

論文 ポーラスコンクリートの配合設計法に関する研究

梶尾 聡^{*1}・宇治 公隆^{*2}・國府 勝郎^{*3}

要旨：7号砕石および細骨材を用いた透水性舗装用ポーラスコンクリートを対象とした配合設計法の確立を目的として、配合条件がポーラスコンクリートの締固め性および曲げ強度に及ぼす影響について実験的検討を行った。その結果、水結合材比を小さく、ペースト細骨材空隙比および単位粗骨材かさ容積を大きくすると高い曲げ強度が得られることを明らかにした。また、フルコンパクション状態における空隙率は、ペースト細骨材空隙比およびモルタル粗骨材空隙比の関係式で近似できることを示し、曲げ強度が確保できるペースト細骨材空隙比および目標空隙率を用いて、単位粗骨材かさ容積を決定する配合設計法を提案した。
キーワード：ポーラスコンクリート、配合設計、単位粗骨材かさ容積、空隙率、曲げ強度

1. はじめに

環境負荷低減を目的とするエコマテリアルの一つであるポーラスコンクリート（以下、POC）は、多種多様な用途に適用され、研究が盛んに行われている¹⁾。しかしながら、現状では POC の配合設計・製造方法およびフレッシュ時の管理方法は、各研究者が独自の方法で行っており、それらの技術は確立されるには至っていない。委員会報告¹⁾による POC の配合計算の手順として、粗骨材量の設定方法は、粗骨材の実積率に補正係数²⁾を乗じる方法が提案されており、一般的な³⁾の値として 0.95～0.98 が示されている。また、POC のフレッシュ性状を評価する方法としては、マーシャル法²⁾、VC 試験³⁾および沈下法⁴⁾などの締固め性で評価する方法や、ペーストやモルタルの流動性⁵⁾、ペースト落下量⁶⁾、ペースト面積占有⁷⁾およびモルタル付着量⁸⁾などバインダーの性状で評価する方法が報告されている。既往の文献では細骨材を使用しないケースが多いが、細骨材を用いることでダレの抑制、乾燥収縮量の低減、乾湿繰り返しに対する耐久性の向上が明らかとなっており、委員会報告では可能な限り混入することが望ましいとされて

いる。

舗装用途では、透水性舗装用コンクリートとしては歩道・景観系舗装から車道まで幅広く適用されている。また、舗装用途では歩行性や走行性を重視し、粒径が小さい7号砕石（5mm-2.5mm）が使用されるケースが多い。

本報は舗装用 POC を対象とした配合設計法の確立を目的とし、骨材として7号砕石を用い、細骨材を混入した POC の配合条件とフレッシュ時の締固め性および曲げ強度の関係を求め、対象とした POC の配合設計法を提案するものである。

2. 実験概要

実験はモルタル粗骨材空隙比（ K_m ）、ペースト細骨材空隙比（ K_p ）⁹⁾および水結合材比（ W/P ）を変化させた際の POC のフレッシュ性状および強度特性を確認することを目的とした。表 - 1 に実験水準を示す。

2.1 使用材料

表 - 2 に使用材料を示す。細骨材はコンクリート用細骨材（陸砂）、道路用単粒度砕石7号（最大骨材寸法 5mm）を本論文では粗骨材として扱

*1 太平洋セメント（株）中央研究所研究開発部主任研究員（正会員）

*2 首都大学東京 都市環境学部都市環境学科准教授 工博（正会員）

*3 首都大学東京 都市環境学部都市環境学科教授 工博（正会員）

っている。

2.2 ポーラスコンクリートの配合

実験時の配合条件は単位粗骨材かさ容積を $1\text{m}^3/\text{m}^3$ ，混和材添加率を結合材量 $(P=C+Ad) \times 3\%$ に固定した。表 - 3 および 4 に実験を行った配合の一部として， K_m または W/P を変化させた POC の配合を示す。設計空隙率 V_m は，単位粗骨材かさ容積が $1\text{m}^3/\text{m}^3$ であることから，式(1)に示すように粗骨材の実積率 G_g と K_m により求める理論空隙率である。

$$V_m = (1 - G_g)(1 - K_m) \quad (1)$$

ここに， V_m ：設計空隙率

G_g ：粗骨材の実積率

K_m ：モルタル粗骨材空隙比

2.3 ポーラスコンクリートの練混ぜ方法

POC の練混ぜは二軸強制練りミキサを用い，粗骨材および細骨材，セメントおよび混和材をミキサに投入し 15 秒間空練りを行った後，水を投入して 5 分間練り混ぜた。

2.4 フレッシュ時の締固め性評価試験

フレッシュ時の締固め性を評価する試験方法として，図 - 1 に示す沈下法による空隙率（空隙指標値）⁴⁾の測定を行った。振動テーブルは振動数 3000rpm，起振力 823N のものを用いた。試験方法は $10 \times 20\text{cm}$ 鋼製型枠に計量した 2.60kg の試料を投入し，4kg の錘を載せて振動をかけた後の試料高さを測定する。空隙指標値は同等な振動エネルギーを与えた際の POC の残存空隙率

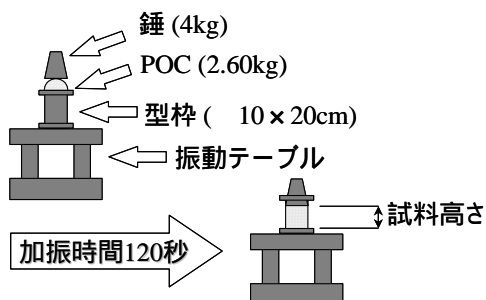


図 - 1 空隙指標値測定方法（沈下法）

を示し，所要振動時間は，ほぼフルコンパクション状態となる 120 秒間とした。空隙指標値 V_t は式(2)を用いて算出した。

表 - 1 実験水準

水結合材比 (W/P)	ペースト細骨材空隙比(K_p)	モルタル粗骨材空隙比(K_m)
25%	1.0	0.75 ~ 1.13
	2.0	0.62 ~ 0.96
	5.0	0.51 ~ 0.96
	7.5	0.45 ~ 0.85
	8.0	0.65
30%	2.0, 5.0	0.73
35%		
40%	5.0	

表 - 2 使用材料

種類	特性および品質
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度： $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
混和材 (Ad)	無機系特殊混和材 密度： $2.16\text{g}/\text{cm}^3$
水(W)	水道水
細骨材 (S)	表乾密度： $2.59\text{g}/\text{cm}^3$ ，吸水率 1.06% 実積率：66.9%，粗粒率：2.51 単位容積質量： $1715\text{kg}/\text{m}^3$
粗骨材 (G)	単粒度碎石 S-5，吸水率 1.04% 実積率：57.2%，表乾密度： $2.63\text{g}/\text{cm}^3$ 単位容積質量： $1489\text{kg}/\text{m}^3$

表 - 3 配合例 1 ($K_p=7.5$ ， $W/P=25\%$)

K_m	K_p	W/P (%)	V_m (%)	単位質量 (kg/m^3)				
				W	C	Ad	S	G
0.45	7.5	25	23.5	66	258	8	106	1504
0.55			19.3	81	315	10	129	
0.65			15.0	96	372	12	153	
0.75			10.7	111	430	13	176	
0.85			6.4	126	487	15	200	

表 - 4 配合例 2 ($K_p=5.0$ ， $K_m=0.73$)

K_m	K_p	W/P (%)	V_m (%)	単位質量 (kg/m^3)				
				W	C	Ad	S	G
0.73	5.0	25	11.6	97	378	12	233	1504
		30		108	348	11		
		35		116	322	10		
		40		123	299	9		

$$Vt = 1 - \frac{W}{V \times T} \quad (2)$$

ここに、 Vt ：空隙指標値

W ：試料の質量（2600g）

V ：試料の体積（ cm^3 ）

T ：空気が全くないものとして計算した POC の単位体積質量（ t/m^3 ）

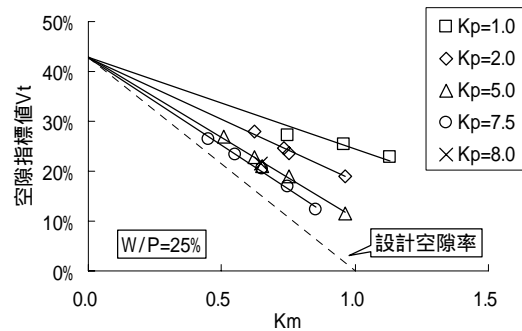


図 - 2 空隙指標値と Km の関係

表 - 5 一次回帰分析結果

Kp	1.0	2.0	5.0	7.5
傾き α_1	0.184	0.248	0.324	0.352
R^2	0.6165	0.9814	0.9902	0.9935

2.5 強度試験

(1) 試験体の作製方法

試験体の目標空隙率は 25%、20%とした。試験体は目標空隙率となるように試料を量りとり、JCI-SPO1-1(ポラスコンクリートの供試体の作り方(案))¹⁰⁾に準じて行った。試験体寸法は $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ とした。

(2) 試験体の空隙率測定方法

硬化後の POC 試験体の全空隙率(試験体空隙率)は、JCI-SPO2-1(ポラスコンクリートの空隙率試験方法(案))¹⁰⁾の質量法に準じて行った。ただし、粗骨材粒径が小さいことから、空隙径が小さく、試験体内の水が抜け切らなかったため、試験体の気中質量は試験体作製時の計量値を用いた。

(3) 曲げ強度試験

曲げ強度試験は JIS A 1106 に準じて行った。試験体は材齢 2 日で脱型した後、20 水中で試験に供するまで養生した。試験材齢は 7 日、28 日とした。

と考え、一次回帰分析を行い、式(3)に示す一次回帰式を求めた。

$$Vt = -\alpha_1 \times Km + (1 - Gg) \quad (3)$$

ここに、 Gg ：粗骨材の実積率 (=0.572)

表 - 5 に一次回帰分析による求められた α_1 および相関係数 R^2 を示す。 Kp が小さいほど α_1 は小さくなることから、細骨材量が多くなると締固め性は低下する。図 3 に示すように空隙指標値は設計空隙率と同等となることが理想であるが、実際には図 4 に示すように Km を大きくするほど粗骨材粒子間に細骨材等が介在しやすくなり、フルコンパクション状態でも粗骨材単体の物理試験の状態よりも見掛けのかさ容

3. 結果と考察

3.1 フレッシュ時の締固め性

(1) Km および Kp の影響

図 2 に $W/P=25\%$ とした POC の空隙指標値 Vt と Km の関係を示す。ここで、理論上の $Km=0$ は粗骨材単体を示し、空隙指標値は粗骨材が形成する空隙、すなわち $(1 - \text{粗骨材の実積率})$ となる。よって、 Km と空隙指標値の関係は図 2 に示すような線形関係である

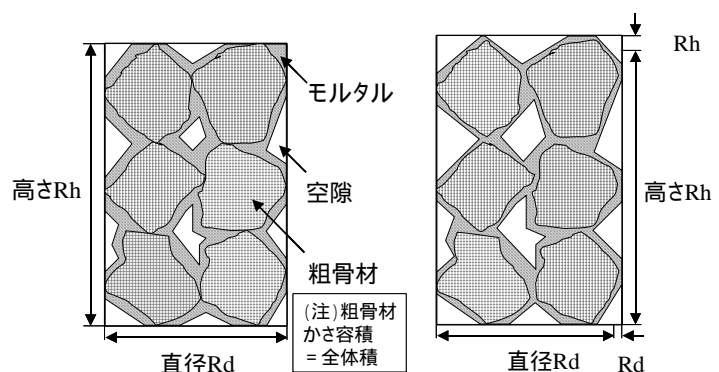


図 - 3 理想状態

図 - 4 実際の状態

積が大きくなるため、空隙指標値の方が大きくなったと考えられる。また、空隙指標値は、 K_p を小さくするほど設計空隙率と乖離する傾向を示した。図 5 に V_t と K_p の関係を示す。ここで、 K_p が無限大、すなわち細骨材が無混合の条件では理想状態となると仮定すると、単位粗骨材かさ容積は $1.0\text{m}^3/\text{m}^3$ となることから、 V_t は (1-粗骨材の実積率) に近似することとなる。よって、 V_t と K_p の関係式は漸近線 $V_t=1-Gg$ である式(4)に示す分数関数として回帰分析を行った。この結果、 $\alpha_2=-34.00$ 、 $\beta_2=6.799$ 、 $R^2=0.9930$ となる相関性の高い関係式が得られた。ここで、式(4)を式(3)に代入した式(5)より、骨材物性値である粗骨材の実積率、配合条件である K_m および K_p を用いて空隙指標値を推定できる式が得られた。

$$\alpha_1 = (1 - Gg) \left\{ \frac{\alpha_2}{(Kp + \beta_2)^2} + 1 \right\} \quad (4)$$

$$Vc = (1 - Gg) \left[1 - \left\{ \frac{\alpha_2}{(Kp + \beta_2)^2} + 1 \right\} Km \right] \quad (5)$$

ここに、 Vc ：配合から求める空隙率

α_2 、 β_2 ：実験定数

図 6 に、式(5)より求めた空隙率 Vc と実験から得られた空隙指標値の関係を示す。 Vc は空隙指標値を $\pm 1.5\%$ の範囲で精度良く推測できることが確認されたことから、式(5)は空隙指標値、すなわちフルコンパクション状態となる空隙率の推定式として妥当であると考えられる。

(2) 単位粗骨材かさ容積の影響

初期の単位粗骨材かさ容積は理想状態である $1\text{m}^3/\text{m}^3$ とした。しかし、図 4 に示すように実際の単位粗骨材かさ容積は理想状態とはなっておらず、この状態における単位粗骨材かさ容積は式(6)で求めることができる。ここで、式(6)の

空隙率 V に式(5)を代入することにより K_m および K_p から単位粗骨材かさ容積を求めることができる。

$$Rg = \frac{1 - V}{1 - (1 - Km)(1 - Gg)} \quad (6)$$

ここに、 Rg ：単位粗骨材かさ容積

図 7 に K_m および K_p より求めた単位粗骨材かさ容積を示す。単位粗骨材かさ容積は K_m が $0.5 \sim 1.0$ の範囲内では、 $K_p=7.5$ で $Rg=0.93 \sim 0.95$ 、 $K_p=5$ で $Rg=0.90 \sim 0.93$ 、 $K_p=2$ で $Rg=0.81 \sim 0.88$ 、

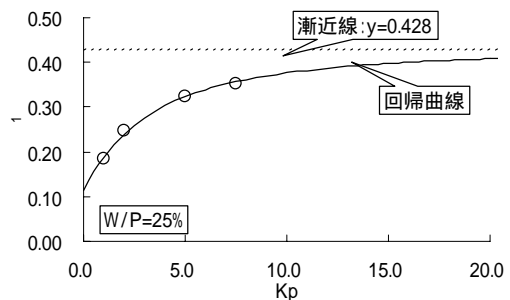


図 - 5 V_t と K_p の関係

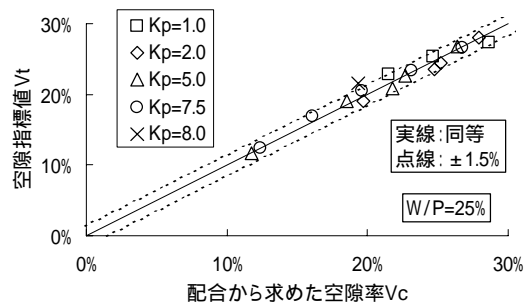


図 - 6 配合から求めた空隙率

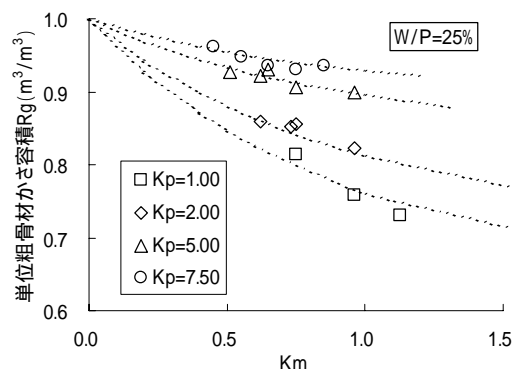


図 - 7 V_t から求めた単位粗骨材かさ容積

$K_p=1$ で $R_g=0.76\sim 0.85$ であった。 R_g は、 K_p が大きくなると変動が小さくなり、式(5)を求めた仮定より K_p を無限大とすると 1.0 に近似する。

(3) 水結合材比の影響

図 8 に空隙指標値 V_t と水結合材比 W/P の関係を示す。 W/P が 25% ~ 40% の範囲では、空隙指標値の変動は小さく、ほぼ同等な結果であった。この結果は本報告における最小 W/P は 25% としており、このときのペーストの 0 打フロー値 (JIS R 5201 参考) が 319mm と非常に流動性が高いものであり、ペーストが POC の締固め性に及ぼす影響が小さかったためと考えられる。

3.2 強度特性

図 9 に $W/P=25\%$ および目標空隙率 25% とした POC の材齢 7 日の曲げ強度試験結果を示す。図中に空隙指標値 V_t が 25% となる水準の曲げ強度を各 K_p ごとに近傍の結果より直線回帰して求めた結果を示す。 K_p が 2.0 ~ 7.5 の範囲では、空隙指標値が同等となる配合条件における曲げ強度は K_p が大きいほど漸増し、 $K_p=1.0$ は著しく低い結果であった。曲げ強度が漸増した理由は、 K_p が大きいほどモルタル強度が大きくなると考えられること、単位粗骨材かさ容積が大きくなり粗骨材間隔が小さくなったことなどが考えられる。

図 10 に結合材水比と材齢 7 日の曲げ強度試験結果を示す。図中の「2.0-V25」は $K_p=2.0$ 、試験体空隙率 25% を示し、目標空隙率は各配合の

空隙指標値とほぼ同等とした。POC の曲げ強度は P/W とほぼ線形関係にあり、 K_p が大きく、空隙率が小さいほど傾きが大きく、ペースト強度の影響を受けやすい。よって、曲げ強度を確保するためには、できるだけ W/P を小さくし、 K_p および単位粗骨材かさ容積を大きくするとよい。

図 11 に材齢 7 日と材齢 28 日の曲げ強度の関係を示す。材齢 7 日から材齢 28 日までの曲げ強度の伸び率は約 15% であり、配合の違いが強度の伸び率に及ぼす影響は小さく、材齢 7 日の強度で検討された結果が材齢 28 日の強度に反映されるものと考えられる。

4. 配合設計法の提案

ポーラスコンクリートの条件として、設計空隙率 V および目標曲げ強度を設定する。強度を確保するために、できるだけ W/P は小さく、 K_p は大きく設定するが、細骨材量は耐久性に影響

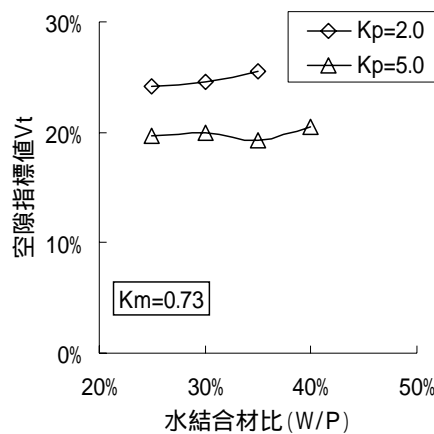


図 - 8 空隙指標値と W/P の関係

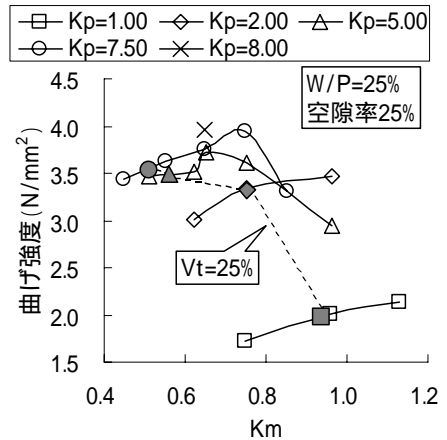


図 - 9 材齢 7 日の曲げ強度

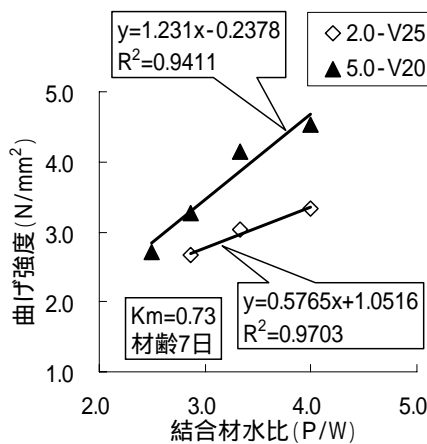


図 - 10 W/P と曲げ強度の関係

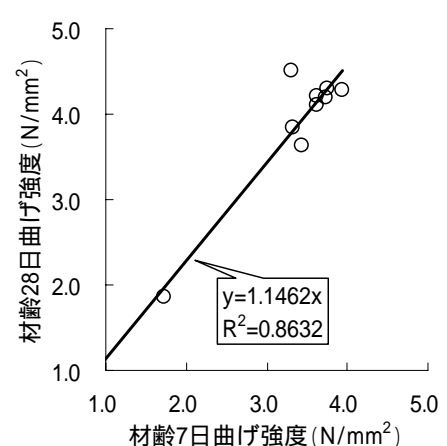


図 - 11 曲げ強度の伸び

を及ぼすことが報告されており¹⁾、 K_p を設定する際には、これに留意する必要がある。次に、式(5)より逆算により導いた式(7)より K_m を求め、式(6)に代入することにより得られる式(8)を用いて、設計空隙率、粗骨材の実積率および K_p より単位粗骨材かさ容積を求める。 K_m は式(7)もしくは単位粗骨材かさ容積と空隙率により求まる。

$$K_m = \frac{1 - Gg - \frac{\alpha_2}{(K_p + \beta_2)^2}}{(1 - Gg) \left(1 + \frac{\alpha_2}{(K_p + \beta_2)^2} \right)} \quad (7)$$

$$Rg = \frac{(1 - V) \left\{ 1 + \frac{\alpha_2}{(K_p + \beta_2)^2} \right\}}{1 - V + Gg \times \frac{\alpha_2}{(K_p + \beta_2)^2}} \quad (8)$$

ポーラスコンクリートは数値で評価し難い高さ方向の空隙分布や空隙閉塞などの目視評価も重要な評価項目であり、試し練りによる配合補正が必要である。配合補正は、モルタルの流動性を調整する場合は W/P や K_p を変えればよく、 K_p を変えた場合には式(8)により単位粗骨材かさ容積も補正する。また、空隙率を微調整する場合には K_m で調整すればよく、図 2 より K_p が 5 以上であれば空隙率 1% の増減に対し K_m は 0.03 を減増、 K_p が 5 未満では 0.04 ~ 0.06 減増すればよいものと考えられる。

5. まとめ

ポーラスコンクリートの配合設計において重要な目標値は空隙率と強度であり、透水性能や騒音低減効果などの付加性能は空隙率で代替評価されることが多い。配合条件が空隙率と強度に及ぼす影響について、実験的検討を行い、以下のことが明らかとなった。

(1) フルコンパクション状態における空隙率は、粗骨材の実積率、モルタル粗骨材空隙比およびペースト細骨材空隙比を用いた関係式に

より求めることができる。

- (2) ポーラスコンクリートの曲げ強度を確保するためには、できるだけ水結合材比を小さく、ペースト細骨材空隙比や単位粗骨材かさ容積は大きくするのがよい。
- (3) 目標空隙率や強度を得るために設定した水結合材比およびペースト細骨材空隙比より、単位粗骨材かさ容積を求めるポーラスコンクリートの配合設計法を提案した。

参考文献

- 1) ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告：日本コンクリート工学協会，2003.5
- 2) 関口修ほか：ポーラスコンクリートの歩道および車道への適用，舗装，Vol.36，No.4，pp.16-21，2001.4
- 3) 羽生賢一ほか：ポーラスコンクリートの振動締固め特性に関する一考察，第 56 回セメント技術大会講演要旨，pp.310-311，2002
- 4) 渡辺治郎ほか：透・排水性舗装用コンクリートのコンシステンシーに関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.52，pp.798-803，1998
- 5) 湯浅幸久ほか：ポーラスコンクリートの製造方法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，pp.235-240，1999
- 6) 片平博ほか：ポーラスコンクリートのフレッシュ性状判定法の検討，土木技術資料，41-9，pp.56-61，1999
- 7) 湯浅幸久ほか：セメントペーストの流動性がポーラスコンクリートの振動締固め性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.133-138，2001
- 8) 田中博一ほか：ポーラスコンクリートのフレッシュ時における品質管理方法，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.127-132，2001
- 9) 國府勝郎ほか：締固め仕事量に基づく超硬練りコンクリートの配合設計，土木学会論文集，No.532，V-30，pp.109-118，1996.2
- 10) JCI 規準集（1977~2002 年度），日本コンクリート工学協会，2004.4