

砂-粘土互層軟弱地盤上に築造された河川堤防の地震時被害に及ぼす地震動継続時間の影響

地震動継続時間，地震応答スペクトル，軟弱粘性土

名古屋大学
徳島大学

○中井健太郎，花田優，野田利弘
馬場俊孝，蔣景彩

1. はじめに

徳島県を流れる一級河川的那賀川下流域は典型的な三角州地形であり，広域の軟弱地盤地帯である．南海トラフ地震による甚大な被害が危惧されるため，耐震点検とそれに基づく耐震対策が進められている．しかし，現行の河川堤防の耐震性照査においては，粒径の比較的大きいシルトが支配的な土の場合や N 値が小さく軟弱な状態にあっても粘性土の場合に地震被害が十分に想定されていないこと，地層不整形性に起因する複雑な波動伝播の影響が考えられていないこと，堆積状態の不均一性などの地盤が有する不確実性の影響が十分には考慮されていないこと，ならびに耐震性照査に用いる設計用地震動は加速度応答スペクトルで規定されることが多く地震動継続時間の影響が十分には検討されていないこと，などの多くの課題が存在する．本報では，深部に軟弱粘性土が介在する砂-粘土互層地盤上に築造された河川堤防を対象に，地震動継続時間が地震被害に及ぼす影響を数値解析的に検討した．用いた解析コードは水～土連成有限変形解析コード¹⁾で，土骨格の弾塑性構成式として砂から粘土，両者の混在した中間土から特殊土までを同じ理論的枠組で記述する SYS カムクレイモデル²⁾を搭載している．

2. 対象地盤の地層構成

対象地域の地層構成は，表層から埋め土層 (B 層)，沖積砂層 (As 層)，沖積粘土層 (Ac 層)，沖積砂礫層 (Ag 層) が堆積し，その下は硬質な洪積層 (D 層) となっている．原位置調査から，B 層や As1 層は液状化強度の小さい砂質土，As2 層は中密な砂質土，Ac1 層は軟弱な粘性土，Ac2 層は圧縮性が高いシルト質粘性土である．対象地点は既に L2 地震動に対する耐震性照査が実施済みであり，その結果に基づき，堤防の嵩上げと静的締固め工法による地盤改良が実施済みである．解析に用いた有限要素メッシュを図-1 に示す．解析に用いた各層の弾塑性性状は現位置試験結果をもとに決定し，地盤改良部分は改良率を考慮した密な砂質土に置換することで再現した．

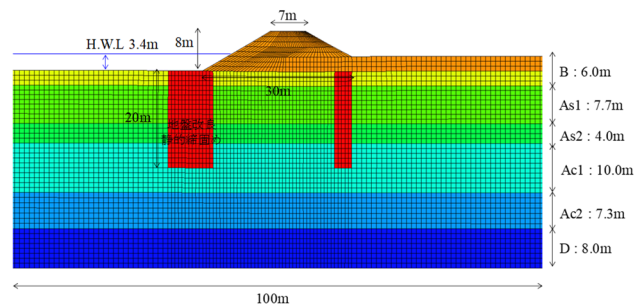


図-1 有限要素メッシュ図 (堤体付近拡大)

3. 入力地震動

図-2 に解析に用いた 3 つの入力地震動を示す．左図は加速度時刻歴，右図は加速度応答スペクトルである．ARTEQ (株式会社構造計画研究所) を用いて，河川堤防耐震性能照査で規定される応答スペクトル (図中の黒破線，レベル 2-1 地震動：発生頻度が低いプレート境界で発生する大規模な地震) に適合させた継続時間の異なる地震動である (地震波形の包絡関数は相似形となるようにした)．地震応答スペクトルからわかるように，いずれの地震動も短周期～長周期成分まで幅広く含む広帯域地震動である．なお，図中の T_b 、 T_p はそれぞれ定義の異なる地震動継続時間であり，代表的継続時間を表す b 継続時間とパワーの蓄積時間に基づく p 継続時間を示す³⁾．

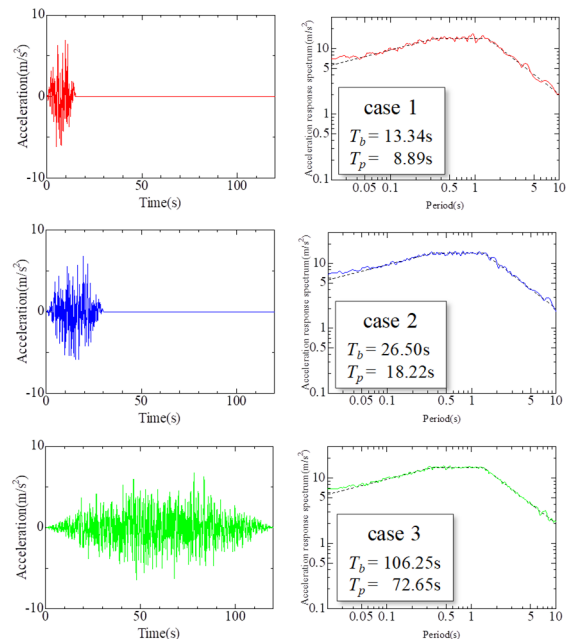


図-2 同一応答スペクトルを有する 3 種類の入力地震動

4. 解析結果

図 3 は各ケースの有効応力減少比とせん断ひずみの分布を示す．有効応力減少比は地震動終了直後，せん断ひずみは地震中に蓄積した過剰間隙水圧の消散に伴う圧密沈下が収束した時点を示している．有効応力減少比は初期平均有効応力を過剰間隙水圧で除したものである．地震前の 0 から増加して 1 に近づくほど有効応力が減少して地盤剛性が低下したことを示し，1 になると地盤は液状化したことを意味する．

有効応力減少比を見ると、地震動継続時間が長いほど有効応力減少の程度が大きい。特に case3 では砂質土である B 層および As1 層はほぼ全域で 1 に到達して液状化している。また、深部粘性土 Ac1・Ac2 層でも有効応力減少が顕著に見られる。一般的に粘性土は地震被害に対して鈍感であると言われているが、Ac1 層のように軟弱な状態にある場合や、Ac2 層のように比較的粒径が大きいシルト質粘性土が堆積している場合は長周期成分を含む長時間震動を受けると、大きな揺れによって地盤が乱されて有効応力が減少／剛性が低下する（紙幅の都合から詳細は省略するが、長周期成分を含まない場合は、粘性土層における有効力減少／剛性低下はほとんど見られない）。続いて、せん断ひずみを見ると、継続時間が長いほど特に盛土部分で変状が大きい。これは、盛土下部の砂質土層の剛性低下に起因する。また、すべてのケースにおいて深部粘性土、特に Ac2 層でも変状が生じる。上述の通り、長周期震動によって粘性土が乱されたことに起因する。

図-4 と図-5 は、盛土天端における沈下量と水平変位量を示す。継続時間の長い case3 で特に地震被害が大きい。沈下量に着目すると、一度収束しかけた沈下が 10^5 s 付近（地震発生から約 1 日後）から再び加速化している。これは粘土層において、地震中に減少した有効応力の回復に伴う圧密沈下が引き起こしており、粘性土が地震によって乱されると地盤変状は長期にわたって継続する危険性を指摘している。続いて水平変位に着目すると、震動初期の最大水平変位に大きな差異はないが、継続時間が長いほど残留変位が大きい。基本的には河川堤防の耐震対策は液状化層が対象となるため、当該地点でも地盤改良は浅部砂層に対して実施されている。本解析結果が示すように、軟弱粘性土層が地震動によって乱される場合、剛性低下に伴う側方流動によって、深部で大きな残留変形が生じる危険性も示唆している。

以上、同一応答スペクトルを有する地震動であっても、継続時間が長いほど地震被害が大きくなることを示した。これは砂質地盤の液状化や粘性土の乱れなど、地盤が示す弾塑性応答に起因する。設計用地震動は応答スペクトルで規定されることが多いが、強い弾塑性応答を示す軟弱地盤の場合は、特に地震動の継続時間の影響を考慮することが詳細な被害予測のためには重要であることを指摘した。

謝辞

本検討は、防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクトに関するもので、一部は JSPS 科研費 22H01742 の助成も受けた。また、弾塑性モデル化に使用した地盤情報は、国土交通省那賀川河川事務所から提供いただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

1) Noda, T. et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type..., S&F, 48(6), 771-790. 2) Asaoka, A. et al. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume..., S&F, 42(5), 47-57. 3) 神山真 (1984): 地盤の影響考慮した震動継続時間およびその関連..., 土木学会論文集, 350 (I-2), 271-280.

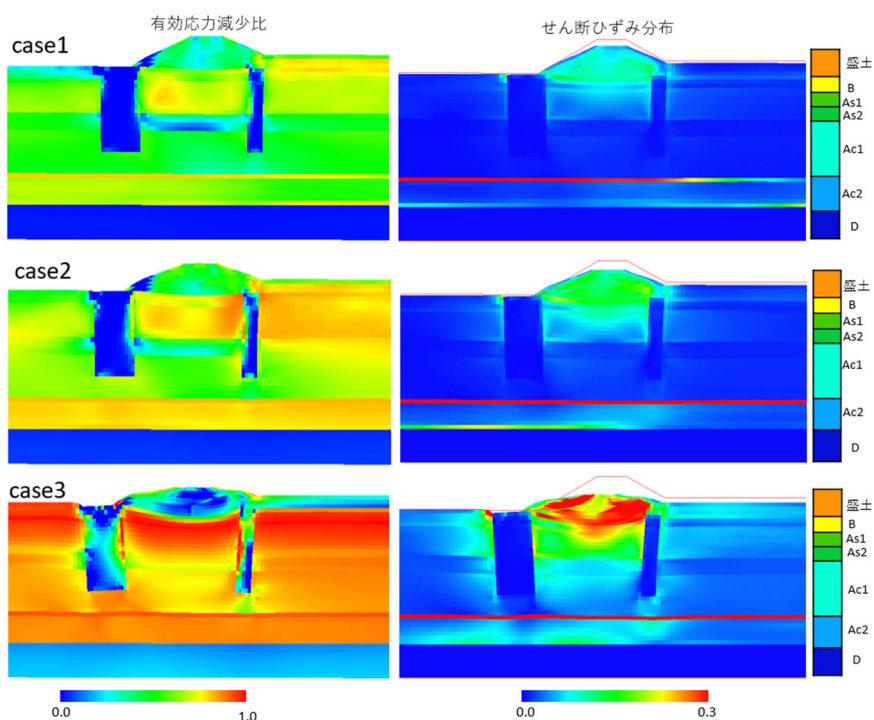


図-3 継続時間の影響（有効応力減少比とせん断ひずみ分布）

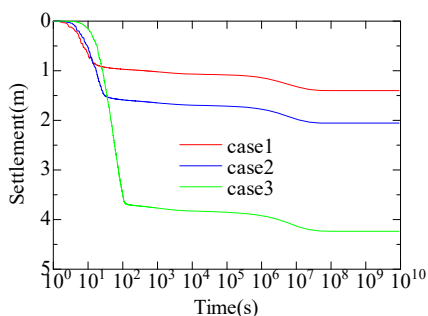


図-4 盛土天端の沈下量

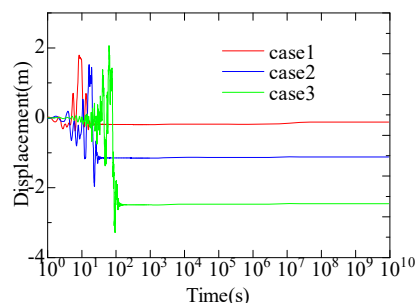


図-5 盛土天端の水平変位量