空気～水～土連成有限変形解析による 河川堤防の力学挙動に及ぼす地震と降雨の複合外力の影響評価

（Evaluation of effect of combined external force of earthquake and rainfall on the mechanical behavior of levee by a soil-water-air coupled finite deformation analysis）

西沢建吾[1]，吉川高広[1]，野田利弘[1]，岡田都希[2]

1　名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻　yoshikawa.takahiro@b.mbox.nagoya-u.ac.jp
2　名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 令和 2 年度修了生

概　　要

降雨による地盤・土構造物の被害が毎年発生している。また，大地震も断続的に起こっている。さらに，2004 年の新潟県中越地震と台風 23 号および 2009 年の駿河湾地震と台風 9 号のように，地震と降雨がほぼ同時に起こった事例もあり，このように地震と降雨の複合外力に対して地盤・土構造物の性能評価を行う必要性が高まっている。本稿では空気～水～土連成有限変形解析により，地震と降雨の複合外力を想定して，河川水位と堤体の飽和度の違いが堤防の地震時の力学挙動に与える影響について評価した。その結果，河川からの浸透による堤体の飽和度上昇だけでなく，河川水位に対応する表面力が堤体を堤内側に押す影響も大きいことを示した。

キーワード：複合外力，空気～水～土連成有限変形解析，河川堤防

1. はじめに

平成 30 年 7 月豪雨や令和元年東日本台風，令和 2 年 7 月豪雨のように，降雨による地盤・土構造物の被害が毎年発生している。また，2011 年の東北地方太平洋沖地震や 2016 年の熊本地震，2018 年の北海道胆振東部地震のように，大地震も断続的に起こっている。さらに，2004 年の新潟県中越地震ではその 3 日前に台風 23 号が日本に上陸し，2009 年の駿河湾地震は台風 9 号の接近中に発生しており，このように地震と降雨の複合外力に対して地盤・土構造物の性能評価を行う必要性が高まっていると言える。本稿では弾塑性構成式 SYS Cam-clay model[1)]を搭載した空気～水～土骨格連成有限変形解析コード[2)]を用いて，地震と降雨の複合外力が河川堤防の力学挙動に与える影響について述べる。具体的には，河川水位および堤体の飽和度の違いが地震時の力学挙動に与える影響について述べる。

2. 計算条件

図 1 は解析断面の概略図で，水理境界条件と空気の境界条件を中心に示す。2 次元平面ひずみ条件を仮定した。基礎地盤は飽和と仮定し，下端と左右端を非排水条件とした。地表面と堤体表面の水理境界は浸出面境界条件，空気の境界条件は大気圧を満たす排気条件とした。堤体は高さ 6m まで 12 回に分けて構築し[3)]，過剰間隙水圧が消散するまで圧密を行った。表 1 は弾塑性構成式 SYS Cam-clay model[1)]に関する材料定数と初期値を示す。粘性土地盤の材料定数と初期値は，東日本大震災で被災した鳴瀬川下中ノ目地区でサンプリングされた不攪乱試料の力学試験結果から決定した値[4)]を用いた。堤体の材料定数と初期値は実河川堤防に用いられている土試料の力学試験結果から決定された値[5)]を用いた。表 2 は堤体の水分特性モデルに関する材料定数と初期値およびその他の物性値を，図 2 は水分特性曲線および透水係数・透気係数と飽和度の関係を示す。堤体の水分特性は，Carsel and Parrish[6)]の silt の van Genuchten モデル[7)]のパラメータを参考にして決定し，透水・透気係数には Mualem モデル[8)]を用いた。初期地盤および堤体を作製する際には，比体積，構造の程度，飽和度，間隙空気圧，応力比および異方性の程度を各層で均一とし，過圧密比を土被り圧に応じて鉛直方向に分布させた[9),10)]。これらは著者らの既往研究[4)]に準じた条件となっている。

次に河川水位について，堤体構築時は初期の地表面位置と一致させ，その後，図 1 の堤外側の青線で示した箇所において河川水位を 1 日で 5m 上昇させた。つまり，全水頭を 15m から 20m に変化させ（位置水頭の基準面は解析断面の下端），水位に対応する表面力も作用させた。なお，本稿で示す計算では，降雨が堤体内へ浸透する条件は考慮していない。具体的な計算ケースは，河川水位を上昇させ

ない場合を CASE0 として，CASE1 では水位上昇直後に，CASE2 では定常状態になるまで放置した後に地震波を入力した。CASE3 と 4 はそれぞれ，CASE1 と 2 から 2 日間で河川水位を元の高さまで低下させた後で地震波を入力した。図 3 は地震直前の飽和度分布を示す。CASE1 と 3 は堤外側の堤体表面付近のみ飽和度が高く，CASE2 と 4 は堤体の飽和度が全体的に高い。CASE1 と 3 および CASE2 と 4 の飽和度の違いは小さい。

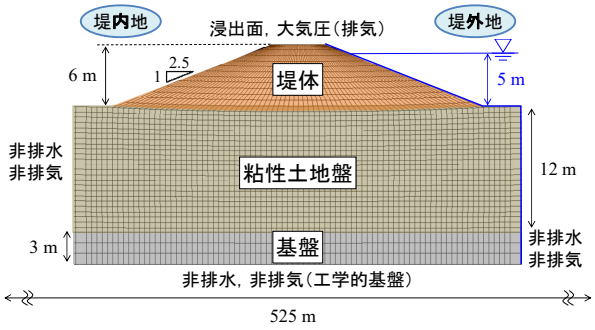

図 1　解析断面

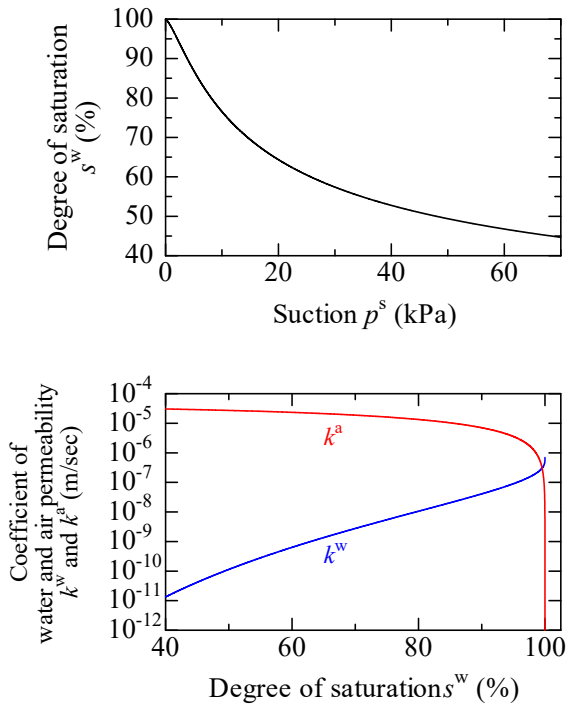

図 2　堤体の水分特性曲線および
透水係数・透気係数と飽和度の関係

表 1　土骨格の構成式に関する材料定数と初期値

		基盤	粘性土地盤	堤体
弾塑性パラメータ	NCL の切片 N	1.98	2.45	1.765
	限界状態定数 M	1.2	1.5	1.35
	圧縮指数 $\tilde{\lambda}$	0.045	0.25	0.11
	膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.002	0.07	0.02
	ポアソン比 ν	0.15	0.2	0.3
発展則パラメータ	正規圧密土化指数 m	0.08	7.0	0.5
	構造劣化指数 a ($b=c=1.0$)	2.2	0.1	1.7
	構造劣化指数 c_s	1.0	0.5	1.0
	回転硬化指数 b_r	3.5	0.1	0.1
	回転硬化限界定数 m_b	0.9	1.0	0.4
初期値	構造の程度 $1/R^*_0$	1.01	2.3	1.5
	過圧密比 $1/R^*_0$	分布	分布	分布
	比体積 v_0	1.623	2.39	1.74
	応力比 η_0	0.545	0.545	0.375
	異方性の程度 ζ_0	0.545	0.545	0.375
土粒子密度 ρ^s (g/cm^3)		2.636	2.65	2.67
飽和透水係数 k_s^w (m/s)		8.25×10^{-5}	3.33×10^{-7}	6.94×10^{-7}

表 2　堤体の水分特性に関する材料定数と初期値

最大飽和度 s^w_{max} (%)	100.0
最小飽和度 s^w_{min} (%)	7.4
van Genuchten パラメータ α (kPa^{-1})	0.163
van Genuchten パラメータ n' ($m'=1-1/n'$)	1.37
乾燥透気係数 k^a_d (m/s)	3.82×10^{-5}
初期間隙空気圧 p^a_0 (kPa)	0.0
初期飽和度 s^w_0 (%)	65.6

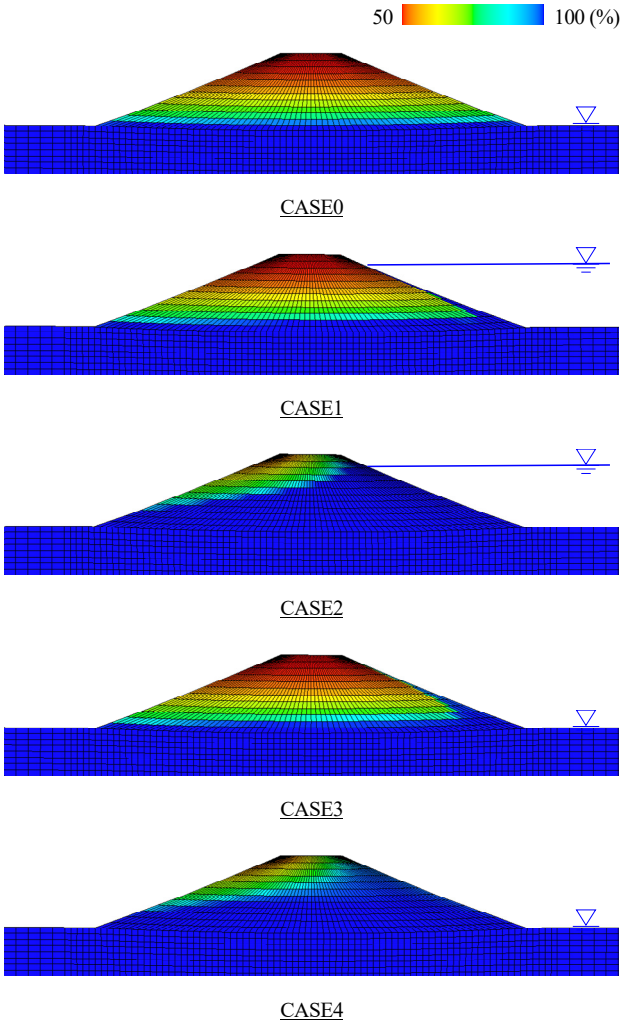

図 3　地震直前の各ケースの飽和度分布と河川水位

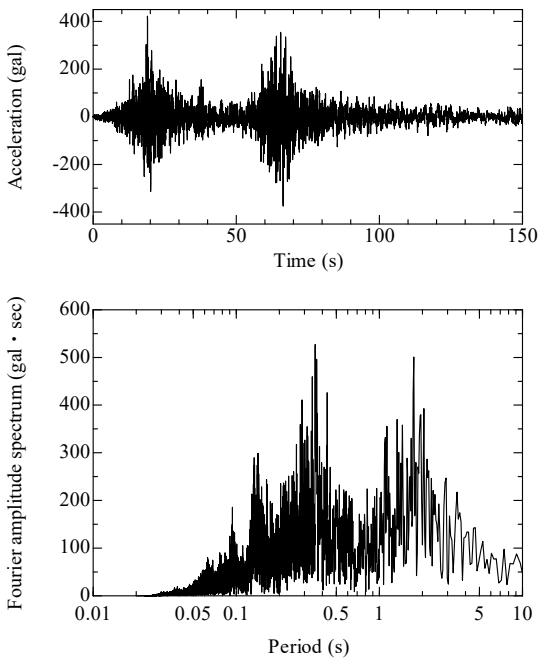

図 4　入力地震波とフーリエ振幅スペクトル

図 4 は入力地震波とフーリエ振幅スペクトルを示す。東北地方太平洋沖地震における KiK-net 田尻（MYGH06）の NS 成分地震波形を，翠川の式[11]を用いて V_s=300m/s での値に補正した。元データは 300 秒の地震波であるが，計算時間短縮のために，振幅が大きい 150 秒間を取り出した。この地震波を 2E 波と考え，E 波を下端の水平方向に入力した。地震時には地盤底部の水平方向を粘性境界[12)13)]にして，側方には側方境界要素単純せん断変形境界[14)]を与えた。

3.　計算結果

図 5 と図 6 はそれぞれ地震直後のせん断ひずみと平均骨格応力の分布図を示す。まず CASE0 と CASE1・2 の比較から，河川水位が高い場合は堤内側に大きな変形が生じている。これは，河川水位に対応する表面力が堤体に作用した状態で地震を受け，堤内側に押される状態で変形したためである。一方で，水位を低下させた CASE3・4 では堤内側への大きな変形は見られない。次に，飽和度が異なる CASE1 と 2 および CASE3 と 4 を比較すると，飽和度が高

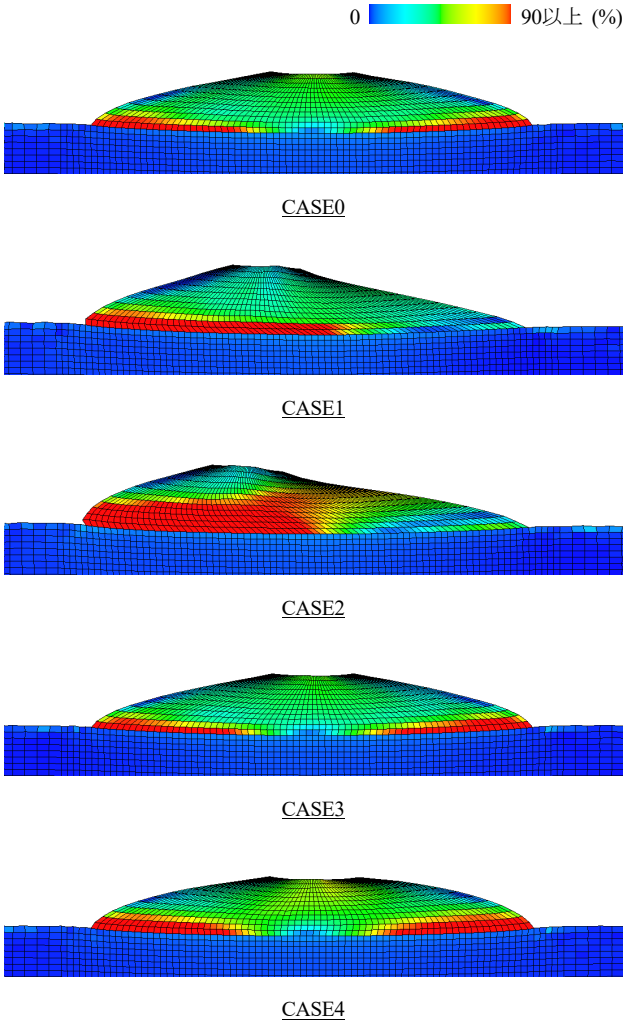

図 5　地震直後のせん断ひずみ分布
（河川水位が高いほど堤内側への変形が大きく，
堤体の飽和度が高いほどせん断ひずみは大きい）

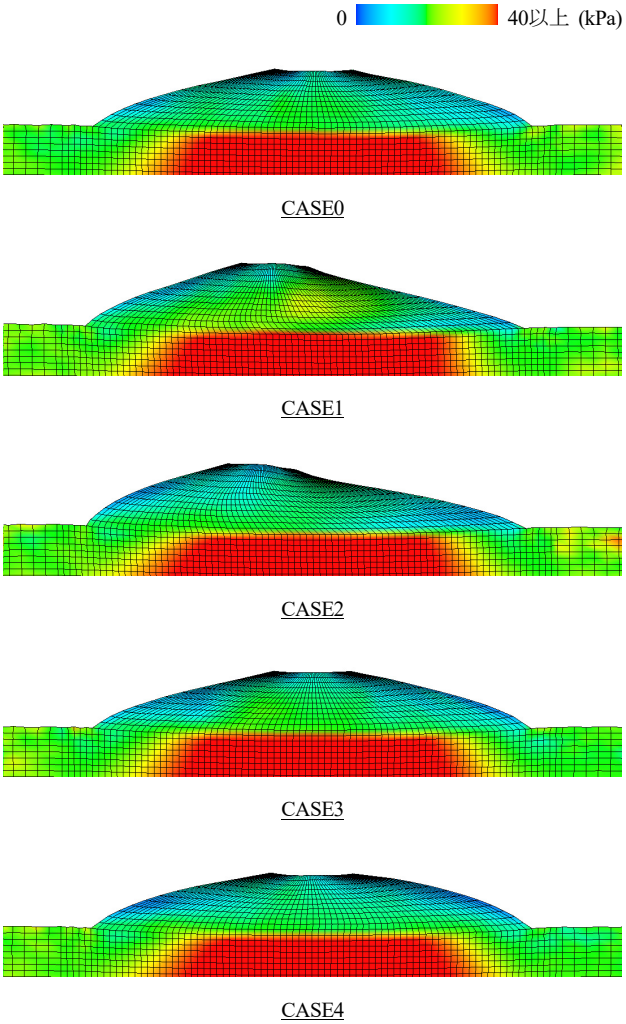

図 6　地震直後の平均骨格応力分布
（堤体の飽和度が高いほど平均骨格応力は小さい）

いCASE2およびCASE4の方が地震中に平均骨格応力が低下して，大きなせん断変形が生じている。飽和度が高いほど地震中に体積変化が生じにくく，塑性体積圧縮（負のダイレタンシー）が弾性体積膨張に働き，平均骨格応力が低下して，土骨格の剛性が低下したためである。図 7 は堤内側法尻の水平変位～時間関係を，図 8 は天端中央の沈下量～時間関係を示す。上述の通り，水位が高い CASE1・2 は堤内側への水平変位が大きい。初期の飽和度が異なる CASE1 と 2 および CASE3 と 4 を比較すると，飽和度が高いCASE2およびCASE4の方が水平変位と沈下量が大きい。なお，水位が高い方が沈下量は小さい理由は，堤外側への水平変位は抑えられるためである。

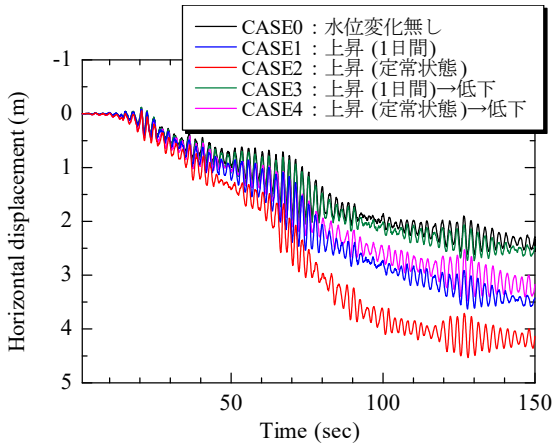

図 7　堤内側法尻の水平変位

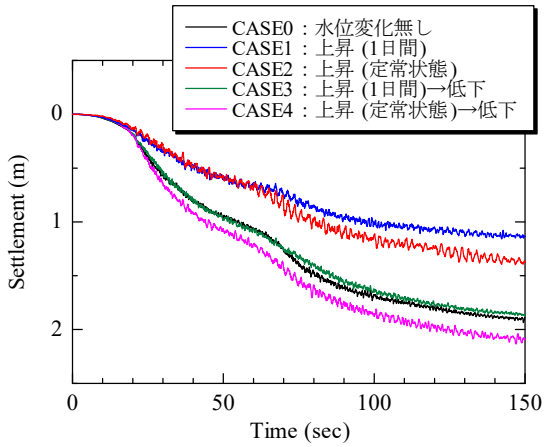

図 8　天端中央の沈下量

4.　おわりに

降雨により河川水位が上昇した状態で堤防が地震外力を受ける場合，河川からの浸透による堤体の飽和度上昇だけでなく，河川水位に対応する表面力が堤体を堤内側に押す影響も大きいことを示した。本稿では降雨後の地震を想定した解析を行ったが，今後は地震後の降雨にも注目した評価も行っていきたい。

謝辞

JSPS 科研費 17H01289 の助成を受けた。ここに，謝意を表します。

参　考　文　献

1) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils. Soils and Foundations, 42(5), 47-57, 2002.
2) Noda, T. and Yoshikawa, T.: Soil-water-air coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, Soils and Foundations, 55(1), 45-62, 2015.
3) Takaine, T., Tashiro, M., Shiina, T., Noda, T. and Asaoka, A.: Predictive simulation of deformation and failure of peat-calcareous soil layered ground due to multistage test embankment loading, Soils and Foundations, 50(2), 245-260, 2010.
4) Yoshikawa, T., Noda, T., Kodaka, T. and Takaine, T.: Analysis of the effect of groundwater level on the seismic behavior of an unsaturated embankment on clayey ground, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 85, 217-230, 2016.
5) Sakai T. and Nakano M.: Interpretation of the effect of compaction on the mechanical behavior of embankment materials based on the soil skeleton structure concept, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1179-1182, 2013.
6) Carsel, R.F. and Parrish, R.S.: Developing joint probability distribution of soil water retention characteristics, Water Resources Research, 24(5), 755-769, 1988.
7) van Genuchten, M. T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, 44, 892-898, 1980.
8) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resources Research, 12, 513-522, 1976.
9) Noda, T., Asaoka, A. and Yamada, S.: Some bearing ca-pacity characteristics of a structured naturally deposited clay soil, Soils and Foundations, 47(2), 285-301, 2007.
10) Nakano, M., Yamada, E. and Noda, T.: Ground improve-ment of intermediate reclaimed land by compaction through cavity expansion of sand piles, Soils and Foundations, 48(5), 653-671, 2008.
11) 翠川三郎：関東平野を対象とした震度分布予測，構造工学論文集，33B，43-48，1987.
12) Lysmer, J. and R.L. Kuhlemeyer: Finite dynamic model for infinite media, ASCE, 95(EM4), 859-877, 1969.
13) Noda, T., Takeuchi, H., Nakai, K. and Asaoka, A.: Co-seismic and post-seismic behavior of an alternately layered sand-clay ground and embankment system accompanied by soil disturbance, Soils and Foundations, 49(5), 739-756, 2009.
14) 吉見吉昭，福武毅芳：地盤液状化の物理と評価・対策技術，技報堂出版，2005，344pp.