

論文 粘弾性モデルを導入した水・コンクリート骨格連成解析手法による間隙水圧特性評価に関する研究

大下英吉¹・石川靖晃²・林真弘³

要旨：本研究は、コンクリートや岩盤などの多孔質材料の時間依存型変形挙動を詳細に評価することのできる数値モデルの確立を目的として、筆者らが構築した水・コンクリート連成解析手法に粘弾性モデルの導入を行った。そして、新たに構築された水・コンクリート骨格連成解析手法により、繰返し载荷によるコンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧特性およびコンクリート応力に及ぼす間隙水圧の影響評価を行い、本モデルの適用性を示した。

キーワード：間隙水圧, 全応力, 有効応力, 粘弾性, 時間依存挙動

1. はじめに

コンクリート中の水分移動に関する研究は、硬化コンクリートのクリープの解明を例に取るまでもなく、過去多くの実績が積み重ねられている。この種の問題に限らず、海洋コンクリート構造物や水中コンクリート構造物など、コンクリート中の水分移動が重要な設計要因となる問題は数多い。そこで筆者らは、荷重载荷により均質材料から不均質材料に至るまでの統一的な水分移動に関する水・コンクリート骨格連成解析手法¹⁾²⁾の開発を行うとともに、単調载荷を受けるコンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧の実測³⁾⁴⁾を行った。実験的・解析的評価から、コンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧はコンクリート応力の相当分を分担するとともに、間隙水圧を発生させる主要因は体積ひずみであることが明らかとなり、若材齢コンクリート、地中或いは水中コンクリートでは、その影響が非常に重要であることが実証されたわけである。しかしながら、水コンクリート連成解析手法は、単調载荷による時間依存性の無い短期挙動を評価するものであるため、地震動或いは波のように短周期の外力の繰返しが中・長期的に作用するような時間依存挙動に対しては適

用性が困難である。したがって、水・コンクリート骨格連成解析手法の適用範囲を広げるためにも、粘弾性或いは粘塑性モデルのような時間依存型モデルの導入が必要であり、このことはすなわち、間隙水圧特性や応力特性に及ぼす間隙水圧の影響をより詳細に評価することにつながるわけである。

そこで本研究では、時間依存性を考慮した水・コンクリート骨格連成解析手法の構築を行い、繰返し荷重を受けるコンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧測定実験との比較により、その適用性評価を行った。そして、拡張された水・コンクリート骨格連成解析手法により、繰返し荷重下のコンクリート応力に及ぼす間隙水圧の影響評価も解析的に実施した。

2. 従来の水・コンクリート連成解析手法による時間依存挙動の評価

大下ら⁵⁾は、コンクリート内部に発生する間隙水圧特性の詳細な評価を行うために低応力レベルの繰返し荷重を受けるコンクリートの間隙水圧測定実験を実施し、応力経路による間隙水圧発生メカニズムの実験的評価を行っている。実験は、大下らが開発した間隙水圧測定セル³⁾を用

¹ 中央大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

² 名城大学講師 理工学部土木工学科 工修 (正会員)

³ 名城大学大学院 (正会員)

いた一次元圧密状態での繰返し載荷であり、あそびをなくすために事前に一軸圧縮強度の10%の荷重を載荷した。載荷荷重は一軸圧縮強度の60%である。なお、セルは軸直交方向変位が拘束される仕組みとなっているため載荷荷重は弾性応力レベルの範囲である。ここでは、間隙水圧測定実験に従来の水・コンクリート骨格連成解析手法を適用し、その問題点を明確にする。

図-1,2 は、実験に対する解析結果を示している。各図は、それぞれ全応力～軸ひずみ関係および間隙水圧～軸ひずみ関係を示しており、記号●は実験結果、○は解析結果を表している。両図から、実験結果はヒステリシスを示すことに対し、解析結果は載荷、除荷とも全く同じ応力経路を示している。一般に、低応力レベルの繰返し荷重を受けるコンクリートの応力特性は、

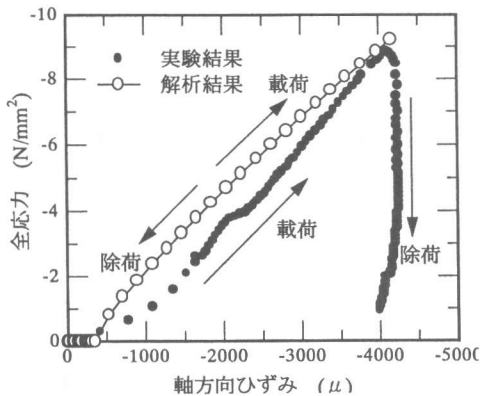


図-1 従来の水・コンクリート骨格連成解析手法の特性 (全応力)

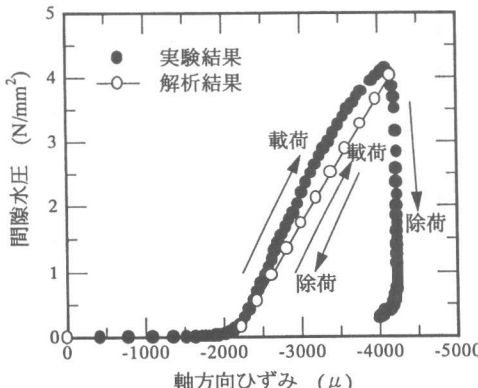


図-2 従来の水・コンクリート骨格連成解析手法の特性 (間隙水圧)

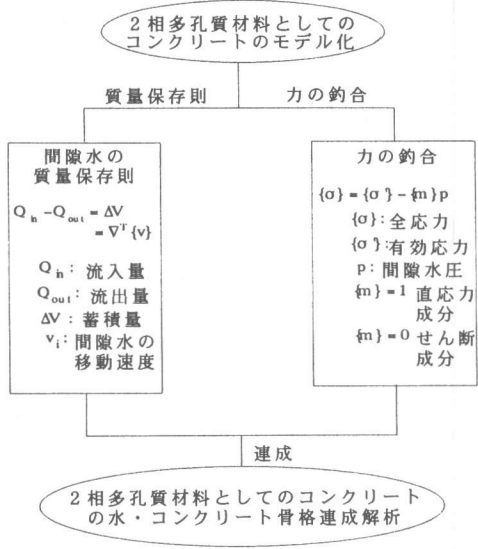


図-3 従来の水・コンクリート骨格連成解析 (均質材料)

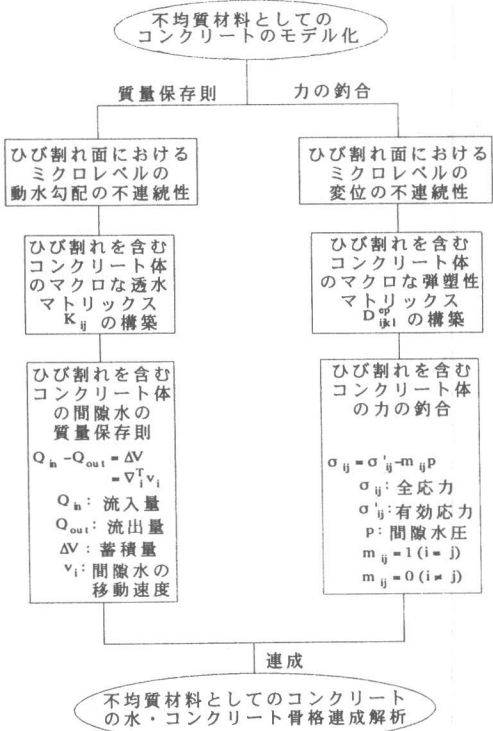


図-4 従来の水・コンクリート骨格連成解析 (不均質材料)

粘弾性の影響により載荷と除荷で異なる応力経路を示し、ヒステリシスを描くことが知られている⁹⁾。このことから、従来の水・コンクリート骨格連成解析手法により変形或いは間隙水圧特性のより詳細な評価を行うためには、粘弾性成分などの時間依存挙動を評価することのできるモデルへの拡張が必要である。

3. 拡張された水・コンクリート骨格連成解析手法

筆者らが構築した水・コンクリート骨格連成解析手法は、図-3,4 に示すように、間隙水の質量保存則と力の釣合い式を連成させたものであり、均質材料から不均質材料に遷移する過程をも評価可能なものである。しかしながら、本解析手法は時間依存性を考慮していないため、その適用範囲が短期的挙動のみに限定されており、その適用範囲を長期的挙動評価にまで拡張させるためには、時間依存性のひずみ成分の導入が必要であることが2. において確認された。

3.1 粘弾性成分を考慮した間隙水の質量保存則

石川ら⁷⁾は、流動体から固体へ遷移する時点のコンクリートの変形挙動を表すために、弾性、塑性ひずみ成分の他に粘弾性および粘塑性ひずみ成分を表したモデルの構築を行っている。このうち、本研究では次式に示す Dirichlet 級数近似により増分型で表した粘弾性モデルを導入することにした。

$$d\{\varepsilon^{ve}\} = \frac{\Delta\sigma}{E''} + \Delta\varepsilon'' \quad (1)$$

$$\frac{1}{E''} = \sum_{\mu=1}^N \frac{1-\lambda_{\mu}}{C_{\mu(r+1/2)}}$$

$$\Delta\varepsilon'' = \sum_{\mu=1}^N \{1 - \exp(-\Delta y_{\mu})\} \gamma_{\mu(r)}$$

ここで、 $\Delta\sigma$ は応力増分であり、 E'' , $\Delta\varepsilon''$ は級数展開にて算出される項である。

そして、既往の研究²⁾に粘弾性の影響による間隙水の変形を考慮すると、間隙水の質量保存則は次式のマトリックスで表すことができる。

$$-H\{\bar{p}\} - L^T \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} - S \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} - W \frac{d\{\bar{v}\}}{dt} - \frac{d\{g_p\}}{dt} - \frac{d\{f_p^{vs}\}}{dt} + \{f_p^{ext}\} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $d\{\bar{u}\}$, $d\{\bar{p}\}$ は、それぞれ節点変位ベクトル、節点間隙水圧である。また、各マトリックスおよびベクトルは、以下に示す通りである。

$$H = \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T \frac{k}{\rho_w} \nabla \bar{N} d\Omega, S = \int_{\Omega} \bar{N}^T \frac{\xi}{k_f} \bar{N} d\Omega$$

$$L^T = \xi \int_{\Omega} \bar{N}^T \{m\}^T B d\Omega$$

$$W = \int_{\Omega} \bar{N}^T \{3(1-\xi)\alpha - 3\xi\mu\} \bar{N} d\Omega$$

$$f_p^{ext} = \int_{\Omega} \bar{N}^T q / \rho_w d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T \frac{k}{\rho_w} \nabla \rho_w z d\Omega + \int_{\Gamma} \bar{N}^T (\{v\}^T \cdot n) d\Gamma$$

$$g_p = \int_{\Omega} \bar{N}^T \frac{V_c}{V} \frac{\eta \gamma_p}{\rho_w} C_H d\Omega$$

ここで、粘弾性に関する項は $d\{f_p^{vs}\}$ であり、次式で表すことができる。

$$f_p^{vs} = \int_{\Omega} \{(1-\xi) \frac{V_c}{V} - \xi\} \{m\}^T \{\varepsilon^{ve}\} d\Omega \quad (3)$$

3.2 粘弾性成分を考慮した力の釣合い式

既往の研究²⁾に粘弾性の影響による骨格の変形を考慮すると、有効応力増分は次式で表すことができる。

$$d\{\sigma\} = [D_s^{ep}] \{d\{\varepsilon^t\} - d\{\varepsilon^{pr}\} - d\{\varepsilon^p\} - \frac{V_c}{V} d\{\varepsilon^{ve}\} \} \quad (4)$$

ここで、ひずみ成分の上付き添え字 t, pr, p, ve は、それぞれ全ひずみ、間隙水圧による骨格のひずみ、塑性ひずみおよび粘弾性ひずみを表している。また、 V, V_c は、それぞれコンクリート体の全体積およびセメントペーストの体積である。

いま、間隙水圧 p が存在する場合の全応力 $\{\sigma\}$ と有効応力 $\{\sigma'\}$ の関係は、次式により表すことができる。

$$\{\sigma\} = \{\sigma'\} - \{m\}p \quad (5)$$

$$\{m\} = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

ここで、符号の定義は、応力に関しては引張を正、水圧に関しては圧縮を正としている。

そして、仮想仕事を用いた力の釣合い式は次式のマトリックスで表すことができる。

$$K_T \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} - L \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} - A \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} - \frac{d\{\bar{f}\}}{dt} = 0 \quad (6)$$

なお、各マトリックスおよびベクトルは、以下に示す通りである。

$$K_T = (1-\xi) \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} B d\Omega$$

$$L = \xi \int_{\Omega} B^T \{m\} \bar{N} d\Omega$$

$$A = (1-\xi) \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} \{m\} \alpha \bar{N} d\Omega$$

ここで、粘弾性に関する項は $d\{\bar{f}\}/dt$ であり、次式で表すことができる。

$$\{\bar{f}\} = \int_{\Omega} N^T \{b\} d\Omega + \int_{\Gamma} N^T \{f\} d\Gamma + (1-\xi) \frac{V_C}{V} \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} \{e^{cr}\} d\Omega \quad (7)$$

3.3 粘弾性成分を考慮した2層多孔質材料の支配方程式

力の釣合いと間隙水の質量保存則とを同時に満足する拡張された水・コンクリート骨格連成解析方程式は、次式のマトリックス形式で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{u}\} \\ \{\bar{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_T & -L \\ -L^T & -S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} \\ \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{d\{\bar{f}\}}{dt} + A \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} \\ W \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} - \frac{d\{f_p^{ve}\}}{dt} - \{f_p^{ext}\} + \frac{d\{g_p\}}{dt} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

すなわち、節点変位ベクトルと節点間隙水圧を未知数として、境界条件を代入することにより、時間依存挙動を示すコンクリートの変形および水分移動特性が自動的に求まることになる。なお、注意すべきことは、式(1)に示す粘弾性ひずみ増分は非線型性を有していることである。

4. 拡張された水・コンクリート骨格連成解析手法の適用性評価

2. において示した繰返し荷重を受けるコンクリートの間隙水圧測定実験に本モデルを適用

し、その適用性評価を行うことにする。

4.1 全応力に対する適用性評価

全応力に対する実験結果と解析結果との比較を図-5に示す。図中の記号●は実験結果、○は解析結果を示している。なお、解析では水和反応により生じる内部空（水）隙の負圧と骨格の圧縮力を初期応力 σ_0 として導入している。

まず、同図から、粘弾性モデルを導入した本解析手法と実験結果は比較的良好な一致を示しており、時間依存挙動を導入した本解析手法の適用性が評価される。

一般に、除荷時の応力経路は、図-6に示すように、載荷時の応力経路とは異なる原点指向を示すが、実験および解析結果とも除荷時に急激

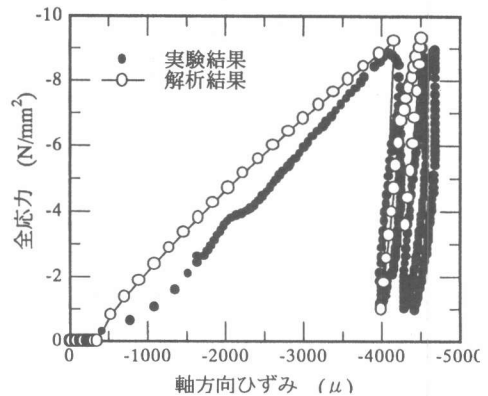


図-5 全応力に対する解析的評価

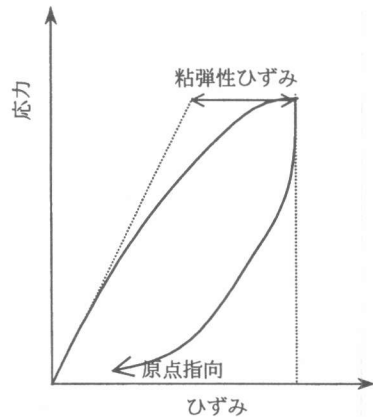


図-6 低応力レベルでの繰返し応力履歴特性

な応力低下を示し、ひずみの回復は殆ど生じていない。この現象は、あたかも塑性或いは粘塑性挙動のように見えるが、実験が弾性応力レベル内での繰返し載荷であることを考えると、この現象はそれらのひずみ成分の影響ではなく、コンクリートの内部空隙に生じる間隙水圧の影響であると考えられる。なお、詳細な検討は 5. で行うことにする。

4.2 間隙水圧に対する適用性評価

間隙水圧に対する実験結果と解析結果との比較を、図-7 に示す。図中の記号●は実験結果、記号○は解析結果を示している。

まず、同図から、全応力と同様に粘弾性モデルを導入した本解析手法と実験結果とは比較的良好な一致を示しており、時間依存挙動を導入した本解析手法の適用性が評価される。このように、拡張された水・コンクリート骨格連成解析手法は、弾性応力（低応力）レベルでの時間依存挙動を詳細に評価可能であることが判明したわけである。そこで次に、繰返し荷重を受けるコンクリートの間隙水圧挙動について簡単な考察を行うことにする。

5. 間隙水圧挙動に関する考察

まず、図-8 に示すように、載荷時、除荷時の間隙水圧経路は全く異なっており、除荷時には急激な間隙水圧の消散が生じている。この現象

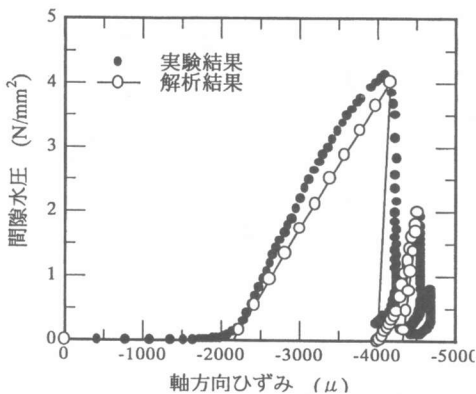


図-7 間隙水圧に対する解析的評価

は、後続する載荷時の間隙水圧勾配が点線で示す完全飽和水圧曲線とほぼ等しいということから考えると、不飽和による影響ではないであろう。では、どのような影響によるものかは図-9 に示す有効応力履歴から推測されるであろう。除荷時の有効応力は、白丸の領域で示すように、荷重を除荷したにも拘わらず急激な増加を示した後に低下を生じている。ここで、除荷開始時の急激な有効応力の増加が、急激な間隙水圧の消散につながる重要なポイントであると考えられる。すなわち、除荷開始時では、内部空隙に生じていた間隙水圧が何らかの原因により、コンクリート骨格に生じる有効応力へと移行することおよび除荷開始時の影響は間隙水圧のみに影響することなどの影響により、有効応力の急激な増加現象が生じるものと考えられる。この

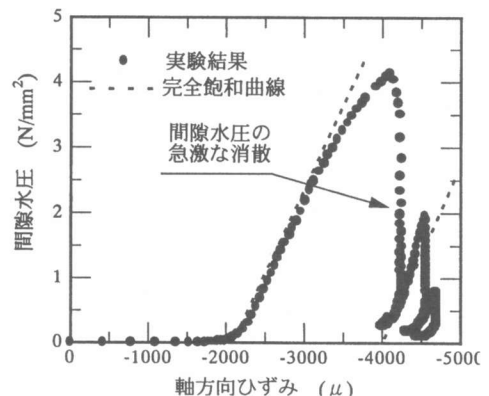


図-8 不飽和状態の影響評価

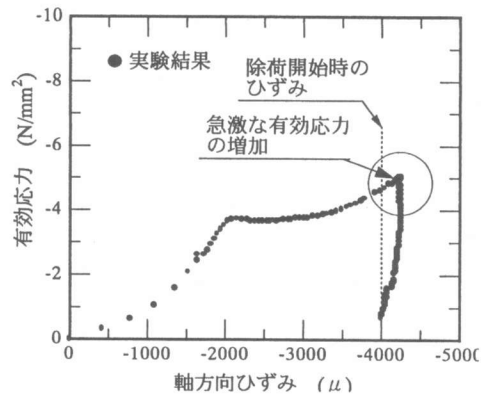


図-9 除荷開始時の有効応力経路

ような現象は、あたかも水を媒体として骨格に
 応力が伝達されることを示しており、今後より
 詳細な検討を行って行く必要がある。

次に、間隙水圧の最大値は約 4N/mm^2 であり、
 コンクリート応力である全応力の約 $1/2$ もの無視
 し得ない程の大きな応力を分担している。そし
 て、間隙水圧の極大値は、繰返しとともに徐々
 に低下の傾向を示している。このような一連の
 間隙水圧特性は、コンクリート骨格に多大な影
 響を及ぼしていることが推測され、その影響評
 価を図-10 に示す。同図は、本解析手法により得
 られた有効応力を示しており、間隙水圧の影響
 を明確にするために間隙水圧を考慮しない結果
 も併せて示している。図中の記号●は水圧を考
 慮しない結果、○は水圧を考慮した結果を示し
 ている。この図から、水圧を考慮した結果は、
 間隙水圧が発生する 2000μ 以後のひずみ域では、
 有効応力の増加は殆ど無く外力の相当分を間隙
 水圧が負担しており、水圧を考慮していない結
 果と全く異なった傾向を示している。また、荷
 重除荷後の挙動も両結果で全く異なっており、
 間隙水圧はコンクリート応力に多大な影響を及
 ぼしていることが再確認されるであろう。この
 ような状況は、外力が作用しコンクリートの内
 部空隙に間隙水圧が発生した後のコンクリート
 の現象に相当するものと考えている。

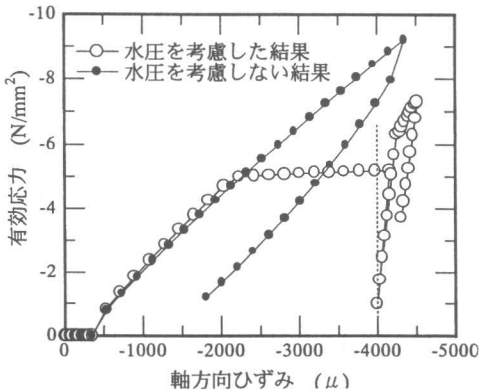


図-10 有効応力に及ぼす間隙水圧の影響

5. 結論

本研究では、時間依存挙動を考慮した水・コ
 ンクリート骨格連成解析手法の構築を行い、繰
 返し荷重を受けるコンクリートの間隙水圧実験
 結果との比較により、その適用性評価を行った。
 さらに、構築した水・コンクリート骨格連成解
 析手法により、繰返し荷重下の間隙水圧特性お
 よびコンクリート応力に及ぼす間隙水圧の影響
 評価も実施した。以下に、その結果をまとめる。

- 1) 拡張された水・コンクリート骨格連成解析
 手法は、時間依存挙動を比較的精度良く評価可
 能なものである。
- 2) 載荷時と除荷時の間隙水圧経路は異なる。
- 3) 間隙水圧は応力経路に大きな影響を及ぼす。

参考文献

- 1) 大下英吉, 田辺忠顕: コンクリート内部に発生す
 る間隙水圧の予測とその影響評価に関する解析的研究,
 土木学会論文集, No.526/V-29, pp.29-41, 1995.
- 2) 大下英吉, 田辺忠顕: 不均質材料の透水性に関す
 るモデル化とその適用性評価, 土木学会論文集, No.526/
 V-29, pp.63-77, 1995.
- 3) 大下英吉, 田辺忠顕: コンクリートに発生する間
 隙水圧の実測とその影響に関する実験的研究, 土木学
 会論文集, No.514/V-27, pp.75-84, 1995.
- 4) 大下英吉, 田辺忠顕: コンクリートのポストピー
 ク領域における間隙水圧に関する実験的・解析的研究,
 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.109-120, 1997.
- 5) 林真弘, 石川靖晃, 大下英吉: 荷重履歴を受ける
 コンクリート中の間隙水圧に関する実験的研究, コン
 クリート工学年次論文報告集, 1998. (投稿中)
- 6) 安藤直樹, 石川靖晃, 田辺忠顕: 遷移材齢時にお
 けるコンクリートの構成則に関する実験的研究, コン
 クリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1363-
 1368, 1997.
- 7) 石川靖晃, 安藤直樹, 阿部博俊, 菊川浩治: ピン
 ガム流体から固体への遷移過程におけるコンクリート
 の構成則に関する研究, コンクリート工学年次論文報
 告集, Vol.17, No.1, pp.627-632, 1995.