

地盤の不均質性を考慮した小段付き盛土の 地震時破壊挙動に関する研究

山下典彦¹·田中博文²

¹神戸市立工業高等専門学校都市工学科助教授(〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3) E-mail:yamasita@kobe-kosen.ac.jp ²神戸大学大学院自然科学研究科学生 元神戸高専専攻科学生(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1) E-mail:034t128n@y03.kobe-u.ac.jp

小段を有した盛土の安定評価は一般には行われず,その破壊形状はあまり知られていない.本研究では, その破壊挙動を調べるため,単純盛土斜面および小段付き盛土斜面を用いて遠心模型実験を実施し,その 結果を円弧滑り分割法による安定解析結果と比較した.その際,震度法の観点から地震時の安定性に対す る検討を行うため,傾斜震度法モデルを用いて実験を行った.また,盛土の安定性および破壊形状に与え る影響については,地盤の不均質性を考慮した信頼性安定解析の観点から検討した.その結果,小段付き 盛土斜面の破壊形状は円弧では近似できず,また,地盤の不均質性が盛土の破壊形状および安定性の低下 に影響することが確かめられた.

Key Words : centrifuge model test, circler slice method, seismic coefficient method safety factor, reliability analysis

1.はじめに

盛土は,道路盛土や鉄道盛土として広く用いられ ている土木構造物であり,現在の社会基盤を構成す る上で必要不可欠な構造物である.その設計 ¹⁾は, 円弧滑り分割法による安全率を主な評価指標とした 極限平衡原理のもとに行われてきた.さらに,地震 大国である我が国では欠かすことのできない耐震設 計に関しては,地震による影響を静的に評価した簡 易的手法である震度法を円弧滑り分割法に適用した 手法が採用されてきた、兵庫県南部地震以降は、 Newmark 法や動的有限要素法のような動的解析法が 盛んに研究されているが,震度法による設計が実務 では大半を占めたままである.ここで,円弧滑り法 に代表されるように,過去の研究より一般的に盛土 の破壊形状は円弧で近似できるものとされているが, これは単純盛土に関する研究結果によるものであり、 小段を有した盛土に関する研究はあまり行われてお らず,その破壊形状もあまり知られていない.

そこで本研究では、比較的多く施工されていなが ら、あまりその破壊挙動が知られていない小段付き 盛土を対象に、単純盛土を比較対象として遠心模型 実験を行った.その際、地震時の安定性の検討につ いて、一般的に実務設計で用いられている震度法を 適用するため、傾斜震度法モデルを用いた²⁾.さら に,地盤を扱う上で無視することのできない不均質 性が盛土の安定性に与える影響について信頼性設計 法の観点から検討するために,従来のモンテカルロ シミュレーションによる信頼性設計法の問題点を指 摘し,地盤の不均質性のモデル化および臨界円の探 査順序に着目して新たな解析フローを提案した.そ して,実験結果とモンテカルロシミュレーションに よる信頼性設計を考慮した数値解析の結果を比較検 討した.

2. 傾斜遠心模型実験

(1) 実験システムの概要^{3,4)}

遠心模型実験は,有効半径300mm,供試体容器寸 法B120×H100×T40mmの図-1に示す小型のドラム 型遠心力載荷装置を用いて行った.実験システムは, 遠心力載荷装置を基本として図-2のように構成した. この実験システムでは,高速で回転している供試体 を,ストロボビジョンスコープを介してCCDカメラ で撮影することによりモニターに映し出し,その破 壊過程を,肉眼により観測するものである.更に, 実験前後にデジタルカメラを用いて供試体を撮影し, 両者を比較することにより模型盛土の破壊形状を観 察した.この実験システムは,遠心力載荷装置の中 でも小型のものを用いており,多数の供試体について容易かつ安価に実験を行うことが可能である.この特徴を利用して,多数の供試体について実験を行い,その結果を統計的に分析することにより,信頼性安定解析との比較検討が可能となる.

(2) 傾斜震度法モデル

遠心模型実験は,縮小模型に実物と同様の応力状 態を再現するため自重方向に遠心力を作用させるの で,水平方向への静的載荷は不可能である.すなわ ち,遠心模型実験において,水平震度 k_Hに自重を 乗じた k_HW なる水平力を想定した図-3(a)に示す震 度法の力学モデルを再現することは不可能である. そこで,図-3(b)に示すような傾斜震度法モデルと いう,斜面を式(1)で表される傾斜角 だけ傾け,さ らに三平方の定理を適用し自重を(1+k_H²)倍するこ とにより震度法と等価な力学モデルを用いた.円弧 滑り分割法に震度法を適用したときの地震時安全率 は,震度法モデルでは式(2)となり,傾斜震度法モデ ルでは式(3)となる.両モデル間では,傾斜により分 割片の形状が異なるため若干の安全率の差が生じる が,ほぼ同値の安全率が得られることが解析的にわ かっている⁵⁾.

$$\theta = \tan^{-1} k_H \tag{1}$$

$$F = \frac{\sum c \cdot b / \cos \alpha + \sum (W \cdot \cos \alpha - k_H \cdot W \cdot \sin \alpha) \tan \phi}{\sum (W \cdot \sin \alpha - k_H \cdot W \cdot \cos \alpha)}$$
(2)



図-1 遠心力載荷装置の概要

$$F = \frac{\sum c \cdot b / \cos \alpha + \sum (1 + k_H^2) W \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi}{\sum (1 + k_H^2) W \cdot \sin \alpha}$$
(3)

(3) 模型地盤および供試体の作成

従来の遠心模型実験を用いた盛土の研究において は,豊浦砂のみで作成した模型地盤が多く用いられ てきた⁶⁾.しかしながら,これでは十分な粘着力を 有しておらず実地盤を模しているとは言い難い.そ こで本研究では,豊浦砂にカオリン粘土を乾燥重量 比で 9:1 で混合することで粘着力を有する試料を作 成し,実験用試料として用いた.供試体容器と締固 め用具を用いて締固め試験を行い,含水比w=6%, 湿潤単位体積重量 $_{=}15.5 \text{kN/m}^3$ を目標に一層全面 突きにより模型地盤を作成した.この模型地盤より カッターリングで直接カットした試験体を用いて一 面せん断試験を行った結果,粘着力 $c=3.7 \text{kN/m}^2$, 内部摩擦角 =27.3°と得られた.

供試体の模型盛土斜面は,供試体容器内に一層全 面突きにより作成した模型地盤より,斜面形成用具 を用いてカットして形成した.このため,盛土基盤 部と盛土本体の物性値に差がないモデルとなってい る.また,盛土の破壊を詳細に観察するために色砂 により5mm間隔でラインマーカーを配置した.さら に,模型地盤と側面との摩擦については,シリコン オイルを塗布することで低減を図った.



図-3 震度法の力学モデル

(4) 実験モデル

実験には、図-4に示す3種類の模型盛土斜面を用 いた.図-4(a)は斜面勾配1:1.0の単純盛土斜面(タ イプ)、図-4(b)は斜面勾配1:1.2の単純盛土斜面 (タイプ)である.図-4(c)は斜面勾配1:1.0で,法 尻と法肩を結ぶラインが斜面勾配1:1.2となるように, 高さHの斜面の中腹H/2の位置に幅H/5の小段を設け た小段付き盛土斜面(タイプ)である。各タイプ 共に模型盛土高さ H_m は5cmであり,水平震度 $k_{H}=0.15$ を想定して,破線で表される常時モデルよ り半時計方向に斜面を =8.5°傾けた傾斜震度法モ デルとした.

実験中,遠心力は一定の増加率で模型盛土斜面が 破壊するまで漸増させた.すなわち,模型盛土斜面 が破壊したときの遠心力が重力加速度の倍数であり, 盛土斜面の実物への拡大倍率nとなる.

(5) 実験結果と円弧滑り分割法の比較

各タイプ30ケース,計90ケースについて実験を行い,得られたデータを統計的手法を用いて分析した 結果を表 - 1に示す.模型地盤の含水比w,湿潤単位 体積重量 $_{t}$,実物換算高さ H_{p} および安全率 F_{p} につい て,それぞれ平均値 μ ,変動係数 V_{E} ,最大値Maxお よび最小値Minを示している.

a)模型地盤と実物換算高さ

各タイプ共に,模型地盤の含水比wおよび湿潤単 位体積重量,の平均値は,それぞれ目標値の含水比 w=6%,湿潤単位体積重量,=15.5kN/m³に近く, ばらつきもほぼ同様であり,一定した精度で模型地 盤が作成されたことがわかる.

実物換算高さH_pは,模型盛土高さH_mに拡大倍率n を乗じて算出した.単純盛土斜面においては,タイ



(a)タイプ



(b)タイプ 図-4 模型盛土斜面

表-1 実験結果の統計的指標

(b)タイ	プ
----	-----	---

(a)タイプ						
	w (%)	$\frac{\gamma_t}{(kN/m^3)}$	<i>Hp</i> (m)	Fp		
μ	6.15	15.48	4.65	0.86		
V_E	0.017	0.0069	0.079	0.034		
Max	6.32	15.73	5.32	0.93		
Min	5.95	15.24	3.82	0.74		

	w (%)	$\frac{\gamma_t}{(\text{kN/m}^3)}$	<i>Нр</i> (m)	Fp
μ	6.07	15.46	8.23	0.77
V_E	0.014	0.0060	0.080	0.024
Max	6.28	15.64	10.04	0.80
Min	5.95	15.29	7.24	0.72

プの方が斜面勾配が急なため,タイプよりも小さい遠心力で破壊が生じ,実物換算高さH_pの平均値は4.65mおよび8.23mと得られた.小段付き盛土斜面のタイプでは7.20mと得られ,タイプの方がタイプよりも小さな遠心力で破壊した.すなわち,実物換算高さH_pが大きく算定されるほど,幾何学的形状として安定でり,ここではタイプが最も安定な形状であると言える.

b)安全率

安全率F_pは,地盤の不均質性を考慮せず,供試体中で₁, c, が均質であると仮定して,実物換算高さH_pの盛土斜面において震度法モデルの安全率算定式である式(2)を用いて算出した.以下,この地盤の不均質性を考慮していない解析法を信頼性安定解析と区別するために,確定安定解析と称する. (については各ケースのデータを用い,強度定数c,についてはすべてのケースにおいて一面せん断試験より求めた値を用いた.各タイプの安全率F_pの平均値は,0.86,0.77,0.83と若干の差はあるがおよそ0.8であることがわかる.

ここで,破壊時の極限状態における安全率を算定 しているにも関わらず,安全率が1.0を下回ったの は次の要因が考えられる. 遠心力載荷装置におけ る遠心力場の曲率⁷⁾, 遠心力載荷に起因する圧縮 による強度増加, 模型の側面摩擦, フェレニウ ス法を用いた安全率の算定, 地盤の不均質性を考 慮していない確定安定解析による誤差,である.し かしながら,これらの影響は各モデルに同程度に作 用しているため,得られた安全率がおよそ0.8と一 定であるので今回行った実験および解析手法固有の 誤差であると解釈した.特に, の地盤の不均質性 の影響については,後で詳細に検討する.



(c)タイノ					
	w (%)	$\frac{\gamma_t}{(kN/m^3)}$	<i>Hp</i> (m)	Fp	
μ	6.07	15.49	7.20	0.83	
V_E	0.014	0.0079	0.102	0.030	
Max	6.31	15.79	9.18	0.90	
Min	5.94	15.30	6.30	0.77	



図-6 実験における破壊面と臨界円の比較

c)破壊形状

図-5 は,各模型盛土斜面の破壊形状の一例を示している.単純盛土斜面のタイプ およびタイプ においては,1つのすべり土塊として一瞬で破壊が 生じ,その破壊形状は従来から知られているように 円弧に近い形状となった.一方,小段を有したタイ プ においては,下段が破壊した後に上段が破壊す るという2段階の複雑な破壊メカニズムを示し,そ の破壊形状も2つの円弧が繋がったような1つの円 弧では近似できない複雑なものとなった.

図-6 は,実物換算高さ H_nの平均値を用いて確定 安定解析を行った結果得られた臨界円と実験により 得られた破壊形状を常時の水平座標軸に変換して同 じスケール上で表示したものである.破線が確定安 定解析による臨界円,実線が実験結果より得られた 破壊面群を示している.タイプ とタイプ を比較 すると,タイプ は円弧に近いが,タイプ は直線 的であることがわかる.タイプ では,破壊メカニ ズムとして,30 ケースの供試体中,下段が破壊す るとほぼ同時に上段が破壊したケースが 16,下段 が破壊した後しばらくしてから上段が破壊したケー スが 14 とほぼ 1/2 の確率で2 種類の破壊形式が生 じた.しかしながら,この破壊形態は小段の幅や上 下斜面の勾配により変化する可能性がある.また, 実験による破壊面は、各タイプともにケース間で多 少の差を生じているが,その破壊形式は全て斜面先 破壊であり,確定安定解析による臨界円よりも浅い 位置を通過しているが,盛土斜面上部における破壊 の始点は概ね一致している.

d) 地盤のばらつきによる影響

変動係数に着目すると、含水比wではおよそ0.015, 湿潤単位体積重量、ではおよそ0.007であるのに対 し、実物換算高さHpではおよそ0.09,安全率Fpでは およそ0.03であった.ここで、w、、,は供試体全体 で算出した値であり、均質仮定のもとでの値となる. すなわち、w、、,の変動係数に比べてHp、Fpの変動 係数が数倍大きいのは、模型地盤の不均質性が影響 していると考えられる.これは、図-6において破壊 形状にケース間で若干ではあるが差が生じているこ とからもわかる.

3. 信頼性安定解析

(1) 盛土の信頼性安定解析^{8,9,10,11)}

信頼性設計とは、ある設計を行う際に想定される 不確定要素を確率論を用いて処理できるとして、構 造物の想定されるすべての破壊モードに対する合計 の破壊確率を算出するものであり、その安定解析を 信頼性安定解析と称する.そして、その破壊確率が 許容範囲内に収まるように設計を行う.それに対し て、従来行われてきた安全率による設計では、不確 定要素が存在するために、構造物の最も破壊する確 率の高いモードに対して、安全率に余裕を持たして 設計を行う.言い換えれば、信頼性安定解析におい ては、構造物は如何にして破壊に至るかに主眼をお さ、確定安定解析においては、構造物は如何にすれ ば破壊に至らないかに主眼をおいている.

信頼性安定解析の手法は,数値積分によるものと モンテカルロシミュレーションによるものに大別さ れ,種々の構造物に適用した研究が行われている. 盛土のような土構造物の設計を行う場合,地盤の不 均質性を無視することはできず,その不均質性を考 慮した盛土の信頼性安定解析についても、すでに一 連の研究が行われている.地盤の不均質性をあらわ すパラメーターとして,最も一般的に扱われるのは 地盤の強度定数である.従来の盛土の信頼性安定解 析では、まず均質地盤を用いて確定安定解析を行い、 臨界円を求めていた¹²⁾.その上で,得られた臨界円 を固定したまま地盤の強度定数をばらつかせ、モン テカルロシミュレーションを行って破壊確率を算定 していた.また,数値積分による手法を用いた場合 も,同様に臨界円の固定をしていた.この場合,あ る地盤の組み合わせにおいて,固定された臨界円が 最小の安全率を与えるとは限らず,地盤の不均質性 による影響を的確に評価できていない可能性がある.

(2)解析フローの提案¹³⁾

本研究では,盛土の安定性に与える影響の大きい 地盤の強度定数c,のばらつきに着目し,地盤の形 成過程を考慮した不均質地盤モデルを仮定した.さ らに,モンテカルロシミュレーションによる信頼性 安定解析を行うに際し,従来の解析が臨界円を固定 していたことに関して,これは破壊モードの固定を 意味しているので,より信頼性設計の理論に合致す るように,臨界円の固定を行わないように解析フロ ーを修正した.

a)不均質地盤モデル

本研究では,地盤の形成過程を考慮して,図-7に 示すような不均質地盤モデルを用いた.従来の盛土 の信頼性安定解析では,円弧滑り分割法を用いてい たこともあり,地盤のばらつきは分割片ごとに与え られいるものが多かった.しかしながら,実際の盛 土においては,その基礎地盤は堆積作用により水平 方向に地盤定数の高い自己相関を有しており,盛土 本体においても,層ごとに土砂を撒き出して締め固 めて建設することから,基礎地盤同様に水平方向に 地盤定数の高い自己相関を有している.不均質地盤 モデルは,任意の厚さを持った層ごとに強度定数の 平均値と変動係数を与えることにより,分割法の分 割片の幅とあわせて,空間的にばらつきを持ったモ デルを作成できる.

b) ばらつきの要因と解析フロー

盛土の設計における地盤のばらつきの要因を考慮 し,さらに臨界円の固定を行わないために,図-8に 示す解析フローを提案した.盛土の設計をする際に 考慮すべき地盤のばらつきの要因は, 空間的なば らつき, 設計に用いる強度定数と実際に施工され た盛土での強度定数との差,の2つに大別される. 解析フローにおいては,STEP1で*c*,の平均値を変 動係数*V*_Dに従う一様乱数を用いて変動させることに より による影響を,STEP2でSTEP1で生成した 平均値について,さらに変動係数*V*_Gおよび相関係数 に従う2次元正規乱数を用いて*c*, tan 変動させ ることにより による影響を考慮した.さらに,モ ンテカルロシミュレーションの各試行において不均 質地盤を作成し,臨界円の探査を行うことにより, 確実に最小安全率を求めることが可能となり,信頼 性設計の理論にも適合し,より詳細に地盤の不均質 性を考慮できるようにした.

ここで,強度定数の関係をc,tan に関する2次 元正規乱数を用いて表現したのは,安全率の算定式 に着目すると,粘着力cと内部摩擦角 による摩擦 係数tan の間に負の線形関係があるためである. c,tan を確率変数とする2次元正規乱数は,式(4)で 表される同時正規確率密度関数に従う¹⁴⁾.ここで, c, tan はc,tan の標準偏差, μ_c , $\mu_{tan\phi}$ はc, tan の平均値である.解析においては,標準偏差ではな く変動係数を用いて地盤の不均質性の度合を表現し, それらの関係は式(5)で表される.さらに,STEP2 におけるc,tan の変動係数 V_c , V_{tan} は,c,tan で等 しいとして,まとめて V_G として扱った.



$$V_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (x = c, \tan \phi) \tag{5}$$



c)実験との比較

実験結果と信頼性安定解析の比較を可能にするため,次の仮定を用いる.まず,実験のケース間で生じる強度定数の平均値の差を実際の盛土と設計強度との差と見なしてSTEP1で考慮した.さらに,ケース内の模型地盤に生じる強度定数の空間的なばらつきを,実際の盛土に生じる空間的なばらつきと見なしてSTEP2で考慮した.すなわち,図-8の解析フローを用いることにより,実験の各ケースを連続した盛土より抽出した複数の任意断面と考えることができ,実際の盛土を対象とした信頼性安定解析のシミュレーションを行うことができる.



(3)解析条件

信頼性安定解析は、実験結果より得られたパラメ ーターを用いて行った.図-9に各タイプの盛土斜面 の解析モデルの断面を示す.解析モデルは、遠心模 型実験の供試体と同条件とするため、盛土本体と基 礎地盤での物性値の変化がないモデルを用いた.基 礎地盤の厚さは、解析結果に影響を及ぼさないよう に、各タイプの解析モデルとも一定に5.0mとした 地震時安定解析の水平震度は、実験と同様に $k_{H}=0.15$ とした.盛土の物性値には、確定安定解析 と同様に、湿潤単位体積重量 ,は各ケースの平均値 を用いた.強度定数c, は一面せん断試験により 得られた値、c=3.7kN/m²、=27.3°を用いた.

モンテカルロシミュレーションの繰り返し回数は 安定した安全率の分布が得られる1000回とし,地盤 のばらつきを表すパラメーターは,地盤のばらつき の大きさが未知であるために,STEP1における変動 係数 V_D は0.1,STEP2における変動係数 V_G は0.0, 0.1,0.2,0.3の4ケース,相関係数 は-0.5とした. ここで, V_G =0.0とは地盤がばらついていない状態で あり,確定安定解析と同義である.また,不均質性 地盤の要素のサイズは,分割片の幅を1.0m,層厚 を1.0mと仮定して,1.0×1.0mの正方形メッシュと した.

(4)解析結果

a) 臨界円のばらつき

臨界円群の一例として,図-10にタイプ,図-11 にタイプのN=1~100の臨界円を示す.V_G=0.0の場合,地盤は均質であるので臨界円は唯一求まり,その形状は確定安定解析により求めた図-6の臨界円と同じである.それ以降は,V_Gが増大するにつれて,臨界円群のばらつきの幅も大きくなり,不均質性の



図-9 解析モデルの断面

影響により盛土の破壊形状がばらつくことが解析的 にわかった.ここで、単純盛土斜面のタイプ にお いては、その破壊形式はほぼ全てが斜面先破壊とな り、実験結果とよく一致している.一方で、小段付 き盛土斜面のタイプ では、ほぼ全てが盛土の上段 から斜面先を通過する大きな斜面先破壊となりタイ プ と同様の傾向を示したが、実験で現れたような 小段の下段を通過する小さな臨界円は現れず、実験 結果とは異なる結果となった.

b)安全率群のばらつき

本研究で行った信頼性安定解析では,従来の安全 率による設計法と比較するため,破壊確率ではなく, 得られた安全率群に着目し,そのばらつきを統計的 に分析した.図-12は,地盤の強度定数の変動係数 V_{G} と安全率群の変動係数 V_{F} の関係を示したものであ る.安全率群の変動係数VFは,地盤の強度定数の変 動係数V_Gが増加するにつれて増加し,V_G=0.1~0.3 の範囲においては,ほぼ比例関係にある.また,実 物換算高さH。が大きいほど安全率の変動係数VFは小 さくなっている.図-13は,地盤の強度定数の変動 係数 V_G と安全率比 F_{VG}/F_0 の関係を示している.安全 率比 F_{VG}/F_{θ} とは,信頼性安定解析により求められた 各地盤の強度定数の変動係数V_Gにおける安全率群の 平均値F_{VG}を,確定安定解析により求められた安全 率F₀で除したものである.一点鎖線は,比較のため に示した臨界円を固定してから地盤の強度定数をば らつかせる従来の信頼性安定解析を行った解析結果 である.この場合,地盤の強度定数の変動係数 V_G に よらず,安全率比 F_{VG}/F_0 は1.0のままである.これは,



臨界円を固定しているために地盤の不均質性が的確 に評価されていないためである.一方,新しく提案 した解析フローでは,安全率比 F_{VC}/F_0 は地盤の強度 定数の変動係数 V_G に比例してほぼ一定の割合で低下 しており,地盤の不均質性を考慮することにより安 全率が低下することがわかった.その減少率は,各 タイプで大差はなく, V_G =0.3のときにおよそ10% である.

c)実験結果との比較

図-12および図-13を用いて,実験に用いた模型地 盤の強度定数のばらつきを推定する.まず,実験結 果の確定安定解析より得られたタイプ,,の 安全率 F_p の変動係数 V_E 0.034,0.024,0.031をそれ ぞれ図-12にプロットすることにより,模型地盤の 強度定数の変動係数 V_G がそれぞれ0.19,0.19,0.23 であると推定される.次に,図-13において,模型 地盤の強度定数の変動係数 V_G の推定値をプロットす ることにより,安全率比 F_{VG}/F_{θ} はそれぞれ0.94, 0.92,0.93と求められる.すなわち,実験における 盛土は地盤の不均質性の影響により,安全率で評価 すると確定安定解析の安全率 F_{θ} と比較しておよそ 7%低下することがわかる.

(5) 信頼性安定解析の実務への適用

本研究におていは,信頼性安定解析を行うに際し, モンテカルロシミュレーションによる手法を用いた. しかしながら,実際の盛土の設計において,地盤の 不均質性を考慮するためだけに,長時間の解析時間 を必要とするモンテカルロシミュレーションを行う ことは非現実的である.ここで,盛土の形状によら ず,安全率比Fvc/Foと地盤の強度定数の変動係数VG は比例関係にあることから,モンテカルロシミュレ ーションを設計の度に行わずとも,簡易的に地盤の 不均質性を考慮した安全率を算定することが可能と なることを示している.すなわち,地盤の強度定数 の変動係数V_Gさえ推定することができれば,確定安 定解析により得られた安全率F₀に安全率比F_{VG}/F₀を 乗ずることにより,地盤の不均質性を考慮した安全 率を算定することができる.

4.結論

小段付き盛土の地震時破壊挙動を検討するため, 傾斜震度法モデルを用いて遠心模型実験を行った. その際,地盤の不均質性が,盛土の破壊形状および 安定性に与える影響を考慮するため,地盤の成因を 考慮した不均質地盤モデルを用いた新たな解析フロ ーを提案し,信頼性安定解析を行った.それらの結 果を安全率を中心に比較検討することにより,以下 の結論が得られた.

- 遠心模型実験により地震時盛士の破壊現象を再 現した結果,単純盛土斜面では円弧状の破壊が生 じたが,小段付き盛土斜面では下段が破壊した後 に上段が破壊するという複雑な破壊が生じ,円弧 ではその破壊形状を近似できないことがわかった.
- 実験結果を円弧滑り分割法による確定安定解析 法を用いて検証した結果,全てのタイプにおいて 1.0を大きく下回る安全率が得られた.しかしな がら,単純盛土斜面と小段付き盛土斜面において, ほぼ同値の安全率が得られたことから,破壊形状 の近似はできなくとも,安定性の評価は可能であ るといえる.詳細な検討を行うには,破壊メカニ ズムに合った安定解析方法を用いるべきである.
- 3) 実験結果より得られたパラメーターを用いて, 信頼性安定解析を行った結果,模型地盤の強度定 数の変動係数は 0.2 程度であると推定された.また,確定安定解析と比較して,この場合の安全率 は約7%低下することがわかった.
- 4) 信頼性安定解析を行った結果,地盤の不均質性が盛土の破壊形状および安定性の低下に影響することがわかった.また,地盤の強度定数の変動係数VGに比例して,ほぼ一定の割合で安全率が低下していることがわかり,モンテカルロシミュレー

ションを行わずとも,地盤の不均質性を考慮した 設計が可能であることがわかった.

参考文献

- 1) (社)日本道路協会:道路土工・のり面工・斜面安定工 指針, pp.164-180, 1999.
- 2) 森洋,草野郁,新井曜子:遠心場準静的傾斜土槽実験 による盛土斜面の耐震性評価,第11回日本地震工学シ ンポジウム論文集,pp.919-924,2002.
- 3) 高田直俊,日下部治:講座「遠心模型実験」3.原理, 土と基礎, Vol.35, No.12, pp.89-94, 1987.
- 4) 寺師昌明,藤井斉昭:講座「遠心模型実験」4.遠心 模型実験装置の基本システムと計測システム,土と基 礎, Vol.36, No.1, pp.79-86, 1988.
- 5)山下典彦,田中博文:信頼性設計法を用いた斜面安定 予測に関する研究,第36回地盤工学研究発表会, pp.2309-2310,2001.
- 6) 風間基樹,稲富隆昌,飯塚栄寿,永吉貴行:飽和砂地 盤上の盛土の地震時安定性に関する遠心力模型振動実 験,土木学会論文集,No.547 / -36,pp.107-116, 1996.
- 7) 菊沢正裕,長谷川高士,内田一徳,片平辰義:層状斜 面の遠心模型実験と安定解析,土木学会論文集, No.430 / -15, pp.49-58, 1991.
- 8) 松尾稔:地盤工学-信頼性設計の理念と実際-, 1984.
- 9) 土質工学会:土質基礎工学ライブラリー28 土質基礎 の信頼性設計,1985.
- 10) 星谷勝,石井清:構造物の信頼性設計法,1986.
- 11) (社)土質工学会:土質データーのばらつきと設計, 1988.
- 12)山下典彦,田中博文:地盤の不均質性を考慮した地震 時斜面の信頼性安定解析に関する研究,第37回地盤工 学研究発表会,pp.2073-2074,2002.
- 13) 土田孝,湯怡新:港湾構造物における最適な円弧すべ りの安全率,土木学会論文集,No.596/ -43,pp.295-306,1998.
- 14)伊藤学,亀田弘之:土木・建築のための確率・統計の 基礎, pp.133-145, 1977.

(2003.6.30受付)

A STUDY OF THE FAILURE BEHAVIOR DURING THE EARTHQUAKE OF THE EMBANKMENT WITH A BANQUETTE IN CONSIDERATION OF THE HETEROGENEITY OF THE GROUND

Norihiko YAMASHITA, Hirofumi TANAKA

Centrifugal model test was conducted to investigate the destructive action of the embankment with a banquette using an tiliting seismic coefficient method model. The result was compared with the stability analysis due to the circler slice method. Moreover, the influence which it has on the stability and destructive form of the embankment was considered from a viewpoint of the reliability analysis in consideration of the heterogeneity of the ground. Consequently, it was confirmed that cannot approximate the destructive form of the embankment with a banquette with a circle, and the heterogeneity of the ground influences the destructive form of embankment and the fall of stability.