

三相系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河川水位の複合外力の影響評価

名古屋大学 正会員 ○吉川 高広
フェロー会員 野田 利弘

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 model¹⁾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、下端を非排水条件、左右端を全水頭（＝位置水頭＋圧力水頭）一定条件とした。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。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。堤体の水分特性は、Carsel and Parrish⁶⁾の silt の van Genuchten モデル⁷⁾のパラメータを参考にして決定した。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、

左右端は全水頭＝15m 一定（位置水頭の基準面は解析断面の下端）とした。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、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 CASE4 はそれぞれ、CASE1 と CASE2 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 2 は地震直前の飽和度分布を示す。CASE1 と CASE3 は堤外側の堤体表面付近のみ飽和度が高く、CASE2 と CASE4 は堤体の飽和度が全体的に高い。CASE1 と CASE3 および CASE2 と CASE4 の飽和度の違いは小さい。

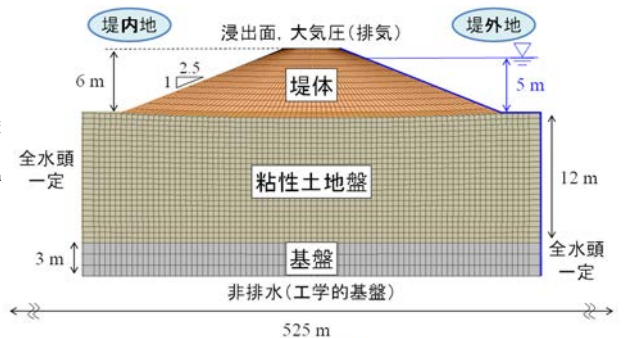


図 1 解析断面

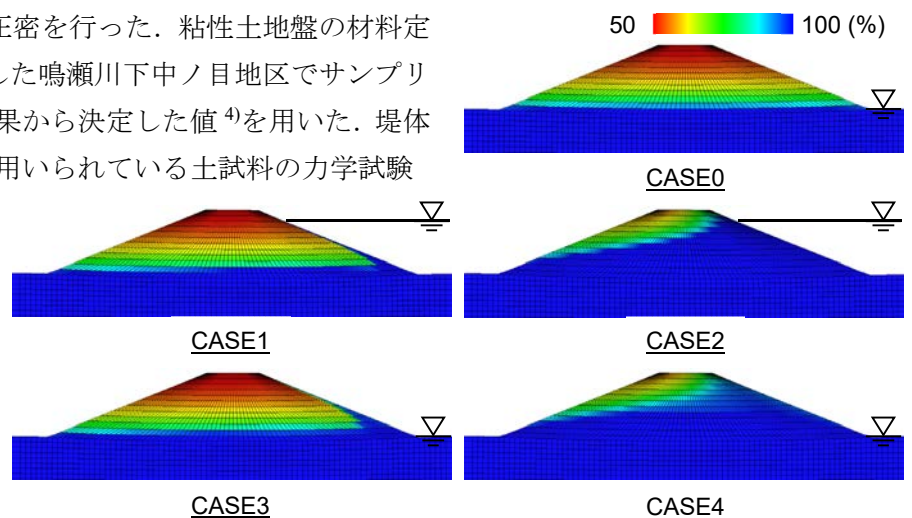


図 2 地震直前の各ケースの飽和度分布と河川水位

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

連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学工学部 9 号館 3 階 TEL : 052-789-3834

図3は入力地震波を示す。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⁸⁾を用いて $V_s=300\text{m/s}$ 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波を解析断面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⁹⁾にして、側方には側方境界要素単純せん断変形境界¹⁰⁾を与えた。

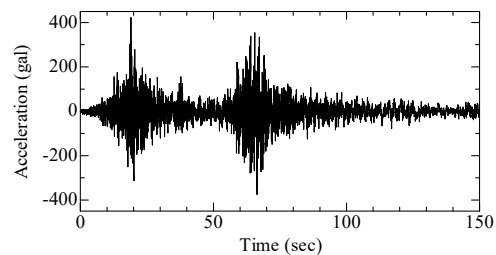


図3 入力地震波

0 90 以上(%)

0 20 以上(kPa)

3. 計算結果

図4は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CASE2およびCASE3とCASE4を比較すると、飽和度が高い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5は堤内側法尻の水平変位～時間関係を、図6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CASE2およびCASE3とCASE4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。

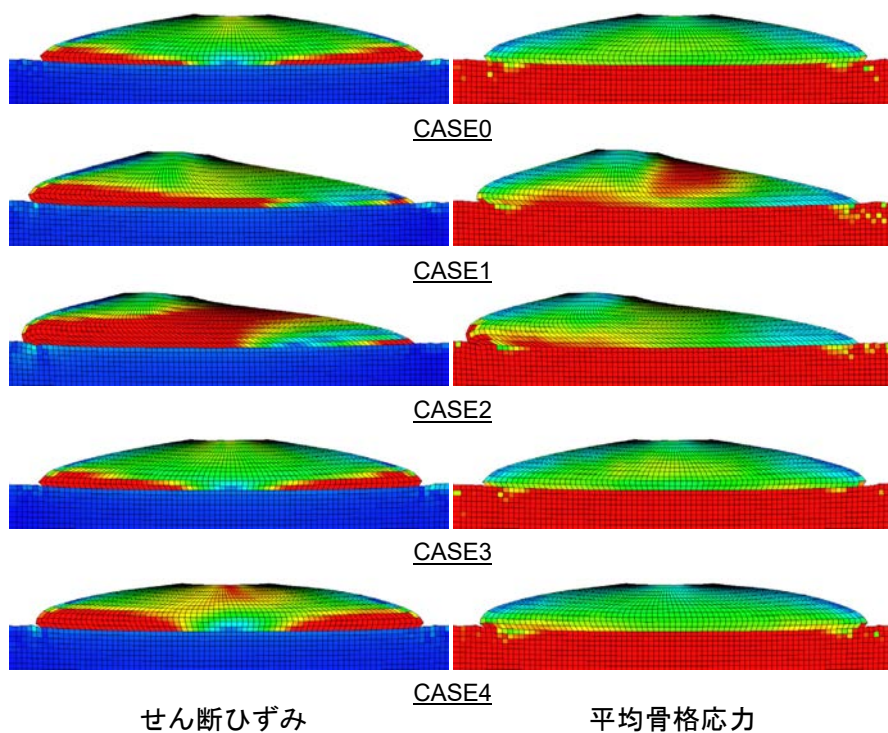


図4 河川水位と堤体の飽和度の違いが地震時の力学挙動に与える影響

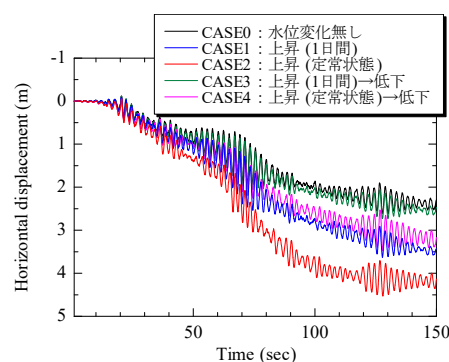


図5 堤内側法尻の水平変位

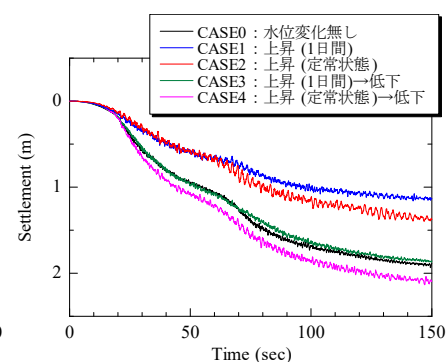


図6 天端中央の沈下量

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。

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。

参考文献: 1) Asaoka et al. (2002): An elasto-plastic..., S&F, 42(5), 47-57. 2) Noda and Yoshikawa (2015): Soil-water-air..., S&F, 55(1), 45-62. 3) Takaine et al. (2010): Predictive..., S&F, 50(2), 245-260. 4) Yoshikawa et al. (2016): Analysis..., Soil Dyn. Earthq. Eng., 85, 217-230. 5) Sakai and Nakano (2013): Interpretation..., Proc. of 18th ICSMGE, 1179-1182. 6) Carsel and Parrish (1988): Developing..., Water Resour. Res., 24(5), 755-769. 7) van Genuchten (1980): A closed-form..., Soil Sci Soc Am J, 44, 892-898. 8) 翠川 (1987): 関東平野..., 構造工学論文集, 33B, 43-48. 9) Lysmer and Kuhlemeyer (1969): Finite..., ASCE, 95(EM4), 859-878. 10) 吉見吉昭, 福武毅夫 (2005): 地盤液化の物理と評価・対策技術, 技報堂出版, 344pp.