

論文 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

吉田 知弘^{*1}・国枝 稔^{*2}・音野 琢也^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨：ポーラスコンクリートの適用事例には、排水性舗装など薄肉の曲げ部材である場合が多く、ポーラスコンクリート特有の空隙が力学的な欠陥であることを認識したうえで、部材の力学特性を把握する必要がある。本研究では、曲げを受けるポーラスコンクリートはり供試体を対象とし、供試体の形状（長さ、幅及び載荷時のモーメントスパン）の違いが、算定される曲げ強度に及ぼす影響について実験的に検討し、ポーラスコンクリートの強度の寸法効果に関する基礎データを得た。

キーワード：ポーラスコンクリート、曲げ強度、寸法効果、空隙、欠陥

1. はじめに

ポーラスコンクリートは、約 20%前後の連続空隙を有し、水や空気を透過させる機能を有していることから、様々な利用形態が提案されている¹⁾。近年、透水性、保水性を利用したポーラスコンクリートの適用が推し進められており、例えば、排水性舗装、吸音版、河川用護岸など比較的薄肉部材での利用が挙げられる。

コンクリートの破壊は部材中に存在する欠陥に起因してひび割れが発生する点に特徴があり、コンクリートの強度には寸法効果が存在することが知られている²⁾。寸法効果の原因には、様々な理由があるが、材料欠陥の確率分布、破壊の局所化、コンクリート特有の不均質性などが挙げられる。強度の寸法効果の取り扱いに関しては、引張軟化曲線を考慮することによる曲げ強度の寸法効果に関する検討³⁾や、長さ方向に関する寸法効果に関する検討結果⁴⁾がある。特に、後者については、部材の力学特性が最も弱い部分に支配されるという最弱リンクの考え方によるものである。

ポーラスコンクリート中に存在する空隙と強度との間には強い相関があることが知られているが、ポーラスコンクリート中の空隙が、欠陥

であることを認識し、ポーラスコンクリートの強度の寸法効果がどの程度であるかを把握しておく必要がある。安藤ら⁵⁾は、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。また、国枝⁶⁾は、ポーラスコンクリートの圧縮強度に関して、供試体径が小さい場合には、せき板効果により強度が小さく算定されることを示している。

曲げを受ける部材の設計に際し、試験室レベルでの曲げ強度を設計用値として利用する際には注意が必要であり、設計レベルにおいても強度の寸法効果を考慮することの重要性が認識されている⁷⁾。ポーラスコンクリートの場合においても、試験室レベルでの供試体の曲げ強度を代表値として扱うが、実際には面的な広がりを持った曲げ部材である場合が多く、それらがどのような力学特性を有しているのか把握しておく必要がある。

本研究では、ポーラスコンクリートの曲げを受けるはり供試体を対象とし、供試体の形状（長さ、幅及び載荷時のモーメントスパン）の違いが、算定される曲げ強度に及ぼす影響について実験的に検討し、ポーラスコンクリートの強度

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (正会員)

*2 岐阜大学助手 工学部社会基盤工学科 工博(正会員)

*3 岐阜大学大学院 土木工学専攻 (正会員)

*4 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 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(mm)	目標 空隙率(%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C ^{*1}	S	G	Ad.
ポーラス大	13-20	20.2	30	89.1	297	0	1609	0
ポーラス小	5-13	20.8	30	88.3	294	0	1583	0
高強度ポーラス	5-13	16.8	23	71.0	316	131 ^{*2}	1563	6.32 ^{*3}
普通コンクリート	5-13	-	63	184	293	722	1035	1.17 ^{*4}

*1：早強ポルトランドセメント

*2：7号硅砂

*3：高性能 AE 減水剤

*4：AE 剤

表 - 2 供試体寸法

コンクリートの 種類	供試体寸法 (mm)		
	幅	高さ	長さ
ポーラス大	100	100	1600
ポーラス小	100		
高強度ポーラス	100,200,400		
普通コンクリート	100,200,400		

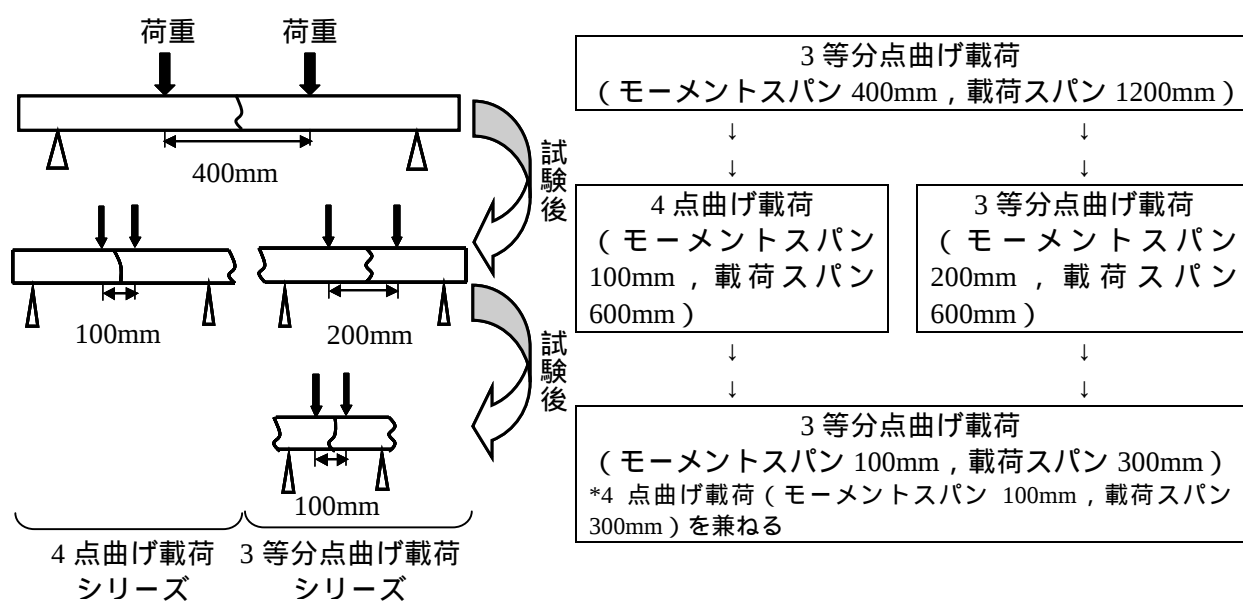


図 - 1 載荷試験のフロー

の寸法効果に関する基礎データを得た。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表 - 1 に、使用した 3 種類のポーラスコンクリート及び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

ランドセメント（密度 3.12g/cm³）を用いた。径の大きな骨材を使用したポーラスコンクリート（以後、ポーラス大と呼ぶ）は、水セメント比を 30%とし、13-20mm の粒度分布の骨材（密度 2.61g/cm³，実積率 61.4%）を用いた。径の小さな骨材を使用したポーラスコンクリート（以後、ポーラス小と呼ぶ）では、水セメント比を



図 - 2 試験終了後の供試体の例

30%とし、5-13mm の粒度分布の骨材（密度 2.61g/cm^3 ，実積率 60.9%）を使用した。高強度ポーラスコンクリート（以後、高強度ポーラスと呼ぶ）は、水セメント比を 23%に低減するとともに、5-13mm の粒度分布の骨材（密度 2.61g/cm^3 ，実積率 60.9%），細骨材として 7 号硅砂，ならびに高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）を使用した。また、本実験では、比較のための普通コンクリート（スランプ 7.5 cm，空気量 5.1%）も作製した。

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。試料を所定の型枠に 2 層に分けて詰め、各層ごとに突き棒（突き部分が $35 \times 35\text{mm}$ ）にて十分に突固めを行った。

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。なお、載荷方向が供試体打設方向と直角になるように載荷試験を行った。

2.2 供試体の寸法及び載荷方法

(1)概要

本実験で作製した供試体の寸法を表 - 2 に示すとともに、載荷試験のフローを図 - 1 に示す。4 種類のコンクリートに関して、供試体の長さ、幅及び載荷時のモーメントスパンを変化させた実験を行い、曲げ強度を算定した。同一の供試

表 - 3 空隙率及び圧縮強度

コンクリートの種類	全空隙率 (%)	圧縮強度 (MPa)
ポーラス大	26.1	14.2
ポーラス小	24.9	10.9
高強度ポーラス	19.0	16.9
普通コンクリート	-	37.2

体に対して、載荷を繰り返すことによる供試体への影響（例えば、微細ひび割れ）が考えられるが、製造過程における締固め程度の違い等が供試体の力学特性に及ぼす影響に比べて小さいと考え、本載荷方法を採用した。なお、曲げ強度を算定する際には、載荷ジグ及び供試体の自重によるモーメントを加算した。以上の曲げ試験用供試体の他に、圧縮強度試験用供試体（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ）を作製した。ポーラスコンクリートに関しては、この圧縮強度試験用供試体を用いて、JCI エココンクリート研究委員会「ポーラスコンクリートの空隙率試験法（案）⁸⁾」に準じて全空隙率の測定も行った。

(2)供試体長さに関する実験

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、幅 $100 \times$ 高さ $100 \times$ 長さ 1600mm の供試体を各 3 体ずつ作製した。この供試体について、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 分した供試体のうち、1 つの切片（長さ：約 800mm ）について、再度モーメントスパン 200mm の 3 等分点曲げ載荷試験を行った。さらにこの試験により 2 分した供試体（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、それぞれの曲げ強度を算定した。図 - 2 に、実験終了後の供試体の例を示す。

(3)載荷時のモーメントスパンに関する実験

載荷時のモーメントスパン長の違いが、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、供試体長さに関する実験にて生じた幅

表 - 4 曲げ強度一覧

コンクリートの種類	供試体幅 (mm)	3 等分点曲げ載荷時 曲げ強度(MPa) ^{*1}			4 点曲げ載荷時曲げ強度 (MPa) ^{*1} (モーメントスパン 100mm 一定)	
		供試体長 1600(mm)	供試体長 800(mm)	供試体長 400(mm)	供試体長 400(mm)	供試体長 800(mm)
ポーラス大	100	1.76 (0.07)	1.91 (0.08)	1.91 (0.17)	-	-
ポーラス小	100	1.95 (0.08)	2.24 (0.11)	2.09 (0.10)	-	-
高強度ポーラス	100	3.37 (0.24)	4.05 (0.15)	3.91 (0.34)	← ^{*2}	3.75 (0.04)
"	200	3.40 (0.10)	3.38 (0.05)	3.51 (0.09)	← ^{*2}	3.66 (0.34)
"	400	2.65 (0.11)	2.63 (0.08)	-	-	2.83 (0.24)
普通コンクリート	100	4.94 (0.09)	4.59 (0.06)	4.94 (0.24)	← ^{*2}	5.04 (0.12)
"	200	4.53 (0.06)	4.37 (0.02)	4.52 (0.13)	← ^{*2}	4.68 (0.12)
"	400	3.68 (0.15)	4.15 (0.12)	-	-	4.12 (0.11)

*1 カッコ内は標準偏差

*2 同一条件の実験結果を流用

100×高さ 100×長さ約 800mm の供試体（3 体）を利用し，この供試体について，モーメントスパン 100mm の 4 点曲げ載荷試験（載荷スパン 600mm）を行った。なおこの試験により得られた切片を利用した試験（モーメントスパン 100mm，載荷スパン 300mm）は，前節の試験結果（モーメントスパン 100mm の 3 等分点曲げ載荷試験）を代用した。

(4) 供試体幅に関する実験

供試体の幅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，高強度ポーラス及び普通コンクリートのみを対象として，高さ 100mm，長さ 1600mm の一定とし，幅を 200mm および 400mm に変化させた供試体を各 3 体ずつ作製し，先述の試験同様に，載荷スパンを変化させた曲げ試験を 3 回繰り返した。

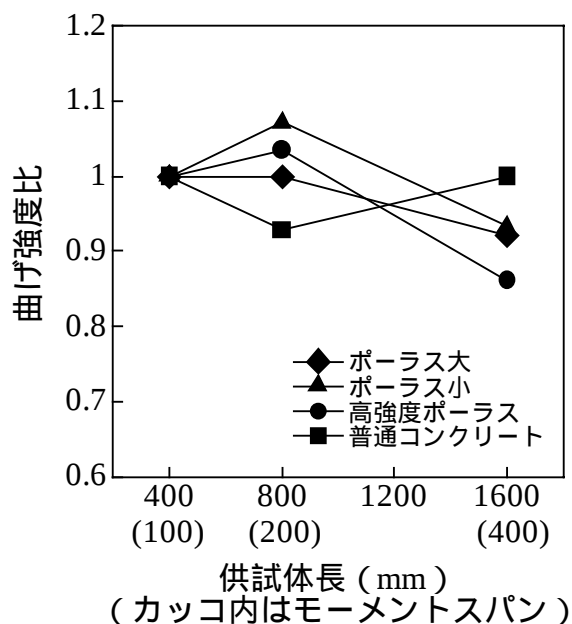


図 - 3 供試体長の違いによる強度の寸法効果

3. 実験結果

3.1 空隙率試験及び強度試験結果

計測したポーラスコンクリートの空隙率を表 - 3 に示す。また，すべてのコンクリートの圧

縮強度を併せて表 - 3 に示す。ポーラスコンクリートに関しては，圧縮強度約 10 - 17MPa の範囲にあった。また，普通コンクリートの圧縮強度は約 37MPa であった。

3.2 供試体長の違いによる強度の寸法効果

幅 100mm の供試体を用いて、各供試体長さにおいて 3 等分点曲げ載荷試験を行い算定した曲げ強度を表 - 4 及び図 - 3 に示す。なお、図中では、供試体長さ 400mm の曲げ強度を基準に正規化して表示した。

ポーラスコンクリートについて供試体長さ 400mm と 800mm の曲げ強度を比較すると、800mm の供試体の曲げ強度は 400mm のそれを上回っているが、明確な理由は現段階では不明である。しかし、1600mm の曲げ強度は、400mm 及び 800mm のそれらよりわずかに低下する傾向にあり、特に、高強度ポーラスの場合に顕著であった。また本研究の範囲内では、普通コンクリートにおける長さ方向の寸法効果は明確ではなかった。ポーラスコンクリートにおいて寸法効果が観察された理由は、ポーラスコンクリート中のひび割れは、部材中のもっとも弱い部分を進展するものと考えられるが、供試体長(載荷におけるモーメントスパン長)が増加することにより、欠陥となり得る空隙の量が増加し、相対的に弱点が増加するメカニズムによると考えられる。なお、本データは供試体寸法をさらに大きくした場合に強度が低下する可能性を示しており、更なるデータの蓄積が必要である。

3.3 モーメントスパン長の違いによる強度の寸法効果

前節の実験における供試体の破片を利用し、モーメントスパンを 100mm の一定とし、載荷スパンを 600mm、300mm とした 4 点曲げ載荷試験を行った結果を、3 等分点載荷試験の結果(載荷スパンは同様)とあわせて表 - 4 及び図 - 4 に示す。幅 100mm の高強度ポーラスの強度が低い結果となっており、せき板効果などによるバラツキも含んでいることが予想されるが、これを除けば、モーメントスパン 100mm の 4 点曲げ載荷試験による曲げ強度は、いずれの供試体幅においても 3 等分点載荷から得られた曲げ強度と同程度か上回る結果となった。この理由は、3.2 節に示した長さ方向の寸法効果に類似

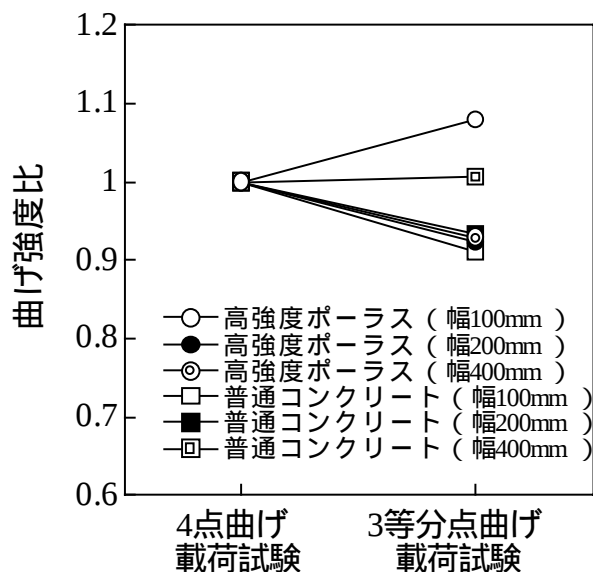


図 - 4 モーメントスパン長の違いによる強度の寸法効果

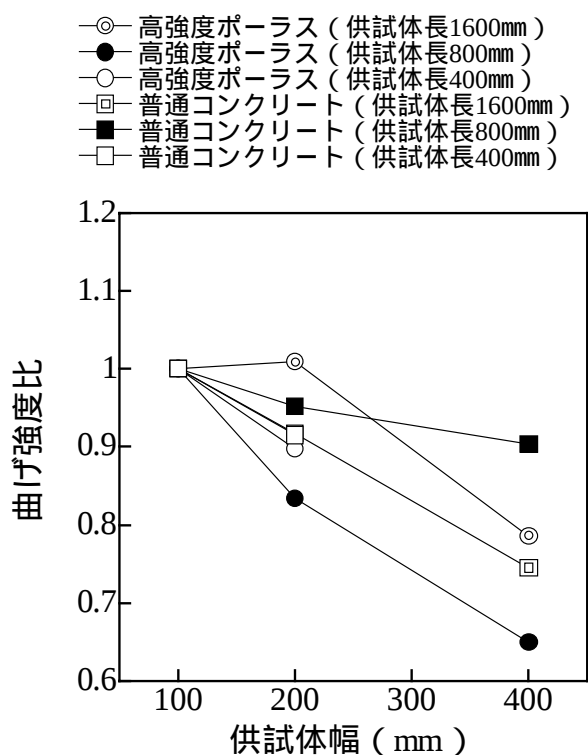


図 - 5 供試体幅の違いによる強度の寸法効果

した強度低下のメカニズムと考えられる。

3.4 供試体幅の違いによる強度の寸法効果

供試体幅の異なる高強度ポーラス及び普通コンクリートの曲げ強度を表 - 4 及び図 - 5 に示す。コンクリートの種類及びモーメントスパンの違いによらず、供試体の幅が大きくなるほど算定される曲げ強度が小さくなった。このこと

は、供試体の幅が大きくなりモーメントスパン内のコンクリートの体積が増加することにより、欠陥となり得る空隙の量が増加し、相対的に弱点が増加するメカニズムによると考えられる。ただし、ポーラスコンクリート、普通コンクリートによる違いは明確ではなかった。

実験データの中には、幅 200mm の供試体から算定される曲げ強度よりも、幅 100mm の供試体から得られる曲げ強度の方が小さいものがある。このことは、ポーラスコンクリートの型枠に接していた部分には、せき板効果により空隙が多い部分が存在し⁹⁾、供試体幅が小さい場合には、ポーラスコンクリートの見かけの断面積が減少しているにも関わらず、曲げ強度の算定に用いる断面積は、外郭による面積が用いられていることによるものと考えられる。はり高さを变化させた強度の寸法効果を検討した実験⁵⁾においても同様の結果が得られている。以上より、ポーラスコンクリートの強度の寸法効果に関しては、供試体の幅もしくは高さが 100mm 程度の範囲においては、強度の寸法効果は小さく、供試体寸法 400mm 程度では強度の寸法効果が大きいという特徴を有しているといえる。

4. 結論

本実験にて得られた結論を以下に示す。

- (1) ポーラスコンクリートの供試体長さが、算定される曲げ強度に及ぼす影響について検討した結果、わずかであるが曲げ強度の寸法効果が確認された。これは、供試体寸法が増加することにより欠陥となり得る空隙量が増えたことによるものと考えられる。
- (2) モーメントスパンの長い供試体から得られた曲げ強度は、短い供試体のものに比べて小さい傾向にあった。
- (3) 供試体幅が大きくなるほど強度の低下量は大きくなった。しかし、供試体寸法を小さくした場合、強度は一樣に大きくなり、せき板効果の影響を受けていると考えられる。
- (4) ポーラスコンクリート供試体は、寸法の増加に伴い強度の低下率が大きくなることから、さらに供試体寸法を大きくすることにより寸法効果は顕著に現れ、強度が大きく低下する可能性が示された。今後、さらなるデータの蓄積が必要である。

参考文献

- 1) 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・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム論文集，2002
- 2) 土木学会：コンクリートの寸法効果と引張軟化曲線，コンクリート技術シリーズ 18，p.2，1997
- 3) 内田裕市，六郷恵哲，小柳治：コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討，土木学会論文集，442/ V-16，pp.101-107，1991
- 4) 小出英夫，外門正直：コンクリート梁の曲げ耐力における部材長寸法効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.559-564，1997
- 5) 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報告集，Vol.17，No.1，pp.765-770，1995
- 6) 国枝稔：コンクリート部材の性能と表面性状，岐阜大学学位論文，pp.143-161，1999
- 7) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書[舗装編]，p.23，2002
- 8) 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
- 9) 越健，島崎磐，国枝稔，六郷恵哲：ポーラスコンクリートの空隙率と空隙分布の評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.1，pp.259-264，1999