

粘性土地盤上の高規格堤防の地震時 安定性評価手法について（その3）

Methods for Evaluating Earthquake Stability of Super Levees Built on Soft Clay (Part3)

研究第一部 次長 石川 浩
研究第一部 主任研究員 白木原 隆雄

We carried out elasto-plastic FEM analysis and studied appropriate improvement depths and improvement widths for soil improvement using the deep mixing method, as described in this paper, for the purpose of developing a new method for practical use in evaluating the earthquake stability of super levees.

The results of our analyses done by changing the improvement depth and width showed improvement efficacy when the improvement unit was in contact with the bearing layer, but when a floating type improvement unit was used, no improvement efficacy was seen. Also, even when we increased the width of the floating type improvement unit, no improvement efficacy was found. These analysis results also match the trend shown by the results of dynamic centrifugal model tests done by Public Works Research Institute.

From the above results, we have reached the conclusion that concerning improvement depth it is appropriate to ensure that the improvement unit is in contact with the bearing layer, and that concerning improvement width it is appropriate to determine the minimum width of the improvement unit using the fixed circular arc method of stability analysis.

Key words: super levees, earthquake deformation analysis, cohesive soil (soft clay) ground, soil improvement, elasto-plastic FEM

1. はじめに

高規格堤防の地震時におけるすべりに対する安定性の検討は、地震時の動的問題を静的問題に置き換えた通常の設計震度を用いた円弧すべり面法で行っている。

しかし、基礎地盤が厚い沖積粘土層から成る場合には、最小安全率を示す円弧が粘土層の基底を通るような深い円弧となることが多く、大規模な対策工が要求される。過去にこのような大円弧ですべり破壊を生じたという報告はなく、より実態に即した安定性評価手法を考えていく必要がある。

平成7年度は、震度法による円弧すべり計算の適用性について検討し、繰り返し円弧すべり安定計算、円弧範囲の制限方法を中心に検討した。その結果、円弧すべり計算を行う際の円弧範囲については、當時（設計震度K_h=0）の円弧すべり計算で最小安全率を示す円弧に固定することができるという結論が得られた（限定円弧法）。この結論をもとに、高規格堤防盛土設計・施工指針（案）の改訂（平成8年9月版）を行った。

平成8年度は、高規格堤防の地震時安定性の新たな評価手法の実用化を目的として、変形解

析手法や地盤改良工の設計手法などについて検討を行った。その結果、粘性土地盤の変形解析手法については群馬大学の鶴飼教授による弾塑性FEMや、砂質地盤の液状化による側方流動の検討については東京大学の東畑教授によるモデルによる手法について、解析事例を増やしていく必要があるという方向性が示された。また、地盤改良工の設計手法については、合理的な検討手法は少なく、変形解析手法を用いて解析を行い、適切な改良法について検討する必要があるという結論が得られた¹⁾。

本年度は引き続き、弾塑性FEMによる地盤改良の設計法の検討、粘性土の強度についての検討、液状化による側方流動の解析を行った。図-1に検討の流れを示す。

このうち弾塑性FEMによる地盤改良の設計法の検討についてその概要を報告する。

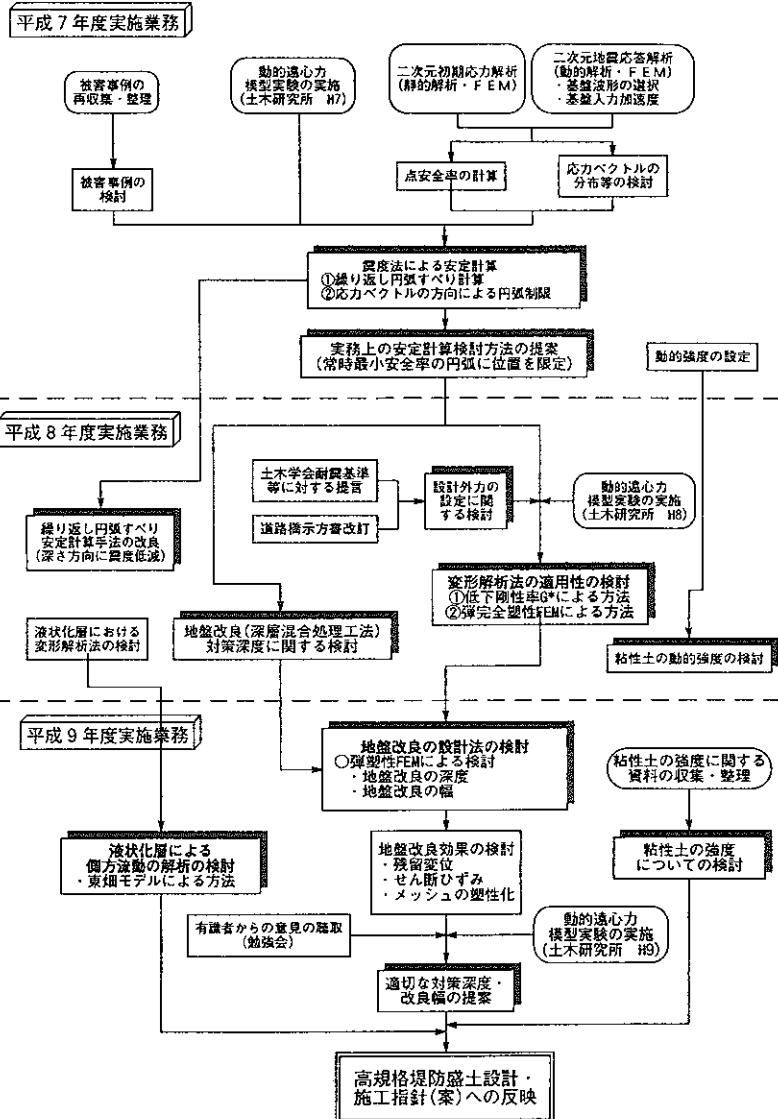


図-1 検討の流れ

Fig.1 Study Flow

2. 検討の目的

高規格堤防の地震時の安定性については、以下により検討することとされている²⁾。

- ① 限定円弧法による円弧すべり計算を行い、最小安全率 (F_s) が 1.2 以上であることを確認する。
- ② F_s が 1.2 未満である時は、必要な対策を講じるものとする。

F_s を 1.2 以上にするための対策としては現在おもに深層混合処理工法による地盤改良が行われており、その際の地盤改良深度については、支持層に着底させることが原則となっている。しかし、軟弱な粘性土層が厚い地盤の場合、現実には深さが 40mにも及ぶような大規模な地盤改良深度が要求される場合がある。このため、適切な改良深度を解析によって求め、過大設計

とならしいような設計法を検討する必要がある。

以上の目的で、今回の業務においては、昨年度に検討した変形解析手法の中で最も適用性が高いと判断された群馬大学の鶴飼教授による弾塑性FEMを用いて標準モデルについて解析を行った。

解析では、改良深度、改良幅、入力加速度を変えたモデルを作成し、それぞれについて検討した。

解析結果については、変形モードやひずみ分布を整理し、それぞれのモデルを比較して地盤改良効果についての検討を行い、適切な地盤改良法について検討した。

3. 解析条件

解析に用いた地盤モデルは、江戸川座生地区

の断面をもとに作成した単層の粘性土から構成される標準モデルで、粘性土層の層厚は20mである。

また、入力地震波は軟弱地盤における応答加速度が大きくなるとされている八戸波を採用した。入力加速度は、レベル1相当の地震を想定し、設計震度 $k_h = 0.15$ に相当する地表加速度が235galになるよう124galとした。

4. 改良深度を変えた場合の検討

4-1 目的

限定円弧法で得られた改良幅(5m)の地盤モデルにおいて適切な改良深度を検討するため、改良深度を何通りか変えて解析した。

4-2 解析ケース

解析ケースを表-1に示す。

表-1 解析ケース
Table 1 Analysis Cases

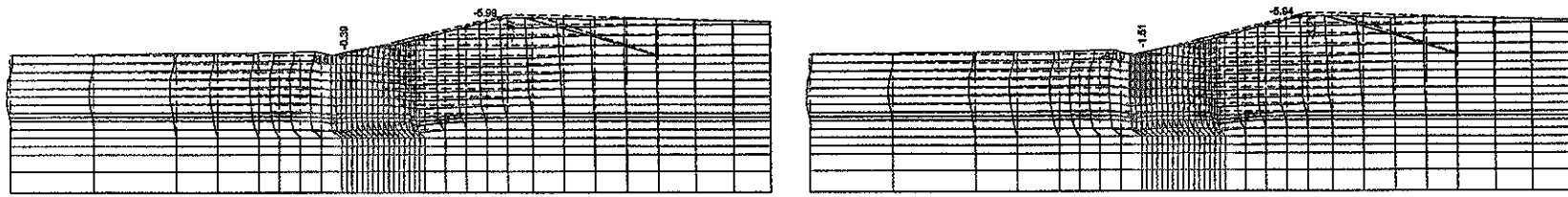
ケース	改良幅	改良深度	断面モデル	入力波	入力加速度
ケース1	5m	改良なし	標準モデル (粘性土層 厚20m)	八戸波	基盤 124gal (地表 $kh=0.15$ 相 当)
ケース2		着底・根入れ2m			
ケース3		10m(粘性土層の1/2)			
ケース4		15m(粘性土層の3/4)			

4-3 解析結果

加振後の残留変位分布図を図-2に示す。未改良、フローティングのケースでは、盛土天端の沈下、盛土法尻の隆起が見られる。全体的な変位状況を見ると、粘性土層底面を下面とする円弧すべり的な変位モードが見られる。いずれのケースとも、盛土天端の水平変位量、沈下量は約6cm、3cmであり、フローティングのケースでは、改良体は川側に水平移動するように滑動モードで動いている。一方、着底のケースでは、盛土天端の沈下、盛土法尻の隆起がかなり小さくなるとともに全体的な変位も小さくなってしまっており、円弧すべり的な変位モードを抑止している。盛土天端の水平変位量、沈下量は約4cm、2cmであり、改良体は川側に傾くように転倒モ

ードで動いている。

次に、加振後の残留せん断ひずみ分布図を図-3に示す。未改良、フローティングのケースでは、粘性土層底面にせん断ひずみの大きい赤い表示部分が連続している。この部分のひずみは粘性土の破壊ひずみといわれる2%を超えていることから、すべりが生じていると考えられる。一方、着底のケースでは、粘性土層底面のせん断ひずみが小さくなっている、かつ改良体によって分断されていることからすべりを抑止していると考えられる。また、改良体背面にひずみの大きい赤い表示部分があり、これは改良体のすべり抑止効果のためこの部分に応力が集中したためと考えられる。

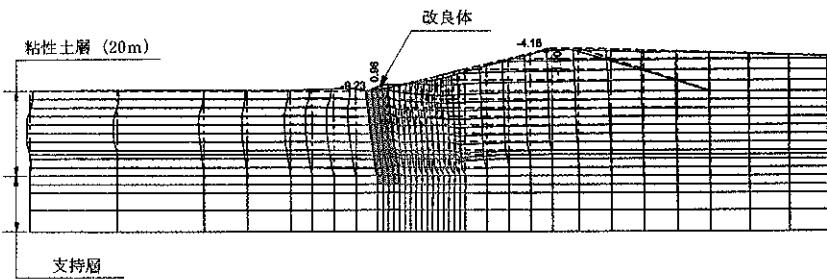


Geo.scale 0 10 20 m
Displacement 0 25 50 cm
zach03p-residual-displacement

[ケース 1・未改良・基盤 124gal]

Geo.scale 0 10 20 m
Displacement 0 25 50 cm
zach23p-residual-displacement

[ケース 3 改良幅 5m・改良深度 10m・基盤 124gal]



Geo.scale 0 10 20 m
Displacement 0 25 50 cm
zach13p-residual-displacement

[ケース 2 改良幅 5m・着底・根入れ 2m・基盤 124gal]

Geo.scale 0 10 20 m
Displacement 0 25 50 cm
zach33p-residual-displacement

[ケース 4 改良幅 5m・改良深度 15m・基盤 124gal]

図-2 残留変位分布図

Fig.2 Residual Displacement Distribution Diagram

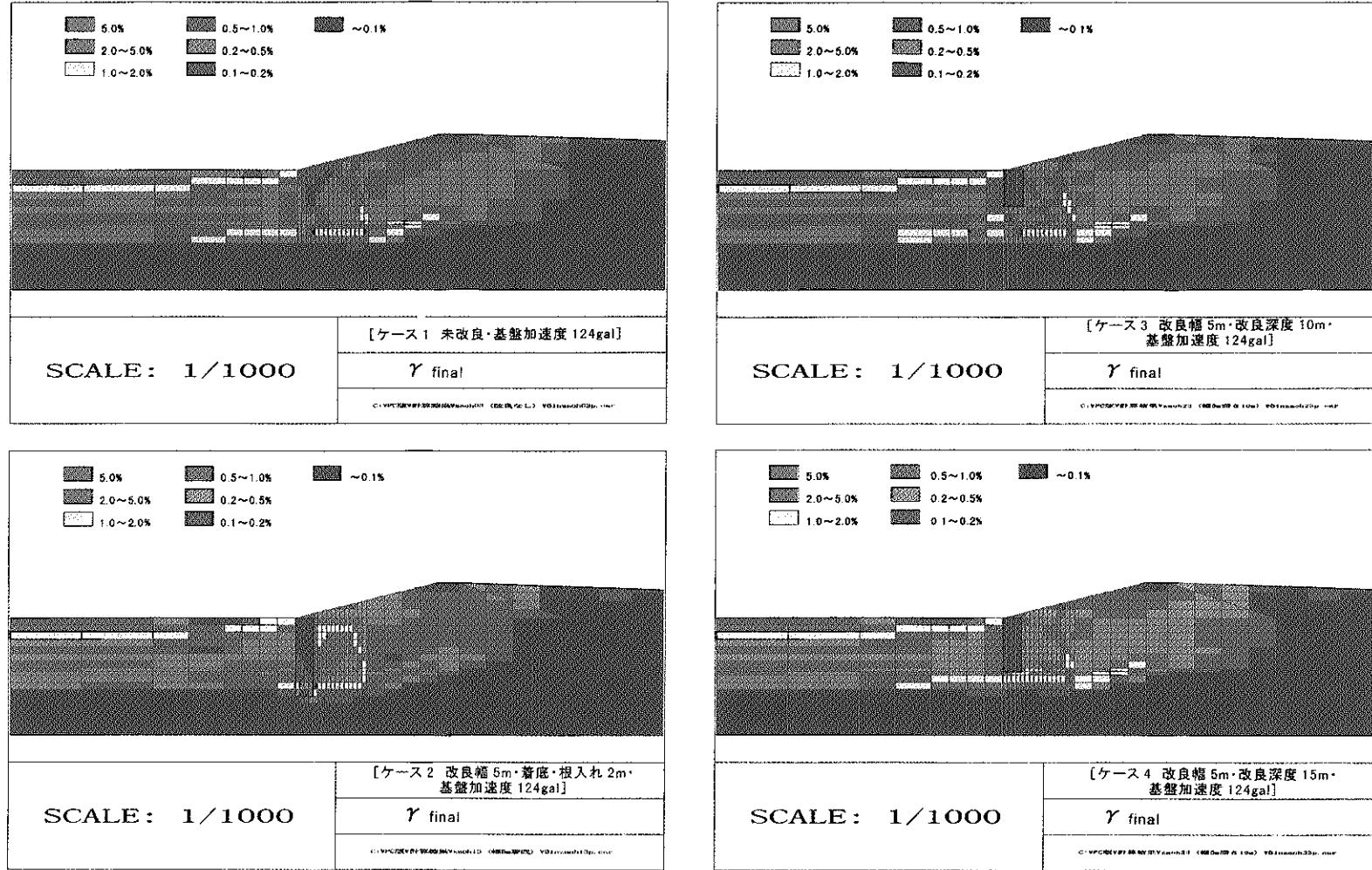


図-3 残留せん断ひずみ分布図

Fig.3 Residual Shearing Strain Distribution Diagram

4-4 考察

改良体を着底させたケースにおいては、未改良のケースと比較して、水平変位量、沈下量が小さくなり、改良効果が見られた。また、改良体が転倒モードで動き、円弧すべり的な変位モードを抑止するなどの改良効果も見られた。

しかし、フローティングにしたケースにおいては、改良体が滑動モードで動くため、円弧すべり的な変位モードは抑止されなかった。このため、未改良のケースと沈下量などにほとんど相違が見られなかつた。

また、改良深度を粘性土層の1/2にしたケースと3/4にしたケースとの比較では、改良効果にほとんど差が見られなかつた。

以上のことより、標準モデルで改良幅を5mとしたケースにおいては、地盤改良の効果を得るためにには、改良体を着底させる必要があると考えられる。

5. 改良幅を変えた場合の検討

5-1 目的

前節での結果は改良幅が5mと狭い場合の計算結果であり、同じフローティングタイプでも、改良幅を広くした場合には、改良効果が得られることが考えられる。

ここでは、フローティングタイプの改良において、改良深度(15m)を等しくして改良幅を変えた場合の検討を行つた。

5-2 解析ケース

解析ケースを表-2に示す。

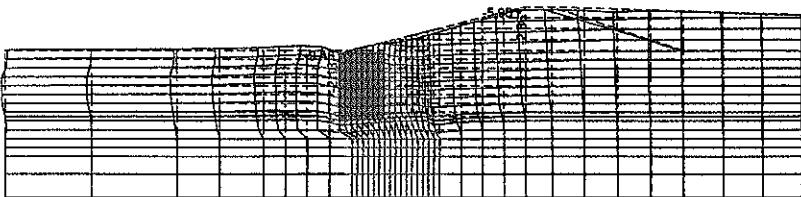
表-2 解析ケース
Table 2 Analysis Cases

ケース	改良幅	改良深度	断面モデル	入力波	入力加速度
(ケース1)		改良なし			
(ケース4)	5m		標準モデル (粘性土層 厚20m)		基盤 124gal (地表 kh=0.15相 当)
ケース5	10m				
ケース6	20m				

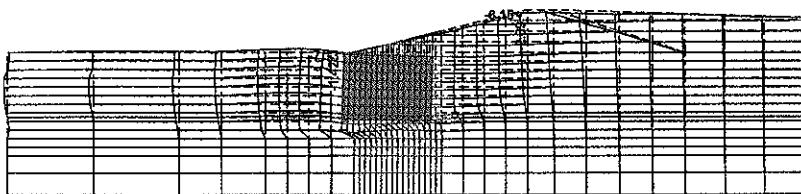
5-3 解析結果

残留変位分布図を図-4に示す。いずれのケースとも、盛土天端の水平変位量、沈下量は約6cm、3cmであり、未改良のケースとほとんど差が見られない。また、改良体が滑動モードで動いており、円弧すべり的な変位モードを抑止していない。

次に、残留せん断ひずみ分布図を図-5に示す。いずれのケースとも、粘性土層底面にせん断ひずみの大きい赤い表示部分が連続していることから、すべりが生じていると考えられる。



Geo.scale 0 10 20 m
zaoh63p-residual-displacement
Displacement 0 25 50 cm
[ケース 5 改良幅 10m・改良深度 15m・基盤 124gal]



Geo.scale 0 10 20 m
zaoh123p-residual-displacement
Displacement 0 25 50 cm
[ケース 6 改良幅 20m・改良深度 15m・基盤 124gal]

図-4 残留変位分布図

Fig.4 Residual Displacement Distribution Diagram

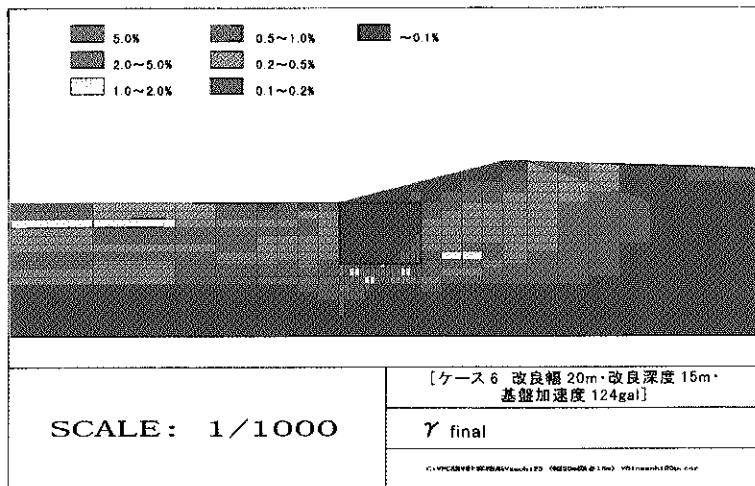
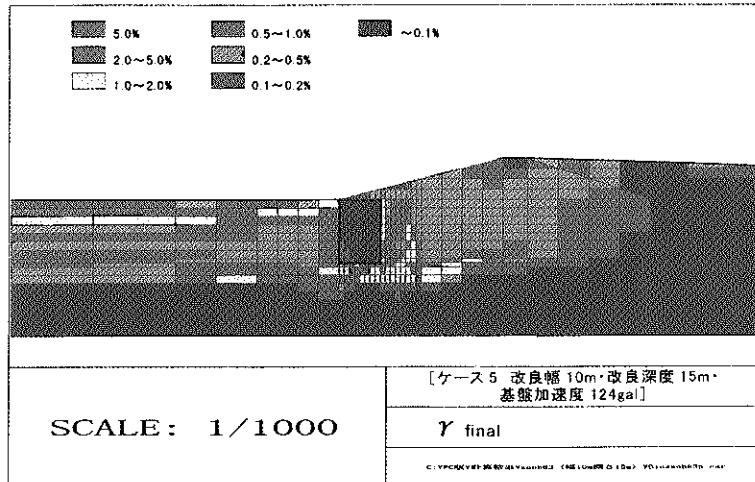


図-5 残留せん断ひずみ分布図

Fig.5 Residual Shearing Strain Distribution Diagram

5-4 考察

いずれの場合も、改良体が滑動モードで動くため、円弧すべり的な変位モードは抑止されなかつた。このため、未改良のケースと沈下量などにはほとんど相違が見られなかつた。

以上のことより、フローティングタイプの改良については、改良幅を最大 20m としても大きな改良効果は得られず、幅は狭くとも改良体を着底させた方が改良効果が高いと考えられる。

6. 大加速度を入力した場合の検討

これまでの解析はレベル 1 相当の地震を想定した場合の結果であり、顕著な改良効果が得られたとはいえない面がある。そこで、改良効果の相違をより明確にするため、レベル 2 相当の地震を想定し、入力加速度を 400gal にした場合の検討を行つた。

解析結果はこれまでの解析と同様にフローティングタイプの改良については、改良効果は小さく、着底が必要であるという結論が得られた。

7. 動的遠心模型実験結果との比較

7-1 目的

粘性土地盤上の堤防の破壊挙動、破壊機構、部分改良による対策効果を明らかにすることを目的として、建設省土木研究所動土質研究室により平成 7 年度より動的遠心模型実験が実施されている。

平成 9 年度は、加振波形、地盤改良の深度および改良幅による違いを調べることを目的とした実験が実施された³⁾。

今回は、本年度の実験ケースのうち、改良深度および改良幅に着目した実験ケースについて、弾塑性 FEM による解析結果と比較し、解析の妥当性について検討した。

7-2 実験ケース

実験ケースを図-6 に示す。このうちケース 5~10 は、高規格堤防において実際に行われている深層混合処理工法による地盤改良を再現したモデルである。

入力波は、すべて正弦波 60Hz の 20 波加振としている。

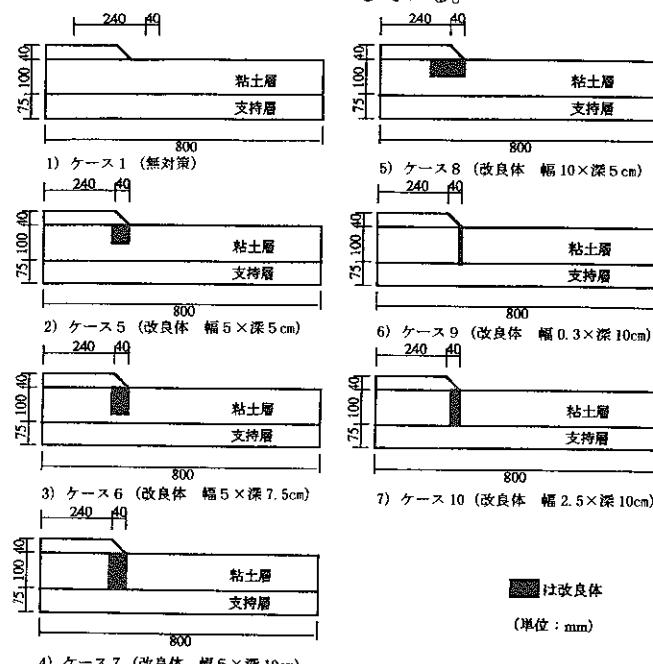


図-6 遠心模型実験ケース

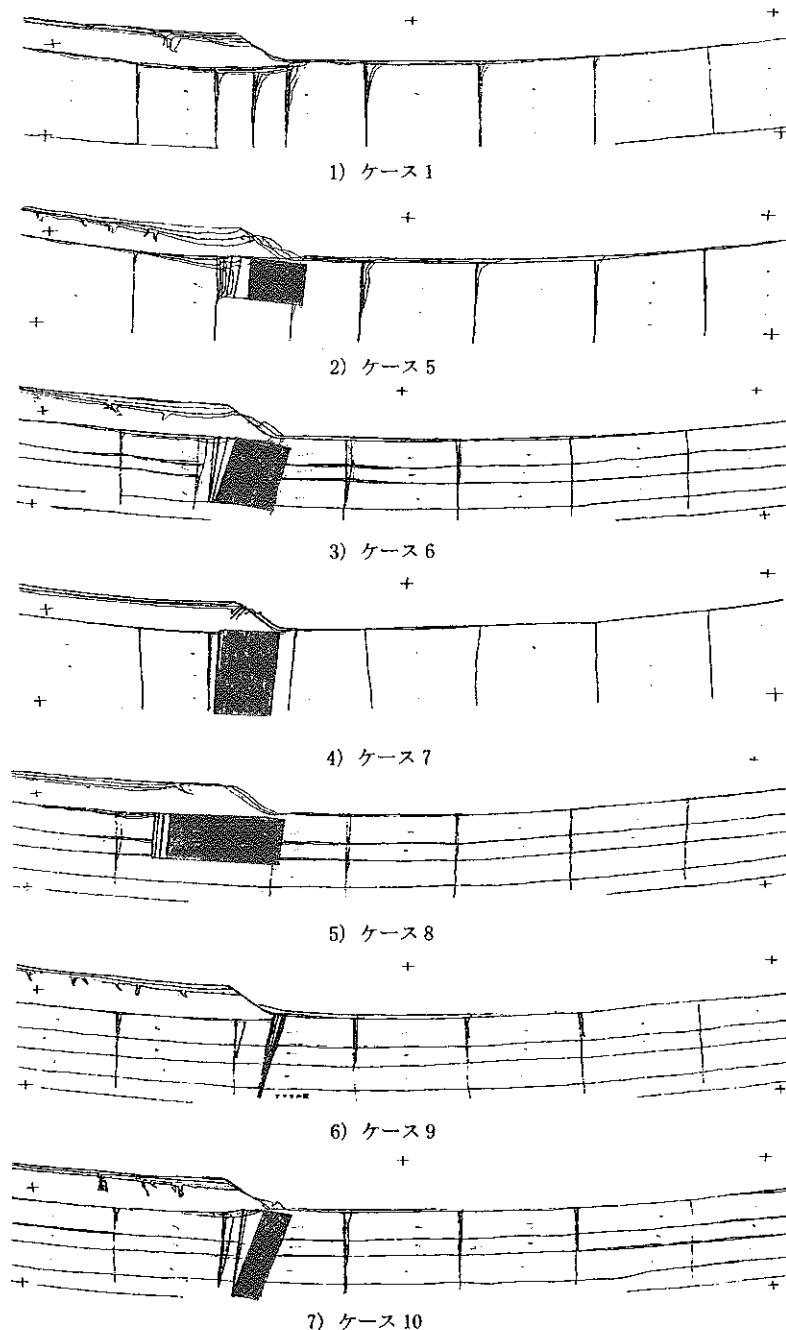
Fig.6 Centrifugal Model Test Cases

7-3 実験結果

(1) 模型の変形 (図-7)

改良したケースについては、縦長のプロポー

ションのもの（ケース 6, 7, 9, 10）は、改良体が川側に傾くように移動した。横長のもの（ケー
ス 5, 8）は、川側に水平移動した。



■は、変形後の改良体

図-7 変形状況

Fig.7 Deformation Conditions

(2) 加振加速度と盛土の沈下量 (図-8)
着底しているケース(7, 9, 10)は、沈下量が小さく、改良効果が見られるが、フローティング

のケース (5, 6, 8) は沈下量が大きく、改良効果が小さい。

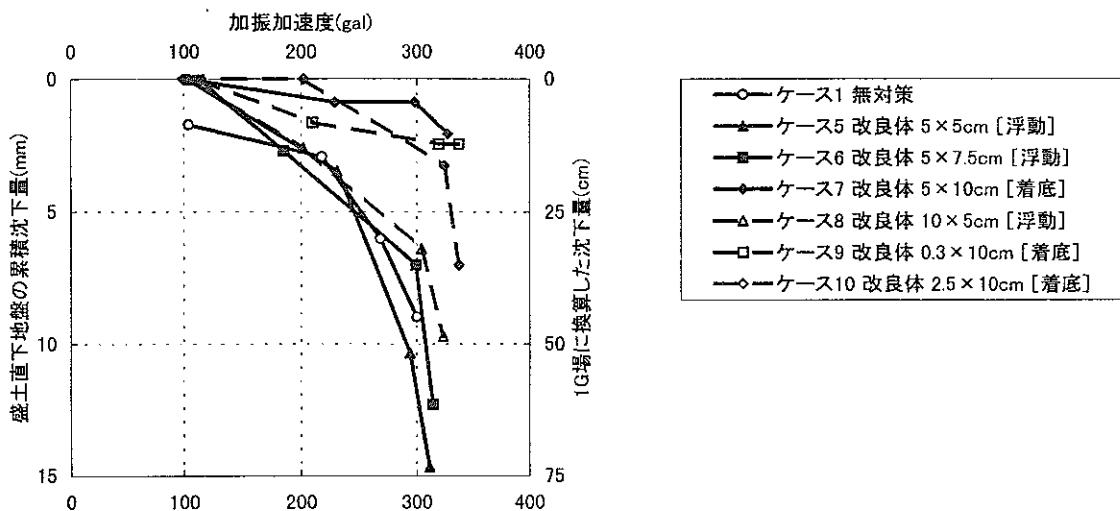


図-8 加振加速度と沈下量との関係

Fig.8 Relationship between Excited Acceleration and Settlement

7-4 考察

改良体が着底したケースは改良効果が大きく、転倒モードになっている。改良体がフローティングのケースは改良効果が小さく、滑動モードになっている。

これらの傾向は、弾塑性FEMによる解析結果と一致しており、解析の妥当性を検証できた。

8. まとめ

改良幅を限定円弧法で設定し、入力加速度を124gal (レベル1相当、地表震度 $k_h = 0.15$)とした場合、改良体を着底させた場合には改良体が転倒モードで動き、改良効果が見られたが、フローティングタイプとした場合は、改良体が滑動モードで動き、改良効果が見られなかった。また、フローティングタイプとした場合には、改良幅を2倍、4倍に広くしても、改良効果が見られなかった。改良効果の相違をより明確にするため入力加速度を400gal (レベル2相当)

とした場合も、同様な結果が得られた。また、これらの解析結果は土木研究所の動的遠心模型実験結果の傾向と一致した。

以上の結果から、深層混合処理工法による地盤改良においては、改良深度については支持層に着底させ、改良幅については限定円弧法により最小幅を決定する方法が妥当であると考えられる。

今後の課題としては、

- ① 今回の変形解析が単層の粘性土地盤を対象としたものであり、実際の地盤は砂と粘土の互層地盤であることが一般的であることから、互層地盤を対象とした変形解析手法の開発が望まれる。
- ② 高規格堤防上は通常の土地利用を想定するため、地震時にどれだけの変位量が許容されるのかを明確にし、それに見合う適切な地盤改良工を変形解析等で求めていく必要がある。等が挙げられる。

なお、弾塑性FEMによる変形解析について

は、群馬大学の鶴飼恵三教授、若井明彦助手にプログラムを提供していただいた。また、動的遠心模型実験結果については、建設省土木研究所動土質研究室に実験結果を提供していただいた。ここに感謝の意を表する。

＜参考文献＞

- 1) 中村敏一・大矢通弘：粘性土地盤上の高規格堤防の地震時安定性評価手法について（その2）、リバーフロント研究所報告第8号、1997年3月
- 2) (財) リバーフロント整備センター：高規格堤防盛土設計・施工マニュアル、1998年1月
- 3) 建設省土木研究所動土質研究室：平成9年度第1回高規格堤防施工法検討委員会 委員会資料 動的遠心模型実験の概要、1997年10月