

論文 断面寸法の異なる高強度軽量骨材コンクリートの割裂引張強度

本庄一貴^{*1}・吉武 勇^{*2}・田中 浩^{*3}・浜田純夫^{*4}

要旨：普通コンクリートと比して同程度の圧縮強度を有する高強度軽量骨材コンクリートにあっても、引張強度は普通コンクリートのそれに比べ低くなる傾向にある。そのようなコンクリートにおいては、特に引張強度の適切な評価が必要とされる。本研究では、軽量骨材コンクリートの引張強度特性を適切に評価するため、断面寸法の異なる軽量骨材コンクリートについて割裂引張強度試験を行った。その結果、軽量骨材コンクリートでは断面寸法が大きくなっても、普通コンクリートのような強度低下はほとんどなく、骨材の破壊に起因した割裂引張破壊の可能性が窺えた。

キーワード：高強度軽量骨材コンクリート、割裂引張強度、寸法効果

1. はじめに

一般的なコンクリートの強度特性の評価は、ほとんど圧縮強度試験のみによって行われているのが実情である。それに対して引張強度は、ひび割れ発生や終局耐力評価において重要な要因のひとつであるにも拘わらず、その特性は無視されることが多い。これは、引張応力に対して脆弱なコンクリートのような材料では、その圧縮強度のみを耐荷性能として評価する方が適切とされてきた背景がある。また圧縮強度試験に比べ、引張強度試験は、載荷板～供試体の界面(接触面)処理や載荷方法に強く影響を受け、試験が容易に行えないことも原因のひとつとなっている。

例えば、一軸応力状態として純引張強度が求まる直接引張試験は、載荷板と供試体の接合が同強度の大きな支配要因となり、また二次曲げの影響を取り除くことが極めて困難な方法である。そこで、一般にコンクリートや岩石のような材料においては、圧縮強度に比して引張強度が極めて低い特性にあることから、その引張強度の評価にあたり、割裂引張強度試験がしばし

ば採用されている。

この割裂引張強度試験は、引張強度試験の中においても、一般に強度管理用として作製される円柱供試体(φ100～150mm程度)を特別な処理をすることなく、直接用いることができ、極めて簡便な方法である。この割裂引張強度試験では、骨材(量・寸法)の影響や供試体寸法の影響が強く表れる試験方法として知られ、コンクリートの割裂引張強度に及ぼす寸法効果について、これまで多くの検討がなされてきた¹⁾²⁾。

近年では、コンクリート構造物への付加機能のひとつとして、高強度化・軽量化が推進され、特に低吸水性の高強度軽量骨材が開発されて以来、その将来的な用途拡大が望まれるようになった。ここで、このような高強度軽量骨材コンクリートの特性として、圧縮強度は天然骨材によるコンクリートと遜色ないまでに発揮できるものであるが、引張強度は必ずしもそのような傾向にないことが知られている³⁾。純せん断強度を主眼とした著者らの研究⁴⁾においても、各種コンクリートの強度特性と純せん断強度特性との相違を求めらる中で、高強度軽量骨材コンクリー

*1 山口大学大学院 理工学研究科 社会建設工学専攻 (正会員)

*2 山口大学 工学部 社会建設工学科 講師 博(工) (正会員)

*3 株式会社栗本鐵工所 大阪臨海工場 鉄構事業部 博(工) (正会員)

*4 山口大学 工学部 社会建設工学科 教授 Ph.D. (正会員)

表-1 使用材料

	セメント(C)	細骨材(S)	粗骨材(G)		混和剤(Ad)
使用材料 および主原料	早強ポルトランドセメント	北九州 若松産海砂	真珠岩系 人工軽量骨材	山口県宮野産 安山岩碎石	高性能 AE 減水剤
密度(g/cm ³)	3.13	2.60	0.85	2.70	1.05
吸水率(%)	——	1.19	5.0 以下	0.64	——

表-2 供試体の形状寸法

直径(mm)	長さ(mm)	長さ/直径
50*	100	2.00
75*	150	2.00
100	200	2.00
150		1.33
200		1.00
240		0.83
300		0.67

*比較参考用

表-3 配合条件

	W/C (%)	単位量(kg/m ³)			
		W	C	S	G
軽量骨材	30	160	533	709	295
コンク	45	160	355	774	322
リート	60	160	267	806	336
普通コン	30	160	533	709	937
	45	160	355	774	1023
	60	160	267	806	1066

トは高い圧縮強度特性を示すものであったが、割裂引張強度の増進はあまり望めず、結果的に脆度係数(圧縮強度/引張強度)が 20 以上になるなど、引張応力に対して非常に脆弱なものとなった。このようなコンクリートにおいては、既往の圧縮強度との関係式から求まる推定値を大きくはずれることから、特に引張強度特性を適切に把握しておく必要がある。

本研究では、高強度軽量骨材コンクリート(以下、単に「軽量骨材コンクリート」と表す)の引張強度特性を求めるべく、最も一般的な割裂引張強度試験を実施した。特に普通コンクリートとの特性比較を行いながら、供試体の断面寸法が及ぼす割裂引張強度への影響について実験的な評価を試みた。

2. 実験条件

2.1 実験供試体

本研究の割裂引張強度試験において、用いた供試体形状は、供試体長 200mm を共通とする直径 $\phi=100\text{mm}$, 150mm , 200mm , 240mm , 300mm の円柱供試体である。またコンクリートの割裂引張強度試験としては、一般的な割裂引張強度試験で行われる供試体寸法より小さいものであ

るが、参考データを得る目的から、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$, $\phi 75 \times 150\text{mm}$ の円柱供試体も同時に作製した。これらのうち、直径 $\phi=50 \sim 150\text{mm}$ までは鑄鉄製の規格型枠を用い、直径 $\phi 200\text{mm}$ 以上の供試体では、塩化ビニルパイプを切断し、これを型枠として使用した。

2.2 使用材料

本研究で作製したコンクリートの主要構成材料を表-1 に示す。本研究では、軽量骨材として真珠岩系微粉末を主原料とした造粒型人工軽量骨材(密度 0.85g/cm^3 , 最大寸法 15mm)を採用した。真珠岩系軽量骨材は、微粉砕した真珠岩に発泡材、保形材などを混合した原料を高密度造粒し、中温焼成で焼結させた後、高温焼成で発砲させて製造したもので、骨材中に微細な閉気孔を形成し、従来の膨張頁岩系軽量骨材に比して骨材の吸水特性および強度特性が著しく改善されているものである。さらに比較用として作製した普通コンクリートには、安山岩碎石(密度 2.70g/cm^3 , 最大寸法 20mm)を用いた。ここで使用したセメントはいずれも早強ポルトランドセメントであり、これにポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤を併用している。

本研究では、強度レベルの異なるコンクリートの断面寸法の違いによる割裂引張強度特性を

表-4 コンクリートの強度試験結果

	W/C (%)	割裂引張強度* (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	脆度係数
軽量骨材 コンクリート	30	2.21	36.7	19.8	16.7
	45	1.85	30.2	17.6	16.3
	60	2.01	21.0	16.5	10.4
普通 コンクリート	30	4.98	56.4	39.0	11.3
	45	3.61	41.5	37.2	11.5
	60	3.42	34.2	36.2	10.0

※ φ100×200mm

求めるため、表-3 に示すように W/C を 30, 45, 60% の 3 水準としたコンクリートを作製した。なおこれらのコンクリートは、いずれもセメント質量に対し、高性能 AE 減水剤を 0.5~1.0% 添加し、空気量は 5% と設定した。

コンクリートの練り混ぜは、全て強制練りミキサ(容量 0.1m³)を用いて行った。この打設では、セメントと細骨材を投入し 60 秒間空練り後、水および高性能 AE 減水剤を加えてさらに 60 秒間の練混ぜによりモルタルを作製した。その後粗骨材を加え 120 秒間練り混ぜを行った。なお、軽量骨材はプレウェッティング(24 時間吸水)を施し表乾状態として用いた。供試体は全て材齢 1 日で脱型し、試験材齢 7 日まで 20℃水中養生を施した。

2.3 実験方法

本研究では油圧式万能試験機(Max:980kN)を用い、基本的に JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準じて割裂引張強度試験を行った。さらに、作製したコンクリートの基本物性を求めるため、φ100×200mm の円柱供試体を用いて、各配合 3 体ずつの圧縮強度・圧縮ヤング係数の測定を行った。なお、いずれの試験も材齢 7 日で実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 割裂引張強度と圧縮強度・純せん断強度

本研究では、断面寸法の影響を評価するに先立ち、標準的な試験供試体寸法(φ100×200mm)について、その強度特性を調べた。φ100×200mm 供試体を用いて求めた各コンクリートの

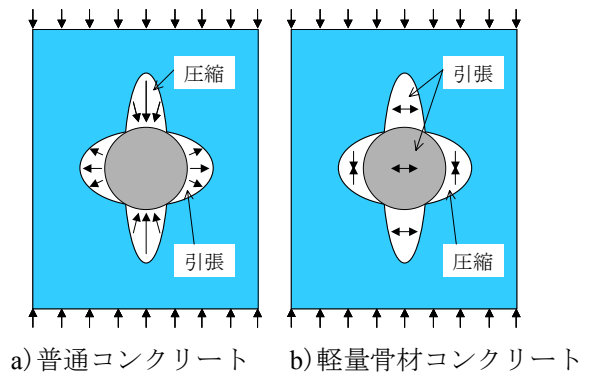


図-1 骨材周辺の応力状態図

圧縮強度および割裂引張強度を表-4 に示す。

ここで、各コンクリートの脆度係数に着目すると、普通コンクリートが 10~11 程度とほぼ一定の傾向を示すのに対し、軽量骨材コンクリートでは 10~17 程度まで広範な値を示すものであった。これは、φ100×200mm を用いた軽量骨材コンクリートの強度試験では、W/C に応じて圧縮強度が 21~37N/mm² まで変化しているにも拘わらず、割裂引張強度特性は 2N/mm² 前後でほぼ一定傾向を示したことによるものである。

一般に、普通骨材のヤング係数は母材であるモルタルマトリックスのヤング係数よりも大きいことが知られている。そのため、圧縮荷重下では、外力に対して軽量骨材はモルタルマトリックスにほぼ追従して変形するのに対し、普通骨材はモルタルマトリックスの変形に追従できないため、骨材周辺の両者の応力状態は図-1 のようになると考えられている⁵⁾。すなわち、軽量骨材コンクリートは普通コンクリートと異なり、骨材自体の破壊から部材としての破壊に至る影

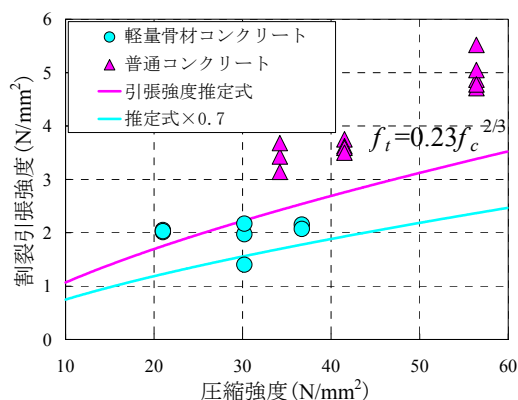


図-2 推定引張強度と割裂引張強度結果

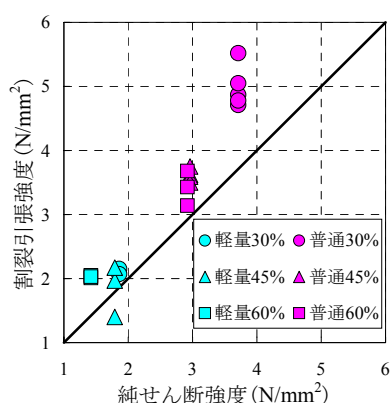


図-3 純せん断強度と割裂引張強度

響が高いことが報告されている⁵⁾。なお、本研究の荷重過程においても、軽量骨材コンクリートでは、比較的低い荷重レベルから骨材破壊を示す破壊音の発生が顕著に認められた。

このとき圧縮荷重下では、局部的に骨材あるいはその近傍が破壊に至っても、その周辺にあるモルタルマトリックスが応力負担するため、部材としての耐荷性能は瞬時に低下するものではなく、モルタルマトリックスの強度増加に応じて、コンクリート部材としての強度は向上する。これに対して、引張荷重下(引張応力作用下)では、骨材自体の破壊が部材としての耐力低下に及ぼす影響は大きいことが予想される。

これまで多くの研究において、コンクリートの引張強度と圧縮強度には相関性があるとの観点から、圧縮強度を基にした引張強度推定式⁶⁾が提案されてきた。しかしながら、ここで示される推定式は、モルタルマトリックス強度より骨材強度が十分に高く、骨材破壊が生じにくい

普通コンクリートから得られたものがほとんどである。

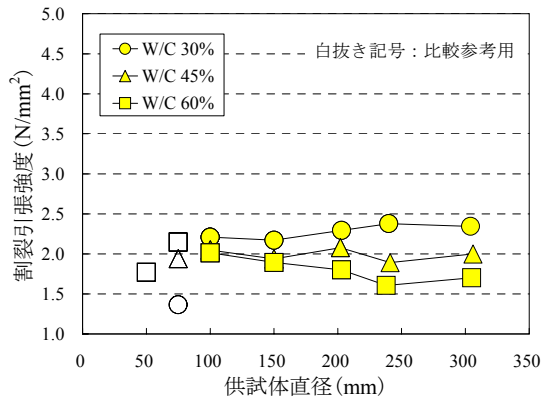
そのため、図-2の引張強度推定値と割裂引張強度実験値の比較結果において、推定値は圧縮強度増進に伴い大きくなるのに対し、軽量骨材コンクリートの実験値ではほぼ横ばいとなった。軽量骨材コンクリートの低引張強度特性を考慮し、低減補正係数を乗じて、普通コンクリートと破壊に対する影響要因およびその強度特性が異なることから、同推定式による適切な推定は困難であることが窺える。

ここで、既報⁷⁾で示した純せん断試験方法により純せん断強度と割裂引張強度の相関性を求めた(図-3参照)。本来、コンクリートのような材料の純せん断強度は、ポアソン効果により僅かに小さくなるが、概ね(一軸)引張強度と等しい値を示すものである。そのため、割裂引張強度においても、純せん断強度との相関性は高く、配合が異なっても一定強度値を示す軽量骨材コンクリートの割裂引張強度に対して、純せん断強度も同様に強度一定傾向を示し、両者間の差異は±20%程度と比較的小さいものであった。

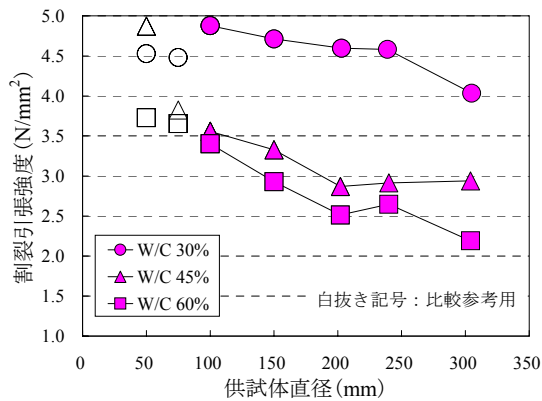
3.2 断面寸法の異なる供試体の割裂引張強度

先述の軽量骨材コンクリートにおける割裂引張破壊機構の推察から勘案すれば、断面寸法が異なる場合においても、その引張強度特性には大きな変化が生じにくいことが予想される。そこで本研究では、断面寸法の異なる軽量骨材コンクリートの割裂引張強度特性について実験的評価を試みた。

W/C=30~60%における a) 軽量骨材コンクリートおよび b) 普通コンクリートの供試体寸法に伴う割裂引張強度の変化を図-4に示す。b)に示す普通コンクリートの試験結果では、W/C=30%において強度低下傾向が鈍くなるものの、供試体の断面寸法が大きくなるに従い割裂引張強度は著しく低下する傾向にあり、既往の研究で指摘される寸法効果の影響が認められた。特にφ100mmの供試体による強度試験結果に比して、φ300mmの供試体では約15~40%程度の強度低



a) 軽量骨材コンクリート



b) 普通コンクリート

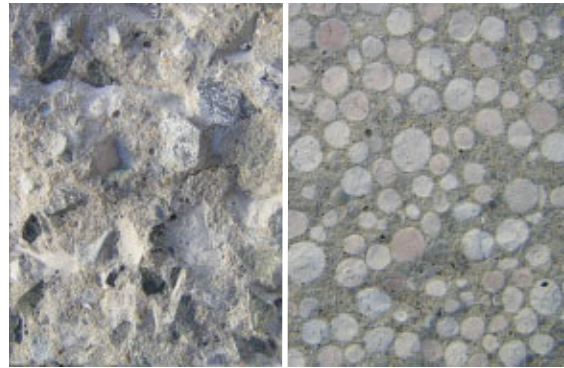
図-4 断面寸法の異なる割裂引張強度

下であった。

一方、軽量骨材コンクリートは W/C=60%において、若干の強度低下傾向がみられたものの、断面寸法の増大に伴う割裂引張強度の低減はほとんどなく、W/C=60%および45%では、φ100mm供試体の結果を基準としてほぼ横ばいであり、W/C=30%に至っては、むしろ割裂引張強度が増加する傾向にあった。

なお、写真-1 に示す割裂破壊断面に着目すると、普通コンクリートでは粗骨材は全く破損することなく残存し、著しい凹凸がみられたのに対し、軽量骨材コンクリートでは破断面における軽量粗骨材が割裂破断しており、その破壊面はほぼ平滑なものであった。

本研究において普通コンクリートとして用いた粗骨材は、安山岩砕石であり、その表面形状は造粒型の人工軽量骨材に比べて、非常に角張ったものである。そのため、粗骨材どうし噛み



a) 普通コンクリート b) 軽量骨材コンクリート

写真-1 試験後の破壊断面

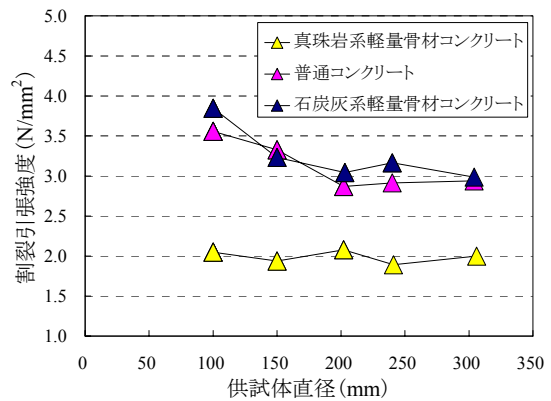


図-5 割裂引張強度特性に及ぼす粗骨材の影響

合わせ作用が生じ、特に断面寸法が小さい場合、その効果が相対的に大きくなる傾向にある。逆に断面寸法が大きくなると、粗骨材の最大寸法は相対的に小さくなり、粗骨材間の噛み合わせ作用による抵抗が小さくなるものと考えられる。

さらに、断面寸法が大きくなるにつれ、破断面における欠陥の存在率は高まるため、同箇所を起点とした破壊が進行し、割裂引張強度の低下をもたらすものと推察される。

一方、本研究で使用した軽量骨材の形状は球形であり、粗骨材間の噛み合わせ効果はほとんど期待できない。また、粗骨材の強度が母材であるモルタルマトリックスより小さいことから、本研究で行った軽量骨材コンクリートの割裂試験では、いずれも粗骨材の圧裂破壊現象を起点にコンクリート全体が割裂引張破壊に至ったものと予想される。そのため、これらの軽量骨材コンクリートでは、断面寸法が変化した場合においても、粗骨材寸法の相対的な効果はあまり

影響せず、且つ破壊の起点が粗骨材そのものであることから、割裂引張強度がほぼ一定の傾向を示したものと推察される。但し、W/C が大きくなるにつれ、モルタルマトリックスに生じる欠陥確率は高くなることが予想されるため、これらのコンクリートにおいては、一部粗骨材を起点とした破壊ではなく、このような欠陥部からの破壊となった可能性も考えられる。

ここで、断面寸法が変化する際の割裂引張強度特性に関し、粗骨材の影響を評価するため、先述の 2 種類のコンクリートに加え、石炭灰系軽量骨材(密度 1.85g/cm^3 , 最大寸法 15mm)を用いた W/C=45%の軽量骨材コンクリートの割裂引張強度特性を図-5 に示す。なお、この石炭灰系軽量骨材は、先の軽量骨材に比して約 2 倍以上の密度を有し、且つより高強度な材料である。

図-5 に示すように、この軽量骨材コンクリートの強度性状は、むしろ普通コンクリートのそれに近く、割裂破壊面においても、残存骨材による凹凸がみられた。W/C=45%の結果に限られるが、同コンクリートの割裂引張応力状態においては、コンクリートとしての破壊が骨材自体の破壊のみに起因するものではないことが窺える。換言すれば、先述の軽量骨材コンクリートの割裂破壊機構に関する考察は、本研究で主として用いた軽量骨材に限られるものであり、軽量骨材コンクリートの割裂引張強度においては、モルタルマトリックスの強度と骨材強度の双方のバランスが影響を与えるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、高強度軽量骨材コンクリートの引張強度特性を適切に評価するために、異なる断面寸法の供試体における割裂引張強度特性について、普通コンクリートとの比較を交えながら検討を試みた。本研究の範囲内で得られた知見を以下に要約する。

(1) 真珠岩系軽量骨材コンクリートの割裂引張強度は、W/C に拘わらず 2N/mm^2 程度とほぼ一定値を示したことから、既往の圧縮強度に

基づく引張強度推定式での評価は困難である。

- (2) 真珠岩系軽量骨材コンクリートにおける割裂引張強度と純せん断強度の相関性は比較的高く、その差異は $\pm 20\%$ 程度であった。
- (3) 真珠岩系軽量骨材コンクリートでは断面寸法が大きくなっても、普通コンクリートのような強度低下はほとんどなく、骨材の破壊に起因した割裂引張破壊の可能性が窺えた。
- (4) 石炭灰系軽量骨材コンクリートでは、普通コンクリートに近い強度性状を示したことから、軽量骨材コンクリートの割裂引張破壊はモルタルマトリックス強度と骨材強度の双方に影響を受けることが考えられる。

参考文献

- 1) 長谷川俊昭, 塩屋俊幸, 岡田武二: コンクリートのひび割れと寸法効果, 大型コンクリート円柱供試体の割裂引張強度, セメント・コンクリート, No.474, pp.6-20, 1986.8.
- 2) 土木学会コンクリート委員会寸法効果小委員会: コンクリートの寸法効果と引張軟化曲線, 土木学会コンクリート技術シリーズ, No.18, 1997.5.
- 3) 日本コンクリート工学協会: 高性能軽量コンクリート委員会報告書, pp.59-60, 2000.8.
- 4) 田中 浩, 吉武 勇, 山口佳起, 浜田純夫: 純せん断力を受けるコンクリート要素の強度に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.746/V-61, pp.205-214, 2003.11.
- 5) 石川雄康, 國府勝郎, 森 大介, 岡本享久: 高性能軽量骨材を用いたコンクリートの破壊挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.725/V-58, pp.1-13, 2003.2.
- 6) 例えば土木学会: コンクリート標準示方書【構造性能照査編】, p.21, 2002.3.
- 7) 田中 浩, 吉武 勇, 山口佳起, 浜田純夫: 単純せん断力を与える簡易型載荷装置の試作, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.1003-1008, 2003.7