

砂・粘土互層地盤上の河川堤防の地震時挙動と矢板補強効果の解析的検討

地震応答解析，堤防，互層

名古屋大学 学生会員 加藤健太 尾崎奨
名古屋大学 国際会員 中井健太郎 野田利弘

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震では河川堤防も甚大な被害を受けた。南海トラフ巨大地震や首都直下地震など、巨大地震の発生が危惧されている中、河川堤防の耐震性を適切に評価し、必要な耐震対策を施すことが求められている。本報では、液状化の危険性の高い軟弱地盤上に築造された河川堤防の地震時挙動を解析的に評価するとともに、鋼管矢板による補強効果について検討した。用いた解析コードは、砂から粘土さらに中間土までを同じ理論的枠組みで記述可能な土の弾塑性構成式（SYS カムクレイモデル¹⁾）を搭載した動的/静的水～土骨格連成有限変形解析コード **GEOASIA**²⁾である。

2. 解析条件

本報では図1に示す有限要素メッシュを用いた。地層構成は、深部から洪積層（支持層）、その上部に軟弱な粘性土層、表層に緩い砂質土層が存在している水平成層地盤とした。この基礎地盤上に堤防高5m、堤防天端は右岸が7m、左岸が14m、法面勾配が1:1の河川堤防を築堤した後で、河道部分の掘削を行い、河川の水位をT.P.+1.2mまで上昇させた。

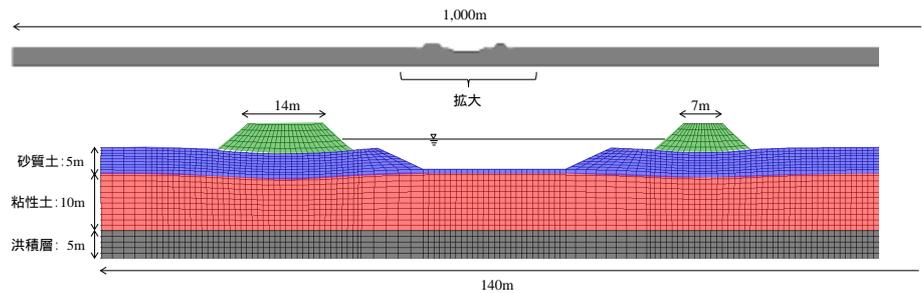


図1 有限要素メッシュと地層構成

た。水理境界は、地表面が地下水位面と一致するように水圧ゼロとし、下端及び両側面は非排水条件、堤外地側の要素の水理境界は水位の高さに応じた水圧を要素に与える排水境界としている。材料定数は東海地方の河川堤防のボーリング調査で採取された試料を用いて行われた各種力学試験結果をSYSカムクレイモデルで再現することによって決定している。初期状態に関しては、骨格構造の程度（構造、過圧密、異方性）や初期応力比は各層で均一とし、比体積を土被り圧に応じて分布させた。入力地震波は、中央防災会議（2004）で策定された名古屋港付近における東海・東南海・南海3連動地震波で、工学的基盤での V_s を考慮して2倍に増幅させ、地盤底面の全節点の水平方向に等しく入力した。地震時は境界両側端で周期境界を設定するとともに、地盤底面に $V_s=300\text{m/s}$ に相当する粘性境界を用いた。

ボーリング調査から得られた粘性土は、鋭敏で構造高位な状態にあった。粘性土の状態が河川堤防の地震時挙動に与えるこの影響も調べるため、構造高位な状態（決定した初期状態をそのまま使用）と、構造低位な状態（に対して構造のみを低位化）について解析を実施し、両者を比較した。また著者らはこれまでに、既存の止水矢板の耐震性について検討し、もともと耐震性を考慮していない止水矢板単体では堤体の沈下量やストレッチング量低減には効果がないことを示してきた³⁾。そこで本報では、耐震対策として有効な補強方法についても検討するため、根入れが浅い矢板が川表・川裏の両側に打設されている場合、根入れの深い矢板が川表・川裏の両側に打設されている場合、根入れが浅い矢板が川表・川裏の両側に打設され、その上部をタイロッドで結んだ場合、の3ケースで解析を実施した。～については同一の材料定数・初期状態を用いている。

3. 解析結果

解析ケースおよびにおける地震直後のせん断ひずみ分布を図2に、地震時の層別沈下量を図3に示す。なお、堤防の沈下量や水平変位については、右岸と左岸において大きな差異が見られなかったため、本報では左岸堤防に着目して考察を行う。構造高位なでは、地震直後から発生する砂質土の液状化に起因して、堤防の沈下と側方流動が見られる。さらに、堤防直下の粘性土層で生じた滑りが、さらなる堤防の沈下と河床隆起を引き起こし、河積が減少している。一方、構造低位なを見ると、砂質土ではと同様の液状化被害が見られるものの、粘性土ではせん断ひずみの程度も小さく、滑りは見られない。この粘性土層の被害の差異によって、総沈下量はの方がより大きくなっている（図3）。以上から、粘性土が構造高位で軟弱な場合、従来は地震時被害が発生しない/しにくいと考えられてきた粘性土層においても、特に河川堤防直下のように偏荷重を受ける箇所付近では、地震中の沈下や滑りが発生し、被害が甚大化する危険性がある。

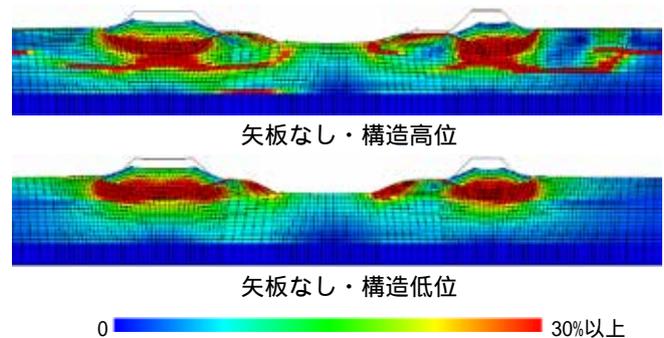


図2 粘性土層の状態の異なる解析ケースの比較
(地震直後のせん断ひずみ分布)

続いて解析ケースの地盤に対して、鋼管矢板による補強効果を検証した。解析ケース～における地震直後のせん断ひずみ分布を図4に示す。なお、鋼管矢板は一相系弾性体としてモデル化し、降伏モーメン

トに達した要素はヤング率を 100 分の 1 に減少させることで、簡易的に鋼管矢板の降伏を表現している。また、タイロッドは矢板先端部の 2 節点間の距離が不変という制約条件を与えて再現した。根入れの浅い矢板のみの では、液状化層の側方流動を抑えることができず、矢板が逆八の字に開いてしまう。また、粘性土層深部で鋼管矢板の先端を回り込むような滑りが生じてしまい、逆に河床隆起量が増加してしまう。一方、根入れを支持層まで深くした では、矢板が洪積層と粘性土層の境界で降伏したものの、矢板の変位は小さく、液状化層の側方流動を抑え込むことができている。また、粘性土での滑りも発生しておらず、河道部分の変形が最も小さくなる。鋼管矢板間をタイロッドで結んだ では、と同様に鋼管矢板の先端を回り込むような滑りが発生しているものの、タイロッドによる拘束効果により堤体や砂質土層の側方流動を抑制できる。

全解析ケースの堤防天端中央部分における沈下量を図 5 に示す。の沈下量は無対策の とほとんど差がなく、矢板の補強効果が現れていない。や では無対策の と比較して、では 94cm、では 73cm 沈下量が小さくなり、地震後にもある程度の堤防高を確保できる。図 6 には、堤体法尻の水平変位量（ストレッチング量）を示す。においては沈下量と同様に、ストレッチング量の低減効果はほとんど見られず、逆に若干増加している。それに対して では、ストレッチング量が 2.4m となり、無対策の と比べてストレッチング量が半減する。鋼管矢板をきちんと支持層まで根入れすることで高い補強効果が得られることを示している。また、タイロッドを利用した では、ストレッチング量が 17cm と非常に小さい。矢板の根入れが浅くても、タイロッドで連結することで高い拘束効果が得られ、堤体の変状を低減できる。

4. おわりに

砂・粘土互層の軟弱地盤上の河川堤防では、地震中に砂質土層の液状化に伴って堤体の沈下や側方流動が生じる。粘性土が鋭敏で構造高位な場合には、砂質土の液状化に加えて、粘性土内から発生する滑りによって河床の隆起や堤体の更なる沈下が引き起こされ、堤防の機能が著しく低下する危険性があることを示した。また、鋼管矢板による河川堤防の補強効果について検討した結果、矢板が支持層まで打設されていない場合には側方流動を抑止することができず、耐震効果がほとんど得られないことを示した。しかしながら、矢板間をタイロッドで連結することによって、高い拘束効果が発揮され、沈下量および側方変位低減に効果的であることがわかった。

本研究は JSPS 科研費（20126012, 25249064）および南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト（文部科学省）の助成を受けた。ここに謝意を表す。また、本稿は地盤工学会東日本大震災対応調査研究委員会「地盤変状メカニズム研究委員会（委員長：浅岡顕）」に関連する研究報告である。

参考文献 1) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanics of soils, S&F 42 (5), 45-57. 2) Noda, T. et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, S&F, 48(6), 771-790. 3) 加藤健太, 野田利弘, 中井健太郎 (2013): 砂・粘土互層地盤の軟弱地盤上に築造された河川堤防の地震応答解析, 第 1 回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム講演概要集, 79-82.

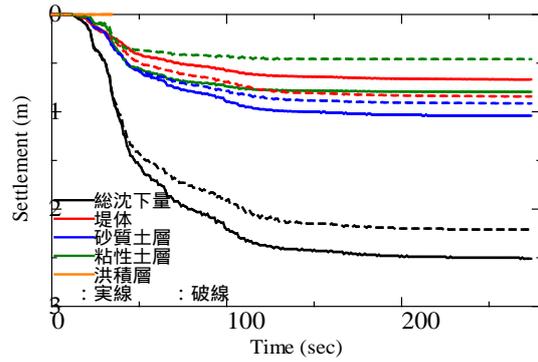


図 3 解析ケース の地震時の層別沈下量（左岸中央）

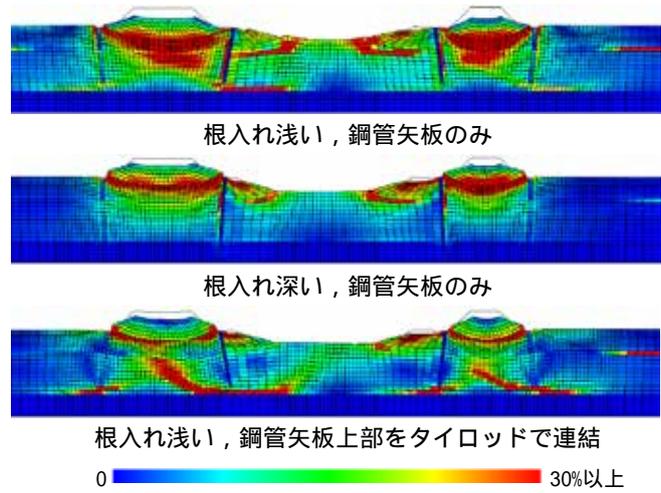


図 4 各補強対策の効果（地震直後のせん断ひずみ分布）

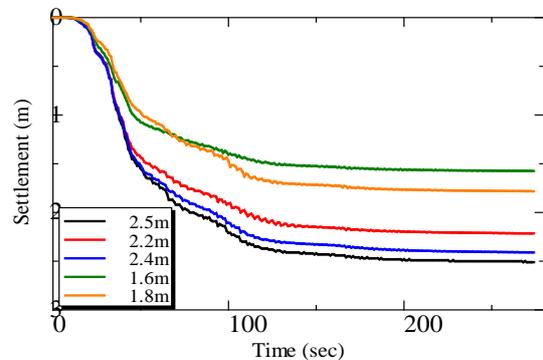


図 5 各解析ケースの地震時の天端中央沈下量（左岸）

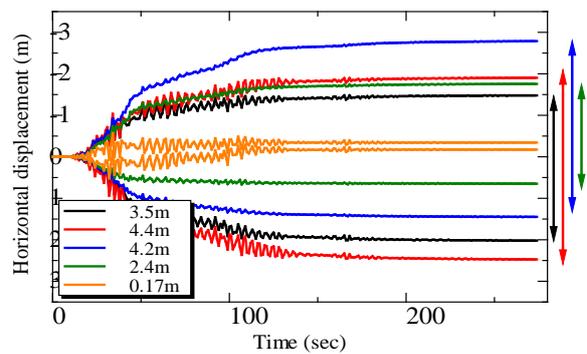


図 6 各解析ケースの地震時のストレッチング量（左岸）