

# 論文 プリーディング層を考慮したコンクリート供試体の寸法効果に関する三次元有限要素解析

森本康介\*<sup>1</sup>・長尾哲英\*<sup>2</sup>・畑中重光\*<sup>3</sup>・水野英二\*<sup>4</sup>

**要旨：** 圧縮力を受けるコンクリート供試体の寸法効果の原因としては、一般に（１）材料欠陥の確率分布，（２）破壊領域の局所化，（３）コンクリート特有の不均一性などが考えられている。本研究では、特に（３）の原因による影響の程度を探ることを目的として、寸法の異なるプレーンコンクリート供試体に材料不整（プリーディング層）を導入し、三次元有限要素解析を行った。その結果、プリーディング層を導入することにより、プレーンコンクリート供試体の圧縮強度が寸法の増大とともに低下する傾向を定性的にはあるが確認することができた。

**キーワード：** 寸法効果，コンクリート供試体，三次元有限要素解析，プリーディング層

## 1. はじめに

一般に、鉄筋コンクリート構造物や部材の耐力は、寸法が大きくなるにつれて低下することが知られている。この現象は寸法効果と呼ばれ、コンクリート材料の分野において主要な研究テーマの一つである。これまでの研究<sup>1),2)</sup>によれば寸法効果の原因として、（１）材料欠陥の確率分布，（２）破壊領域の局所化，（３）コンクリート特有の不均一性などが考えられている。すなわち、コンクリート中に存在する材料欠陥の大きさや各領域の強度にはばらつきがあり、構造物が大きくなればこの弱い領域を含む確率が増すことになる。また、この欠陥部等を起点とする内部破壊は必ずしも部材の寸法比に比例して拡がるわけではない。

本研究では、特に（３）の原因による影響の程度を探ることを目的として、寸法の異なるプレーンコンクリート供試体に層状の材料不整（ここでは、プリーディング層と呼ぶ）を導入した三次元有限要素解析を行った。なお、本解析ではコンクリート部分の構成則に、これまでに筆者らが開発したひずみ軟化型モデル<sup>3),4),5)</sup>を採用した。

## 2. 解析手法

### 2.1 解析対象

解析対象とした供試体（高さ幅比  $H/D=1, 2, 3$ ）を図-1に示す。なお、解析は供試体の1/4領域（図中の斜線部）にて行った。解析条件を表-1に、供試体の形状・材料に関する諸量を表-2および図-2に示す。本研究では、表-1に示す解析条件に基づいて、形状（ $H/D$ の比）および断面の大きさ（ $D \times D$ ）を変化させた供試体（計12種類）について解析を行った。供試体へのプリーディング層<sup>6),7)</sup>の導入に際して与えた強度分布例

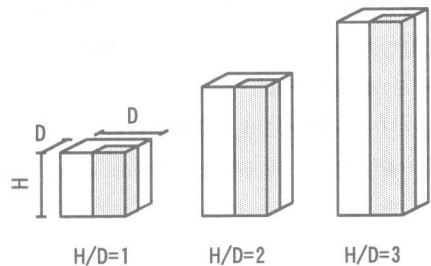


図-1 H/Dの異なる供試体（全体図）

\* 1 三重大学大学院 工学研究科博士前期課程建築学専攻（正会員）

\* 2 三重大学 工学部建築学科（非会員）

\* 3 三重大学教授 工学部建築学科 工博（正会員）

\* 4 中部大学教授 工学部土木工学科 Ph. D.（正会員）

(ここでは、 $H/D=2$ 、各層の強度差  $\Delta Fc=1(\text{MPa}/20\text{cm})$ ) を図-2 に示す。このケースでは強度分布として、各層毎 (20cm) に 1 [MPa] の強度差を与えた。また、各層の強度を平均化するとコンクリートの一軸圧縮強度は、 $fc'=30.0[\text{MPa}]$  となるように設定した。

## 2.2 要素分割図

有限要素解析に用いた試験体の要素分割図を図-3 に示す。本研究では、一要素当たりの寸法を  $10 \times 10 \times 10(\text{cm})$  の立方体として要素分割を行った。また、解析モデルは、断面の二軸 (X, Y 軸) 対称性から、供試体の 1/4 部分とした。

## 2.3 境界条件

端部拘束を導入しない場合は  $X=0$  および  $Y=0$  平面でそれぞれ X および Y 方向を固定し、端部拘束を導入する場合はさらに上下端部の平面で X, Y 方向を固定した。

## 2.4 解析プログラム

本研究では、8 節点アイソパラメトリック三次元ソリッド要素<sup>8)</sup>を組み込んだ有限要素プログラム FEAP<sup>9)</sup>を使用する。コンクリートのひずみ軟化領域まで解析するため、供試体 (高さ H) の上部に軸ひずみ 0.005% を与える変位制御とした。

## 2.5 構成モデル

コンクリート部分には、筆者らのひずみ軟化型モデル<sup>9)</sup>を採用し、鉄筋部分には von Mises モデルを用いた。

## 3. 解析結果

本節では、特に  $H/D=2$  に関する解析結果について考察を行う。

### 3.1 平均軸応力-軸ひずみ関係

平均軸応力-平均軸ひずみ関係を、図-4 および図-5 に示す。図-4 に、端部拘束の有無によ

表-1 解析条件

	ブリーディング層の有無	端部拘束の有無	各層の強度差 $\Delta Fc$ (MPa/20cm)
ケース1	有	有	1
ケース2	有	無	1
ケース3	無	有	無
ケース4	有	有	2
ケース5	有	無	2

表-2 供試体の形状・材料データ

供試体寸法				材料データ	
断面: D×D (cm)	高さ: H (cm)			$E_c$ (GPa)	$\nu_c$
	H/D=1	H/D=2	H/D=3		
(a) 20×20	20	40	60	21.0	0.2
(b) 40×40	40	80	120		
(c) 60×60	60	120	180		
(d) 80×80	80	160	240		

D: 供試体幅 H: 供試体高さ  $E_c$ : コンクリートのヤング率  $\nu_c$ : コンクリートのポアソン比

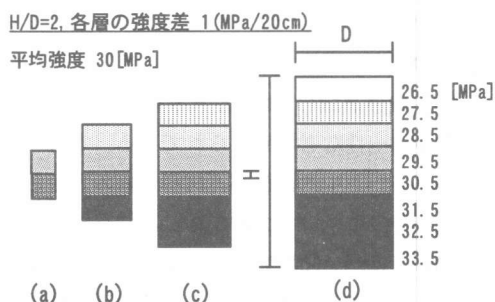


図-2 供試体寸法およびブリーディング層の強度分布例

る比較 (解析ケース1 および 2)、図-5 には、ブリーディング層の有無による比較 (解析ケース1 および 3) を示す。図中の軸応力の値は、解析モデルの最上面での節点力の総

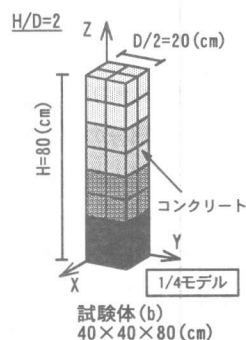


図-3 要素分割例

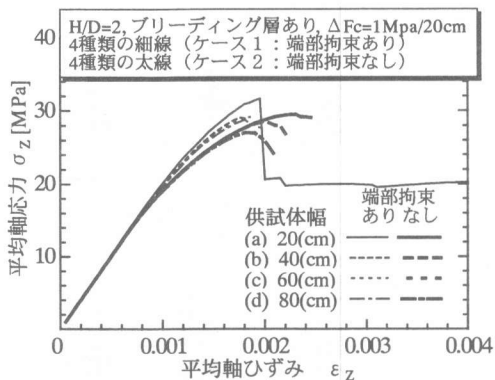


図-4 平均軸応力-軸ひずみ関係  
(端面摩擦の影響)

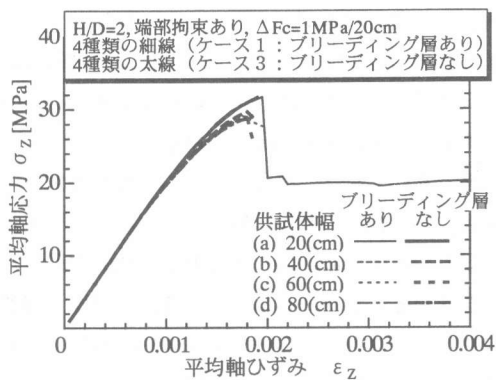


図-5 平均軸応力-軸ひずみ関係  
(ブリーディング層の影響)

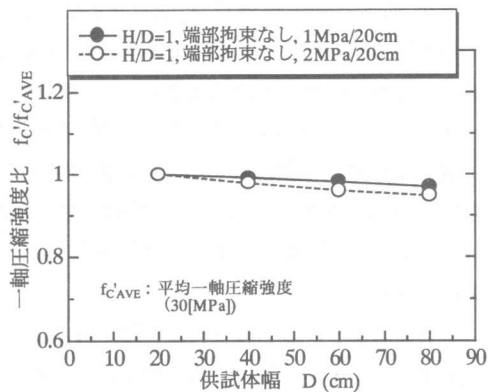
和を最上面の面積で割ったものである。

図-4および図-5に示されるように、ひずみ軟化域に関して数値解がほとんど得られていない。これは、強度の異なるブリーディング層および端部拘束条件の導入により供試体内部の各層間で破壊の進展に差が生じるため、最大応力以降に供試体内部のある要素内にてスナップバック現象<sup>5)</sup>

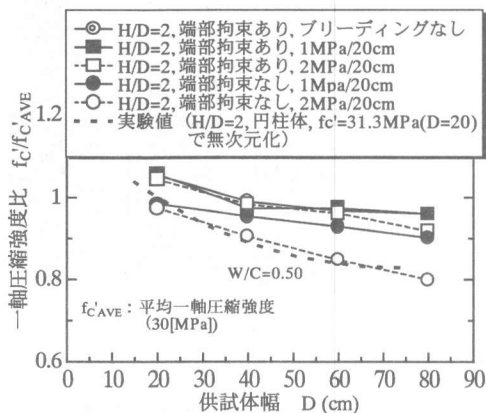
(不安定現象)が起き、ピーク以降の応力-ひずみ関係が一意的に定まらなかったことが原因である。従って、本論文ではピークまでの応力-ひずみ関係の結果を基に議論を行う。

図-4および図-5によれば、上昇域の応力-ひずみ曲線の差異は小さいものの、寸法の増大に伴い圧縮強度が低下していく傾向が認められる。

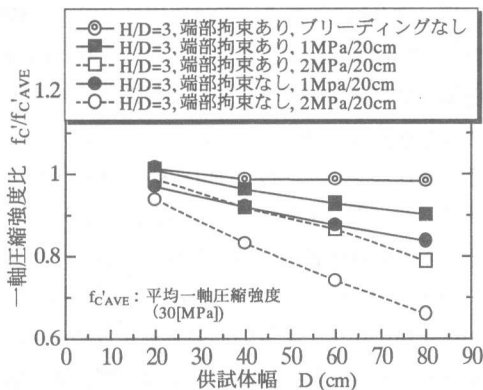
これは、ブリーディング層の導入により寸法が大きいほど、供試体内により弱い強度層を含むことになるためである。しかし、ブリーディング層を導



(a) H/D = 1



(b) H/D = 2



(c) H/D = 3

図-6 寸法の違いによる一軸圧縮強度比

入しなくても解析ケース3（端部拘束あり）では、圧縮強度の低下が見られた。これは、供試体寸法が大きくなるに従い端部からの拘束効果が相対的に薄れることが原因と考えられる。

図-4によれば、ブリーディング層を考慮した場合、端部拘束の有無（解析ケース1および2）により、高応力域における応力上昇域の勾配に差が見られることが分かる。図-5によれば、端部拘束がある場合、ブリーディング層の有無（解析ケース1および3）による影響は、各ケースにおいてほとんど見られなかった。

### 3.2 一軸圧縮強度比の傾向

各供試体形状（ $H/D=1,2,3$ ）ごとにまとめた供試体寸法と一軸圧縮強度比の関係を図-6(a),(b)および(c)に示す。縦軸の一軸圧縮強度比  $f_c'/f_{c'AVE}$  とは、各供試体の最大応力  $f_c'$  をコンクリートの平均一軸圧縮強度  $f_{c'AVE}$ （ここでは、 $30[\text{MPa}]$ と設定）で除した値である。横軸は、各供試体の幅  $D(\text{cm})$  を普通目盛で示した。実験値<sup>10)</sup>（図中の点線）も示してあるが、図中の値は  $D=20(\text{cm})$  時の圧縮強度（ここでは、 $31.3\text{MPa}$ ）で除してある。また、この実験結果は円柱供試体（ $H/D=2$ ）に対して得られたものであることを付記しておく。

解析結果より、形状比（ $H/D$  の比）および強度勾配が大きい場合の方が、強度比が低く、より急勾配な一軸圧縮強度比  $f_c'/f_{c'AVE}$  - 供試体幅  $D$  関係が得られることを確認した。

図-6(b)によれば、実験値に見られる一般的傾向、すなわち供試体幅  $D$  が大きくなるにつれ圧縮強度の低下率が小さくなる傾向は、端部拘束の影響を大きく受けることが推測される。しかし、図-6(c)に示すように、 $H/D=3$ 、端部拘束あり、ブリーディング層あり（ $1,2(\text{MPa}/20\text{cm})$ ）という条件下での解析結果には、そのような傾向が見られない。これは、形状比が  $H/D=3$  の供試体は  $H/D=2$  の供試体に比べ、より弱い強度層を含むことになるため、その結果、供試体内では端部拘束の影響よりもブリーディング層の影響の方が強くなったと考えられる。

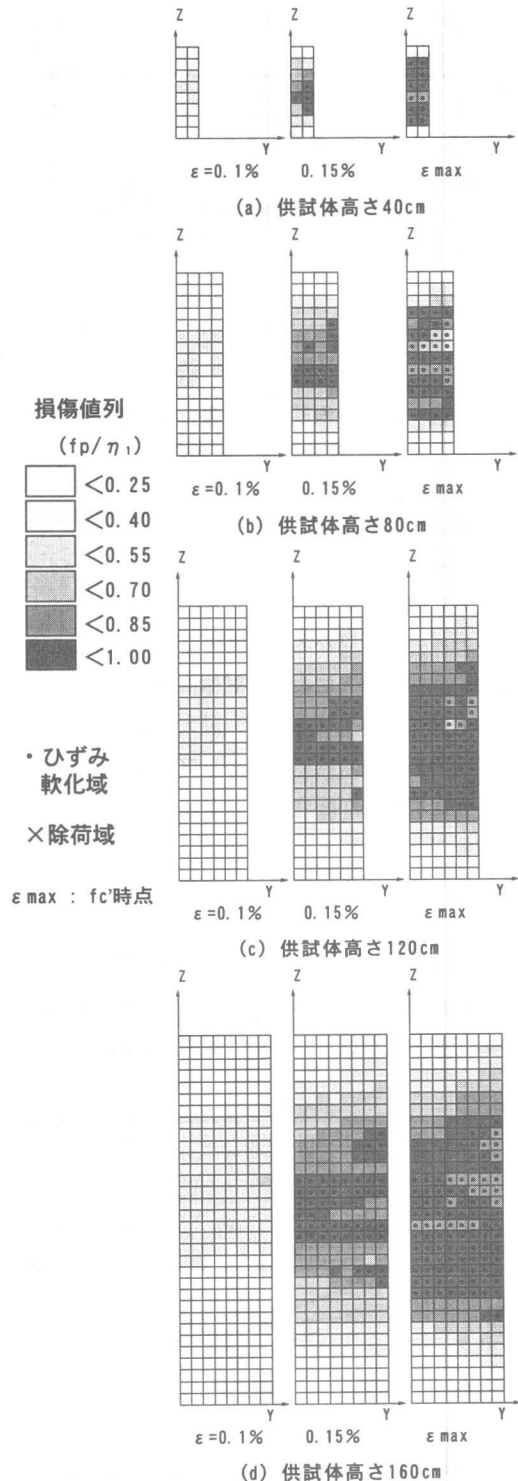
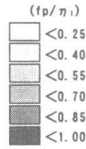


図-7 損傷度の進展図  
(ケース1 :  $H/D=2$ , 端部拘束あり, ブリーディング層あり)

・ひずみ  
軟化域  
×除荷域  
 $\epsilon_{max}$  :  $f_c$ 時点



### 3.3 損傷度の進展

ここでは、各解析ケースにおける損傷度の進展（破壊の進展）について考察を行う。一例として供試体内での損傷度の進展を、図-7（ケース1）、図-8（ケース2）、および図-9（ケース3）に示す。損傷度とは、各有限要素内の現応力点での負荷曲面の強度パラメータ  $F_p$  と、破壊曲面の強度パラメータ（最大値  $\eta_1$ ）との比  $(F_p/\eta_1)$  で定義される。また、損傷度の進展図中の点「・」は、そのガウス点が軟化領域にあることを示している。

図-7は、ケース1（プリーディング層あり、端部拘束あり）に対する解析結果を示す。図より分かるように、端部拘束の影響により上下端部の破壊の進展が他より遅れ、供試体の中央部より破壊を始め、徐々に上下方向に進展していく。また、このケースではピーク以降の応力-ひずみ関係がほとんど得られなかったが、供試体内のガウス点情報を詳しく調べた結果、供試体中央部のガウス点では引張の等価拘束圧<sup>5)</sup>を受けていることが分かった。それゆえ、端部拘束の影響の少ない供試体の中央部では、非常に脆性

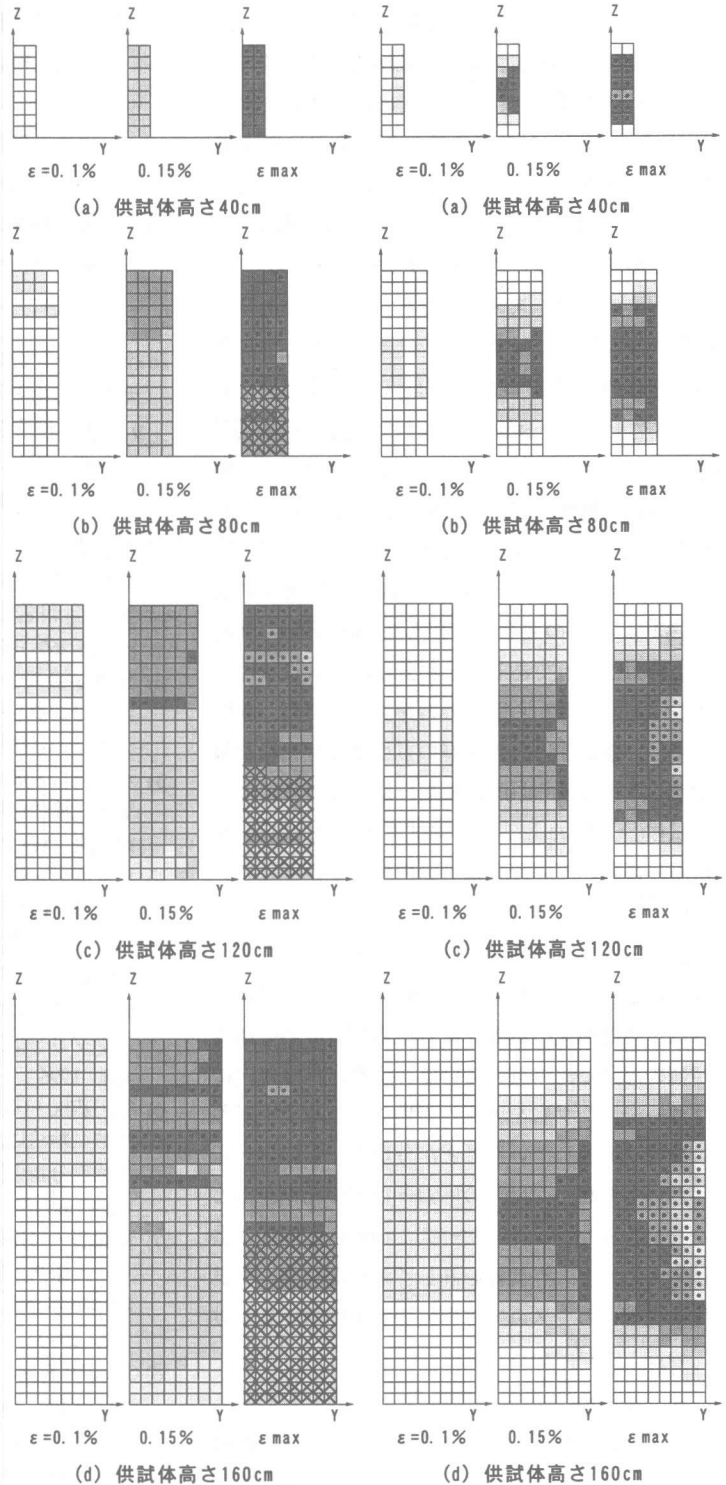


図-8 損傷度の進展図  
(ケース2 :  $H/D=2$ , 端部拘束なし, プリーディング層あり)

図-9 損傷度の進展図  
(ケース3 :  $H/D=2$ , 端部拘束あり, プリーディング層なし)

的な破壊（スナップバック現象）を起こしている、と解析結果より推測される。破壊の進展に及ぼす供試体寸法の影響として、寸法の小さい試験体(a)および(b)では、上下端の強度差が小さいため破壊はほぼ上下対称に進展していくが、寸法の大きい試験体(c)および(d)においては、上層（弱い層）寄りに破壊が進展していくことが分かる。

図-8は、ケース2（ブリーディング層あり、端部拘束なし）に対する解析結果を示す。供試体内の全体的な破壊進展の傾向として、端部拘束を行ってないため、供試体上部（弱い層）の破壊が他の部分に比べ早く進展することが分かる。しかし、最初に破壊が起こる部分は、上端部に近い一番弱い層内のガウス点ではなく、この弱い層（試験体(b)の場合）もしくは2番目に弱い層（試験体(c)および(d)の場合）と接している下側の層内の上部ガウス点であることが分かった。これは、隣接する弱い層から引張の力を受けるため、本解析では、逆に強い方の下層のガウス点が先に引張破壊したと考えられる。また、最大応力時には、供試体(b)、(c)および(d)の供試体下部の強い層（圧密層）において除荷挙動（図中の×印の部分）が起きていることが確認された。

図-9は、ケース3（ブリーディング層なし、端部拘束あり）に対する解析結果を示す。図によれば、端部拘束の影響により、端部の破壊の進展が他の部分に比べ遅れている。また、供試体内にブリーディング層を導入していないため上下対称の破壊が進展していることが分かる。このケースにおいてもピーク以降の応力-ひずみ関係がほとんど得られなかった。ケース1の場合と同様に供試体内のガウス点情報を詳しく調べた結果、供試体中央部のガウス点では引張の等価拘束圧を受けていることが分かった。

#### 4. まとめ

(1) プレーンコンクリートの三次元有限要素解析において、ブリーディング層の導入を行い、実験で見られる圧縮強度の低下の傾向（寸法効果）と定性的に一致することを確認した（図-4,5,6）。

(2) 通常の圧縮試験方法を想定し、端部拘束を与えた解析では、実験値に見られる一般的な傾向、すなわち供試体幅  $D$  が大きくなるにつれ圧縮強度の低下率が小さくなる傾向が得られた（図-6）。

(3) 端部拘束の有無およびブリーディング層の有無が、寸法の異なる供試体の破壊の進展状況に及ぼす影響を調べた（図-7,8,9）。

謝辞：本研究費の一部は、文部省ハイテクリサーチ構想による研究費（中部大学）、および平成9・10年度文部省科研費・基盤研究B(2)（研究代表者・谷川恭雄 名古屋大学大学院教授）によったことを付記する。

#### 参考文献

- 1) 破壊力学の応用研究委員会：破壊力学の応用研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，pp.215-269, 1993.5
- 2) 土木学会コンクリート委員会 寸法効果小委員会：コンクリートの寸法効果と引張軟化曲線，コンクリート技術シリーズNo.18, 土木学会, 1997.5
- 3) 水野英二・畑中重光：塑性理論によるコンクリートの圧縮軟化特性のモデル化，コンクリート工学論文集，Vol.2(2), pp.85-95, 1991
- 4) 水野英二・畑中重光：塑性理論によるコンクリートの経路依存型圧縮軟化特性のモデル化，コンクリート工学論文集，Vol.3(2), pp.1-13., 1992
- 5) 柴麻紀・前田欣昌・畑中重光・水野英二：ひずみ軟化を考慮したコンクリート構成モデルの開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.18(2), pp.401-406, 1996
- 6) 谷川恭雄・山田和夫・小阪義夫・熊谷茂：複合非破壊試験法によるコンクリートの打込み高さ方向の強度分布の推定，コンクリート工学年次論文集，Vol.3, pp.137-140, 1981
- 7) 和藤浩・村松昭夫・山口武志・畑中重光：コンクリート床スラブの真空脱水締固め工法の改善，日本建築学会東海支部研究報告集，Vol.37, pp.117-120, 1999
- 8) Chen, W. F. and Mizuno, E. : Nonlinear Analysis in Soil Mechanics, Elsevier, 1990
- 9) Zienkiewicz, O. C. : The Finite Element Method, Third Ed., (吉識・山田監訳：マトリックス有限要素法)，培風館，pp.672-796, 1984
- 10) Department of the Interior : Cement and Concrete Investigations, US Bureau of Reclamation, Boulder Canyon Project, Final Report, Part VII, Bulletin 4, 1965