

粘性土地盤上盛土の耐震安定性

長岡技術科学大学 (正) 大塚 悟
名古屋大学大学院 (学) 山田英司
NTT (正) 寺川邦明
名古屋大学 (正) 松尾 稔

1. はじめに

地震によって生じる地震荷重は地震の加速度と構造物の質量を乗じた慣性力と考えることができる。地震の加速度を重力加速度で無次元化した工学的な指標が「震度」である。地震の加速度は図.1に示すように時間とともに刻々と変化する。したがって震度も本来時間的に変動するが、これをある値に置き換えて構造物の重量に乗じて静的な地震荷重とする設計方法が「震度法」である。震度法は簡便な耐震設計法であるが、構造物の安定性に影響を及ぼす入力地震波の加速度履歴や地盤・構造物の動的特性を考慮できない問題点がある。また、地震の加速度を静的荷重に置き換えても、荷重を一方向ではなく載荷方向を変えると構造物の安定性が低下する繰り返し載荷の効果があり、問題は多い。本論文ではシェイクダウン定理に基づいて、

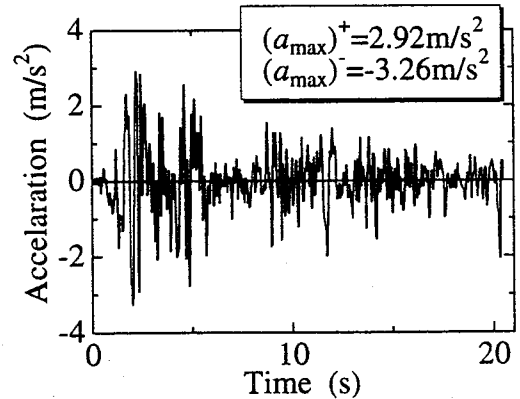


図.1 地震の加速度履歴

- 1) 震度法に基づくものの、地震荷重の作用方向の変化を考慮した静的安定解析
 - 2) 地震の動的な加速度履歴や地盤・構造物の動的特性を考慮した安定解析
- という2つの解析手法を用いて地震に対する安定性評価を行う。本論文では粘性土地盤上の盛土を事例として、2)の解析を主に、入力地震波の周期による盛土安全率の変化を調べ、1)の静的安定解析と比較・考察する。

2. シェイクダウン定理に基づく土構造物の安定解析

シェイクダウン解析(Koiter,1960)の基本定理である Melan の定理に基づいて外荷重に対する土構造物の安定性を評価する。Maier(1969)に従い降伏関数には区分線形降伏関数を用いる。Melan の定理は「荷重領域 Δ 内の任意の荷重の繰り返しに対して物体の至る所で降伏関数

$$f(\sigma(t)) = N^T \sigma(t) - K = N^T (\sigma^E(t) + \bar{\sigma}^R) - K \leq 0 \quad (1)$$

を満足する任意の時間に無関係な残留応力 $\bar{\sigma}^R$ が見出される場合に、物体は最終的にこの荷重の繰り返しに対して弾性応答に落ち着く(シェイクダウンする)ことを保証する。ここに、 N : 線形降伏関数の外向き法線ベクトルの集合マトリックス、 K : せん断力の大きさを表すベクトル、 $\sigma(t)$: 可能な任意の応力、 $\sigma^E(t)$: 弾性応力である。弾性応力 $\sigma^E(t)$ 、残留応力 $\bar{\sigma}^R$ は図.2に示すような領域 Δ で示される荷重範囲の中の任意荷重 $F(t)$ に対して次のつり合い式を満足する。

$$B^T \sigma^E(t) = F(t), \quad B^T \bar{\sigma}^R = 0, \quad F(t) \text{ in } \Delta \quad (2)$$

Stability Evaluation of Embankments on Clayey Ground against Earthquakes.

S.Ohtsuka(Nagaoka University of Technology), E.Yamada(Nagoya University), K.Terakawa(NTT) and M.Matsuo(Nagoya University).

土構造物がシェイクダウンする限界荷重領域を図.2に示すように $\alpha\Delta$ (α :荷重係数)とすると, Melan の定理は荷重領域 Δ に関する荷重係数 α の最大化問題に帰着する。

$$s = \max \left\{ \alpha \left| \begin{array}{l} N^T(\alpha\sigma^E(t) + \bar{\sigma}^R) - K \leq \mathbf{o} \\ B^T\sigma^E(t) = F(t), \quad B^T\bar{\sigma}^R = \mathbf{o}, \quad F(t) \text{ in } \Delta \end{array} \right. \right\} \quad (3)$$

式(4)に示すベクトル M を定義すると, 荷重領域 Δ 内で載荷方向および大きさが繰り返し変化する外荷重 F の影響は全てこのベクトル M によって表すことができる。

$$M = \max\{N^T\sigma^E(t) \mid B^T\sigma^E(t) = F(t), \quad F(t) \text{ in } \Delta\} \quad (4)$$

式(3)と式(4)より, Melan の定理は次式に示す線形計画問題になる。

$$s = \max\{\alpha \mid \alpha M + N^T\bar{\sigma}^R - K \leq \mathbf{o}, \quad B^T\bar{\sigma}^R = \mathbf{o}\} \quad (5)$$

したがって土構造物の外荷重に対する安全率は, 式(5)から求められる荷重係数 α によって与えられる。

3. 静的安定解析による盛土の耐震安定性評価

3.1 地震荷重の作用方向の変化を考慮した静的安定解析

はじめに地震荷重を外荷重としてシェイクダウン定理に基づいて土構造物の安定性を評価する。地震荷重は震度法に基づいて地震の加速度を静的荷重に置き換える。しかし実際の地震では, 加速度の方向は時刻とともに変化しているため, 地震荷重の作用方向も時刻とともに変動している。したがって地震荷重を一方向に単調載荷する静的荷重と考える震度法では, 載荷方向を変えると構造物の安定性が低下する繰り返し載荷の効果を反映することができない。この地震荷重の繰り返し載荷の効果を考慮するために図.2の模式図に示すある荷重領域 Δ を考え, その領域内で載荷方向およびその大きさが繰り返し変化する静的荷重として地震荷重をモデル化する。この場合に地震に対する土構造物の安全率は, 荷重領域を α 倍した領域 $\alpha\Delta$ 内の任意荷重の繰り返しに対して土構造物が崩壊する荷重係数 α によって与えられる。本論文では震度法に対応する地震荷重を単一方向に載荷する方法を Method A1, 地震荷重の作用方向の繰り返し変化を考慮する場合を Method A2 と呼ぶ。

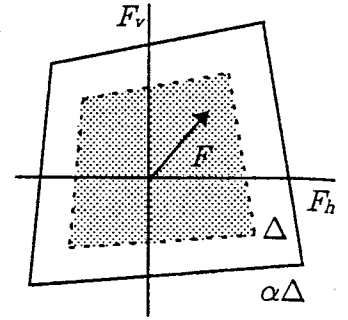


図.2 荷重領域

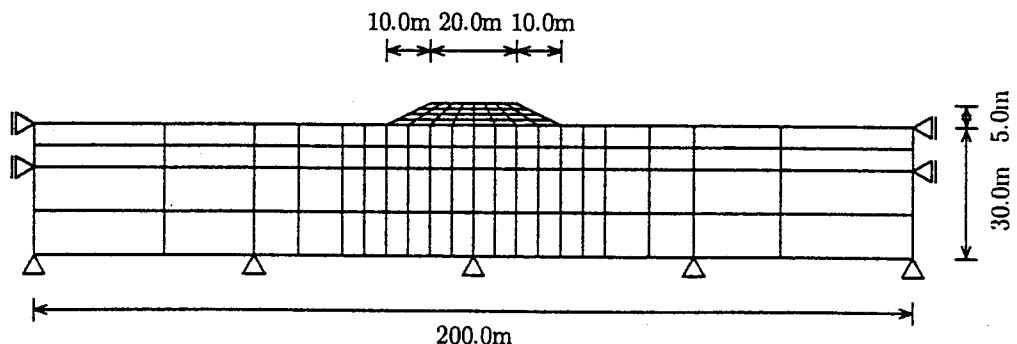


図.3 有限要素メッシュと境界条件

3.2 地震荷重の繰り返し載荷が盛土安定性に及ぼす影響

震度法の考え方に基づく静的安定解析を用いて, 地震荷重の作用方向の繰り返し変化が盛土安定性に及ぼす

影響を調べる。図.3に示す盛土について地震荷重が単一方向のみに作用する場合 (Method A1) と、地震荷重の作用方向および大きさの繰り返し変化を考慮する場合 (Method A2) の盛土安全率を比較する。地盤・盛土は Mises 材料 (粘性土) と仮定し、解析定数を表.1 に示す。表.2 は盛土に作用する水平加速度の作用方向と大きさを変化させて、載荷方向の変化による盛土安全率の差異を示す。地震荷重を水平加速度 $a_x=2.94\text{m/s}^2$ による静的荷重ととらえる場合 (Method A1) に、粘性土地盤上の盛土の安全率は $F_s=2.263$ である。水平加速度方向の反転を考慮 (Method A2) すると盛土の安全率は減少し、正負の大きさが等しい場合の安全率は約 30% 減少する結果となった。この結果は耐震安定性評価において従来の震度法に基づいて静的安定解析を行う場合でも、単一方向に作用する地震荷重だけを扱うのではなく、地震荷重の大きさやその作用方向の繰り返し変化を考慮する必要性を示している。

次に水平方向および鉛直方向の加速度を考慮して、表.3 に示す 5 つの荷重領域を設定した。Case① は水平加速度のみであり、慣用の「震度法」に対応し、Case②～Case⑤ では水平方向・鉛直方向加速度に対する荷重領域を設定している。図.4 は粘性土地盤の場合における Case①～Case⑤ に対する極限シェイクダウン領域が示されている。シェイクダウン領域における可能な水平方向加速度に着目すると、慣用解析 Case① と Case②,③ との差異はほとんど見られないのに対して、Case① と Case④, ⑤ には 2 割ほどの差異がある。これは粘性土地盤の場合、鉛直方向加速度に対して水平方向加速度の繰り返し変化が盛土の安全率の低下に大きく影響することを表している。

表.1 解析定数

E	1000.0 kN/m ²	ν	0.33333
γ_t	19.6 kN/m ³	γ_w	9.8 kN/m ³
c_u	盛土	70.7kN/m ²	
	地盤	0 ≤ z ≤ 10(m) : 141.1kN/m ²	
	地盤	10 ≤ z ≤ 30(m) : 212.1kN/m ²	
		z: 地表面からの深さ	

表.2 水平方向の静的繰り返し荷重に対する安全率

解析方法	水平加速度 (m/s ²)	安全率 F_s
Method A1	$a_x = 2.94$	2.263
Method A2	$-0.98 \leq a_x \leq 2.94$	2.263
	$-1.96 \leq a_x \leq 2.94$	2.025
	$-2.94 \leq a_x \leq 2.94$	1.687
	$-3.92 \leq a_x \leq 2.94$	1.446
	$-4.90 \leq a_x \leq 2.94$	1.266

表.3 荷重領域

	水平加速度 (m/s ²)	鉛直加速度 (m/s ²)
Case①	$a_x = 2.94$	$a_y = 0$
Case②	$0 \leq a_x \leq 2.94$	$-2.94 \leq a_y \leq 0$
Case③	$0 \leq a_x \leq 2.94$	$-2.94 \leq a_y \leq 2.94$
Case④	$-2.94 \leq a_x \leq 2.94$	$-2.94 \leq a_y \leq 0$
Case⑤	$-2.94 \leq a_x \leq 2.94$	$-2.94 \leq a_y \leq 2.94$

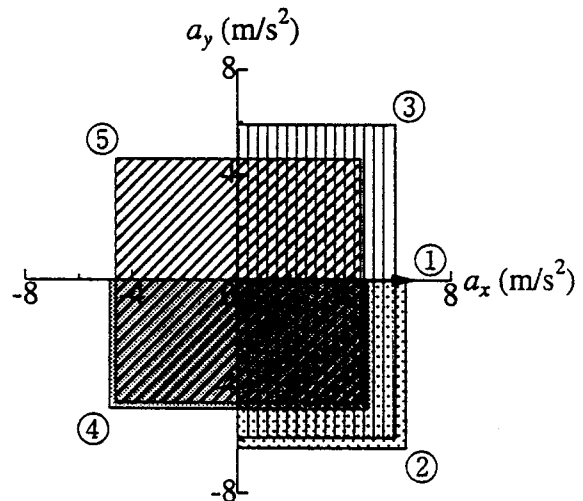


図.4 シェイクダウン領域

4. 加速度履歴を考慮した盛土の耐震安定性評価

4.1 地震の加速度履歴を考慮した安定解析

静的荷重に対する土構造物の極限状態は荷重～変位関係が不定になる状態として定義される。しかしこの定義では図.5 に示したような加速度履歴を考慮した地震荷重の場合に安定性を定義することは難しい。なぜなら動的

荷重の場合には、加速度項により荷重に対して変形が常に定義されるので、変形が不定になる状態を用いて土構造物の安定性を定義することができないためである。本論文ではシェイクダウン定理を応用して、地震に対する盛土の安定性を評価する。図.5に示す地震の加速度履歴全体を1つの連続した荷重と考える。この荷重を載荷してから十分な時間が経過した後に、再度この荷重を仮想的に繰り返し載荷する。この荷重の仮想的な繰り返しに対して最終的に弾性応答(シェイクダウン)する場合に土構造物を安定、塑性変形が際限なく生じる場合に不安定と定義する。本論文では地震の加速度履歴を考慮した安定解析を Method B と呼ぶ。動的荷重の繰り返しに対するシェイクダウン定理の応用に関しては Ho (1972) の研究に基づく。

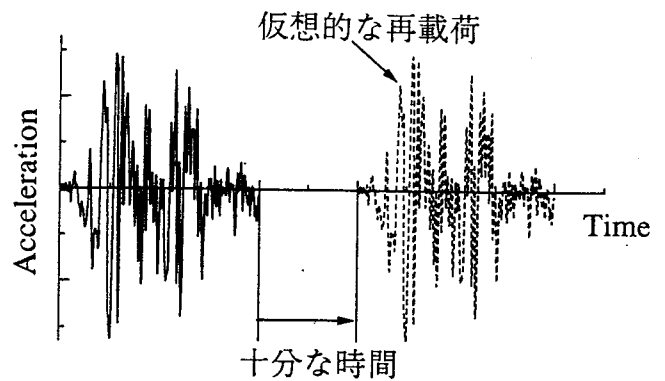


図.5 地震の加速度履歴

4.2 入力地震波の周期による盛土安全率の変化

地震に対する盛土の安定性は1) 入力地震波の加速度履歴、2) 地盤・盛土のダンピング特性および剛性などの動的特性、の影響を受ける。図.3(有限要素メッシュ及び境界条件) および表.1(解析定数) に示す盛土に対して、入力地震波として基盤の水平方向に最大加速度 $a_x=2.94\text{m/s}^2$ の正弦波加速度を25波加振する。その正弦波加速度の周期の変化による盛土の安全率への影響を数値解析によって調べ、さらに地盤・盛土のダンピング特性、および剛性によって盛土安全率～入力地震波周期関係がどのように変化するかを調べた。地盤・盛土のダンピングには Rayleigh Damping のモデル(減衰マトリックス $C = \alpha M + \beta K$, M : 質量マトリックス, K : 剛性マトリックス)を用い、ダンピング係数は $\alpha = 0.3, \beta = 0.0$ (減衰定数 $h=19.4\%$) および $\alpha = 1.0, \beta = 0.0$ ($h=64.6\%$) と設定した。

(1) 盛土安全率～入力地震波の周期関係

図.6に盛土安全率～入力地震波の周期関係を示す。図.6には静的解析を用いた単一方向載荷(Method A1)および地震荷重の作用方向の変化を考慮した場合(Method A2)の安全率も示している。正弦波加速度の周期により盛土安全率は変化している。全般に正弦波加速度が短周期の時は安全率は大きく、長周期になると安全率は低下する傾向があり、最終的には地震荷重の作用方向の変化を考慮した静的安定解析(Method A2)による安全率に漸近することが分かる。

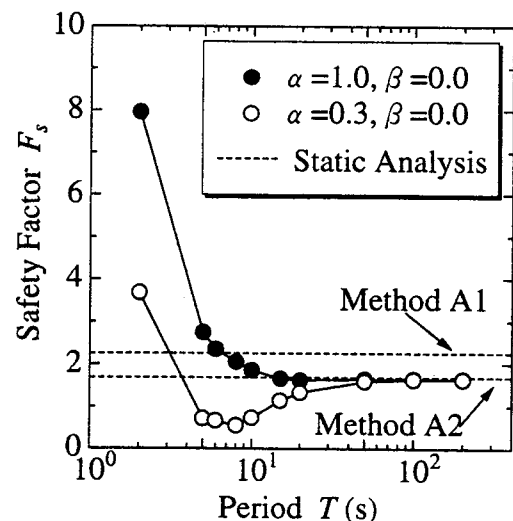


図.6 盛土安全率～周期関係

(2) 地盤・盛土のダンピング特性の影響

地盤・盛土のダンピング係数を変化させると、ダンピング係数の大きい場合 ($\alpha = 1.0, \beta = 0.0$) には安全率は正弦波加速度の周期に応じて単調に減少するが、ダンピング係数が小さい場合 ($\alpha = 0.3, \beta = 0.0$) には、周期 $T = 4 \sim 50$ s において安全率が低下して静的安定解析(Method A2)の結果を下回る結果が得られた。これは地盤・盛土の固有周期 $T=8.1$ s 付近で共振により振動が増幅されて安全率が低下したためと考えられ、入力地震動の動的特性によっては震度法に基づく静的耐震安定解析が過大な安全率を与えることを示している。また長周期のときにはダンピング係数の値に関わらず一定値(Method A2 の安全率)に落ち着いており、妥当な解を与えている。

(3) 地盤・盛土の剛性(弾性係数)の影響

図.7に地盤・盛土の弾性係数を変化させたときの盛土の安全率～入力地震波の周期関係を示す。地盤・盛土の弾性係数に応じて、入力加速度の周期による安全率の低下過程は大きく異なる。弾性係数が小さいと安全率は単調に減少するのに対して、弾性係数が大きくなると周期によっては安全率が静的安定解析 (Method A2) の結果を下回るほど低下する場合が生じる。地盤の盛土の剛性が高い場合、ある周期において振動の増幅による安全率の低下が生じている。最小安全率を与える入力加速度波の周期は弾性係数の増加に伴って減少する傾向がある。正弦波加速度が短周期の時は剛性が高い(弾性係数が大きい)ほど安全率が小さくなる傾向がみられる。長周期になると剛性による影響が小さくなり、最終的には盛土安全率は剛性によらず一定値に、すなわち加速度の反転を考慮した静的安定解析 (Method A2) の結果に漸近する。

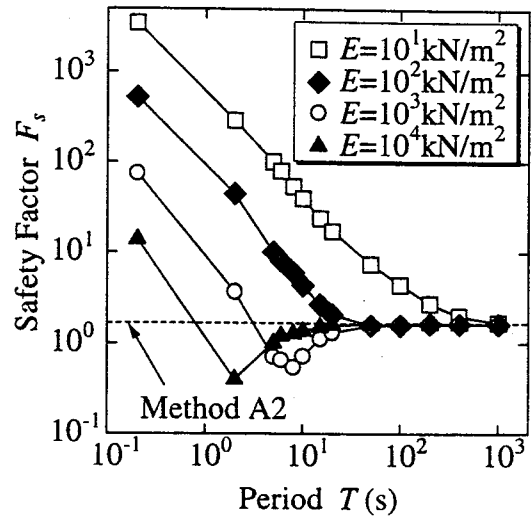


図.7 弾性係数による安全率～周期関係

5. 不規則波に対する盛土の耐震安定性評価

図.3に示す盛土について、過去に観測された地震の加速度履歴(図.8(a)～(d))を基盤に入力し、地震に対する盛土の安定性について考察を行う。ここでは十勝沖地震(1968年)の際に八戸で観測されたN-S方向, E-W方向の加速度履歴(図.8(a)(b)), Imperial Valley 地震(1940年)の際に El Centro で観測されたN-S方向の加速度履歴(図.8(c)), 日向灘地震(1968年)の際に板島橋で観測された橋軸方向の加速度履歴(図.8(d))を用いた。

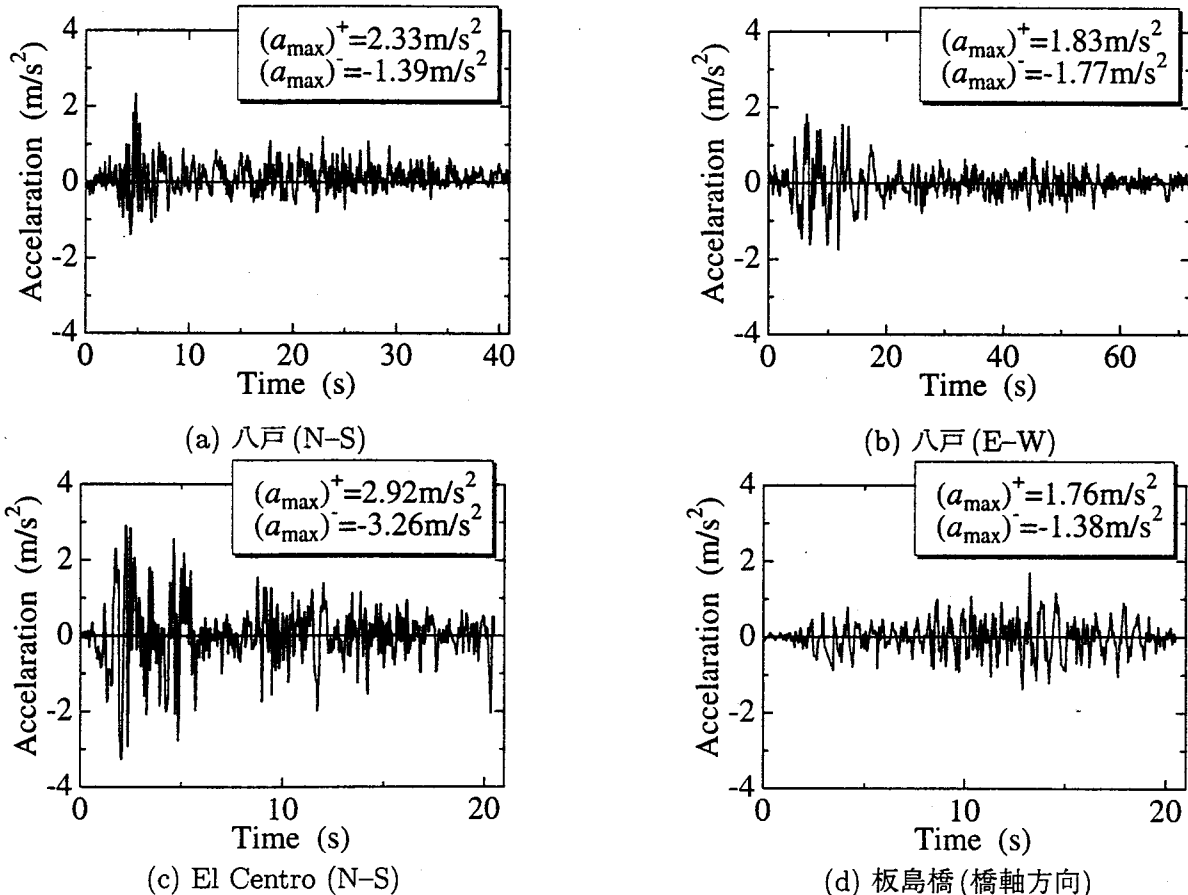


図.8 地震の加速度履歴

静的安定解析による盛土の安全率は、最大加速度が最も大きい(c) El Centro 波(N-S)の場合に最小となる。単一方向に地震慣性力が作用する場合(Method A1)と加速度方向の反転を考慮する場合(Method A2)を比較すると、加速度方向の正負の変化が最も大きい(b)八戸波(E-W)の場合に安全率の低下は最大となり、粘性土では約25%低下する。

表.4 地震波に対する盛土の安全率

地震波	Method A1	Method A2	Method B
(a)	2.86	2.67	10.52
(b)	3.64	2.76	2.98
(c)	2.04	1.61	9.53
(d)	3.92	3.22	13.11

地震の動的な加速度履歴を考慮した安定解析(Method B)では、地盤・盛土のダンピング係数は $\alpha = 0.1, \beta = 0.0$ (減衰定数 $h=6.5\%$)に設定した。地震の加速度履歴によって盛土安全率は大きく異なる。最も安全率が小さいのは(b)八戸波(E-W)を入力した時である。この八戸波(E-W)の最大加速度は他の地震加速度履歴と比べて最小である。この事例は地震に対する盛土の安定性評価において、最大加速度の大きさ以外に加速度履歴の影響が大きいことを示している。また、静的解析(Method A1,A2)と地震の加速度履歴を考慮した安定解析(Method B)の結果を比較すると、(b)八戸波(E-W)を除いてMethod Bの安全率は静的解析の結果より大きくなった。しかし、静的解析の安全率より小さくなる地震波の事例もあり、静的解析は地震波特性、地盤・盛土の固有周期、ダンピング特性に応じて安全側および危険側の値を与える。

6. おわりに

本論文で得られた結論を箇条書きにする。

- 1) 地震の加速度方向の繰り返し変化が及ぼす盛土の安定性への影響について、震度法に基づく静的安定解析(Method A2)を用いて明らかにした。加速度方向の変化を考慮すると粘性土地盤上の盛土の安全率は約30%低下した。
- 2) 地震の加速度履歴を考慮した安定解析手法(Method B)を新しく提案した。粘性土地盤上盛土の基盤に正弦波加速度を入力して盛土の耐震安定性を調べ、本解析手法による耐震安定性評価は入力地震波特性および地盤・盛土の動的特性を反映することを明らかにした。すなわち、盛土の安全率は正弦波加速度の周期とともに変化するが、長周期になると加速度方向の変化を考慮した静的安定解析(Method A2)による安全率に漸近する。地盤・盛土のダンピング係数が小さい場合(減衰定数 $h=19.4\%$)、地盤・盛土の固有周期付近の加速度周期において盛土の安全率が震度法に基づく静的安定解析(Method A2)による安全率を下回る。
- 3) 実際に過去の地震で観測された加速度履歴を用いて盛土の耐震安定性を評価した。従来の震度法では考慮できない地震の加速度履歴が土構造物の安定性評価に重要な役割を果たし、地震の加速度履歴の影響が提案する解析(Method B)によって十分取り入れられる。

参考文献

- 1) W.T.Koiter(1960) : General theorems for elastic plastic solids, Progress of solid mechanics, Vol.2, North Holland Press. 2) G.Maier(1969) : Shakedown theory in perfect elastoplasticity with associated and non-associated flow-laws:a finite element linear programming approach, Meccanica Vol.4, No.3, pp.1-11. 3) H.-Sh.Ho(1972) : Shakedown in Elastic-Plastic Systems Under Dynamic Loadings, Journal of Applied Mechanics, Transactions of ASME, pp.416-421. 4) 寺川ら(1996) : 地震慣性力の静的繰り返し変化を考慮した盛土の耐震安定性評価, 第31回地盤工学会研究発表会(投稿中). 5) 山田ら(1996) : 地震動の加速度履歴を考慮した盛土の耐震安定性評価, 第31回地盤工学会研究発表会(投稿中).