

理想球形骨材によるポーラスコンクリートモデル供試体の圧縮強度理論
に関する研究STUDY ON THEORY OF COMPRESSIVE STRENGTH OF POROUS CONCRETE
MODEL SPECIMEN USING IDEAL SPHERICAL AGGREGATE

大谷俊浩*, 村上 聖**, 佐藤嘉昭***, 三井宜之****, 平居孝之*****

Toshihiro OTANI, Kiyoshi MURAKAMI, Yoshiaki SATO,

Yoshiyuki MITSUI and Takayuki HIRAI

This study aims at establishing a theory of compressive strength which is useful for the mix proportion to get required compressive strength in porous concretes. Making porous concrete model specimens using ideal spherical aggregates such as alumina ball and glass bead, an experimental investigation was conducted regarding the influence of total void ratios, spherical diameters of the aggregate and water-cement ratios on compressive strength of the specimens. Moreover, a consideration was done concerning a compatibility of the experimental results and the theory by means of a truss model considering the bridge effect of the aggregate.

Keywords: Porous concrete, Compressive strength, Spherical aggregate, Truss model, Bridge effect

ポーラスコンクリート, 圧縮強度, 球形骨材, トラスモデル, ブリッジ効果

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^{1)~3)}。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ものの、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い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性状について報告している^{4)~7)}。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^{8),9)}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課題であると考えられる。

そこで、本報では、理想球形のアルミナボールや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実験結果との対応について考察を行った。

2. 実験方法

2.1 使用材料

表1にポーラスコンクリートモデル供試体の使用材料を示す。セメントには、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、理想球形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、φ5、10、15、20mmの4種類、ガラスビーズの球径は、φ15mm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、JISA 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3.68g/cm³および2.53g/cm³であった。

表1 ポーラスコンクリートモデル供試体の使用材料

セメント	高炉セメントB種 密度=3.03g/cm ³
粗骨材	アルミナボール 密度=3.68g/cm ³ 球径=φ5、10、15、20mm
	ガラスビーズ 密度=2.53g/cm ³ 球径=φ15mm
混和剤	高性能 AE 減水剤

* 大分大学工学部福祉環境工学科 助手・工修
** 熊本大学大学院自然科学研究科 助教授・工博

*** 大分大学工学部福祉環境工学科 教授・工博
**** 熊本大学工学部環境システム工学科 教授・工博

***** 日本文理大学工学部建築デザイン学科 教授・工博

Research Assoc., Dept. of Architectural Eng., Faculty of Eng., Oita Univ., M. Eng. Assoc. Prof., Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architectural Eng., Faculty of Eng., Oita Univ., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Civil Eng., Faculty of Eng., Kumamoto Univ., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architectural Designs, Faculty of Eng., Nippon Bunri Univ., Dr. Eng.

2. 2 使用調合

(1) 理想球形骨材の実積率の測定

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くなるほど、その差異が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⁷⁾。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とが分かる。また、既往の研究¹⁰⁾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、実際の空隙率は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も関与しているものと推察される。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解析では、格子配列の違いについて考察する。

(2) 本実験の使用調合

表2に使用調合を示す。目標空隙率は、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に使用したφ100×200mm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¹¹⁾。

2. 3 供試体作製

ポーラスコンクリートの練混ぜ方法は、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いったん練り鉢に移し、その中にアルミナボールあるいはガラスビーズを投入し、その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200mmになるように練混ぜ具合に応じて適宜高性能AE減水剤を後添加した。圧縮強度試験には、φ100×200mm円柱供試体を各1個ずつ作製し、標準養生材齢28日後湿潤状態で圧縮強度試験に供した。なお、締固めには、突き棒と木づちを用い、打設後翌日にJISに準拠してセメントペーストにより厚さが1~2cmになるように両面キャッピングを施した。

3. 実験結果

3. 1 圧縮破壊性状

図2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

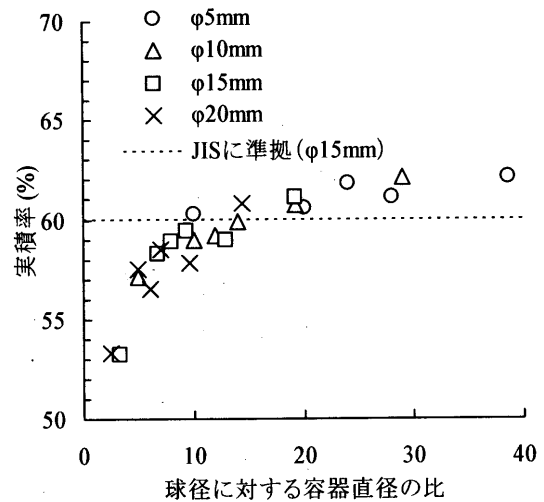


図1 球径に対する容器直径の比と実積率との関係

表2 ポーラスコンクリートモデル供試体の使用調合

球径 (mm)	実積率 (%)	目標空隙率 (%)	W/C (%)	
φ5	60.6	20	25	
		25		
		30		
φ10	59.0	20	25	
		25		
		30		
φ15	58.3	20	25	
		25	25	
			30	35
			30	25
		φ20	57.5	20
25				
30				

*実積率は、φ100×200mm円柱型枠による測定値

破壊を生じた供試体はみられず、横方向の膨張により局部的に表面の球形骨材がはじけるか、あるいは全体が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、破壊が局部的で激しく、その逆では、全体が崩れるように破壊した。なお、図ではキャッピング部分に破壊がみられるが、これは、破壊性状が分かりやすくなるように最大荷重以降の圧縮軟化域に至るまで载荷したためである。

3. 2 圧縮強度試験結果

図3に、圧縮強度試験結果を示す。なお、(b)の圧縮強度と球径との関係については、後述の理論的考察のために、べき乗関数による回帰曲線を併記している。また、(c)の圧縮強度とセメント水比との関係については、回帰直線を示している。全体的な傾向として、空隙率の増加とともに圧縮強度が低下すること、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との間には、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骨材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。普通骨材を用いたポーラスコンクリートの場合、局部的に骨材の割裂破壊がみられること

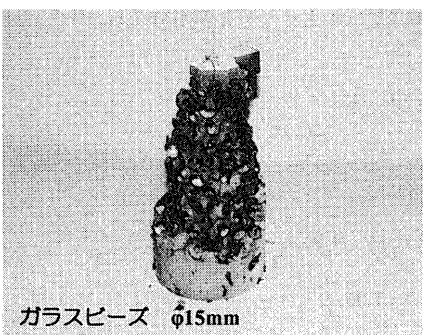
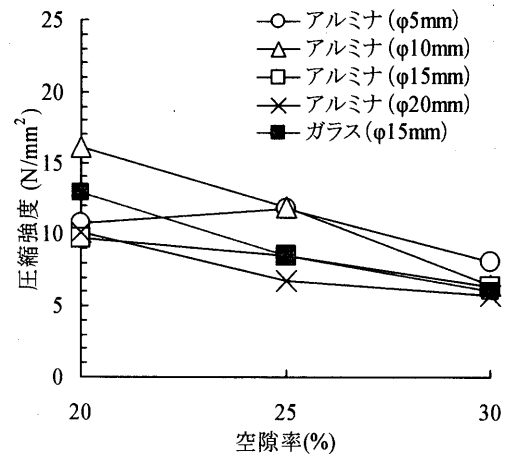
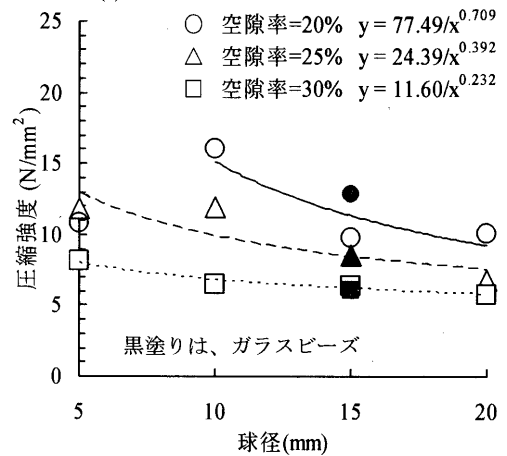


図2 ポーラスコンクリートモデル供試体の圧縮破壊性状

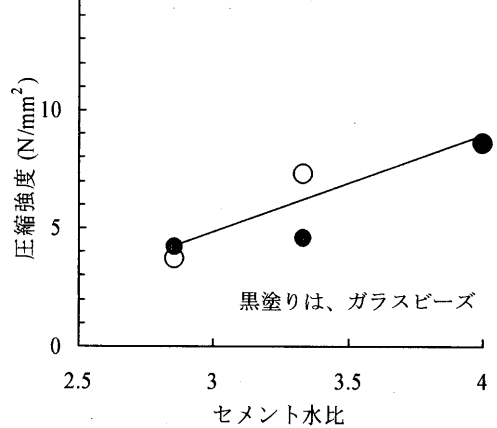


(a) 圧縮強度と空隙率との関係



(b) 圧縮強度と球径との関係

球径15mm、空隙率=25%一定



(c) 圧縮強度とセメント水比との関係

図3 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

が多いが、本実験で使用したアルミナボールの公称強度は、9.8GPaと非常に大きく、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

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巨視

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取り扱うのに簡便なモデルである¹²⁾。その他にも、個別要素法、粘弾塑性サスペンション要素法¹³⁾、ラチスモデルなどのように、ポーラスコンクリートの強度解析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法則が別個に要求される。ここでは、理想球形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。

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4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、圧縮方向の縦並列球形骨材の座屈がないとすれば、破壊形式は球形骨材の割裂破壊となるので、次式に示すように、圧縮強度は球形骨材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、局部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。

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

ここに、 n ：圧縮力を分担する球形骨材の個数

A ：圧縮断面積 (mm²)

d ：球形骨材直径 (mm)

N ：球形骨材1個の分担圧縮力 (N)

G_{Ri} ：球形骨材の割裂引張強度 (N/mm²)

C ：圧縮強さ (N)

C/A ：圧縮強度 (N/mm²)

斜方格子配列の場合、球形骨材の割裂引張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引張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、そのときの引張材の引張抵抗力は、横並列球形骨材界面でのセメントペーストの付着力により直接的に、さらに上下の球形骨材界面でのセメントペーストの圧縮せん断抵抗力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、横並列の球形骨材界面の引張付着破壊から、その上下の球形骨材界面でずりせん断破壊を生じ、横方向の拘束がない最外表面の球形骨材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。

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

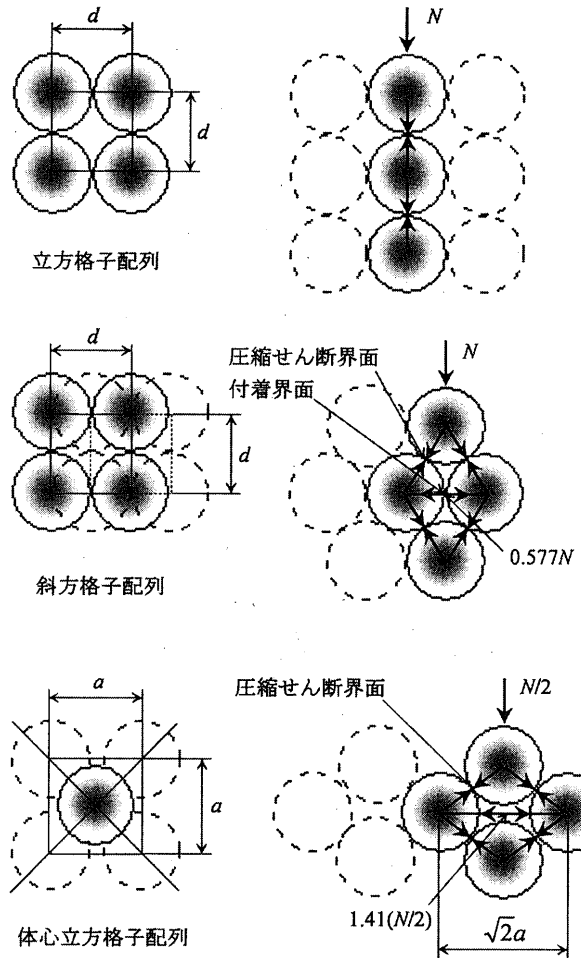


図4 各格子配列におけるトラスモデルによる応力伝達

ここに、 T ：横並列球形骨材界面のセメントペーストの付着力により直接負担される引張抵抗力 (N)

T' ：上下の球形骨材界面でのセメントペーストの圧縮せん断抵抗力により間接的に負担される引張抵抗力 (N)

一方、体心格子配列の場合、トラスモデルにおける引張材の引張抵抗力は、横並列球形骨材は接触していないので、その上下の球形骨材界面でのセメントペーストの圧縮せん断抵抗力のみによって負担されることになるが、1個の球形骨材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材の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小さくなることが分かる。

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

なお、斜方および体心立方格子配列の場合も、球形骨材の割裂破壊で終局的破壊が決まる場合には、割裂引張応力は、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、普通骨材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、骨材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している。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。本実験の場合には、球形骨材表面が平滑なために骨材とセメントペースト間の接着強度が小さく、普通骨材を用いた一般的なポーラスコンクリートよりも圧縮強度は小さくなっているが、骨材とセメントペースト間の付着破壊と骨材の割裂破壊が混在する一般的なポーラスコンクリートに対して、本実験のポーラスコンクリートは付着破壊が骨材の割裂破壊に先行する場合の圧縮強度の影響因子を考察するのに有用であると思われる。

5. 実験結果のトラスモデルによる考察

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より、斜方格子配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定性的に説明することができる。なお、実際の骨材配列は、これらの格子配列の混合系であり、前記の各格子配列における理論式により本実験結果を定量的に説明することは困難であることを付記する。

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、球形骨材界面のセメントペーストの付着力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推察される。

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形骨材界面のセメントペーストの膜厚が大きくなるために、球形骨材間のセメントペーストの接触面積の増加による付着力や圧縮せん断抵抗力の増大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推察される。

球径が圧縮強度に及ぼす影響に関しては、トラスモデルにおける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。これは、圧縮力を分担する球形骨材個数が球径の2乗に反比例するためであり、既往の研究でも、骨材粒径が小さいほど、骨材間の接触箇所が多くなるために圧縮強度は増加するとしている。しかし、図3(b)に示す圧縮強度と球径との関係の実験結果に対するべき乗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、球形骨材界面の付着力や圧縮せん断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。

ここで、球形骨材界面のセメントペーストの付着力や圧縮せん断

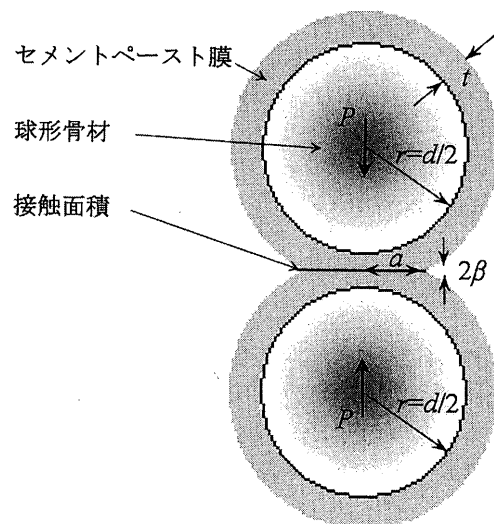


図5 球形骨材間のセメントペーストの接触面積

抵抗力が骨材間のセメントペーストの接触面積に比例するものとし、トラスモデルにおける引張抵抗力の球径依存性について考察する。いま、接触面積を求めるために、図5に示すように、弾性論における球体の接触理論を応用する。なお、セメントペーストは、打設時において流動体であるが、球形骨材界面を均一に被膜するセメントペーストを弾性係数の非常に小さな弾性体と仮定する。球体の接触理論により、接触面の半径 a および断面面積 πa^2 は、次式により与えられる。

$$\begin{aligned} a &= 1.109\sqrt{\frac{P r}{E 2}} = 1.109\sqrt{\frac{r}{2}\pi a^2 \frac{P}{E \pi a^2}} \\ &= 1.109\sqrt{\frac{r}{2}\pi a^2 \varepsilon} \propto \sqrt{d a^2 \left(\frac{\beta}{t}\right)} \\ \pi a^2 &\propto d^2 \left(\frac{\beta}{t}\right)^2 \end{aligned} \tag{4}$$

- ここに、 P : 骨材間の圧縮力 (N)
- E : セメントペーストの弾性係数 (N/mm²)
- $r=d/2$: 球形骨材半径 (mm)
- $\varepsilon=\beta/t$: 接触面の平均圧縮ひずみ
- t : セメントペースト膜厚 (mm)
- 2β : 骨材間のセメントペーストの平均縮み (mm)

また、(4)式とトラスモデルにおける引張抵抗力 T および圧縮強度 C/A との対応は、次式により与えられる。

$$\begin{aligned} T &\propto \pi a^2 \propto d^2 \left(\frac{\beta}{t}\right)^2 \\ C/A &\propto \frac{T}{d^2} \propto \left(\frac{\beta}{t}\right)^2 \end{aligned} \tag{5}$$

以下では、上式における t および β について、本実験結果との対応から検討を行う。まず、セメントペースト膜厚 t を本実験の使用

調査に基づいて、球形骨材界面で均一にセメントペーストが被膜されていると仮定して求めた計算結果を表3に示す。また、 t と球径 d との関係をべき乗回帰すれば、次式が得られる。

$$t \propto d^\alpha \quad (6)$$

$$\alpha = 0.0078V + 0.9728$$

ここに、 V : 空隙率(%)

(6)式は、空隙率が大きくなるほど、セメントペースト膜厚に及ぼす球径の影響度が大きくなることを示している。

さらに、図3(b)に示す圧縮強度と球径との関係の実験結果に対するべき乗回帰式から、(5)、(6)式により、 β を逆算すると、

$$\beta \propto d^\gamma \quad (7)$$

$$\gamma = 0.0317V + 0.1544$$

(7)式は、空隙率が大きくなるほど、球形骨材間のセメントペーストの平均縮みに及ぼす球径の影響度が大きくなることを示している。

上記の(5)、(6)、(7)式より、トラスモデルにおける引張抵抗力の球径依存性が次式により与えられる。

$$T \propto d^2 \left(\frac{\beta}{t} \right)^2 \propto d^\delta \quad (8)$$

$$\delta = 2 + 2(\gamma - \alpha) = 0.0478V + 0.3632$$

(8)式は、トラスモデルにおける引張抵抗力に寄与する球形骨材界面のセメントペーストの付着力や圧縮せん断抵抗力は、空隙率が大きくなるほど、球径の影響を受けやすくなることを示し、その結果として、空隙率が大きくなるほど、(2)、(3)式に示す C/A に関する分母および分子の球径依存性が相殺されるために、圧縮強度は球径の影響を受けにくくなるという本実験結果の傾向を説明することができる。

以上の結果から推定される圧縮強度と球径との関係と本実験結果との対応について検討を行う。いま、本実験のポーラスコンクリートが、斜方格子配列と体心立方格子配列の混合系と考えると、(2)、(3)式および(8)式より、圧縮強度 C/A は次式のように表せる。

$$C/A = \eta \frac{d^\delta}{d^2} \quad (9)$$

ここに、 η : 実験定数

ここで、圧縮強度の本実験結果から上式により求められる η の逆算値と空隙率との関係を図6に示す。なお、図中には、もっとも相関係数が高い e 関数で回帰した曲線を併記している。また、図7には、この回帰関数から求められた η を用いて計算された圧縮強度 C/A と球径 d との関係を示す。式中のパラメータは本実験結果との対応から推定された値なので、実験結果と良い対応が得られることは当然のことではあるが、球径 d が大きくなるにつれて空隙率が圧縮強度

表3 セメントペースト膜厚の計算値

球径 (mm)	実積率 (%)	目標空隙率 (%)	セメントペースト膜厚 (mm)
φ 5	60.6	20	0.29
		25	0.22
		30	0.15
φ 10	59.0	20	0.64
		25	0.50
		30	0.35
φ 15	58.3	20	1.00
		25	0.78
		30	0.56
φ 20	57.5	20	1.40
		25	1.11
		30	0.81

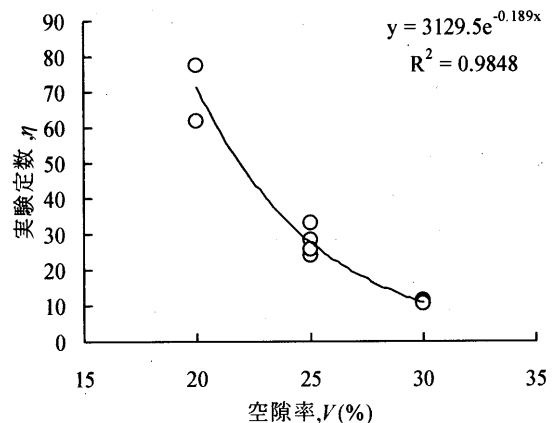


図6 η の逆算値と空隙率との関係

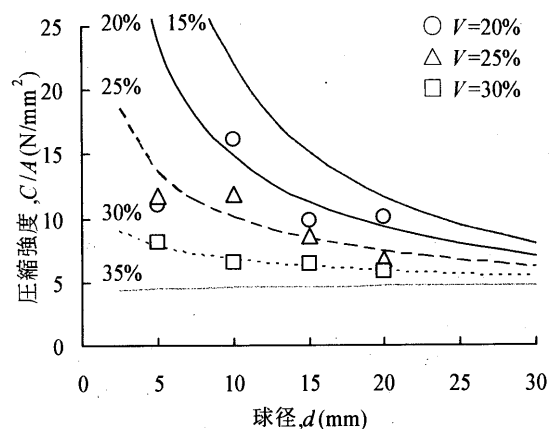


図7 圧縮強度と球径との関係の計算値

に及ぼす影響が小さくなること、空隙率が35%では圧縮強度は球径に影響されず、ほぼ一定値を示すことなどが予測される。

ところで、以上の結果は、骨材強度が十分に大きく、骨材の割裂破壊が生じない場合を想定したものであり、骨材の割裂破壊が先行する場合には、前述のように、トラスモデル解析では、空隙率、水セメント比および骨材粒径は、ポーラスコンクリートの圧縮強度にほとんど影響を及ぼさないことが予想される。

6. 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、アルミナボールやガラスビーズのような理想球形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巨視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取り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を行った。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、横方向の膨張から局部的に表面の球形骨材をはじけるか、あるいは全体が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と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の傾向を定性的にうまく説明することができる。

謝辞

本実験にあたっては、熊本大学工学部甲斐定夫技官、当時熊本大学大学院生の川添新平(現在、麻生セメント㈱)、卒論生の田中裕子、古野誠(現在、熊本大学大学院生) 諸氏の協力をいただきました。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会:エココンクリート研究委員会報告書、1995.11
- 2) 日本コンクリート工学協会: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書、2003.5
- 3) 湯浅幸久ほか:ポーラスコンクリートの振動締固めに関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.552、pp.37-44、2002.2
- 4) 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) 大谷俊浩ほか:結合材の分布状態がポーラスコンクリートの強度特性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.2、pp.139-144、2001
- 6) 大谷俊浩ほか:砕石粒径が小さい場合の結合材の分布状態がポーラスコンクリートの強度特性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.1155-1160、2002
- 7) 大谷俊浩ほか:ポーラスコンクリートの空隙率と圧縮強度に及ぼす供試体寸法の影響、セメント・コンクリート論文集、No.56、pp.298-303、2002
- 8) 岡本享久ほか:ポーラスコンクリートの製造・物性・試験方法、コンクリート工学、Vol.36、No.3、pp.52-62、1998.3
- 9) 柳崎邦生ほか:倉吉オケ崎護岸における緑化コンクリートの施工、コンクリート工学、Vol.37、No.2、pp.30-34、1999.2
- 10) 松川徹ほか:緑化コンクリートの空隙性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp.999-1004、1996
- 11) 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
- 12) 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報告集、Vol.17、No.2、pp.1293-1298、1995
- 13) 朴相俊ほか:粘弾塑性サスペンション要素法によるポーラスコンクリートの圧縮破壊解析、コンクリート工学論文集、Vol.24、No.1、pp.321-326、2002

(2004年3月29日原稿受理、2004年8月26日採用決定)