

応答加速度分布に及ぼす盛土の幾何学的形状の影響に関する解析的研究

都間 英俊¹・常田 賢一²・小田 和広³・江川 祐輔¹

¹大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail:htsuma@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²大阪大学大学院教授 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail:tokida@civil.eng.osaka-u.ac.jp

³大阪大学大学院助手 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail:oda@civil.eng.osaka-u.ac.jp

盛土の地震時におけるすべり破壊に対する安定性は、震度法に基づく円弧すべり計算によって評価される場合が多い。この方法では盛土内には一様な水平震度を与えて計算を行うことが一般的であった。筆者らは一連の遠心模型実験とそのシミュレーション解析を通じ地震時における盛土の崩壊メカニズムや変形特性およびその補強・強化工法に関する研究を進めてきた。その結果、崩壊時における盛土の変形特性をより適切に評価するためには、盛土内の応答加速度分布特性を計算に反映させることが必要であることを明らかにした。ところで盛土内の応答加速度分布は盛土の幾何学的形状、盛土材料の動的力学特性、入力波の特性等々の影響を受けることが予想される。このためその特性は現在までのところ明らかにされていない。本論文では盛土の地震時における変形特性の合理的な評価方法の開発の一環として、盛土内の応答加速度分布に対する盛土形状の影響について一連のシミュレーションを通じて明らかにする。

Key Words : Shape of Embankment, Response Acceleration, Numerical Analysis, Earthquake

1. はじめに

盛土の地震時におけるすべり破壊に対する安定性は、震度法に基づく円弧すべり計算によって評価される場合が多い。この方法を用いる場合、盛土内には一様な水平震度を与えて計算を行うことが一般的であった。筆者らは、一連の遠心模型実験とそのシミュレーション解析を通じ地震時における盛土の崩壊メカニズムや変形特性およびその補強・強化工法に関する研究を進めている^{1), 2)}。その結果、崩壊時における盛土の変形特性をより適切に評価するためには、盛土内の応答加速度の分布特性を計算に反映させることが必要であることを明らかにした。ところで、平坦地盤上に建設される一般的な左右対称な台形盛土についても盛土の高さ、天端幅および法面勾配は様々である。また丘陵部や山岳部では基礎地盤が傾斜している場合がほとんどであるため、その幾何学的な形状は非常に多様である。本

論文では、円弧すべり計算に基づく盛土の地震時における安定性および変形特性の簡易的な評価方法の開発の一助として盛土形状が盛土内の応答加速度の分布特性に及ぼす影響について一連のシミュレーションを通じて明らかにする。

2. 解析概要

(1) 解析手法

加振時における盛土内の応答加速度の算定は、2次元動的 FEM である UWLC(FORUM8)を用いた。

(2) 検討対象

本論文では、まず、平坦な基礎地盤上の左右対称な台形盛土を基本形として検討対象とした。図-1 は解析モデルを示している。境界条件は底面固定とした。表-1 はシミュレーション解析における変動パラメータを示している。変動パラメータとしては、盛土厚 (T)、天端幅 (B) および法面勾配 (m) を選んだ。ただし、パラメトリックスタディでは、盛土

厚が 10m, 天端幅が 18m および法面勾配が 1 : 1.8 のケースを基本とし, 3つのパラメータのうち, 一つだけを変化させた. すなわち, 盛土厚については 5m から 15m までの 11 パターン, 天端幅については 10m から 25m までの 4 パターンならびに法面勾配については 1 : 1.5 から 1 : 2.0 までの 6 パターンについて変化させた. なお, 基本ケースの盛土の諸元は, 道路構造令に示されている第一種第一級の 2 車線道路を想定した. 盛土厚および法面勾配はそれぞれ道路土工のり面工・斜面安定工指針に基づき決定した.

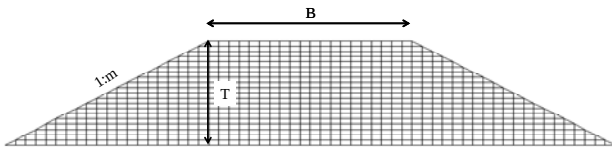


図-1 解析モデル

表-1 解析ケース

	盛土厚 (m)	天端幅 (m)	法面勾配 (1:m)
盛土厚変化	5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15	18	1:1.8
天端幅変化	10	10,15,18,25	1:1.8
法面勾配変化	10	18	1:1.5,1.6,1.7,1.8,1.9,2.0

次に, 両盛土の動的変形特性に対する基礎地盤に傾斜角度の影響を調べるため, 先に述べた基本ケースに対し, 底面の角度 (α) のみを変動パラメータとしたシミュレーション解析を行った. 図-2 は解析モデル, 表-2 はシミュレーション解析における変動パラメータをそれぞれ示している. 解析モデルの境界条件は盛土底面を固定とした. 解析では, 盛土基盤の傾斜角度を 5°から 15°に変化させた. ここで, 盛土厚として, 図-2 に示すように盛土の法肩から底面に下ろした垂線の長さで規定した.

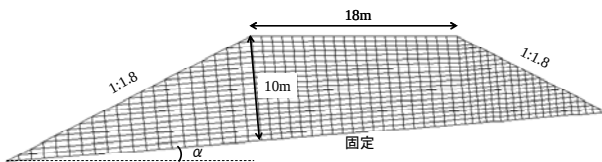


図-2 解析モデル

表-2 解析ケース

	底面傾斜角(deg)
底面傾斜角変化	5,10,15

れる片盛土に対して検討を行った. 図-3 は解析モデル, 表-3 はシミュレーション解析における変動パラメータをそれぞれ示している. 解析モデルの境界条件は盛土底面を固定とした. 片盛土の場合, 天端幅 18m, 法面勾配 1 : 1.8 と固定し, 盛土厚のみを変動パラメータとして, その値を 5m から 7m に変化させた. なお, 片盛土においては底面傾斜角は盛土厚, 天端幅および法面勾配を決定すると自動的に定まるため, 表-3 中には各盛土厚に対応した底面傾斜角を示している.

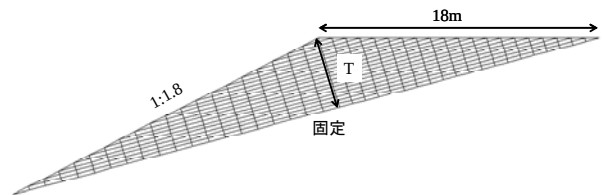


図-3 解析モデル

表-3 解析ケース

盛土厚	5m	6m	7m
底面傾斜角	16°	19.5°	23°

(3) 盛土材料の力学モデル

本研究では, 盛土材料の非線形的な動的力学挙動を表現するために, 修正 RO モデルを用いることとした. 表-4 は盛土材料の主要な解析パラメータを示している.

表-4 主要な解析パラメータ

単位体積重量 γ (kN/m ³)	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 (deg)	ポアソン比 ν	初期せん断弾性係数 G_0 (kN/m ²)	最大減衰定数 h_{max}
19.6	5.0	40.0	0.33	5217.8	0.22

G_0 は $\sigma'_m=1$ (kN/m²)に基準化

(4) 入力波

入力波は振幅 300Gal, 周波数 1Hz の正弦波 5 波を盛土底面に水平方向に与えた. 本来地震波は不規則波であるが, 盛土形状の違いによる応答加速度への影響のみを検討するため今回の研究では正弦波を用いた.

最後に傾斜した基礎地盤上の盛土としてよく見ら

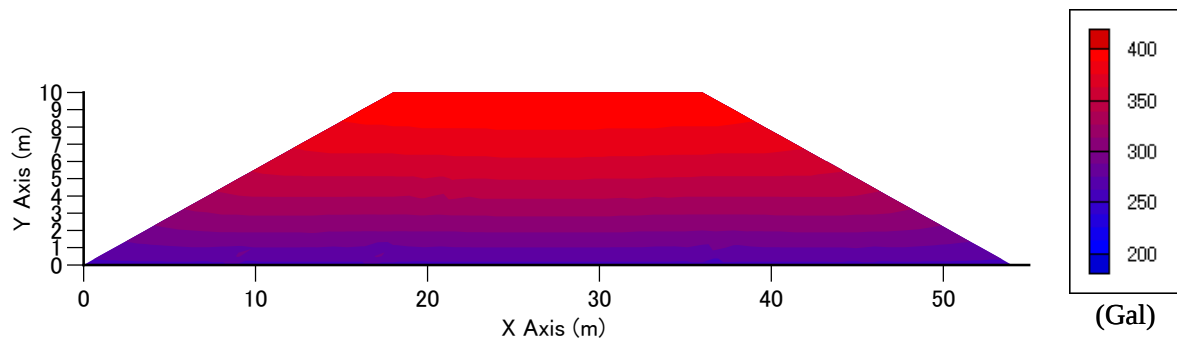


図-4 基本ケースにおける応答加速度分布

3. 平坦地盤上の盛土における応答加速度分布

(1) 基本ケースにおける応答加速度分布

地震時における盛土のすべり破壊に対する安定性を評価するうえで、盛土に最も負荷がかかっている状態を把握することが重要である。そこで本研究では盛土の左法肩での応答加速度が最大となる瞬間が最も負荷がかかっている状態であると仮定し、その時刻における盛土内全体の応答加速度を評価することとした。このことに従い基本ケースにおける盛土内の応答加速度の分布を示したものが図-4 である。盛土内の応答加速度が盛土の底面から天端に向け一様に増幅していることが分かる。また、応答加速度の分布を水平方向に見た場合、法面付近でわずかに加速度が小さくなるものの、盛土内の同じ高さでは概ね一様な応答加速度を示すことが分かる。このことは後に述べる平坦地盤上の盛土で盛土厚、天端幅および法面勾配をそれぞれ変化させたケースにおいても同様に、盛土内の応答加速度が天端に向けて盛土底面に平行して増幅していく傾向が見られた。そこで平坦地盤上の盛土で検討を行ったケースについて、図-4 中の法肩から盛土底面に引いた垂線上(黄線部)での応答加速度の比較を行った。

(2) 応答加速度分布に及ぼす盛土厚の影響

図-5 に盛土厚が 5m, 10m, 15m における法肩から底面に下ろした垂線上での応答加速度を示している。また図-6 には法肩での最大応答加速度と盛土厚の関係を示している。盛土厚により大きく応答加速度の分布形状が異なっているが、全ての盛土厚において盛土の天端付近までは一様に増幅し、それ以降では増幅の割合が小さくなっていることが分かる。また盛土底部における応答加速度が入力波の振幅(300Gal)よりも小さい値を示しており、盛土厚が大きくなるほどこの傾向は顕著に見られる。これは法肩での応答加速度が最大となる時刻において各節点の応答加速度を評価しているため位相差の影響によるものと思われる。

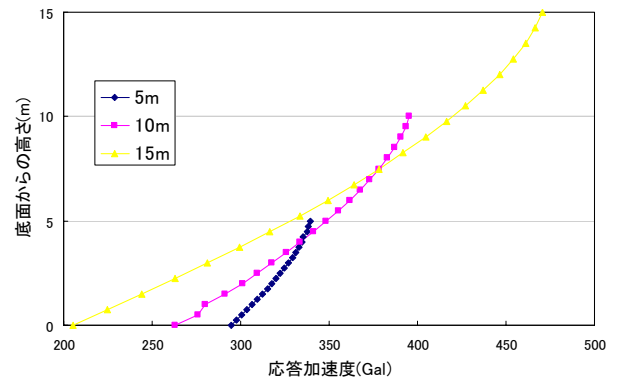


図-5 応答加速度の高さ方向の変化(盛土厚変化)

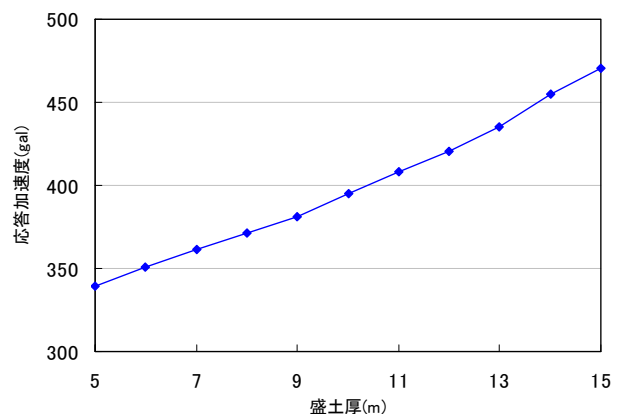


図-6 盛土厚と法肩における最大応答加速度の関係

(2) 応答加速度分布に及ぼす天端幅の影響

盛土厚および法面勾配を固定し天端幅を 10m, 15m, 18m, 25m と変化させ解析を行い、盛土内の応答加速度に及ぼす天端幅の影響について調べた。図-7 に各天端幅での法肩から底面に下ろした垂線上での応答加速度を示している。いずれの天端幅においても応答加速度に大きな差異は見られず、盛土の底面から天端にかけて同様な応答加速度を示している。このことから盛土内の応答加速度に対し天端幅が及ぼす影響は極めて小さいということが推察される。

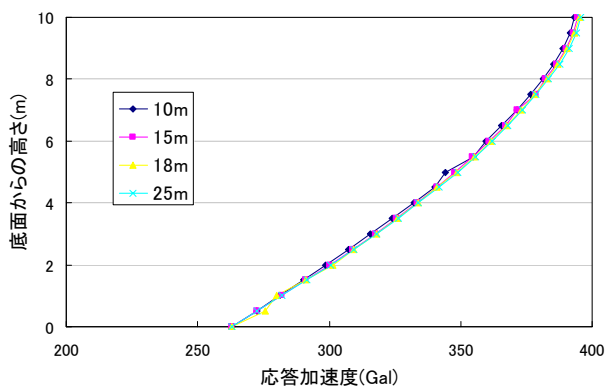


図-7 応答加速度の高さ方向の変化(天端幅変化)

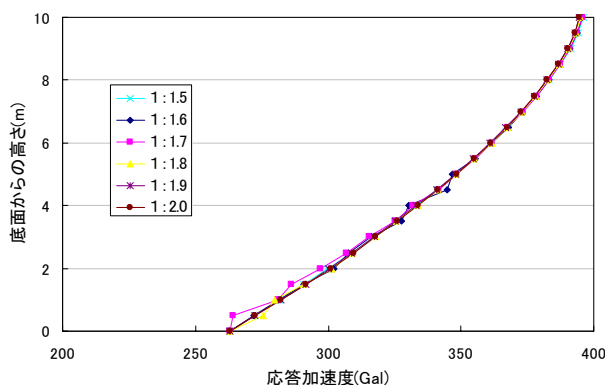


図-8 応答加速度の高さ方向の変化(法面勾配変化)

(3) 応答加速度分布に及ぼす法面勾配の影響

盛土厚および法面勾配を固定し法面勾配のみを1:1.5から1:2.0まで変化させ盛土内の応答加速度に及ぼす法面勾配の影響について調べた。図-8に各法面勾配での法肩から底面に下ろした垂線上での応答加速度を示している。いずれの法面勾配においても応答加速度は一樣であり、盛土の底面から天端にかけて、同様な増幅傾向を示していることが分かる。このことから盛土内の応答加速度に対し法面勾配が及ぼす影響は極めて小さいということが示唆される。

4. 傾斜地盤上の両盛土における応答加速度分布

盛土厚 10m 天端幅 18m および法面勾配を 1:1.8 と固定し底面の傾斜角のみを変化させ傾斜地盤上の両盛土における応答加速度分布について検討を行った。各底面傾斜角での盛土内の応答加速度分布を図-9, 10, 11 に示している。いずれの角度においても盛土の左法肩付近で最も応答加速度が大きく出ていることが分かる。また応答加速度が盛土底面に概ね平行して増幅していることが判断できる。そこで各図中に示す法肩から底面に引いた垂線上(黄線部)での応答加速度を比較した。その結果を図-12 に示す。なお結果には平坦地盤上での結果($\alpha=0$

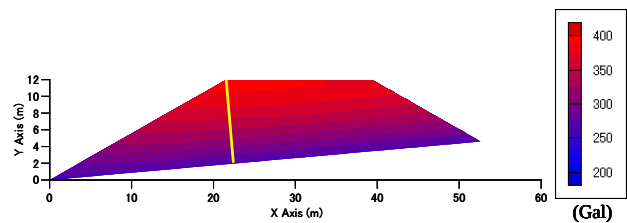


図-9 盛土内の応答加速度分布($\alpha=5^\circ$)

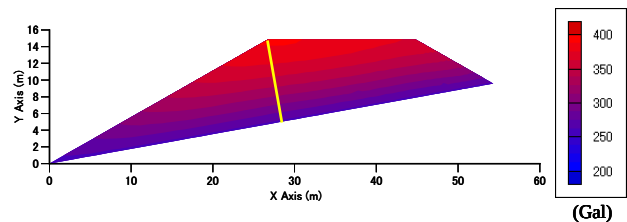


図-10 盛土内の応答加速度分布($\alpha=10^\circ$)

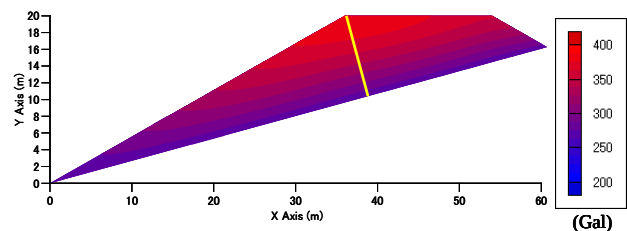


図-11 盛土内の応答加速度分布($\alpha=15^\circ$)

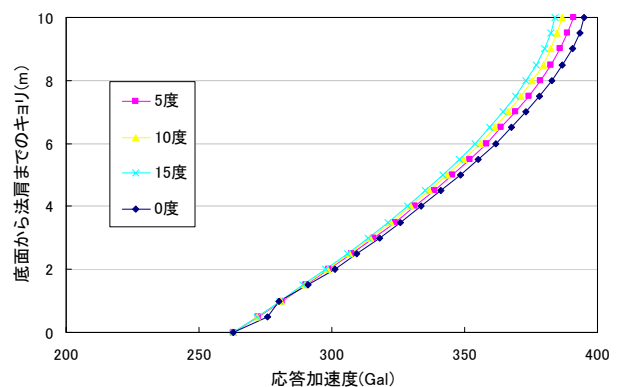


図-12 応答加速度の高さ方向の変化

度)も合わせて示している。平坦地盤上盛土の結果も含め底面の傾斜角が大きくなるに従い、全体的に応答加速度がわずかに小さくなる傾向が認められる。しかし平坦地盤上盛土と底面傾斜角が 15 度のケースを比較すると、最も差が大きく出ている法肩における応答加速度を比較すると、入力波の振幅 300Gal に対して差は 10Gal 程度であり小さいと言える。このことから、傾斜地盤上の両盛土における応答加速度は、盛土底面から法肩にかけて同じ盛土厚を有する平坦地盤上の盛土と概ね同様に増幅することが示唆される。

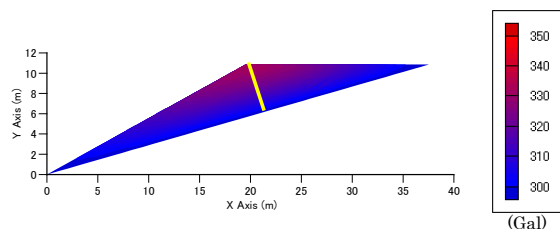


図-13 応答加速度分布(T=5m)

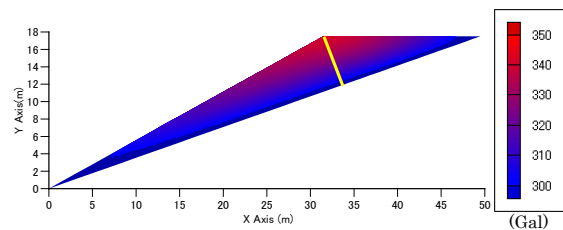


図-14 応答加速度分布(T=6m)

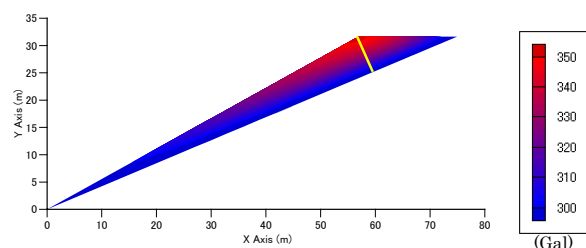


図-15 応答加速度分布(T=7m)

5. 傾斜地盤片盛土における応答加速度分布

傾斜地盤上の片盛土における応答加速度分布について検討を行った。ここでは天端幅および法面勾配を固定し盛土厚のみを変化させた。各盛土厚での盛土内の応答加速度を図-13, 14, 15 に示している。傾斜地盤上両盛土の場合と同様に盛土の左法肩付近で最も応答加速度が大きく出ている。また応答加速度が盛土底面に概ね平行して増幅していることが判断できる。そこで各図中の法肩から底面に引いた垂線上(黄線部)での応答加速度を比較した。その結果を図-16, 17, 18 に示す。なお、各結果においては同じ盛土厚を有する平坦地盤上盛土の結果も合わせて示している。片盛土における各盛土厚の応答加速度を比較すると平坦地盤上の盛土と同様に盛土厚が大きくなるに従い、盛土内の応答加速度も大きくなることが分かる。次に各盛土厚において平坦地盤上盛土と片盛土の結果を比較すると、片盛土は法肩付近において応答加速度が小さくなる傾向が見られる。しかしいずれの盛土厚においても応答加速度の差は小さく、概ね同様な増幅傾向を示すと言える。このことから、傾斜地盤上の片盛土における応答加速度は、傾斜地盤上の両盛土と同様に盛土底面から法肩にかけて同じ盛土厚を有する平坦地盤上の盛土と概ね同様に増幅することが示唆される。

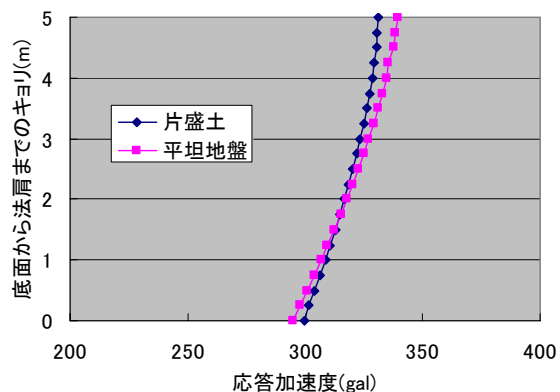


図-16 応答加速度の高さ方向の変化(T=5m)

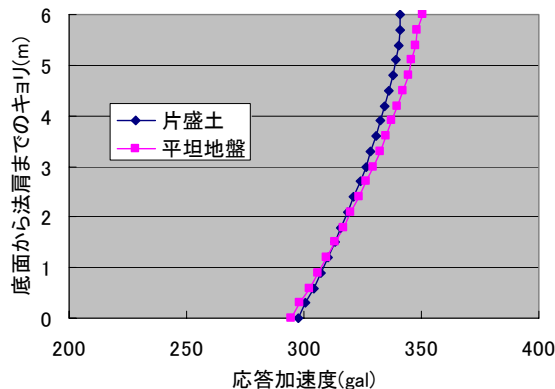


図-17 応答加速度の高さ方向の変化(T=6m)

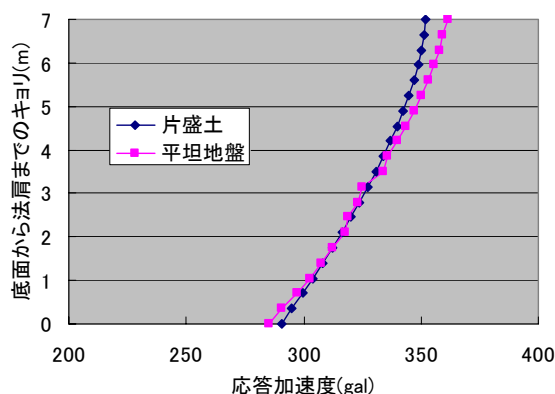


図-18 応答加速度の高さ方向の変化(T=7m)

6. 結論

盛土形状が盛土内の応答加速度の分布特性に及ぼす影響についてシミュレーション解析により検討を行った結果以下のことが分かった。

(1) 平坦地盤上の左右対称な台形盛土においては盛土内の応答加速度は天端に向け概ね底面に平行して増幅していき、また増幅に対しては、盛土厚による影響が大きく、盛土の天端幅、法面勾配による影響は極めて小さい。

(2) 傾斜地盤上の両盛土においては、盛土内の応答加速度は盛土の法肩に向け概ね底面に平行して増幅することが分かった。法肩から盛土底面に引いた垂

線上の応答加速度の分布形状を見た場合、底面の傾斜が大きくなるに従い法肩付近で応答加速度がわずかに小さくなるものの、同じ盛土厚を有する平坦地盤上の盛土と同様な傾向を示す。

(3) 傾斜地盤上の片盛土についても傾斜地盤上の両盛土と同様に盛土内の応答加速度は盛土の法肩に向け概ね底面に平行して増幅し、法肩から盛土底面に引いた垂線上の応答加速度の分布形状を見た場合、同じ盛土厚を有する平坦地盤上盛土と概ね同様な傾向を示す。

今後は入力波や盛土材料による盛土内の応答加速度分布に及ぼす影響についても検討を行い、地震時における盛土の安定性の合理的な評価手法の一環として、盛土内の応答加速度分布に対する指標の作成に務めていきたい。

謝辞：本研究は国土交通省道路局「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」の研究助成を得て実施されたものである。

参考文献

- 1) 江川祐輔・常田賢一・小田和広・中平明憲：道路盛土の地震時すべり安定性・沈下特性の評価およびすべり破壊制御に関する検討，第12回日本地震工学シンポジウム論文集，pp,582-585,2006. 11
- 2) 谷村祐輔，常田賢一，小田和広，江川祐輔：弾塑性極限解析による道路盛土の地震時安定性に関する研究，第12回日本地震工学シンポジウム論文集，pp,734-737, 2006. 11
- 3) 国土交通省道路局：道路構造令 第5条(車線等)，1970.
- 4) 日本道路協会：道路土工 のり面工・斜面安定工指針，pp.161, 2001.

(2007. 6. 29受付)

ANALYTICAL STUDY ON THE EFFECT OF THE SHAPE OF EMBANKMENT ON THE CHARACTERISTICS OF SEISMIC ACCELERATION.

Hidetoshi TSUMA,Ken-ichi TOKIDA,Kazuhiro Oda

The stability of embankment to the earthquake has been often estimated through the circular slip surface analysis in which a seismic coefficient method is applied. In this analysis, the uniform horizontal seismic coefficient in the embankment is usually applied. The authors have been studied the deformation characteristics of the embankment for sliding failure caused by earthquakes and their reinforcement techniques against earthquakes through a series of centrifuge model tests and their numerical simulation. As the results, it was elucidated that the failure characteristics of the embankment strongly depend on the distribution of seismic acceleration in the embankment. Therefore, the development of the estimation method for seismic acceleration in the embankment is required to predict adequately the deformation of embankment for sliding failure caused by earthquakes. In this paper, the effect of the shape of embankment on the characteristics of seismic acceleration is discussed to develop the reasonable estimation method for stability and deformation characteristics for the earthquakes through a series of numerical simulation.