

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 佐々木 智大
樋口 俊一

Effective Stress Analysis Method for Unsaturated to Saturated Porous Media and its Application to Underground Structure in Liquefiable Ground

Koji Ito Tomohiro Sasaki
Shunichi Higuchi

Abstract

This paper describes the numerical procedure of solving liquefiable ground problems involving RC structures ranging from unsaturated to saturated porous media and its verification and application based on a three-dimensional 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.

概要

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を忠実に再現できる非線形地震応答解析が望まれている。このような問題への適用拡大を目指し、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まで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、不飽和浸透流解析および本手法との比較から、不飽和地盤における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における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有効応力解析手法を適用し、本手法により、飽和度に応じた不飽和・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。

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^{1) 2)}。

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

2.1 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^{3), 4)}。

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。

$$(1-n)\rho_s \ddot{u}_i + \left(\frac{n^2 \rho_f g}{k}\right) \dot{u}_i - \left(\frac{n^2 \rho_f g}{k}\right) \dot{U}_i - \sigma'_{j,i,j} + (\alpha-n)p_i + b_{si} = 0 \quad (1)$$

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

$$\dot{p} = -Q\{(\alpha-n)\varepsilon_{ii}^u + n\varepsilon_{ii}^U\} \quad (3)$$

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

ここに、 u_i と U_i , \dot{u}_i と \dot{U}_i , \ddot{u}_i と \ddot{U}_i , ε_{ii}^u と ε_{ii}^U , b_{si} と 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, ρ_s と ρ_f , K_s と 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, σ'_{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 σ'_{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, α 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。

$$\dot{p} = -Q^*\{(\alpha-n)\varepsilon_{ii}^u + n\varepsilon_{ii}^U\} \quad (5)$$

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

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

$$\psi = h_w - h + \frac{p}{\gamma_w} \quad (8)$$

ここに、 Q^* は不飽和土の間隙水の剛性, C_s は比水分容量, θ は体積含水率, ψ は圧力水頭, S_r は飽和度($S_r = 0$: 乾燥土, $S_r = 1$: 飽和土), γ_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。

$$n\bar{\rho}_f = nS_r\rho_f \quad (9)$$

ここに、 $\bar{\rho}_f$ は間隙水の見掛けの密度である。

2.2 不飽和浸透特性

既往の研究¹⁾と同様に、van Genuchten による不飽和浸透特性モデルを用いた^{5), 6)}。

2.2.1 圧力水頭と飽和度の関係(水分特性曲線)

式(10)に有効飽和度を示す。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{nS_r - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (10)$$

Table 1 物理定数と力学定数
Physical and Mechanical Properties

| | | |
|---------------------|------------|-------|
| 間隙率 | n | 0.309 |
| 飽和水分量 | θ_s | 0.309 |
| 高サクシオン時に残留する水分量 | θ_r | 0.075 |
| スケーリングパラメータ | α' | 2 |
| 水分特性曲線の形を決める形状パラメータ | n' | 4 |
| | m | 0.75 |

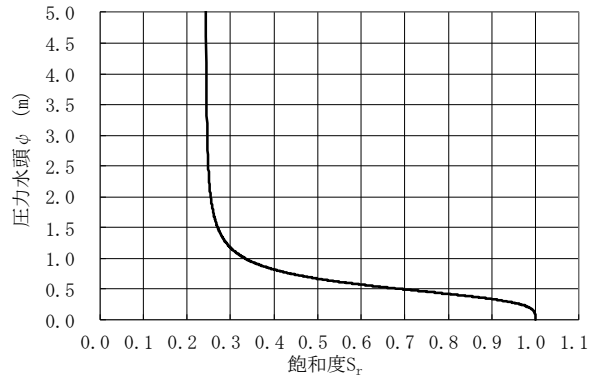


Fig. 1 圧力水頭と飽和度
Pressure Head vs. Saturation Degree

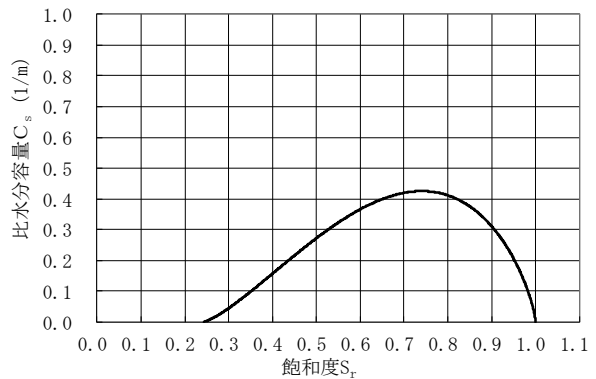


Fig. 2 比水分容量と飽和度
Specific Water Capacity vs. Saturation Degree

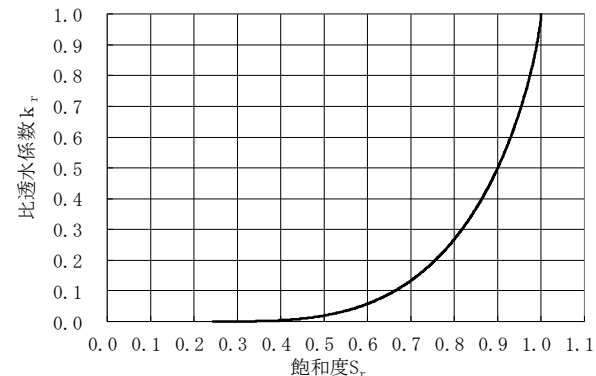


Fig. 3 比透水係数と飽和度
Relative Permeability vs. Saturation Degree

ここに、 S_e は有効飽和度, θ_s は飽和体積含水率($=n$), θ_r は残留体積含水率, θ は体積含水率である。

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

$$m = 1 - \frac{1}{n'} \quad (12)$$

ここに、 α' 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。

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

2.2.2 比透水係数と飽和度の関係 式(14)に比透水係数を示す。

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

ここに、 k_r 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。

Fig. 1~3に、文献(6)を参考にシルト質砂を想定して設定したTable 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。

2.3 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。

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

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

$$\alpha = 1 - \frac{K_T}{K_s}$$

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。

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

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

Fig. 4に $K_f = 2250000 \text{ kN/m}^2$ 、 $K_a = 140 \text{ kN/m}^2$ およびTable 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

3.1 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¹⁾。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。

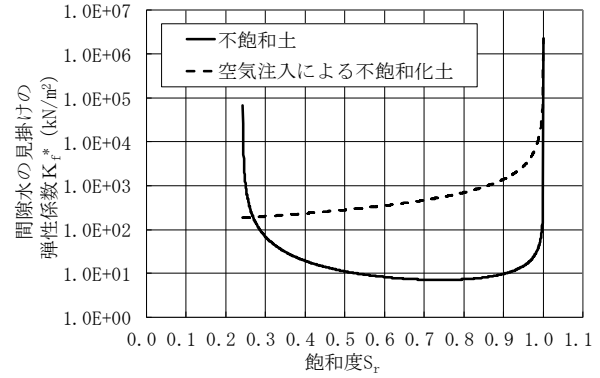


Fig. 4 間隙水の見掛けの体積弾性係数と飽和度
Apparent Volumetric Compressibility of Pore-Fluid vs. Saturation Degree

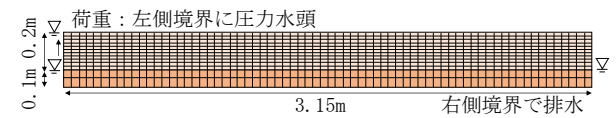


Fig. 5 解析モデルと有限要素メッシュ
Analytical Model and FE Mesh

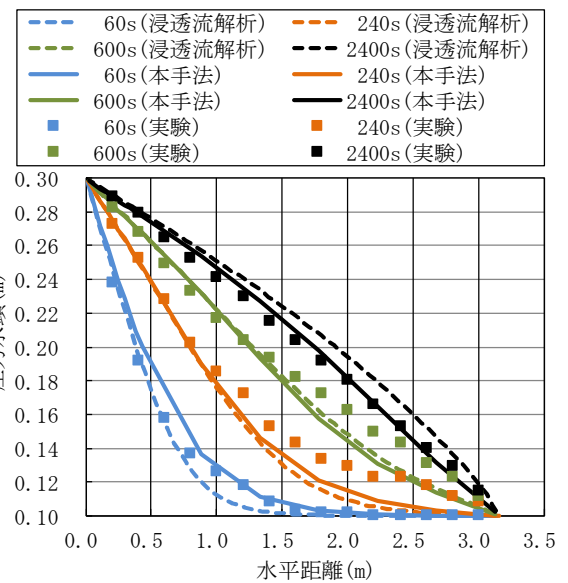


Fig. 6 圧力水頭の経時変化(浸透流解析、本手法と実験)
Distribution of Pressure Head
(Seepage Flow Analysis, Proposed Method and Laboratory Test)

Fig. 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¹⁾と同様とした。さらに、本検討では不飽和浸透流解析も別途実施し、不飽和浸透実験および本手法で得られる結果を比較した。

3.2 解析結果

Fig. 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

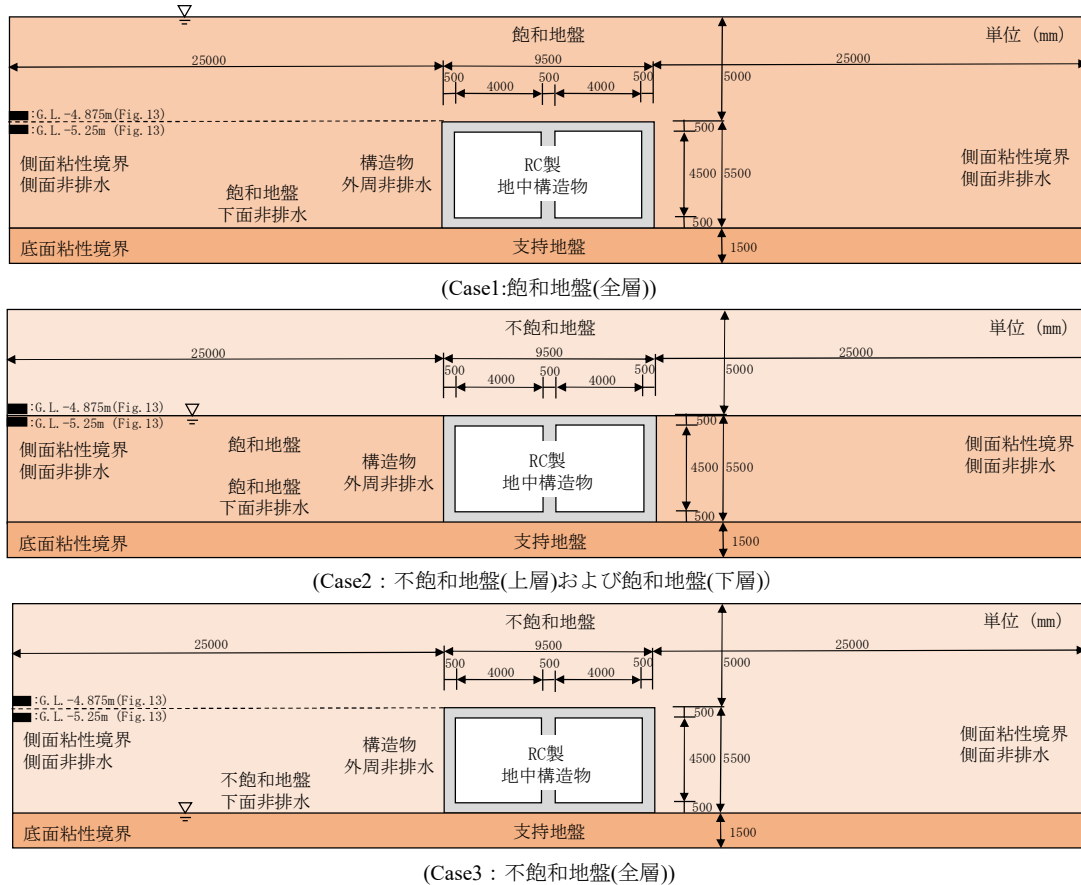


Fig. 7 検討対象(飽和地盤(全層), 不飽和地盤(上層)および飽和地盤(下層), 不飽和地盤(全層))
Target (Whole Saturated Ground, Upper Unsaturated Ground and Lower Saturated Ground, Whole Unsaturated Ground)

果が得られ、実験結果とも概ね整合することから、本法で不飽和浸透特性を再現できることを確認できた。

4. 不飽和・飽和地盤にある地中構造物の応答

4.1 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。

Fig. 7に解析ケースを示す。全層が飽和地盤(地下水位: 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、Fig. 8の構造仕様でコンクリートの設計基準強度を $F_c = 24\text{N/mm}^2$, 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⁷⁾。

Fig. 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, Fig. 7には力学・水理の境界条件も併記した。

4.2 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[®]」⁸⁾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⁹⁾。

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。

4.3 地盤の構成モデル

地盤材料の構成モデルでは、Fig. 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^{10)~12)}。本モデルでは、緩い砂で見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⁹⁾。

4.4 地盤定数

Table 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

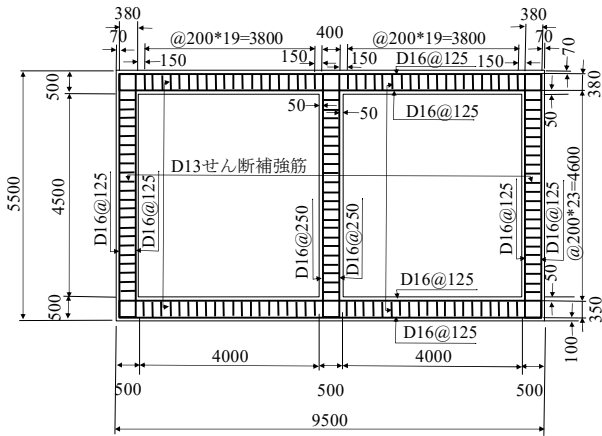


Fig. 8 寸法と仕様
Detail and Specification for Underground RC Structure

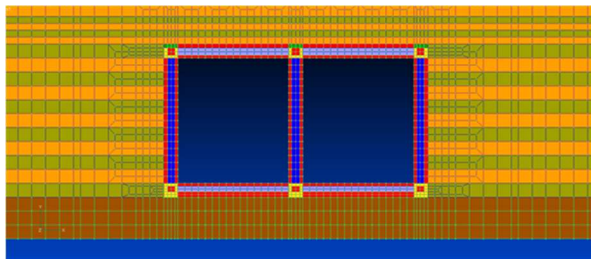


Fig. 9 解析モデルの有限要素メッシュ (RC製構造物周辺)
FE Mesh of Analytical Model (around RC Structure)

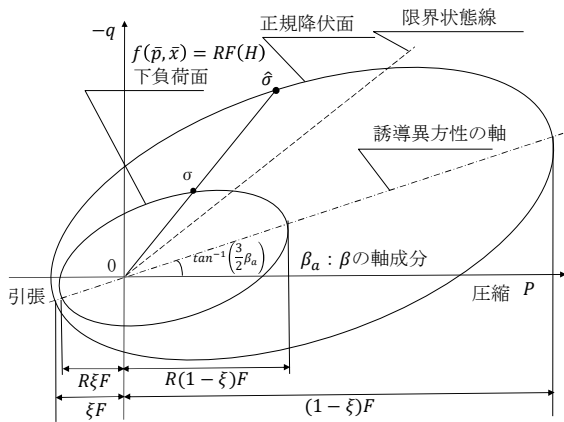


Fig. 10 p-q面における正規降伏面と下負荷面
Normal Yield Surface and Subloading Surface in p-q Plane

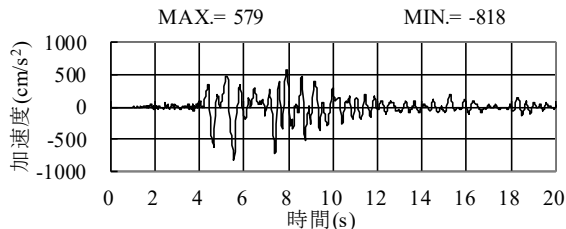


Fig. 12 地震波
Time History of Earthquake Motion

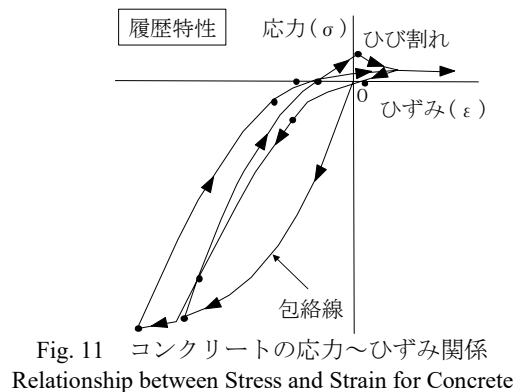
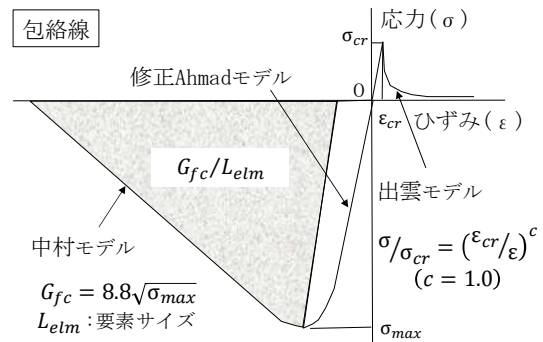
砂を想定したTable 3の緩い砂に相当する下負荷面モデルの材料定数を用い、不飽和地盤ではTable 1の不飽和浸透特性の物理定数と力学定数から初期飽和度を設定した。支持地盤では弾性($\rho_t = 2.0\text{t/m}^3$, $V_s = 700\text{m/s}$)を仮定した。

Table 2 物理定数と力学定数
Physical Properties and Mechanical Properties

| 材料 | 珪砂7号($D_r = 60\%$) | |
|-----------|----------------------|-----------------------------------|
| 土粒子密度 | ρ_s | 2.648t/m ³ |
| 間隙水密度 | ρ_f | 1.0t/m ³ |
| 間隙率 | n | 0.472 |
| 土粒子体積弾性係数 | K_s | $1.0 \times 10^{10}\text{kN/m}^2$ |
| 間隙水体積弾性係数 | K_f | $2.25 \times 10^6\text{kN/m}^2$ |
| 透水係数 | k | $7.0 \times 10^{-5}\text{m/s}$ |

Table 3 下負荷面モデルの材料定数
Mechanical Properties of Subloading Surface Model

| 材料 | 珪砂7号($D_r = 60\%$) | |
|-------------------|----------------------------|-------------------------|
| 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 | ϕ | 33° |
| 正規降伏面の初期値 | F_0 | 100kN/m ² |
| ポアソン比 | ν | 0.33 |
| 回転硬化限界面 | ϕ_b | 33° |
| 回転硬化発展則 | b_r | 100 |
| 正規降伏比Rの発展則 | u | 5000 |
| | ζ_1 | 1000 |
| せん断による 等方硬化/軟化 | μ | 0 |
| | ϕ_d | 26.6° |
| | ζ_2 | -10 |
| 規準有効応力 | $\sigma'_{m,ref}$ | 100kN/m ² |
| 弾性係数 | E_{ref} | 218647kN/m ² |



4.5 鉄筋コンクリートの構成モデル

Fig. 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¹³⁾、軟化域は中村モデル¹⁴⁾を用い、圧縮破壊の条件ではOttosenの提

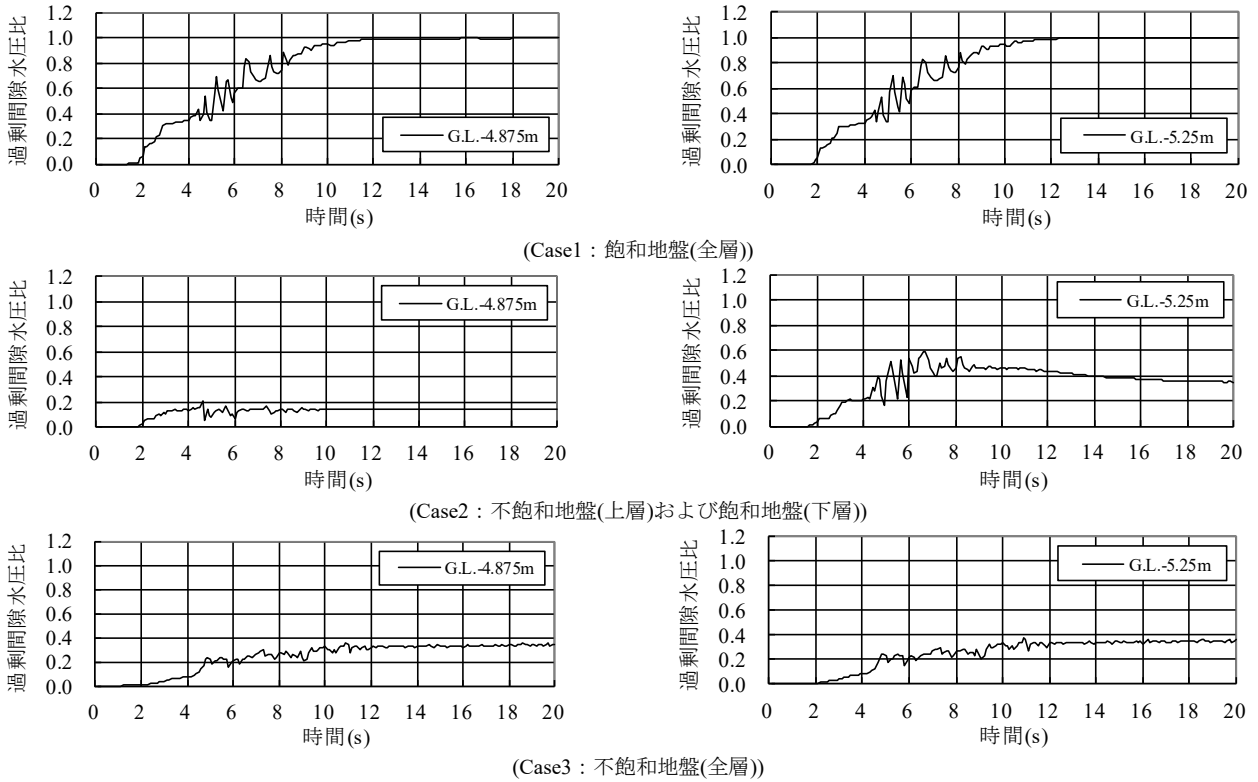


Fig. 13 自由地盤の過剰間隙水圧比の時刻歴
Time Histories of Excess Pore-water Pressure Ratio at Free Field

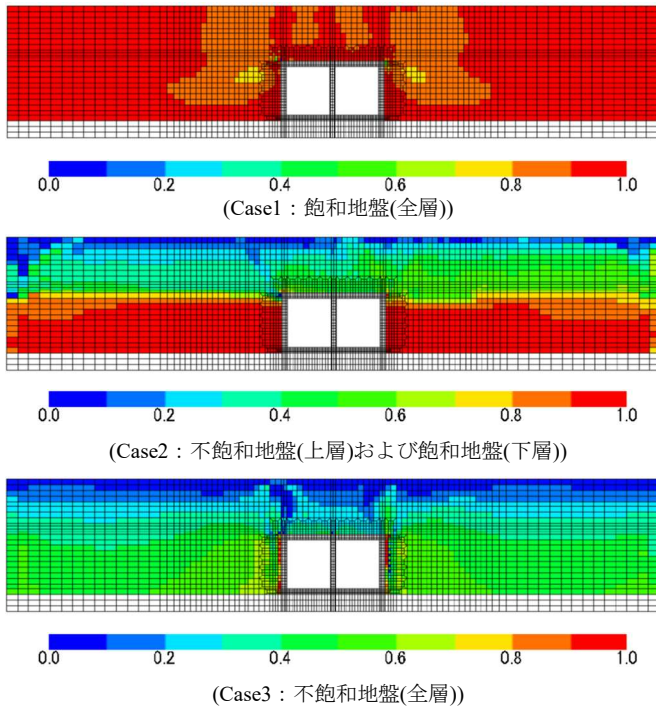


Fig. 14 過剰間隙水圧比の分布 (10s)
Distribution of Excess Pore-water Pressure Ratio (10s)

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¹⁵⁾。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¹⁶⁾。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¹⁵⁾。

鉄筋は、すべてコンクリート要素の剛性に鉄筋に相当

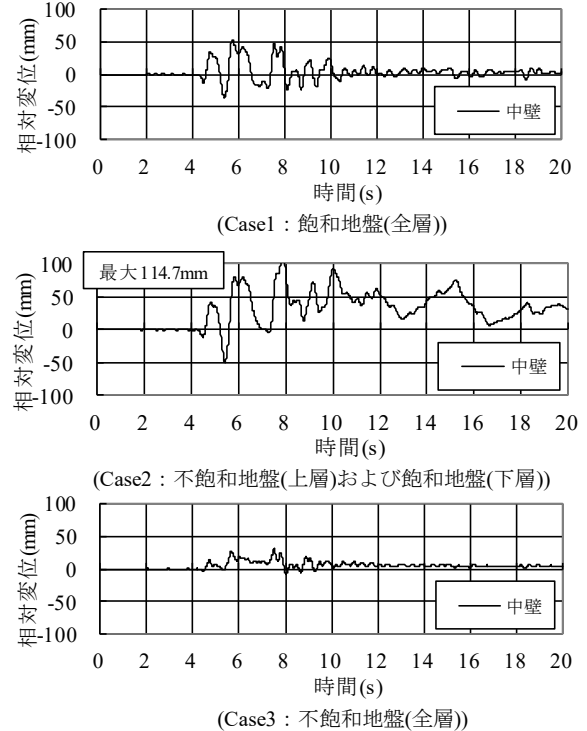


Fig. 15 構造物の相対変位の時刻歴
Time Histories of Relative Displacement at RC Structure

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。

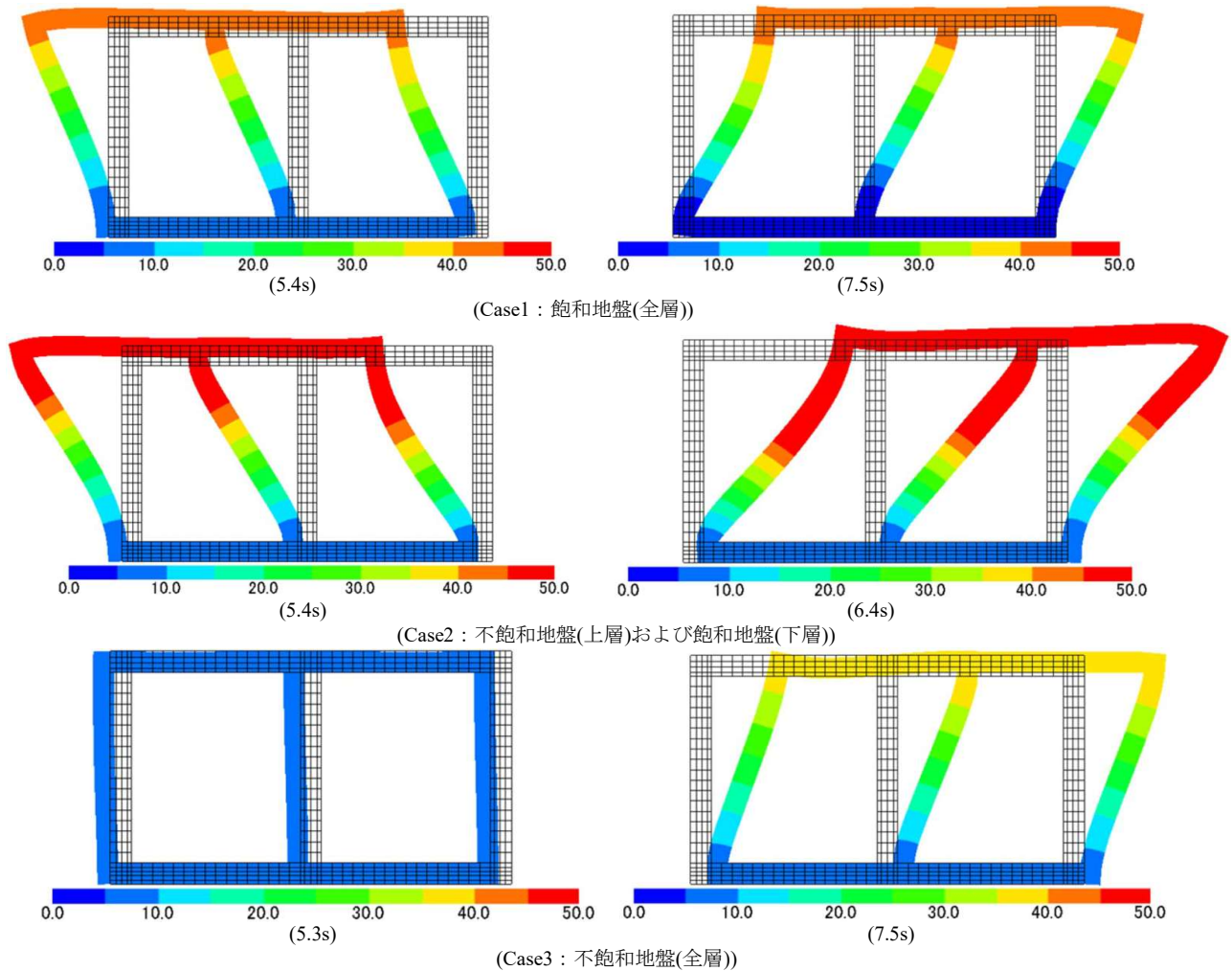


Fig. 16 地震時の構造物の変形(単位:mm, 倍率:50倍)
Deformation of Structure (Unit : mm, Scale : 50 times)

4.6 解析条件

Fig. 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5/10000s, 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とし, 減衰定数1%を仮定した。

4.7 解析結果

Fig. 13に頂版天端深度近傍位置の自由地盤(Fig. 7を参照)で得られた過剰間隙水圧比の時刻歴, Fig. 14に10sの過剰間隙水圧比の分布を示す。Case1, 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, 初期から飽和度が増加しサクシオンが低下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評価できると考えられる。

Fig. 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。Case1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7.9sで最大となり, 層間変形角が2.29%でCase1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。

Fig. 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では, 乾燥土(飽和度 $S_r = 0$)と飽和土(飽和度 $S_r = 1$)を仮定した従来の有効応力解析手法と本手法で得られる応答性状は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, 地震後の適切な液状化地盤の挙動を統一的に表現できる本手法は, 地中構造物および周辺地盤の健全性評価において有用と考えられる。

本手法の将来的な適用対象としては, 例えば, 人工バリアで低透水性のペントナイトを用いるために飽和までに長期間を要する放射性廃棄物の地層処分場等において, 建設・操業・閉鎖という各段階の過渡的な時期に応じた不飽和土の飽和度を反映した人工バリアやRC製構造物の地震時健全性評価が想定される。

5. まとめ

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。

- 1) 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で構造物の損傷程度が大きくなり，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できた。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 5) 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
- 6) 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. I_395-I_406, 2017
- 8) 米澤健次，穴吹拓也，江尻讓嗣：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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) Hashiguchi, K. and Mase, T.: Extended yield condition of soils with tensile yield strength and rotational hardening,

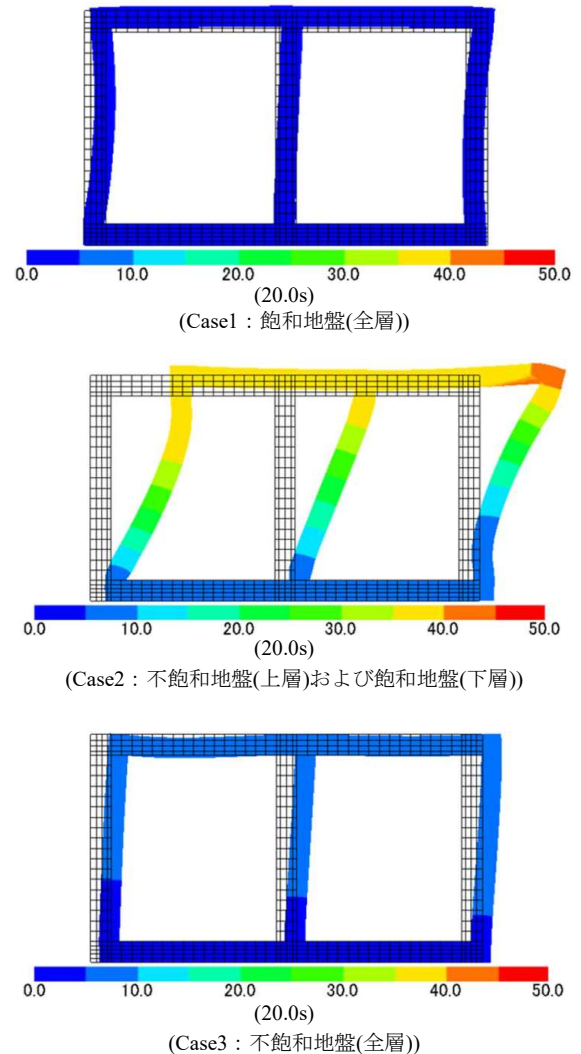


Fig. 17 地震後の構造物の変形(単位：mm，倍率：50倍)
Deformation of Structure (Unit : mm, Scale : 50 times)

- 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
- 16) 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