

論文 ポーラスコンクリートの曲げ破壊性状

安藤貴宏*¹・栗原哲彦*²・内田裕市*³・六郷恵哲*⁴

要旨：ポーラスコンクリートの力学特性は、骨材やセメントペーストの性質に大きく左右される。そこで配合を3種類に変化させたポーラスコンクリートの曲げ破壊性状について、実験と解析によって検討した。本実験の範囲（はり高さ10～30cm）では、曲げ強度の寸法効果はわずかであった。高性能AE減水剤を混入することによりポーラスコンクリートの空隙率と曲げ強度を改善できた。本研究で採用した推定法によって求めた引張軟化曲線を用いて、曲げ荷重-変位曲線を精度よく再現できた。はり高さが20cmと30cmの供試体の実験結果からは、ほぼ同じ形状の引張軟化曲線が得られた。

キーワード：ポーラスコンクリート、曲げ強度、引張軟化曲線、寸法効果

1. はじめに

ポーラスコンクリートはまぶしコンクリートとも呼ばれ、連続空隙を有し、軽量で、透水性、通風性、断熱性など機能性に富んだコンクリートである。そのため利用の拡大が期待されているが、その力学特性については改善の余地あるいは不明な点が多い。ポーラスコンクリートの力学特性は、粗骨材の粒径分布やセメントペーストの性質に大きく左右される。そこで本研究では、セメントペーストの配合を変化させることで、ポーラスコンクリートの強度改善を試みた。また、ポーラスコンクリートの曲げ破壊性状について、実験と解析により検討した。

2. 実験概要

本試験では、表-1に示すような3種類の配合を用いた。セメントには、比重3.13の早強ポルトランドセメントを使用し、粗骨材には、骨材寸法5～15mmの玉砕石（表乾比重2.61、粗粒率6.29）を使用した。供試体シリーズB、Cにおいては、高性能AE減水剤をセメント量の3%添加した。表-1には、実測した空隙率も示す。

Aシリーズは、一般的なポーラスコンクリートの配合であり、水、セメントおよび粗骨材を一括投入して練り混ぜた。Bシリーズは、高性能AE減水剤を使用して水セメント比を小さくした配合であり、セメントペーストをよく練り混ぜた後、粗骨材を投入してポーラスコンクリートを作製した。練り混ぜには容量100ℓの強制

表-1 示方配合

供試体 シリーズ	W/C (%)	空隙率* (%)	単位量(kg/m ³)			
			W	C	G	A d
A	30	20.3	94	309	1572	—
B	23	28.8	32	159	1625	4.76
C	19	22.8	47	289	1624	8.67

* 独立した空隙は含まれていない

*1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 岐阜大学助手 工学部土木工学科、工修（正会員）

*3 岐阜大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

練りミキサーを使用し、セメントペーストの練り混ぜに5分程度、粗骨材を投入してから1分程度練り混ぜた。Bシリーズでは、練り混ぜ後にセメントペーストが粗骨材から分離しないようペースト量を少なくしたため、強度も小さくなった。そこで、できるだけ水セメント比を小さくし、かつセメント量を増やしたものがCシリーズの配合である。Cシリーズでは、初めにセメント量の92%を使用してBシリーズと同様に練り混ぜた後、最後にセメントペーストの流動性を小さくするために、残りの8%のセメントをミキサーに投入し20秒程度練り混ぜた。どの供試体シリーズにおいてもミキサー内で練り混ぜた後、曲げ供試体ならびに圧縮供試体用型枠に詰め、ハンドバイブレータおよびテーブルバイブレータにより十分締め固めを行った。なお、はり高さ30cmの曲げ供試体の場合には3層程度に分けて締め固めを行った。圧縮供試体は、脱型後、打設面にセメントペーストでキャッピングを行った。

表-2に曲げ供試体の寸法諸元を示す。B、Cシリーズでは、ポーラスコンクリートの寸法効果を検討するため、10×10×40cmの供試体を基準に、はり高さ、スパン長をそれぞれ2倍および3倍とした合計3種類の寸法の供試体を作製した。

載荷試験は、図-1に示すような3等分点曲げ載荷とし、荷重と載荷点変位を計測した。荷重の検出には、容量10tonfのロードセルを用いた。載荷点変位の検出には、ストローク5mmの高感度変位計（感度1/2000mm）を用い、支点沈下の影響を受けないようにするため図-1に示すように供試体の上面と下面に2個ずつ合計4個設置した。なお、ポーラスコンクリートの表面には凹凸があるため、2×2cm程度の薄いアルミ板を供試体の計測点に直接接着して、変位の計測を行った。急激に破壊が生じないように最大荷重以降、必要に応じて除荷、載荷を繰り返した。載荷は原則として打設方向と同じ方向に載荷し、C-10については載荷方向の影響を調べるため、打設方向と直角の方向にも載荷した。供試体は載荷試験直前まで恒温室内（温度20℃、湿度95%）で湿布養生を行い、載荷試験は材齢12～18日の間で行った。

表-2 曲げ供試体の寸法諸元

供試体シリーズ	供試体	幅×高さ×スパン [長さ] (cm)
A	A-10	10×10×30[40]
B	B-10	10×10×30[40]
	B-20	10×20×60[80]
	B-30	10×30×90[120]
C	C-10	10×10×30[40]
	C-20	10×20×60[80]
	C-30	10×30×90[120]

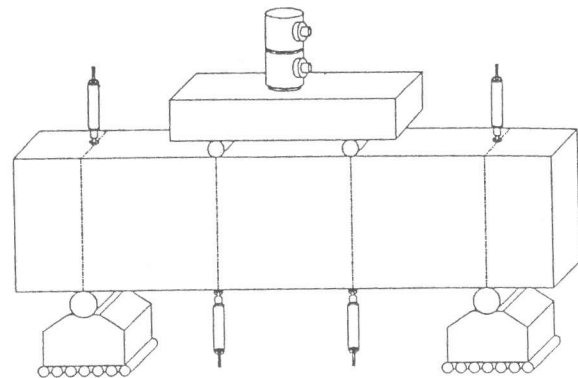


図-1 曲げ載荷試験の概略図

表-3 試験時材齢における強度試験結果

供試体シリーズ	供試体	曲げ強度 (kgf/cm ²)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	材齢 (日)
A	A-10	24.5(3.90)	202(12.9)	1.76×10 ⁵ (7.85)	13~15
B	B-10	20.2(4.67)	136(4.13)	1.53×10 ⁵ (21.7)	13~15
	B-20	21.3(5.58)			
	B-30	18.1(2.70)			
C	C-10	30.1(1.85)	188(4.98)	1.94×10 ⁵ (2.92)	12~13
	C-20	29.0(4.23)			
	C-30	27.0(6.81)			

* 括弧内の数字は変動係数(%)

表-3に試験時材齢におけるポーラスコンクリートの強度試験結果を示す。曲げ強度および圧縮強度は、 $10 \times 10 \times 40$ cmの曲げ供試体および $\phi 10 \times 20$ cmの圧縮供試体から求め、弾性係数は、コンプレッソメータを用いて圧縮供試体から計測した。

3. 引張軟化曲線の推定法

曲げ供試体の荷重-変位曲線から引張軟化曲線を推定する橋高らの提案した方法[1]を用いて、ポーラスコンクリートの引張軟化曲線を推定した。ただし、本研究では軟化開始点を決定するために引張軟化曲線の初期の部分を完全塑性型と仮定し、解析(仮想ひびわれモデルを組み込んだFEM)で得られる初期の荷重-変位曲線と実験値とが最もよく一致するものを軟化開始点とした[2]。解析においてひびわれが1節点ずつ進展するごとに逐次、引張軟化曲線を仮定し、解析で得られた荷重-変位曲線と実験値とが一致するように引張軟化曲線を仮定し直す操作を繰り返した。なお、解析においては、通常のポアソン比の値0.2と実測した弾性係数の値を用いた。

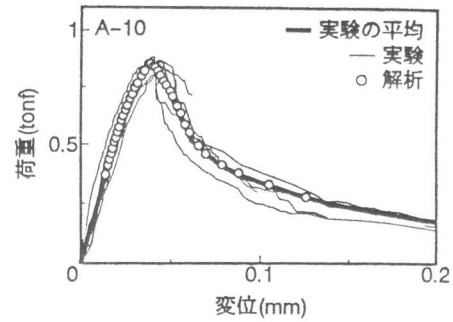


図-2 荷重-変位曲線 (Aシリーズ)

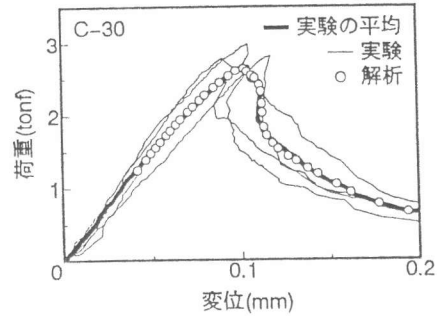
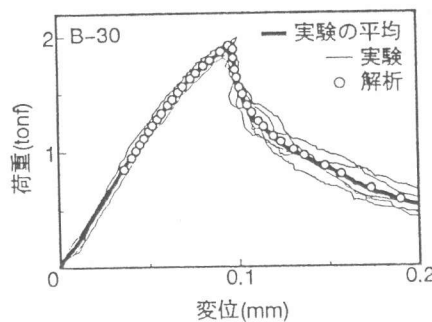
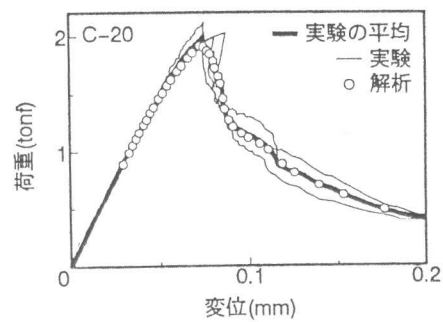
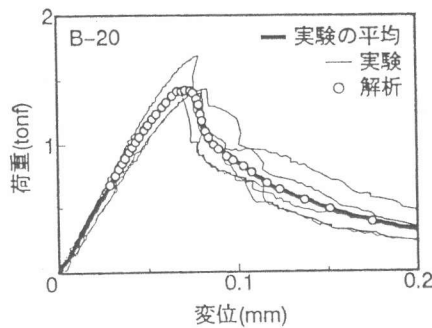
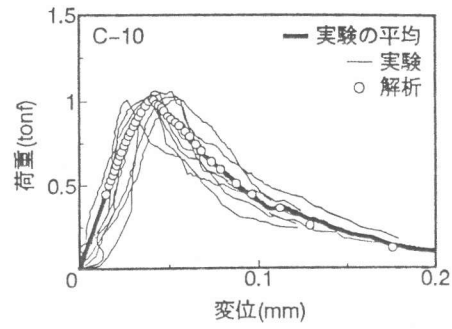
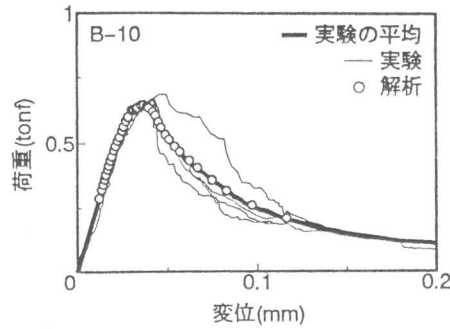


図-3 荷重-変位曲線 (Bシリーズ) 図-4 荷重-変位曲線 (Cシリーズ)

4. 実験および解析結果

4.1 荷重-変位曲線および強度特性

図-2~4に実験から得られた荷重-変位曲線(細線)を示す。

図-2~4からわかるようにポーラスコンクリートの荷重-変位曲線は、ばらつきが大きい結果となった。また、表-3より荷重-変位曲線だけでなく強度、弾性係数等においてもばらつきの大きいものが見られた。ポーラスコンクリートはランダムな連続空隙を有するため、普通コンクリートに比べばらつきが大きくなる傾向にあると考えられる。

Bシリーズではセメント量をAシリーズの約50%としたため、空隙率はAシリーズの1.4倍となったが、圧縮強度と曲げ強度はともにAシリーズより低くなった。強度の低下は、曲げ強度より圧縮強度の方が顕著であった。一方、セメント量はAシリーズとほぼ同程度として水セメント比を小さくしたCシリーズでは、Aシリーズに比べ圧縮強度がわずかに低くなったが、曲げ強度は20%程度大きく、空隙率も10%大きくなった。このことより、高性能AE減水剤を用いてセメント量を減らさずに水量を減らし水セメント比を小さくすることで、空隙率と曲げ強度が大きいポーラスコンクリートを製造できることが明らかとなった。

BおよびCシリーズにおける曲げ強度とはり高さの関係を図-5に示す。なお、曲げ強度は供試体の自重を考慮して補正を行ったものである。はり高さが10cmと20cmでは、曲げ強度は同程度になり、30cmでは10%程度小さくなった。したがって、本実験の範囲では、曲げ強度の寸法効果はわずかであった。C-10の打設面を上にして載荷した場合と打設面が横になるように載荷した場合とで、曲げ強度や荷重-変位曲線の形状に差は認められなかった。

本実験におけるポーラスコンクリートの曲げによるひびわれ性状は、普通コンクリートのものと特に違いはなく、大きなひびわれは1本のみであり、ほぼ直線的に骨材間との接点でひびわれが進展し破壊した。

4.2 引張軟化曲線

図-6~8に曲げ荷重-変位曲線から求められた引張軟化曲線を示す。図-2~4には、引張軟化曲線の推定のために用いた実験の平均の荷重-変位曲線を太線で示し、さらに推定された引張軟化曲線を用いて荷重-変位曲線を解析した結果を○印で示す。解析で得られた荷重-変位曲線は、実験の平均の荷重-変位曲線と完全に一致しており、本研究で採用した引張軟化曲線の推定方法が有効であることが確認された。

各シリーズで推定された引張軟化曲線を比較すると、C-20およびC-30において、軟化した後、引張応力が若干回復する形状を示したが、どの供試体シリーズも引張軟化曲線の形状はほぼ同様であり顕著な差は見られなかった。はり高さが大きい供試体の荷重-変位曲線からは、ひびわれ幅が大きい領域を含む引張軟化曲線を推定することができた。BおよびCシリーズにおいて、引張軟化曲線の寸法効果を見るため、異なる寸法の供試体から得られた引張軟化曲線を用いて荷重-変位曲線の解析を行った。図-9~10に実験から得られた荷重-変位曲線の平均値を

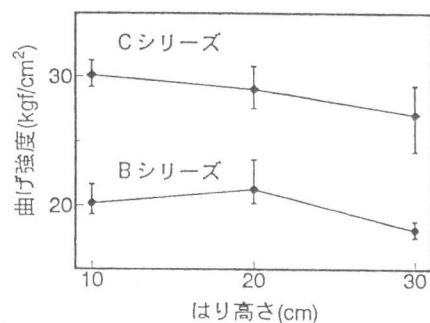


図-5 曲げ強度とはり高さの関係

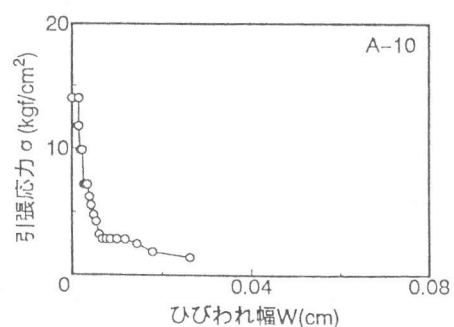


図-6 引張軟化曲線 (Aシリーズ)

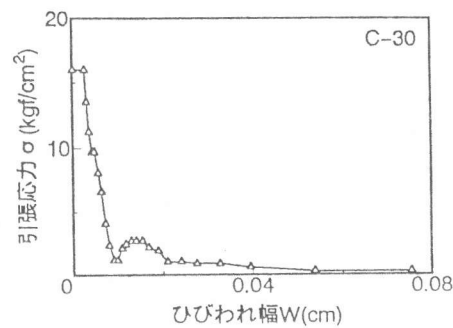
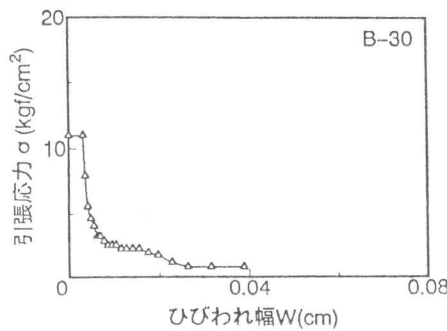
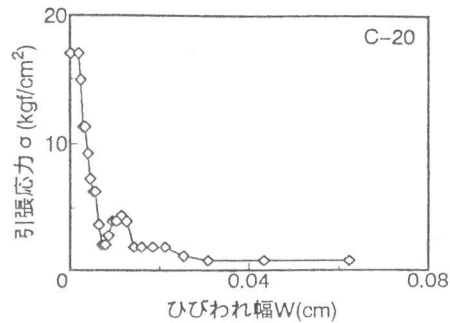
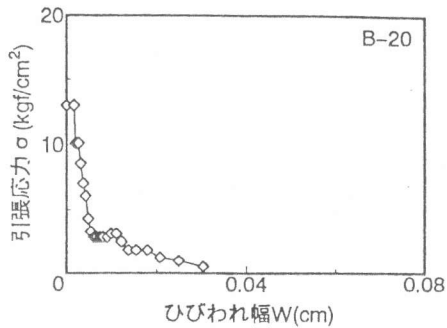
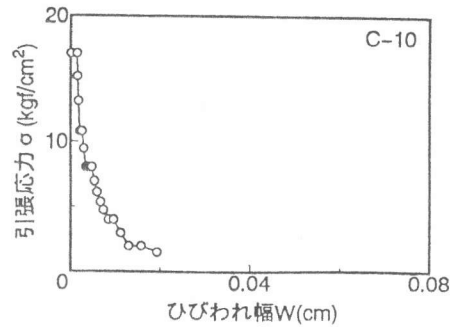
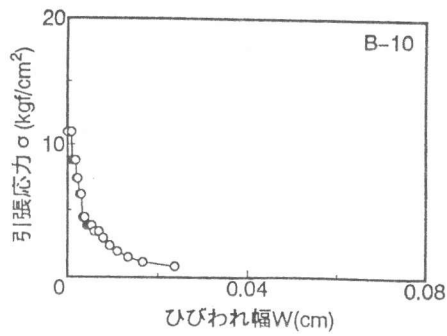


図-7 引張軟化曲線 (Bシリーズ)

図-8 引張軟化曲線 (Cシリーズ)

太線で示す。また、はり高さ10cmの引張軟化曲線を用いて、はり高さ10、20、30cmについてそれぞれ解析した荷重-変位曲線を○印で示し、同様にはり高さ20および30cmの引張軟化曲線を用いて、それぞれのはり高さについて解析した荷重-変位曲線を◇および△印で示す。図-9~10からわかるように、はり高さ20cmと30cmの場合には、どちらの引張軟化曲線を用いても荷重-変位曲線の実験値と解析値はよく一致した。しかし、はり高さ10cmの供試体から得られた引張軟化曲線を用いてはり高さ20cmおよび30cmの供試体の荷重-変位曲線を解析すると、Bシリーズ、Cシリーズともに最大荷重が低くなる結果となった。以上のことより、本実験の範囲では、引張軟化曲線の形状は、はり高さ20cmと30cmの場合に比べ、はり高さが10cmの場合には少し異なっていることがわかる。この違いが寸法に起因する本質的なものか、あるいは小さな供試体では変形の計測が難しいことによるものか、さらに検討が必要であると考えられる。

5. まとめ

ポーラスコンクリートを対象とし、強度特性、曲げ荷重-変位曲線および引張軟化曲線について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

(1)高性能AE減水剤を用いて単位水量を減らすことにより、空隙率が大きく曲げ強度も高いポ

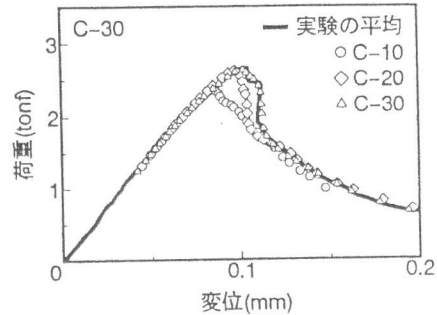
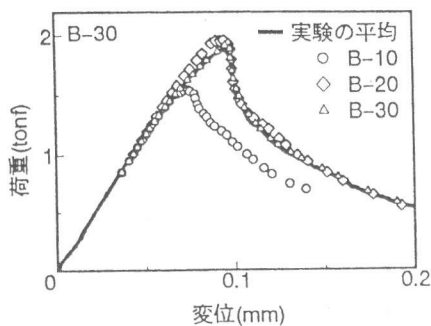
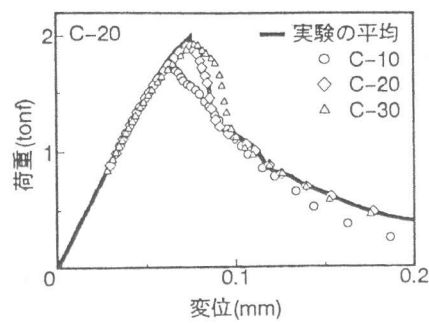
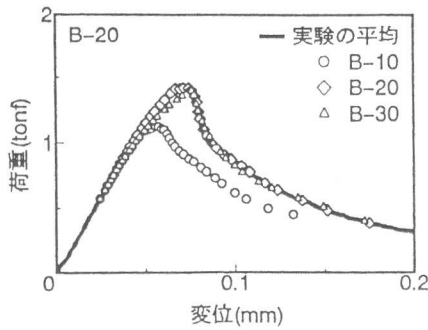
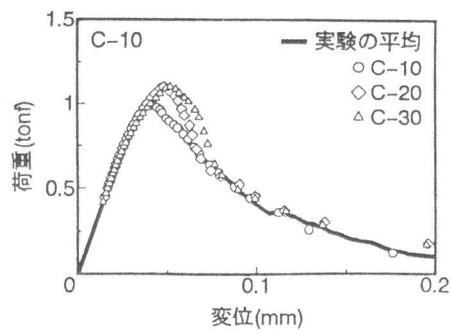
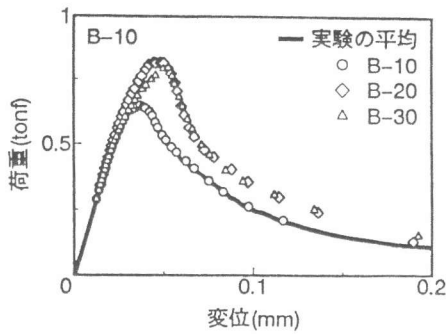


図-9 荷重-変位曲線の解析結果(Bシリーズ) 図-10 荷重-変位曲線の解析結果(Cシリーズ)

ーラスコンクリートを製造することができた。

- (2) ポーラスコンクリートの強度特性および曲げ荷重-変位曲線は、ばらつきが大きかった。
- (3) ポーラスコンクリートの曲げ強度の寸法効果はわずかであった。
- (4) 本研究で採用した引張軟化曲線の推定法は、有効であることが確認された。
- (5) 推定したポーラスコンクリートの引張軟化曲線の形状は、はり高さが20cmと30cmの場合に比べ、はり高さが10cmの場合には少し異なっていた。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費補助金一般研究C(No. 05650432)ならびに財団法人鹿島学術振興財団研究助成金により行われたことを付記して謝意を表する。

〔参考文献〕

- [1] 橘高義典、上村克郎、中村成春：コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析、日本建築学会構造系論文報告集、第453号、pp. 15-25、1993. 11.
- [2] 安藤貴宏、千葉佳敬、栗原哲彦、内田裕市、六郷恵哲：コンクリートの引張軟化曲線の逆解析による推定、土木学会中部支部研究発表会講演概要集、V-34、pp. 609-610、1995. 3