

外水位変動を考慮した河川堤防の応力解析

福島工業高等専門学校 学生会員 ○小野 里花子
 福島工業高等専門学校 正会員 金澤 伸一

1. はじめに

降雨に起因する河川堤防の破堤原因として、越流、浸食、浸透が挙げられる。しかし、水位上昇の速度によっては河川堤防が破堤する前に水位上昇過程で堤体内において内部破壊（コラプス）が発生している可能性が考えられている。さらに、洪水あるいは地震による堤防の不安定化や変形のメカニズムは完全に解明されておらず、現在の技術的知見の整備は十分であると言えないのが現状である。破堤の対策を講じるためにその崩壊メカニズムを解明することは急務である。

そこで本研究では、不飽和土/水/空気連成要素有限法解析プログラム（DACSAR-MP）¹⁾を用いて、締固めを考慮した築堤解析を行った後、降雨を想定した水位変動解析を行い、水位上昇過程における堤体内の各応力の挙動の変化やそれによる影響の考察を試みた。

2. 研究方法

2.1 解析条件

図1に解析モデルを示す。堤体左下に排水層を設置し、変位、水理、空気境界は図1に示す通りとした。解析で扱う材料として、基礎地盤は砂混じりシルト、堤体はシルト混じり砂とした。用いた材料定数を表1、2、水分特性曲線を図2、3に示す。また、排水層の透水係数と透気係数を堤体の500倍に設定した。透水係数と透気係数以外の材料定数は堤体と同様である。

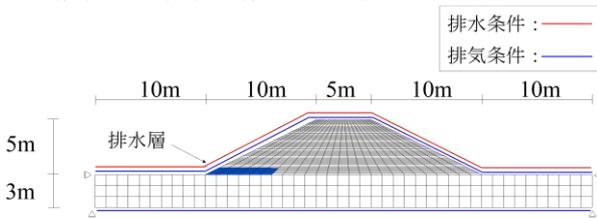


図1. 解析モデル

表1. 基礎地盤に用いた材料定数

M	n_E	a	m	ν	S_{r0}
1.33	1.3	10	0.8	0.33	0.15
e_0	k_x	k_y	λ	κ	G_s
1.2	0.1	0.1	0.18	0.037	2.7

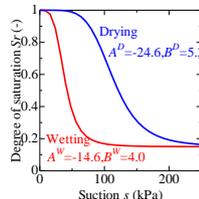


図2. 水分特性曲線（基礎地盤）

表2. 堤体部に用いた材料定数

M	n_E	a	m	ν	S_{r0}
1.33	1.3	10	0.8	0.33	0.15
e_0	k_x	k_y	λ	κ	G_s
1.2	17.28	8.64	0.18	0.037	2.7

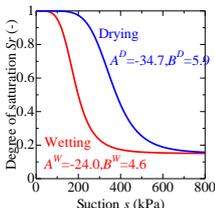


図3. 水分特性曲線（堤体部）

2.2 築堤解析

築堤解析では、一層 30cm、500kPa の締固めを、堤体高さ 5m になるまで繰り返して築堤した。解析上での築堤の表現として、要素を発生させ、そこに 500kPa を載荷、除荷させることで築堤を表現した。

2.3 水位変動解析

水位上昇解析では、解析モデルの堤体部右側を堤外地（河川側）とし、集中豪雨を想定して河川水の水位を上昇させた。解析上での水位上昇の表現として、水が浸潤する右法面と基礎地盤に水位上昇分の水頭を上げた後、水圧をかけることで水位上昇を表現した。水位は基礎地盤 0m から上昇させ、水位が天端 5m に到達した時点で解析を終了した。水位上昇速度は速度 1.4cm/min²⁾ に設定し、上昇速度が堤体に与える影響の違いを検討するため、上昇速度を 10 パターンに変え解析を行った。

3. 解析結果

3.1 築堤解析

図4に築堤完了後の堤体内の状態のコンターを示す。飽和度 S_r に着目すると、堤体左下部分が周囲に比べ若干小さい値を示しており、排水層が機能していることがみとれる。せん断ひずみ ϵ_s の分布をみると、堤体両法尻部分が周囲より大きな値を示しており、築堤完了時点で既に両法尻が弱部になっていることが確認できた。

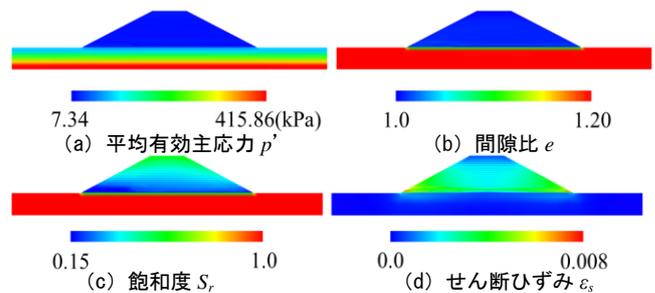


図4. 築堤解析

3.2 水位変動解析

図5に水位上昇時の各応力を示す。解析を行った 10 パターンのうち、特に著しい変化がみられた速度 1.4cm/min (case1)、35cm/min (case2) の結果を示す。それぞれ図は上から平均有効主応力 p' 、間隙比 e 、飽和度 S_r であり、図の左から各応力の水位 1m、3m、5m 時を抜粋したものである。

はじめに各応力の挙動の変化に着目する。平均有効主応力 p' をみると、どちらの case においても水位の上昇に伴い堤体内と基礎地盤にかけて値が小さくなり、

キーワード：河川堤防, コラプス

連絡先：〒970-8034 福島県いわき市平上荒川字長尾 30 福島工業高等専門学校 TEL：0246-46-0827

強度が低下していることがみてとれる。

間隙比 e に着目すると、どちらの case においても水位上昇に伴い浸潤面である右法面から堤体内にむかって値が小さくなり、体積が圧縮していることが確認できる。特に case1 の水位 5m 時に着目すると、全体的に体積が圧縮されていることが確認でき、平均有効主応力 p' の挙動から強度が低下したことを踏まえると、構造破壊が起きている可能性が考えられる。

飽和度 S_r をみると、水位上昇に伴い浸潤面から堤体内にむかって値が大きくなり堤体内が不飽和状態から飽和状態に変化することが確認できた。

次に、上昇速度の違いに着目する。各応力において、速度の遅い case1 が速度の速い case2 に比べ各応力の変化が顕著であった。これは、上昇速度が遅くなるほど河川水の浸透時間が長いためであると考えられる。特に、飽和度 S_r は上昇速度の違いが顕著にみられ、浸潤面の形成に大きな違いが確認できた。case1 ではなだらかな浸潤面、case2 では縦の浸潤面が形成された。case1 はまず基礎地盤から浸透し、その後基礎地盤から堤体に向かって上向きの浸透がされたものと考えられる。このとき、堤体は堤外地側からの左向きの浸透、基礎地盤からの上向きの浸透、それによる浮力をうけていると考察でき、構造的に弱くなっていることが考えられる。case2 では、基礎地盤から先に浸透することはなく、堤外地側からの左向きの浸透のみであるため縦の浸潤面が形成されたと考えられる。

さらに飽和度 S_r のより詳細な堤体内での挙動を検討するため、堤体内の要素の水位上昇過程における飽和度変化を図7、グラフで示した各要素の位置を図8に示す。図7より、堤外地側の要素である要素126、885、1385だけでなく、基礎中間に位置する要素113と堤内地側である要素100、187も不飽和状態から飽和状態に変化していることが確認できる。このことから水は堤内地側まで浸透しており、水みちが形成されていると考えられ、これによってパイピングが発生する可能性が考えられる。

4. 結論

以上の解析結果より、水位が上昇する過程において、平均有効主応力 p' の挙動より堤体内の強度が低下したこと、間隙比 e の挙動より体積が圧縮されたこと、飽和度 S_r の挙動より不飽和から飽和状態に変化したこと、これら各応力の挙動より、内部破壊（コラプス）が発生していると考えられる。またこれら各応力の変化が水位上昇に伴い堤体内に進行していくことから、内部破壊も水位上昇に伴い堤体内に進行していくものと考えられる。また水位上昇速度の違いとして、速度が遅い場合各応力の変化が顕著であったことから、上昇速度が遅いほど内部破壊が発生する可能性が高いと言える。さらに、上昇速度の違いが浸潤面の形成に大きな影響

を及ぼすことが確認できた。case1 の場合はなだらかな浸潤面、case2 の場合は縦の浸潤面を形成した。case1 では堤外地側からの左向きの浸透に加え、基礎地盤から上向きの浸透とそれによる浮力を受け、構造的に弱くなっていることが考えられる。実地盤において、水みちが形成されパイピングが発生する可能性が考えられる。

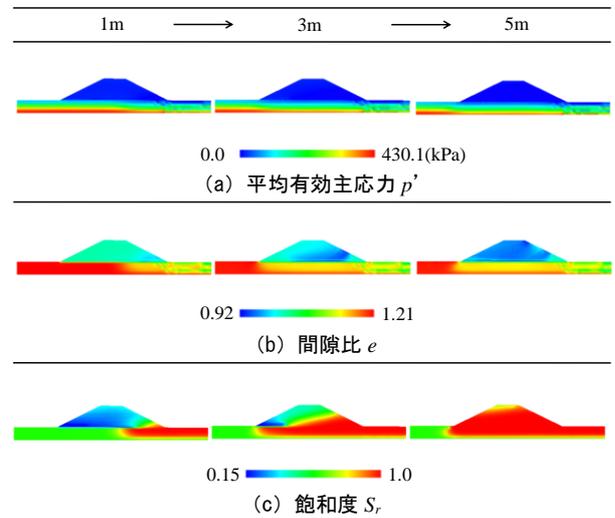


図5. case1の水位変動解析結果

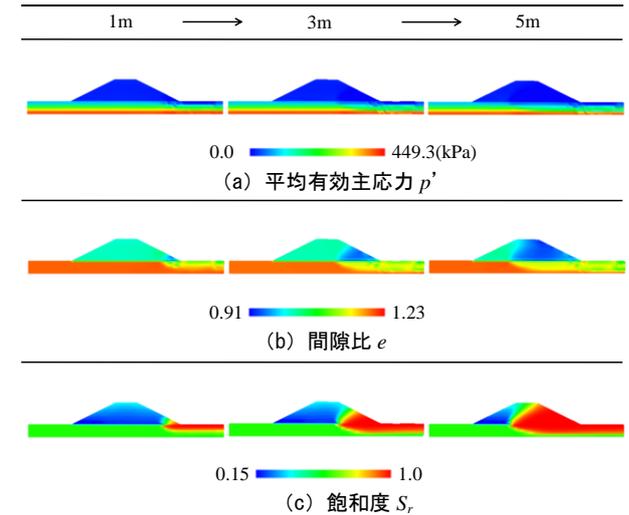


図6. case2の水位変動解析結果

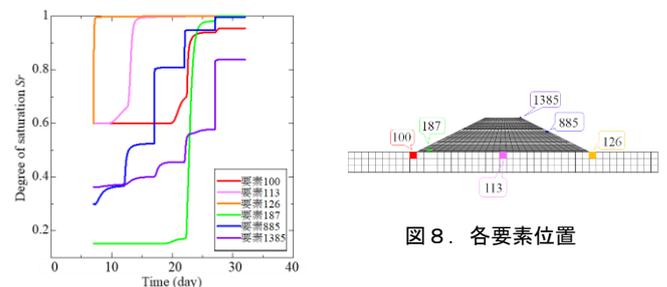


図7. 各要素の飽和度変化 (case1)

図8. 各要素位置

参考文献

- 1) 金澤伸一, 橘伸也, 飯塚敦, 盛土構造物の排水能力に対する解析的検討, 土木学会論文集 A2, 土木学会, Vol.71, pp.429-436, 2016年
- 2) 鬼怒川堤防調査委員会, 鬼怒川堤防調査委員会報告書, p11, 2016年