

平成 20 年岩手・宮城内陸地震で発生した天然ダムの浸透・越流解析

東北大学 学 ○一山 智弘 正 風間 基樹・渦岡 良介・森 友宏

1. はじめに

平成 20 年岩手・宮城内陸地震により大規模な斜面崩壊や地すべり・土石流が発生し、崩壊土砂が河道に堆積して天然ダムが形成された。天然ダムの決壊による下流域の被災は過去にも記録されており¹⁾、今回の地震で形成された天然ダムも今後の降雨や余震により決壊し下流域に氾濫を起す可能性がある。本研究では天然ダム堤体内の浸透状況の確認を目的として湯ノ倉温泉地区天然ダムを対象に浸透・越流解析を行った。

2. 解析手法

2.1 基礎式

多孔質・有限変形理論に基づき、以下の仮定の下で基礎式を誘導する。1) 土粒子自体は非圧縮、2) 各相間の質量交換はない。3) 準静的解析とし慣性項は無視する。以下に、3 相系の多孔質体を対象として誘導した土骨格の変位 $\mathbf{u}^s$ ・間隙水圧 p^w ・間隙空気圧 p^a を未知数とする基礎式 (つりあい式と 2 つの連続式)²⁾ を示す。混合体のつりあい式は以下のように表される。

$$\operatorname{div} [\boldsymbol{\sigma}' - \{s^w p^w + (1 - s^w) p^a\} \mathbf{I}] + \rho \mathbf{b} = 0 \quad (1)$$

ここに、 ρ は混合体の密度、 $\boldsymbol{\sigma}'$ は Cauchy 骨格応力テンソル、 $\mathbf{b}$ は物体力である。また、間隙水の連続式は、土骨格と間隙水の質量保存則および構成式を用いて以下のように表される。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{n s^w \rho^{wR}}{K^w} - n \rho^{wR} c \right) \frac{D^s p^w}{Dt} + n \rho^{wR} c \frac{D^s p^a}{Dt} \\ & + s^w \rho^{wR} \operatorname{div} \mathbf{v}^s \\ & + \operatorname{div} \left\{ \frac{k^{ws}}{g} (-\operatorname{grad} p^w + \rho^{wR} \mathbf{b}^w) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 ρ^{wR} は間隙水の実質密度、 K^w は間隙水の体積弾性係数、 c は比水分容量、 k^{ws} は土骨格に対する透水係数、 $\mathbf{v}^s$ は土骨格の速度、 g は重力加速度である。なお、 $D^s \square / Dt$ は土骨格の現配置に対する物質微分を表している。同様に、間隙空気の連続式は以下のように表される。

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{n(1 - s^w) M^a}{\Theta R} - n \rho^{aR} c \right\} \frac{D^s p^a}{Dt} + n \rho^{aR} c \frac{D^s p^w}{Dt} \\ & + (1 - s^w) \rho^{aR} \operatorname{div} \mathbf{v}^s \\ & + \operatorname{div} \left\{ \frac{k^{as}}{g} (-\operatorname{grad} p^a + \rho^{aR} \mathbf{b}^a) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 M^a はモル質量、 Θ は絶対温度、 R は気体定数、 ρ^{aR} は間隙空気の実質密度、 k^{as} は土骨格に対する透気係数である。

2.2 数値解法

空間離散化には混合型の有限要素法を適用し、時間積分には Newmark 法を用いる。上記の基礎式と境界条件から誘導した弱形式は現配置 $\mathbf{x}$ の情報を含む非線形・連立方程式となっている。式 (1)～式 (3) に対応する原配置の弱形式 δw^s 、 δw^w および δw^a をいったん基準配置に変換し $\mathbf{u}^s$ 、 p^w および p^a について線形化した後、再び現配置に変換して Newton – Raphson 法を適用する。有限要素定式化においては Galerkin 法を用い、要素はアイソパラメトリック 8 節点要素を用いた。LBB 条件を考慮し、土骨格の変位を 8 節点、間隙水圧および間隙空気圧を 4 節点に与えた。

3. 解析条件

解析モデルは湯ノ倉温泉地区天然ダムの縦断面図を参考に作成している。天然ダムの縦断面図は旧地形の河道に沿って地震前後の地形の標高差をとることにより求めた。地震前の旧地形図には国土地理院電子国土の地形図 (2 万 5 千分の 1)³⁾ を、地震後の地形図にはレーザー測量より得られた DEM⁴⁾ を用いている。解析モデルを図-1 に示す。材料数は堤体と大気の 2 つを設定している。解析モデルにおける天然ダムの規模は閉塞長が水平距離で 518 m、堤高が約 35 m である。天端高さは天然ダム下流端 (標高 355 m) の高さを 0 m として 46 m (標高 401 m) となった。

はじめに静的自重解析を行い堰止湖水位上昇前の状態を算定した後、引き続いて堰止湖水位の上昇を考慮した準静的解析を行った。

準静的解析においては土骨格に対する境界条件として解析モデルの全節点で水平鉛直方向固定とした。間隙水圧の境界条件としては、側方境界において全水頭を与えている。下流側の側方境界は全水頭を 0 m で固定し、上流側の側方境界には各ステップにおいて図-2 に実線で示す全水頭を与え水位の上昇を再現した。縦軸は天然ダム下流端の高さを基準 (0 m) としたときの水位を表している。実線の水位は堰止湖水位が一定の速度で上昇を続け、やがて天端を越えて越流に至る場合を想定している。図-2 の破線は報道写真等からの推定と、国土交通省東北地方整備局による測定結果⁴⁾ をもとにした実際の堰止湖水位の変化である。解析に用いた水位は実際の水位よりも緩やかに上昇するように設定している。水位上昇は天然ダム天端より 4 m 上の位置までとし、その後は一定の水位を与えている。計算時間増分を 3600 秒として 4000 ステップの計算を行った。間隙空気圧の境界条件は、堤体の表面で一定 (大気圧) とした。

用いた材料パラメータを表-1を示す。堤体の物理特性、浸透特性は実際の天然ダム構成土の室内試験結果をもとに設定した。土粒子密度は土粒子密度試験、間隙比は圧密試験、飽和透水係数は変水位透水試験、水分特性曲線は保水性試験より求めた。図-3にVGモデル⁵⁾を用いて設定した水分特性曲線と比透水・透気係数および室内保水性試験結果を示す。大気は間隙率が1.0、土粒子密度が0.0の'すかさかの'土要素(大気要素)²⁾として、材料パラメータを設定した。また、透水・透気係数とも土に比べて大きな値を設定した。水分特性曲線は図-4のように設定した。

4. 解析結果

図-2より堰止湖の水位が越流水位に達するのは1349時間後である。図-5に水位上昇1300時間後および1400時間後のダルシー流速の水平成分を示す。図-5を見ると、越流水位に到達した後に天然ダム下流側の堤体のり面に接している大気要素においてのり面に沿った流速が発生しており越流が再現されていることがわかる。また、図-6に示す1400時間後と1500時間後の飽和度分布および図-7に示す1500時間後の堤体内部のダルシー流速のベクトルを見ると、越流水が堤体内部へ浸透していることが確認できる。このため越流後、堤体内部の飽和領域が増加している。堤体内部が飽和すると土粒子に浮力が作用し、さらに毛管作用に基づく土粒子間のサクシオンがなくなるため、土のせん断強度が小さくなる。そのためダム堤体が不安定になり決壊を引き起こす危険性が増すと思われる。

5. 結論

本研究では天然ダムを対象に浸透・越流解析を行った。その結果、越流が起こったときの堤体内の浸透状況を再現することができた。

謝辞 本研究において間組および国土交通省には現地調査や地震後の地形データなどの情報提供において大変お世話になりました。ありがとうございました。

参考文献 1) 田畑茂清, 西山高久, 井上公夫: 天然ダムと災害, 21-24, 2002. 2) 渦岡良介, 栗原崇, 風間基樹, 仙頭紀明: 大気要素を用いた不飽和土-水連成場の有限要素解析, 計算工学講演会論文集 Vol.13, 219-222, 2008. 3) 国土地理院: <http://www.gsi.go.jp/>. 4) 国土交通省東北地方整備局: <http://www.thr.mlit.go.jp/>. 5) Van Genuchten, R.: A Closed-form Equation for Predicting the Unsaturated Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Science Society of America Journal, 44, 892-898, 1980.

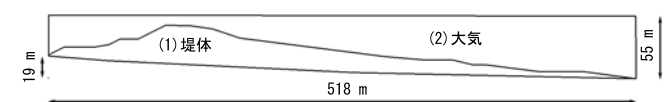


図-1 解析モデル

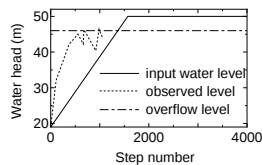


図-2 堰止湖水位

表-1 材料パラメータ		
パラメータ	(1) 堤体	(2) 大気
初期間隙率 n_{0s} [%]	0.6	1.0
初期飽和度 S_{0s}^w [%]	0.4	0.0
土骨格の実質密度 ρ_{0s}^R [t/m ³]	2.61	0.0
間隙水の実質密度 ρ_{0s}^{wR} [t/m ³]	1.0	1.0
間隙空気の実質密度 ρ_{0s}^{aR} [t/m ³]	1.2×10^{-3}	1.2×10^{-3}
飽和透水係数 [m/s]	1.0×10^{-5}	10.0
飽和透気係数 [m/s]	1.0×10^{-6}	10.0
間隙水の体積弾性係数 K^w [kN/m ²]	2.0×10^6	2.0×10^6
間隙空気の状態定数 $M^a/(\Theta R)$ [1/m]	1.25×10^{-5}	1.25×10^{-5}
最小飽和度 s_{min}^w	0.35	0.0
最大飽和度 s_{max}^w	1.0	1.0
VG モデルパラメータ α_{vg} [m ² /kN]	0.02	5.0
VG モデルパラメータ n_{vg}	3.0	3.0
VG モデルパラメータ m_{vg}	0.667	3.0
VG モデルパラメータ ξ_{vg}	3.5	0.1
VG モデルパラメータ η_{vg}	0.333	10.0
Lame 定数 λ [kN/m ²]	7.5×10^4	1.0×10^{-2}
Lame 定数 μ [kN/m ²]	3.75×10^4	1.0×10^{-3}

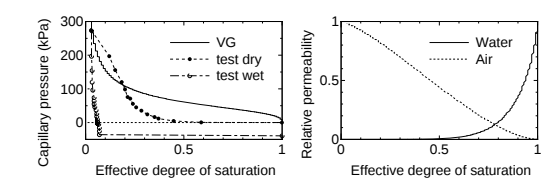


図-3 水分特性曲線と比透水・透気係数(堤体)

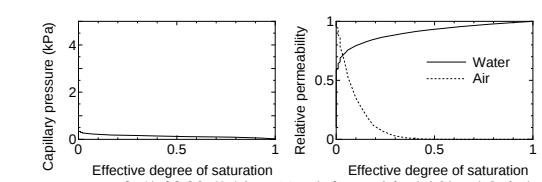


図-4 水分特性曲線と比透水・透気係数(大気)

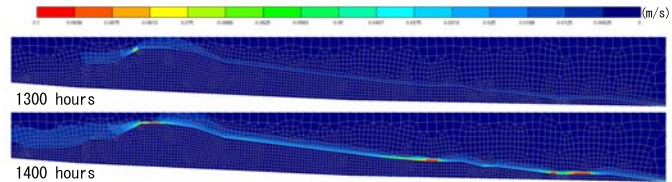


図-5 1300 時間後, 1400 時間後のダルシー流速の水平成分

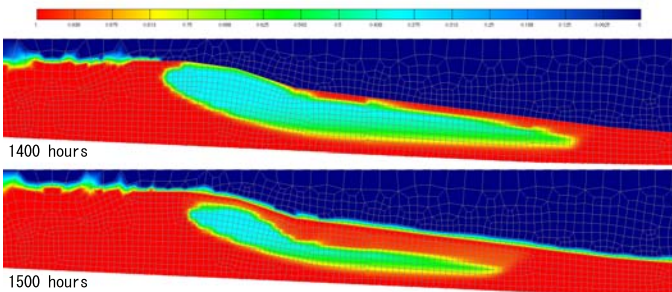


図-6 1400 時間後, 1500 時間後の飽和度分布

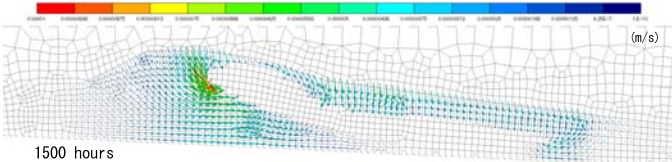


図-7 1500 時間後のダルシー流速ベクトル