

論文 コンクリート要素の純せん断強度に与える粗骨材の影響

稲森 あゆみ^{*1}・吉武 勇^{*2}・久部 修弘^{*3}・浜田 純夫^{*4}

要旨：コンクリートのせん断強度に関する研究は、部材レベルのものがほとんどであり、材料強度特性としての要素レベルに関する検討は少ない。コンクリートのせん断破壊は、要素レベルのひび割れが発生・進展することから決定されるため、コンクリート要素のせん断強度の定量化は重要と考えられる。そこで本研究では、コンクリート要素の純せん断強度を定量化すべく、特に粗骨材の種類や量がおよぼす影響について実験的検討を試みた。その結果、比較的高強度の粗骨材を用いる時、粗骨材量の増加に伴い噛み合わせ効果が顕著となるため、純せん断強度が大きくなることが確認された。

キーワード：純せん断強度，コンクリート要素，粗骨材，軽量骨材，噛み合わせ

1. はじめに

コンクリートのせん断強度に関する研究の多くは、RC ディープビームやRC パネルといった部材レベルを中心としたものであり¹⁾、せん断破壊の起点となる要素レベルにおける検討はほとんどみられない。また、コンクリートのような引張力に弱い材料では、せん断破壊より先に主引張応力による引張破壊が生じることから、材料強度としてのせん断強度は定義されていない^{2),3)}。そのため、コンクリート材料において、要素レベルにおけるせん断強度特性についての検討がほとんどなされてこなかった。

しかしながら、コンクリート部材におけるせん断破壊は、要素レベルのひび割れが発生・進展することから決定されるため、コンクリート要素のせん断強度の定量化は重要と考えられる。ところが、コンクリートのせん断強度を求める試験方法は標準化されておらず、これまでいくつかの方法が提案・実施されてきた^{2),3)}。これらの試験方法の多くは、単純にせん断力のみを負荷できる構造(純せん断)ではなく、詳細には曲げや軸力作用の影響を取り除くことが困難なも

のであった。

純せん断力作用下のコンクリート要素の破壊挙動や終局強度(以下、純せん断強度)の定量化が可能になれば、部材レベルさらには構造物レベルのせん断破壊予測において貢献できるものと考えられる。

ここで純せん断強度に限らず、コンクリートの各種強度には、コンクリートの構成材料およびその配合が大きな影響をおよぼす。本研究では、この中でも特にコンクリート中の粗骨材に着目し、その種類や混入量が純せん断強度におよぼす影響について実験検討を試みた。本論文は、これまで開発を進めてきた純せん断試験装置^{4),5)}を用い、破壊面における粗骨材の架橋効果や粗骨材間の噛み合わせ効果が純せん断強度に与える影響を検討したものである。

2. 実験条件

2.1 純せん断試験装置

本研究で使用した純せん断試験装置の模式図を図-1に示す。この装置は一般的に用いられているアムスラー型万能試験機内に設置し、図-2

*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 助教授 博(工) (正会員)

*3 三菱化学産資株式会社 カーボン・アルミナ繊維事業部 (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)

に示すように一軸載荷荷重を扇形回転載荷治具、およびそれにピン結合した載荷板を介して 45° 方向に分配し、供試体に純せん断力を与えるものである。図-3 に供試体に作用する力の模式図を示す。図-2 の A 点にアムスラー型万能試験機による力 P の $1/2$ が作用すると、要部 O 点を中心とした回転力が与えられる。直線 O-A から 45° の角度に設けた B 点に接線方向力 F (純せん断力) が作用する。純せん断力 F は直線 O-A 間が 190mm, 直線 O-B 間が 200mm であるため、式 (1) のようになる。

$$F = \frac{P}{2} \cdot \frac{190}{200} \quad (1)$$

純せん断応力 τ は純せん断力 F が負荷される載荷板面積で除したもので、式 (2) のようになる。

$$\tau = \frac{F}{170 \times 100} \quad (2)$$

本研究における純せん断強度は破壊時の最大純せん断応力 $\tau_{\max}$ である。なお、この時に扇形回転載荷治具の回転により生じる水平方向の反力は、上下に設置する鋼製フレームにとっている。

2.2 純せん断試験用供試体

純せん断試験に用いる供試体を図-4 に示す。載荷板には、1 枚あたり鋼製ボルト(六角孔付き M12, 埋め込み長さ 18mm)を千鳥状に計 11 本取り付けた。本研究では、純せん断力を負荷する領域を、内部の $170 \times 170 \times 100\text{mm}$ のコンクリート部位とし、その外周部分である鋼製ボルトの埋設部分は、載荷板とコンクリート部位の取り付け部分とみなしている。なお、載荷板による過度な変形拘束の影響を考慮し、厚さ 1mm のゴム板を各載荷板(4 枚)に取り付けた。

2.3 使用材料および配合条件

本研究で作製したコンクリートに用いた材料一覧を表-1 に示す。本研究では普通コンクリートの粗骨材に安山岩碎石(密度 2.70g/cm^3 , 最大寸法 20mm, 粗粒率 6.64)を用いた。また軽量骨材には、極めて低密度で比較的強度の小さい真珠岩系軽量骨材(密度 0.85g/cm^3 , 粗粒率 6.50), お

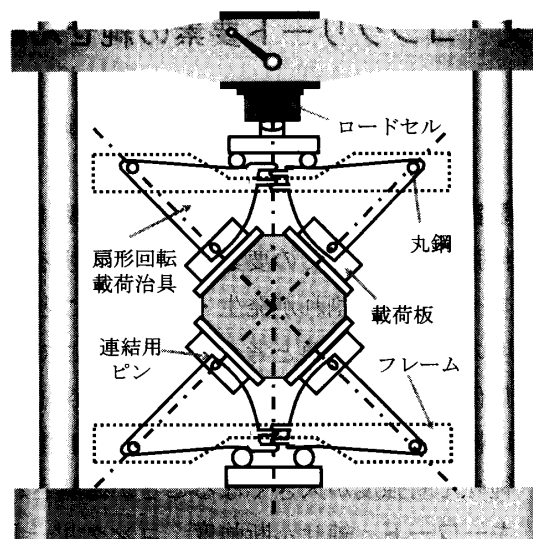


図-1 純せん断試験装置の模式図

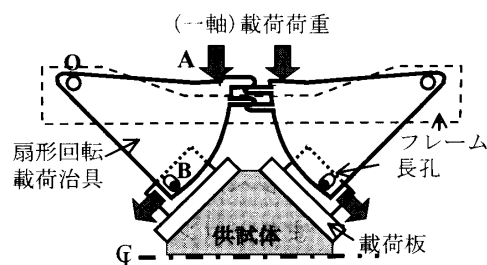


図-2 せん断力導入方法模式図

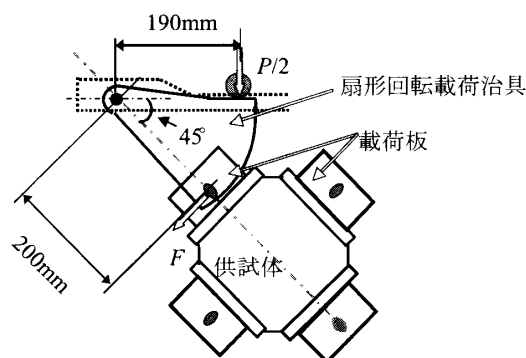


図-3 供試体に作用する力の模式図

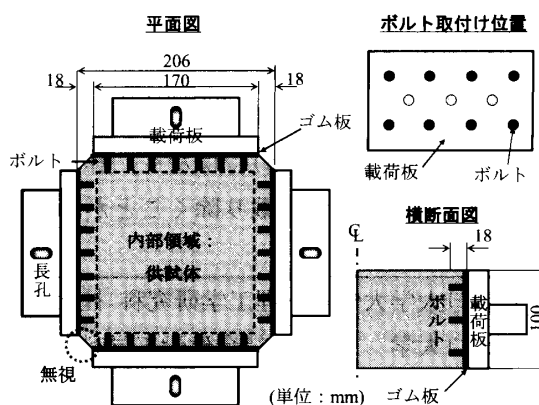


図-4 純せん断試験用供試体

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	早強ポルト	北九州	山口県宮野産	真珠岩系	石炭灰系	高性能 AE
および主原料	ランドセメント	若松産海砂	安山岩碎石	軽量骨材	軽量骨材	減水剤
密度(g/cm ³)	3.13	2.60	2.70	0.85	1.85	1.05
吸水率(%)	—	1.19	0.64	5.0 以下	3.0 以下	—

表-2 粗骨材種類の異なるコンクリートの配合

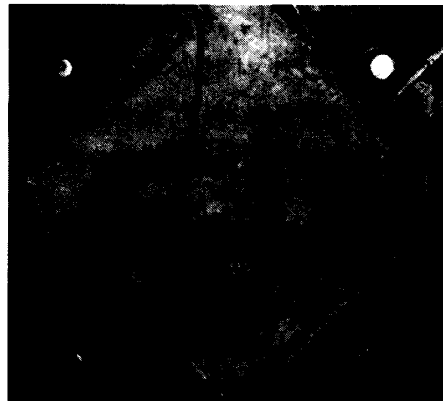
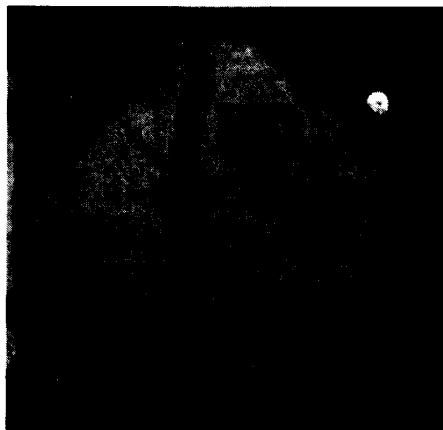
	W/C (%)	単位量(kg/m ³)			
		W	C	S	G
普通 コンクリート	30	160	533	709	937
	45	160	355	774	1023
	60	160	267	806	1066
真珠岩系 軽量骨材 コンクリート	30	160	533	709	295
	45	160	355	774	322
	60	160	267	806	336
石炭灰系 軽量骨材 コンクリート	30	160	533	709	642
	45	160	355	774	701
	60	160	267	806	730
モルタル	30	252	840	1117	—
	45	352	782	906	—

表-3 粗骨材量の異なるコンクリートの配合

粗骨材実積 率比(%)	単位量(kg/m ³)			
	W	C	S	G
0	274	454	1381	—
40	202	337	1021	466
60	160	267	806	730
80	129	215	652	932

よび軽量骨材の中では高強度の石炭灰系軽量骨材(密度 1.85g/cm³)を用いた。この両軽量骨材は、最大寸法 15mm の造粒型のものである。なお、セメントは早強ポルトランドセメントを用い、混和剤にはポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤を用いた。

本研究では、粗骨材種類および粗骨材量を主な実験検討パラメータとして、純せん断強度試験を行った。粗骨材種類を主検討パラメータと

写真-1 モルタルの純せん断破壊の例
(W/C=30%)写真-2 普通コンクリートの純せん断破壊
の例(W/C=30%)

する配合条件、および粗骨材量を主検討パラメータとする配合条件をそれぞれ表-2、表-3に示す。ここで後者の粗骨材量を主検討パラメータとする実験では、粗骨材の実積率(63.0%)に対し、0~80%の粗骨材を混入したものである。なお、本論文では、これらの比を「粗骨材実積率比」と表す。同検討実験では、粗骨材に石炭灰系軽量骨材を用い、水セメント比を 60%一定で実施した。これは、石炭灰系軽量骨材が比較的

高強度であり、天然の骨材に比べ、粒径・粒度のバラツキが小さいことから、骨材量のおおよす影響評価に適していると考えたためである。なお、表-3に示す粗骨材実積率比 0% (=モルタル) は、予め粗骨材実積率比 60% のコンクリートを打設し、ここから粗骨材を取り除くため、5mm 目ふるいでウェットスクリーニングしたものである。

本研究で作製したいずれのコンクリートにおいても、セメント質量に対して高性能 AE 減水剤を 0.5~1.0% 添加し、空気量は 5% と設定した。

2.4 実験方法

本研究における純せん断試験は材齢 7 日に行い、同材齢までは十分な湿布養生を施した。また、強度比較用として用いるシリンダー供試体 ($\phi 100 \times h 200 \text{mm}$) は、材齢 1 日にて脱枠し、20℃ 水中養生を行った。本研究では、アムスラー型万能試験機を用いて、JIS A 1108-1999、JIS A 1113-1999 に準拠して圧縮強度試験および割裂引張強度試験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 粗骨材種類の影響

本研究における純せん断試験では、いずれの供試体もひび割れ発生後、それが進展することで劈開破壊に至る脆性的なものであった。ここで純せん断破壊の一例として、モルタルおよび普通コンクリートの破壊状況を写真-1、写真-2に示す。破壊面に着目すると、モルタルにはコンクリートのような粗骨材間の噛み合わせや架橋効果がなく、粗骨材による純せん断破壊の抵抗性がないため、極めて平滑な破壊面を形成していた。また、真珠岩系軽量骨材コンクリートでは粗骨材のほとんどが割裂破壊し、同様に平滑な破壊面を形成していた⁵⁾。これに対し、石炭灰系軽量骨材コンクリートでは、粗骨材がほとんど破壊せず、破壊面に残存することで凹凸を形成し、普通コンクリートに至っては、粗骨材が全く破壊することなく、破壊面に残存することで、複雑な凹凸面を形成していた。これら

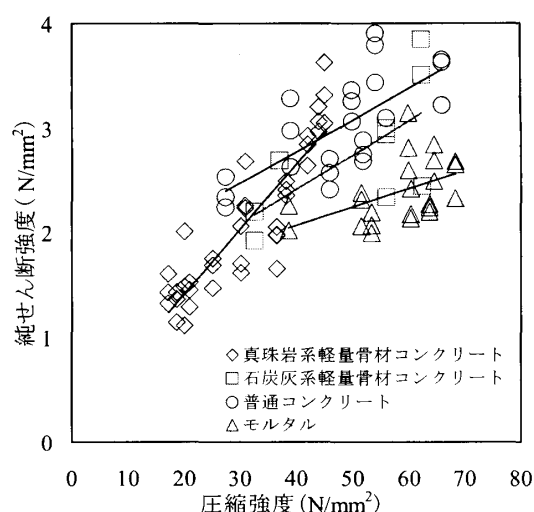


図-5 純せん断強度—圧縮強度

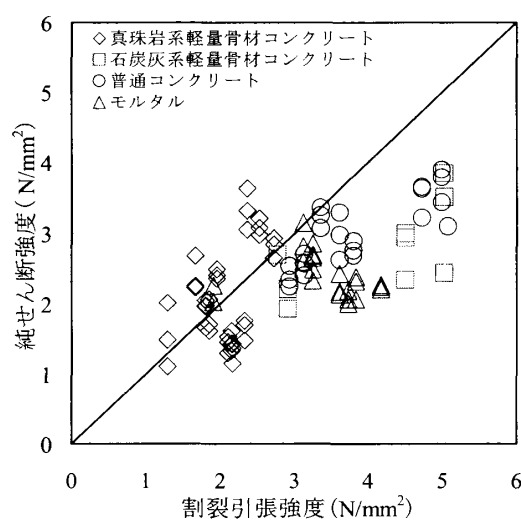


図-6 純せん断強度—割裂引張強度

の破壊面の形成状況から、石炭灰系軽量骨材や砕石といった比較的高強度の粗骨材を使用した場合、少なからず純せん断強度に寄与するものと推察された。

ここで、本研究で行った全ての純せん断強度試験結果を、シリンダー供試体から得られる圧縮強度で整理したものを図-5に示す。いずれのコンクリートにおいても圧縮強度の増加に伴い純せん断強度も増加する傾向にあった。その中でも、真珠岩系軽量骨材コンクリートは、圧縮強度増加に対する純せん断強度の増加割合が他に比べて大きいことが分かる。また、圧縮強度 40 N/mm² 以上における各コンクリートの純せん

断強度に着目すると、同じ圧縮強度レベルにおいてもモルタルが他のコンクリートに比べ $0.5 \sim 1.0 \text{ N/mm}^2$ ほど小さい。これは、コンクリートの純せん断破壊に対して、破壊面における粗骨材の噛み合わせ効果および粗骨材自身の割裂破壊抵抗性によるものと推察される。

純せん断破壊は、負荷するせん断応力の主引張応力成分によって生じるものである。これには、主圧縮応力成分のポアソン効果も同時に作用することになる。したがって理論上のコンクリートの純せん断強度は、引張強度に比して同等以下の値となる⁵⁾。そこで、先述の純せん断強度を割裂引張強度で整理すると図-6に示す結果が得られる。

しかしながら、図-6に示す結果より、真珠岩系軽量骨材コンクリートでは、純せん断強度が割裂引張強度に比して同等以上になる事例もみられた。これに対して、その他のコンクリートは、純せん断強度が割裂引張強度に対して低い傾向を示した。これは、先述のポアソン効果に加え、引張応力を受ける領域長の差異が関与するものと思われる。すなわち、本研究の割裂引張強度試験において主に引張応力を受ける領域長が 100 mm 以下となるが、純せん断試験における同領域長は 265 mm 程度と差異があるため、破壊強度に対する寸法効果が現れたものと考えられる。

一方、真珠岩系軽量骨材コンクリートは、モルタルマトリックスに比べ低強度の粗骨材を含むことから、引張応力が作用した場合、その破壊の起点となりやすい。そして、この粗骨材自身の破壊強度が、供試体寸法の影響以上に支配的となる^{6),7)}。そのため、同様の引張破壊を示す割裂引張強度試験と純せん断試験では、ポアソン効果や供試体寸法の差異があるとはいえ、個々のコンクリート供試体特有の強度性状によって両者が同等あるいは純せん断強度が若干大きい値を示したものと推察される。

3.2 粗骨材量の影響

先述のように、コンクリートの純せん断破壊

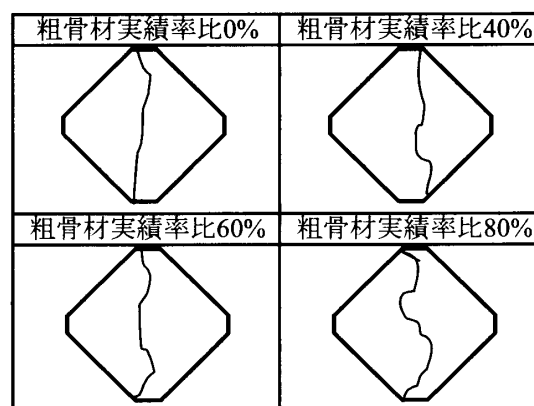


図-7 純せん断破壊のスケッチ

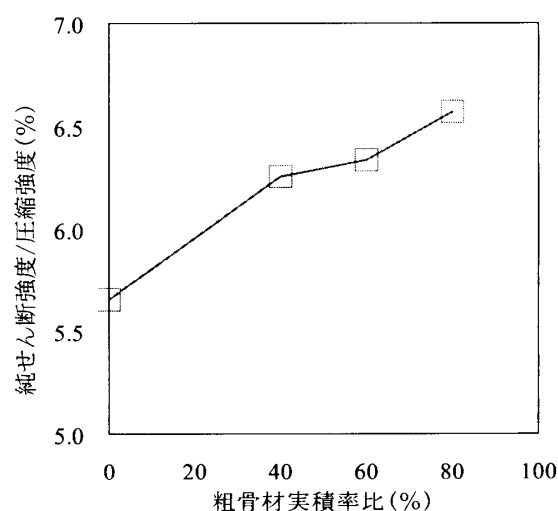


図-8 純せん断強度/圧縮強度—粗骨材実績率比

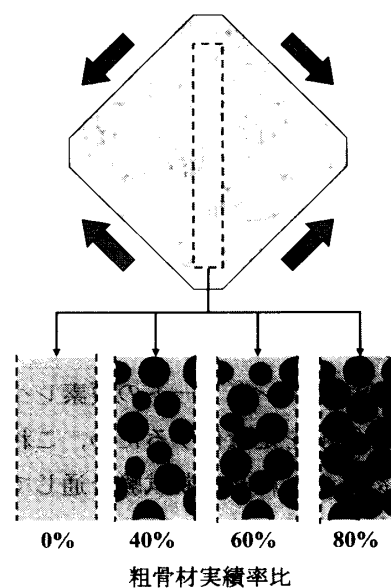


図-9 粗骨材の噛み合わせ模式図

には、粗骨材の噛み合わせ効果が寄与すること

が考えられる。そこで、比較的高強度な造粒型の軽量骨材である石炭灰系軽量骨材を用い、実積率(63.0%)の 0, 40, 60, 80%の粗骨材量とする 4 水準のコンクリートについて純せん断試験を行うことで、純せん断強度におよぼす影響を調べた。

各粗骨材量のコンクリートにおける純せん断破壊状況スケッチの一例を図-7に示す。図-7に示すように、粗骨材実積率比 0%(モルタル)は、ほぼ真っ直ぐなひび割れを伴い劈開破壊に至ったが、粗骨材実積率比の増加に伴い、凹凸が著しい複雑なひび割れ形成を示すものであった。

ここで、コンクリートの圧縮強度に対する純せん断強度の比の平均値を、粗骨材実積率比で整理すると図-8に示す結果が得られる。この結果より、粗骨材実積率比の増加に伴い、圧縮強度に対する純せん断強度の比が増加傾向にあることがわかる。これは図-9に示すように、粗骨材量が増加すると粗骨材が相互接触する確率が高まるため(噛み合わせ効果)、純せん断破壊に対する抵抗性が向上したものと考えられる。特に一軸引張応力状態とは異なり、引張応力方向の 90° 方向から同等量の圧縮応力成分が付加するため、より粗骨材間の噛み合わせ効果が顕著になるものと推察される。結果的に、これらの噛み合わせ効果が小さい部位に迂回してひび割れが形成するため、粗骨材量の増加に伴い、図-7に示すような複雑な凹凸を含む純せん断破壊が生じたものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、コンクリートの要素レベルにおけるせん断強度を定量化するため、これまでに開発を進めてきた純せん断試験を通じて、特に粗骨材の種類や量が純せん断強度におよぼす影響について実験的検討を試みた。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は、普通コンクリートなどに比べ、圧縮強度に伴う純

せん断強度の増加割合が大きい。

- (2) 圧縮強度が同等レベルの場合、モルタルの純せん断強度はコンクリートに比べ小さくなるため、純せん断強度への粗骨材の寄与が推察された。
- (3) 粗骨材量の増加に伴い、複雑な凹凸を含むひび割れが形成される。また、破壊面に対する粗骨材の架橋効果と粗骨材間の噛み合わせ効果が顕著となり、純せん断強度は増加傾向を示す。

参考文献

- 1) 例えば Vecchio, F., J. and Collins, M., P. : The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, *ACI Journal*, Vol.83, No.2, pp.219-231, 1986.3.
- 2) 岩崎訓明, 青柳征夫, 西林新蔵 : 新体系土木工学, 技報堂出版, pp.97-102, 1981.1
- 3) 岡田 清, 六車熙 : コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp.403-407, 1984.2
- 4) 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
- 5) 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.
- 6) 本庄一貴, 吉武 勇, 田中 浩, 浜田純夫 : 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.1599-1604, 2004.7.
- 7) 本庄一貴, 吉武 勇, 田中 浩, 浜田純夫 : 真珠岩系および石炭灰系軽量骨材コンクリートの割裂引張強度における寸法効果, 土木学会第 59 回年次学術講演会, V-479, pp.955-956, 2004.9.