|浸透-変形連成解析による浸水時の河川堤防の安定性評価|

株式会社 日建設計シビル	正会員	加藤 亮輔
京都大学大学院	フェロー	岡 二三生
京都大学大学院	正会員	小高 猛司・木元 小百合
株式会社 日建設計	フェロー	角南 進

1.研究の背景と目的

2004 年新潟豪雨に見られる破堤のように、計画高水位を上回る洪水が多発している。このため、これまでの堤防 の安全性照査手法の見直しが求められている。本研究では、従来の浸透解析と、すべり破壊・パイピング破壊のよ うに、浸透と破壊を個別に検討するのではなく、多相系材料の変形解析法を用いて堤防の安全性を検討する手法を 提案する。具体的には、混合体理論に基づいて、間隙が常に排気状態であると仮定して不飽和堤防盛土を定式化し、 これを用いて浸水時における河川堤防の浸透と変形の連成解析を行う。

2.支配方程式の定式化

用いたプログラムは砂の弾塑性構成式 1)を組み込んだ液状化解析コ ード LIQCA2D-04²⁾を不飽和浸透問題に拡張した LIQCA2D-SF であ る。はじめに、この LIQCA2D-SF の定式化を行う。全水頭 h を用い て連続式を表すと次式のようになる。

$$-\frac{k}{\gamma_{W}}\rho^{f}\ddot{\varepsilon}_{ii}^{s}-k\frac{\partial^{2}h}{\partial x_{i}^{2}}+\dot{\varepsilon}_{ii}^{s}+\frac{n}{K^{f}}\dot{p}=0 \qquad (1)$$

不飽和層において見かけの混合体・液相の密度および見かけの体積弾 性係数を以下のように定義する³⁾。

$$\overline{\rho} = (1-n)\rho^{S} + n\overline{\rho}^{f} , \quad \overline{\rho}^{f} = S_{r}\rho^{f} , \quad \frac{1}{\overline{K}^{f}} = \frac{S_{r}}{\overline{K}^{f}} + \frac{C}{n\gamma_{w}}$$
(2)

これをつりあい式、連続式に導入し、離散化を行う。 まず連続式の離散化を行うと以下のようになる。

$$\int_{V} \left(-\frac{k}{\gamma_{W}} \bar{\rho}^{f} \ddot{\varepsilon}_{ii}^{s} + \dot{\varepsilon}_{ii}^{s} + \frac{n}{\bar{K}^{f}} \dot{p} \right) \delta p dV - \int_{V} k \frac{\partial^{2} h}{\partial x_{i}^{2}} \delta p dV = 0 \quad (3)$$

左辺最終項は流入速度ベクトルと単位法線ベクトルを用いて次式のよ うに書ける。 $\int L \frac{\partial^2 h}{\partial t} \log V = \frac{4}{\Sigma} \left[\left(-v_{i} + n_{i} + v_{i} + n_{i} \right) db \right]$ (4)

$$V_{i} = -\bar{k}_{i} \frac{\partial h}{\partial x_{1}} = -\frac{\bar{k}_{i}}{\gamma_{w}} \left(\frac{\partial p}{\partial y} - \gamma_{w} \right) = -\frac{\bar{k}_{i}}{\gamma_{w}} \frac{\partial p}{\partial y} + \bar{k}_{i}$$
(5)

なので、最終的に空間離散化された連続式は以下のようになる。

$$\frac{\overline{\rho}^{J} k}{\gamma_{W}} \left\{k_{v}\right\}^{T} \left\{\ddot{u}_{N}\right\} - \left\{k_{v}\right\}^{T} \left\{\dot{u}_{N}\right\} + A\dot{p}_{de} - \left(\alpha p_{dE} - \sum_{i=1}^{4} \alpha_{i} p_{dEi} - \sum_{i=1}^{4} \overline{k}_{i} b_{xi}\right) = 0 \quad (6)$$

次に、つりあい式について考えると、不飽和問題では飽和度にしたがって土の単位体積重量が変化するため次項を 物体力に付け加える必要がある。

$$\left\{\Delta F_{s}\right\} = \int_{V} \Delta \rho \left[N\right]^{T} \left\{b_{s}\right\} dV \tag{7}$$

以上の空間離散化されたつりあい式と連続式を Newmark の 法により時間離散化して用いる。

有効飽和度を
$$S_e = \left(1 + |\alpha\psi|^n\right)$$
として表し、これを用いて比水分容量と比透水係数を以下のように算定する。
 $C = \alpha \left(n-1\right) \left(\theta_s - \theta_r\right) S_e^{fm} \left(1 - S_e^{fm}\right)^m \qquad k_r = S_e^{1/2} \left\{1 - \left(1 - S_e^{fm}\right)^m\right\}^2$ (8)

また、水分特性曲線としては van Genuchten の式を採用する。

キーワード:不飽和浸透,変形,堤防,動水勾配,有限要素法

表1	土質バラメータ	
		Ş

	计百吨办	
解析セテル	砂の弾塑性セナル	
初期間隙比 eo	0.856	
圧縮指数	0.018	
膨潤指数	0.0055	
初期せん断係数比 G₀/ 'mゥ	873	
透水係数 k(m/s)	1.0 × 10 ⁻⁵	
重力加速度 g(m/s ²)	9.8	
密度 (t/m ³)	1.91	
変相応力比 M _m	0.909	
破壊応力比 M _f	1.122	
硬化関数中のパラメータ B ₀	2200	
硬化関数中のパラメータ B ₁	30	
硬化関数中のパラメータ C _f	0	
水の体積弾性係数 K _f	2.0 × 10 ⁵	
擬似過圧密比 OCR	1	
C _d	2000	
ダイレンタンシー係数 D ₀ ,n	5.0, 1.5	
塑性基準ひずみ _{ref} ^P	0.005	
弾性基準ひずみ _{ref}	0.01	
初期応力解析		
ヤング係数 E(kPa)	8.80 × 10 ⁴	
ポアソン比	0.258	
内部摩擦角 '	35	
粘着力 c (kPa)	10	



連絡先:〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究か社会基盤専攻地盤力学研究室 075-753-5086

実際の解析においては以上の不飽和浸透特性を用いてまず有効飽和度および飽和度を求め、有効飽和度から間隙 水の見かけの体積弾性係数および透水係数を算定し、逐次更新する。なお、式(6)の最終項(自重項)については、初 期飽和度より低い飽和度の水は自由水でないと仮定し、初期飽和度よりも高い飽和度を持つ時のみこれを作用させ ている。

<u>4.解析結果</u>

今回用いたパラメータは表1に示す江戸崎砂のものであり、解析モデルは図1のものである。解析モデルについては初期水位を1mとし、初期水面以下を基礎地盤部分(材料1)と仮定する。透水係数は、基礎地盤部分の材料1 と堤防盛土部分の材料2はともに1.0×10⁻⁵(m/s)である。初期飽和度は材料1が100%、材料2が60%であり、水位上昇速度が1/3(m/hour)である。このモデルについての解析結果を以下に示す。

本研究では、偏差ひずみテンソルの第二不変量(以下偏差ひずみと呼ぶ)が 5%以上に達した時点でパイピングによ り破壊が生じたと定義した。この定義は、図 2 に示すように偏差ひずみが 5%を超えると急激に変形が進むことに よる。図 3 に水平局所動水勾配の分布図を示す。動水勾配の発生している要素は飽和している要素であることから、 時間経過とともに川表側から川裏側へ水が浸透していく様子が確認できる。破壊と定義した 118 時間後には、川裏 側の法尻部の局所動水勾配は 0.45 に達しており,ほぼ同じ箇所に偏差ひずみは集中し、時間の経過とともに偏差ひ ずみは拡大している。河川堤防の構造検討の手引き 4によれば、堤防の浸透破壊に対する安全性照査基準の一つに、 局所動水勾配を 0.5 以下に抑えるというものがある。しかし、今回の解析で求められた局所導水勾配はその数字よ りも低い値であり、0.5 以下であれば安全であると言いがたい。



次に偏差ひずみの各時間(120秒)ごとの増分を図4に示す。破壊前では、 図3に見られる浸潤面に沿って偏差ひずみが生じていることが確認でき る。浸潤線がほぼ定常となると、川裏側法尻部分において偏差ひずみが 蓄積して行き、最終的には、図2のように、偏差ひずみが大きく発生し 破壊に至っている。

<u>5. まとめ</u>

飽和 - 不飽和浸透特性を取り入れた変形解析法を提案し、浸透破壊に 対する堤防の安定性について検討を行った。本報での解析の結果は、従 来の安全性基準とは局所動水勾配において異なるものとなった。近年の 洪水被害も鑑みて、従来の安全性基準を見直す必要がある。

本研究は,国土交通省の建設技術研究開発助成制度の研究課題「河川 堤防の調査,再生と強化法に関する研究開発(代表:岡二三生)」の一環 で実施している。記して謝意を表する。

[参考文献] 1)Oka et al.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, *Geotechnique*, 49(5), 661-680, 1999. 2) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ: LIQCA2D04 (2004 公開版)資料, 2004. 3) 渦岡他: 不飽和層への浸透現象を考慮した液状化解析, 土木学会論文集, 694(-57), 153-163, 2001. 4) 財団法人 国土技術研究 センター: 河川堤防の構造検討の手引き, 46-68, 2002.





図3偏差ひずみ増分分布図