

# 論文 大粒径ポーラスコンクリートの曲げ破壊性状に関する基礎的研究

前川 明弘<sup>\*1</sup>・畑中 重光<sup>\*2</sup>・三島 直生<sup>\*3</sup>・黒田 萌<sup>\*4</sup>

要旨：コンクリートがらを粗骨材とした大粒径ポーラスコンクリートの基礎的な強度性状の評価を目的として、同供試体の曲げ試験および二次元FEM解析を実施した。その結果、大粒径ポーラスコンクリートの曲げ強度は、一般的なポーラスコンクリートよりも小さく、その破壊は粗骨材であるコンクリートがらで発生していることが明らかとなった。また、製造方法の比較からは、浸漬手法に比べて吹付け手法の方が、応力が集中しやすいことや空隙率が大きくなるために曲げ強度が低下する傾向があることが確認できた。

キーワード：大粒径ポーラスコンクリート, コンクリートがら, 魚礁, 曲げ破壊, FEM解析

## 1. はじめに

本研究では、これまでに大粒径ポーラスコンクリート（以下、LPOCとする）の製造方法、空隙特性および魚礁に対する適用性に関する検討を行ってきた。その結果、高強度結合材をコンクリートがらに吹き付ける手法によりLPOCを形成することは可能で、イセエビなどに対する魚礁としても有効であることが確認できた<sup>1)</sup>。

LPOCの魚礁としての利用は、巨石積み魚礁と比較し、空隙径が安定して確保でき、漁業者の捕獲時における崩落事故の恐れがないといった利点がある。しかしながら、現時点ではその強度性状は不明であり、実用化のためには強度性状の把握が不可欠となる。

魚礁ブロック製品は、製造から運用までの期間を考慮すると運搬時に最も破壊の危険性が高いと考えられる。既報において、想定される製品の形状・寸法を再現し、図-1の方法で運搬した場合における有限要素法解析をおこなった結果、製品の下端で曲げ引張破壊する可能性が高いことが予測された<sup>2)</sup>。

そこで本報では、LPOCの基礎的な曲げ強度性状の評価を目的として、LPOC製供試体を用

いた曲げ試験および二次元FEM解析を行った。

## 2. 大粒径ポーラスコンクリートの製造方法

本研究では、既報<sup>1)</sup>において、表-1に示す吹付けによるLPOCの製造方法を検討してきた。その結果、粗骨材の下側に結合材が部分的に付着していないことを確認した。このため本報では、結合材の付着性状を一般的なポーラスコンクリートに近づけるため、浸漬による手法も併せて検討することとした。

## 3. コンクリートがらを使用した大粒径ポーラスコンクリート供試体の曲げ試験

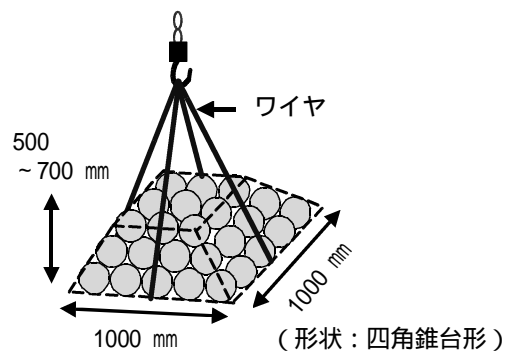


図-1 魚礁ブロックの形状・寸法および運搬方法

\*1 三重県科学技術振興センター工業研究部 主任研究員 (正会員)

\*2 三重大学工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

\*3 三重大学工学部建築学科 助手 博士(工学) (正会員)

\*4 三重大学工学部建築学科 学生

### 3.1 使用材料および結合材の調合

粗骨材には、特定の建築構造物の解体現場から発生した最大径100mmのコンクリートがらのみを使用した。コンクリートがらの圧縮強度は、コア抜きして 50mm×100mmに調整した8個の供試体により確認した。その結果、圧縮強度の平均値は22.4N/mm<sup>2</sup>であった。

結合材の調合は、水セメント比W/C=0.25、モルタル中の細骨材容積率s/m=0.35とし、フロー値FLを200または300に変化させた。結合材の使用材料および 50mm×100mmの円柱供試体による圧縮強度を表-2、表-3に示す。

### 3.2 大粒径ポーラスコンクリート供試体の作製

最大粒子径100mmのコンクリートがらを使用してLPOC供試体を作製し(図-2)、曲げ試験を行うことで破壊の状況を確認した。LPOCは、粗骨材を200×200×300[mm]の金網(5@100mm)製型枠内に設置して作製した。粗骨材の積み方は、1層あたり6個の3層積み(合計18個)とした。

吹付けによる作製は、1層ごとに吹き付け、吹付け量は1供試体当たり4リットルとした。浸漬の場合は、FL=300では粗骨材18個が入った金網型枠ごと一度に浸漬して作製した。FL=200では浸漬後、空隙が塞がれるため粗骨材を1つずつ浸漬させ型枠内に設置した。

脱型は24時間後に行い、14日間標準養生した。養生後、供試体を200×240×800[mm]の型枠中央部に設置し、両側を呼び強度18N(標準養生・材齢28日:21.6N/mm<sup>2</sup>、標準養生・材齢14日:18.0N/mm<sup>2</sup>)の普通コンクリートを充填することによりスパンを延長した。普通コンクリート打設時には、載荷スパン内にコンクリートが侵入しないよう空隙を粘土で塞いだ。得られた供試体は材齢28日となるまで湿布養生した。

### 3.3 測定方法

曲げ試験は載荷スパン200mmの三等分点載荷法とし、1水準につき3本の試験を行った。

空隙率はLPOCのみの状態の供試体を水中に沈めた時の水位の変化から容積を計測すること

表-1 LPOCの作製方法による比較

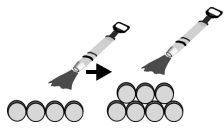
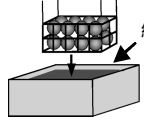
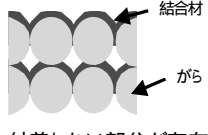

名称	吹付け <sup>1)</sup>	浸漬
製造方法	 結合材の吹き付け	 浸漬による付着
結合材の付着状況	 付着しない部分が存在	 全面に付着

表-2 結合材の使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度:3.17g/cm <sup>3</sup> 比表面積:3270cm <sup>3</sup> /g
細骨材	産地:三重県檜田川流域 表乾密度:2.61g/cm <sup>3</sup> 吸水率:1.48% 粗粒率:2.84
水	水道水
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤

表-3 結合材の圧縮強度\* [N/mm<sup>2</sup>]

材齢	FL		養生方法
	200	300	
14日	93.2	95.8	標準
28日	109.5	124.0	
		104.4	121.2

[注]\* JIS R5201に準拠, FL:モルタルフロー値

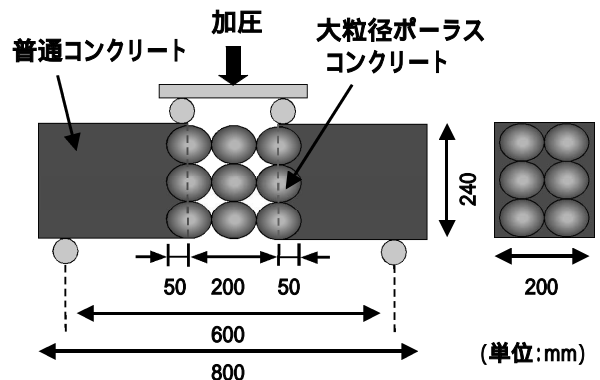


図-2 大粒径ポーラスコンクリートの曲げ供試体および試験方法の概要

により算出した。空隙を含めた容積はビニル袋に入れた状態の供試体で計測した。

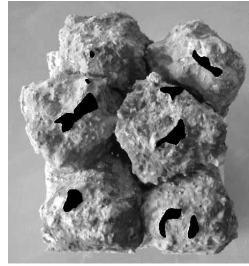
### 3.4 実験結果および考察

#### (1) 曲げ試験結果

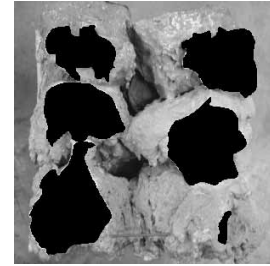
図-3に、LPOC供試体の空隙率と曲げ強度



(FL=200・浸漬，：破断面)  
(a) 破壊直後の様子



FL=300・浸漬  
(b) 破断面の厚さ (：画像処理による破断面)



FL=200・浸漬  
(b) 破断面の厚さ (：画像処理による破断面)

写真 - 1 曲げ供試体の破壊状況

(JIS A 1106に従い算出)との関係を示す。同図には、既往の研究<sup>3)~6)</sup>による通常粒径のポラスコンクリート供試体の曲げ強度も併示する。ただし、結合材に樹脂エマルジョン等の特殊混和剤を添加したものや、再生骨材を使用したものなど使用材料は統一されていない。

曲げ供試体の空隙率は、FL=300の場合30%前後の高空隙率であった。FL=200の場合には23~25%と少し小さくなったが、これは結合材付着厚さの影響によるものである。また、破壊はすべて載荷スパン内で発生していた [写真 - 1 (a)]

既往の研究結果と比較した結果、LPOCの曲げ強度は極端に小さいことが明らかとなった。この主な原因としては、以下の理由が考えられる。

- ) 粗骨材であるコンクリートがらの強度が低い。
- ) 粗骨材粒径が極端に大きく、断面の有効背が相対的に小さくなるとともに不均一性が増し応力およびひずみの集中がおこる。
- ) 本実験条件では、特に、断面積が極小となる結合部分が一直線上になるように粗骨材を配置してある。

製造方法の比較からは、吹付けの方がLPOCの空隙率が大きくなるために強度が下がる傾向となった。また、LPOCの曲げ強度が小さいことから、自重の影響が相対的に大きくなると思われる。本実験条件では、供試体の自重の影響は、最大曲げモーメントに対して、FL=300

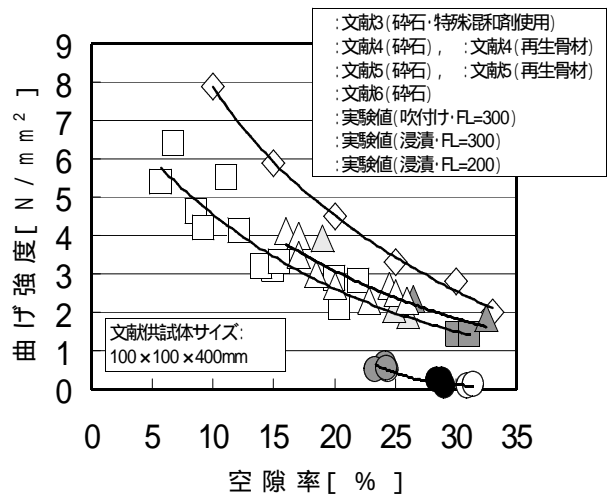


図 - 3 大粒径ポラスコンクリート供試体の曲げ強度と既往の研究との比較<sup>3)~6)</sup>

の吹付けで16.8%、FL=200の浸漬で3.6%となった。

(2) 画像処理による破断面積の計測および評価

曲げ供試体の破断面の例を写真 - 1(b)に示す。破断面の観察から、コンクリートがらにおける破壊(骨材破壊)が多く観察された。また、この結果から判断すると、コンクリートがらと結合材との付着性は良好で、結合材の強度および付着強度はコンクリートがらの品質と比較すれば充分大きいことが確認できた。

ここで、破断面をLPOCにおける最弱断面と仮定し、破断面の面積と曲げ強度との関係を検討した。破断面の面積は、破断面を色分けし、画像処理をおこなうことで計測した。

図 - 4に曲げ強度と破断総面積との関係を示す。破断総面積が大きくなると曲げ強度が大き

くなる傾向があり，両者の間には直線的な相関関係があることが確認できた。

4. 大粒径ポーラスコンクリートの曲げ破壊挙動に関する二次元FEM解析

本解析では，LPOCの曲げ破壊機構をより詳細に調べることを目的として，汎用FEMソフトDIANA<sup>7)</sup>を用いた二次元FEM解析をおこなった。

4.1 解析概要

(1) 供試体および検討ケース

解析対象は第3章で用いた曲げ供試体とし，コンクリートがらおよび結合材といった内包する材料の違いを再現するため，要素分割が容易な二次元解析とした。また，対称性を考慮して解析範囲を供試体の1/2とし，自重の影響は考慮していない。

要素分割を図-5に，検討ケースを表-4に示す。図-5に示すように，解析対象領域を縦48×横56の要素〔LPOC部分の1要素の大きさ：5×5(mm)〕に分割し，コンクリートがら，結合材，空隙および普通コンクリートの4種類を各要素に振り分けた。結合材厚さは，1要素分の5mmとした。

吹付けと浸漬の違いは，結合材要素をコンクリートがらの上面のみに配置するか全周に配置するかで再現した。このため，吹付けの方が空隙の量が多く，結合材の結合部面積は小さくなっている。

また，結合材とコンクリートがらおよび普通コンクリートの境界は完全付着とした。

供試体の対称面（図-5の一点鎖線）は対称

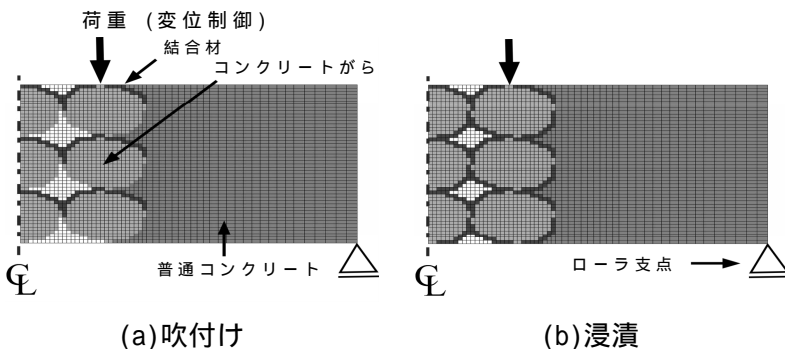


図-5 要素分割

性を考慮して水平方向の変位を拘束し，ローラ支点においては鉛直方向の変位を拘束した。載荷方法は，図-5の載荷点に鉛直方向の強制変位を0.01mm/stepのスピードで与え，最大で0.5mm(51step)まで与えた。

(2) コンクリートの構成モデル，破壊基準，および要素モデルの概要

本解析では，LPOCの降伏直前までの挙動のみを評価の対象としているため，図-6に示したようにコンクリートがらおよび結合材は完全弾塑性とした。また，普通コンクリート部はその破壊を考慮しないため弾性とした。

破壊基準は，下記に示すDrucker-Prager型の

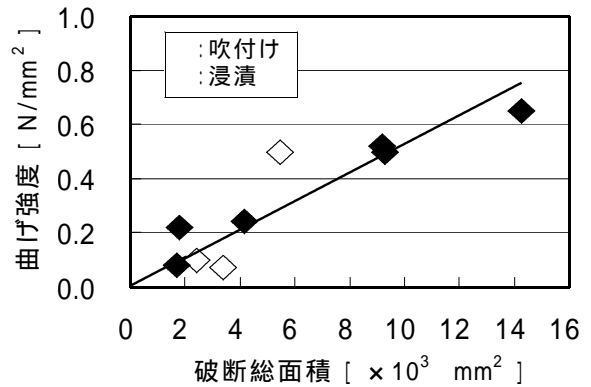


図-4 曲げ強度と破断総面積との関係

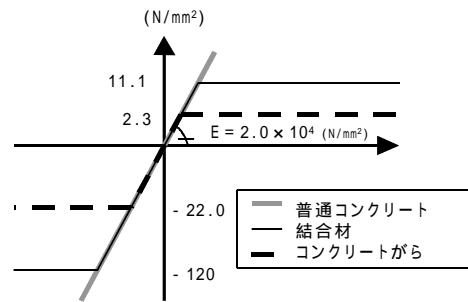


図-6 各材料の応力-ひずみ関係（引張り正）

表-4 検討ケース

製造方法	結合材要素の配置	空隙要素数	面積空隙率
吹付け	上半分のみ	174個	18.1%
浸漬	全面	90個	9.4%

破壊基準<sup>9)</sup>を用いた。

$$f(I_1, \sqrt{J_2}) = I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (1)$$

ここで,  $I_1$ : 応力の一次不変量,  
 $J_2$ : 偏差応力の二次不変量,  
 $= ( )$ ,  $k = k(C, )$ ,  
 $C = k(f_c, )$ ,  $C$  は表 - 5 参照

要素としては4節点ひずみ要素 (DIANAでの要素名: Q8EPS) を採用した。

(3) コンクリートがらおよび結合材の材料定数

表 - 5に, コンクリートがら, 結合材およびコンクリートの材料定数を示す。表 - 5では, 結合材モルタルの弾性係数をコンクリートがらの弾性係数と同じ値と仮定し<sup>9)</sup>, コンクリートがら要素の圧縮強度は, 第3章で使用したコンクリートがらの22.4 (N/mm<sup>2</sup>) から決定した。

また, 内部摩擦角  $\phi$  は, 引張強度  $f_t = f_c/10$  となるように53°と定めた。

#### 4.2 解析結果および考察

(1) 引張最大主応力分布

各供試体の要素が最初に降伏したstepの引張最大主応力分布および降伏した要素の位置を図 - 7に示す。同図の変形量は, 計算結果を300倍にして示し, 応力の値は引張を正とした。

吹付けは, 最下層のがらとがらの接点の上方に大きな引張最大主応力が分布しているが, 浸漬は, 最下層のがらとがらの接点の下方に大きな引張最大主応力が分布している。この差は, 結合材をコンクリートがらの上面にのみ配置したか, 結合材をがらの全面に配置したかによる違いであると考えられる。

降伏した要素は製造方法にかかわらずコンクリートがら要素であり, 吹付けで曲げ強度0.46 N/mm<sup>2</sup> (5ステップ), 浸漬で曲げ強度1.56N/mm<sup>2</sup> (12ステップ) となった。

(2) 偏差応力比分布

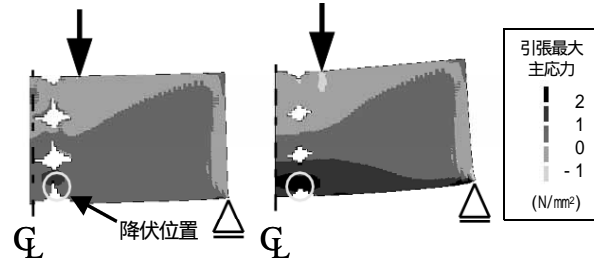
偏差応力比  $r$  を, 式(2)および図 - 8に示すように定義する。

$$r = \sqrt{J_{2A}} / \sqrt{J_{2B}} \quad (2)$$

ここで,  $J_{2A}$ : その時点における偏差応力の二次不変量  $J_2$ ,  $J_{2B}$ :  $I_{1A}$ の応力状態でそ

表 - 5 材料定数

	コンクリートがら	結合材	普通コンクリート
ヤング係数 $E$ (N/mm <sup>2</sup> )	$2.0 \times 10^4$	$2.0 \times 10^4$	$2.0 \times 10^4$
ポアソン比	0.2	0.2	0.2
密度 ( $\times 10^{-3}$ g/mm <sup>3</sup> )	2.4	2.3	2.4
圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	22	120	-
内部摩擦角 ( $^\circ$ )	53	53	-
引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	2.3	11.1	-
粘着力 $C$ (N/mm <sup>2</sup> )	3.68	20.1	-



(a)吹付け (b)浸漬

図 - 7 要素が最初に降伏したstepにおける引張最大主応力分布と降伏位置

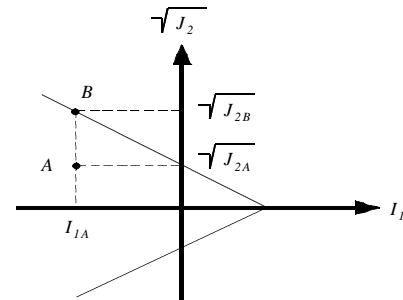


図 - 8 偏差応力度比の定義

の Gauss 積分点が降伏するときの  $J_2$  偏差応力比  $r$  を用いることで, 異なる降伏応力を持つ材料が混在した場合の, 応力上昇域における降伏状態の分布を視覚的に捉えることができる。偏差応力比  $r$  の分布を図 - 9に示す。

同図には, 要素が最初に降伏した時点(A)およびその拡大図(B)を示す。

吹付け, 浸漬どちらにおいても結合材要素の偏差応力比はコンクリートがらの偏差応力比に比べて低い。吹付け, 浸漬のいずれも降伏した要素付近が局部的に偏差応力比が高く, ある要素に降伏が集中しているが, 浸漬のほうが偏差応力比が分散する傾向となった。

以上に示した曲げ供試体に関する本解析によ

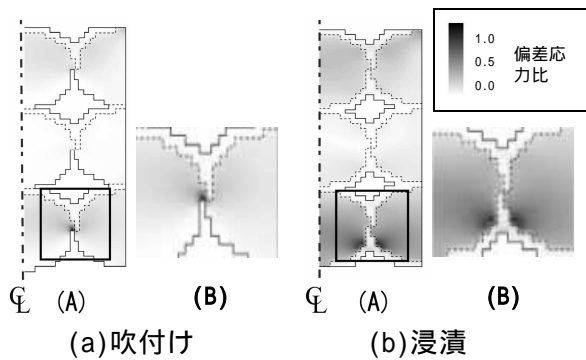


図 - 9 偏差応力比 の分布

[ (A):要素が最初に降伏した時点, (B):(A)の 部分の拡大図 ]

り、製造方法にかかわらずコンクリートがらの破壊が結合材破壊に先行する様子を再現できた。

## 5. まとめ

- 1) 大粒径ポーラスコンクリートの曲げ試験による破壊は、主にコンクリートがらによる破壊（骨材破壊）であり、結合材のコンクリートがらに対する付着強度は充分大きい。
- 2) 二次元FEM解析によれば、大粒径ポーラスコンクリートの曲げ破壊では骨材破壊が先行することが確認でき、実験の結果を再現できた。
- 3) 曲げ試験により、大粒径ポーラスコンクリートの曲げ強度は、一般的なポーラスコンクリートと比較して小さいことが明らかとなった。これは粗骨材であるコンクリートがらの強度が低いこと、および、粗骨材粒径が大きく、不均一性が大きいことなどに起因するものと考えられる。
- 4) 実験及び解析の結果より、吹付けと浸漬の製造方法の違いが大粒径ポーラスコンクリートの曲げ強度に及ぼす影響を比較すると、吹付け法では応力の分布が集中しやすいことや空隙率が大きくなるために、曲げ強度が低下する傾向が見られた。ただし、製造方法は製造条件や製品の大きさ、形状などを総合的に考慮し決定される必要がある。本研究の結果、コンクリートがらを利用した

大粒径ポーラスコンクリート単体では、魚礁として十分な強度が確保できない可能性が高い。

今後、空隙を確保したまま曲げ強度を増大させる方法として、底部の鉄筋補強などについて検討していく予定である。

## 謝辞

本解析に際し、吉田幸夫氏（三重大学大学院生）のご助力を得た。付記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 前川明弘, 畑中重光, 三島直生, 湯浅幸久: リサイクル型大粒径ポーラスコンクリートの製造および魚礁としての適用性に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第589号, pp.43-48, 2005
- 2) 黒田萌, 前川明弘, 吉田幸夫, 三島直生, 畑中重光: 大粒径ポーラスコンクリートを用いた魚礁ブロックの破壊性状に関する基礎的研究, 日本建学会東海支部研究報告集, 第43号, pp.121-124, 2005
- 3) 野田悦郎, 中原大磯, 梶尾聡, 市川勝俊: ポーラスコンクリートの車道舗装への適用に関する検討, 舗装36-4, pp.10-15, 2001
- 4) 大谷俊浩, 村上聖, 佐藤嘉昭, 三井宜之: 産業副産物を使用したポーラスコンクリートの力学的特性および耐久性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1431-1436, 2004
- 5) 音野琢也, 国枝稔, 吉川浩司, 六郷恵哲: 低品質再生骨材を用いたポーラスコンクリートの力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1149-1154, 2002
- 6) 吉田知弘, 国枝稔, 音野琢也, 六郷恵哲: 供試体形状に依存したポーラスコンクリートの曲げ強度, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1169-1174, 2003
- 7) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics: DIANA Finite Analysis User's Manual, TNO Building and Construction Reserch., 1999
- 8) W. F. Chen (色部誠, 河角誠, 安達洋賢訳): コンクリート構造物の塑性解析, 丸善, pp.216-233, 1985.7
- 9) 川上英男: 砕石コンクリートの弾性係数評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.303-308, 2002