# 不飽和・飽和地盤の有効応力解析手法と 地中構造物への適用

伊藤 浩二1・佐々木 智大2・樋口 俊一3

l正会員	株式会社大林組	技術研究所構造技術研究部(〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)				
E-mail: ito.koji.ro@obayashi.co.jp						
2正会員	株式会社大林組	技術研究所構造技術研究部(〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)				
E-mail: sasaki.tomohiro@obayashi.co.jp						
3正会員	株式会社大林組	技術研究所構造技術研究部(〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)				
E-mail: higuchi shunichi@obayashi co in						

近年,液状化地盤にある RC 製構造物では,大規模地震における安全性を適切に評価する場合,従来の 地下水以深の飽和地盤の地震時,地震後の挙動に加えて,地下水以浅の不飽和地盤の挙動も忠実に再現す る非線形地震応答解析が望まれている.このような課題に対して,広範な飽和度を有する不飽和・飽和地 盤の地震時から地震後の過剰間隙水圧の蓄積,消散を統一的に表現する有効応力解析手法を構築した.既 往の不飽和浸透の模型実験,不飽和浸透流解析と本手法との比較から,不飽和地盤の有効応力解析手法の 適用性を検証した.液状化地盤にある RC 製地中構造物の大規模地震の挙動を把握するために,不飽和・ 飽和地盤, RC 製地中構造物の材料非線形を考慮した本手法を適用し,不飽和・飽和地盤, RC 製地中構造 物の適切な地震時挙動が得られることを示した.

Key Words: unsaturated, saturated, underground reinforced concrete structure, effective stress analysis

## 1. はじめに

降雨と地震,地震と津波等が複合した自然災害に対す る鉄筋コンクリート製(以下RC製)構造物,土構造物およ び周辺地盤の安全性評価では,不飽和土から飽和土に至 る土粒子骨格の間隙の飽和度に応じた地震時,地震後の 地盤挙動を適切に評価する必要がある.

近年,設計入力地震動レベルの増大に伴い,地盤の塑 性化や構造物の損傷を許容した部材変形を耐震性評価の 指標とすることは合理的な靱性指向型の設計に繋がるこ とから,地盤と構造物を一体として解析できる有限素法 等が耐震設計の有力なツールとして期待されている.

このような要望に対して,液状化地盤にあるRC製構 造物の非線形地震応答解析では,不飽和地盤および飽和 地盤において地震時に過剰間隙水圧が蓄積し液状化に至 る過程,地震後に蓄積した過剰間隙水圧が消散する過程 を評価できる有効応力解析手法が求められている<sup>1,2</sup>.

本研究では、はじめに、広範な飽和度を有する不飽和 土・飽和土の地震時挙動を統一的に表現するために、液 状化地盤で一般に用いられる飽和多孔質体の基礎式を不 飽和土へ拡張した. さらに,既往の不飽和浸透の模型実 験,不飽和浸透流解析および本手法との比較から,不飽 和土で導入した不飽和浸透特性の適用性を検証した.

次に、不飽和地盤、飽和地盤の液状化地盤にあるRC 製構造物の非線形地震応答解析を行うために、地震時か ら地震後までの地盤の材料非線形およびRC製構造物の 材料非線形を考慮した有効応力解析手法を構築した.

おわりに、液状化地盤にあるRC製地中構造物の大規 模地震における挙動を把握するために、不飽和・飽和地 盤およびRC製地中構造物の材料非線形を考慮した有効 応力解析手法を適用し、本手法により、広範な飽和度を 有する不飽和・飽和地盤の層構成に応じたRC製地中構 造物の適切な地震時挙動が得られることを示した.

## 2. 不飽和・飽和地盤の有効応力解析手法

#### (1) 基礎式

不飽和土の基礎式(釣合い式と連続式)では、飽和土の Biot の多次元圧密式を援用し、有限要素法の定式化では、 間隙水の変位で絶対変位を用いるu – U形式とした <sup>3, 4</sup>.

式(1), (2)に飽和土の土粒子骨格,間隙水の釣合い式, 式(3), (4)に連続式を示す.

$$(1-n)\rho_{s}\ddot{u}_{i} + \left(\frac{n^{2}\rho_{f}g}{k}\right)\dot{u}_{i} - \left(\frac{n^{2}\rho_{f}g}{k}\right)\dot{U}_{i}$$
$$-\sigma_{ji,j}' + (\alpha - n)p_{,i} + b_{si} = 0 \tag{1}$$

$$n\rho_f \ddot{U}_i - \left(\frac{n^2 \rho_f g}{k}\right) \dot{u}_i + \left(\frac{n^2 \rho_f g}{k}\right) \dot{U}_i + np_i + b_{fi} = 0$$
(2)

$$\dot{n} = -O\{(\alpha - n)\dot{s}_{i}^{u} + n\dot{s}_{i}^{U}\}$$
(2)

$$p = q((u - h)e_{ii} + he_{ii})$$

$$1 \qquad K_{\pi}$$
(3)

$$Q = \frac{1}{\left(\frac{\alpha - n}{K_s} + \frac{n}{K_f}\right)}, \alpha = 1 - \frac{m_f}{K_s}$$
(4)

ここに、 $u_i \geq U_i$ ,  $\dot{u}_i \geq \dot{U}_i$ ,  $\ddot{u}_i \geq \ddot{U}_i$ ,  $\varepsilon_{ii}^u \geq \varepsilon_{ii}^U$ ,  $b_{si} \geq b_{fi}$ は骨格ならびに間隙水の変位、速度、加速度、体積ひず みと物体力、 $\rho_s \geq \rho_f$ ,  $K_s \geq K_f$ は土粒子ならびに間隙水 の質量密度と体積弾性係数、 $K_T$ は土粒子骨格の体積弾 性係数、nは間隙率、kは透水係数、gは重力加速度、  $\sigma'_{ij}$ は有効応力テンソル、pは過剰間隙水圧である.式(1) ~(4)では $\sigma'_{ij}$ で引張を正、pで圧縮を正と定義している. Qは飽和土の間隙水の剛性、aは土粒子骨格の体積弾性 係数と土粒子の体積弾性係数の比から得られる係数であ る.式(5)~(8)にBiotの連続式から誘導される飽和度 $S_r$ に 応じた不飽和土の連続式を示す.

$$\dot{p} = -Q^*\{(\alpha - n)\dot{\varepsilon}^u_{ii} + n\dot{\varepsilon}^U_{ii}\}$$
(5)

$$Q^* = \frac{1}{\left\{\frac{(\alpha - n)S_r\left(S_r + \frac{C_s p}{n\gamma_w}\right)}{K_s}\right\} + \frac{nS_r}{K_f} + \frac{C_s}{\gamma_w}}, \alpha = 1 - \frac{\kappa_T}{K_s} \quad (6)$$

$$C_s(\psi) = \frac{d\theta}{d\psi} \tag{7}$$

$$\psi = h_w - h + \frac{p}{\gamma_w} \tag{8}$$

ここに、 $Q^*$ は不飽和土の間隙水の剛性、 $C_s$ は比水分 容量、 $\theta$ は体積含水率、 $\psi$ は圧力水頭、 $S_r$ は飽和度( $S_r = 0$ :乾燥土、 $S_r = 1$ :飽和土)、 $\gamma_w$ は間隙水の単位体積 重量、 $h_w$ は初期全水頭、hは位置水頭である.式(4)、(6) で $K_s = \infty$ を仮定し単純化すると、不飽和土の $Q^*$ では、飽和土のQに飽和度 $S_r$ および比水分容量 $C_s$ の効果が付加 される.式(9)に飽和度 $S_r$ を考慮した不飽和土の間隙水 の釣合い式における見掛けの密度を示す.

$$n\bar{\rho}_f = nS_r\rho_f \tag{9}$$

ここに、 $\bar{\rho}_f$ は間隙水の見掛けの密度である.

## (2) 不飽和浸透特性

既往の研究<sup>1</sup>と同様に, van Genuchtenによる不飽和浸透 特性モデルを用いた<sup>5, 6</sup>.

## a) 圧力水頭と飽和度との関係(水分特性曲線)

式(10)に有効飽和度を示す.

表-1 物理定数と力学定数



ここに、 $S_e$ は有効飽和度、 $\theta_s$ は飽和体積含水率(= n)  $\theta_r$ は残留体積含水率、 $\theta$ は体積含水率である.

 $S_e$ 

$$= (1 + |\alpha'\psi|_{1}^{n'})^{-m}$$
(11)

$$m = 1 - \frac{1}{n'} \tag{12}$$

ここに, a'は圧力水頭ψの逆数の次元をもつスケーリ ングパラメータ, m, n'は水分特性曲線の形を決める形 状パラメータである.

$$C_s\left(=\frac{d\theta}{d\psi}\right) = \alpha'(n'-1)(\theta_s - \theta_r)S_e^{-1/m}\left(1 - S_e^{-1/m}\right)^m (13)$$

## b) 比透水係数と飽和度の関係

式(14)に比透水係数を示す.

$$k_r = S_e^{1/2} \left\{ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right\}^2$$
(14)

ここに, k<sub>r</sub>は比透水係数(飽和透水係数に対する不飽 和透水係数の比)である.

図-1~3に, 文献6)を参考にシルト質砂を想定して設定した表-1の定数で得られる圧力水頭, 比水分容量, 比透水係数と飽和度との関係を示す.

#### (3) 空気注入による不飽和化土

式(15), (16)に空気注入の液状化対策で得られる不飽 和化土(間隙水に気泡を有する飽和土)における気泡との 混合体での間隙水の見掛けの体積弾性係数を示す.

$$\frac{1}{K_f^*} = \frac{S_r}{K_f} + \frac{1 - S_r}{K_a}$$
(15)

$$Q = \frac{1}{\left(\frac{\alpha - n}{K_s} + \frac{n}{K_f^*}\right)} = \frac{1}{\left\{\frac{\alpha - n}{K_s} + \frac{nS_r}{K_f} + \frac{n(1 - S_r)}{K_a}\right\}}$$
(16)  
$$\alpha = 1 - \frac{K_T}{K_s}$$

ここに、 $K_f^*$ は間隙水の見掛けの体積弾性係数、 $K_a$ は 空気の体積弾性係数である. $K_s = \infty$ を仮定すると、式 (6)、(16)から式(17)、(18)が得られる.

$$\frac{1}{Q^*} = \frac{nS_r}{K_f} + \frac{C_s}{\gamma_w} = \frac{n}{K_f^*}$$
(17)

$$\frac{1}{Q} = \frac{nS_r}{K_f} + \frac{n(1-S_r)}{K_a} = \frac{n}{K_f^*}$$
(18)

図-4にK<sub>f</sub> = 2250000kN/m<sup>2</sup>, K<sub>a</sub> = 140kN/m<sup>2</sup> およ び表-1の物理定数と力学定数で得られる間隙水の見掛け の体積弾性係数と飽和度との関係を示す.空気注入によ る不飽和化土では,飽和度(体積含水率)が小さい範囲を 除き,不飽和土で得られる間隙水の見掛けの体積弾性係 数と同様の傾向となる.

## 3. 不飽和浸透特性の検証

#### (1) 解析モデル

均等砂を用いた不飽和浸透実験を対象として検証解析 を実施した<sup>1)</sup>. この実験は、左端の水位を底面から0.3m、 右端の水位を底面から0.1mに維持し、底面の水圧を測 定し模型地盤の非定常浸透過程を追跡したものである.

図-5に解析モデルと有限要素メッシュを示す.本解析 では、実験で得られた模型地盤の初期含水比分布等から 設定された不飽和浸透特性の定数、模型地盤の物理定数 と力学定数および境界条件を既往の研究<sup>1)</sup>と同様とした.





#### (2) 解析結果

図-6に不飽和浸透流解析および本手法で得られた底面 での圧力水頭の経時変化を不飽和浸透実験結果と比較し て示す.不飽和浸透流解析と本手法ではほぼ同様の結果 が得られ,実験結果とも概ね整合することから,本手法 で不飽和浸透特性を再現できることを確認した.

## 4. 不飽和・飽和地盤にある地中構造物の応答

#### (1) 解析モデル

飽和地盤および不飽和地盤にある RC 製地中構造物を 対象に、大規模地震における地震応答を検討した.

図-7 に解析ケースを示す. 全層が飽和地盤(地下水



_	25000		不飽和地盤 9500		250	単位 (mm)
:G.L4.875m(図-13)	$\nabla$	5	00 4000 500 4000 ▲ 4000 ▲ 4000	500	5000	
■:G.L5.25m (図-13) 側面粘性境界 側面非排水	- 飽和地盤 飽和地盤 下面非排水	構造物 外周非排水	RC製 地中構造物	4500	5500	側面粘性境界 側面非排水
底面粘性境界			支持地盤		1500	

(Case2:不飽和地盤(上層)および飽和地盤(下層))

			不飽和地盤		•	単位 (mm)
	25000		9500	NI	25000	
10 L 4 075- (17 10)			500 4000 500 4000 5	H	5000	
.G.L4.875m([X]-13)			1	1 500		
:G.L5.25m (  <u>X</u>  -13)					ſ	加大地北北北
側面粘性境界		構诰物	#44			則田柏住見介
側面非排水		内田北北北	RC製	4500	5500	側面非排水
beimi yi 1yi vi	不的和批般	2下同 开护小	地中構造物			
	▽ 下面非排水			500	7	
<b>学</b> 二小小小学用	-		士卡拉姆	-	1500	
<b>丛田柏住境</b> 界			又好地盛		1500	

(Case3:不飽和地盤(全層))

図-7 検討対象(飽和地盤(全層),不飽和地盤(上層)および飽和地盤(下層),不飽和地盤(全層))

位:地表),上層が不飽和地盤および下層が飽和地盤(地下水位:頂版天端),全層が不飽和地盤(地下水位:底版下端)である全3ケースとし,不飽和地盤を考慮することによる RC 製地中構造物の地震応答への影響を検討した. 同図の RC 製地中構造物は,一般的な開削鉄道トンネルを模しており,図-8の構造仕様でコンクリートの設計基準強度を $F_c = 24$ N/mm<sup>2</sup>,鉄筋を SD345,頂版・側壁の引張主鉄筋比を $P_t = 1.13\%$ (外側)と 1.59%(内側),底版・中壁の引張主鉄筋比を $P_t = 0.79\%$ (外内とも),せん断補強筋比を一律に $P_w = 0.25\%$ とした<sup>7</sup>.

図-9に RC 製地中構造物周辺の有限要素メッシュを示 す. 飽和地盤,不飽和地盤を二相系の平面要素,構造物 および支持地盤を一相系の平面要素,地盤と構造物との 境界をジョイント要素とし,図-7には力学・水理の境 界条件も併記した.

### (2) 解析方法

解析では、大規模高速化非線形 FEM 解析プログラム 「FINAL-GEO®」®を用いた. 「FINAL-GEO」では、鉄 筋コンクリートの材料構成モデルに加えて、飽和多孔質 体の Biot の多次元圧密式、液状化地盤の地震時から地震 後までの過剰間隙水圧の発生・消散過程を適切に評価で きる地盤構成モデルを導入した有効応力解析により、飽 和地盤、RC製構造物の地震応答を得ることができる<sup>9</sup>.

本研究では、「FINAL-GEO」に2章の不飽和地盤の基礎式および不飽和浸透特性を新たに導入することにより、

広範な飽和度を有する不飽和土,飽和土を統一的に表現 する有効応力解析手法を構築した.

## (3) 地盤の構成モデル

地盤材料の構成モデルでは、図-10の下負荷面モデル を適用した.本モデルは、繰返し塑性を表現する引張降 伏強度を有する下負荷面、および回転硬化の概念に基づ く土の弾塑性構成式である<sup>10~12</sup>.引張強度比 $\xi = 0$ を仮 定して得られる下負荷面モデルでは、緩い砂でみられる 破壊近傍で有効応力経路が原点へ急激に漸近する傾向や 急増する大きなせん断ひずみが発生する傾向を概ね表現 できることを確認している<sup>9</sup>.不飽和地盤のサクション 効果では、正規降伏面の初期値 $F_0$ において、初期平均 有効応力にサクション応力を付加して簡易に考慮した.

#### (4) 地盤定数

表-2に飽和地盤および不飽和地盤で用いた物理定数と 力学定数を示す. 飽和地盤および不飽和地盤では緩い砂 を想定した表-3の緩い砂に相当する下負荷面モデルの 材料定数を用い,不飽和地盤では表-1の不飽和浸透特性 の物理定数と力学定数から初期飽和度を設定した.

支持地盤では弾性( $\rho_t$ =2.0t/m<sup>3</sup>,  $V_s$ =700m/s)を仮定した.

#### (5) 鉄筋コンクリートの構成モデル

図-11 にコンクリートの主応力~等価一軸ひずみ関係 を示す. 圧縮側の上昇域は修正 Ahmad モデル<sup>13)</sup>,軟化



図-9 解析モデルの有限要素メッシュ(RC 製構造物周辺)



図-10 p-q面における正規降伏面と下負荷面

域は中村モデル<sup>14</sup>を用い,圧縮破壊の条件ではOttosenの 提案モデル,ひび割れ発生後のせん断伝達特性で長沼モ デルを用いた<sup>15</sup>.引張側はひび割れまでを線形とし,ひ び割れ後は引張軟化を仮定した<sup>16</sup>.繰返し載荷時の履歴 特性は長沼らのモデルにより表現した<sup>15</sup>.

鉄筋は、すべてコンクリート要素の剛性に鉄筋に相当 する剛性を合わせ込む埋込み鉄筋でモデル化した.鉄筋 の構成則は降伏強度を折れ点とするバイリニア型のモデ ル、降伏点を超えた後の剛性を初期剛性の 1/100,構造 物の材料モデル、材料定数は文献 7)と同じとした.

## (6) 解析条件

図-12 に地震波を示す.レベル2 地震動として JMA 神 戸波の NS 成分(継続時間 20 秒),解析の時間増分は 5/1000s,ステップ数 40000,求解法は接線剛性法, Rayleigh減衰は初期剛性比例で減衰定数1%を仮定した.

表-2 物理定数と力学定数

材料	硅矿	$ $	
土粒子密度	$ ho_s$	2.648t/m <sup>3</sup>	
間隙水密度	$ ho_f$	1.0t/m <sup>3</sup>	
間隙率	n	0.472	
土粒子体積弾性係数	Ks	$1.0 \times 10^{40}$ kN/m <sup>2</sup>	
間隙水体積弾性係数	$K_f$	2.25×10 <sup>6</sup> kN/m <sup>2</sup>	
透水係数	k	7.0×10 <sup>-5</sup> m/s	

表-3 下負荷面モデルの材料定数

材料	硅砂7号(D <sub>r</sub> =60%)		
圧縮指数	$\rho, \lambda/(1+e_0)$	0.00211	
膨張指数	$\gamma, \kappa/(1+e_0)$	0.00047	
内部摩擦角	$\phi$	$33^{\circ}$	
正規降伏面の初期値	$F_0$	100kN/m <sup>2</sup>	
ポアソン比	ν	0.33	
回転硬化限界面	$\phi_{b}$	$33^{\circ}$	
回転硬化発展則	b <sub>r</sub>	100	
工坦際住地Dの発展則	u	5000	
正,况(牢)八儿 <b>A</b> (7)无按则	$\zeta_1$	1000	
いし) トレートフ	μ	0	
せん町による 築方硬化/ 軟化	$\phi_{d}$	26.6°	
477 K/L/ 4/L	$\zeta_2$	-10	
規準有効応力	$\sigma'_{m,ref}$	100kN/m <sup>2</sup>	
弾性係数	Eref	218647kN/m <sup>2</sup>	





## (7) 解析結果

図-13に頂版天端深度近傍位置の自由地盤(図-7を参照) で得られた過剰間隙水圧比の時刻歴, 図-14 に 10s の過 剰間隙水圧比の分布を示す. Casel, 2 では飽和地盤で概 ね一様に液状化が生じた. Case2, 3の不飽和地盤では過 剰間隙水圧の蓄積が生じ, Case2 の飽和土近傍の不飽和 土では飽和度が徐々に増加し飽和土化する現象が再現さ れている. このように本手法では、従来の飽和地盤の有 効応力解析手法と異なり、不飽和地盤の地震時挙動も適 切に考慮した耐震性評価ができると考えられる.

図-15 に構造物の中壁の相対変位(頂版と底版との差)

の時刻歴を示す. Casel では中壁の相対変位は約 5.7s で 最大となり, 層間変形角が 1.03%となった. Case2 では 中壁の相対変位は約 7.9% で最大となり,層間変形角が 2.29%で Casel より大きくなった. Case3 では中壁の相対 変位は約 7.5s で最大となり層間変形角は 0.62%であった.

図-15 構造物の相対変位の時刻歴

(Case3:不飽和地盤(全層))

図-16, 17に地震時, 地震後の構造物の変形状況を示 す. Case2ではCase1, 3と比較して地震時の構造物の相対 変位(層間変形角)が大きく、地震後で残留変位も生じて





いる.このように,不飽和地盤と飽和地盤との層境界に 位置する構造物では,飽和地盤中と比較して構造物の損 傷程度が大きくなり,損傷範囲も広くなると推察される.

したがって、不飽和地盤(地下水以浅)と飽和地盤(地下 水以深)との層境界に位置する構造物の地震応答は、乾 燥土(飽和度 $S_r = 0$ )と飽和土(飽和度 $S_r = 1$ )という従来 の有効応力解析手法と本手法で得られる応答性状が異な ると推察される.以上から、不飽和土(飽和度 $S_r \neq 0$ )と 飽和土(飽和度 $S_r = 1$ )の組み合わせからなる不飽和地盤 から飽和地盤までの地震時、地震後の液状化地盤の挙動 を統一的に表現できる本手法は、地中構造物、土構造物 および周辺地盤の健全性評価において有用と考えらえる.

## 5. おわりに

不飽和・飽和地盤, RC製構造物を含む非線形地震応 答解析方法として,広範な飽和度を有する不飽和・飽和 地盤の地震時から地震後の過剰間隙水圧の蓄積,消散を 表現する地盤構成モデルを導入した有効応力解析手法を 構築した.以下に,本研究で得られた知見をまとめる.

- 不飽和土の基礎式を導入した有効応力解析手法を不 飽和浸透流の再現解析に適用した結果,実験と解析 で得られる不飽和浸透特性の定性的な傾向は概ね整 合した。
- 2) 不飽和・飽和地盤にあるRC製地中構造物の耐震性 評価では、飽和地盤と不飽和地盤との層境界にある 構造物の損傷程度、損傷範囲が飽和地盤中にある構 造物より大きくなり、飽和地盤と不飽和地盤の液状 化挙動を再現する本解析手法の有用性を確認した.

#### 参考文献

- 渦岡良介,久保哲夫,八嶋厚,張鋒: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,No. 694/III-57, pp. 153-163, 2001. 12.
- 渦岡良介,仙頭紀明,八嶋厚,張鋒:護岸近傍に位置 する杭基礎構造物の3次元有効応力解析,日本地震工学論 文集,第2巻,第2号, pp.1-14,2002.
- Biot, M. A.: General theory of three-dimensional consolidation, J. Appl. Phys., Vol. 12, pp. 155-164, 1941.
- 4) Zienkiewicz, O. C. and Shiomi, T.: Dynamic Behavior of Saturated Porous Media; The Generalized Biot Formulation

and Its Numerical Solution, Proc. of Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 8, pp. 71-96, 1984.

- Van Genuchten, M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Am. J., Vol. 44, No. 5, pp. 892-898, 1980.
- 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(改訂版),2012.2.
- 7) 佐々木智大,樋口俊一:断層変位を受けるボックスカル バートの損傷メカニズムに関する研究,土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.74, No.4(地震工学論文集第37巻), pp. L\_395-L\_406, 2017.
- 米澤健次, 穴吹拓也, 江尻譲嗣: 大規模・高速化非 線形 FEM 解析ソフト「FINAL-GEO」, 大林組技術研 究所報, No. 75, 2011.
- 伊藤浩二,佐々木智大,樋口俊一:液状化地盤の三次 元有効応力解析手法と固結工法への適用,大林組技 術研究所報, No. 83, 2019.
- Hashiguchi, K. and Chen, Z.-P.: Elastoplastic constitutive equation of soils with the subloading surface and the rotational hardening, Int. J. for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol. 22, pp. 197-227, 1998.
- Hashiguchi, K. and Mase, T.: Extended yield condition of soils with tensile yield strength and rotational hardening, Int. J. of plasticity 23, pp. 1939-1956, 2007.
- 12)橋口公一,間瀬辰也:下負荷面モデルによるサイクリッ クモビリティの物理的解釈と定量的表現,地盤工学ジャ ーナル, Vol.6, No.2, pp.225-241, 2010.
- 13) Naganuma, K., Yonezawa, K., Kurimoto, O. and Eto, H.: Simulation of nonlinear dynamic response of reinforced concrete scaled model using three-dimensional finite element method, 13th WCEE, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 586, 2004.
- 14) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI-C51E, Vol. 2, pp. 259-272, 1999.





- 15) 長沼一洋:三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係,日本建築学会構造系論文集,第 474 号, pp. 163-170, 1995.
- 出雲淳一,嶋弘,岡村甫:面内力を受ける鉄筋コン クリート板要素の解析モデル,コンクリート工学, Vol. 25, No. 9, pp. 107-120, 1987.

## EFFECTIVE STRESS ANALYSIS METHOD FOR UNSATURATED TO SATURATED POROUS MEDIA AND ITS APPLICATION TO UNDERGROUND STRUCTURE IN LIQUEFIABLE GROUND

## Koji ITO, Tomohiro SASAKI and Shunichi HIGUCHI

This paper describes the numerical procedure of solving liquefiable ground problems involving RC structures for unsaturated to saturated porous media and its verification and application based on a threedimensional effective stress analysis method. The following conclusions are obtained from this study: (1) The developed procedure accurately reproduced the unsaturated seepage flow behavior, based on comparing laboratory test results with seepage flow analytical results; (2) The applicability of the procedure considering the material nonlinearity of both the soil and RC structure is verified, and an underground RC structure surrounded by unsaturated and saturated liquefiable ground is simulated. Moreover, the rational and acceptable seismic behavior of an underground RC structure is reproduced under a large-scale earthquake.