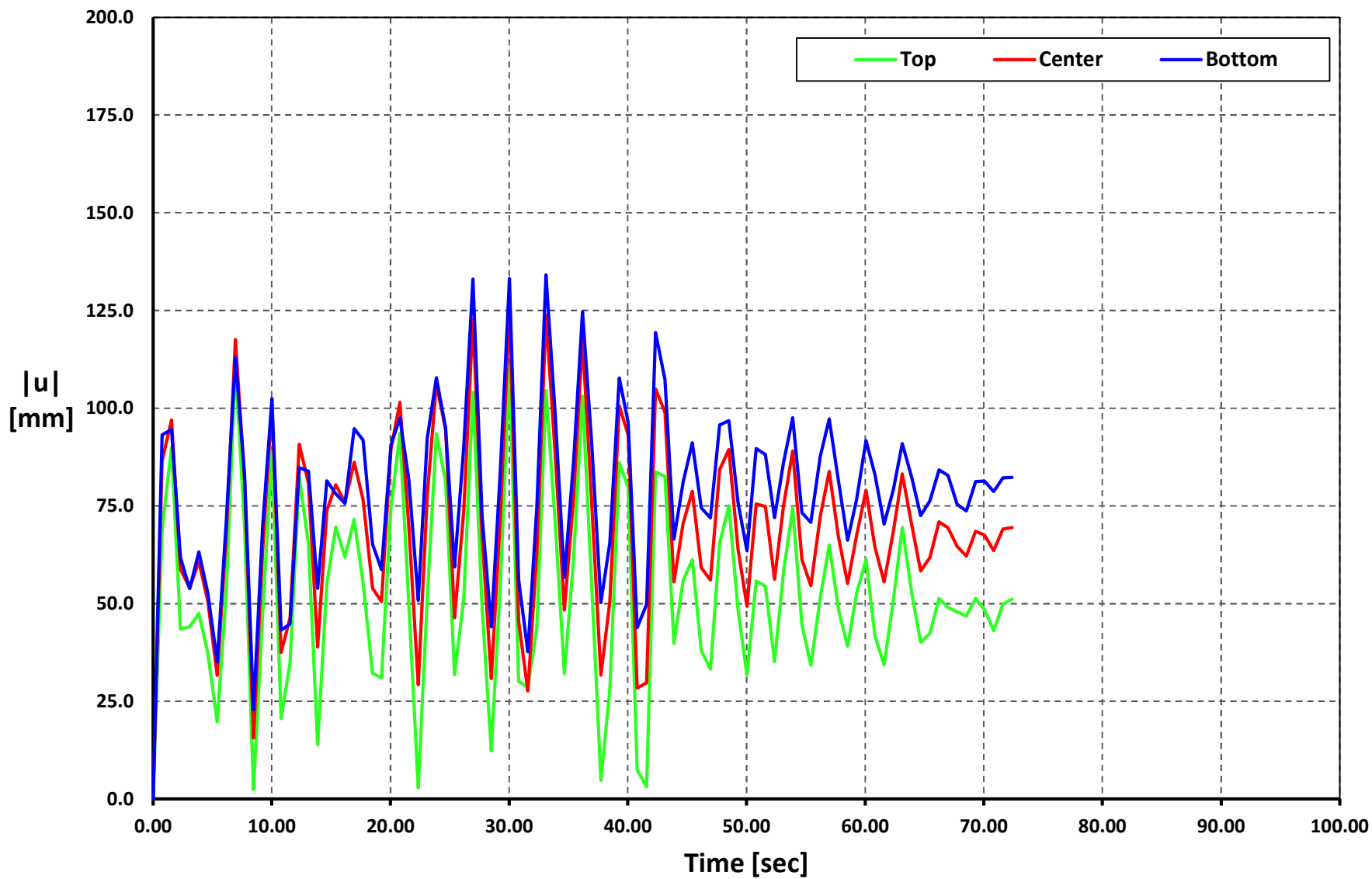
Time vs. |u|

Geometry 07 - Soil Type 2 - ALJ1-N



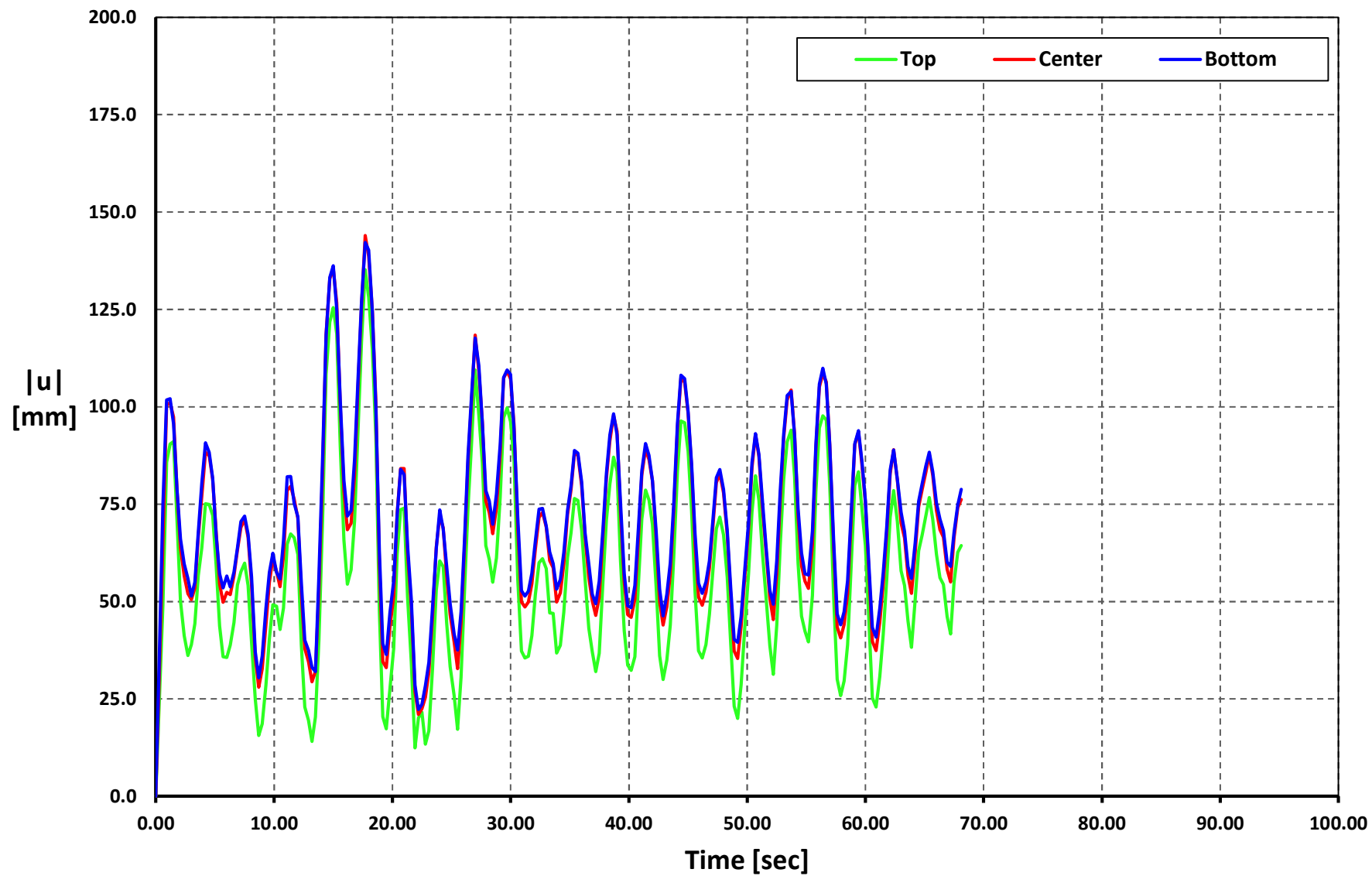
Time vs. |u|

Geometry 07 - Soil Type 3 - APED-E



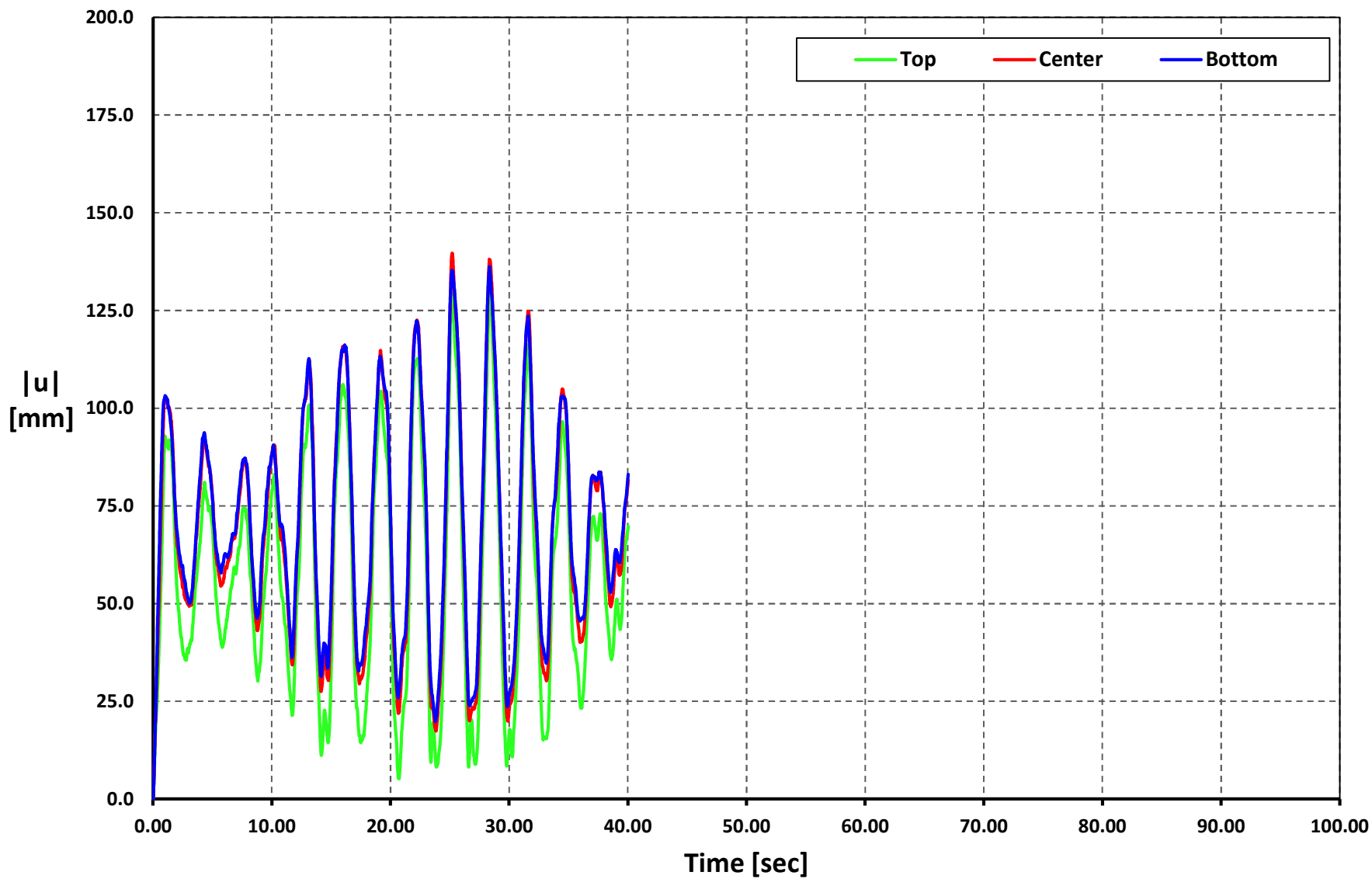
Time vs. $|u|$

Geometry 07 - Soil Type 3 - APO1-N



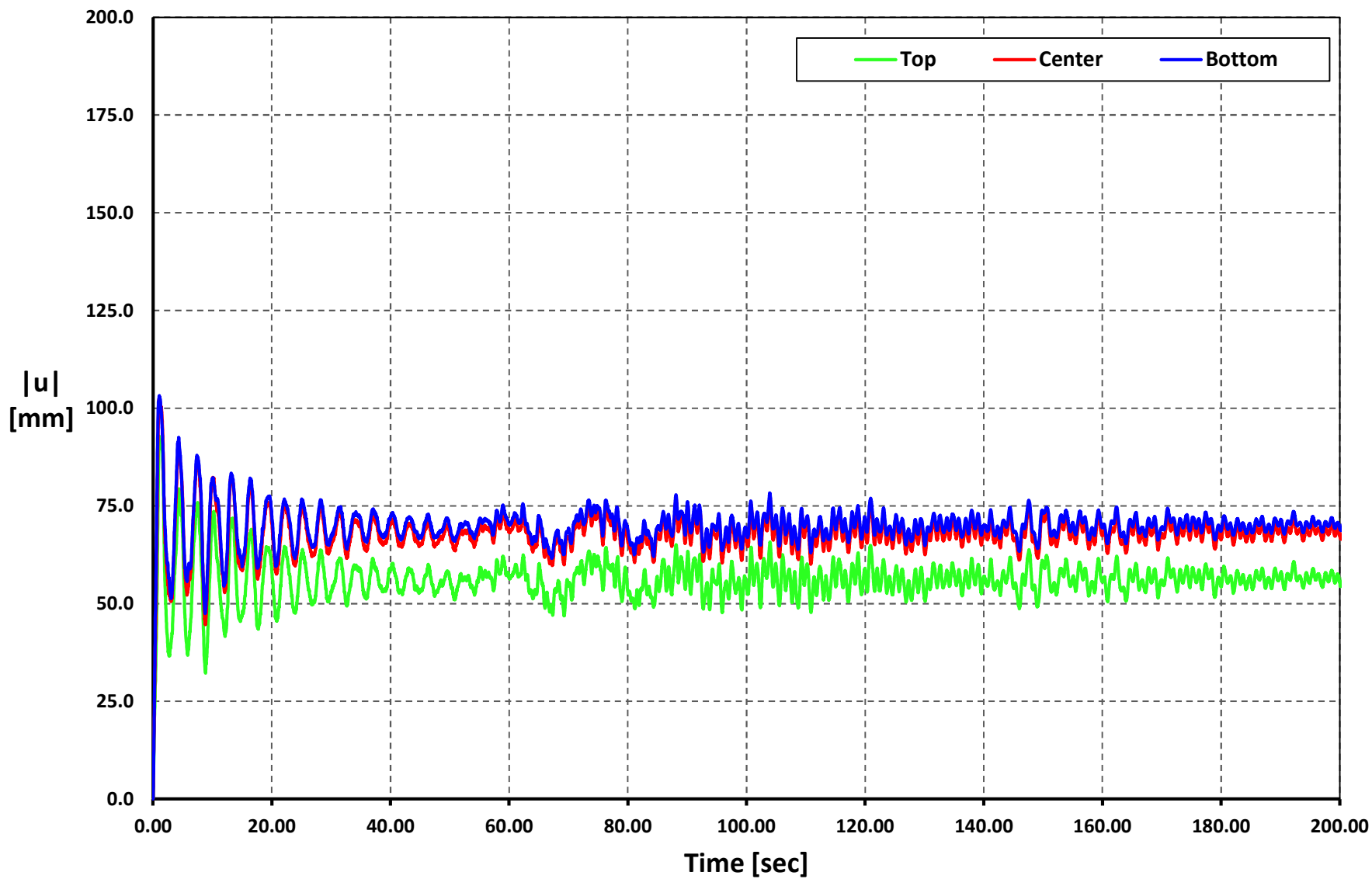
Time vs. |u|

Geometry 07 - Soil Type 3 - AMNT-N



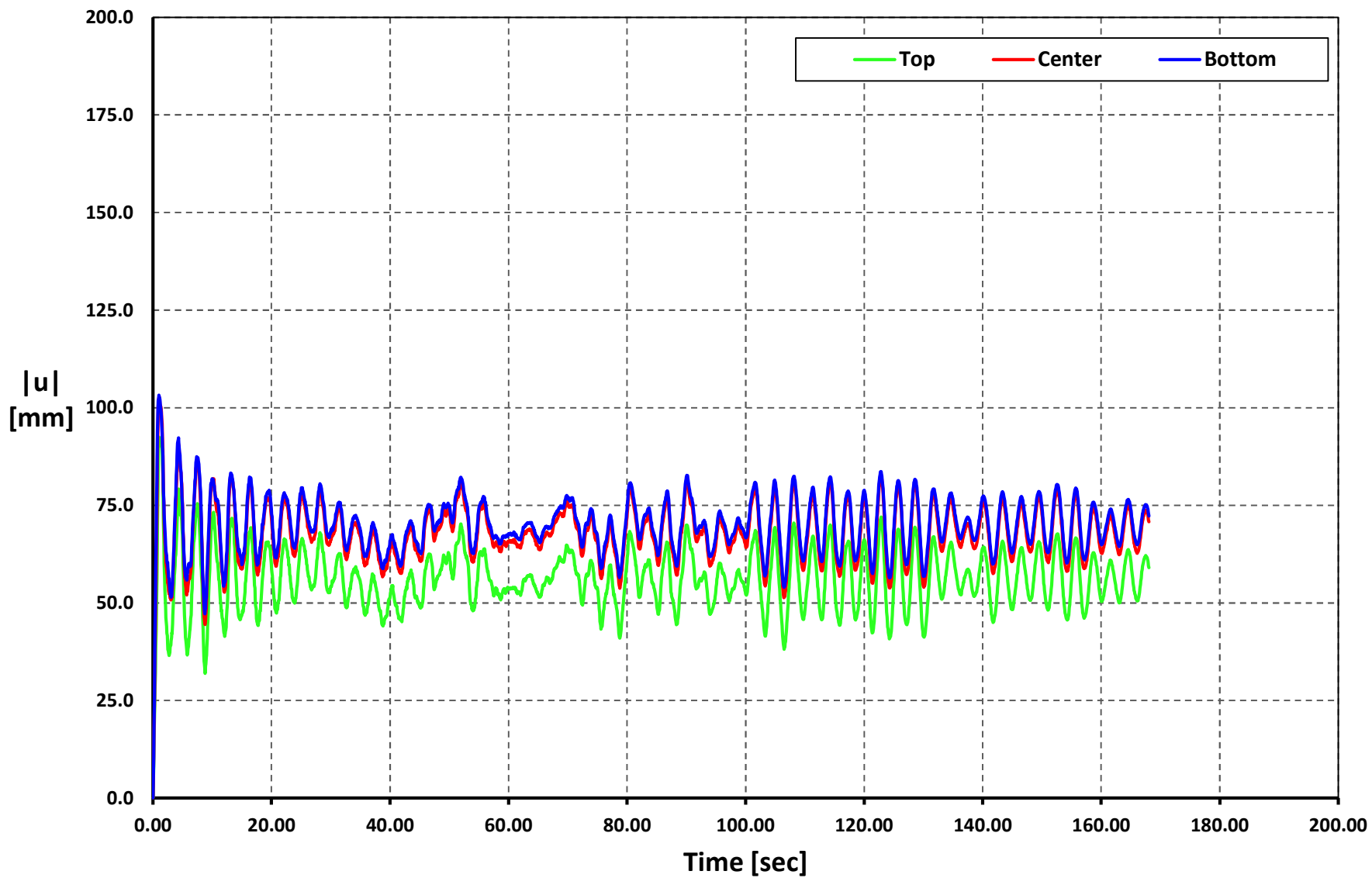
Time vs. $|u|$

Geometry 07 - Soil Type 3 - AGY2-N



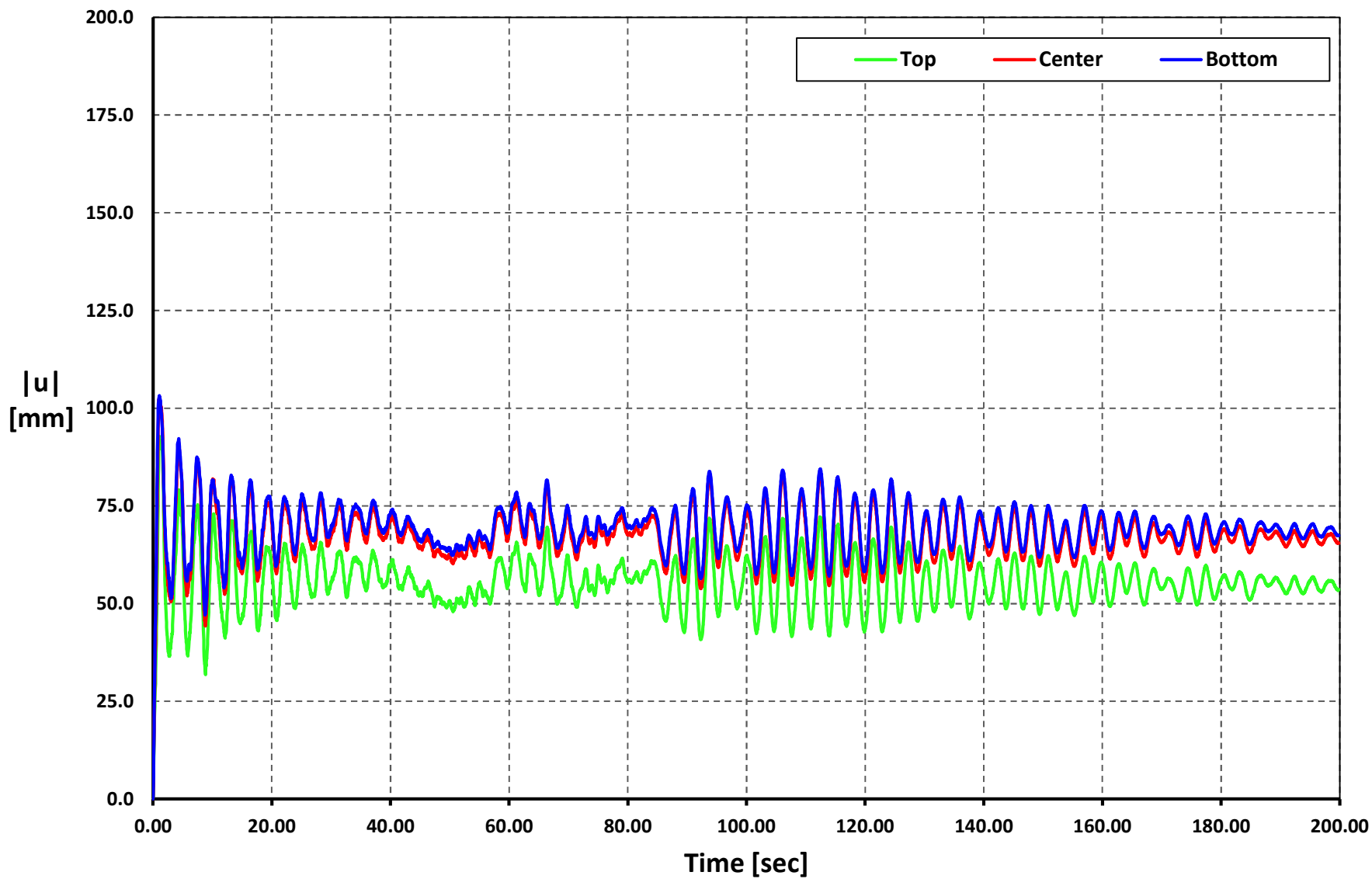
Time vs. $|u|$

Geometry 07 - Soil Type 3 - AMIL-E



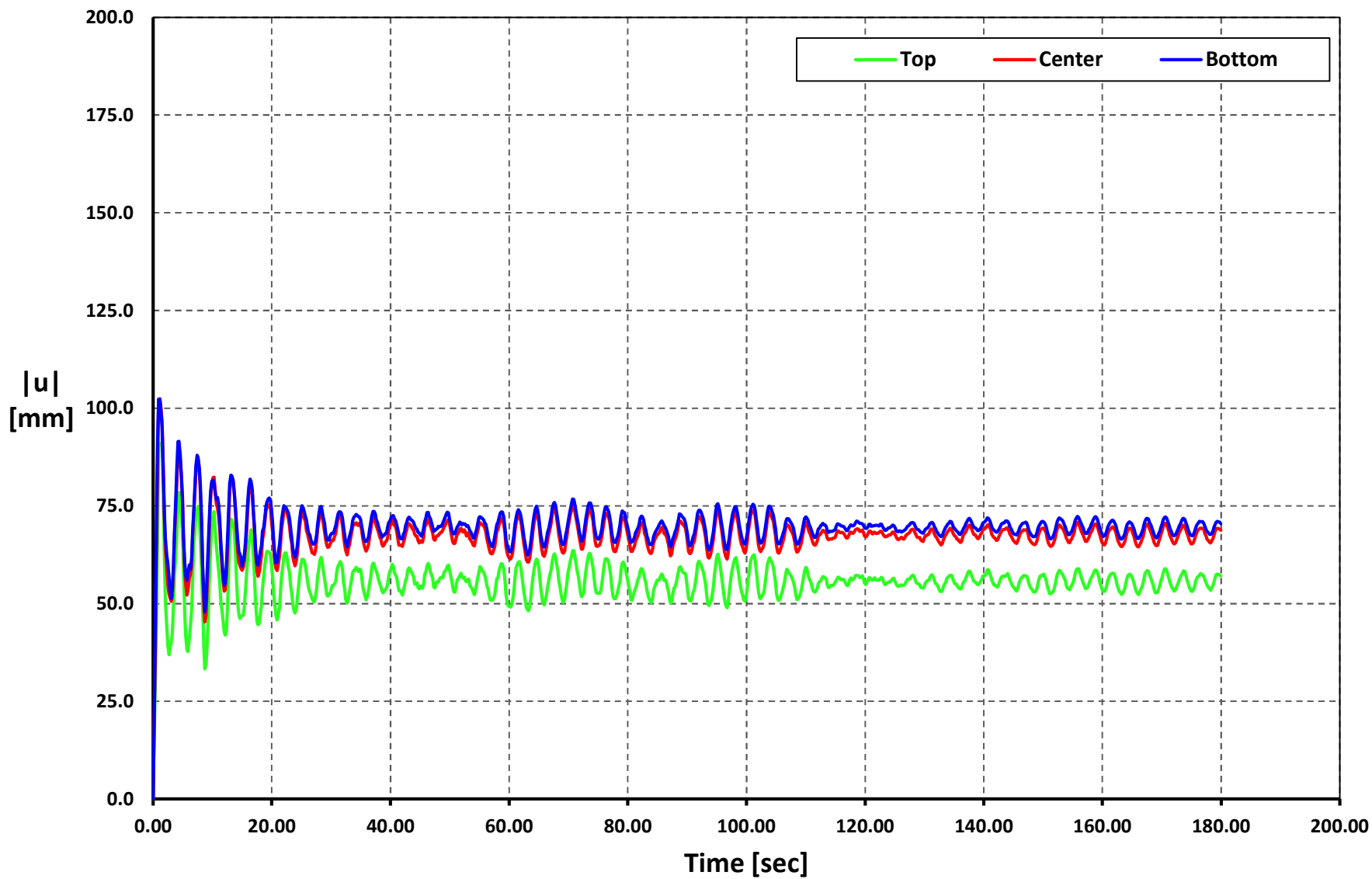
Time vs. $|u|$

Geometry 07 - Soil Type 3 - ACUE-E



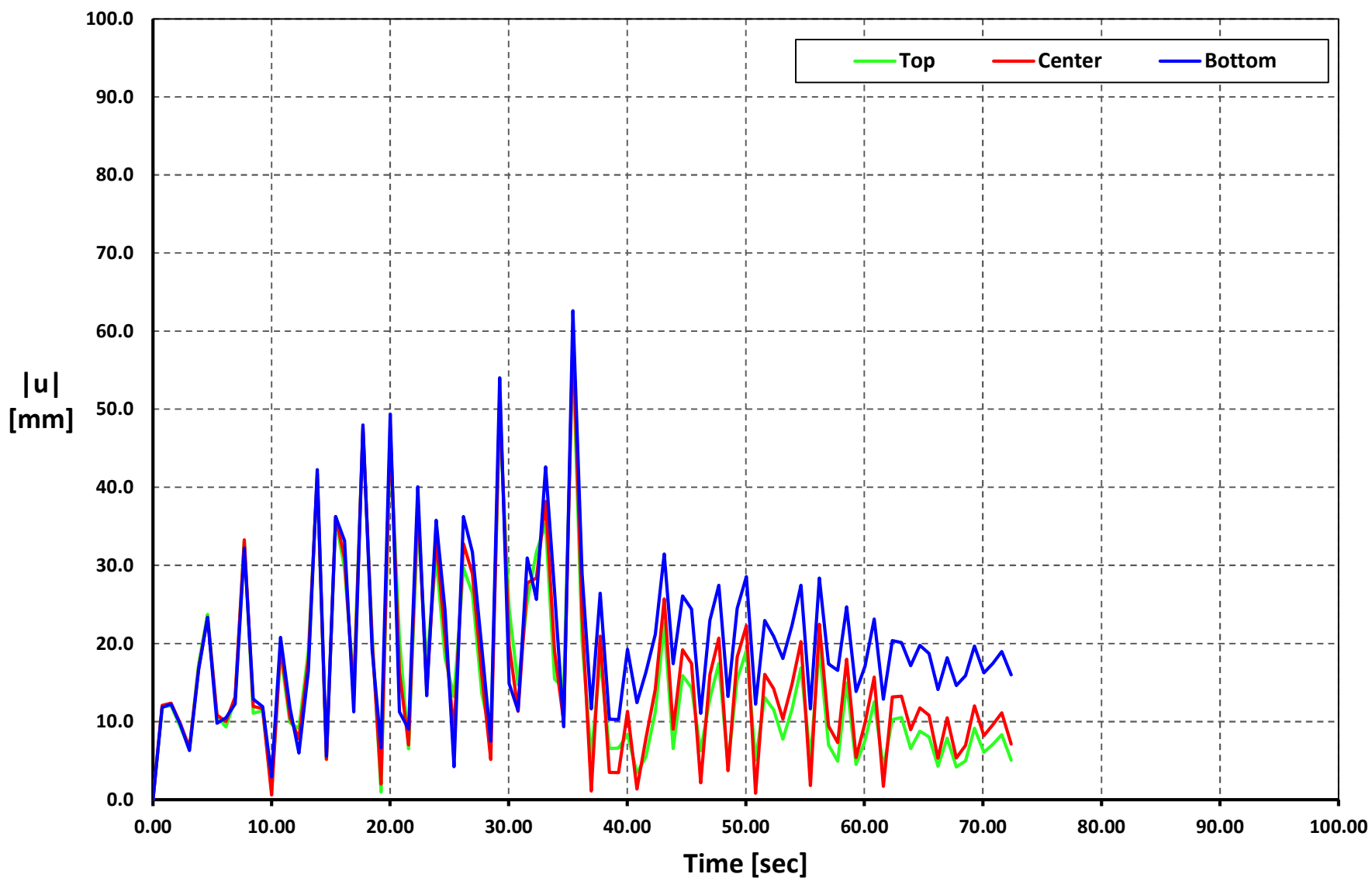
Time vs. |u|

Geometry 07 - Soil Type 3 - ALJ1-N



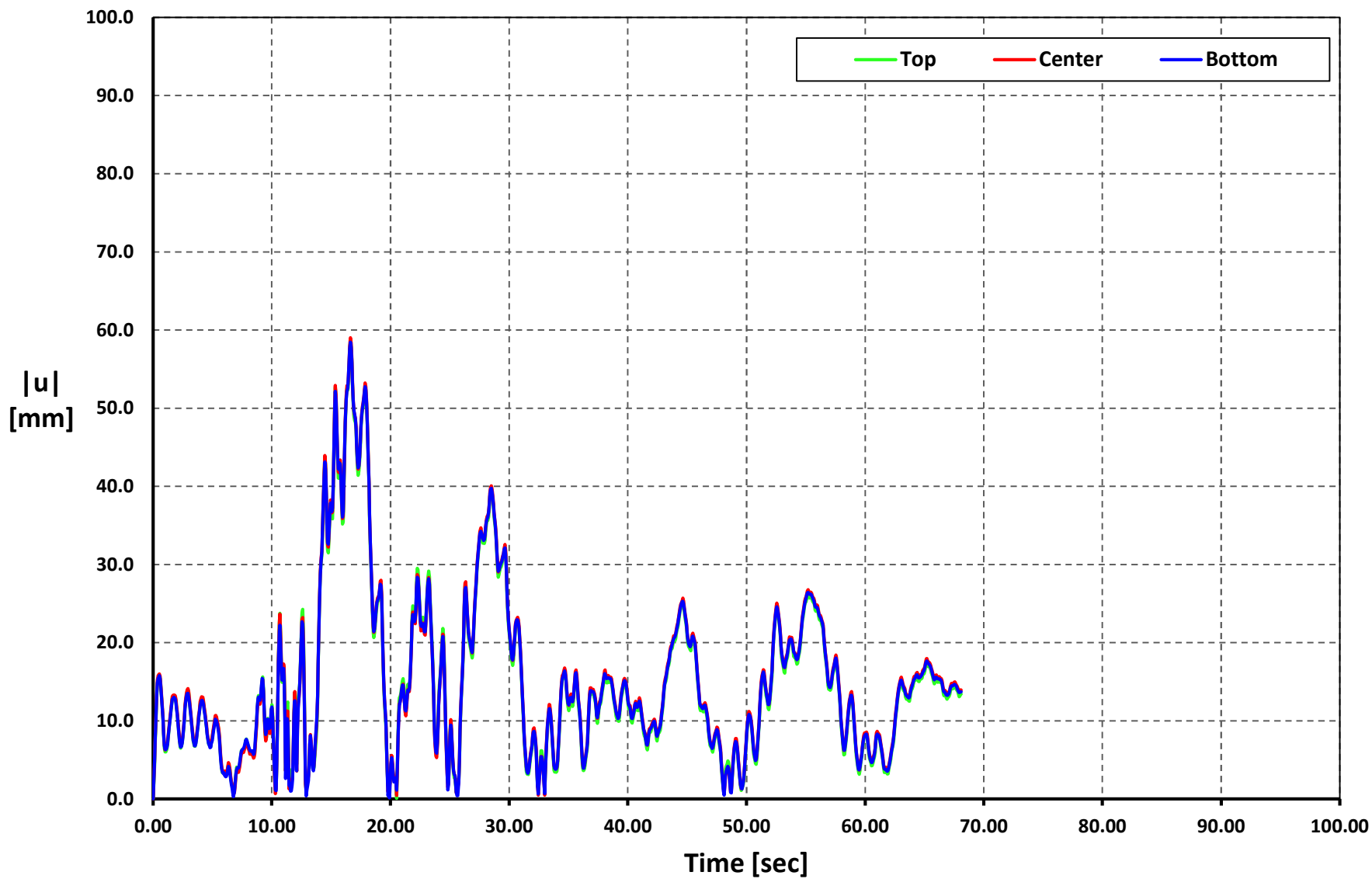
Time vs. |u|

Geometry 08 - Soil Type 1 - APED-E



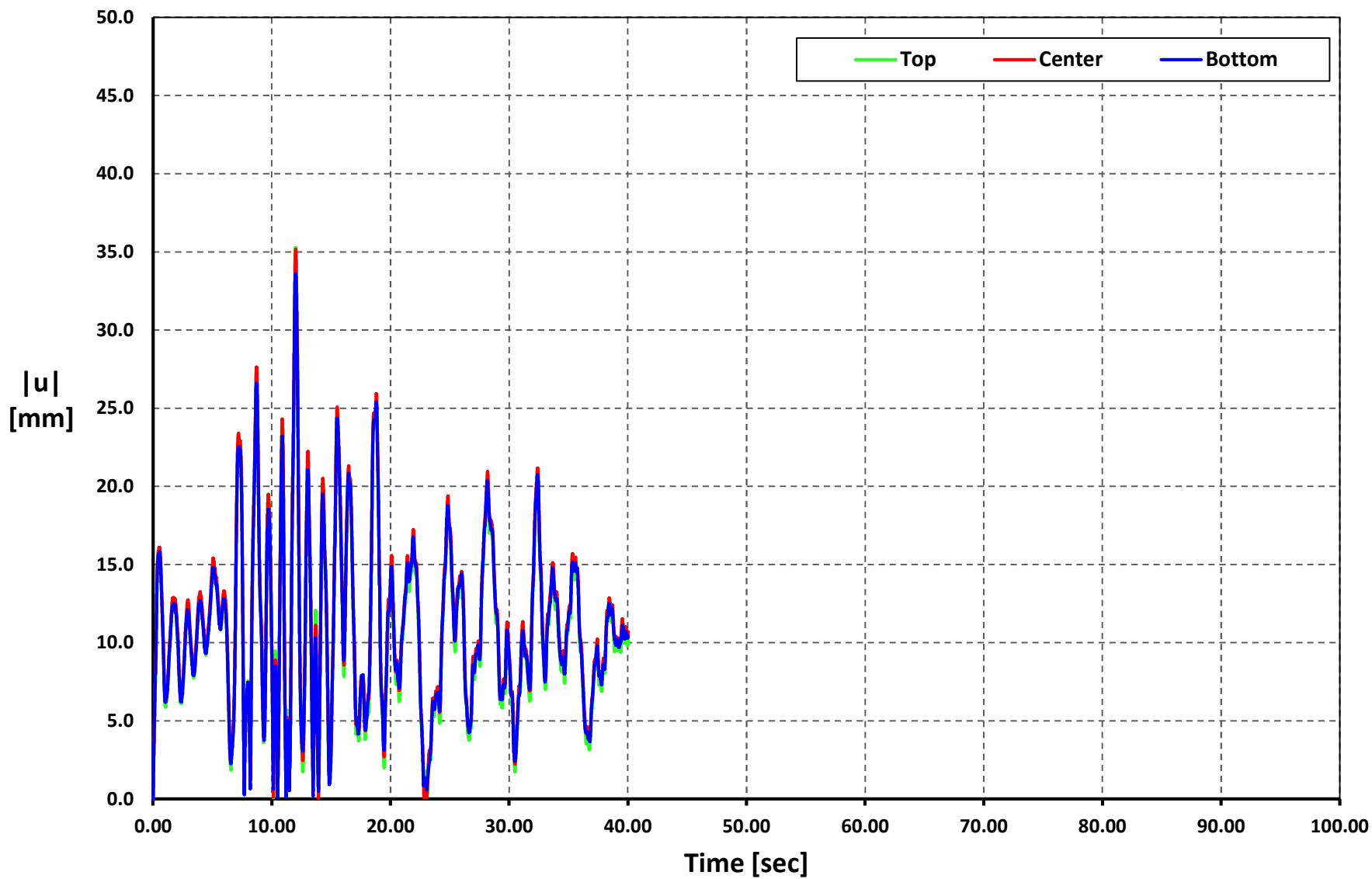
Time vs. |u|

Geometry 08 - Soil Type 1 - APO1-N



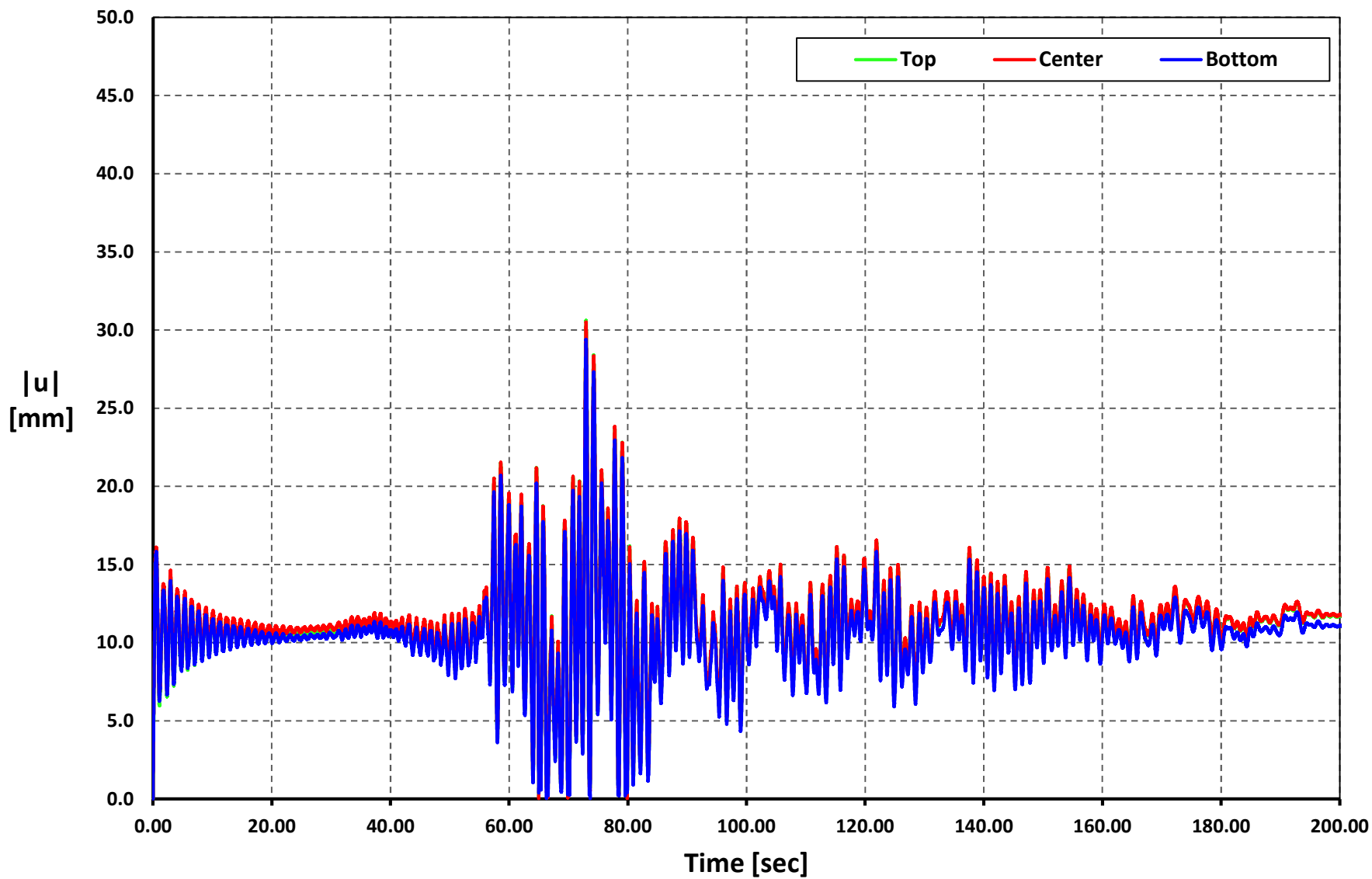
Time vs. |u|

Geometry 08 - Soil Type 1 - AMNT-N



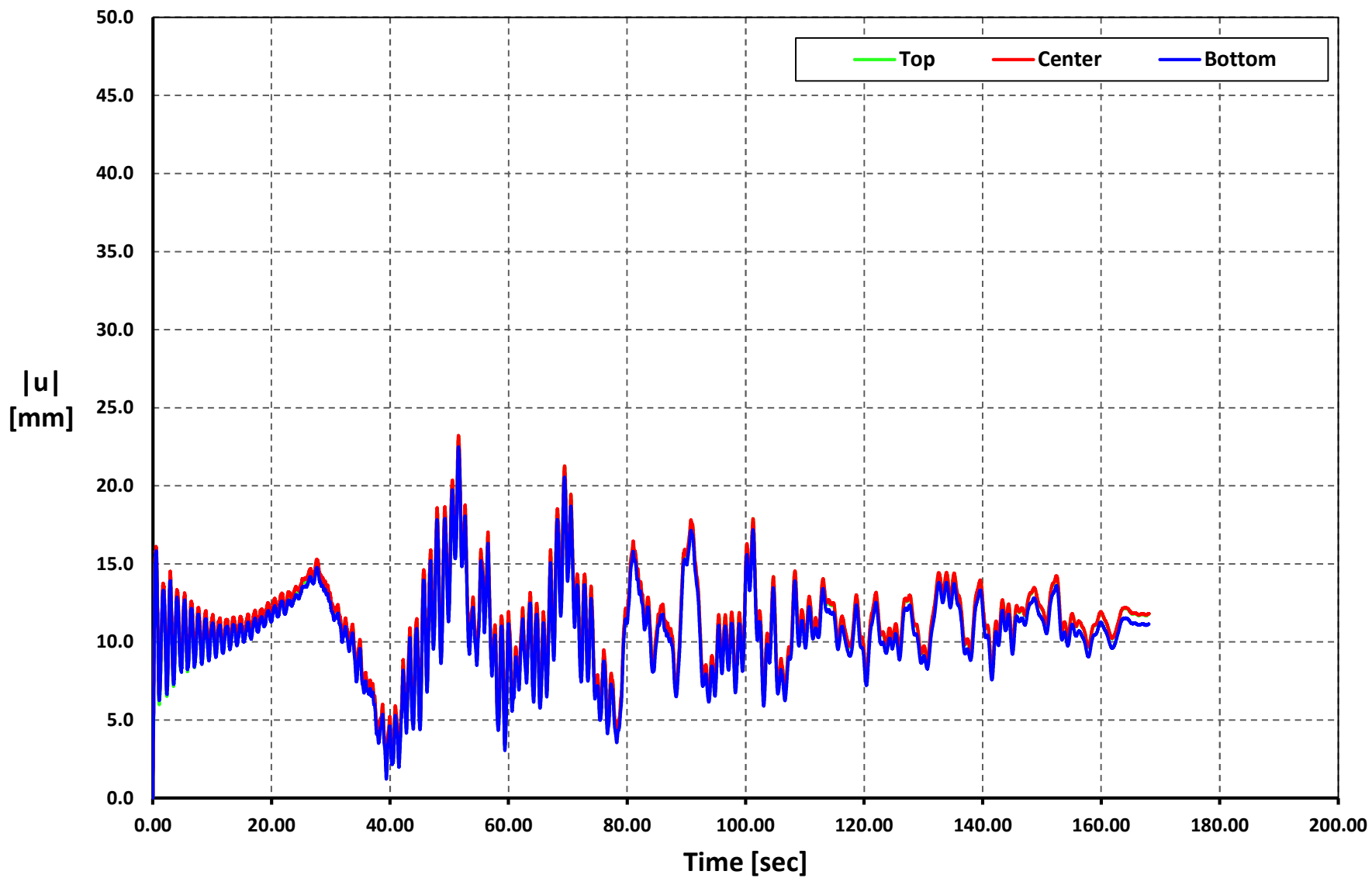
Time vs. $|u|$

Geometry 08 - Soil Type 1 - AGY2-N



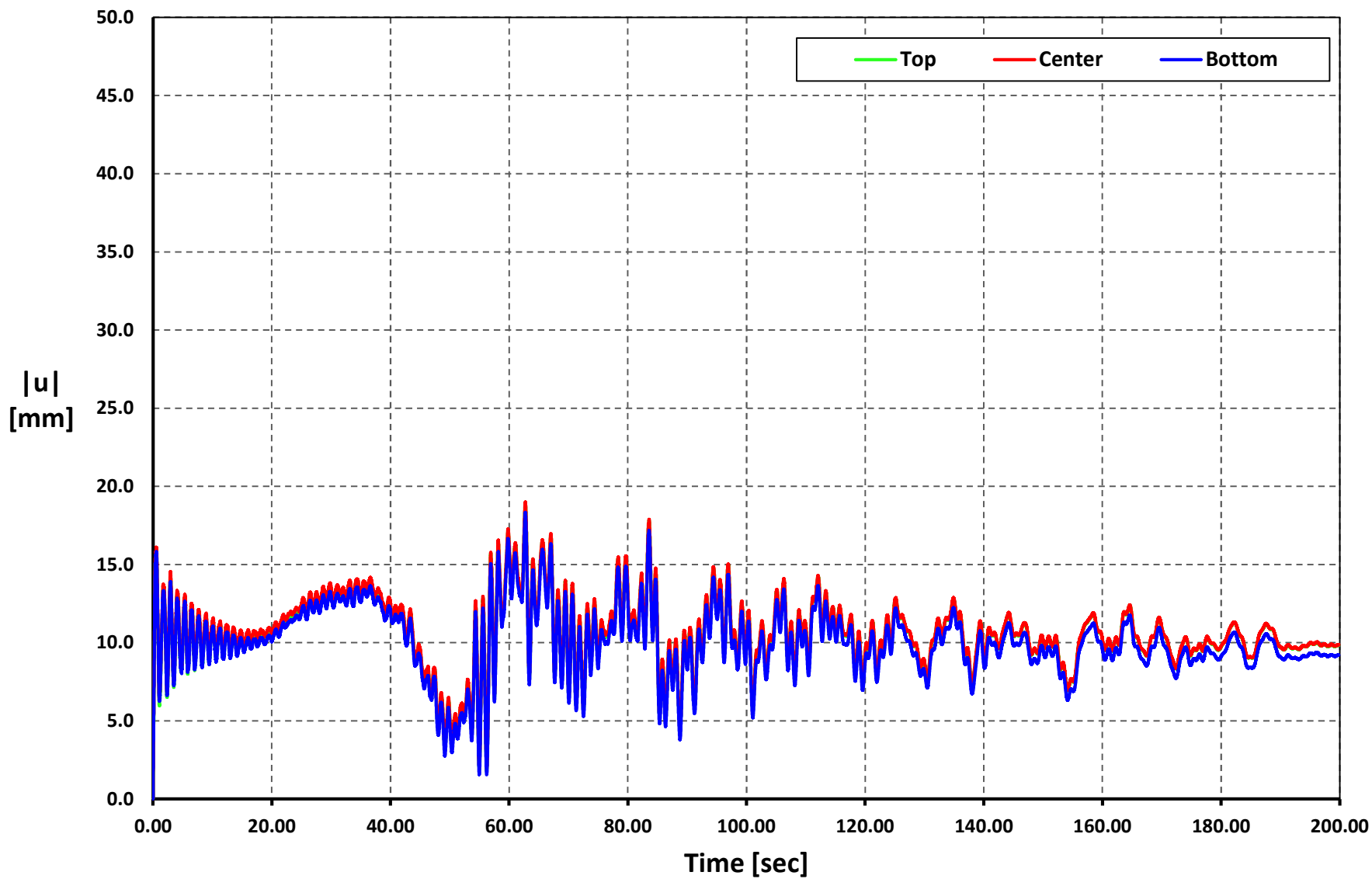
Time vs. $|u|$

Geometry 08 - Soil Type 1 - AMIL-E



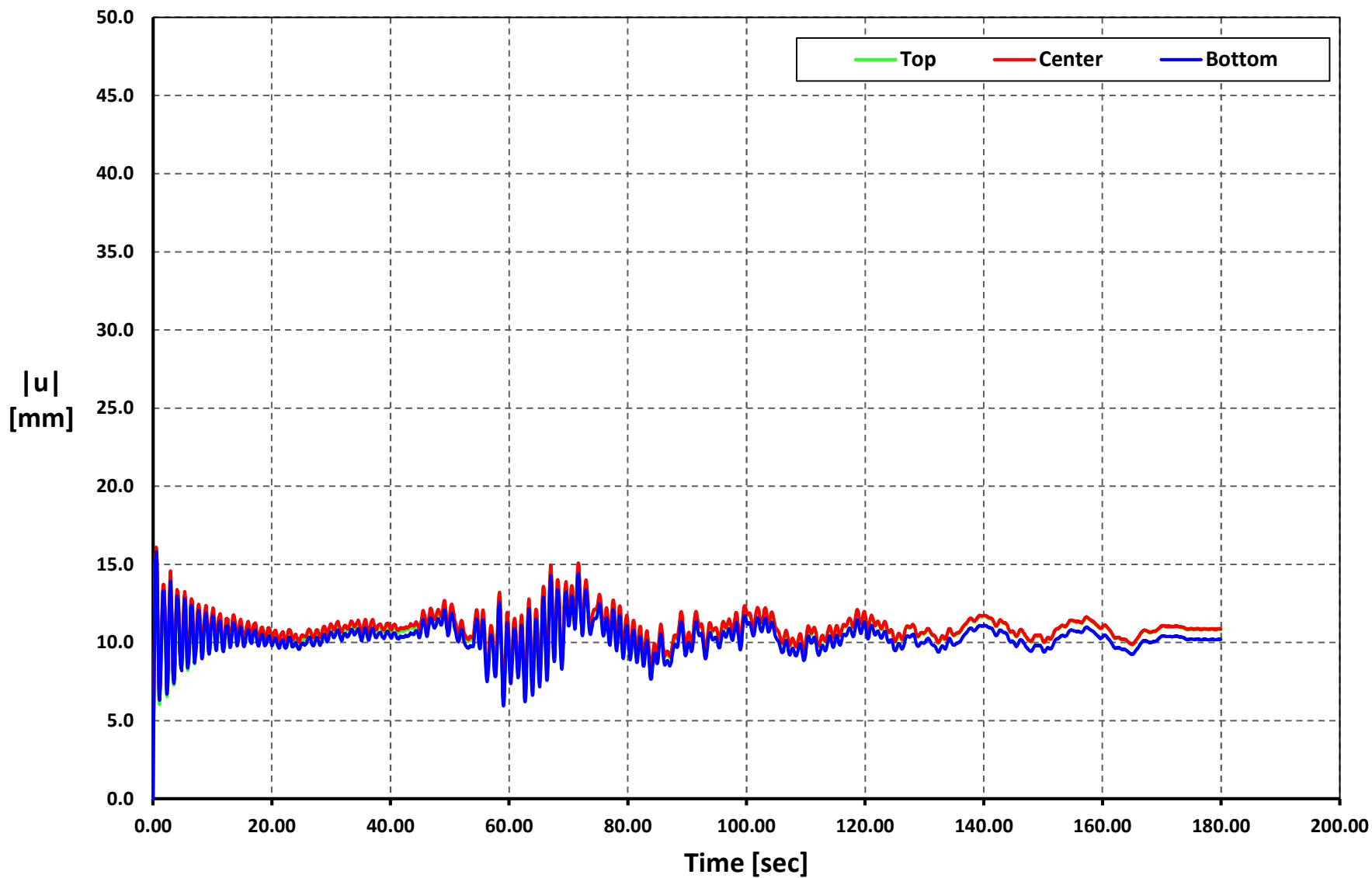
Time vs. |u|

Geometry 08 - Soil Type 1 - ACUE-E



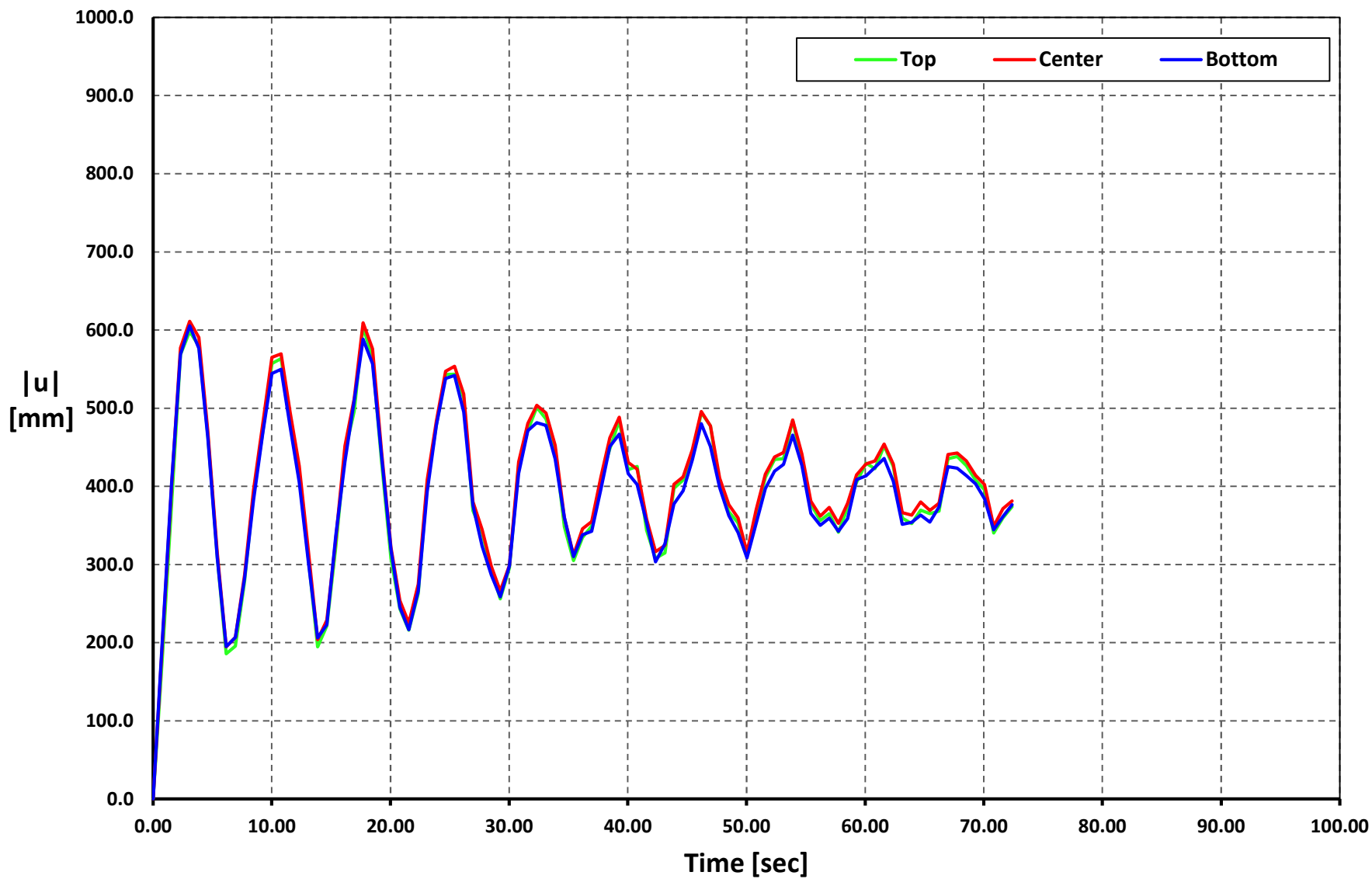
Time vs. $|u|$

Geometry 08 - Soil Type 1 - ALJ1-N



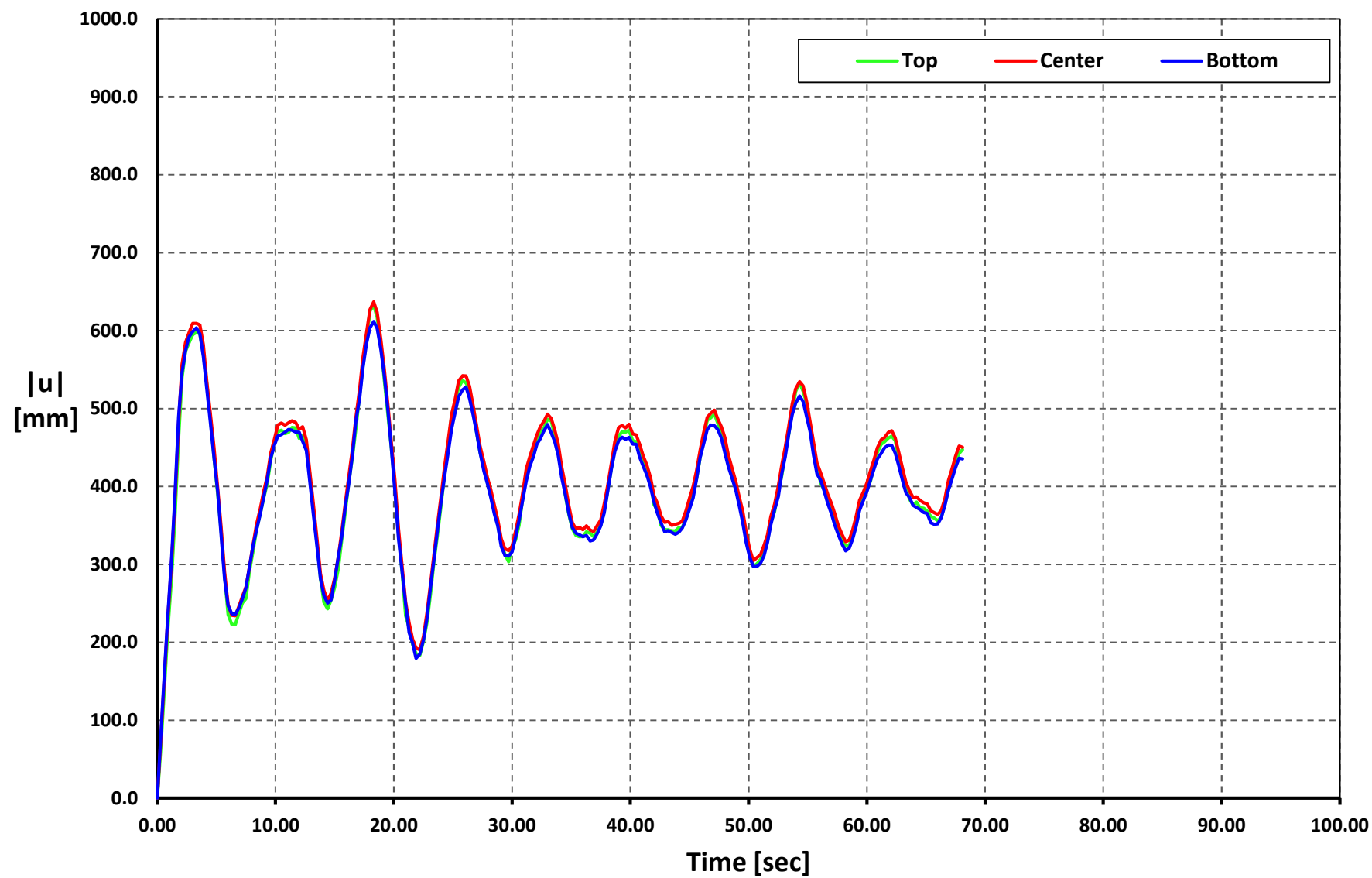
Time vs. |u|

Geometry 08 - Soil Type 2 - APED-E



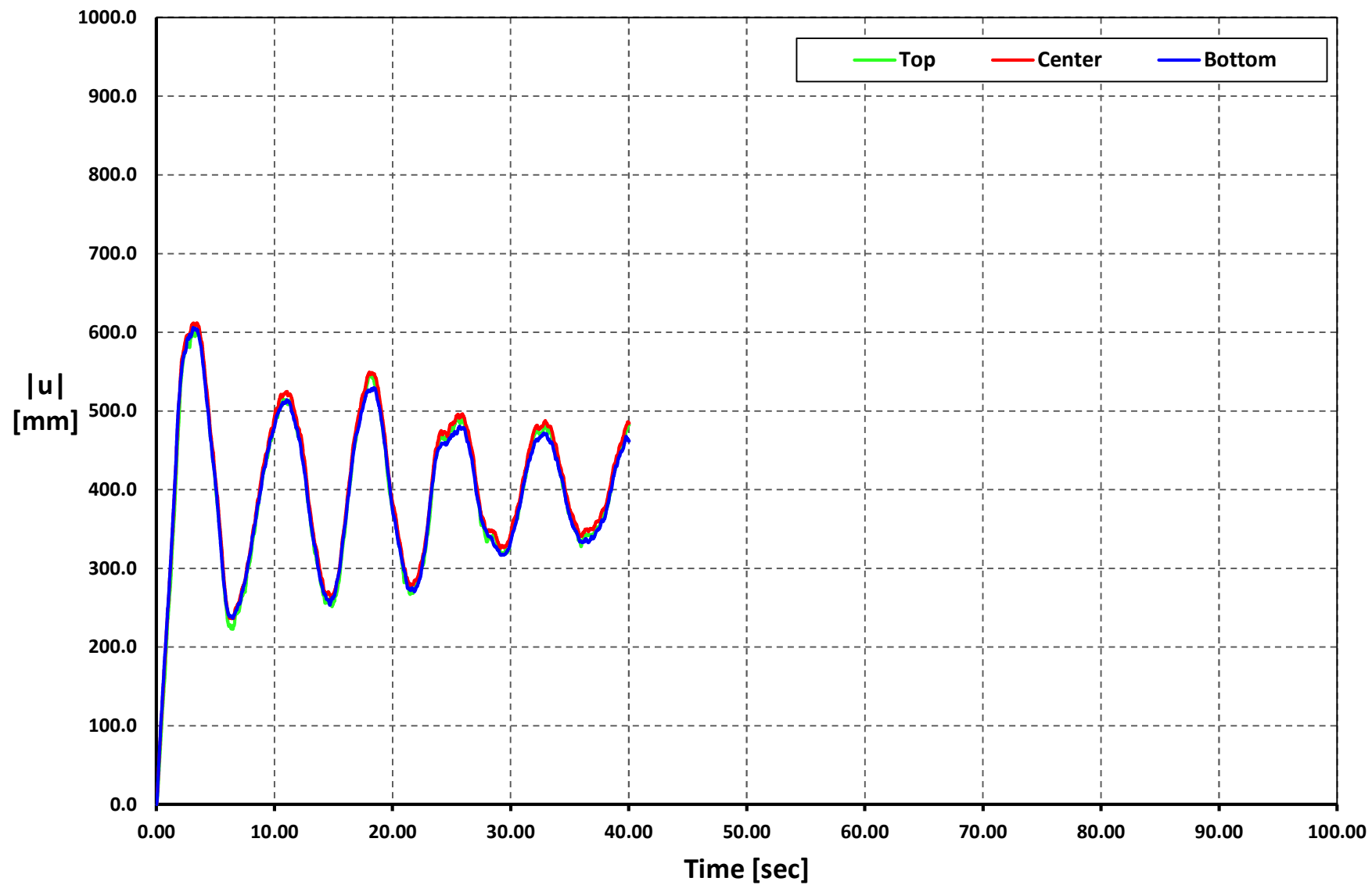
Time vs. |u|

Geometry 08 - Soil Type 2 - APO1-N



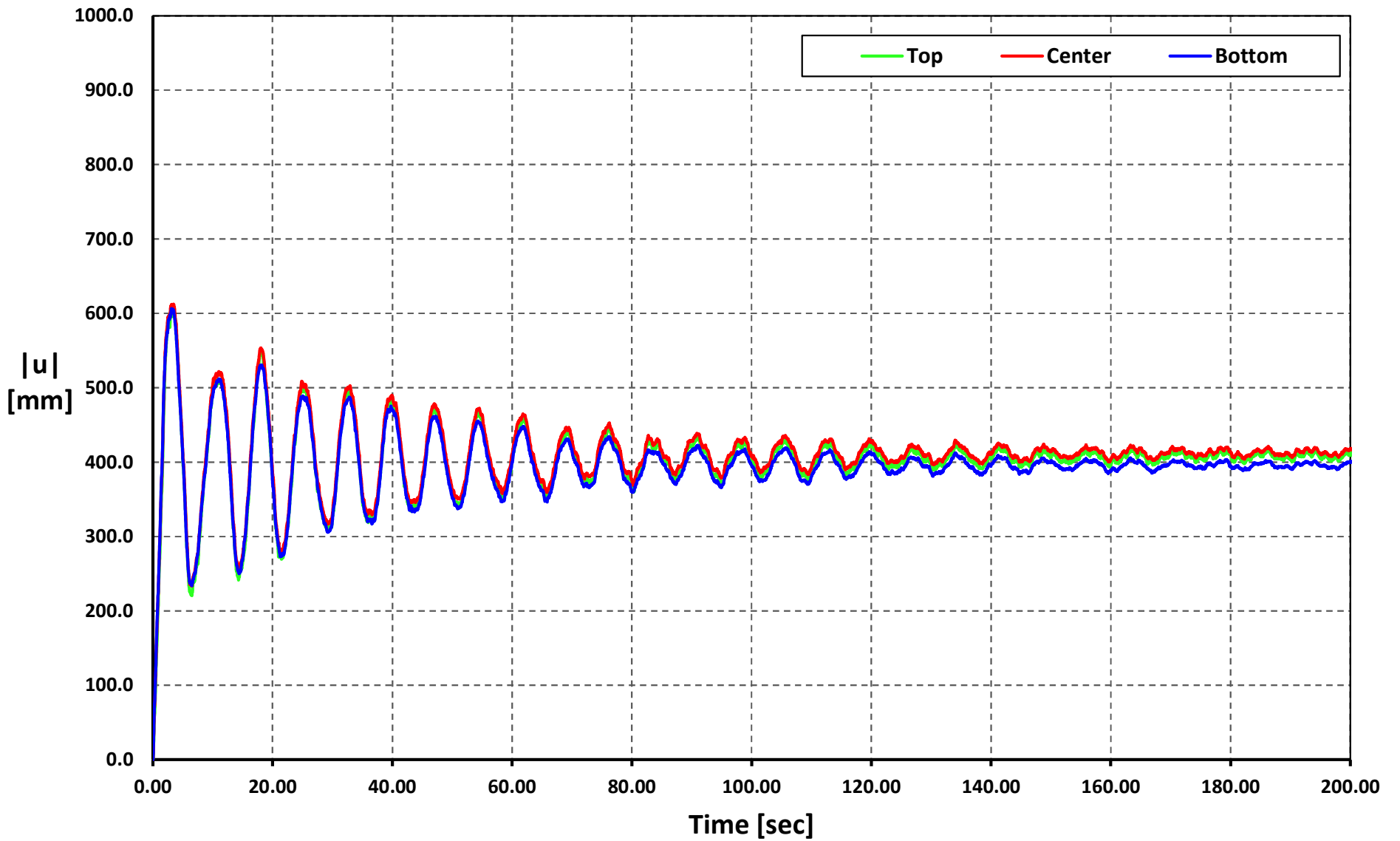
Time vs. |u|

Geometry 08 - Soil Type 2 - AMNT-N



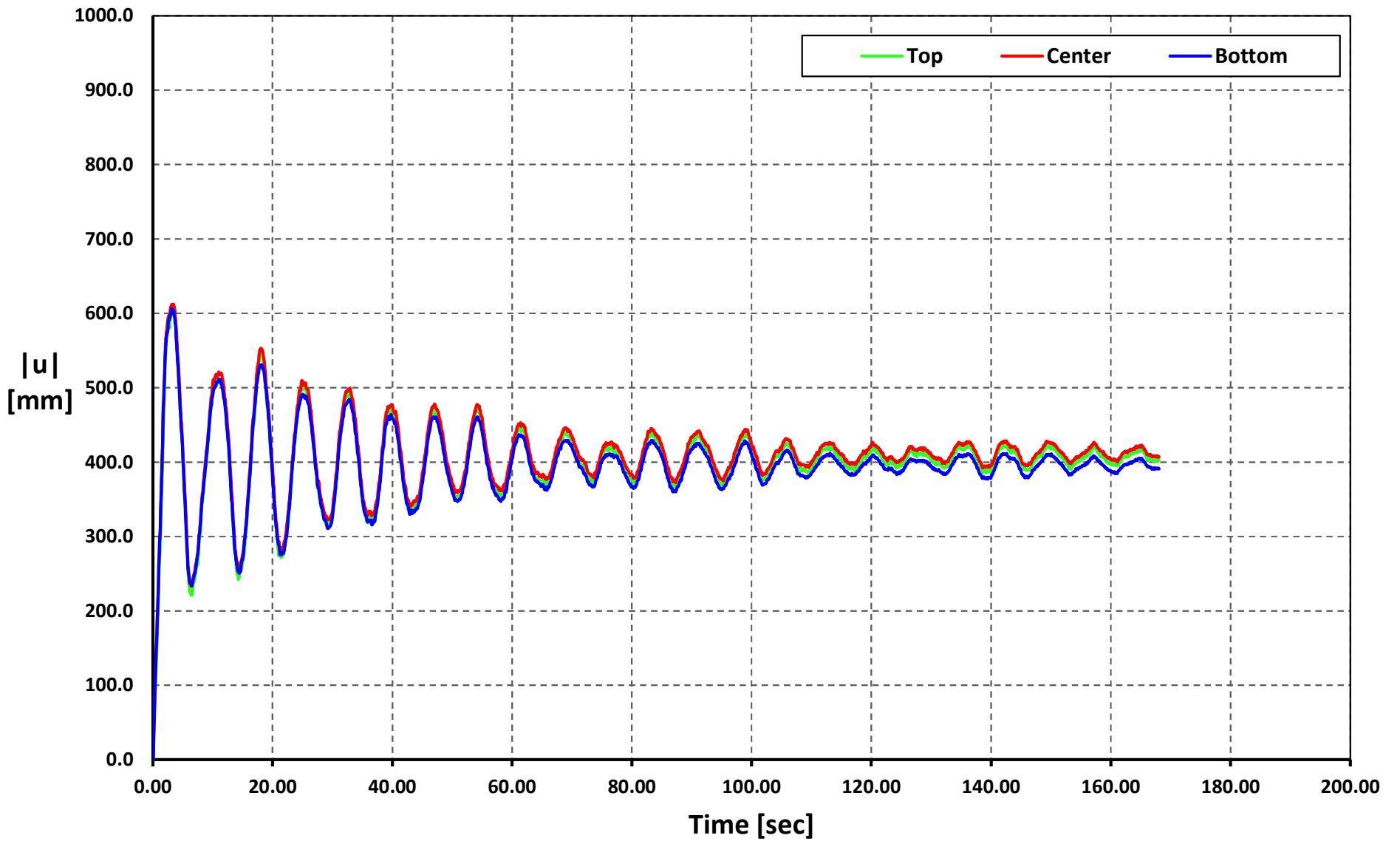
Time vs. |u|

Geometry 08 - Soil Type 2 - AGY2-N



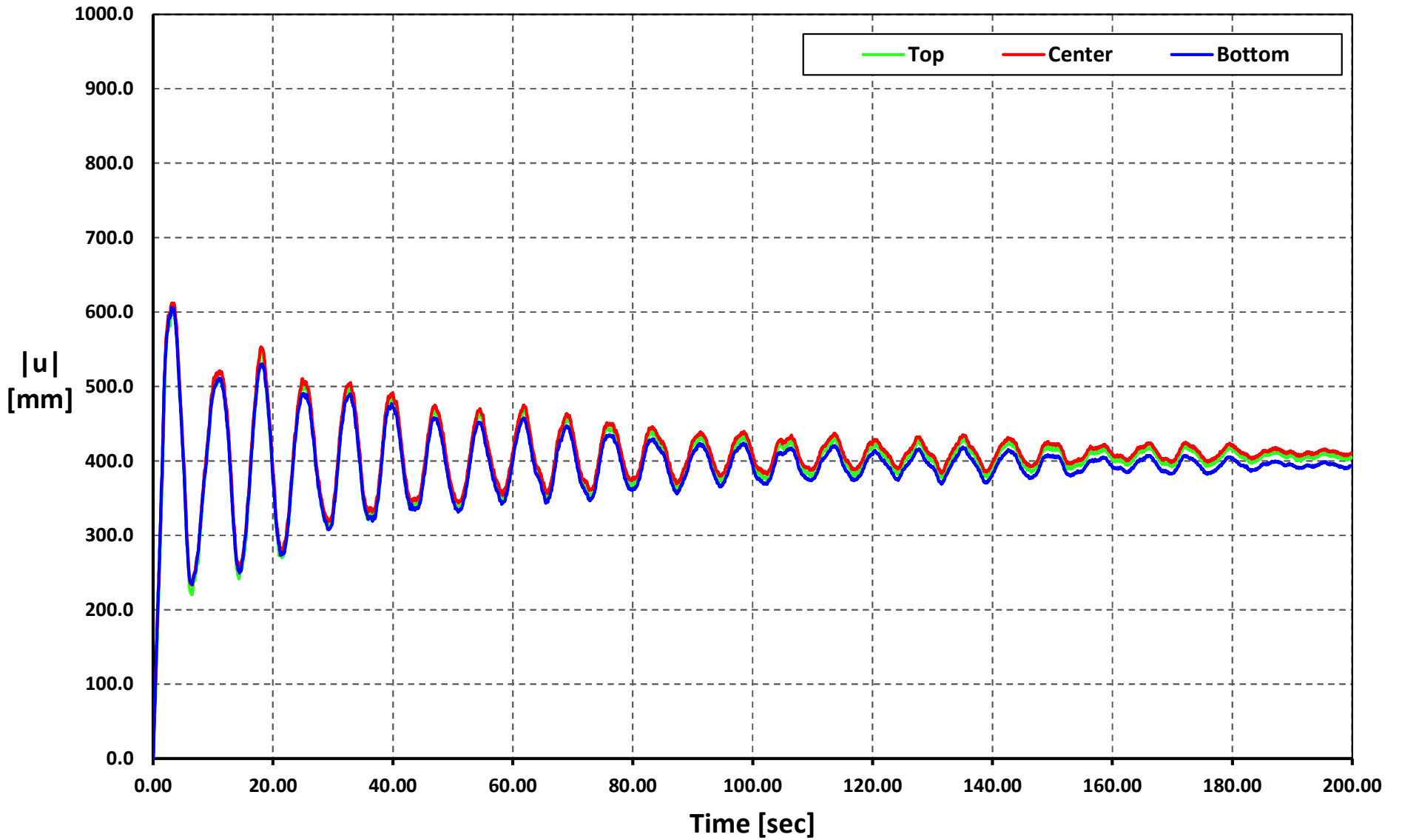
Time vs. |u|

Geometry 08 - Soil Type 2 - AMIL-E



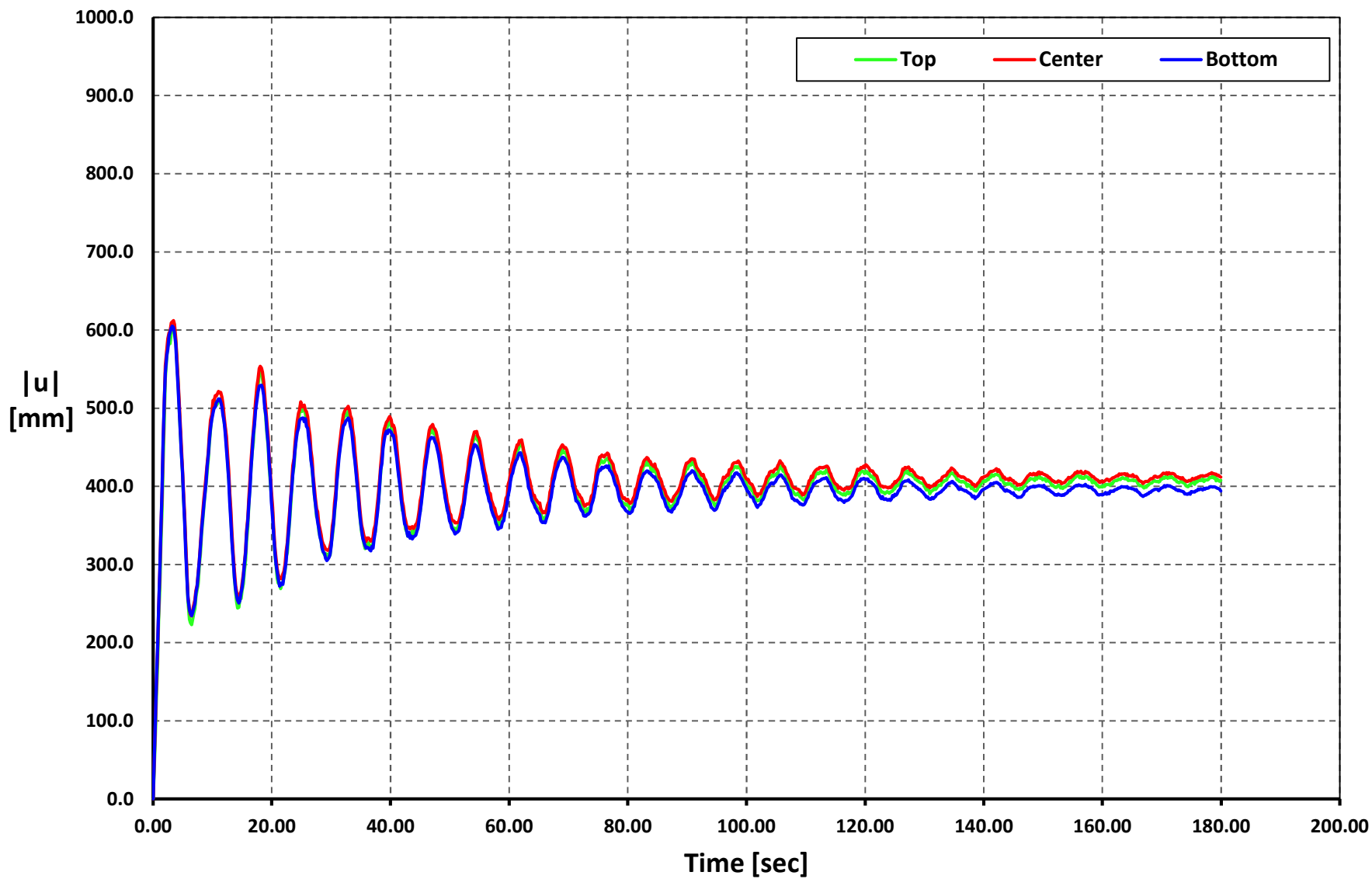
Time vs. |u|

Geometry 08 - Soil Type 2 - ACUE-E



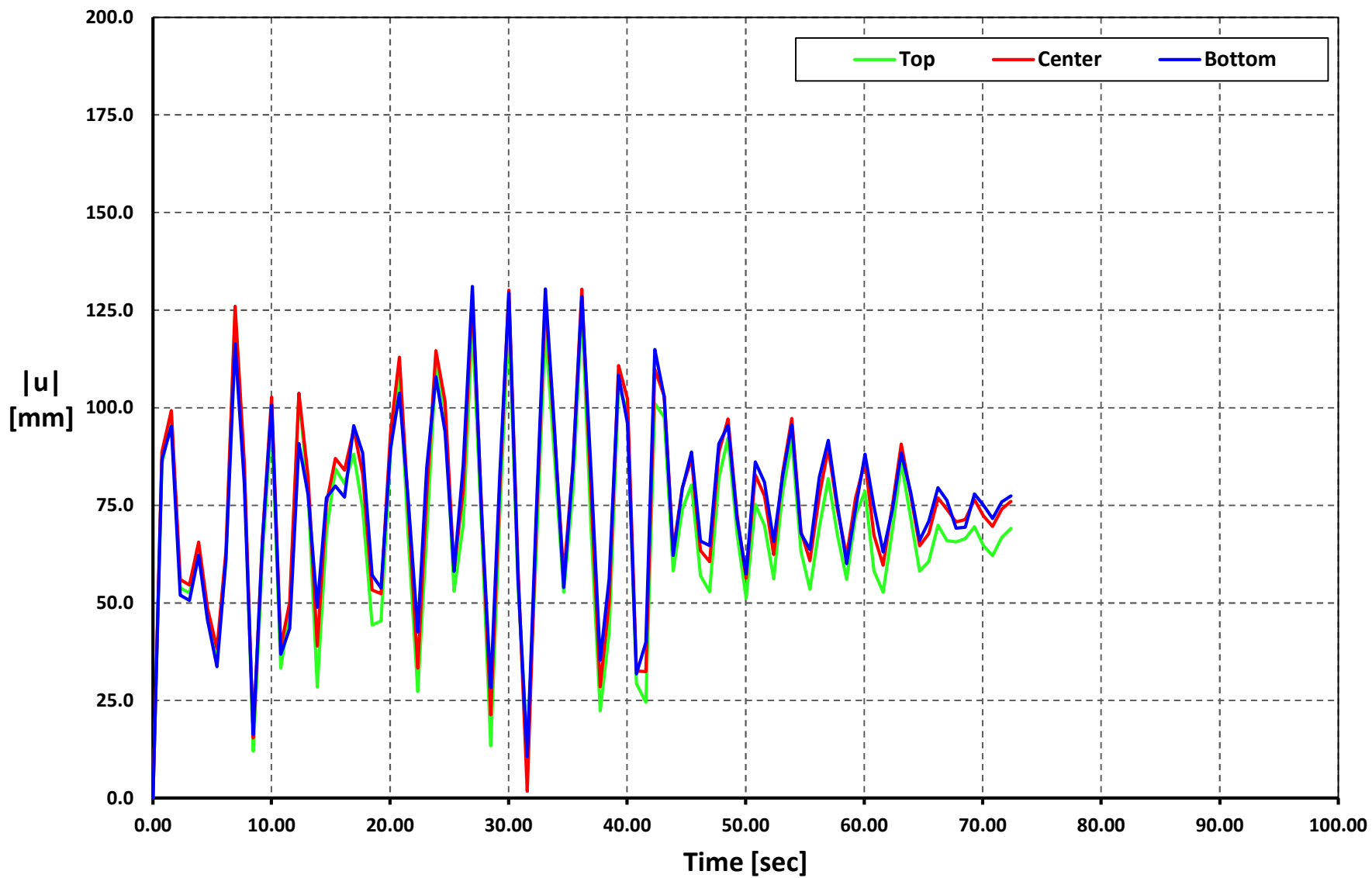
Time vs. $|u|$

Geometry 08 - Soil Type 2 - ALJ1-N



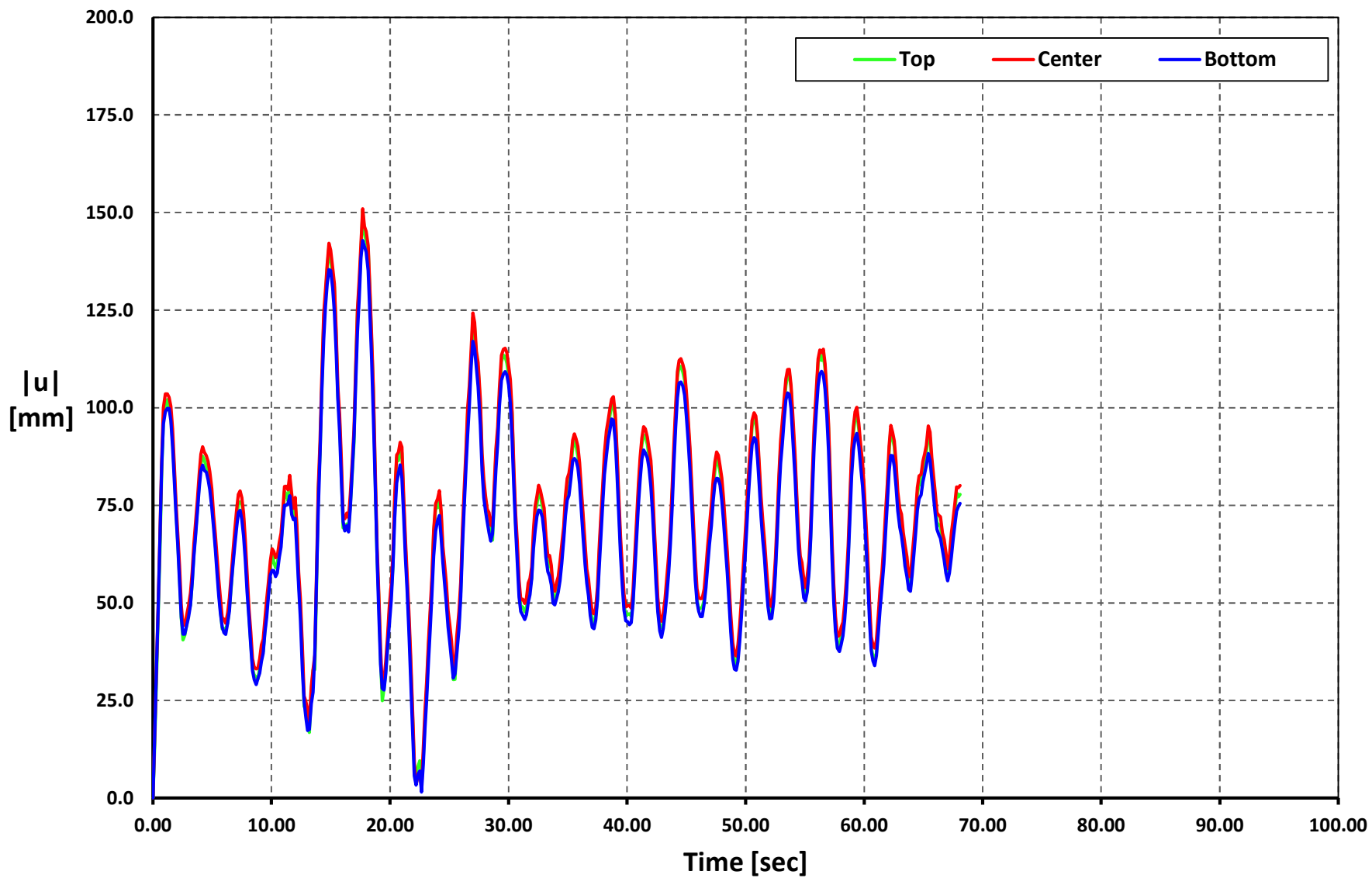
Time vs. |u|

Geometry 08 - Soil Type 3 - APED-E



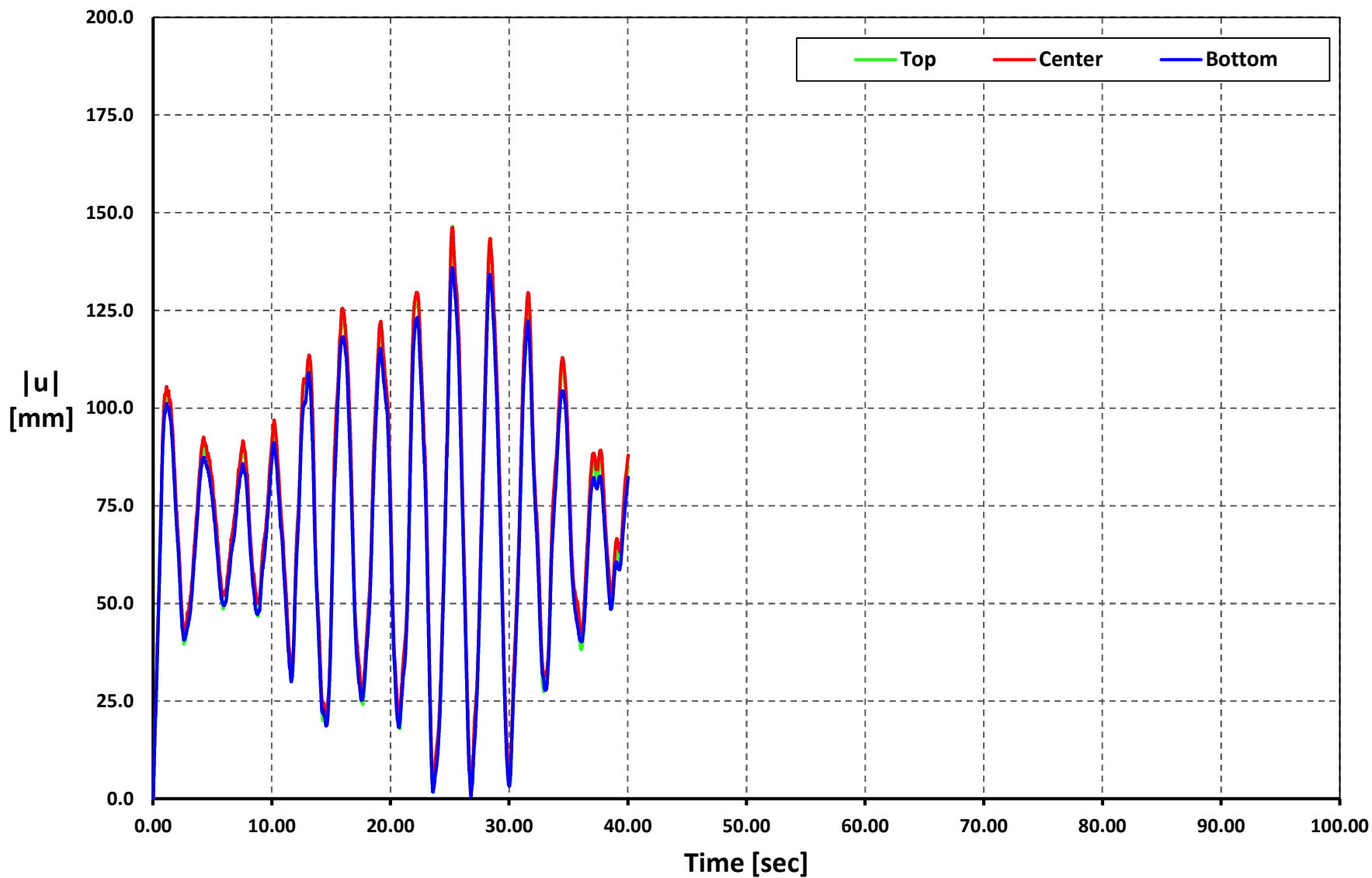
Time vs. |u|

Geometry 08 - Soil Type 3 - APO1-N



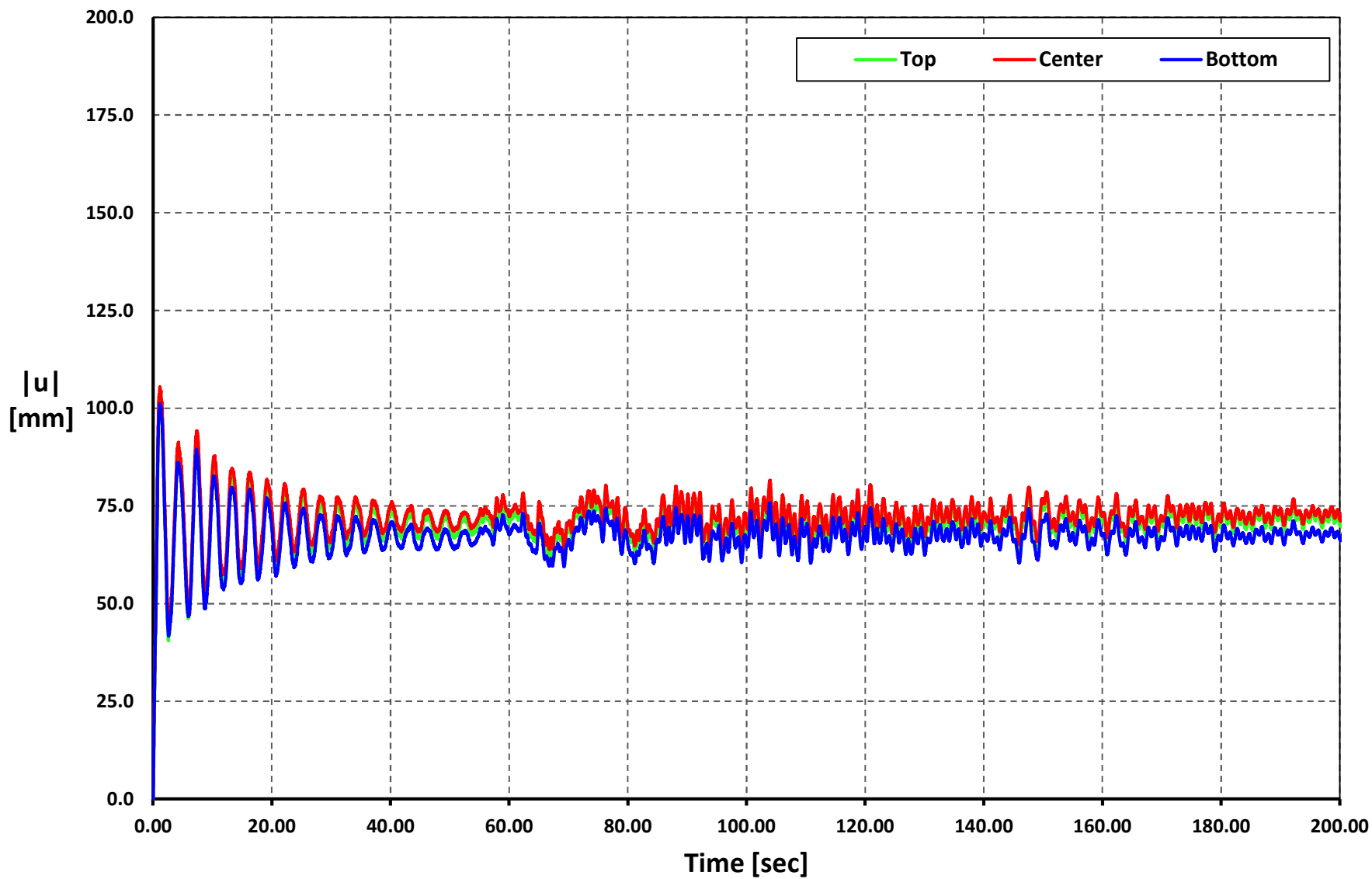
Time vs. |u|

Geometry 08 - Soil Type 3 - AMNT-N



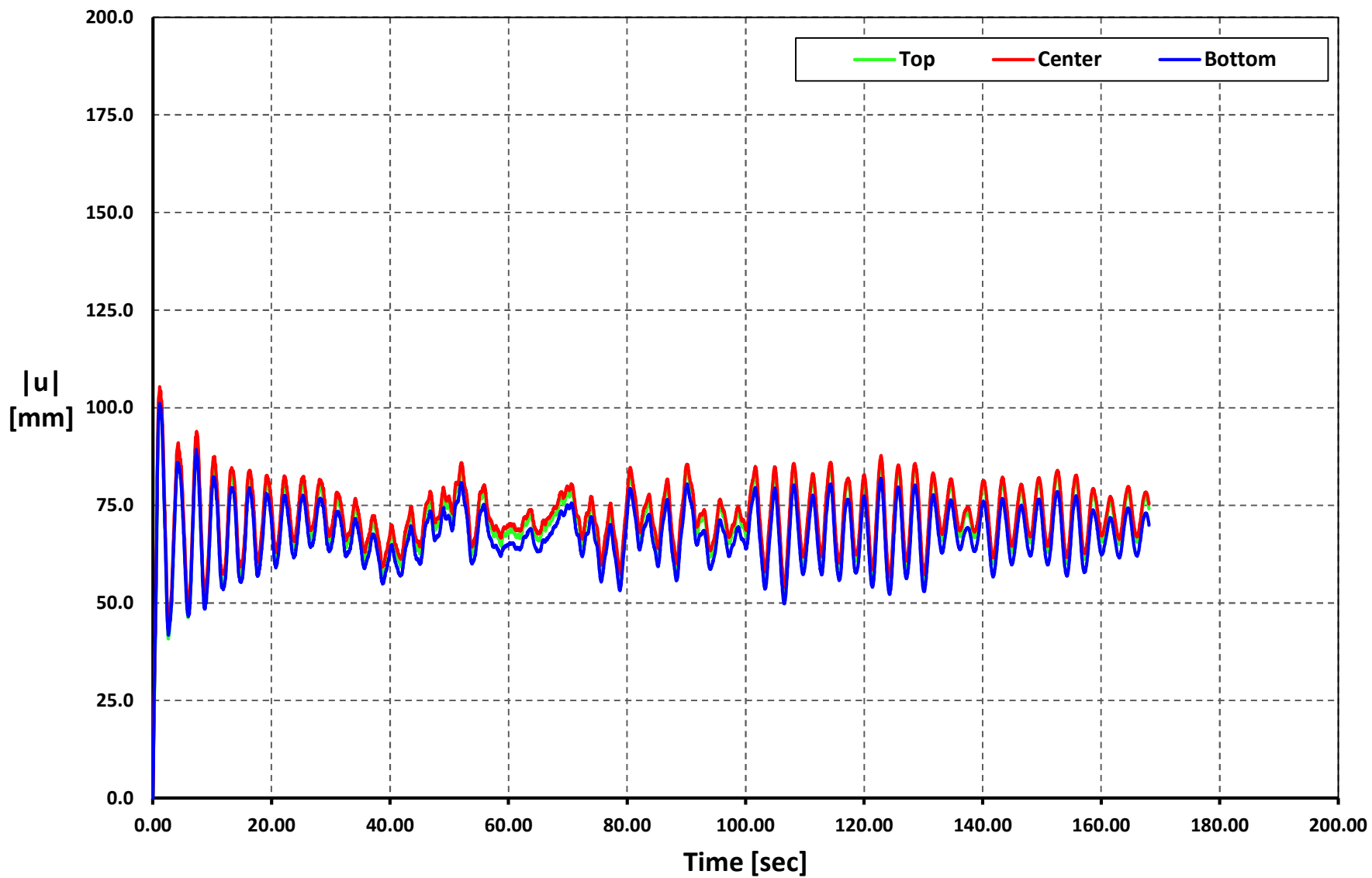
Time vs. $|u|$

Geometry 08 - Soil Type 3 - AGY2-N



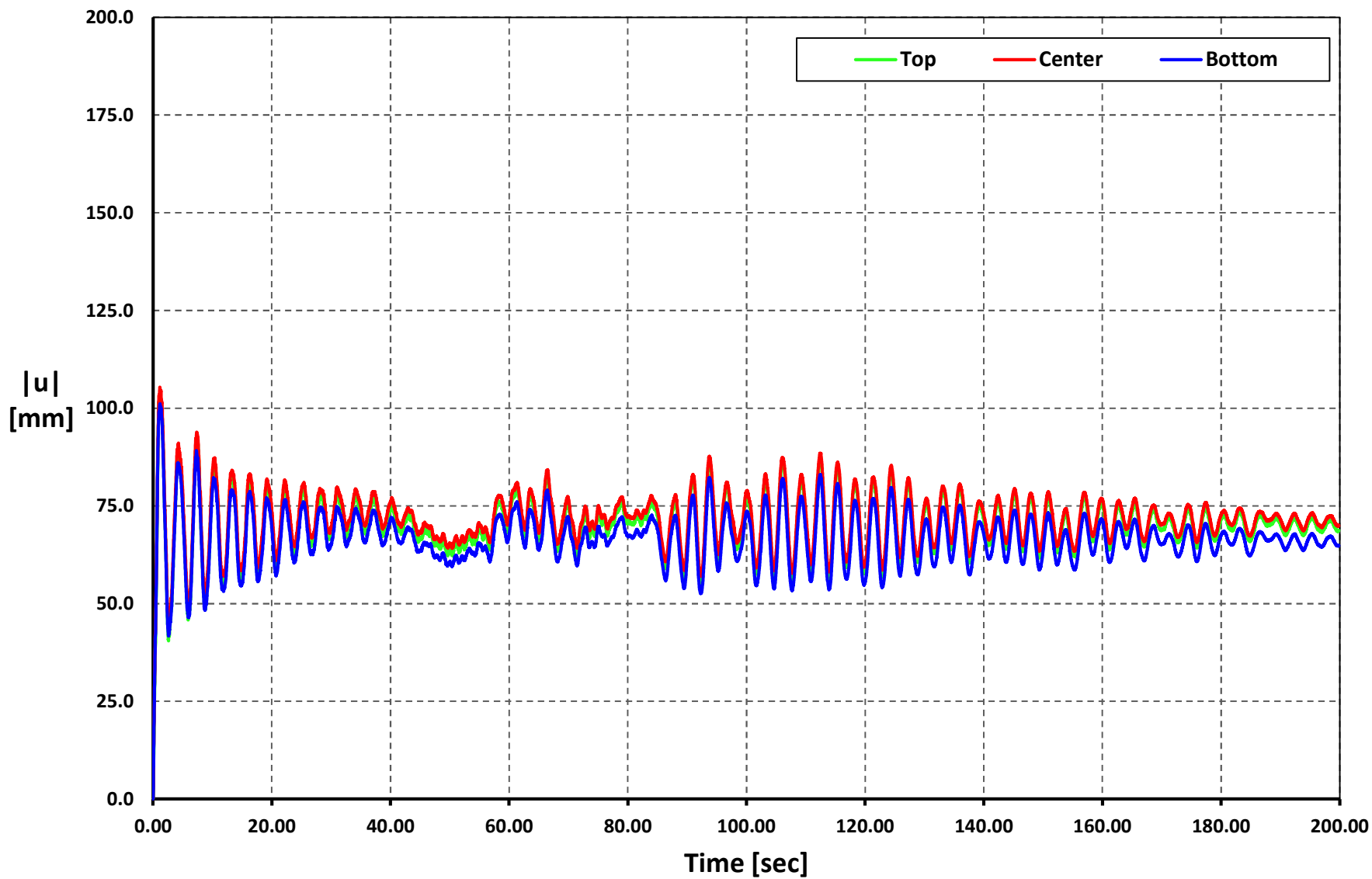
Time vs. |u|

Geometry 08 - Soil Type 3 - AMIL-E



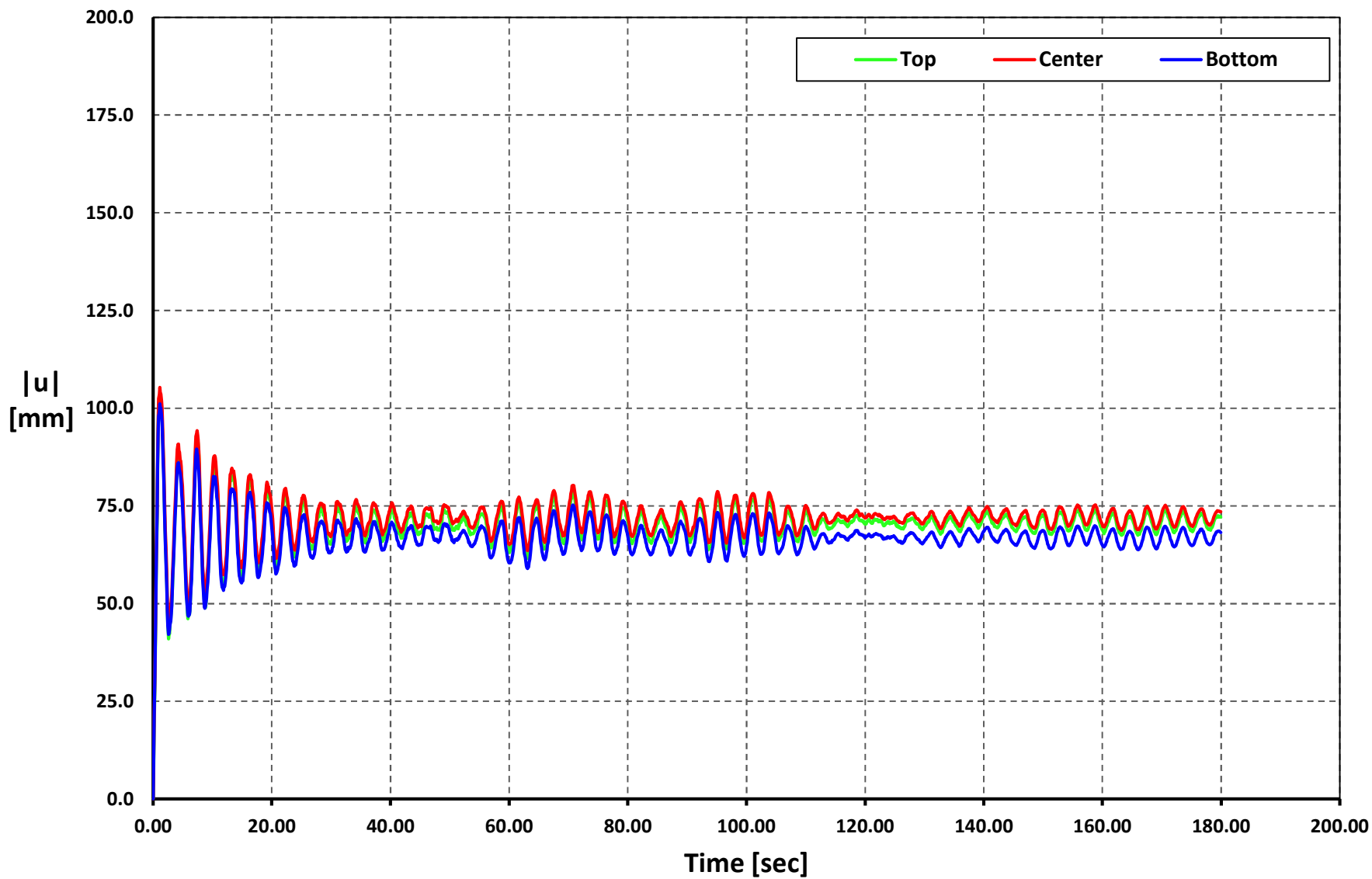
Time vs. |u|

Geometry 08 - Soil Type 3 - ACUE-E



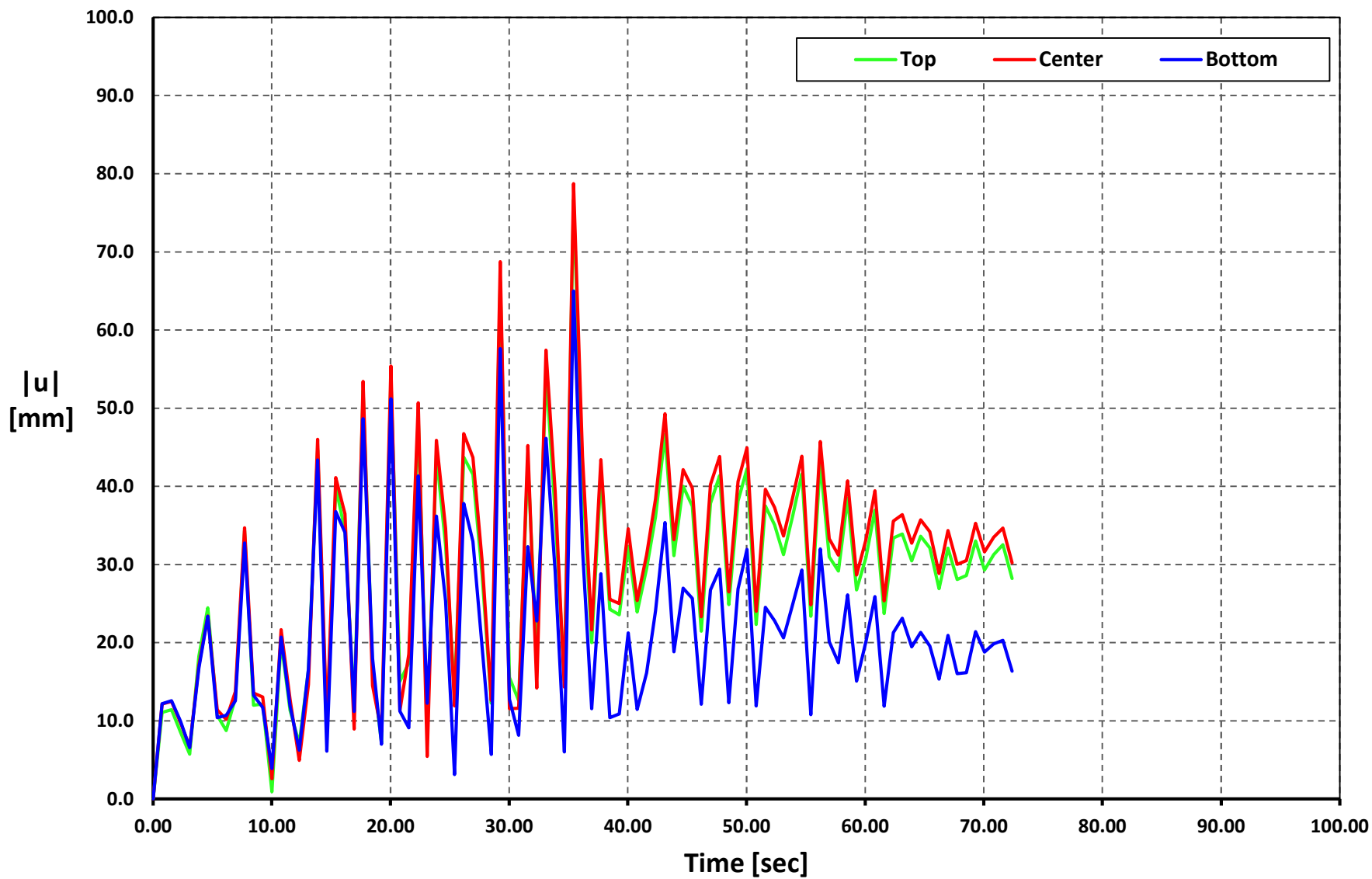
Time vs. |u|

Geometry 08 - Soil Type 3 - ALJ1-N



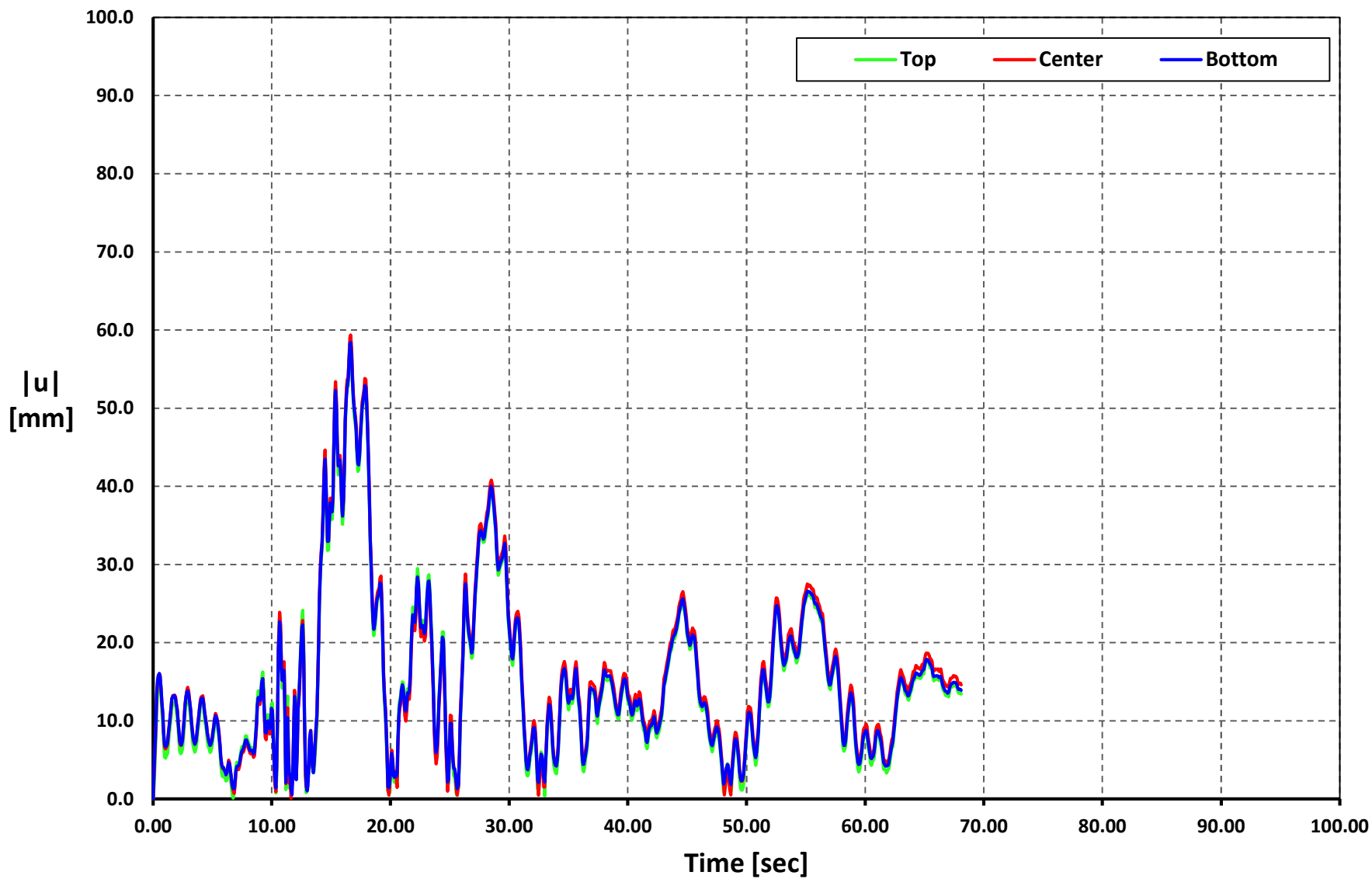
Time vs. |u|

Geometry 09 - Soil Type 1 - APED-E



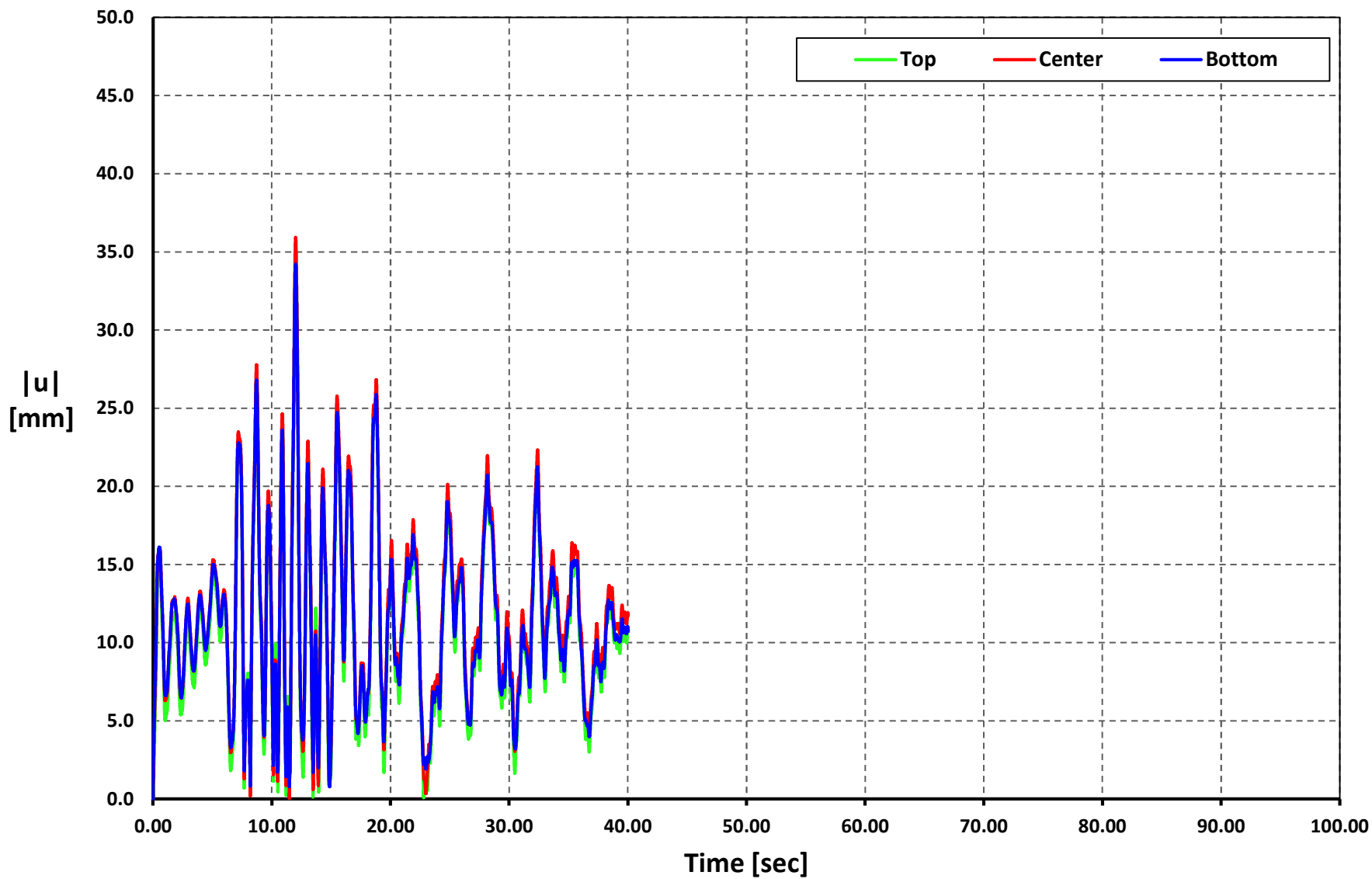
Time vs. |u|

Geometry 09 - Soil Type 1 - APO1-N



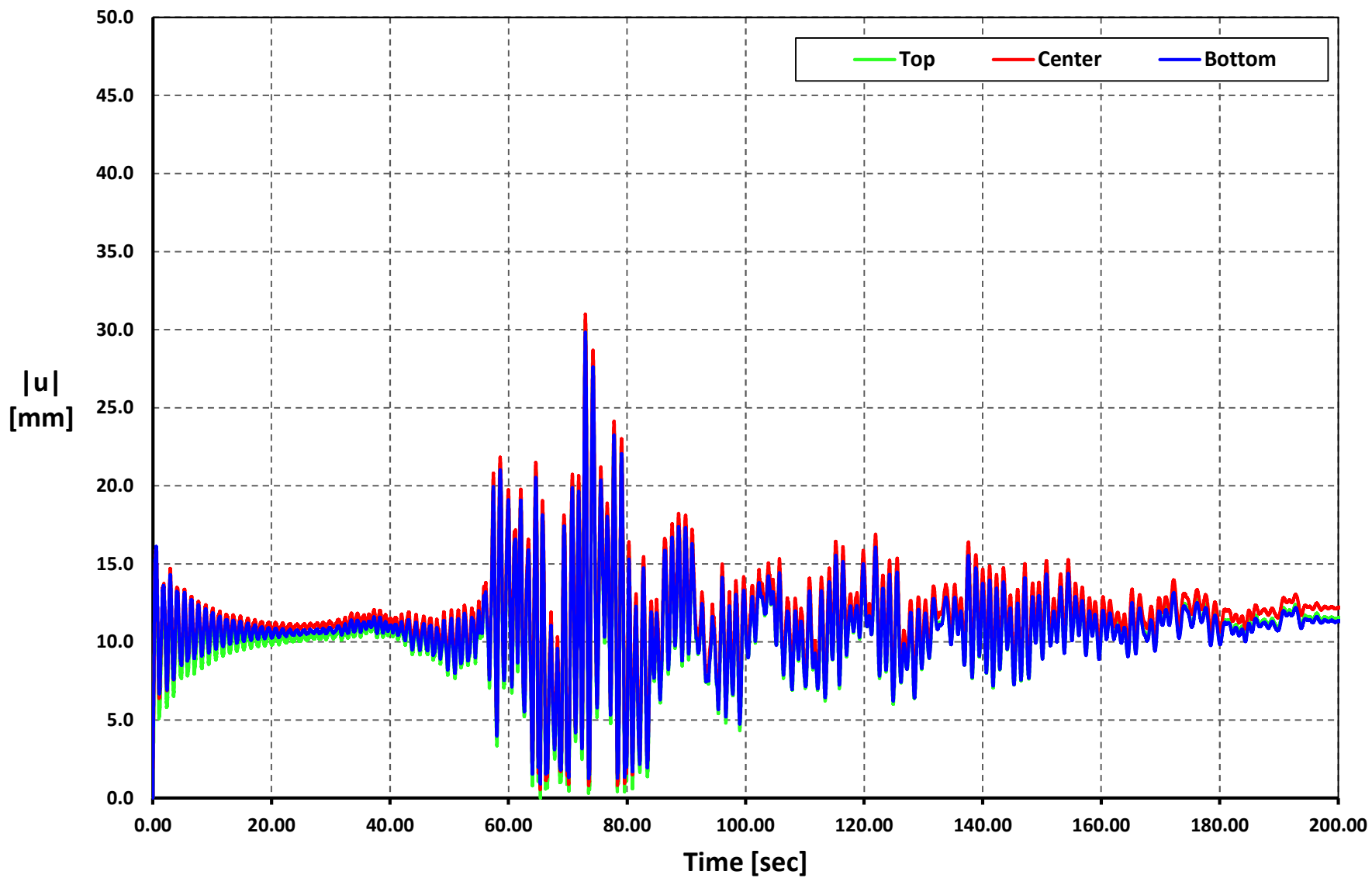
Time vs. |u|

Geometry 09 - Soil Type 1 - AMNT-N



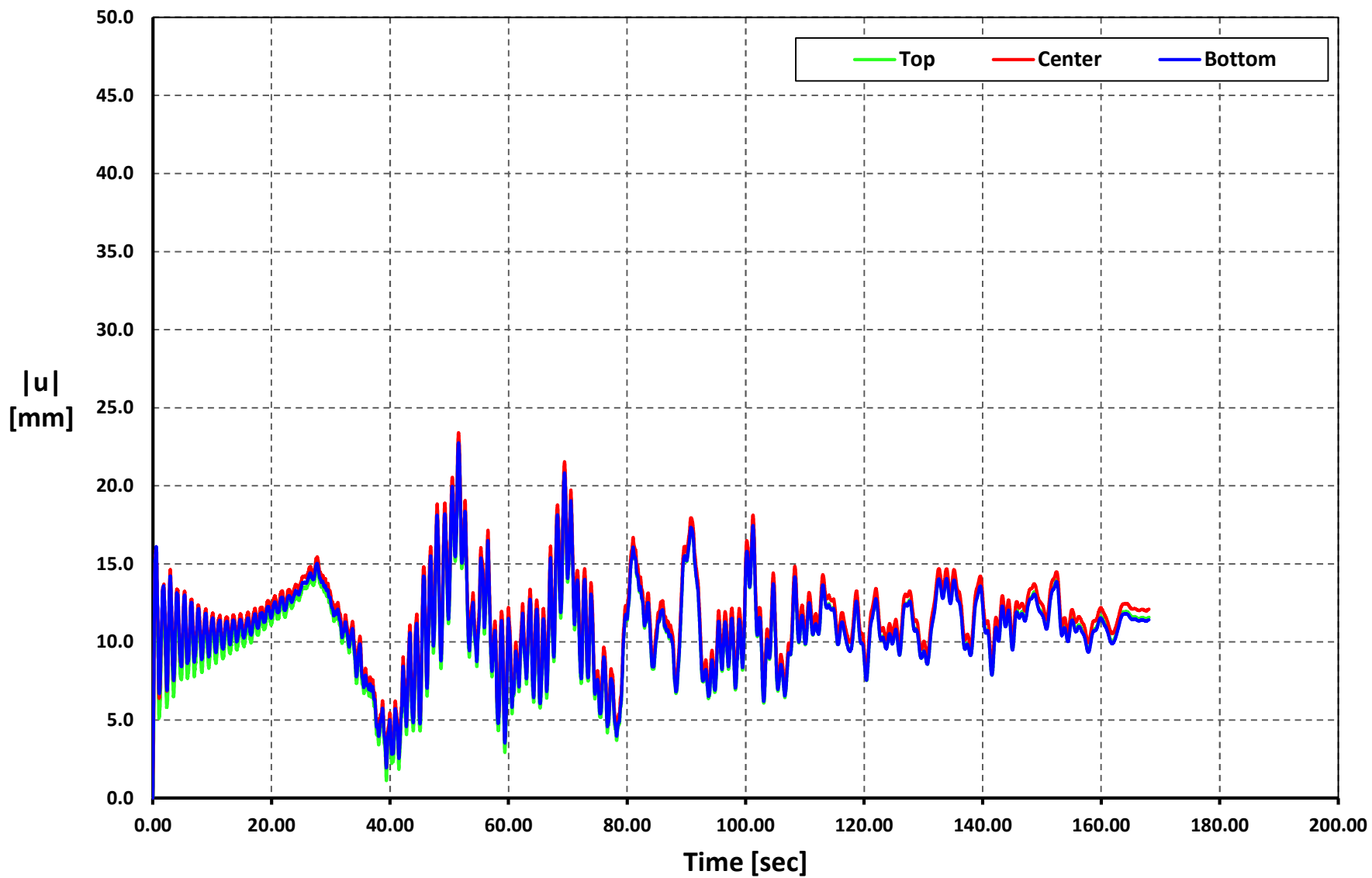
Time vs. $|u|$

Geometry 09 - Soil Type 1 - AGY2-N



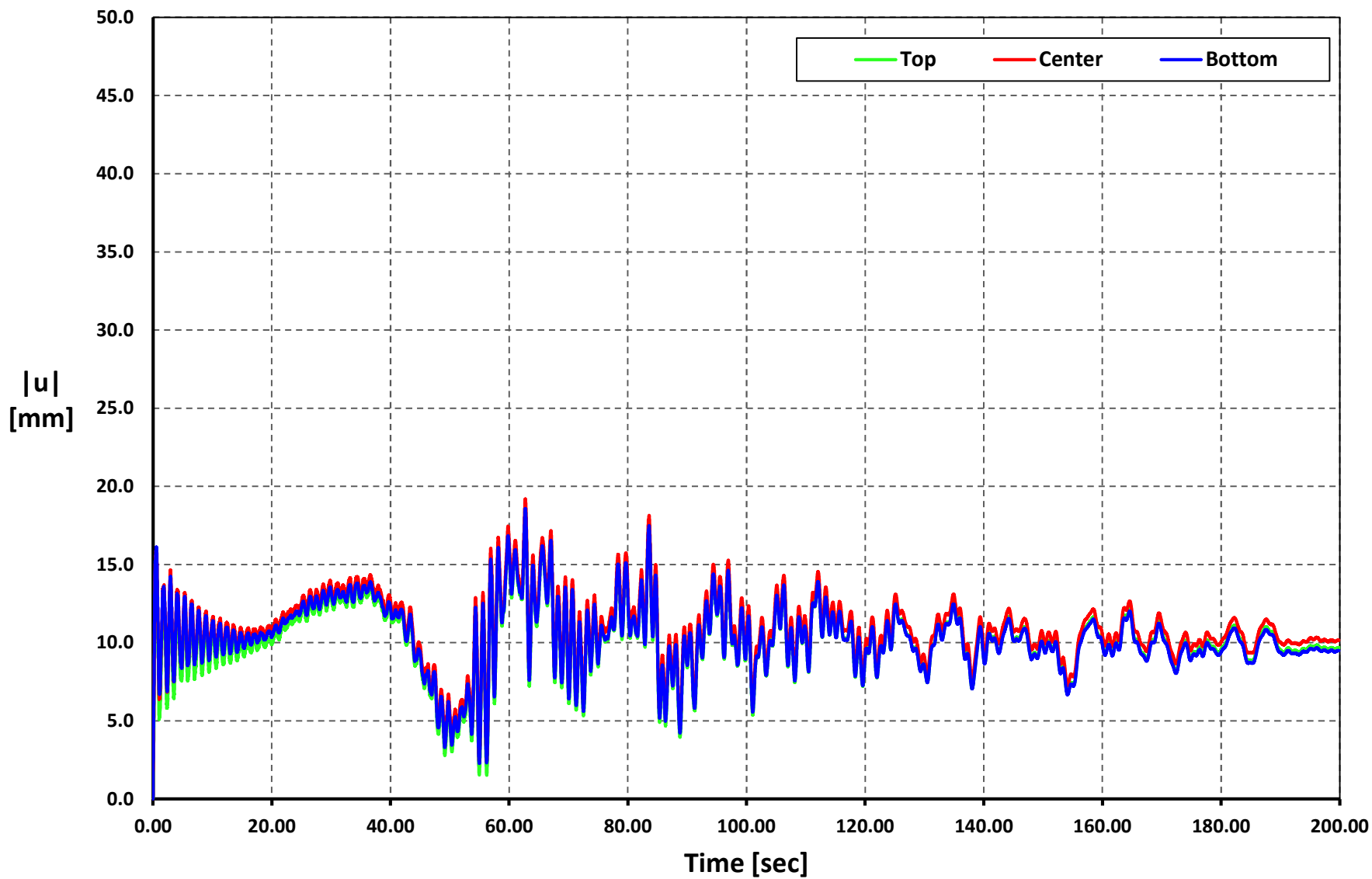
Time vs. $|u|$

Geometry 09 - Soil Type 1 - AMIL-E



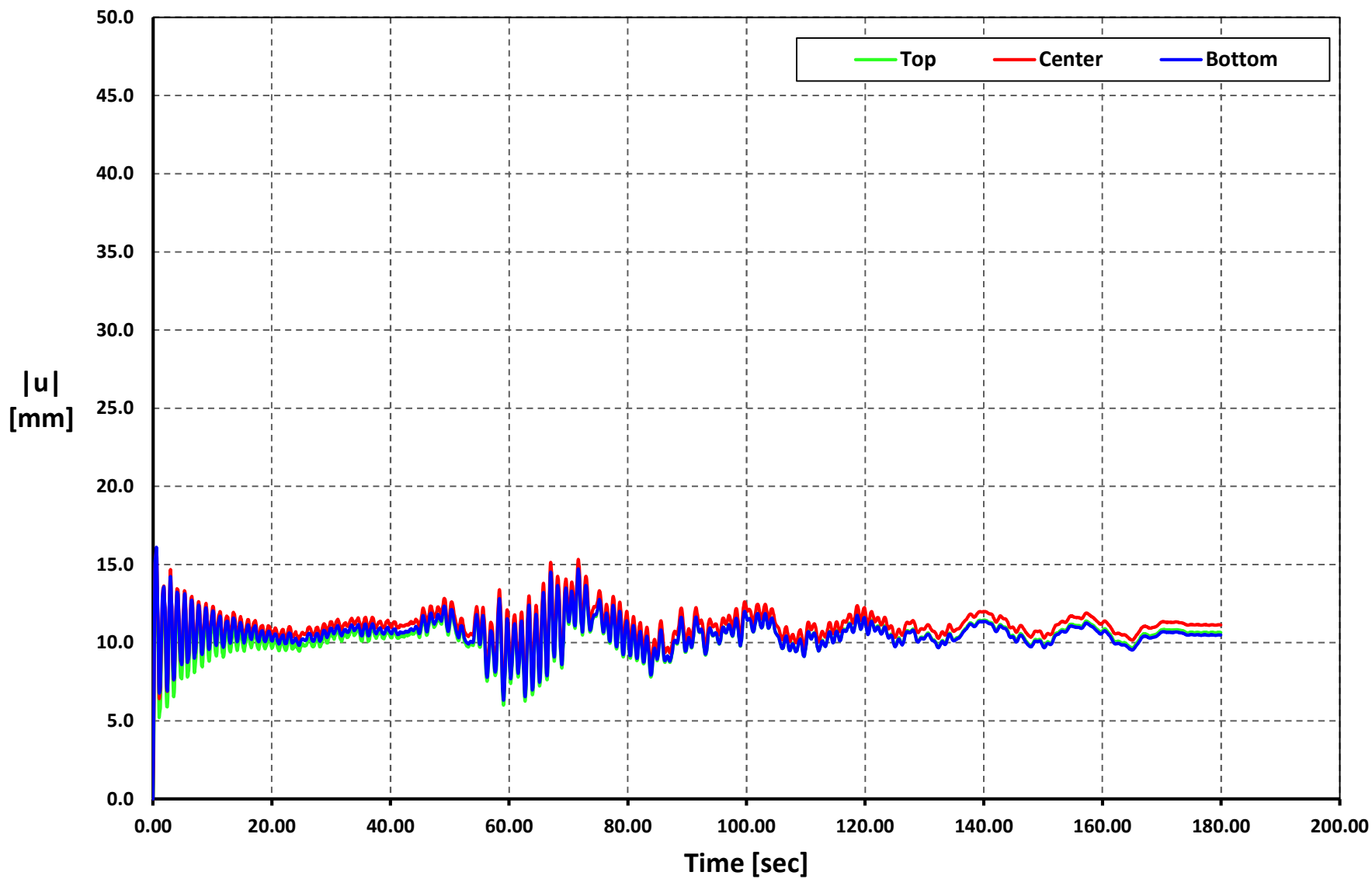
Time vs. $|u|$

Geometry 09 - Soil Type 1 - ACUE-E



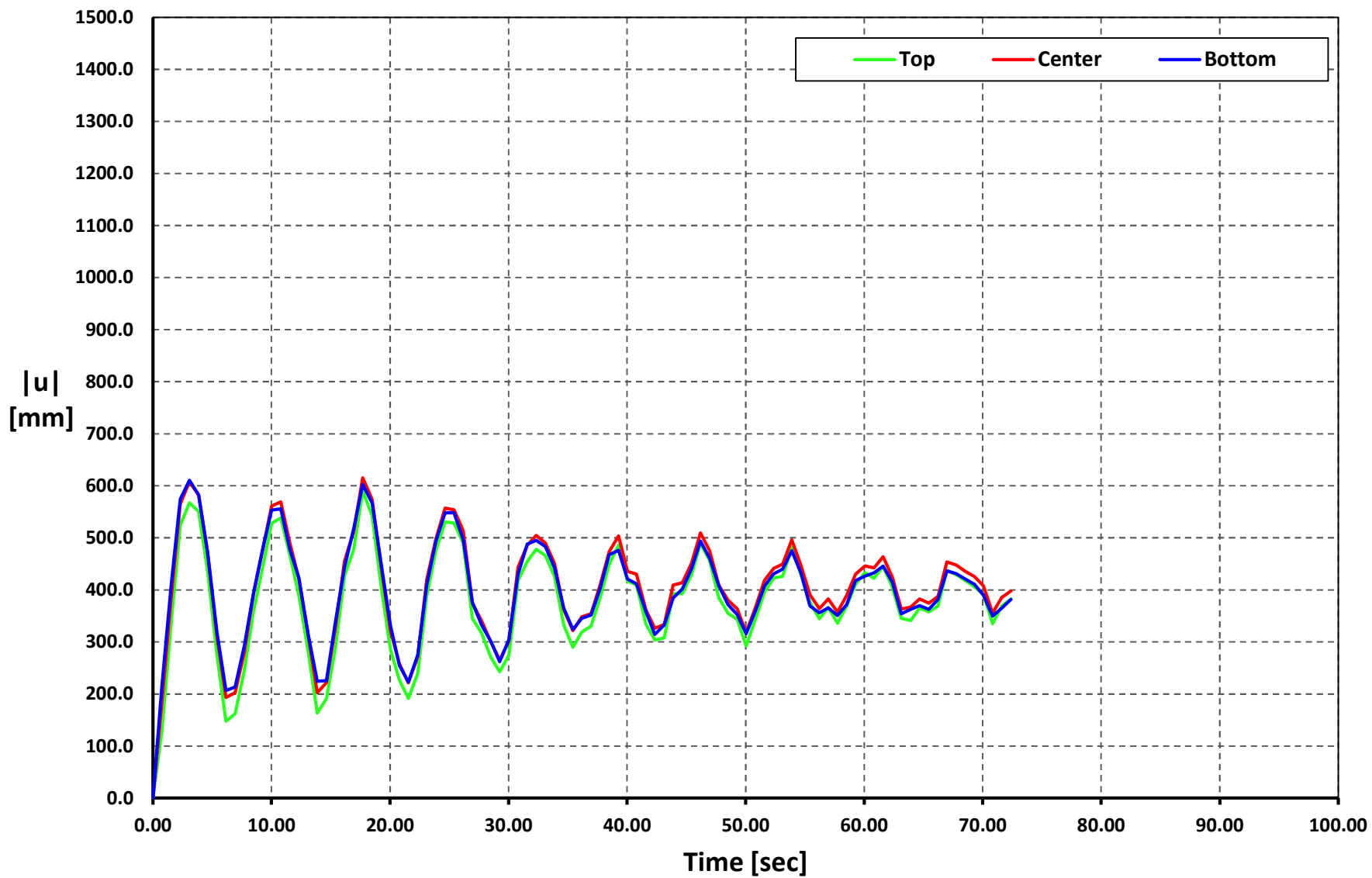
Time vs. $|u|$

Geometry 09 - Soil Type 1 - ALJ1-N



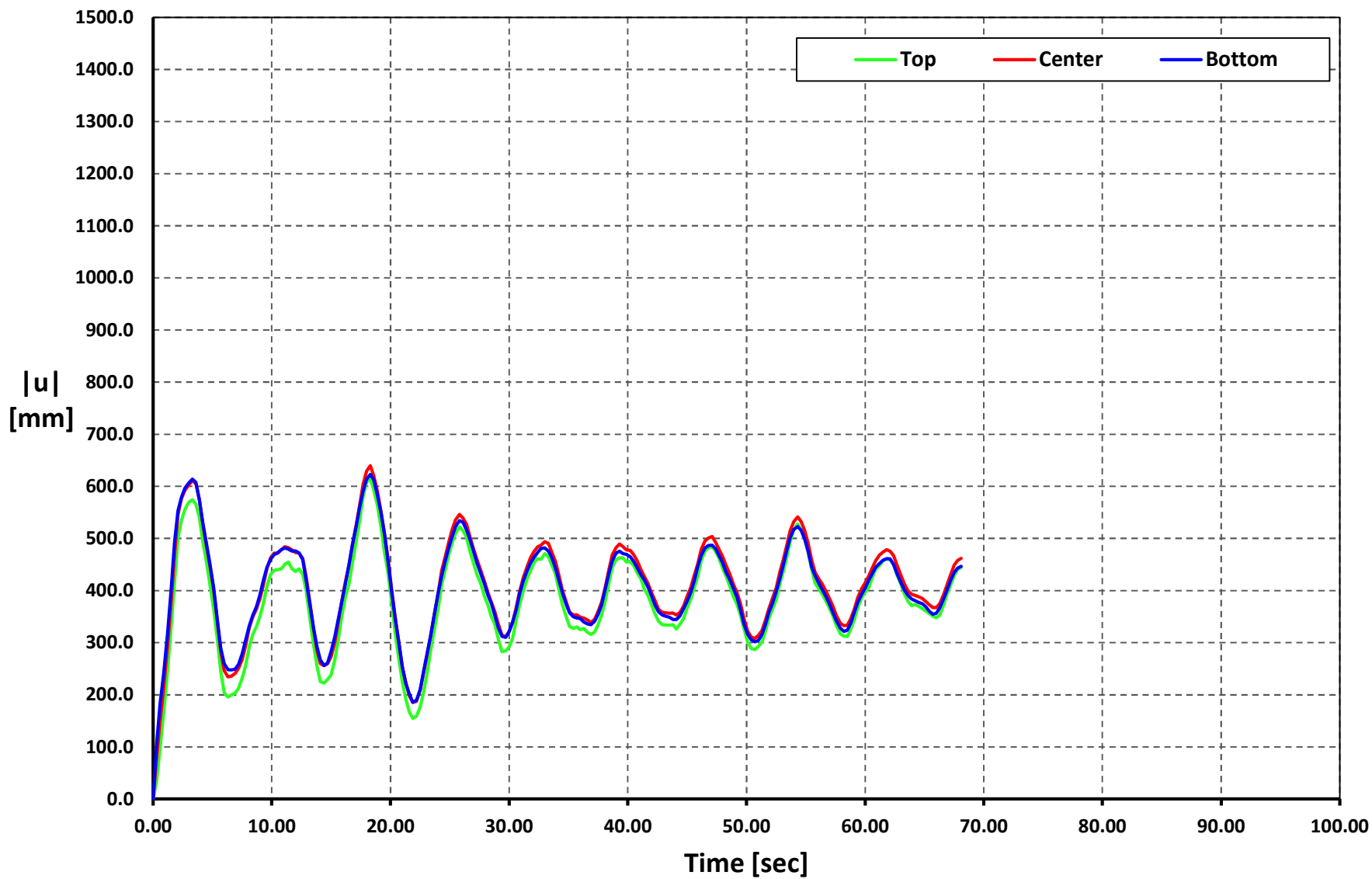
Time vs. $|u|$

Geometry 09 - Soil Type 2 - APED-E



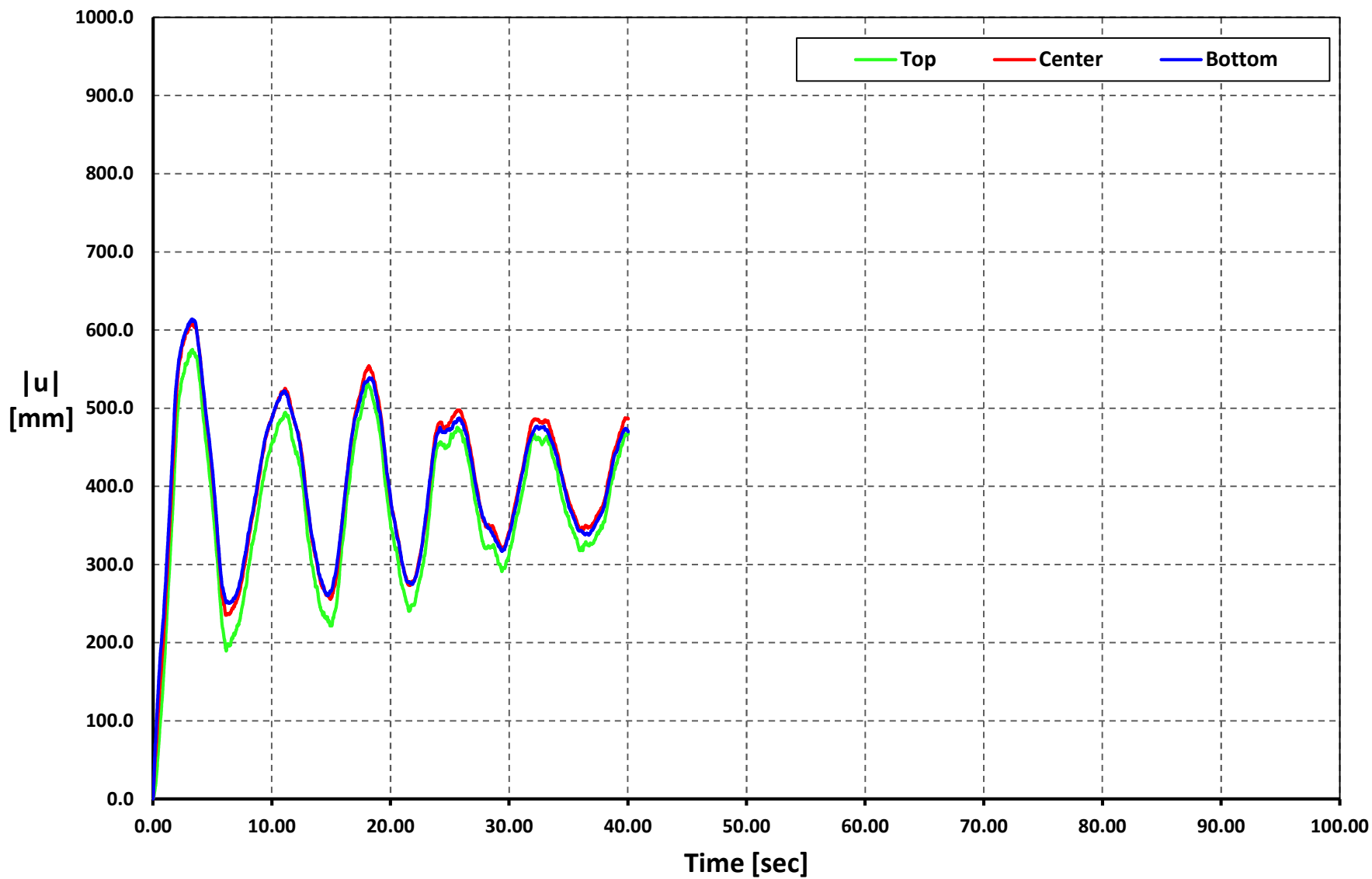
Time vs. $|u|$

Geometry 09 - Soil Type 2 - APO1-N



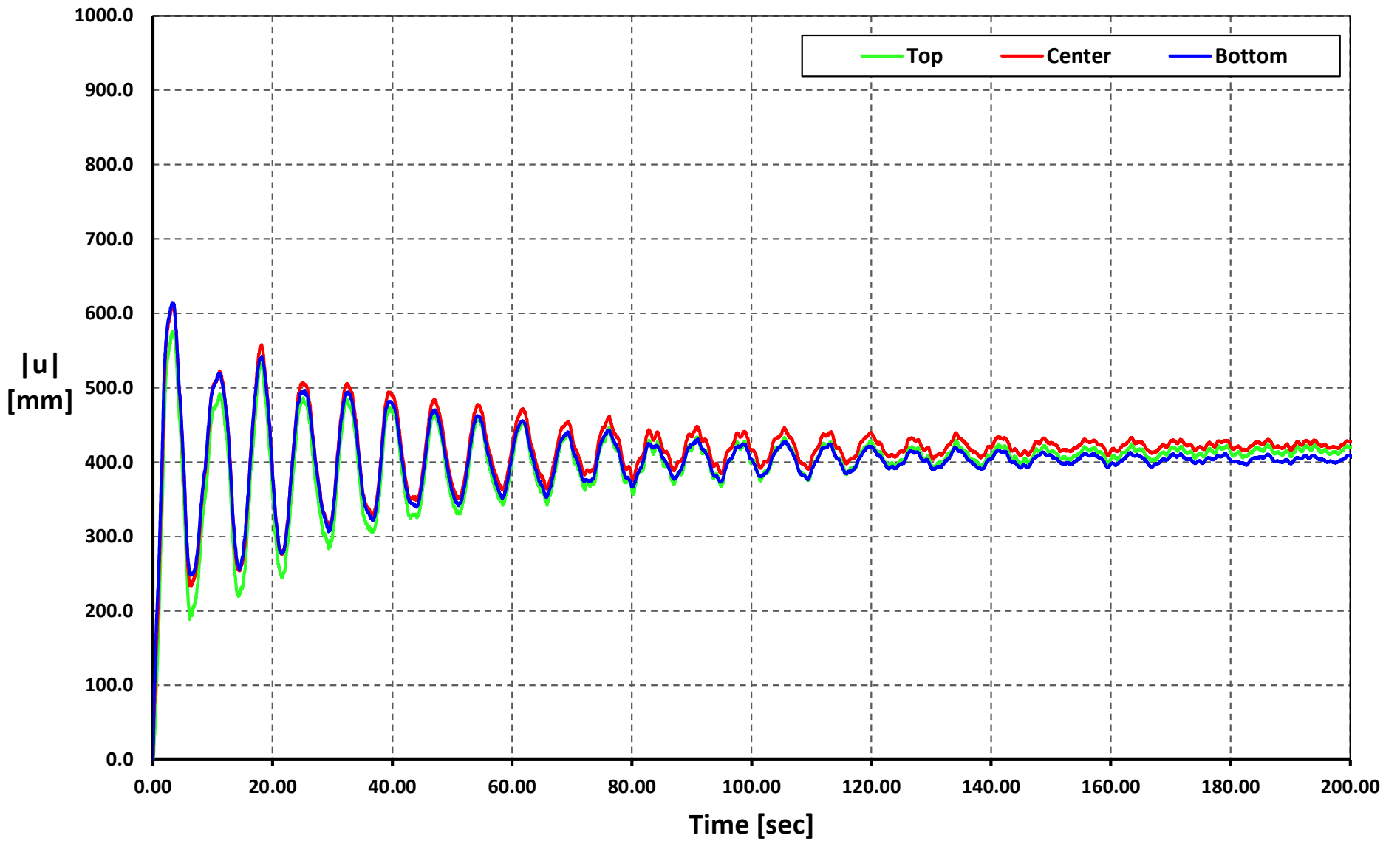
Time vs. |u|

Geometry 09 - Soil Type 2 - AMNT-N



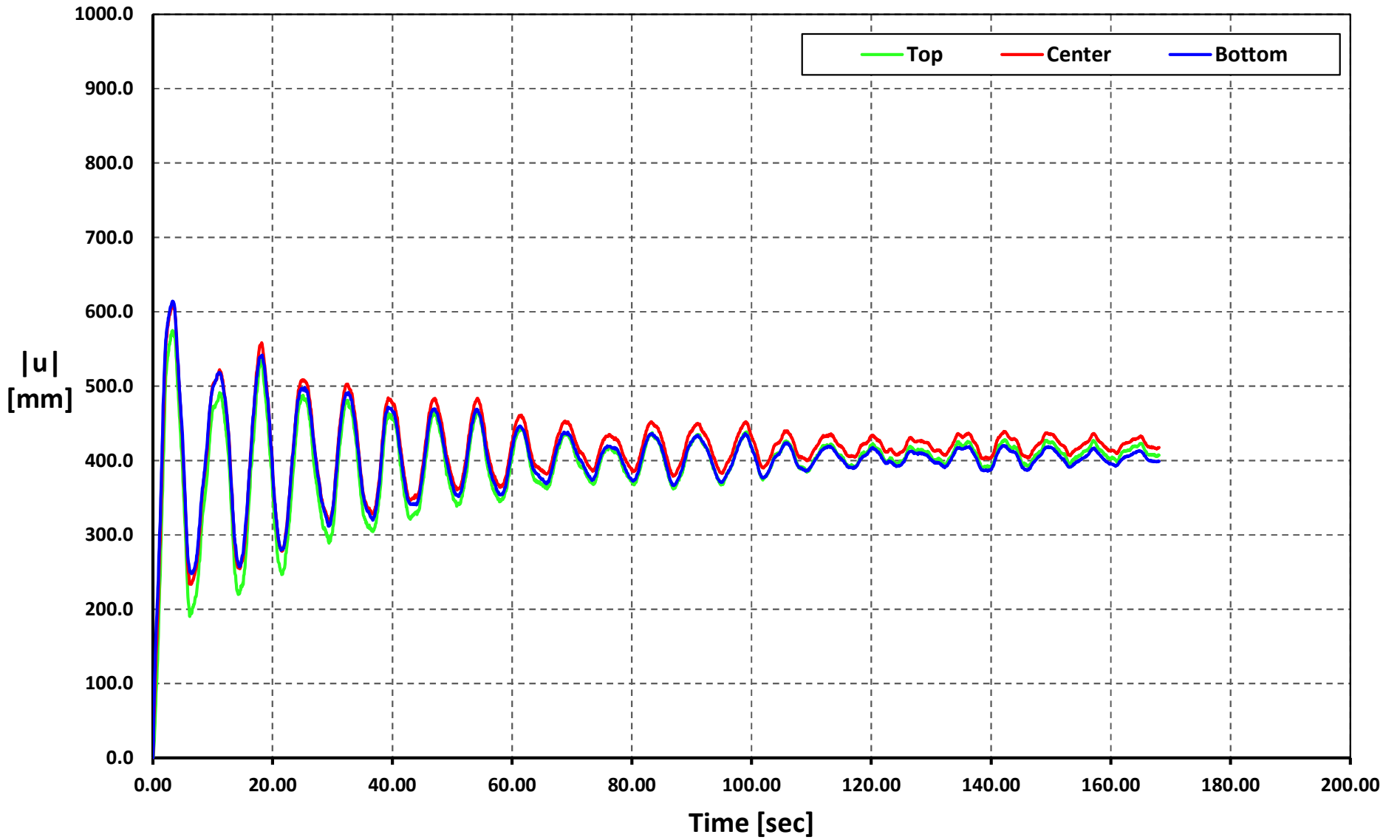
Time vs. $|u|$

Geometry 09 - Soil Type 2 - AGY2-N



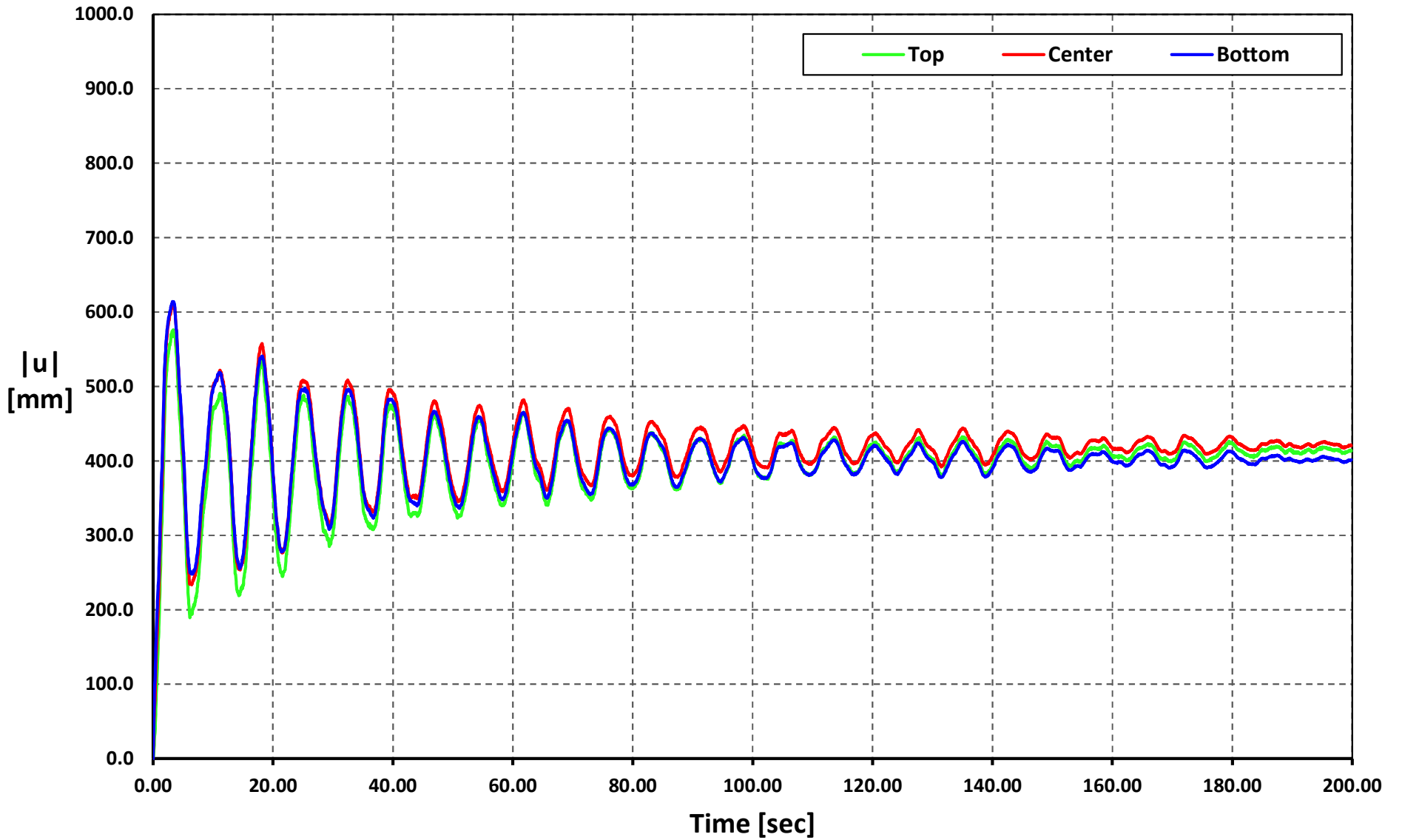
Time vs. |u|

Geometry 09 - Soil Type 2 - AMIL-E



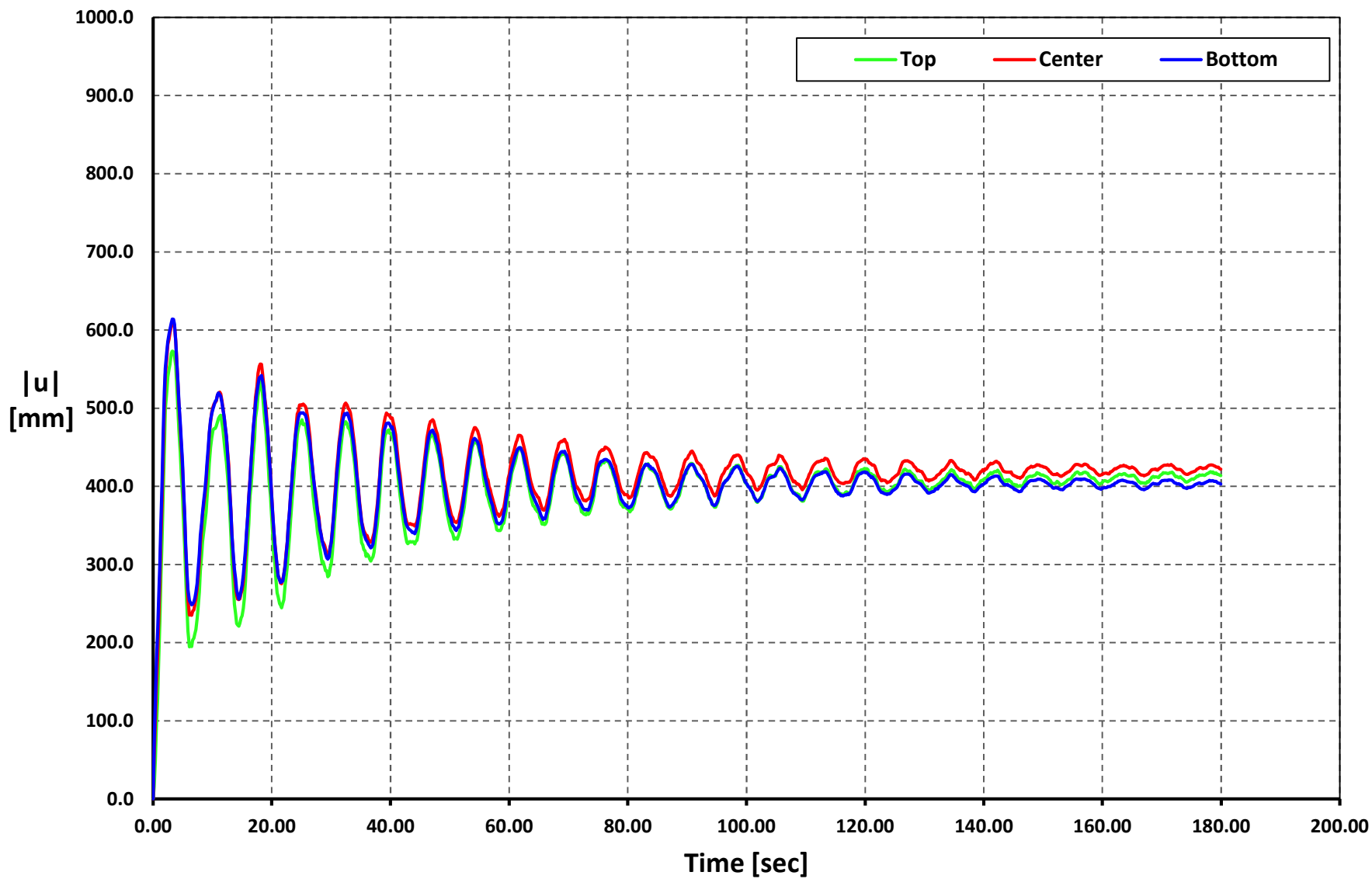
Time vs. |u|

Geometry 09 - Soil Type 2 - ACUE-E



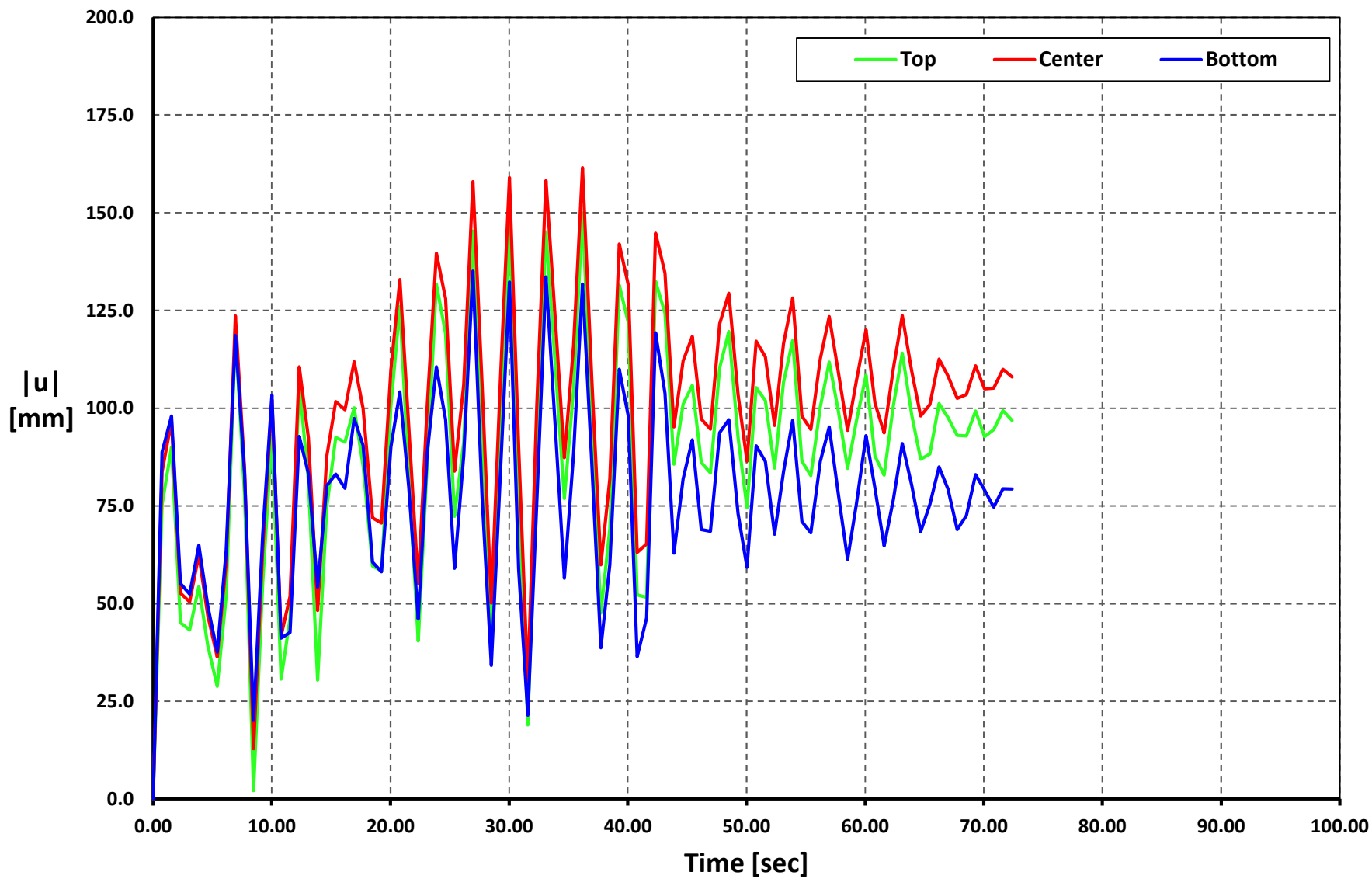
Time vs. $|u|$

Geometry 09 - Soil Type 2 - ALJ1-N



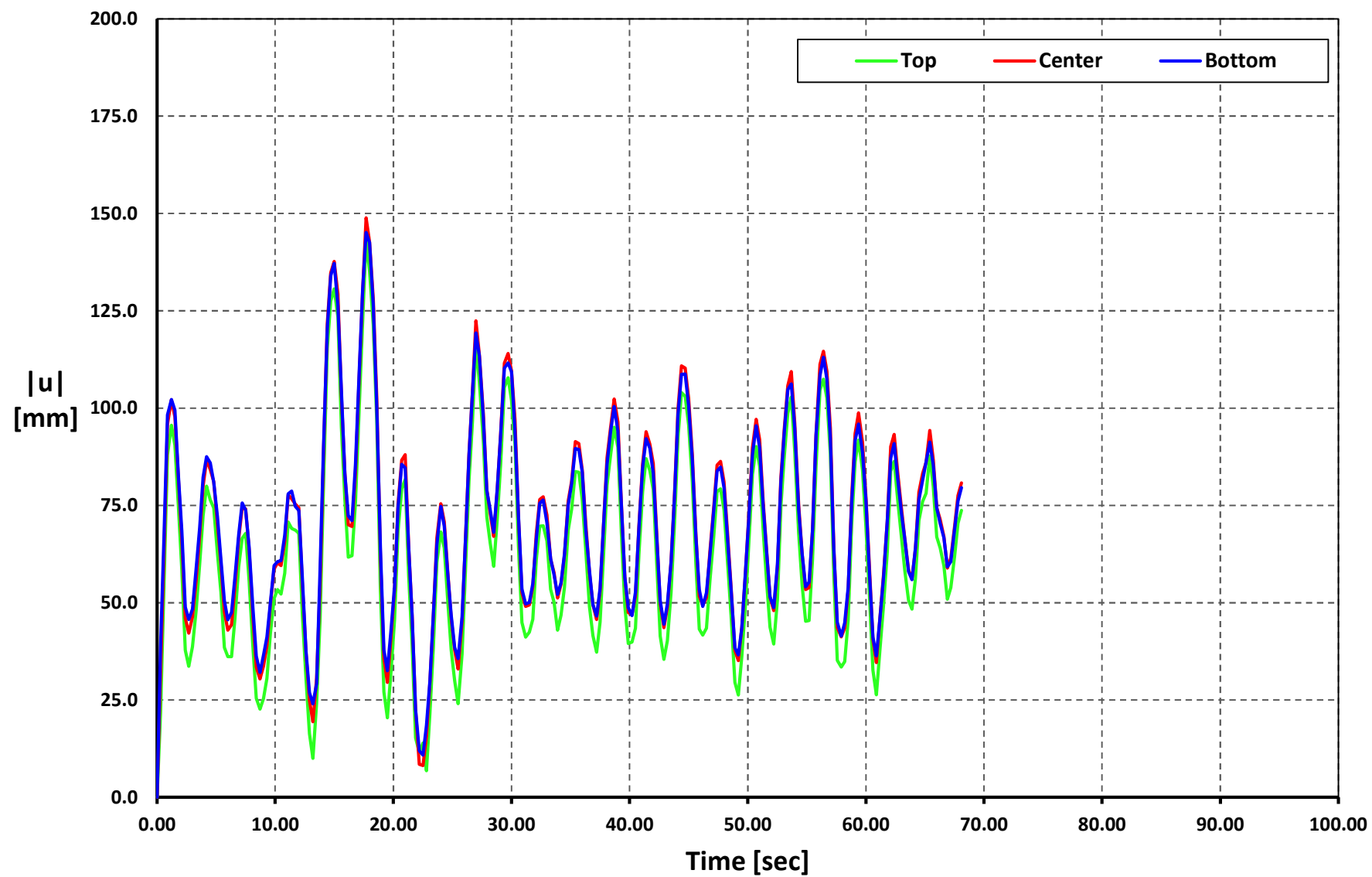
Time vs. |u|

Geometry 09 - Soil Type 3 - APED-E



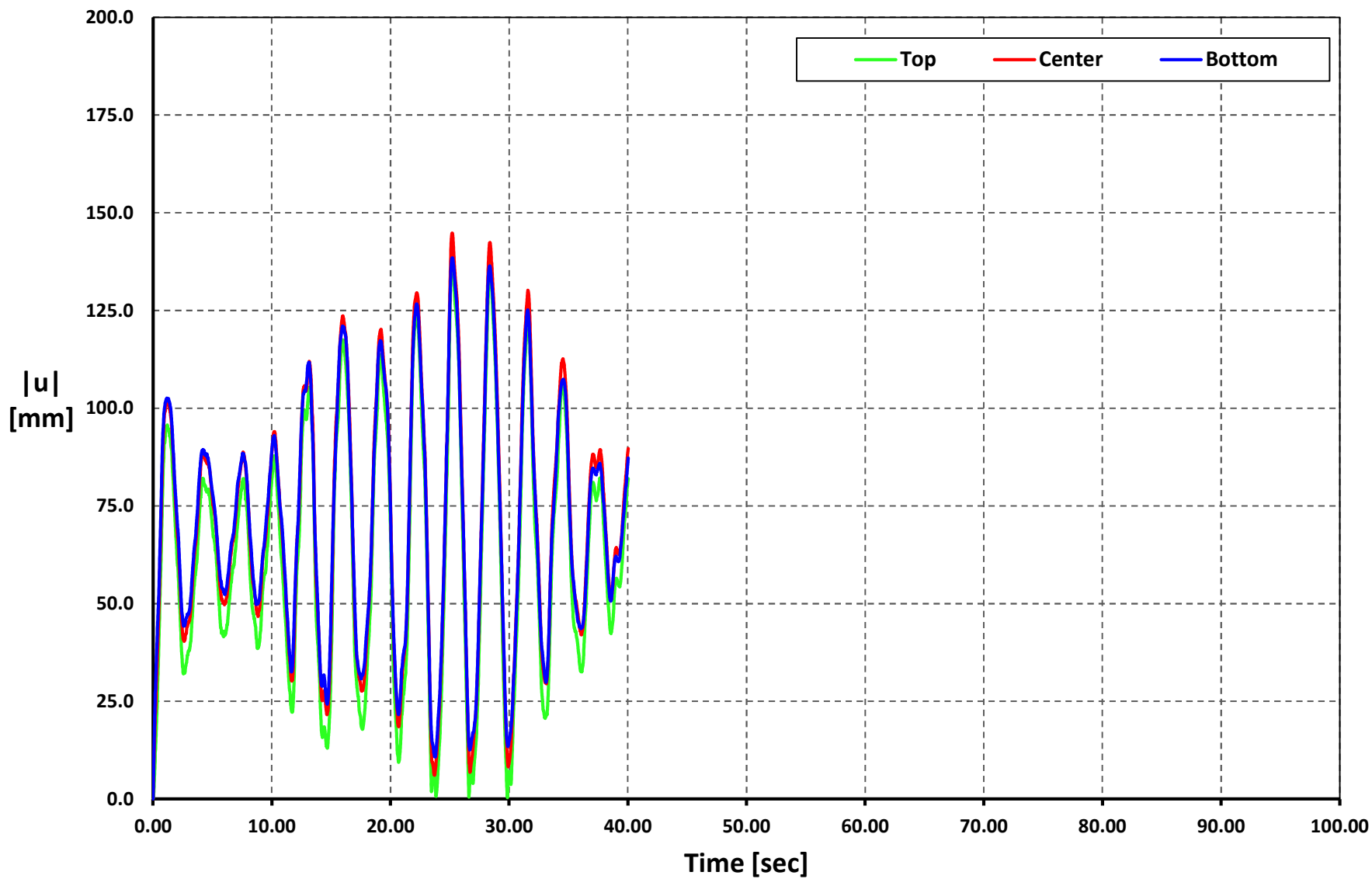
Time vs. |u|

Geometry 09 - Soil Type 3 - APO1-N



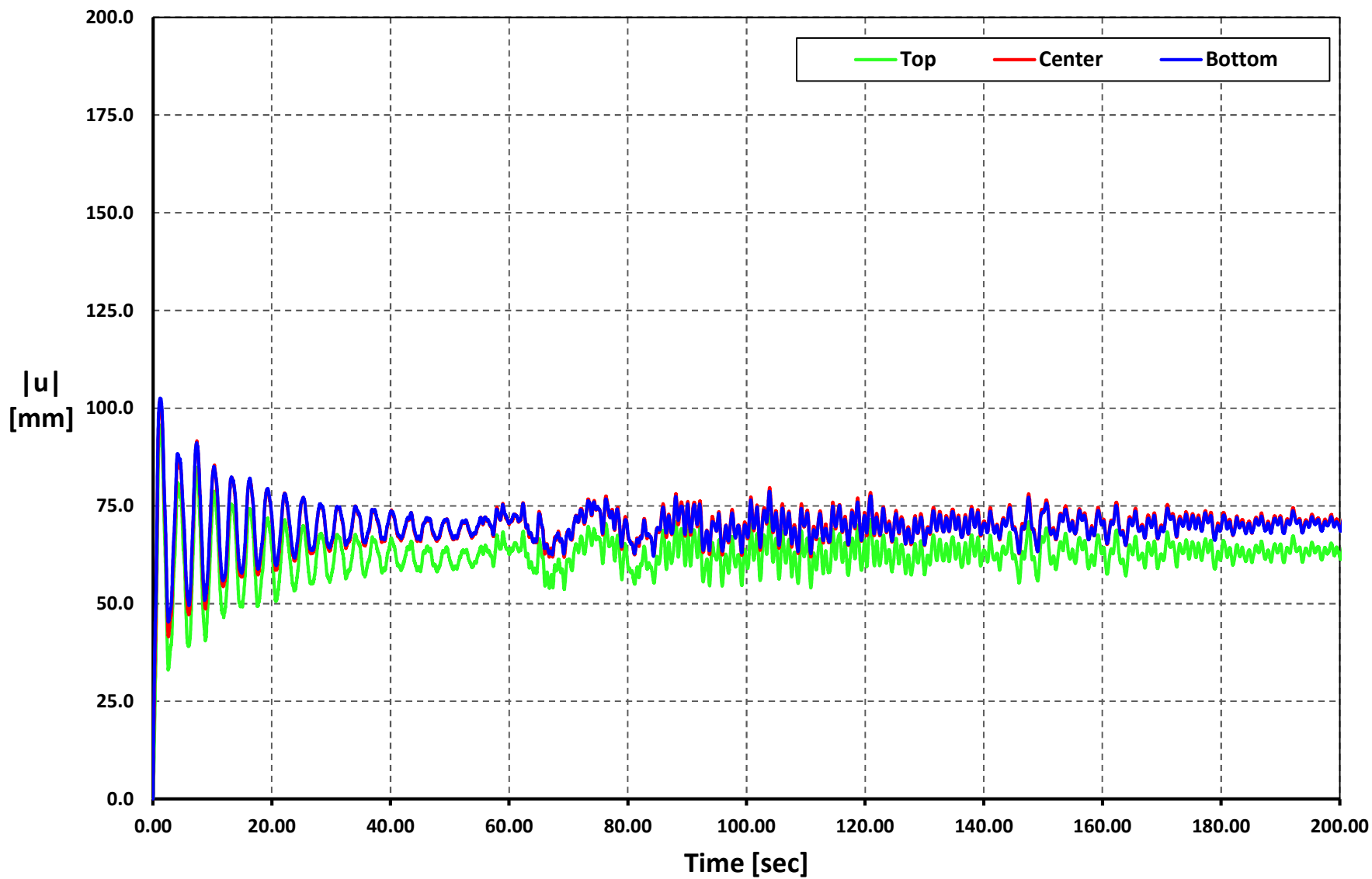
Time vs. |u|

Geometry 09 - Soil Type 3 - AMNT-N



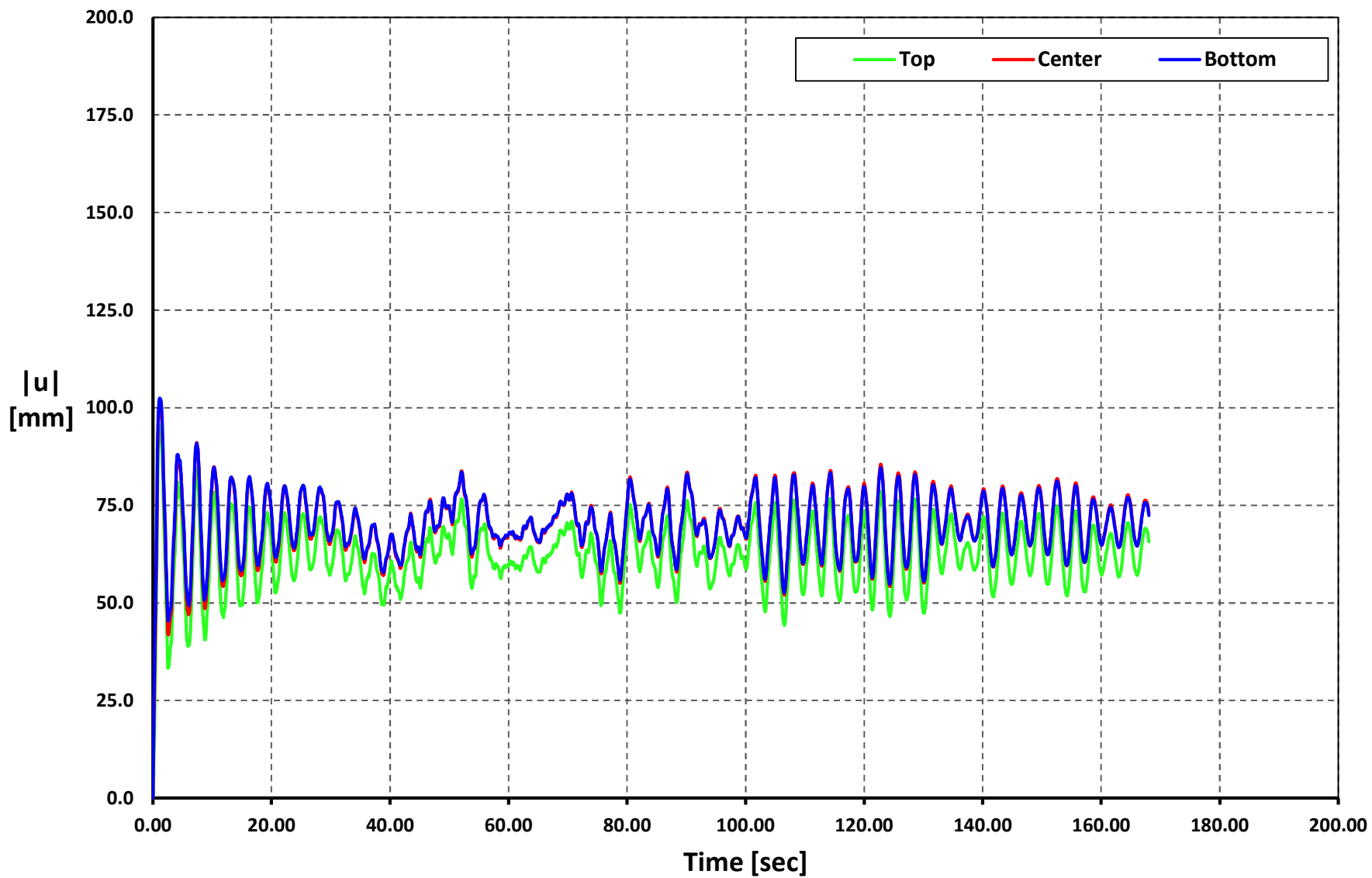
Time vs. $|u|$

Geometry 09 - Soil Type 3 - AGY2-N



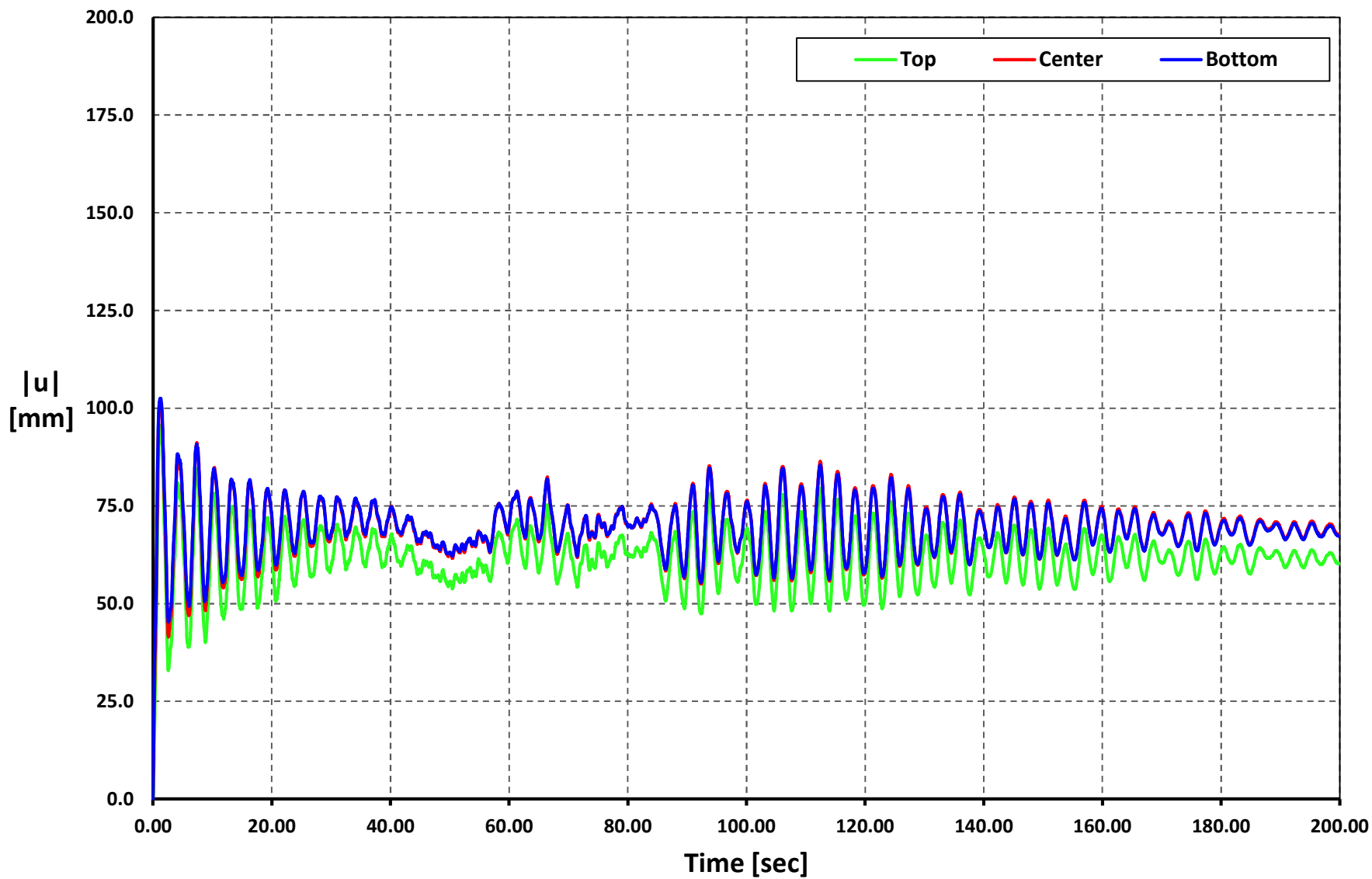
Time vs. $|u|$

Geometry 09 - Soil Type 3 - AMIL-E



Time vs. |u|

Geometry 09 - Soil Type 3 - ACUE-E



Time vs. $|u|$

Geometry 09 - Soil Type 3 - ALJ1-N

