地震動継続時間を考慮した河川堤防－基礎地盤の液状化解析

京都大学大学院　学生会員　○蔡淞宇
京都大学大学院　正会員　岡二三生
京都大学大学院　正会員　木元小百合

１．目的

2011 年東北地方太平洋沖地震は東北地方で広範囲の堤防被害をもたらした。被災した堤防の堤体部には縦断方向の亀裂が発生し，天端の陥没及び法面の側方移動が見られた．特に宮城県においては粘性土基礎地盤上の堤防盛土に被害が多く，長い地震動継続時間も堤体内部の液状化を長期化させ，被害の要因とされる．また佐々木ら[1)]や岡村ら[2)]によって粘性土の圧密による盛土の沈下や盛土内の高水位の影響が指摘されている．本研究では堤防の水-土二相連成の動的解析を行い，堤体の構成，水位と地震動の継続時間が堤防の安定性に与える影響について考察する．

２．使用プログラム

本研究では砂の弾塑性構成式[3)]及び粘土の弾粘塑性構成式[4)]を組み込んだ動的解析プログラム LIQCA2D11[5)]を使用した．さらに弾塑性モデルには内部構造の変化の影響を導入した．過圧密境界曲面を決めるσ'_{mb}には式(1)のように体積ひずみv^pに依存するが，緩い砂においては塑性ひずみε_{ij}^pが支配的であることから，内部構造の変化に伴うひずみ軟化の挙動をσ'_{mbi}の減少として式(2)のように表現する．

$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{mbi}\exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa}v^p\right) \qquad \sigma'_{mbi} = OCR^*\sigma'_{m0} \qquad (1)$$

$$\sigma'_{mb} = \left\{\sigma'_{mbf} + \left(\sigma'_{mbi} - \sigma'_{mbf}\right)\exp(-\beta z)\right\}\exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa}v^p\right) \qquad (2)$$

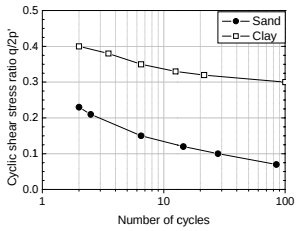
$$z = \int dz = \int \left(d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p\right)^{1/2}$$

３．解析モデル

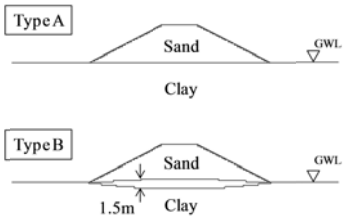
本研究で用いる地盤材料のパラメータと液状化強度曲線を表-1 と図-1 に示す．軟弱地盤の挙動を再現するため地盤層には粘土材料を用い，堤体部には砂質土を用いる．さらに液状化の影響を調べるため，堤体部と基礎地盤の境界に飽和砂質材料を加えることによって図-2 で示す 2 タイプの堤防モデルを構成した．TypeA は飽和層の無い堤防，TypeB は最大厚さ 1.5m の飽和層を有する堤防である．

表－1 材料パラメータ

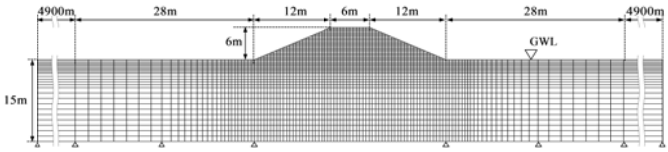
Parameter	Sand	Clay
Density ρ (t/m^3)	1.8 / 2.0	1.7
Water permeability k (m/s)	2.20×10^{-5}	5.77×10^{-10}
Initial void ratio e_0	0.8	1.25
Compression index λ	0.0250	0.3410
Swelling index κ	0.0003	0.0190
Normalized initial shear modulus G_0/σ'_{m0} (kPa)	761	75.2
Stress ratio at Maximum Compression M_m^*	0.909	-
Stress ratio at failure M_f^*	1.229	1.24
Quasi-overconsolidation ratio $OCR^*(=\sigma'_{mai}/\sigma'_{m0})$	1.0	1.0
Hardening parameter B_0^*, B_1^*, C_f	2000, 40, 0	100, 40, 10
Structure parameter $\sigma_{maf}/\sigma_{mai}$, β	0.5, 50	0.3, 3.6
Control parameter of anisotropy C_d	2000	-
Parameter of Dilatancy D_0^*, n	1.0, 4.0	-
Reference Value of Plastic Strain γ_r^{P*}	0.005	-
Reference Value of Elastic Strain γ_r^{E*}	0.003	-
Viscoplastic parameter m'	-	24.68
Viscoplastic parameter (1/s) C_1	-	1.00×10^{-5}
Viscoplastic parameter (1/s) C_2	-	3.83×10^{-6}
Hardening parameter A_2^*, B_2^*	-	5.9, 1.8
Strain-dependent modulus parameter α, r	-	10 , 0.4



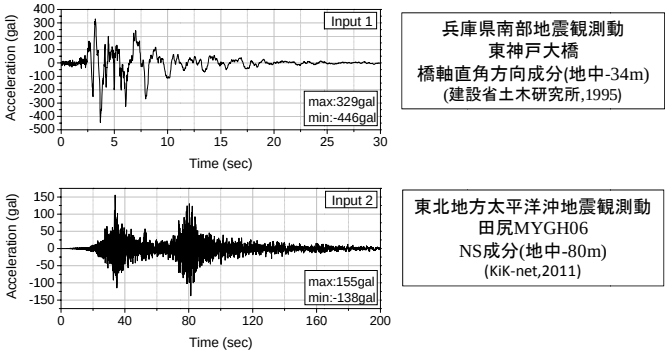
図－1　液状化強度曲線



図－2　堤防のモデルタイプ



図－3　堤防モデル



図－4　入力地震動

キーワード　堤防，液状化，粘土地盤，地震動の継続時間
連絡先　〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 4　C クラスター　C1 棟　ＴＥＬ&FAX：075-383-3193

入力地震動は地震動継続時間の影響を考察するため，図-4 で示す Input1, Input2 の 2 つの地震観測動を使用する．それぞれ直下型地震と海溝型地震の観測動である．以上で述べた堤防モデルと入力地震動を組み合わせ，4 ケースの動的解析を行った．各ケースの解析条件を表-2 で示す．

表-2　解析条件

	Input1	Input2
TypeA	*Case1-A*	*Case2-A*
TypeB	*Case1-B*	*Case2-B*

4．解析結果

堤防の天端沈下量時刻歴と地震終了時の変位ベクトルを図-5 と図-6 に示す．直下型地震の Case1-A 及び Case1-B では法尻付近の基礎地盤にも変形が及び，滑り状の変形が見られる．それに対して Case2-A の変形は微小であるが，Case2-B では堤体部の大変形が発生した．その基礎地盤はほぼ変形せず，堤体の飽和層は圧縮し，天端中央の陥没と法面の水平移動が発生した．図-7 の有効応力減少比分布をみると，Case2-B の飽和領域に液状化の発生が確認できる．また，変位時刻歴をみると，Case2-B 以外では地震動が収束した後に変位の収束が見られるが，Case2-B の場合，地震動の収束による変位の収束は見られず，解析終了時(200 秒)まで継続した．

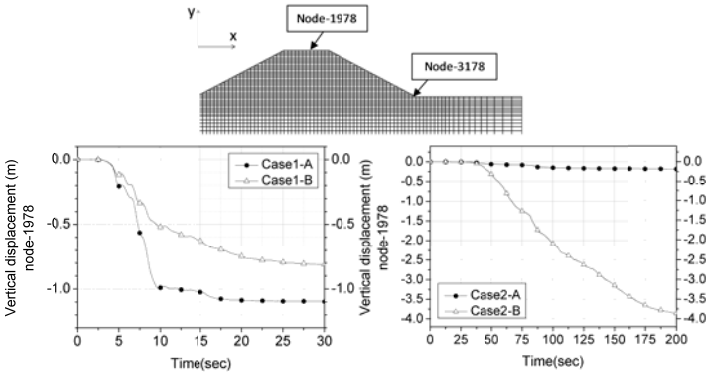


図-5　天端中央の沈下量

5．結論

地震時の堤防の動的解析により，地震動の長継続時間や堤防の事前沈下・高水位が堤防の被害に大きく影響することが明らかとなった．堤防は堤体の飽和領域の液状化と変形が長く継続したことによって被害が拡大し，その結果は実堤防の被害で見られた変形特徴と整合することが確認できた．

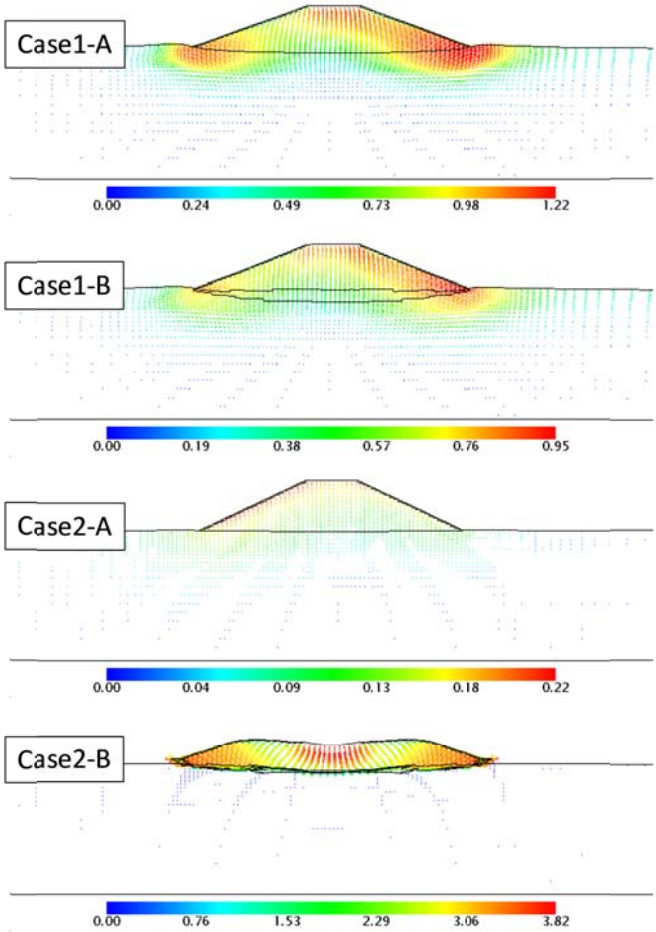


図-6　地震終了時の変位ベクトル図

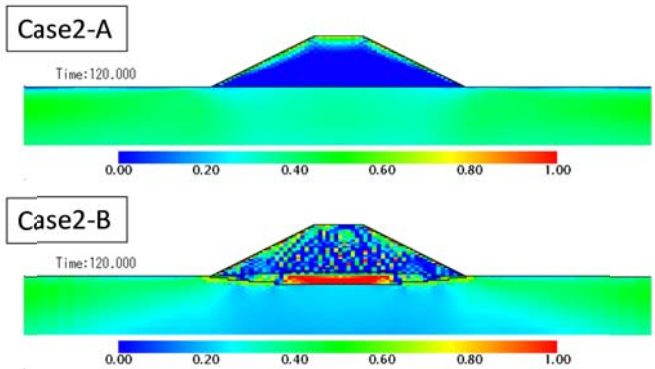


図-7　有効応力減少比分布図

参考文献

1) Sasaki, et al.: *Performance of Ground and Soil Structures during Earthquakes*, TC4, ISSMFE, 13th ICSMFE, JGS, pp.61-68, 1994. 2) 岡村未対ら:第46回地盤工学会発表会講演集, pp.1065-1066, 2011. 3) Oka, et al.: *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp.661-680, 1999. 4) Oka, F. and Kimoto, S.: Computational Modeling of Multi-phase Geomaterials, Taylor & Francis,2012(in press). 5)液状化解析手法 LIQCA 開発グループ：LIQCA2D11･LIQCA3D11 (2011 年公開版)資料,2011.