

# 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

田中 浩<sup>1</sup>・吉武 勇<sup>2</sup>・山口佳起<sup>3</sup>・浜田純夫<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社栗本鐵工所 大阪臨海工場鉄構事業部 (〒590-0977 大阪府堺市大浜西町 2-2)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 山口大学助手 工学部 社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

<sup>3</sup>正会員 修(工) 錢高組 大阪支社 土木支店 土木部 (〒550-0005 大阪府大阪市西本町 2-2-11)

<sup>4</sup>正会員 Ph. D. 山口大学教授 工学部 社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

従来の純せん断試験装置は、主に鉄筋コンクリートを対象とされたものが多く、試験の簡便性・汎用性の点で課題を有するものであった。本研究では、できるだけ簡便な装置を用いて、コンクリートに純せん断力を導入する方法を提案するとともに、これを用いて純せん断力作用下におけるコンクリートの破壊挙動に関する実験を試みた。なお、主な研究対象として取り上げたコンクリートは、高強度な人工軽量骨材コンクリートであり、これを中心に普通コンクリートやモルタルの破壊状況の比較を試みた。

**Key Words** : pure shearing stress, lightweight aggregate concrete, cleavage failure, tensile strength

## 1. はじめに

国内外におけるコンクリート構造のせん断(破壊)に関する研究は、はりの斜めせん断破壊やスラブの押し抜きせん断破壊等を主眼とされている。これらのコンクリート構造体に生じる破壊機構は、多くの場合純粋なせん断応力のみによって生じるものではなく、要素レベルで引張応力や圧縮応力が組み合わされて生じる応力状態、あるいは補強材配置に伴う応力負担状態などに影響を受け、部材レベルではせん断破壊形態を辿るといったものである。

一方、コンクリート自身のせん断強度を求めるべく、これまでいくつかの研究においてせん断強度試験法の開発が行われてきた。多くの場合、せん断破壊面を一面あるいは二面とし、強制的にせん断ずれが生じるよう、様々な形状の試験装置・方法が提唱されている<sup>1)~3)</sup>。しかしながら、コンクリートが純粋なせん断力を受けても、その分力からなる引張力がせん断力作用方向と45°をなして作用することで、劈開破壊が生じることが多く、コンクリートのような材料においては、せん断強度という特性値は存在しないことが知られている。コンクリートのせん断強度を求めるには、二軸あるいは三軸強度試験をも

とにモールの応力円群を描き、そこで得られる破壊包絡線とせん断応力軸( $\tau$ 軸)と交差する点をもって表現されるのが実情である。

現状の試験方法では、純せん断力を負荷できる装置として、Collinsら<sup>4)</sup>の「Shear Panel」がつとに有名なものである。また、Collinsらの装置と同様の手段として、金久保らの研究<sup>5)~7)</sup>では、比較的小型な「平板用二軸加力装置」が用いられており、多くの成果が得られている。

これらの試験ではX-Y方向に配置した複数の加力装置を用いて、コンクリート部材に生じる種々の応力状態を再現出来る点で極めて優れたものである<sup>8)</sup>。しかしながら、これらの装置は主に鉄筋コンクリート板といった比較的大型のコンクリート供試体を対象に、多くの加力装置を用いて載荷を行うため、試験の経済性・汎用性という点では課題を有するものと考えられる。また、単に純せん断力を導入する場合を考えると、荷重の高度な制御が必要とされ、より経済性・汎用性に優れた簡易な載荷装置の開発が望まれる。

本研究の主な目的は、①出来るだけ簡便な載荷装置をもって純せん断力を負荷できる方法(装置)を求めること、②純せん断力を受けたコンクリート要素

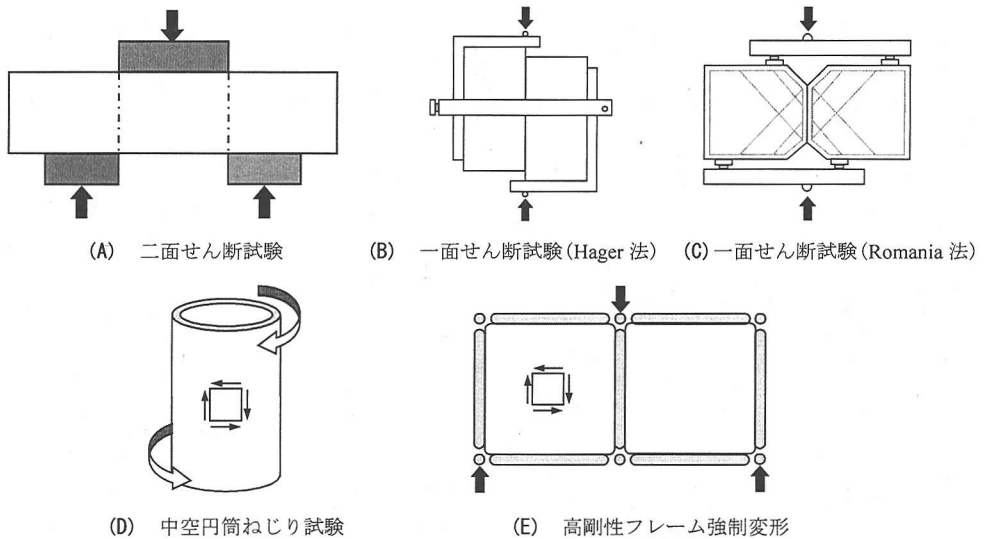


図-1 既往のせん断試験装置<sup>1)~3)</sup>

の破壊挙動を観察・確認すること、さらに③その破壊時強度と圧縮・引張強度等の相関性を明らかにすること、にある。

特に本研究では、普通コンクリートに比べ、引張強度あるいはせん断強度が著しく小さくなる軽量骨材コンクリートのうち、近年開発された独立気泡型軽量骨材を用いた高強度軽量骨材コンクリートも対象に取り入れている。なお、ここでいう「高強度」とは、基本的にコンクリートの圧縮強度を意味するものであり、コンクリート要素の破壊に直接的に拘わる引張強度あるいはせん断強度は、圧縮強度ほど高強度化は期待できない。このようなコンクリートにおいては、直接的に破壊に関与する強度を適切に評価し、設計に関する一資料とすることが肝要と考えられる。本研究で示す純せん断力作用下における各種コンクリートの破壊挙動は、コンクリート構造物のひび割れ進展～破壊現象を解明するための有用な資料になりえるものと思われる。

## 2. コンクリートのせん断試験法

### (1) せん断試験方法の現状

コンクリートのせん断強度を求めるにあたり、最も簡便な試験のひとつに挙げられるのは、はり供試体と上下面に設置した載荷板を用いてせん断面を二面設ける二面せん断試験(図-1(A)参照)である。しかしながら、同試験は載荷板の縁端で局所的な圧縮破壊や曲げひび割れが生じやすく、せん断破壊とは異なるものとなりやすい欠点を有する。

二面せん断試験に対して、図-1の(B),(C)に示すようなHager法やRomania法に代表される一面せん断試験は、せん断力作用方向と破壊すべりが生じる方向が一致するため、せん断破壊という巨視的な破壊現象を捉えるのに有効な試験方法である。ところが、一面せん断試験においても、せん断破壊面に生じる法線応力成分(圧縮力・引張力)の影響を取り除くことは困難であり、厳密には組み合わせ応力状態の破壊挙動を捉えることとなる。また、せん断破壊面に生じるせん断応力の分布は一律にすることは難しく、増厚や補強材の配置など、せん断破壊面以外の部位を補強する必要性もみられ、試験の汎用性に問題が残る。

一方、純せん断応力状態を再現する方法として、中空円筒供試体のねじり(同(D)参照)やコンクリート平板をピン結合した極めて剛なフレームで囲んで強制的にせん断変形を与える方法(同(E)参照)も見受けられる。これらの方法では、コンクリートはせん断力作用面にすべり破壊は生じず、45°方向に生じる引張力の作用によって劈開破壊に至る。この中空円筒のねじりせん断は純粋なせん断破壊が得られるとして、離散物質の地盤材料においても採用されているが<sup>9)</sup>、これをコンクリート要素に応用する場合、供試体の製作が比較的困難であることに加え、供試体寸法を出来るだけ大きくする必要があることから、それに要されるねじりモーメントの与え方や支持方法が難しいといった課題が生じる。また理論上、斜め引張ひび割れが生じる箇所が、外周上のいずれの箇所でも起こりえることは、ある面では利点とも捉えられるが、ひずみの測定等においては多く

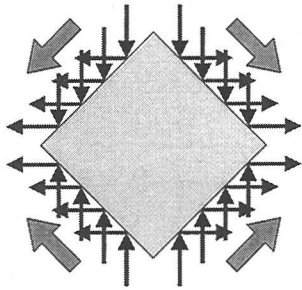


図-2 二軸加力によるせん断力载荷の模式図

の測定点が必要となるなど、様々な実験パラメータを変えて実験するには不利な面も考えられる。

## (2) 純せん断力試験装置

主にRC面部材を対象としているCollinsら、金久保らの試験のように、複数の加力装置を用いてコンクリート面要素にせん断力あるいは様々な直応力を導入する方法(図-2参照)では、加力装置の高度な制御が必要不可欠となる。一方で、各種研究機関等で広く普及しているアムスラー型の載荷装置を用い、載荷荷重をできるだけ簡便な装置をもって純せん断力に変換できるのであれば、複数の加力装置は不要となり、経済的な試験かつ汎用性に優れた試験に成り得るものと考えられる。

そこで、本研究では図-3および写真-1に示すようにコンクリート要素に対して(一軸)載荷荷重成分を二方向のせん断力成分に分配できるような装置を考案・製作した。同装置は、載荷荷重を一旦回転力に変換し、それをせん断力成分に変換する簡易な構造をなすものである。

このせん断試験装置、およびこれに用いるコンクリート供試体は、人力でも設置可能な程度の質量に抑え、できるだけ簡便な装置になるよう配慮した。これにより、広く一軸圧縮強度試験等に用いられるアムスラー型の載荷装置をもって、純せん断試験を行うことができる。

## 3. 純せん断試験装置および実験条件

### (1) せん断力の導入

本研究で考案したせん断試験装置は、図-4に示すように、矩形状の供試体の4辺に取り付けた載荷板～扇形回転載荷治具を介し、(一軸)載荷荷重を供試体の辺方向に変換することで、純せん断力を与えるものである。ここで扇形回転載荷治具は、要部(O点)を中心に回転する機能を有している。なお、載荷板

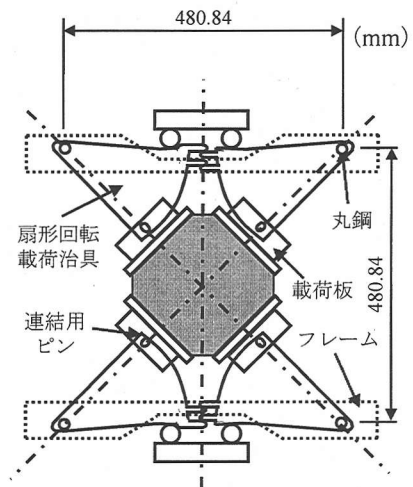


図-3 考案した純せん断試験装置の構成

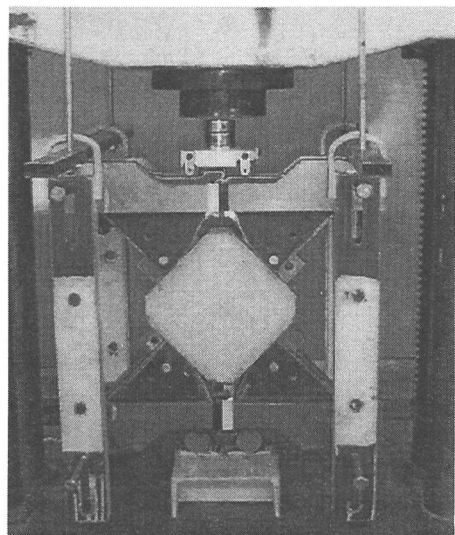


写真-1 セッティング時における純せん断試験装置

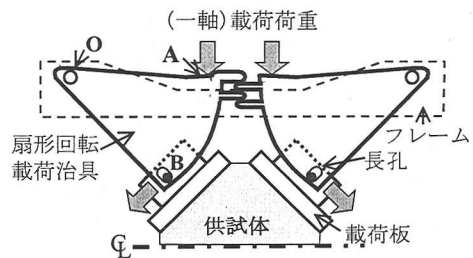


図-4 純せん断力導入方法の模式図

と扇形回転載荷治具はグリスを塗布したピン結合とし、供試体の変形に応じて、せん断力方向に直角な面に軸力が作用しないよう、同方向に長手な長孔と

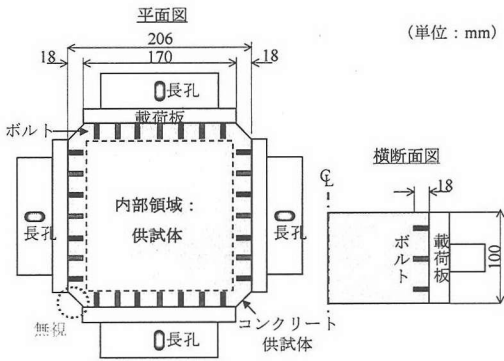


図-5 載荷板の接合方法

している(図-4, 図-5 参照). 与える(一軸)載荷荷重は, コンクリートの強度試験等において一般的に使用されるアムスラー型の載荷装置を用いるため, 本研究で提案する純せん断試験装置は, 専用の加力装置を必要とせず, 比較的小型でかつ経済的な試験になるものと考えられる.

ここで写真-1 には4本の支柱がみられるが, これは装置のセッティングに要するものであり, 載荷荷重に対しては, 応力負担しない構造としている. したがって, 一軸方向の載荷荷重は, 扇形回転載荷治具を介して方向転換され, そのまま供試体へと伝達されるものと考えられる.

## (2) 載荷板の接合方法

本研究で示す純せん断試験装置では, 十分なせん断力を伝達するにあたり, コンクリート供試体と載荷板の接合が重要な要因となる. そこで, 載荷板の接合面にフレッシュコンクリート用接着剤を塗布する手段に加え, 載荷板1枚あたり鋼製のボルト(六角孔付きのM12ボルト)を千鳥状に計11本埋設することで, 載荷板接合の補強を行った(図-5参照). これらのボルトは, コンクリート供試体中に長さ18mmで埋設させ, 隣り合う載荷板からのボルト同士が接触しないように配慮した.

なお, 本研究における載荷板は, 各面1枚ずつの剛な鋼板からなるため, コンクリートとの境界面がせん断変形に影響を及ぼす可能性もある. しかしながら, 本研究では, 比較的小型の供試体を用いた要素試験という観点から, 境界面においてもコンクリートの変形挙動は一様なものとして評価を試みた.

## (3) 供試体

本研究の純せん断試験に用いるコンクリート供試体は, 正方形状(206×206×100mm)の平板のうち, 角部を18mmずつカットした八角形状をなしている.

表-1 使用材料

	セメントC	細骨材S	粗骨材G		混和剤Ad
タイプ	早強ボルトランド	海砂	真珠岩系	安山岩 碎石	高性能 AE 減水剤
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	3.13	2.60	0.85	2.70	1.05
吸水率 (%)	—	1.19	3.0 以下	0.64	—

表-2 配合条件

	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		W	C	S	G
軽量	30	160	533	709	295
コンク	45	160	355	774	322
リート	60	160	267	806	336
モルタル	30	252	840	1117	—
	45	352	782	906	—
普通	30	160	533	709	937
コンク	45	160	355	774	1023
リート	60	160	267	806	1066

※ 混和剤使用量: C×0.01

ここで先述のように, 載荷板に取り付けられた接合補強用のボルトがコンクリート供試体中に埋設されるため, 同領域の応力状態は複雑なものとなる. 本研究では, これらの領域は載荷板を取り付ける際の必要部と捉え, 純粋にせん断力を受ける領域とは別に考えることとした. すなわち, せん断力が作用する領域は, 内部の170×170×100mmに相当するものとし, その外周の枠(18mm)は載荷板の一部とみなして, せん断応力の評価に取り入れていない. 便宜上, 内部の領域を「供試体」と称し, 先述の「コンクリート供試体」とは区別して考えるものとする. なお, コンクリート供試体の四隅部には, せん断力を負担しないコンクリート部位が残されることになるが, せん断力の作用する辺長に比べ, 十分に小さいものと判断されることから無視できるものとした.

## (4) 配合条件と実験パラメータ

コンクリートの使用材料および配合条件をそれぞれ表-1, 表-2 に示す. 本研究では, 特に(圧縮強度に比して)引張・せん断強度が低いとされる人工軽量骨材コンクリートを中心に据え, 圧縮強度が普通・中・高強度となるべく, W/Cを60, 45, 30%の3水準で実験を行った. なお, ここで用いた軽量骨材は, 最も軽量な部類に含まれる真珠岩系の高強度・低吸水性の造粒タイプの人工軽量骨材である. さらに比較用として, 粗骨材以外は同配合の普通コンクリートとモルタルについても実験を試みた. なお, 用い

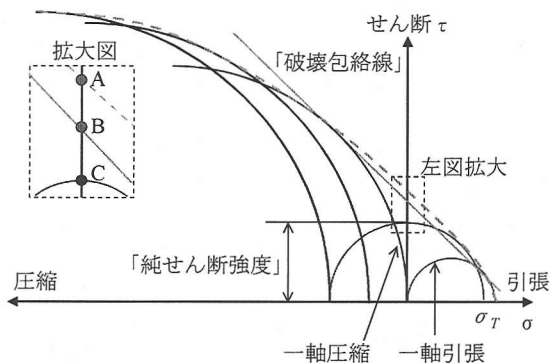


図-6 モールの応力円に基づく純せん断強度

たセメントは早強ポルトランドセメントであり、試験材齢はいずれも7日とした。

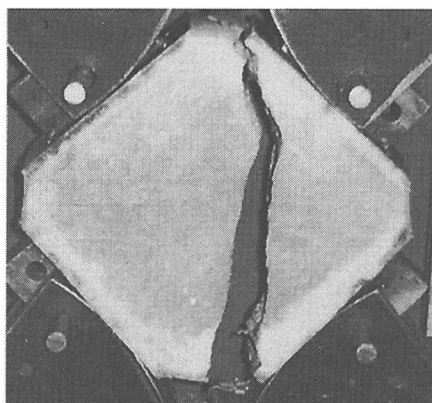
### (5) せん断応力の求め方

本研究では、せん断応力の評価にあたり、各載荷板に導入されるせん断力を、供試体との接触面積で除すことによって求めた。なお、このせん断力は、扇形回転載荷治具を介して伝達されることから、図-4に示すように載荷荷重  $F$  の  $1/2$  荷重が扇形回転載荷治具におけるアーム長比 ( $L_{O-A} : L_{O-B} \approx 190\text{mm} : 200\text{mm}$ ) によって与えられるものである。また、局所的な破壊等によって左右不均等なせん断力が卓越しないよう、左右の扇形回転載荷治具は互いに噛み合わせ部を設け、できるだけ一体となって回転するように配慮している。

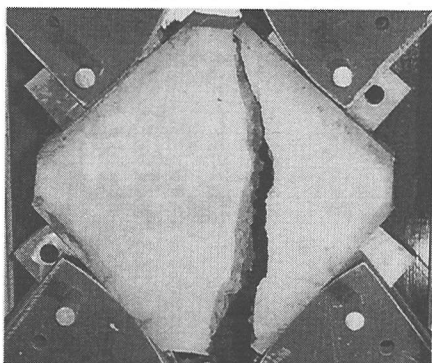
### (6) 純せん断強度について

コンクリートのような材料では、せん断強度という特性値は存在せず、せん断力成分から  $45^\circ$  をなす引張主応力成分によって破壊に至ることが知られている。このことはモールの応力円で考えれば、図-6の模式図に示すように、純せん断力状態の最大値(純せん断強度)は、一軸引張強度の大きさにほぼ等しくなる(厳密にはポアソン効果により僅かに小さい)ことを意味するものである。

一方、これまでコンクリートのせん断強度を求めるべく、様々な試験・方策がとられてきている。例えば、多軸応力状態におけるコンクリートの強度を調べ、モールの応力円群から求まる破壊包絡線と  $\tau$  軸との交点(図-6 拡大図の A 点)を「せん断強度」として求める方法が挙げられる。せん断強度  $\tau$  の評価にしばしば用いられる式(1)などは、(一軸)圧縮強度  $\sigma_c$  と(一軸)引張強度  $\sigma_t$  の応力円双方に接する接線の交点( $k=0.5$  の場合、図-6 拡大図の B 点)を表すものであり、その代表例といえよう<sup>10)</sup>。そのほかにも



(A) 軽量骨材コンクリート (W/C=30%)



(B) 普通コンクリート (W/C=60%)

写真-2 試験後のひび割れ状況

式(1)に準じた形で、係数  $k$  の値が  $0.5 \sim 0.9$  程度とする推定式も提案されている<sup>3)</sup>。

$$\tau = k \times \sqrt{\sigma_c \cdot \sigma_t} = \frac{\sqrt{\sigma_c \cdot \sigma_t}}{2} \quad (k=0.5 \text{ の場合}) \quad (1)$$

しかしながら、これらのせん断強度は、試験方法や求める破壊包絡線によって異なるものであり、ある普遍的な値を表すものではない。すなわち、コンクリートにおけるせん断強度とは、そのコンクリートがおかれている応力状態や破壊包絡線によっても異なるもので、モールの応力円の  $\tau$  軸で表される場合、その定義によって異なるものである。

本研究では、純せん断試験によって求まる破壊時の(最大)せん断応力を「純せん断強度」と定義し、先述のように、圧縮強度レベルが普通・中・高強度のコンクリートにおける「純せん断強度」を求めることとした。この「純せん断強度」は、図-6の拡大図C点に示されるように、基本的に引張強度から求まる絶対値相当の値を示し、定義によって異なるせん断強度の中でも最も小さな値となるものである。

表-3 強度試験結果

コンクリートの種類	軽質コンクリート W/C 30%			軽質コンクリート W/C 30%				
破壊形状								
純せん断強度(N/mm <sup>2</sup> )	2.84	2.64	2.92	3.63	3.31	3.65		
他強度	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	41.9	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	23.4	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	45.1	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	24.4
	割裂引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	2.73	直接引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	1.51	割裂引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	2.37	直接引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	1.71
コンクリートの種類	軽質コンクリート W/C 30%			軽質コンクリート W/C 45%				
破壊形状								
純せん断強度(N/mm <sup>2</sup> )	3.20	2.97	3.06	2.68	2.22	2.25		
他強度	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	44.0	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	23.3	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	30.9	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	19.4
	割裂引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	2.53	直接引張強度(N/mm <sup>2</sup> )		割裂引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	1.67	直接引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	1.14
コンクリートの種類	軽質コンクリート W/C 60%			モルタル W/C 30%				
破壊形状								
純せん断強度(N/mm <sup>2</sup> )	1.48	2.00	1.11	2.69	2.49	2.84		
他強度	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	20.1	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	17.8	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	64.5	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	29.2
	割裂引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	1.29	直接引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	1.09	割裂引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	3.25	直接引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	
コンクリートの種類	モルタル W/C 45%			普通コンクリート W/C 30%				
破壊形状								
純せん断強度(N/mm <sup>2</sup> )	2.25	2.02		2.88	2.68	2.75		
他強度	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	38.7	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	26.5	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	51.9	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	40.6
	割裂引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	1.91	直接引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	1.01	割裂引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	3.80	直接引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	
コンクリートの種類	普通コンクリート W/C 30%			普通コンクリート W/C 45%				
破壊形状								
純せん断強度(N/mm <sup>2</sup> )	3.21	3.65	3.63	2.57	2.71	2.40		
他強度	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	66.0	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	44.7	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	45.9	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	37.8
	割裂引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	4.72	直接引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	3.03	割裂引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	3.14	直接引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	1.78
コンクリートの種類	普通コンクリート W/C 45%			普通コンクリート W/C 60%				
破壊形状								
純せん断強度(N/mm <sup>2</sup> )	3.36	3.25	3.06	2.33	2.24	2.53		
他強度	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	49.9	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	45.3	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	27.4	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	34.2
	割裂引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	3.36	直接引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	2.49	割裂引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	2.94	直接引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	2.25

全ての供試体の破壊形態スケッチを示す。

これらの写真およびスケッチから、本研究で開発した純せん断試験では、いずれの供試体においてもほぼ中央断面近傍において、局所的に縦ひび割れが生じ劈開破壊に至ったことが分かる。これは、与えたせん断力成分のうち、主応力となる引張力成分が破壊に対して支配的であるため、それらの合力によって縦ひび割れが生じたものと推察される。なお、これらの破壊に至るまでの過程において、破壊の前兆を示すような挙動は確認されず、コンクリート強

#### 4. 実験結果および考察

##### (1) 破壊形態

本研究で開発した純せん断試験法によるコンクリート面要素の破壊形態の例として、写真-2に軽量骨材コンクリート(W/C=30%)および普通コンクリート(W/C=60%)の試験後における状況を示す。さらに、表-3には本研究で実施した純せん断試験における



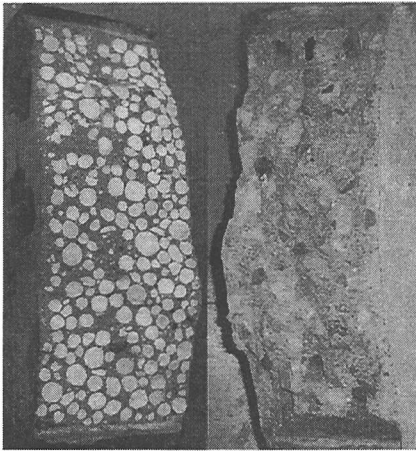


写真-3 試験後の破壊断面  
(左：軽量骨材コンクリート，右：普通コンクリート)

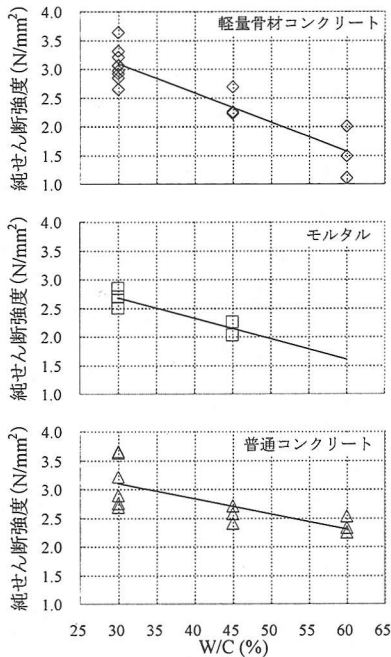


図-7 W/Cに伴う純せん断強度の推移

度に応じた最大荷重点で脆性的に破壊に至るものであった。

特に写真-3に示すように、普通コンクリートでは破壊面に粗骨材がほぼそのままの形で残留しているのに対し、軽量骨材コンクリートでは、破壊面における骨材のほとんどは破壊が生じていた。この傾向は、特に高強度なコンクリートであるほど顕著であった。

## (2) 各種コンクリートの純せん断強度

表-3のスケッチの下端において、各供試体にお

る純せん断強度を示し、さらに各コンクリートの基礎的物性として、圧縮強度、圧縮ヤング係数、(割裂・直接)引張強度を記載した。ここで、同一配合コンクリートにおいても純せん断強度にある程度のばらつきが認められるが、これは打設日異なるなどの供試体製作上の差異やコンクリート材料特性としてのばらつきに加え、破壊面の形状による差異などが影響しているものと考えられる。

各コンクリートの純せん断強度を W/C との関係で表す (図-7 参照)。いずれのコンクリートにおいても、純せん断強度は W/C の増加に伴い低下するものであった。この強度低下の程度を示す回帰直線の勾配に着目すると、軽量骨材コンクリートは、普通コンクリートに比べて小さく、W/C=30%では普通コンクリートと同程度の純せん断強度を有するにも拘わらず、W/C=60%では、普通コンクリートのそれに比べて6割程度の強度であった。なお、モルタルでは粗骨材による抵抗機構がないために、他のコンクリートに比べて若干ながら純せん断強度は低い傾向にあった。このことより、純せん断破壊に対しても、粗骨材の果たす役割は大きく、その強度特性がコンクリートの純せん断強度へ与える影響が著しいものと推察される。

## (3) 純せん断強度と圧縮・引張強度の相関性

本研究では、開発した純せん断試験装置によるコンクリートの純せん断強度が、従来のコンクリート強度試験によって得られる各種強度に対して、どのような相関性があるのか調べるため、提案するせん断強度試験に加えて、圧縮強度試験、割裂引張強度試験および直接引張強度試験を行った。

図-8～図-10に示す各グラフは、これらの試験から得られる強度との相関性を求めた結果である。

### a) 圧縮強度との相関性

図-8には、各コンクリートの圧縮強度と純せん断強度の相関性を示す。ここで、横軸に表す圧縮強度は、各配合の試験につき実施したφ100×h200mm円柱供試体3本の平均圧縮強度である。

純せん断強度は、引張強度等と同様に、圧縮強度に比して約1/10以下と小さいものであり、圧縮強度が高くなるほどその比率が小さくなるものであった。なお、ここに示す結果の範囲では、モルタルの純せん断強度は僅かながら低い傾向にあるが、これらのコンクリートの圧縮強度に対する純せん断強度に有意な差異は認められなかった。

### b) 割裂引張強度との相関性

図-9には、各コンクリートの割裂引張強度と純せん断強度の相関性を示す。圧縮強度試験同様に、φ

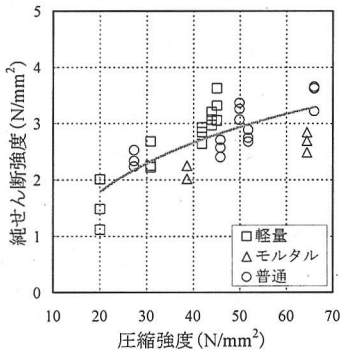


図-8 純せん断強度と圧縮強度の相関性

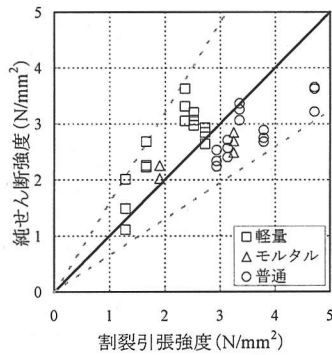


図-9 純せん断強度と割裂引張強度の相関性

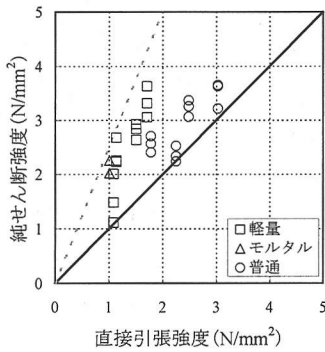


図-10 純せん断強度と直接引張強度の相関性

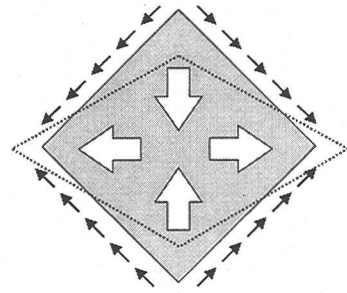


図-11 純せん断力の合力成分模式図

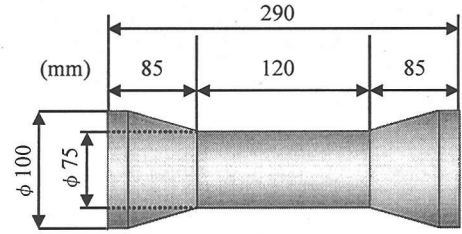


図-12 直接引張試験用ドッグボーン型供試体

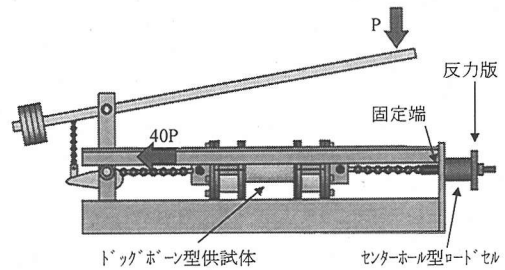


図-13 直接引張力荷装置

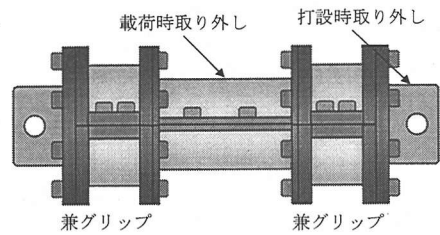


図-14 載荷治具を兼ねる直接引張試験用型枠

100×h200mm の円柱供試体を用い、一試験につき3本以上の結果から平均割裂引張強度を求めている。

軽量骨材コンクリートに比べ、引張強度が高い普通コンクリートでは、割裂引張強度 3N/mm<sup>2</sup> 以上の領域において、純せん断強度は割裂引張強度より小さくなる傾向 (y = x 線より下方に点在) がみられた。この原因として、図-11 の模式図に示すポアソン効果に加え、割裂引張強度試験に比べ純せん断試験における供試体サイズが大きく、破壊に対する寸法効果の影響が表れたことが考えられる。

これに対して、割裂引張強度が 3N/mm<sup>2</sup> 未満にあ

る領域には、軽量骨材コンクリートや低強度のモルタルが y = x 線より上方に分布するものであり、いずれも純せん断強度が 1~5/3 倍ほど割裂引張強度より大きなものであった。

### c) 直接引張強度との相関性

軽量骨材コンクリート等において、純せん断強度が割裂引張強度より高くなる現象の検証実験として、φ75×120mm の引張部位を有するドッグボーン型供試体(図-12 参照)を作成し、直接引張強度を求めた。ここで用いた直接引張荷装置(図-13)は、引張



クリープ試験装置<sup>11)~12)</sup>を改良したものであり、ドッグボーン型供試体のグリップ部には、供試体作成時に用いた型枠(図-14)を転用できる構造としている。載荷荷重のおよそ40倍の引張力が作用し、その反力をとる固定端にはセンターホール型ロードセル(20kN用)を設置することで破壊荷重を求めた。なお、以下の評価に用いる直接引張強度は、各配合のコンクリートにつき2体ずつ実施した時の平均値である。

図-10に示す純せん断強度と直接引張強度の相関性によると、いずれの試験においても純せん断強度が直接引張強度を1~2.5倍ほど上回るものであった。これは、本研究で行った直接引張強度試験では、供試体に生じる二次曲げ応力の影響<sup>13),14)</sup>を取り除くことが出来ず、またグリップ部における応力集中に起因した破断も含まれるための結果と考えられる。特に軽量骨材コンクリートにおける両強度の差異は著しく、本研究で開発した単純せん断試験による純せん断強度は、従来の試験による引張強度よりも高くなる傾向が窺えた。

#### (4) 純せん断試験による破壊強度の評価

上記のように、コンクリートの破壊に大きく影響する引張強度は、割裂引張強度試験と直接引張強度試験といった試験方法でも大きく傾向が異なるものである。本研究で求めたような純せん断強度は、コンクリートの真の引張強度とほぼ同じとなり、この純せん断強度からも引張強度がある程度推定できるものと考えられる。

割裂引張強度試験は、比較的簡易な試験方法であり、コンクリートの引張強度をある程度推定評価できるものであるが、本来弾性論に基づく二軸応力状態の破壊から求めるため、その有効範囲も限られてくる。コンクリートの割裂引張強度試験の適用範囲に関して、町田の研究<sup>15)</sup>によると、脆度係数(圧縮強度/引張強度)6~8が下限値であり、真の引張強度を評価できる範囲はあまり大きくないことが示されている。

また直接引張強度試験では、コンクリートの(一軸)引張強度やその時のヤング係数を評価する手段として有効な方策のひとつと考えられるが、二次曲げによる応力集中の影響、および引張力を伝える治具等の取り付け方法が困難であり、これが直接引張強度を支配する場面も考えられる。また、吉本の研究<sup>16)</sup>のように、直接引張強度と割裂引張強度が比較的良く整合するものもみられるが、これも引張強度レベルが2~5N/mm<sup>2</sup>の範囲と制限されている。

このように従来の引張強度試験では、コンクリートの変形に伴う応力伝達性能・応力状態の変化や、

治具の取り付け方法の点で、必ずしも真の引張強度を推定できるものではなかった。これに対して、純せん断力をコンクリートへ与えることができれば、内部に生じる応力状態はほとんど変化しないことが予想されるため、コンクリート破壊の一要因となる引張強度や純せん断強度の真値に近づけることが可能と思われる。本研究で示した純せん断試験は、簡便な方法ではあるが、コンクリートの破壊に影響を及ぼす強度特性を知るためのひとつの手段になりえるものと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、コンクリートの純せん断応力下における破壊形態と純せん断強度を求めるため、一軸圧縮荷重をせん断力方向に分配できる試験装置を新たに開発した。この開発したせん断試験装置を用いて、普通・中・高強度の軽量骨材コンクリートならびに普通コンクリート等の純せん断強度を求めるとともに、各種強度との相関性の評価を行った。本研究の範囲内で得られた結論を以下に要約する。

- ① 一軸圧縮荷重から純せん断応力状態となるように応力配分できる試験装置の開発を行った。
- ② 開発したせん断試験装置では、与えるせん断応力状態の引張主応力成分が卓越することで、供試体のほぼ中央断面において劈開破壊が生じた。
- ③ 純せん断力作用下における各種コンクリートの破壊は、特に前兆を示すような挙動は確認されず、脆性的なものであった。
- ④ 比較的高い引張強度を有する普通コンクリートでは、純せん断強度が割裂引張強度より小さくなるが、軽量骨材コンクリートのような低引張強度材料では、純せん断強度のほうが大きくなる傾向にあった。
- ⑤ コンクリートの破壊を評価する材料試験として、本研究で開発した純せん断試験法から求まる純せん断強度の適用の可能性が窺えた。

## 6. 今後の展望と課題

本論文では、開発した純せん断試験装置を用いて、コンクリートの一材料強度を示す純せん断強度を求めたが、これは、はりや床版などの構造物のひび割れおよび破壊予測の研究の一環として意義が大きい。また、本試験装置を用いて、種々の方向にひび割れを有するコンクリート要素の強度や変形挙動を調べ

ることができると思われる。さらに、コンクリート構造物の疲労破壊や時系列な状態変化を知る上で、正負交番載荷等も含む純せん断疲労試験ならびに純せん断力作用下の時系列ひずみ挙動(クリープ)を求めることも有意義と考えられる。また、鉄筋や他の補強材を有するコンクリート要素も同様の試験に取り入れる必要があるものと思われ、本研究で開発した純せん断試験装置は、これらの広範囲におよぶ研究課題に対して有用な試験方法になりえるものと考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、串田守可・津田久嗣両氏(榊原本鐵工所)に多大の協力を受けました。また、実験およびデータの整理では、本庄一貴氏、世良健祐氏(山口大学大学院)に御尽力頂きました。ここに記して深甚の謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 野口貴文：コンクリートの非線形性状－圧縮・引張・せん断実験－，コンクリート工学，Vol.39，No.9，pp.110-114，2001.9.
- 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 潜，六車 照：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，pp.403-407，1984.2.
- 4) Collins, M.P., and Mitchell, D.: Prestressed Concrete Structures, Prentice Hall, pp.309-379, 1991.
- 5) 古田智基，金久保利之，植村政彦，吉澤弘之：連続繊維シート補強コンクリートパネルの二軸性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.1459-1464，1999.7.
- 6) 伊藤正通，加藤佑介，金久保利之：コンクリートの強度および種類がRCパネルのせん断性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.3，pp.157-162，2000.6.
- 7) 伊藤正通，金久保利之：曲げモーメントが作用する鉄筋コンクリートパネルのせん断性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.3，pp.1027-1032，2001.6.
- 8) 野口 博：解析的研究と実験の関わり－建築分野－，コンクリート工学，Vol.39，No.9，pp.27-31，2001.9.
- 9) 中田幸男，山本修三，安福規之，村田秀一，兵動正幸：自動制御・計測可能な中空ねじりせん断試験装置の試作とひずみ制御試験への適用，土木学会論文集，No.505/III-29，pp.329-332，1994.12.
- 10) 稲田善紀：岩盤工学，森北出版，pp.79-94，1997.2.
- 11) 吉武 勇，中村秀明，永井泉治，浜田純夫：若材論コンクリートの水和反応進行の影響を考慮した引張クリープ推定式の提案，土木学会論文集，No.634/IV-45，pp.43-53，1999.11.
- 12) 吉武 勇，浜田純夫，中村秀明，永井泉治：水和反応を抑制した若材論コンクリートの圧縮・引張クリープ比較，土木学会論文集，No.641/IV-46，pp.263-268，2000.2.
- 13) 秋田 宏，小出英夫，外門正直：コンクリートの直接引張試験法に関する検討，セメント・コンクリート論文集，No.52，pp.604-609，1998.
- 14) Zheng, W., Kwan, A.K.H. and Lec, P.K.K.: Direct tension test of concrete, ACI Materials Journal, Vol.98, No.1, pp.63-71, 2001.
- 15) 町田篤彦：コンクリートの圧裂試験に関する基礎研究，土木学会論文報告集，No.297，pp.99-112，1978.11.
- 16) 吉本 彰：コンクリートの変形と破壊，学献社，pp.121-145，1990.

(2003. 3. 6 受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE STRENGTH OF CONCRETE ELEMENTS SUBJECTED TO PURE SHEARING STRESS

Hiroshi TANAKA, Isamu YOSHITAKE, Yoshiki YAMAGUCHI and Sumio HAMADA

A new pure-shearing machine for concrete element is developed in the present study. The machine can subject the pure shearing force to concrete element by changing the direction of uni-axial force. Pure shearing strengths of various concrete were tested and correlations between pure shearing strength and other strengths were investigated in this paper. All specimens were fractured from a cleavage failure induced from the vertical crack due to principal stress. The test results indicated that pure shearing strengths of lightweight concrete were higher than tensile strength from the conventional test, which is different from the tendency of normal concrete.