

弾塑性有限要素法による高規格堤防の地震時の安定解析

Stability Analyses of Super-Levees during Earthquakes Based on Elasto-Plastic Finite Element Method

研究第一部 主任研究員 川 井 正 彦
 研究第一部 次 長 井 山 聡
 研究第二部 主任研究員 小 池 太規洋

高規格堤防における地震時の安定解析は、地震時の慣性力を考慮した震度法が用いられてきた。しかし、河川堤防の過去の被災実態を調査した結果、基礎地盤が厚い軟弱粘性土からなるような箇所においては、震度法による円弧すべり面法では、必要となる対策工が過大に算出される可能性のあることが確認された。このため、より実態に即した安定性の評価を考えていく必要から、常時の安定計算における最小安全率の円弧に限定して、震度法による解析を行う「限定円弧法」の提案が行われ、暫定的な手法として用いられてきた。

しかし、この手法では、地震時の高規格堤防の変状を定量的に評価することができなかったため、平成11年度及び平成12年度には、有限要素法による動的変形解析手法を用い、高規格堤防の地震時の安定性評価を行ってきた。この結果、動的変形解析手法を用いた場合、高規格堤防の地震による変位について、量的に評価することが可能となるとともに、従来の震度法では考慮できなかった粘性土の基底まで改良しないフローティング改良の効果について評価し得ることが明らかとなった。

キーワード：高規格堤防、地震時変形解析、粘性土地盤、地盤改良、弾塑性有限要素法

Stability analyses of super-levees during earthquakes have, up to now, employed the seismic coefficient method that takes into consideration the inertia force generated during earthquakes. However, as a result of having conducted studies on the state of damage sustained by river levees in the past, in places where the foundation ground is comprised of thick soft cohesive soil, it has been verified that with circular slip surface method stability analyses based upon the seismic coefficient method, there are possibilities that counter measure works are calculated and implemented in excess of what would suffice. For this reason, based on the need to consider evaluations of stability properties that are in keeping with reality, a proposal to the effect that a "limited circular slip method," in which analyses would be conducted employing the seismic coefficient method whereby the circular slip would be limited to the minimum safety ratio in stability calculations for normal times, be employed, and this has been used as a provisional procedure.

However, with this procedure, because it is not possible to conduct quantitative evaluations of deformations sustained by super levees during earthquakes, during the fiscal years 1999 and 2000, the dynamic deformation analysis procedure employing the finite element method was used in conducting stability evaluations of super-levees during earthquakes. As a result, along with it becoming possible to carry out quantitative evaluations in those instances where the dynamic deformation analysis method was used in connection with deformations of super-levees during earthquakes, it was also found that it was possible to carry out evaluations on the effects of floating improvement work in which the improvement work did not extend all the way to the base of the cohesive soil, something which could not have been considered with the seismic coefficient methods of the past.

Keywords: Super-Levees, Deformation Analyses during Earthquakes, Cohesive Soil Ground, Ground Improvement, Elasto-Plastic Finite Element Method

1. はじめに

地震国である我が国においては、これまで数多くの地震が発生し、甚大な被害を幾度と無く受けてきた。特に、平成7年1月に発生した兵庫県南部地震においては、神戸市周辺の多くの家屋や高速道路などの構造物が甚大な被害を受け多くの人命が失われたことは記憶に新しい。河川堤防においても淀川左岸下流の西島地区に代表されるように堤防天端の沈下が最大3mに及ぶような甚大な被害を受けたことが知られている。

この地震を契機に、それまでの耐震基準の見直しが図られ、想定される地震動の大きさや構造物の重要度に応じた耐震機能が求められるようになった。また、都市の防災機能や危機管理のあり方といった広域的、あるいはソフト的な対応についても様々な検討が進められるようになった。

本報告では、高規格堤防の耐震性を検討するために過年度から実施されてきた研究の成果を踏まえ、その適用が注目されている有限要素法による動的変形解析に着目し、その適用性について考察するとともに、今後の課題について提言する。

2. これまでの経緯

高規格堤防における地震時の安定解析においては、簡便かつ実用的な手法として、地震時の動的な地盤挙動を静的問題に置き換え、地震時の慣性力を考慮した震度法や液状化に伴う過剰間隙水圧を考慮した Δu 法による円弧すべりによる手法が用いられてきた。しかし、河川堤防の過去の被災実態を調査した結果、基

礎地盤が厚い軟弱粘性土からなるような箇所においては、震度法による円弧すべり面法では、現実的な地震時の安定性を十分に評価できないことが判明した。すなわち、軟弱粘性土地盤においては、最小安全率を示す円弧が粘性土層の基底を通るような深い、大きな円弧となり、必要となる対策工が過大に算出される可能性のあることが判明した。このため、より実態に即した安定性の評価を考えていく必要から、平成8年9月に改定された「高規格堤防盛土設計・施工指針(案)」(以下、「高規格堤防マニュアル」とする)において常時の安定計算における最小安全率の円弧に限定して、震度法による解析を行う「限定円弧法」の提案が行われた。

平成8年度以降は、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も検討を行い、粘性土地盤における弾塑性有限要素法の適用や液状化地盤における永久変形解析(最小エネルギー原理に基づく永久変形解析:東畑モデル)などの手法による解析が試みられている。

平成11年度及び平成12年度には、これまでの研究の流れを踏まえ、円弧すべり面法では評価できなかった高規格堤防の変状を定量的に評価することを目的に有限要素法による動的変形解析を行い、その有効性を確認するとともに、動的変形解析を導入した高規格堤防の耐震設計の手順を検討し、「高規格堤防マニュアル」の改定を行った。

これら過年度からの経緯を表-1にまとめて示す。

表-1 高規格堤防の地震時の安定性検討の経緯

年度	研究の概要 (課題と検討内容)	結論
平成7年度 (1995)	粘性土地盤における大円弧問題の研究 - 震度法(Kh法)の改良	限定円弧法を暫定的に適用する
平成8年度 (1996)	対策工設計を含めた合理的な耐震性評価手法の研究 - 弾塑性有限要素法解析(UWL) - 土圧モーメントの釣り合いによる方法	弾塑性有限要素法の実用化を目指すことが望まれる
平成9年度 (1997)	深層混合処理工法の改良深度の研究 - 弾塑性有限要素法解析(UWL):改良幅、深度を変えた解析検討	改良深度は支持層着底とする(フローティング改良では効果が得られないと判定)
平成10年度 (1998)	砂質土(液状化問題)に対する評価手法の研究 - Δu 法、動的強度法による円弧すべり計算 - 弾塑性有限要素法解析による対策工法の検討(LIQCA, UWL)	- Δu 法は安全側の評価手法 - フローティング改良も適用できる(粘土層への根入れは必要最小限とできる)
平成11年度 (1999)	現行の耐震性評価手法及び耐震設計手順の研究 - 現行の評価手法の適用性の検証 - 弾塑性有限要素法解析(LIQCA)	動的変形解析を導入した耐震設計手順を含む高規格堤防マニュアルの改定
平成12年度 (2000)	弾塑性有限要素法による動的変形解析の適用事例の研究 - 弾塑性有限要素法解析(LIQCA) - 解析のための留意事項の整理	手引き(案)の作成

3. 解析手法

動的変形解析は、近年各種手法が提案されており、以下に示すようにそれぞれに特徴を有している（これら各解析手法の詳細については別途文献を参照されたい）。

・有効応力に基づく動的有限要素法解析手法

LIQCA：有効応力に基づく弾塑性理論による方法。地震時の過剰間隙水圧の発生、剛性の低下を考慮し、地盤の変形を時刻歴で計算することができる。地盤の透水現象も考慮されている（岡モデル）。

FLIP：任意方向の単純せん断を仮想したせん断応力とせん断ひずみ関係のモデルに過剰間隙水圧の発生モデルを組み合わせた方法。地震時の過剰間隙水圧の発生、剛性の低下を考慮し、地盤の変形を時刻歴で計算することができる（東畑・井合モデル）。

UWL：有効応力に基づく弾塑性理論による方法。地震時の過剰間隙水圧の発生、剛性の低下を考慮し、地盤の変形を時刻歴で計算することができる。地盤の透水現象も考慮されている。粘性土については全応力モデル（非排水条件）を適用する（鶴飼モデル）。

・静的有限要素法による自重沈下解析手法

ALID：液状化に伴って生じる流動を液状化後にゆっくりと生じる現象と想定し、線形の静的な有限要素法により評価する方法。液状化後の剛性の低下は、液状化判定法（ F_L 法）等により評価できる。

・最小エネルギー原理に基づく永久変形解析手法

東畑モデル：最小エネルギー原理に基づき液状化後の自重による変位量を計算する方法。液状化層を粘性流体とし、非液状化層を横方向の変形に抵抗する弾性体として考慮している。液状化による流動は、液状化後の地震動の継続期間中に生じるものとしている。

平成11年度及び平成12年度に実施した本研究においては、砂質土、粘性土ともに有効応力モデルで解析をおこなうLIQCAを用いた。

4. 解析事例

(1) 地震波形の検討

地震統計調査の結果、再来年数を50年とした場合の基盤加速度振幅の期待値は、150～200gal程度であることがわかった。そこで、波形毎の変位量を比較する意味合いから、基盤最大加速度を200galとして地

震波形毎に算出される変位量の比較を行った（図-1左及び図-2左に西島地区及び川口地区における地表面変位を示した）。

これら解析結果によると、いずれの断面においても長周期の振動成分が卓越し地震動の継続時間が長いという特徴を持つ八戸港観測波形（十勝沖地震）による地表面の鉛直変位が、他の地震波形に比べ耐震性の評価に厳しい（変位量が大い）解析結果となる事がわかる。

また、現行の耐震設計震度 $kh=0.18$ に相当する地表面最大加速度は220gal程度であり、この場合の基盤での加速度としては150galとなる（基盤面～地表面の加速度増幅度は約1.4倍）。

これらのことから、耐震性の評価に当たっては、

- ・地震波形は、十勝沖地震における八戸港観測波形を用いる（河川堤防の機能上、鉛直変位が問題となる）
 - ・基盤における最大加速度は150galとする
- として対策工の効果を確認することとした。

(2) 対策工の効果の検証

1) 淀川下流部 西島地区

無対策における地表面の鉛直変位に着目すると、堤防天端部で最大1.3m、高規格堤防特別区域で最大0.36mの沈下が生じる結果となった。

この断面の表法尻部付近に幅16m、粘性土への根入れ2mの地盤改良を施工するものと設定すると、天端部での沈下量を数センチのオーダーにまで抑制できる結果となった（対策工施工位置から150m以上離れた高規格堤防特別区域での沈下量は無対策の場合に比べ数センチ抑制できるのみであった）。

一方、水平変位についてみると、堤防天端部において対策工を設定することによって、大幅に変位量を抑制できる結果となった。

2) 荒川下流部 川口地区

無対策における地表面の鉛直変位に着目すると、堤防天端部～既設堤防の裏法部において最大0.4m程度の沈下が生じる結果となった。

この断面の表法尻部付近及び高規格堤防特別区域の堤内側端部付近に幅10m、粘性土への根入れ1mの地盤改良を施工するものと設定すると、堤防天端部～既設堤防の裏法部の沈下量をおよそ半分まで抑制できる結果となった。

一方、水平変位についてみると、堤防直下の地盤の両端を改良体によって拘束するような対策工を設定しているため、無対策の場合に比べ、大幅に変位量を抑制できる結果となった。

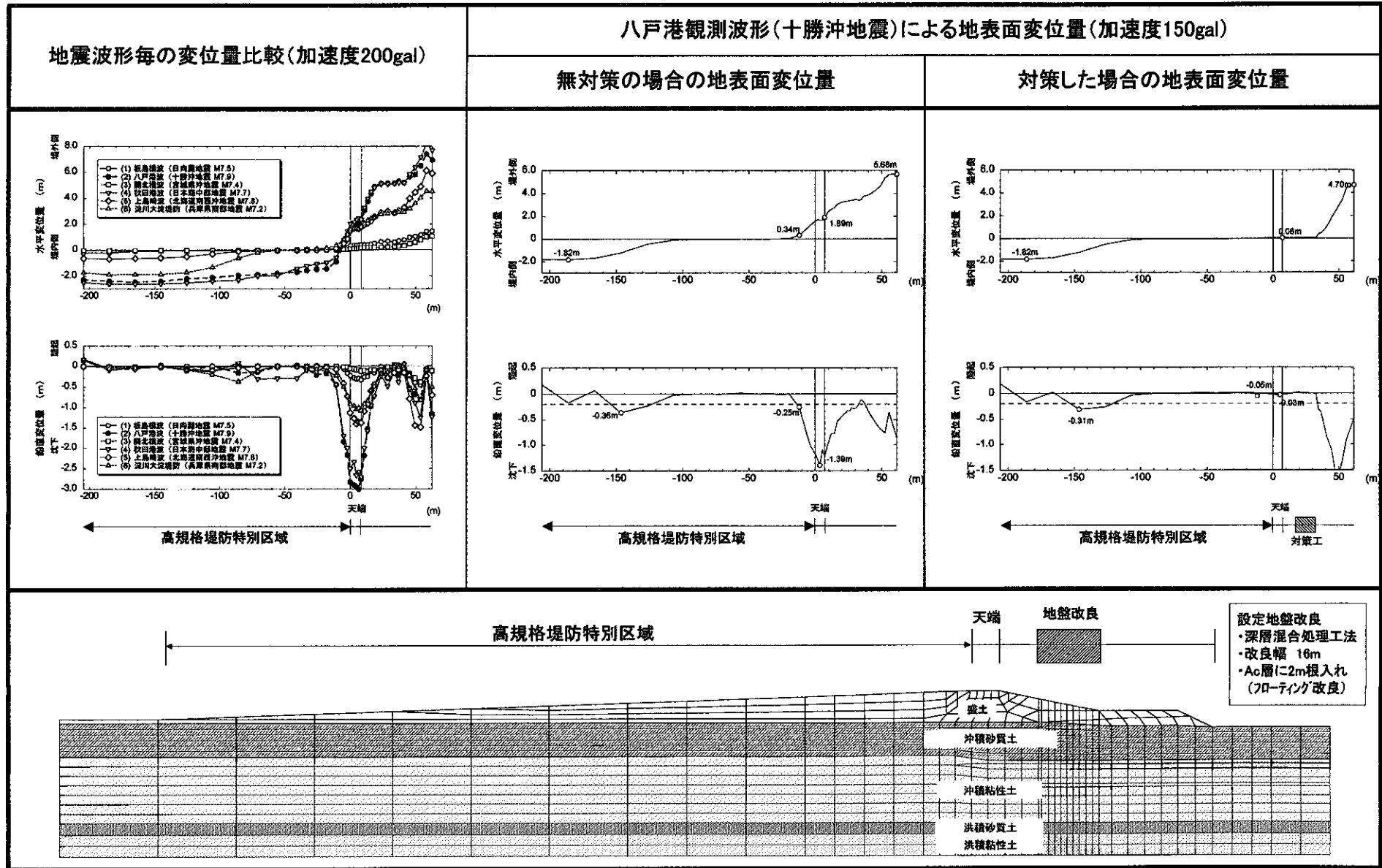
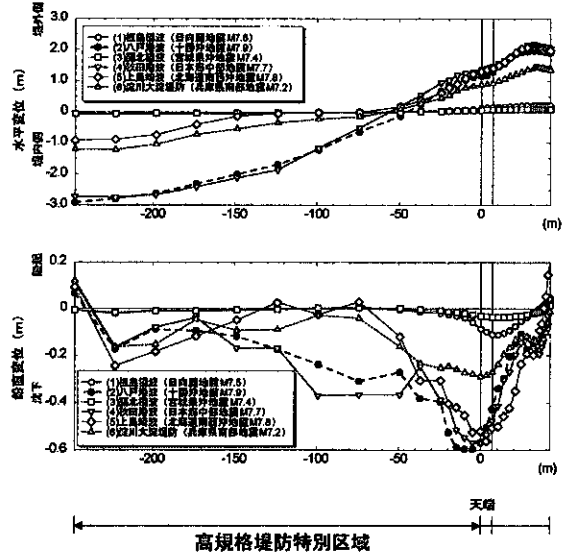


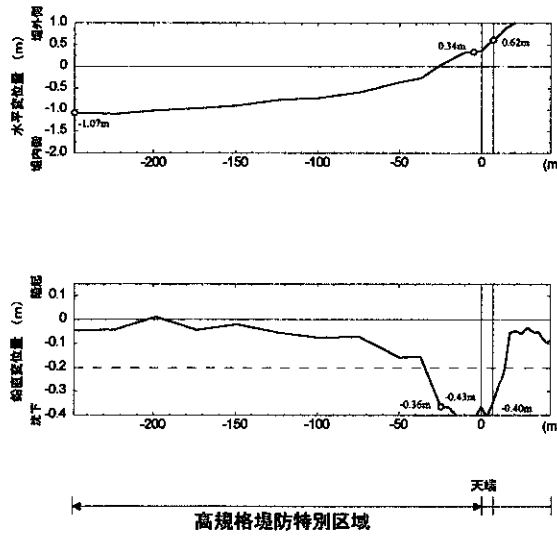
図-1 西島地区高規格堤防における動的変形解析結果

地震波形毎の変位量比較(加速度200gal)

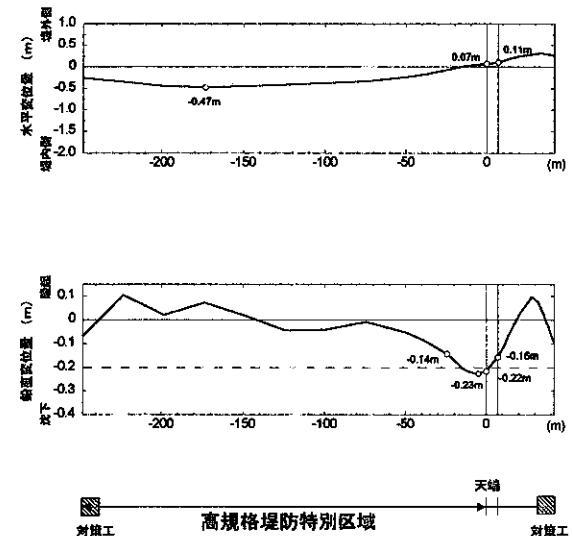


八戸港観測波形(十勝沖地震)による地表面変位量(加速度150gal)

無対策の場合の地表面変位量



対策した場合の地表面変位量



設定地盤改良
・深層混合処理工法
・改良幅 10m
・Y1c層に1m根入れ
(フローティング改良)

地盤改良

高規格堤防特別区域

天端

地盤改良

改良幅10m
Y1c層1m根入れ

設定地盤改良
・深層混合処理工法
・改良幅 10m
・Y1c層に1m根入れ
(フローティング改良)

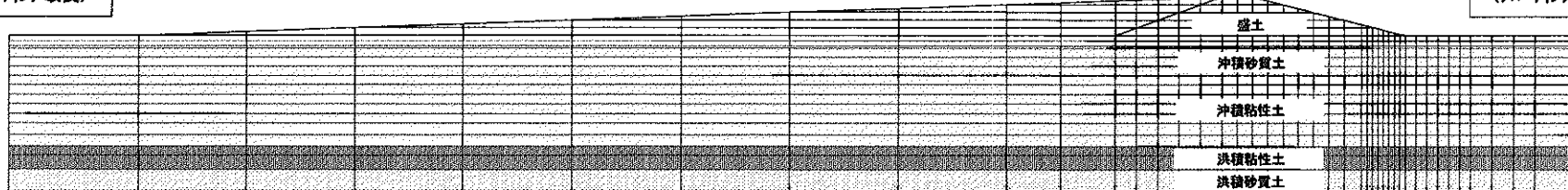


図-2 川口地区高規格堤防における動的変形解析結果

なお、有限要素法を用いた動的変形の場合、算出される水平変位量は、モデルの境界条件や要素の分割方法に影響を受けやすいことが知られており、また、変形後の河川堤防の機能を照査するという観点から、現時点では、算出される鉛直変位量のみに着目して評価がなされている。

5. まとめ

これまでの検討から、円弧すべり計算によって評価されていた粘性土地盤上の高規格堤防の耐震性を弾塑性有限要素法による動的変形解析を用いることによって、より合理的に評価し得ることが明らかとなった。すなわち、

- ① 粘性土地盤における合理的な耐震対策の検討
液状化の恐れのない地盤（特に粘性土地盤）では、動的変形解析を用いることによって、対策工が不要になる可能性がある。
- ② 大円弧問題の根本的な解決
従来の震度法では考慮できなかった粘性土の基底まで改良しないフローティング改良の効果について評価できる。

といった利点のあることが判明した。しかし、様々な対策工法（例えば締固め工法等）を変形解析に反映する手法の確立、動的変形解析を行うために詳細な地盤物性の把握が必要であること、計算手法や理論が煩雑であること及び適用実績が依然少ないこと等、今後の課題は多いといえる。

無論、公共構造物であることの多い土木構造物にとってその機能確保の観点から、地震に伴う変形量を把握し、より合理的な対策を講じることは必要不可欠であると言える。そういった意味で、今後も引き続き様々なケースについて、動的変形解析の試用を行い、解析手法の特性を十分に捉えた上で、現場への適用を図っていくことが必要であると考えられる。

<謝 辞>

高規格堤防の耐震性の評価については、高規格堤防耐震検討会での討議が進められているところであり、本報告の内容も同検討会での議論を踏まえたものであります。あらためてここに、ご参加されている各委員の方々に感謝の意を表します。

また、解析の実施にあたってご協力頂いた応用地質株式会社ならびに資料をご提供頂きました方々に謝意を表します。

<参考資料>

- 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
- 2) 石川浩・白木原隆雄：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）、リバーフロント研究所報告第9号、1998年
- 3) 石川浩・白木原隆雄：高規格堤防における地盤改良の耐震効果について、リバーフロント研究所報告第10号、1999年
- 4) (財)リバーフロント整備センター：高規格堤防盛土設計・施工指針(案)、1994～1996年
- 5) (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、1998～2000年