

# 論文 ポーラスコンクリートモデル供試体の圧縮強度とその理論に関する研究

村上 聖\*<sup>1</sup>・大谷 俊浩\*<sup>2</sup>・三井 宜之\*<sup>3</sup>・平居 孝之\*<sup>4</sup>

**要旨**：本報では、ポーラスコンクリートにおける所要の圧縮強度を得るための調合設計に資する圧縮強度理論の構築を目的に、アルミナボールおよびガラスビーズのような理想球体骨材を用いたポーラスコンクリートモデル供試体を作製し、圧縮強度に及ぼす空隙率、球径および水セメント比の影響について実験的検討を行った。また、骨材のブリッジ効果を考慮したトラスモデルによる圧縮強度理論と実験結果との対応について考察した。

**キーワード**：ポーラスコンクリート、理想球体、圧縮強度、トラスモデル

## 1. はじめに

ポーラスコンクリートは、環境負荷低減および生物対応型エココンクリートとして土木分野だけでなく建築分野においても近年注目されている。しかし、ポーラスコンクリートの設計・製造・施工法、力学的・物理的・化学的な基礎物性、応用分野ならびに新たな用途開発などに関しては、個々の研究機関で精力的に研究が進められているが、ポーラスコンクリートの強度性状一つをとってみても理論体系が十分に確立されているとは言えないのが現状である。

著者らも、これまでにポーラスコンクリートの基礎的性状に関して実験的検討を行い、圧縮強度に及ぼす影響因子や乾湿繰返し促進暴露試験による耐久性状について報告している<sup>1)</sup>。その結果として、ポーラスコンクリートの圧縮強度は、空隙率、水セメント比および骨材強度（人工軽量骨材）に大きく影響されるが、粗骨材粒径の影響は小さいことなどを示した。しかし、水セメント比や粗骨材粒径の影響に関しては、本実験結果と異なる傾向を示唆する既往の研究もみられ、ポーラスコンクリートの圧縮強度に関する理論体系が設計法の確立のために重要な

検討課題であると考えられる。

そこで、本報では、理想球体のアルミナボールとガラスビーズを骨材として用いて作製したポーラスコンクリートモデル供試体の圧縮強度試験を行い、空隙率、球径および水セメント比が圧縮強度に及ぼす影響について実験的検討を行うとともに、骨材のブリッジ効果を考慮したトラスモデルによる圧縮強度理論との対応について考察した。

## 2. 実験方法

### 2.1 本実験の使用材料

表-1 にポーラスコンクリートモデル供試体の作製に用いた使用材料を示す。セメントには、

表-1 使用材料

セメント	高炉セメント B 種 密度=3.03g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	アルミナボール 密度=3.68g/cm <sup>3</sup> 球径=φ 5,10,15,20mm
	ガラスビーズ 密度=2.53 g/cm <sup>3</sup> 球径=φ 15mm
混和剤	高性能 AE 減水剤

\*1 熊本大学大学院助教 自然科学研究科環境共生科学専攻 工博 (正会員)

\*2 大分大学助手 工学部福祉環境工学科 工修 (正会員)

\*3 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 工博 (正会員)

\*4 日本文理大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

緑化コンクリートを想定し、高炉セメントB種を用いた。粗骨材には、理想球体のアルミナボールおよびガラスビーズを用い、アルミナボールの球径は、 $\phi 5, 10, 15, 20\text{mm}$ の4種類、ガラスビーズの球径は、 $\phi 15\text{mm}$ の1種類とした。なお、アルミナボールおよびガラスビーズの密度は、JIS A 1110「粗骨材の密度および吸水率試験方法」に準拠して求め、それぞれ  $3.68\text{g/cm}^3$  および  $2.53\text{g/cm}^3$  であった。

## 2.2 本実験の使用調合

### (1) 実積率の測定

ポーラスコンクリートの調合設計は、JIS A 1104「骨材の単位容積質量試験」による粗骨材の実積率に基づいて算定される。しかし、JISに規定の鋼製円筒容器と圧縮強度試験用円柱型枠の寸法が異なるために、目標空隙率と実際の空隙率は異なり、特に粗骨材粒径が大きい場合にはその影響も大きくなることが知られている。この影響はせき板効果と呼ばれ、型枠側面での骨材配列の乱れに起因するものである。そこで、ここでは、JISに規定の鋼製円筒容器と各種直径の円筒容器を用いて、アルミナボールのすべての球径について実積率を測定した。その結果を図-1に示す。図より、球径に対する容器直径の比が大きくなるほど、実積率は増加し、その関係は球径によらずほぼ同一曲線上に乗るこ

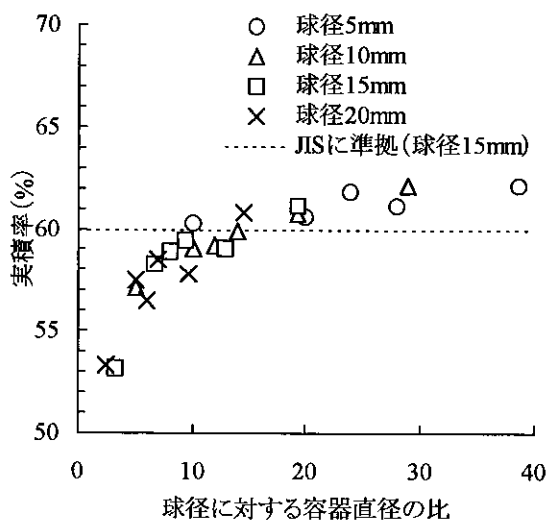


図-1 球径・容器直径比と実積率の関係

とが分かる。また、既往の研究<sup>2)</sup>では、等球径粒子の充填形式は、立方格子および斜方格子配列の混合系として近似できるとしているが、球径に対する容器直径の比が大きい範囲では、実積率の測定値は斜方格子配列の実積率の理論値を超えており（立方格子および斜方格子配列の実積率の理論値は、それぞれ 52.4%および 60.5%）、前述のせき板効果により実際の空隙率が理論値よりも常に小さくなることを考えれば、立方格子および斜方格子以外の配列を想定するのが妥当であると考えられる。いま、体心立方格子配列を想定すると、その実積率の理論値は 68.0%となり、体心立方格子配列も充填形式に関与していることが十分に予想される。後述のトラスモデルによる圧縮強度理論では、格子配列の違いについて考察する。

### (2) 使用調合

表-2に使用調合を示す。空隙率は 20, 25, 30%の3水準、水セメント比は 25, 30, 35%の3水準とし、球径、空隙率および水セメント比の組合せは表中に示すとおりである。なお、本実験では、空隙率が一定の条件で球径が圧縮強度に及ぼす影響を調べることを目的に、供試体における実際の空隙率と目標空隙率との間に球径の違いによる変動が生じないようにするために、ポーラスコンクリートモデル供試体の作製

表-2 使用調合

球径 (mm)	実積率 (%)	空隙率 (%)	W/C (%)
$\phi 5$	60.6	20	25
		25	
		30	
$\phi 10$	59.0	20	25
		25	
		30	
$\phi 15$	58.3	20	25
		25	25
			30
			35
		30	25
$\phi 20$	57.5	20	25
		25	
		30	

に用いた  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱型枠で測定した実積率を用いて、所要の空隙率を得るための調合設計を行った。

### 2.3 供試体の作製

ポーラスコンクリートの混練方法は、容量 5l のモルタルミキサーによりプレミックスしたセメントペーストを練り鉢に移し、アルミナボールおよびガラスビーズ表面にセメントペーストが十分に絡むように手練りを行った。なお、セメントペーストのフロー値は、約 200 になるように混練具合に応じて高性能 AE 減水剤を後添

加した。圧縮強度試験には、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$  円柱供試体を各 1 個ずつ作製し、標準養生材齢 28 日後圧縮強度試験に供した。なお、締め固めには突き棒と木づちを用いた。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 圧縮破壊性状

写真-1 に、代表的なポーラスコンクリートモデル供試体の圧縮破壊性状を示す。アルミナボールおよびガラスビーズともに骨材に割裂破壊を生じた供試体はみられず、横方向の膨張か



写真-1 ポーラスコンクリートモデル供試体の圧縮破壊性状

ら局部的に表面の球体がはじけるか、あるいは崩れるように破壊した。壊れ方は、球径が小さいものほど、水セメント比が小さいほど、また空隙率が小さいほど、局部的で激しかった。その逆では、全体が崩れるように破壊した。

### 3.2 圧縮強度試験結果

図-2 に圧縮強度試験結果を示す。全体的な傾向として、空隙率の増加とともに圧縮強度は低下すること、球径が小さくなるほど圧縮強度は増加し、その程度は空隙率が小さいものほど大きくなること、セメント水比と圧縮強度の間には普通コンクリートの場合と同様にほぼ比例的な関係が得られることが分かる。また、アルミナボールおよびガラスビーズともに割裂破壊を生じなかったために、球径、空隙率および水セメント比が同一の場合、両者の圧縮強度に大きな差異はみられなかった。砕石を用いたポーラスコンクリートの場合、骨材の割裂破壊を生じることが多いが、本実験で使用したアルミナボールの強度のカタログ値は 9.8GPa と非常に高強度であり、ガラスビーズも予想以上に高強度であったものと思われる。従って、本実験結果は骨材強度が十分に大きい場合に対応するポーラスコンクリートの圧縮強度データを提供するものと考えられる。

## 4. トラスモデルによる圧縮強度理論と実験結果との対応

### 4.1 トラスモデルによる圧縮強度理論

トラスモデルは、粗骨材間のブリッジ効果による応力伝達をマクロ的にトラス機構と捉え、コンクリートの圧縮強度を理論的に扱うのに簡便なモデルである<sup>3)</sup>。他にも、個別要素法、粘塑性サスペンション要素法、ラチスモデルなどポーラスコンクリートの強度理論に適用可能な理論モデルがあるが、解析に数値解析を必要とし、剛体としてモデル化される骨材間をリンクするバネあるいはサスペンション要素の構成方程式が別個に要求される。ここでは、理想球体の骨材の配列の違いが圧縮強度に及ぼす影響に

関して考察することを目的に、本実験のポーラスコンクリートモデル供試体の圧縮強度試験結果を定性的に説明する手段として簡易なトラスモデルを利用することにした。

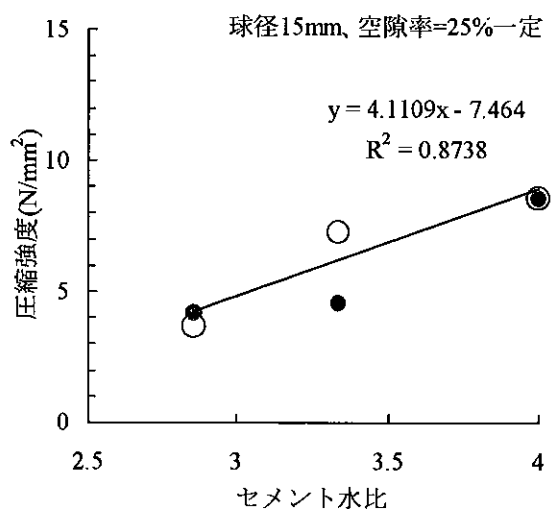
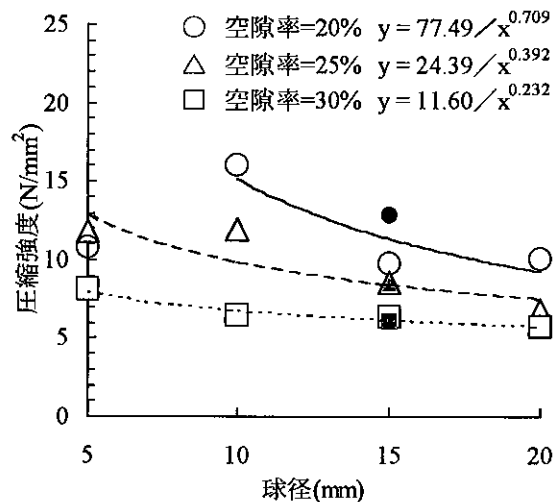
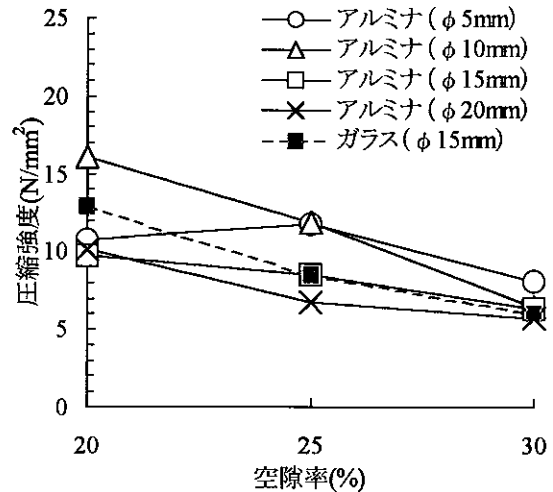


図-2 圧縮強度試験結果

ポーラスコンクリートの場合には、粗骨材間の応力伝達の様相は、その骨材配列に直接依存する。図-3に、トラスモデルによる立方、斜方および体心立方格子配列における応力伝達の様相を示す。

立方格子配列の場合、縦並列の球体の座屈がないとすれば、破壊形式は球体の割裂破壊となるので、次式に示すように圧縮強度は球体の割裂引張強度のみに比例し、球径やセメントペースト強度には依存しないことになる。これは、本実験結果の傾向と矛盾し、局所的に立方格子配列が形成されたとしても圧縮強度を支配する要因にはならないものと推察される。

$$\begin{aligned} n &= A/d^2 \\ N &\propto d^2 G_{FI} \\ C &= n \times N \propto A G_{FI} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 $n$ ：圧縮力を分担する球体個数、 $A$ ：圧縮断面積、 $d$ ：球体直径、 $N$ ：球体1個の分担圧縮力、 $G_{FI}$ ：球体の割裂引張強度、 $C$ ：圧縮強さ、 $C/A$ ：圧縮強度

斜方格子配列の場合、球体の割裂強度が十分に大きいものとすれば、トラスモデルにおける水平材の引張応力が限界値に達することにより終局的破壊に至り、そのときの引張抵抗力は、

横並列の球体界面でのセメントペーストの付着強度により直接的に、さらに上下の球体界面でのセメントペーストの圧縮せん断抵抗により間接的に負担されるものと考えられる。従って、終局的破壊は、横並列の球体界面の付着破壊から、その上下の球体界面でずりせん断破壊が生じ、横方向の拘束がない最外面の球体から順次はじき出されることにより決まるものと推察される。また、そのときの圧縮強度は、次式に示すように上記の引張抵抗力に比例し、球径の2乗に反比例することが分かる。

$$\begin{aligned} n &= A/d^2 \\ 0.577N &= T + T' \\ \therefore N &= 1.73(T + T') \\ C &= n \times N = 1.73A \frac{T + T'}{d^2} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $T$ ：横並列の球体界面でのセメントペーストの付着強度により直接負担される引張抵抗力、 $T'$ ：上下の球体界面でのセメントペーストの圧縮せん断抵抗により間接的に負担される引張抵抗力

一方、体心立方格子配列の場合、トラスモデルにおける水平材の引張抵抗力は、横並列の球体は接触していないので、その上下の球体界面でのセメントペーストの圧縮せん断抵抗のみに

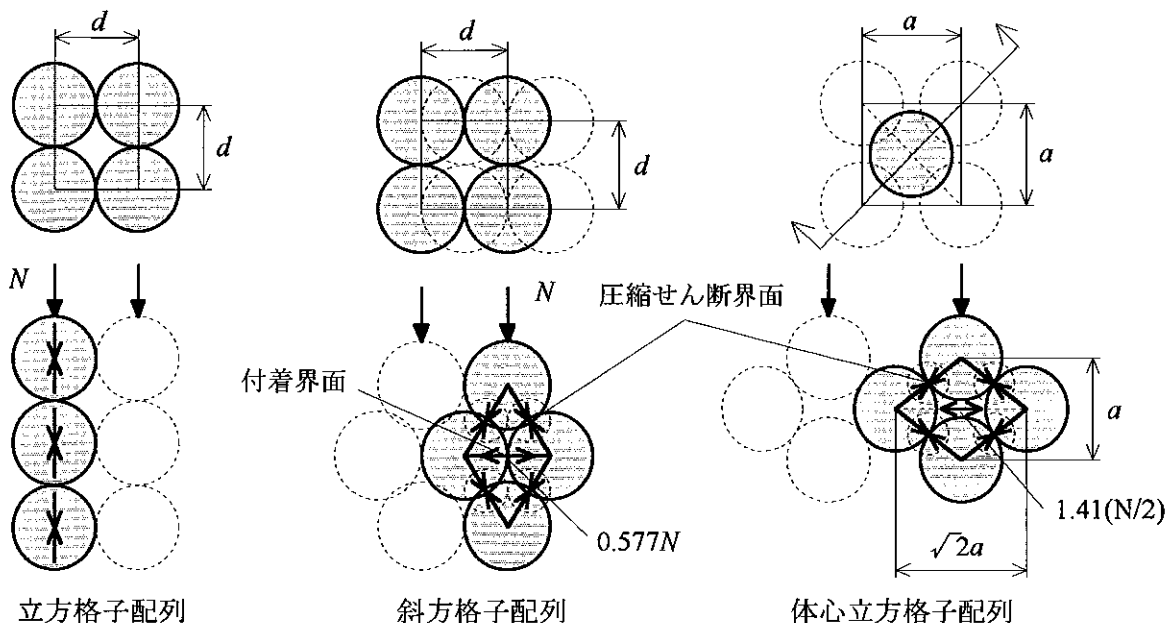


図-3 各格子配列におけるトラスモデルによる応力伝達の様相

より負担されることになるが、1 個の球体が分担する圧縮力は、この場合には2方向に伝達される。また、そのときの圧縮強度は、次式に示すように斜方格子配列の場合と同様に引張抵抗力に比例し、球径の2乗に反比例することになるが、斜方格子配列の場合よりも圧縮強度は常に小さくなるのが分かる。

$$\begin{aligned}
 a &= 2d/\sqrt{3} \\
 n &= A/a^2 = \frac{3A}{4d^2} \\
 1.41(N/2) &= T' \\
 \therefore N &= 1.41T' \\
 C &= n \times N = 1.06A \frac{T'}{d^2}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

なお、斜方および体心立方格子配列の場合も、球体の割裂破壊で終局的破壊が決まる場合には、割裂応力は球径の2乗に反比例するので、そのときの圧縮強度は球径に依存しないことになる。このことは、砕石を用いたポーラスコンクリートにおいて骨材の割裂破壊が生じる場合には、砕石粒径が圧縮強度に及ぼす影響が明確に現れないことを示唆するものである。また、骨材強度の小さい人工軽量骨材を用いた場合や、水セメント比を小さくし、骨材強度が相対的に小さくなるケースでは、同様の理由で骨材粒径が圧縮強度に及ぼす影響は小さくなることが予想され、ポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響因子のうち骨材粒径や水セメント比に関して既往の研究において矛盾する実験結果がみられる理由を説明するものと考えられる。

#### 4.2 骨材配列の違いが圧縮破壊性状に及ぼすモデル実験

上記のトラスモデルによる骨材配列の違いが圧縮破壊性状に及ぼす影響の妥当性を調べるために、ここでは、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$  のモルタル円柱供試体を立方格子、斜方格子および体心立方格子配列になるようにエポキシ樹脂により接着し、圧縮破壊試験を行った。なお、円柱供試体を骨材として用いているために、球体と異なり二次元モデル実験であり、トラスモデルにより予想

される圧縮破壊性状の定性的な比較検討を主目的としたものである。

#### (1) モルタル円柱供試体の作製

骨材として用いたモルタル円柱供試体の使用材料および調合を表-3に示す。なお、できるだけ円柱供試体骨材の割裂破壊が生じにくいようにするために高強度モルタルとした。また、標準養生材齢28日における $\phi 50 \times 100\text{mm}$  円柱供試体3個の圧縮強度および割裂引張強度の測定値の平均は、それぞれ $85.8\text{N/mm}^2$  および $3.61\text{N/mm}^2$ であった。

表-3 円柱供試体の使用材料および調合

セメント	早強ポルトランドセメント 密度= $3.13\text{g/cm}^3$
細骨材	豊浦珪砂 絶乾密度= $2.7\text{g/cm}^3$
混和剤	高性能 AE 減水剤

\*調合：W/C=30%，S/C=1.0，Sp/C=1.0%

\*Sp：高性能 AE 減水剤

#### (2) モデル供試体の作製

円柱供試体を標準養生材齢28日後気中養生を行い、供試体表面にエポキシ樹脂プライマーを塗布し、乾燥後、写真-2に示すように立方格子、斜方格子および体心立方格子配列になるように円柱供試体をエポキシ樹脂により接着した。また、圧縮載荷側の両面はセメントペーストによりキャッピングを行った。

#### (3) モデル供試体の圧縮破壊試験結果

写真-3に各格子配列における圧縮破壊性状を示す。立方格子配列の場合、No.6の円柱供試体の割裂破壊により終局的破壊を生じ、最大荷重の測定値は $70.8\text{kN}$ であった。円柱供試体の割裂引張強度 $3.61\text{N/mm}^2$ から予測される最大荷重は $85.1\text{kN}$ であり、計算値よりも測定値の方が約2割程度小さいが、偏心の影響によるものと思われる。斜方格子配列の場合、横並列の円柱供試体界面の付着剥離から最終的にNo.8、No.13の円柱供試体が外にはじき出されることにより終局的破壊に至り、最大荷重の測定値は $51.6\text{kN}$

であった。体心立方格子配列の場合、No.10 の円柱供試体に割裂破壊がみられるが、最終的には No.6 の円柱供試体が外にはじき出されることにより終局的破壊に至り、最大荷重の測定値は 18.5kN であった。体心立方格子配列の場合には、前述のように球体では2方向に応力が伝達されるが、それを考慮し最大荷重を2倍としても斜方格子配列の場合よりも最大荷重の測定値

は小さくなった。

以上の結果から、定性的ではあるが、トラスモデルによる圧縮強度理論から予想される圧縮破壊性状とほぼ同様の破壊性状がモデル実験により再現されたものと考えられる。

#### 4.3 本実験結果との対応

トラスモデルによるポーラスコンクリートの圧縮強度理論に関する考察により、斜方格子配

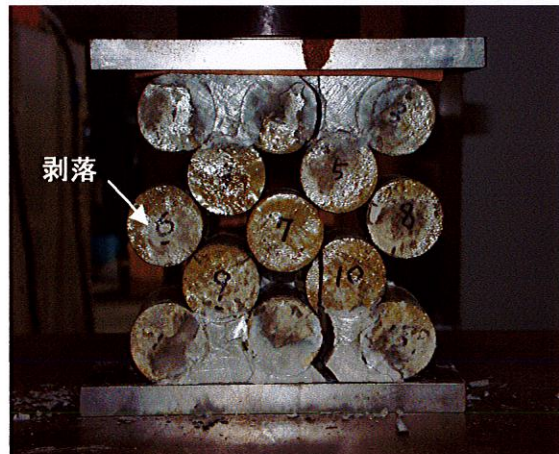
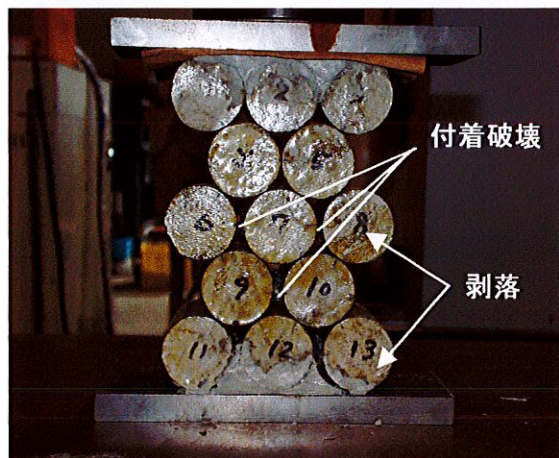
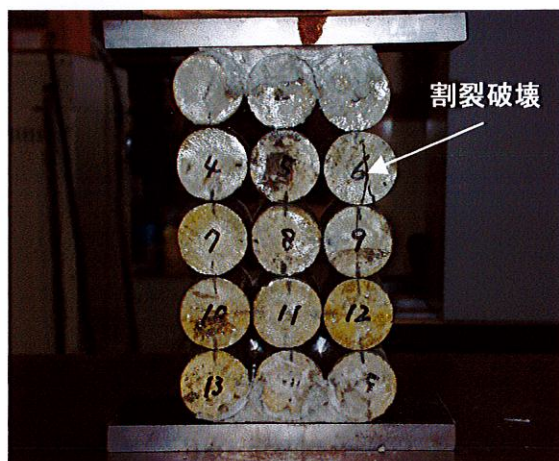
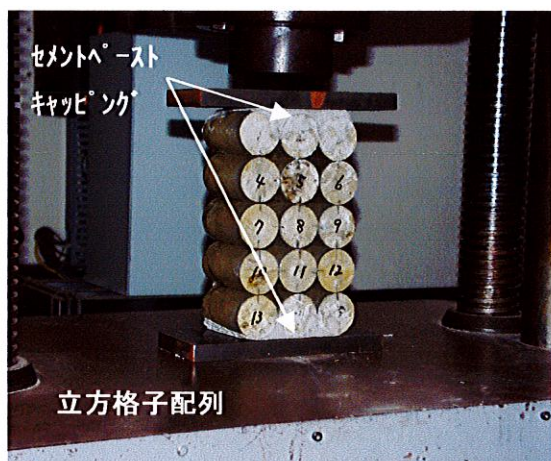


写真-2 モデル供試体の圧縮破壊試験

写真-3 モデル供試体の圧縮破壊性状

列と体心立方格子配列のどちらが圧縮強度に対して支配的な要因なのかを本実験の範囲内では判断することはできないが、本実験結果の傾向をうまく説明することができる。すなわち、水セメント比が圧縮強度に及ぼす影響に関しては、水セメント比が小さくなるほどセメントペーストの強度が増加するために、球体界面のセメントペーストの付着強度や圧縮せん断抵抗力が大きくなり、ポーラスコンクリートの圧縮強度も増加するものと考えられる。

空隙率が圧縮強度に及ぼす影響に関しては、空隙率が小さくなるほど球体界面のセメントペーストの膜厚が増加し、球体界面のセメントペーストの有効付着面積やせん断面積の増加による引張抵抗力の増加がポーラスコンクリートの圧縮強度を増加させるものと考えられる。

球径が圧縮強度に及ぼす影響に関しては、引張抵抗力が球径に依存しないとすれば、圧縮強度は球径の2乗に反比例し、球径が小さくなるほど圧縮強度は顕著に増加することになる。しかし、図-2 に示す回帰式から分かるように、べき乗係数は0.23~0.71の範囲にあり、空隙率が大きくなるほどその係数も小さくなり、球径が圧縮強度に及ぼす影響が小さくなっている。このことは、球体界面の引張抵抗力も球径に依存し、その程度は空隙率が大きくなるほど大きくなることを意味している。いま、回帰式から逆算すると、空隙率が20、25、30%の場合における引張抵抗力は、球径のそれぞれ1.29、1.61および1.77乗に比例することになり、空隙率が大きくなり球体界面のセメントペーストの膜厚が減少するほど、球体界面でのセメントペーストの付着強度や圧縮せん断抵抗力は球径の影響を受けやすくなることを示している。

## 5. まとめ

本報では、ポーラスコンクリートの調合設計のための圧縮強度理論の構築を目的に、アルミナボールおよびガラスビーズのような理想球体を骨材として用いたポーラスコンクリートモデ

ル供試体を作製し、圧縮強度に及ぼす空隙率、球径および水セメント比の影響について実験的検討を行った。また、骨材のブリッジ効果をマクロ的にトラス機構と捉え、コンクリートの圧縮強度を理論的に扱うことができるトラスモデルを用いて、立方格子、斜方格子および体心立方格子等の骨材配列の違いが圧縮破壊性状に及ぼす影響に関して、本実験結果との対応について考察した。その結果として、次のような結論が得られた。

- (1) アルミナボールおよびガラスビーズともに割裂破壊した供試体はみられず、横方向の膨張から局部的に表面の球体のはじけるか、あるいは崩れるように破壊した。
- (2) ポーラスコンクリートモデル供試体の圧縮強度に及ぼす影響因子に関して、空隙率の増加とともに圧縮強度は低下すること、球径が小さくなるほど圧縮強度は増加し、その程度は空隙率が小さいものほど大きくなること、セメント水比と圧縮強度の間にほぼ比例的な関係が得られることが分かった。
- (3) トラスモデルによる圧縮強度理論により骨材配列の違いがモデル供試体の圧縮破壊性状に及ぼす影響や圧縮強度に及ぼす空隙率、球径および水セメント比等の影響因子に関する本実験結果を定性的にうまく説明することができることが分かった。

## 参考文献

- 1) 村上 聖ほか：緑化用基盤としてのポーラスコンクリートの強度性状，セメント・コンクリート論文集，No.54，pp.784-789，2000.5
- 2) 先端建設技術センター編，ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き，山海堂，2001
- 3) 村上雅英ほか：圧縮強度の発現機構に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.17，No.2，pp.1293-1298，1995.6