

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）

Methods for Evaluating Earthquake Stability of Super Levees Built on Soft Clay (Part 2)

研究第一部 次 長 中 村 敏 一

研究第一部 主任研究員 大 矢 通 弘

We studied Level 1 and Level 2 earthquake motions, permanent deformation analysis, and depth for application of the ground improvement method, regarding the earthquake stability of super levees built on soft clay subsoil. As results of our study, we reached the following conclusions.

- 1) Use of the circular slip surface method is appropriate for studying the seismic stability of super levees against Level 1 earthquake motions. In future, we will use permanent deformation analysis to study the need for measures to cope with level 2 earthquake motions.
- 2) We will study the practical use of permanent deformation analysis, mainly regarding elasto-plastic FEM.
- 3) We will do further study of the depth for application of the ground improvement method, using dynamic centrifugal model testing results and elasto-plastic FEM analysis results.

Key words: Super levees, Stability analysis based on circular slip surface, earthquake resistance, elasto-plastic FEM.

1. はじめに

高規格堤防の地震時対すべり安定性の検討は、簡便であること、他により良い方法がないこと、これまであまり問題が起こらなかったこと等により、地震時の動的問題を静的問題に置き換えた、震度法による円弧すべり安定計算で行っている。

高規格堤防の安定性に関しては、最小安全率 $F_s \geq 1.2$ を確保することが河川管理施設等構造令施行規則で義務付けられているため、 F_s が1.2を下回る場合には何らかの対策（地盤改良等）が必要となる。

一般に、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深い大円弧となることが多く、大規模な対策工が要求される。この問題に対し、昨年度は、実務上の扱いとして、円弧すべり安定計算で用いる円弧は常時の最小安全率を示す円弧に固定できるという結論を導き¹⁾

（円弧限定法）、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。今年度は引き続き、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、設計外力の設定、永久変形解析、深層混合処理工法の対策深度等についての検討を行った。図-1に検討の流れを示し、以下に主な項目についてその概要を記す。

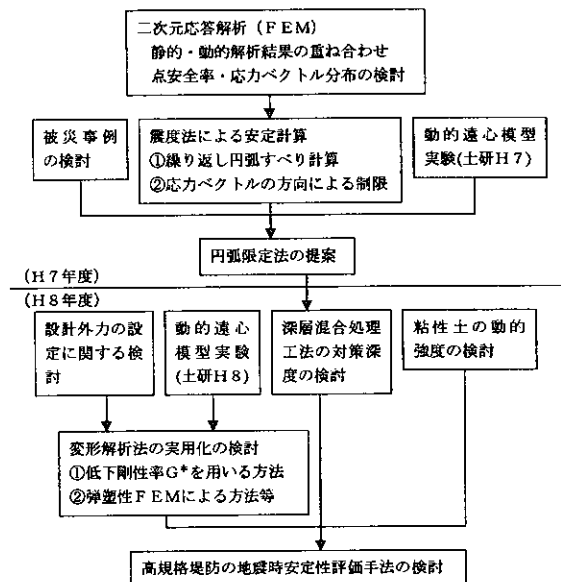


図-1 検討の流れ

Fig. 1 Study flow

2. 設計外力の設定について

(1) 高規格堤防の目標とすべき耐震性能

土木学会の土木構造物の耐震基準に関する提言²⁾（第一次提言1995.5.23）において、構造物の耐震性能の照査は、供用期間中に1～2度発生する確率をもつ地震動強さ（レベル1）と、発生確率は低いが極めて激しい地震動強さ（レベル2）の二段階を想定すべきことが示された。また、第二次提言（1996.1.10）においては、各地震動の耐震設計における目的と性格を、レベル1地震動：原則としてそれが作用しても構造物が損傷しないことを要求する水準、レベル2地震動：極めて希であるが非常に強い地震動を定式化したもので、構造物が損傷を受けることを考慮して、その損傷過程にまで立ち入って構造物の耐震性能を照査する水準、と規定し地上構造物、地中構造物、地盤・基礎構造物別に、それぞれの保有すべき耐震性能を記述している。

これらの内容を考慮すると、高規格堤防としては、以下の耐震性能を目標にすべきであると考えられる。

- ① レベル1地震動に対しては、壊れず堤防としての機能を発揮すること。
- ② レベル2地震動に対しては、支持する諸施設に重大な被害を生じさせず、堤防としての機能は速やかな復旧により確保

できること。

(2) レベル2地震動への対応

高規格堤防の目標とすべき耐震性能を考えると、レベル2地震動に対し、変位・変形量が所定の範囲に収まることを確認すべきである。しかし、現在の震度法による安定解析は地震力を静的外力に置き換え、極限平衡状態における安定を安全率で評価するものであり、レベル2地震動に対しては適切な評価結果を与えることができず、また変位・変形量の議論はできないという限界がある。一般に、地震時に発生する沈下や変形量等の評価法はまだ確立されておらず、研究段階にあるといえる。高規格堤防についても、変位・変形量に関する評価法を実用化に向けて検討中の段階であり、現状では、レベル1地震動について円弧すべり面法で安定性を評価することが妥当であると考えられる。今後、永久変形解析により、レベル2地震動による変位・変形量を直接算出し、レベル2地震動への対応の必要性について確認すべきである。

3. 永久変形解析の実用化の検討

これまでに、粘性土地盤で地震時の永久変形解析を行った事例はほとんどなく、関連する論文も少ない。その理由の一つとして、粘性土地盤上の堤防の被災記録がなく、解析を

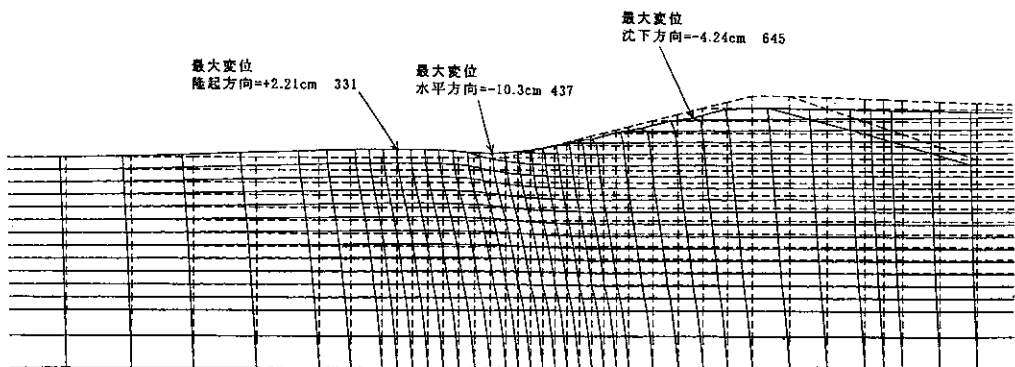


図-2 解析例（低下剛性率 G^* を用いた方法）

Fig. 2 Analysis example (method using declining rigidity modulus G^*)

行ってもそれを検証できる実現象がないことが指摘できる。今回、以下の3種類の変形解析を行い、その適用性を検討した。いずれも、高規格堤防の標準モデル断面を用い、入力地震動に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。また、入力加速度としては、モデル断面において、設計震度 $K_h=0.15$ に対応する地表最大加速度235galが得られるような加速度を考慮した。

(1) 低下剛性率 G^* を用いた方法

低下剛性率 G^* を用いた永久変形解析は、建設省土木研究所（佐々木ら³⁾）によって提案された。土を含む非線形材料は地震動等の繰り返し外力により変形が累積する特性を有するが、本法はこの変形累積特性を見かけ上の変形係数の低下という形で取り込む解析手法である。今回の検討における解析条件および結果を以下に示す。（解析条件）入力加速度は124gal（地表で設計震度 $K_h=0.15$ 相当）、累積変形特性試験は既存結果を使用した。

（結果）a. 永久変位量は、最大でも水平方向で約10cm、鉛直方向で約4cm程度であった。

b. 改良体の有無による変位量の差はなかった。逆に改良体有りの方が変位量が少し大きかった。図-2に解析結果の一例を示す。

(2) 弾塑性FEMによる方法

弾塑性FEMによる永久変形解析については、鶴飼（1990）⁴⁾に示されている。今回、標準モデルについて地震時の残留変位量を求め、改良体のある場合とない場合とでその大きさを比較した。解析条件および結果を以下に示す。（解析条件）入力加速度は3ケース（92gal、124gal、272gal）とした。（結果）a. 入力加速度124galの場合の残留変位量は、水平方向で約10cm、鉛直方向で2~3cmであった。改良体の有無の比較では、改良体有りの方が1~2cm変位量が少ない。b. 入力加速度272galの場合の残留変位量は、水平方向で最大67cm、鉛直方向で最大29cmと、大きな値であった。改良体の有無の比較では、改良体有りの方が変位量が大きくなる節点と小さくなる節点とがあり、改良体の効果についてはあまり見られなかった。図-3に解析結果の一例を示す。

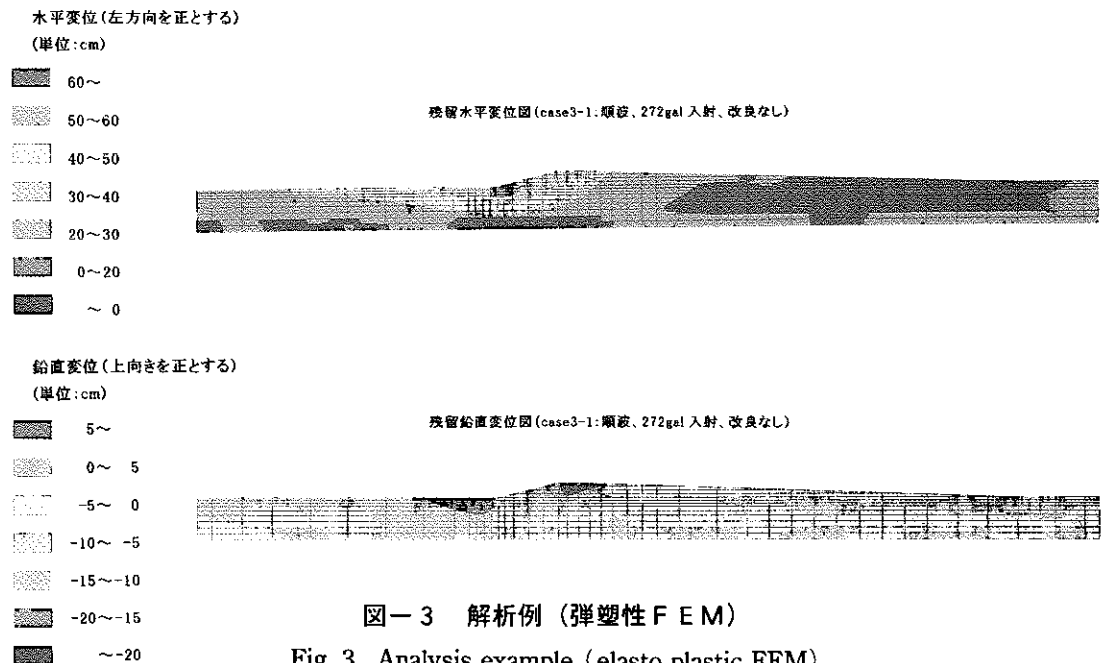


図-3 解析例 (弾塑性FEM)

Fig. 3 Analysis example (elasto-plastic FEM)

(3) Newmarkの考えによるすべり変位量計算

Newmarkは、斜面内にすべり土塊（剛体ブロック）を想定し、土塊に作用する地震力がすべり面上で発揮されるせん断抵抗力を越えたときにすべりが生じるとする考え方を示した。この考えに基づき、FEMによる地震時応答解析と円弧すべり計算とを組み合わせ、鶴飼（1987）⁹⁾の方法から地震時すべり変位量の算出を試みた。この方法は、各節点における各時刻の変位量として与えられるFEMの結果から、系全体のすべり変位量を求めることができることに特徴がある。解析条件および結果を以下に示す。（解析条件）入力加速度は124gal（地表で設計震度 $K_h=0.15$ 相当）。（結果）a. 円弧内の平均加速度を用いた場合は、すべり変位量=0という結果になった。b. 危険側の計算として、応答加速度の平均値に天端節点の加速度時刻歴を用いた場合を行ったが、変位量=1.0cmとかなり小さい値となった（図-4）。

(4) 考察

低下剛性率 G^* を用いた方法は、改良体の効果が正しく現れていないものの、変形性状はそれほどおかしくはない。ただし、この方法は微小変形を対象としたもので、大変形には対応できないという欠点がある。また、粘性土地盤上での地震による実際の変形との対比もまだ行われていない。弾塑性FEMによる方法は、動的遠心模型実験との比較がなされており、加速度波形および沈下量について、100gal程度の入力では良い対応となっている。また、今回の解析結果の残留変位量も124gal入力では水平10cm、鉛直3cm程度と妥当なものと考えられる。Newmarkの考えに基づく方法は、上記の方法に比べ簡便ではあるが、すべて平均値での議論であり、すべり変位量は平均値の取り方および時刻歴にかなり依存するものとなり、一般化は難しいと考えられる。以上より、今後は弾塑性FEMによる方法で、解析数を増やしながら、実用化検討を進めていくのが良いと考えられる。

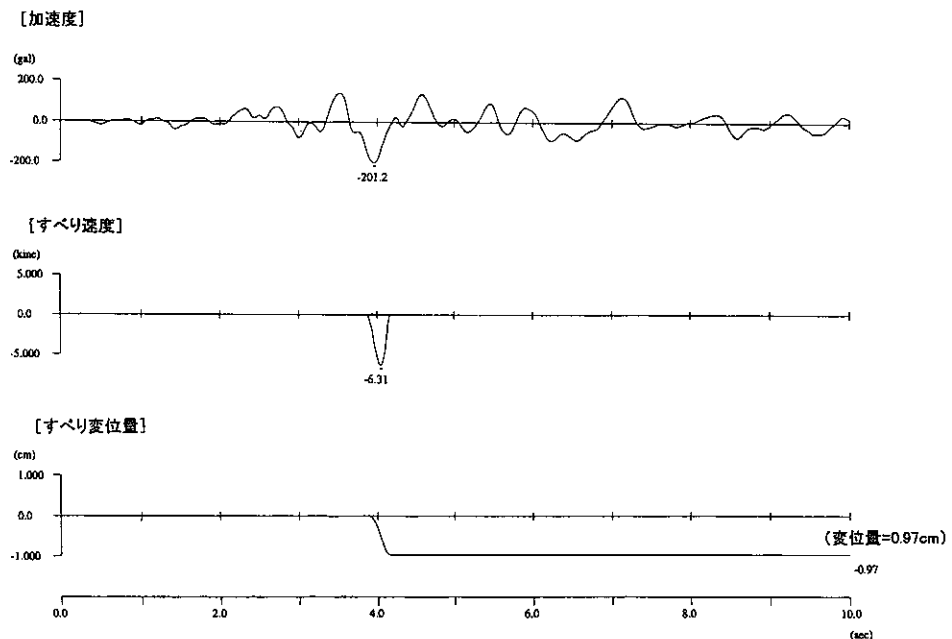


図-4 解析例 (Newmarkの考えによる方法)

Fig. 4 Analysis example (method using Newmark's theory)

4. 深層混合処理工法の対策深度の検討

(1) 検討の背景

円弧限定法では、常時に安全率最小のすべり面が地震時にもクリティカルになるという考えに基づいており、限定した円弧の範囲に見合った適切な対策深度を考える必要がある。しかし、円弧固定ゆえに、改良体と円弧が交わっている限り、対策深度をいくら変えても安全率は変わらないことになり、改良体の深さに関する議論はできない。現在、深層混合処理工法の対策深度については基盤に着底させることを原則としており、地盤が厚い沖積粘土層の場合には、深さ方向に非常に大規模な対策工となっている。今回、着底式からフローティング式への移行の可能性を検討するため、いくつかの方法により、適切な対策深度を算出することを試みた。

(2) 対策深度の検討

検討は、高規格堤防の標準モデル断面を用いた。常時の最小安全率1.936、その時の円弧の半径52.3m（地盤面からの深さ14.3m）、地震時（ $K_h=0.15$ ）の安全率1.107、地震時安全率1.2を確保するための対策工の幅4m、というケースに対して、必要な根入れ深さ（L）を求めた。

① モーメントのつりあいによる方法

改良体による抵抗モーメントの増分が、改良体根入れ部分で支えられると考えて、モーメントのつり合いから必要な根入れ深さを求めた。L=4.5m（図-5）。

② 円弧半径と安全率の関係による方法

常時の最小安全率を示す円弧の、半径が大きくなればそれに応じて安全率は増大するが、その時の半径増分と安全率増分の比が地震時も等しいと仮定して、地震時の安全率1.2を満たす深さを求め、その深度を根入れ深さとした。L=8.9m（図-6）。

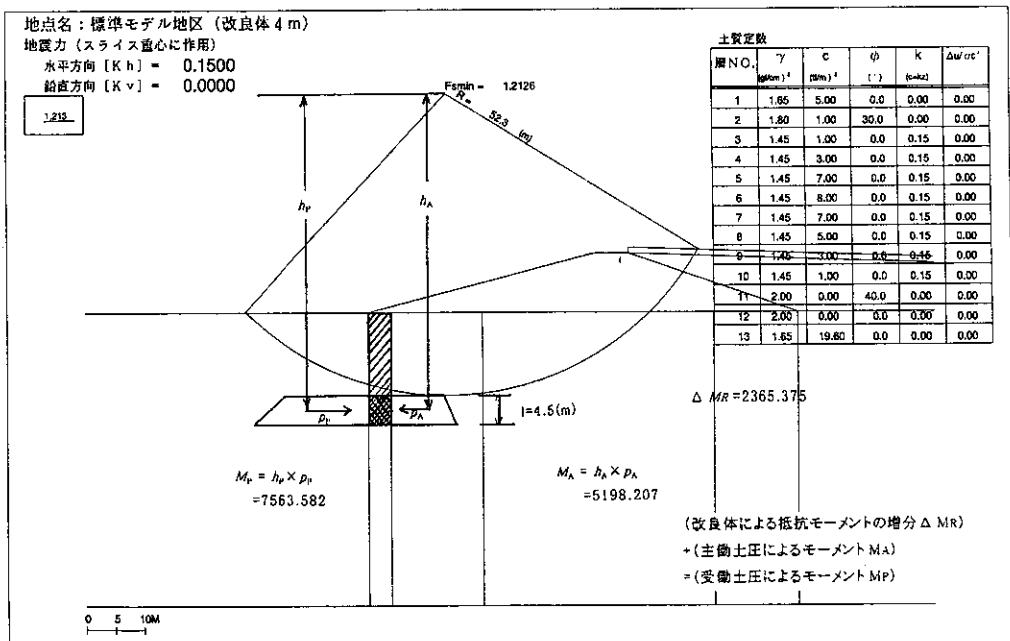


図-5 モーメントのつりあいによる方法

Fig. 5 Method using balance of moments

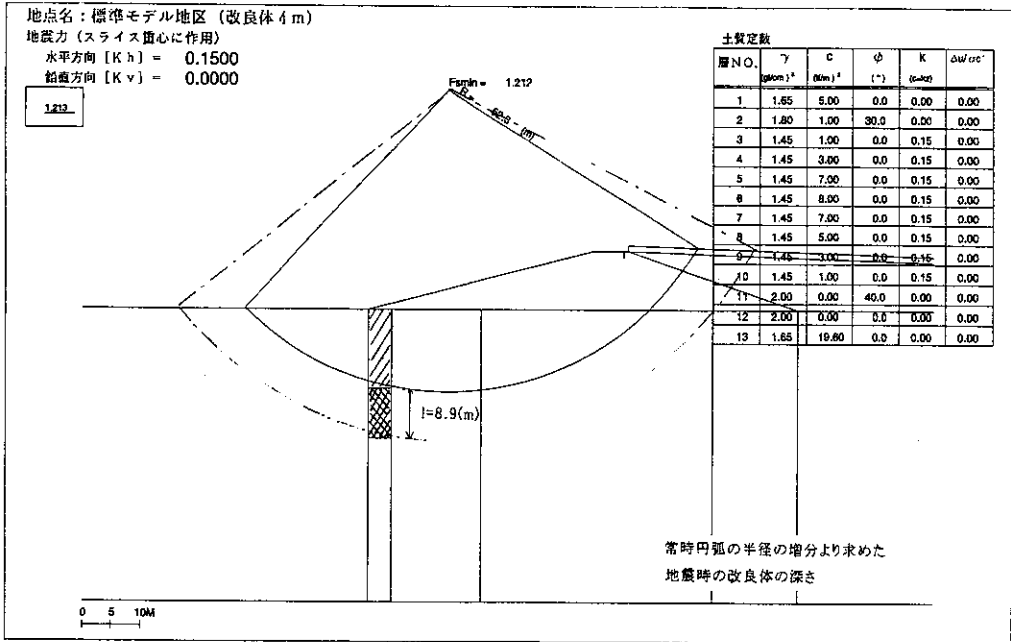


図-6 円弧半径と安全率の関係による方法

Fig. 6 Method using relationship between circular radius and safety rate

③ 根入れ深さによる方法

地すべり抑止杭の深さをせん断抵抗力で検討する場合（せん断杭）の考え方を適用した。必要な根入れ深さは、抑止深度の1/2で与えられる。L=7.2m（図-7）。

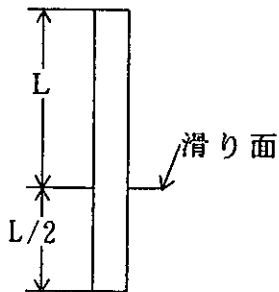


図-7 せん断杭の考え方

Fig. 7 Shearing pile concept

(3) 考察

今回の検討ケースの場合、対策深度は4~9mの根入れにより、全長で18~23mという結果になった。このことは、通常の層厚の粘性土層では、改良体着底の必要性は一概には判断できないが、少なくとも30~40mに達するような厚い粘性土層においては、フローティング式導入の可能性を示している。ただし、上記の方法は、いずれも説得性と合理性を兼ね備えるものではなく、また粘土地盤上の盛土の動的遠心模型実験において、粘土層の半分の深さにフローティングさせた改良体にはその効果が見られないという報告もあり⁶⁾、対策深度については、今後の動的遠心模型実験結果および弾塑性FEMによる解析結果等も取り入れて、さらに検討する必要がある。

5. まとめ

- (1) 高規格堤防の地震時対すべり安定性の検討は、現状ではレベル1地震動について円弧すべり面法で行うことが妥当である。今後、永久変形解析により、レベル2地震動への対応の必要性を検討する。
- (2) 永久変形解析の実用化検討は、今後、弾塑性FEMによる方法を中心に進める。
- (3) 深層混合処理工法の対策深度は、今後の動的遠心模型実験結果および弾塑性FEM解析結果等も取り入れてさらに検討を必要とする。

今後の課題としては、上記項目の他に、粘性土の動的強度を含む地盤のせん断強度の評価方法に対する検討等が挙げられる。

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および若井明彦氏に解析作業を協力いただいた。ここに感謝の意を表す。

<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、リバーフロント研究所報告第7号、1996
- 2) (社)土木学会：土木学会耐震技術等に関する提言集、1996
- 3) 佐々木・松尾・館山：盛土の地震による変形量の一解析手法、第17回土質工学研究発表会、1982
- 4) 鶴飼恵三：安定解析におけるせん断強度低減法の有用性、土と基礎、vol.38、No.1、pp67-72、1990
- 5) 鶴飼恵三：地震時に生じる斜面のすべり変位量の解析、土質工学会論文報告集、vol27、No.1、pp136-146、1987
- 6) 田本・松尾・島津・横川：粘土地盤上の盛土の動的遠心模型実験（その2）、第32回地盤工学研究発表会、1997