# 論文 ポーラスコンクリートの空隙分布が曲げ強度に及ぼす影響

吉田 知弘<sup>\*1</sup>·国枝 稳<sup>\*2</sup>·音野 琢也<sup>\*3</sup>·六郷 恵哲<sup>\*4</sup>

要旨:ポーラスコンクリートの曲げ強度には寸法効果が存在するが、その理由の一つ と考えられる内部の空隙分布に着目し、実験ならびに数値解析によりそのメカニズム について検証した。実験では供試体内部の空隙分布を超音波法により確認し、最も空 隙が多いと判断される部分で破壊が生じることが確認された。また、空隙分布を模擬 した2次元での数値解析においても、空隙の多い部分で破壊すること、ならびに曲げ 強度の寸法効果が再現できることを明らかにした。

キーワード:ポーラスコンクリート,空隙分布,超音波法,寸法効果,RBSN

#### 1. はじめに

ポーラスコンクリート中に存在する空隙と強 度の間には強い相関がある。しかし,欠陥であ る空隙の量や位置(分布)が強度や破壊性状に 及ぼす影響については明らかにはなっていない。 ポーラスコンクリートの寸法効果に関する研究 では,安藤ら<sup>1)</sup>がポーラスコンクリートの引張 軟化曲線を推定し,はり高さが大きくなること によって生じる強度の寸法効果は小さいことを 明らかにしている。

著者ら<sup>2)</sup>は、ポーラスコンクリートのはり長 さが大きくなると曲げ強度が低下することを実 験的に確認した。そのメカニズムとして最弱リ ンクモデルにより説明できるとの考察を行った が、具体的な裏づけを得ていないのが現状であ る。

ポーラスコンクリート内部の空隙は3次元的 であり、その量や位置を定量的に評価すること は難しい。ポーラスコンクリート内部の空隙を 非破壊的に評価する方法の1つに超音波法があ り、ポーラスコンクリートの内部組成を非破壊 的に評価する手法として有効であるという報告 がある<sup>3)</sup>。 部の空隙分布に着目し,実験ならびに解析によ りポーラスコンクリートにおける曲げ強度の寸 法効果メカニズムについて検証した。

#### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料

表-1 に使用したポーラスコンクリート及び 比較用の普通コンクリートの配合を示す。いず れの配合においても、セメントには早強ポルト ランドセメントを用いた。粗骨材には、5-13mm の粒径の骨材(密度:2.61g/cm<sup>3</sup>,実績率:60.9%) を使用し、細骨材には、7号硅砂を使用した。

作製方法は,容量 100 リットルの強制練パン 型ミキサーに,水(混和剤)以外の材料をすべ て投入し空練りした後,水(混和剤)を投入し, 十分に練り混ぜた。試料を所定の型枠(寸法 100 ×100×1600mm)に2層に分けて詰め,各層ご とに突き棒(突き部分 35×35mm)にて十分に 突き固めを行った。

すべての供試体は、打設後3日にて脱型した 後、20℃の恒温室内にて湿布養生を行い、材齢 28日にて載荷試験を行った。また、曲げ供試体 のほかに、φ100×200mmの円柱供試体も作製 し、圧縮強度試験および空隙率測定試験を実施

そこで本研究では、ポーラスコンクリート内 し、圧縮強度 \*1岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員) \*2岐阜大学 工学部社会基盤工学科 助手 工博 (正会員) \*3岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員) \*4岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

コンクリートの種類	粗骨材寸法	W/C	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
	(mm)	(%)	(%)	W	$C^{*1}$	S	G	Ad
ポーラスコンクリート	5-13	16.8	23	71	316	131 <sup>*2</sup>	1563	6.32 <sup>*3</sup>
普通コンクリート	5-13	-	63	184	293	722	1035	1.17 <sup>*4</sup>

\*1:早強ポルトランドセメント (密度 3.12g/cm<sup>3</sup>)

\*2:7号硅砂

\*3:高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)

\*4:AE剤

表-2 全空隙率, 圧縮強度および曲げ強度

マンクリートの毎粒	全空隙率	圧縮強度	曲げ強度	
	(%)	(MPa)	(MPa)	
ポーラスコンクリート(実験1)	17.1	15.9	4.34	
ポーラスコンクリート(実験2)	25.2	8.86	0.65	
普通コンクリート	-	37.2	4.94	



図-1 実験1の載荷試験フロー

した。空隙率の測定は,エココンクリート研究 委員会報告書の「ポーラスコンクリートの空隙 率測定試験法(案)」の容積法<sup>4)</sup>に準じて実施し た。

**表-2** に圧縮強度,曲げ強度および空隙率を示す。なお,後述のとおり,寸法効果を確認す

るための実験1と,破壊箇所と空隙の関係を確 認するための実験2を実施した。実験2の供試 体の強度が低くなった理由としては,締固めが 不十分であったか,練混ぜ時間が短く,結合材 の流動性が小さくなり,骨材の周りに十分に結 合材が行き渡らなかったためと考えられる。

## 2.2 載荷試験方法

#### (1) 寸法効果確認実験(実験1)

供試体の長さの違いが算定される曲げ強度に 及ぼす影響について検討するために,供試体寸 法100×100×1600mmの供試体を各3体ずつ作 製した。載荷試験のフローを図-1に示す。ま ず,長さ1600mmの供試体についてモーメント スパン 400mmの3等分点曲げ載荷試験を行っ た。次にこの試験により2分された供試体のう ち,1つの切片(長さ:約800mm)について, モーメントスパン 200mmの3等分点曲げ載荷 試験を行った。さらに,2分された供試体(長 さ:約400mm)を用いてモーメントスパン 100mmの3等分点曲げ載荷試験を行った。以上 のように,長さ1600mmの供試体に対して計3 回の曲げ試験を行い,ロードセルにて荷重のみ



の計測を行った。なお,曲げ強度の算定には, 自重による曲げモーメントも加算した。

また、それぞれの長さの供試体において、モ ーメントスパン内の空隙分布の評価をするため に、UST(探触子径 ¢ 37.5mm)を用いて、図-2の(a)に示すように供試体の載荷方向に超音波 を伝播させ、伝播距離を伝播時間で除して超音 波伝播速度を算定した。計測箇所は、モーメン トスパン内100×100mmの範囲に対して9箇所 とし、それぞれ、36箇所(1600mmの供試体)、 18箇所(800mmの供試体)、9箇所(400mmの 供試体)の超音波伝播速度を計測した。なお、 ポーラスコンクリート内の空隙量が多いと、み かけの伝播速度が小さくなる特徴がある<sup>3)</sup>。

#### (2) 破壊箇所と空隙の関係(実験2)

破壊箇所と空隙との関係について検討するために,供試体寸法 100×100×400mmの供試体を5体作製した。載荷および超音波伝播速度計測に打設面が極力影響を及ぼさないように,縦打ちにて供試体を作製した。

まず,モーメントスパン内の空隙分布を超音 波法により評価するために,UST(探触子径φ 37.5mm)を用いて,図-2の(b)に示すよう に供試体の載荷方向と直行方向に超音波を伝播 させ,超音波伝播速度を計測した。計測箇所は, モーメントスパン100mmに対して9箇所とし,



図-3 数値解析における載荷スパンと載荷位置

供試体の圧縮側3箇所,中央部3箇所,引張側 3箇所を計測した。その後,3等分点曲げ載荷試 験を実施し,破壊箇所とモーメントスパン内各 部分の超音波伝播速度の関係について考察を行 った。

## 2.3 解析概要

解析には,2次元の Rigid-Body-Spring Networks (RBSN)を用いた。供試体寸法は,寸 法効果確認試験と同様に100×100×1600mmと した。この供試体をヴォロノイ分割により3000 個の要素(平均寸法15mm)に分割し,乱数に よりランダムに空隙の要素を配置した。なお, 図-3に示すように,供試体寸法の違いによら ず,すべて同じ要素分割図を用い,境界条件の み変えて解析を行った。なお,解析において自 重の影響は無視した。解析に用いた材料定数は, 引張強度5MPa,弾性係数30GPa,破壊エネル ギー150N/m(1/4 モデル)の引張軟化特性を用 いた。配置させる空隙要素の数を0,50,200, 400個に変化させ,空隙要素の配置は10通りと した。空隙に相当する要素は引張強度を OMPa とした。

# 3. 実験結果および解析結果

- 3.1 曲げ強度の寸法効果(実験1)
  - (1) 実験結果

図-4 に実験1のスパン長と曲げ強度の関係 を示す。なお、すべての実験値は、自重による 曲げモーメントを荷重として足し合わせた結果 である。今回の実験においても、昨年の実験結 果と同様、供試体寸法の増大に伴い、曲げ強度 が低下する傾向が確認できる。比較用に作製し た普通コンクリートに関しては強度の低下は確 認できず、明確な寸法効果は見られなかった。

次に表-3 にポーラスコンクリート供試体の モーメントスパン内の超音波伝播速度(幅方向 の3箇所の平均)と破壊箇所の結果の一例を示 す。なお,表中の網掛け部分が破壊箇所である。 モーメントスパン内の伝播速度が比較的遅い箇 所,すなわち空隙が多く存在していると考えら



スパン1200mm	4700	4670	4650	4540	4620	4630	4690	4650	4570	4590	4660	4640
スパン600mm	4600	4640	4700	4710	4620	4670						
スパン300mm	4720	4570	'0 4590 単位(m/s)									





れる箇所で破壊しているものがほとんどであっ た。これは、寸法効果のメカニズムである最弱 リンクモデルの考え方をよく表している結果で ある。しかしながら、載荷方向の伝播速度を計 測したため、圧縮側または引張側の空隙のどち らが支配的であったかは明らかではなかった。

## (2) 解析結果

図-5 に解析の結果を示す。空隙の要素の多 少にかかわらず,供試体寸法の増大に伴って, 曲げ強度は低下する傾向が確認できた。空隙要 素を増やすことにより,曲げ強度も低下する傾 向が見られた。これは,ポーラスコンクリート の空隙と強度には強い相関があるということを よく再現できていると考えられる。また,空隙 の要素を設けなかった供試体に関しては,実験 の普通コンクリートと同様に,明確な寸法効果 は確認できなかった。

2

4

2

0

2

0

0

1

破壞位置

図-8 空隙要素数と破壊位置の関係(解析)

1

1

0

0

1

次に、各空隙要素数における、空隙要素の配置を10通り変化させた結果を図-6に示す。どの要素数においても、空隙の配置を変化させることにより曲げ強度は最大で約2MPa程度ばら

ついている。しかし、どの配置においてもスパ ン長が大きくなるに伴い、曲げ強度は低下する 傾向にあった。また、空隙要素が多くなると、 スパン長が小さい場合に強度が小さくなってい るものがあるが、これは、その部分に空隙の要 素が集中して存在したためと考えられる。

## 3.2 破壊箇所と空隙との関係(実験2)

図-7 に実験における供試体の破壊箇所とモ ーメントスパン内各部の超音波伝播速度の一例 を、図-8 に解析におけるモーメントスパン内 の各部分の空隙要素数と破壊位置の一例を示す。 実験においては、超音波伝播速度の最も遅い部 分、すなわち、最も空隙の多いと判断される部 分で破壊することが確認できた。さらに、供試 体の引張側の空隙が最も多いと判断できる部分 で破壊している。実験に用いた供試体の5 体す べてが同じ傾向を示していた。また、解析にお いても、供試体の引張側の空隙要素数が最も多 い部分で破壊が生じている。つまり、ポーラス コンクリートの曲げ強度は供試体断面の引張側 の空隙の影響を強く受けると考えられる。

これらをまとめると、ポーラスコンクリート の寸法効果のメカニズムは、空隙の最も多い部 分で破壊するという最弱リンクモデルの考え方 による影響が大きく、数値解析においても、要 素中に空隙要素を設け、ランダムに配置させる ことにより、ポーラスコンクリートの破壊と曲 げ強度の寸法効果をよく再現できることが明ら かとなった。

4. おわりに

本研究では,実験および数値解析により,ポ ーラスコンクリートの曲げ強度の寸法効果と空 隙分布との関係について検討を行った。その結 果,本研究の範囲内において以下のような結論 を得た。

 ポーラスコンクリートの曲げ破壊は、供試体のモーメントスパン内の最も空隙が多い 部分で破壊する傾向があった。中でも供試 体断面の引張側の空隙が支配的な要因にな っていることが,実験および解析において も明らかとなった。つまり,ポーラスコン クリートの寸法効果のメカニズムとしては, 供試体の最も弱い部分で破壊するという最 弱リンクの考え方によるものであるという ことが実証された。

2) 解析において、ヴォロノイ分割した要素の 中に空隙要素をランダムに配置させ、空隙 要素の個数を変化させることにより、ポー ラスコンクリートの強度と空隙との強い相 関関係、ポーラスコンクリートが空隙の最 も多い部分で破壊すること、ならびに曲げ 強度の寸法効果をよく再現できることが明 らかとなった。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり,岐阜大学学部生の北 野嘉乙氏に多大な御協力をいただいた。ここに 記し感謝の意を表す。

## 参考文献

- 安藤貴宏,栗原哲彦,内田裕市,六郷恵哲: ポーラスコンクリートの曲げ破壊性状,コ ンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.1, pp.765-770, 1995
- 吉田知弘,国枝稔,音野琢也,六郷恵哲: 試験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
- 3) 鎌田敏郎,国枝稔,島崎磐,六郷恵哲:超 音波によるポーラスコンクリートの内部組 成の評価,コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.733-738, 1998
- 4) 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
- Bolander, J. and Saito, S. : Fracture Analysis Using Spring Networks with Random Geometry, Engineering Fracture Mechanics, Vol.61, No.5-6, pp.569-591, 1998