

軟弱粘性土地盤上の盛土における 地震時の安定性評価手法に関する研究

研究第一部 研究員 石原吉雄

1. はじめに

軟弱粘性土地盤において盛土の安定性を検討するには、円弧すべり面法により安全率を求めるのが一般的である。地震が発生した場合を考えると、盛土は一般には通常の構造物に比べて復旧が比較的容易であること、盛土後の時間経過に応じて地盤の強度が増し安定性に余裕が得られることなどの理由から、通常の場合は地震に対する配慮は行わないことが多い。しかし、重要な構造物に近接していたり、被害が大きいたことが予想される場合で、特に軟弱で地震時に著しい変状を生じる可能性のある粘性土地盤では、地震時に対する検討を行っておくことが望ましい。

現在のところ、軟弱粘性土地盤において地震時の盛土の安定性を検討するには、静的強度を用い、地震荷重の影響を水平震度によって考慮した円弧すべり面法により行うのが一般的である。この時、最小安全率を与える円弧は軟弱粘性土地盤の基底を通る深い大規模な円弧となる場合がある。これは、一般に粘性土地盤においては地震加速度が深度とともに減少すること*1

や、過去の被災事例からこうした大規模な円弧でのすべり破壊を生じた例が少ないと指摘されていることなどと矛盾する。したがって、こうした動的な現象を静的な現象として評価する手法に問題があると考えられる。

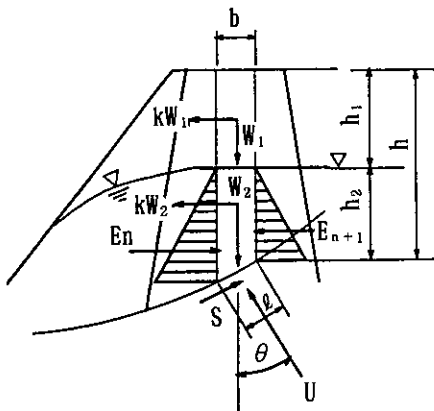
一方で、実際に軟弱粘性土地盤上の盛土の構造物全体の地震時安定性について実証的に調べられた例はきわめて少なく、不明のことが数多く残されている。

以上のことから、本研究では、円弧すべり面法の適用上の問題点を整理し、地震時の応答特性について検討を行い、1つの方法として深度方向に震度を低減させる適用方法を検討した。また、地震時の安定性評価手法の円弧すべり面法の適用方法の今後の課題についてまとめた。

2. 地震力を考慮した安定解析の事例

軟弱粘性土地盤上の盛土の地震力を考慮した安定解析は、以下に示した震度を考慮した円弧すべり面法により安全率を算出するのが一般的である*2。この場合、震度は盛土、基礎地盤共に深度方向に一定に考慮している。

$$F_s = \frac{\sum \{(C \cdot l + N - U - Ne) \cdot \tan \phi\}}{\sum (T + Te)}$$



ここに、 F_s : 安全率

N : 各スライスのすべり面上に働く荷重の垂直分力

T : 各スライスのすべり面上に働く荷重の接線分力

U : 各スライスのすべり面上に働く間隙水圧

Ne : 各スライスのすべり面上に働く地震時慣性力の垂直分力

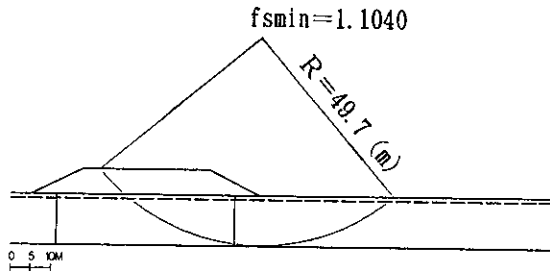
Te : 各スライスのすべり面上に働く地震時慣性力の接線分力

ϕ : 各スライスのすべり面における材料の内部摩擦角

C : 各スライスのすべり面における材料の粘着力

l : 各スライスのすべり面の長さ

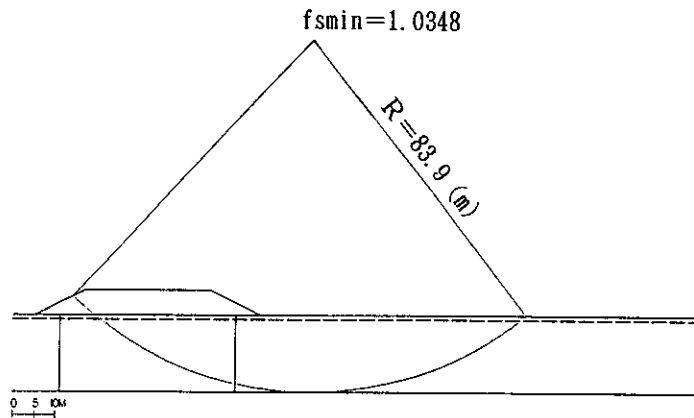
ケース① 軟弱粘性土地盤厚さ20m



盛土モデル
天端幅50m、高さ10m
土質定数

層NO.	γ (g/cm^3)	c (t/m^2)	ϕ ($^\circ$)	k ($c=1.2$)	$\Delta u/\sigma_c'$
1	172	100	25.0	0.00	0.00
2	167	171	0.0	0.14	0.00
3	167	5.00	0.0	0.09	0.00
4	180	0.00	40.0	0.00	0.00

ケース② 軟弱粘性土地盤厚さ30m



ケース③ 軟弱粘性土地盤厚さ50m

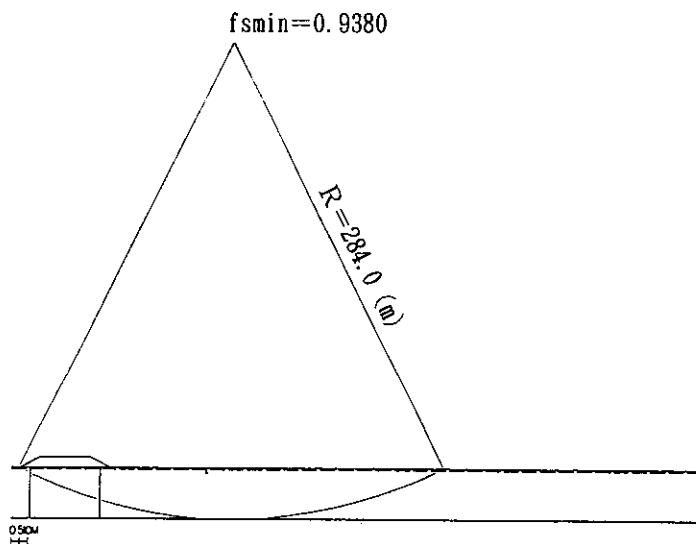


図-1 盛土モデルの円弧すべり面法解析事例

円弧すべり面法による盛土モデルの安定解析を行った。盛土モデルは、天端幅50m、高さ10mの台形型とし、軟弱粘性土地盤の厚さが20m、30m、50mの3ケースとした。盛土モデルと解析結果を図-1に示した。ケース1、ケース2、ケース3とも最小安全率を与える円弧は軟弱粘性土地盤の基底を通る大きなものとなった。また、地盤厚さが大きくなるにつれて円弧も大きくなり、ケース3では円弧が無窮大となる解析結果となった。

このように、震度を深度方向に一定に考慮した円弧すべり面法を適用すると最小安全率を与える円弧は軟弱粘性土地盤の基底を通る深い大規模な円弧となる場合があり、円弧すべり面法の適用上の問題点と考えられる。

3. 過去の被災事例の調査

円弧すべり面法で算出されるような大円弧を示唆する深いすべりの被災事例が存在するのを確認することを目的に、過去の地震による厚い軟弱粘性土地盤上の盛土構造物の被災事例を調査した。

調査対象地震を表-1に示した。調査箇所は過去の報告書より地震被害のあった河川堤防を中心に、地盤が軟弱粘性土を含むものを抽出した。

調査は、10mを越える厚い軟弱粘性土地盤の被災事例があるのか、また、その場合に地盤に

砂質土層を含んでいるかどうかに着目して実施した。新潟地震以前では土質柱状図がないため、関東地震の事例のみ土質断面図を、宮城県沖地震以降は15河川の被災箇所の地盤の柱状図を用いて検討した。

調査内容を以下に示す。

① 関東地震では直轄2河川（A河川、B河川とする）について調査した。

A河川の被災箇所は、沖積粘性土が10~20mと厚く堆積しているものの、表層付近に砂質土質を含む箇所が多く、調査範囲の被災延長では粘性土だけの箇所は6.3%に過ぎなかった。

B河川の被災箇所のほとんどは沖積の砂質土層が表層付近に存在し、粘性土が10m以上堆積している軟弱地盤上で被災のあった箇所は、わずか数地点に過ぎなかった。さらに、そのほとんどが4~5mの砂質土層を含んでいた。

② 宮城県沖地震以降の15河川の調査箇所では、粘性土地盤が10m以上の被災箇所はわずか3地点であり、そのいずれも表層付近に砂質土層を含んでいた。

以上の結果より、今回調査した過去の被災事例では10mを越える厚い軟弱粘性土地盤は少ないこと。またその多くが表層付近に砂質土層を含んでおり、地盤の液状化に起因するものと考えられることがわかった。

同時に被災の形態についても調査したが、明らかに大規模な円弧すべりが発生した形跡は見られなかった。

表-1 被災調査対象地震*3

1891年	濃尾地震
1923年	関東地震
1952年	十勝沖地震
1964年	新潟地震
1978年	宮城県沖地震
1983年	日本海中部地震
1987年	千葉県東方沖地震
1993年	釧路沖地震

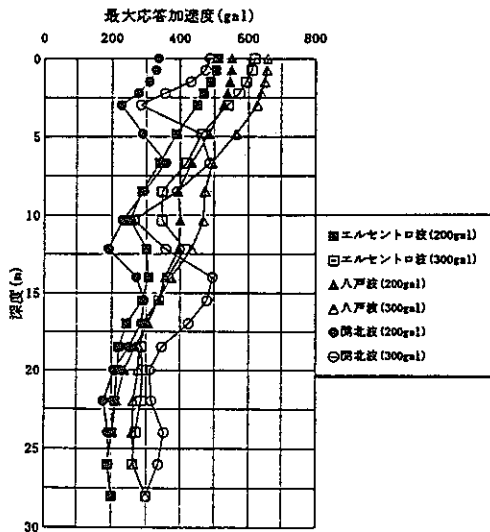


図-2 最大加速度分布図(例)

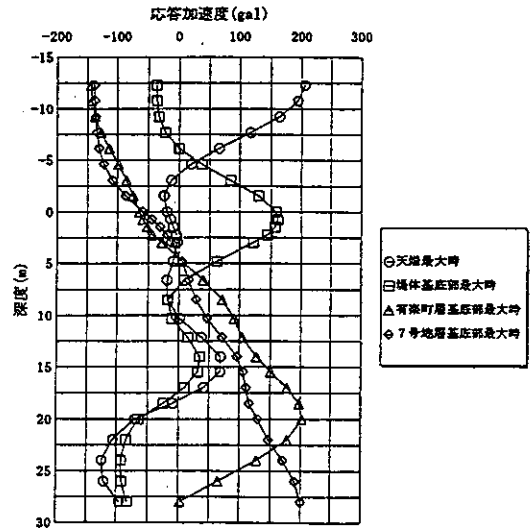


図-3 同時刻での応答加速度分布図(例)

4. 深度方向に水平震度を低減する適用方法の検討

4.1 水平震度を低減する適用方法の検討

既に述べたように、軟弱粘性土地盤上の盛土の安定解析では、地震外力を震度(Kh)として盛土、基礎地盤共に深度方向に一律にかけて算出するのが一般的である。

しかし一方で、既設の堤防などに設置された強震計記録では、天端・地盤表面に較べて地盤中の最大加速度は小さめの値を示す。また、モデルを用いた地震応答解析では、最大応答加速度は一般的に深度方向で低減する(図-2)。

これらのことより、盛土と基礎地盤に一樣な水平震度を考慮することは地震力を過大評価している可能性がある。

そこで、地震応答解析を実施して最大応答加速度の深度方向の分布を明らかにし、深度方向に震度を低減できるのかを検討した。さらに、応答加速度分布のある瞬間を捉えるつまり同時刻の応答加速度分布(図-3参照)を用いることも検討した。

4.2 最大応答加速度分布を用いる適用方法

4.2.1 深度方向の最大応答加速度分布の算出
地震応答解析は、1次元、2次元で行った。

応答解析に用いた断面モデルを図-4に示す。また、深度方向の最大応答加速度分布は、地震波形の特性や基盤に入力する地震時の大きさによって変化することから、地震波形はエルセントロ波、八戸波、開北波を、基盤入力加速度は200gal、300galを用いた。

断面内の水平方向で応答加速度分布のバラツキが予想されたため、検討地点は図-4に示した基盤～地表・基盤～法面・基盤～天端の3地点とした。

図-5に算出した最大応答加速度分布の1例(基盤～天端の1地点)を1次元・2次元のそれぞれについて示した。

4.2.2 低減率の設定

算出した最大応答加速度分布より低減率を設定した。設定は図-4に示した3地点でそれぞれ3波形・2入力加速度の平均値を求め、天端地点の値を1として算出した。1次元・2次元の各々で行った。

設定した低減率の1例(基盤～天端の1地点)を1次元・2次元のそれぞれについて図-6に示した。

4.2.3 低減率を用いた安定計算

設定した低減率を用いて検討断面の安定計算

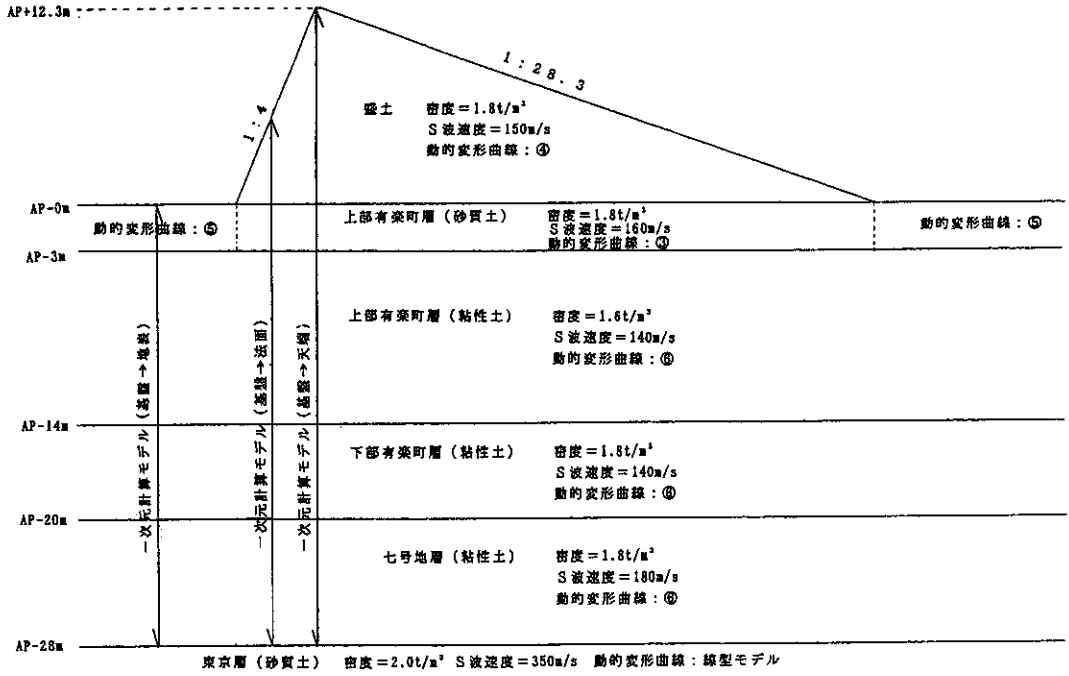


図-4 断面モデル

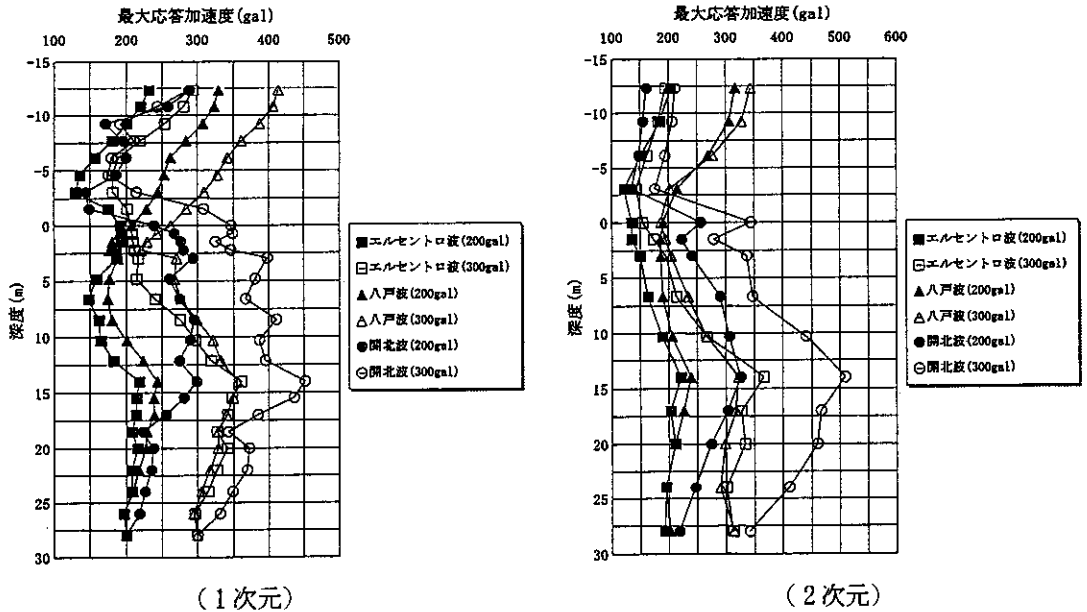


図-5 最大応答加速度分布の1例 (基礎～天端)

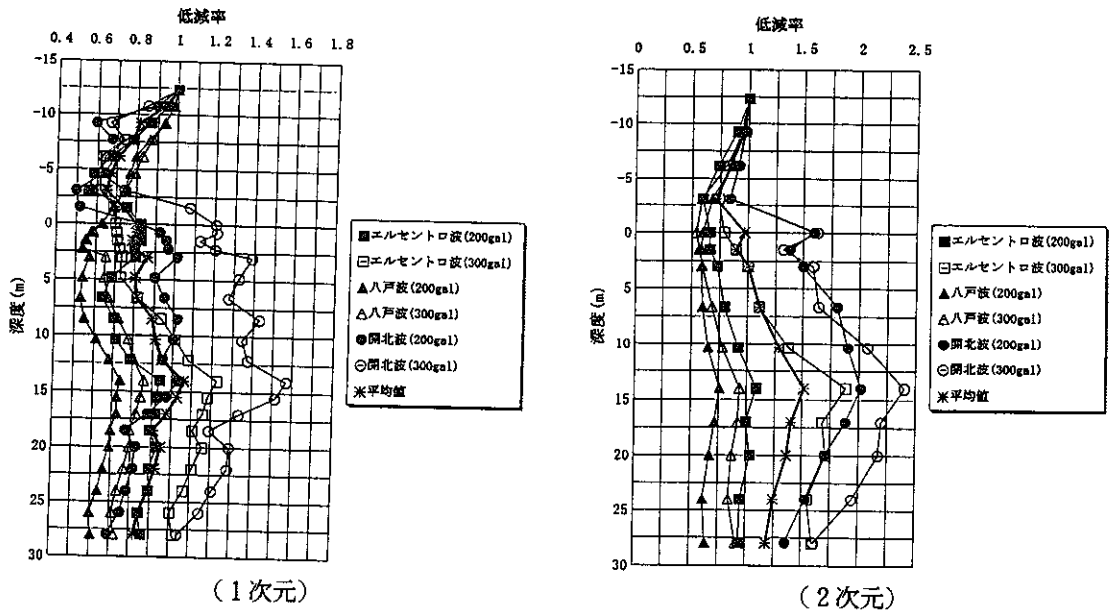


図-6 最大加速度分布による低減率の一例

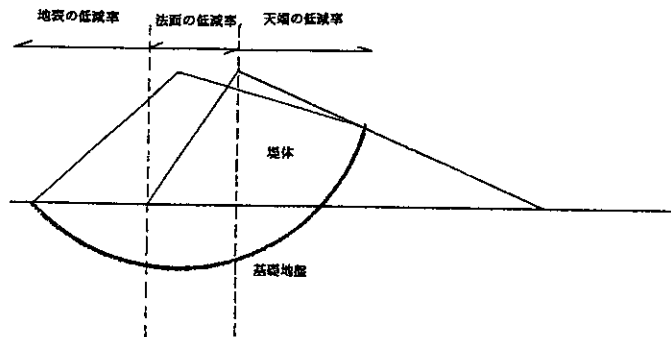


図-7 3地点の低減率の設定範囲

を実施した。設定した3地点の低減率の適用範囲は図-7のようにした。

計算に用いた震度については、一般に以下の式に従って決めている*3。

$$K_h = C_2 \cdot C_G \cdot C_l \cdot C_s \cdot C_B \cdot K_{h0}$$

- | | |
|--------------------|-------------------------------------|
| C_2 : 地域別補正係数 | 強震帯地域 1.0、中震帯地域 0.85、弱震帯地域 0.7 |
| C_G : 地盤別補正係数 | 河川沿いは軟弱地盤が多くⅢ種地盤の 1.2 |
| C_l : 重要度別補正係数 | 通常の 1.0 |
| C_s : 構造物特性格補正係数 | $C_s = 0.75 C_B$ 0.75は土構造物の値 |
| C_B : 堤防規模別補正係数 | 高規格堤防の場合 $B > H \cdot 20$ であるため 0.8 |
| K_{h0} : 標準設計震度 | $K_{h0} = 0.20$ |

応答加速度分布の深度方向の低減を考慮した今回は、上式の堤防規模別係数を考慮しないものとして震度を計算した ($K_h=0.1875$)。

計算結果を表-2に示した。

表-2 最大加速度分布における低減率を用いた安定計算結果

計算方法	安全率	円弧半径 (m)
1次元	0.760	59.7
2次元	0.708	56.0
地震力一定	0.825	59.7

参考に地震力を低減しない一定の場合 (震度 $K_h=0.15$ とした) と比較すると、地震力一定の場合の安全率を下回る結果となった。これは、低減率を用いた計算では、震度を0.1875としているためと考えられる。

4.3 同時刻の応答加速度分布を用いる適用方法

4.3.1 深度方向の同時刻の応答加速度分布・低減率の設定

地震応答解析は、1次元・2次元で行った。

応答解析に用いた断面モデルは最大加速度分布の算出に用いたのと同様とした (図-4)。また、地震波形はエルセントロ波、八戸波、開北波を、基盤入力加速度は200galを用いた。

検討地点も同様に基盤～地表・基盤～法面・基盤～天端の3地点とした。

分布の算出は盛土基底部分 (地表部分) が最大になる時刻とした。これは、本来ならば可能な全ての時刻 (0.02s刻み) に安定計算を実施し評価すべきであるが、簡略化のため天端最大時・盛土基底部分最大時・有楽町層基底部分最大時・七号地層基底部分最大時の4時刻の応答加速度分布を用いて計算を行い、最も安全率の低かった盛土基底最大時としたものである。

また、3波形のうち八戸波を入力波形とすることとした。これは、3波形をそれぞれ入力した4時刻の応答加速度分布を用いて計算を行い、八戸波が最も安全率が低かったことによる。

以上より、算出した応答加速度分布を図-8(1)に示した。

次に、低減率を設定した。算出した応答加速度分布より、天端での応答加速度を1として設定する。また、マイナスの範囲は位相が逆転し

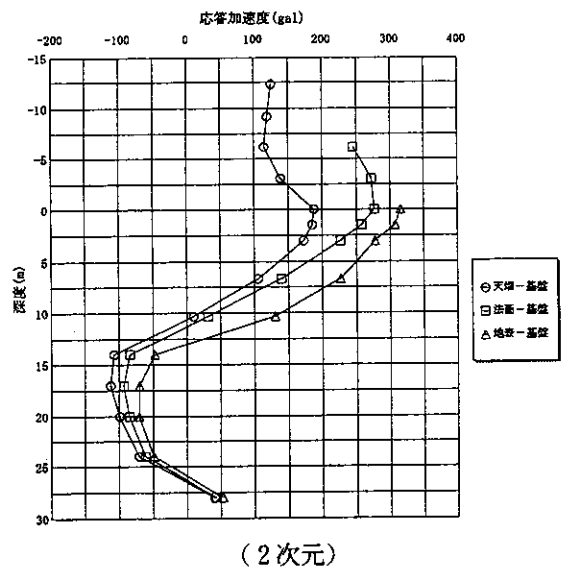
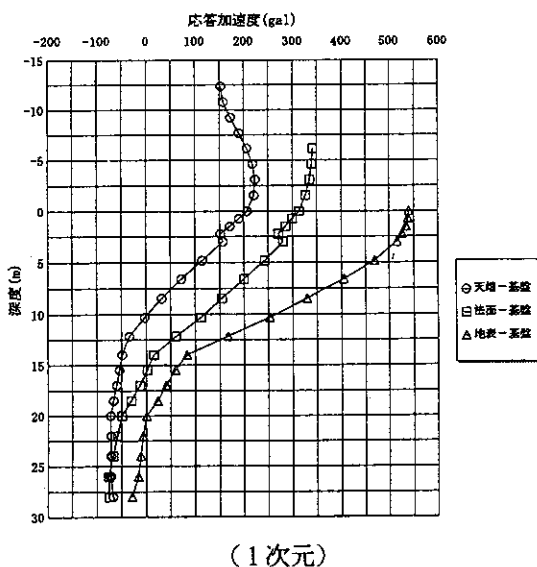


図-8(1) 同時刻の応答加速度分布

* 盛土基底最大時、八戸波、200gal

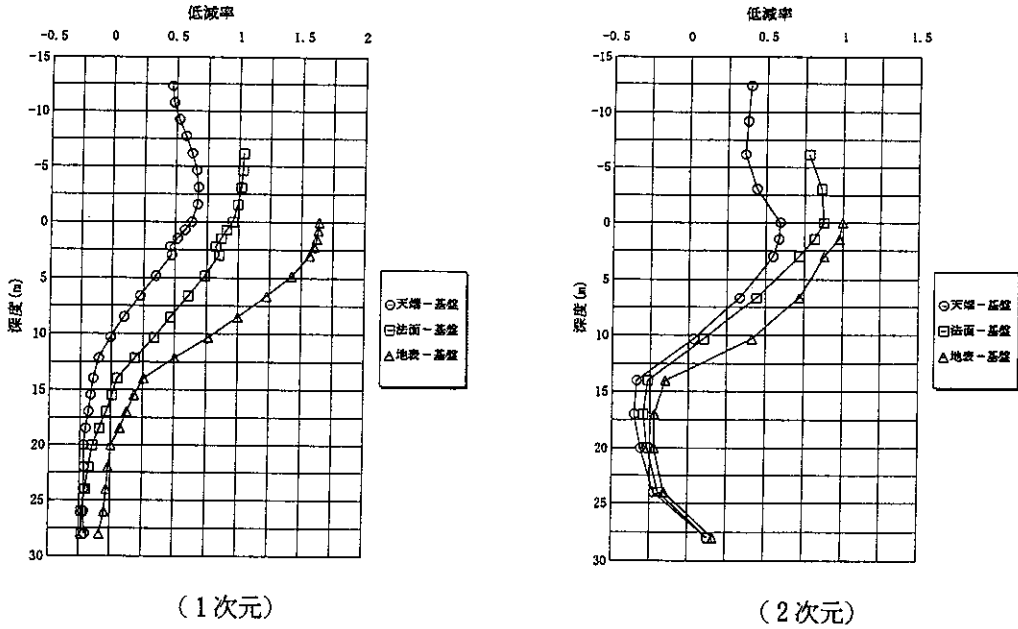


図-8(2) 同時刻の震度 (Kh)の低減率
*盛土基底最大時、八戸波、200gal

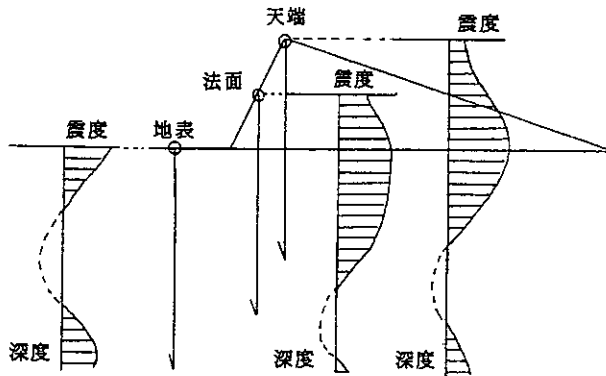


図-9 同時刻の応答加速度を用いた震度 (Kh) の低減方法の概念図

ている範囲であり、この部分は震度がかからないとして低減率を設定した(図-8(2))。同時刻の応答加速度を用いた震度 (Kh) の低減方法の概念図を図-9に示す。

4.3.2 低減率を用いた安定計算

設定した低減率を用いて検討断面の安定計算を実施した。震度は同様に $K_h=0.1875$ とした。

計算結果を表-3に示した。

表-3 同時刻における低減率を用いた安定計算結果

計算方法	安全率	円弧半径 (m)
1次元	0.867	54.7
2次元	0.930	47.5
地震力一定	0.825	59.7

*八戸波、200gal、盛土基底最大時

参考に地震力を低減しない一定の場合（震度 $K_h=0.15$ とした）と比較すると、地震力一定の場合の安全率を下回る結果となった。

以上より、同時刻の応答加速度分布を用い震度を深度方向に低減する方法が軟弱粘性土上の盛土の地震時の安定性評価の1つの評価方法としての可能性を有していると考えられる。

5. まとめ

本研究では地震時の応答加速度の状況を整理し、軟弱粘性土地盤上の盛土の安定性評価手法の1例を検討した。

検討内容を以下にまとめる。

- * 過去の被災事例を整理し、軟弱粘性土地盤上の盛土において、従来用いてきた深度方向に一定に震度をかける円弧すべり面法で算出されるような基盤の基底を通るような大規模な円弧の事例が少ないことを明らかにした。
- * 軟弱粘性土地盤上の盛土の安定性評価の1つの方法として、同時刻の応答加速度分布を用い震度を低減する適用方法を検討・提案した。

今回検討した同時刻の応答加速度を用いた震度の低減方法では、以下の事項が今後の課題と考えられる。

- ・全ての時刻での解析
- ・応答加速度を水平方向に打ち消し合う状況の詳細な検討
- ・解析だけではなく実証確認

・方法の確立

さらに、今回は1つの方法を検討したが、軟弱粘性土地盤上の盛土の地震時の安定性評価手法に関しては以下の検討課題が考えられる。

- ・粘性土地盤の動的強度を考慮する方法の検討
- ・すべり破壊を生じる範囲を限定し評価手法とする方法の検討
- ・永久変形解析による検討

円弧すべり面法は地震時の盛土や地盤の挙動や過去の地震現象の不明な点を考慮し、総合して盛土の安定性を評価する方法である。本研究では今後、地震時の軟弱粘性土地盤上の盛土の挙動を明らかにし、円弧すべり面法の適用方法の確立を目的とし検討していきたい。

また、阪神・淡路大震災等を教訓とした標準設計震度のレベルの問題や盛土や基礎地盤が極端に劣悪なケースの問題も検討が進められる必要があるだろう。

6. おわりに

本研究は「高規格堤防施工法検討委員会」において高規格堤防の設計・施工法を検討していく中で検討を進めているところである。本研究はまだ検討の緒についたばかりであり、今後さらに研究を進めていかなければならない。

最後に、山村委員長、土木研究所の関係各位をはじめとする委員の皆様のご指導、ご助言に厚くお礼を申し上げます。

*1 港湾の施設の技術上の基準・同解説：社団法人日本港湾協会 平成元年6月

*2 高規格堤防実務必携（案）：高規格堤防研究会、(財)リバーフロント整備センター

*3 濃尾地震～宮城県沖地震：河川堤防震害事例集 S59.3 (財)国土開発技術研究センター

日本海中部地震：日本海中部地震災害実態調査業務 S59.3 建設省東北地方建設局

千葉県東方沖地震：地震対策調査業務委託 H元.3 建設省関東地方建設局利根川工事事務所

釧路沖地震：釧路沖地震災害実態調査研究会委員会資料 H5.3 北海道河川防災研究センター

*4 道路橋示方書耐震設計編