論文　単純せん断力を与える簡易型載荷装置の試作

田中　浩[*1]・吉武　勇[*2]・山口佳起[*3]・浜田純夫[*4]

要旨：従来行われてきた単純せん断力載荷試験は，概して装置や供試体が大型で複雑なものが多く，広く普及するまでには至っていない。本研究では，できるだけ簡便な装置をもってコンクリートを単純せん断力状態にできるような簡易型試験装置の試作を行った。さらに，ここで作製した単純せん断力載荷装置を用いて，強度レベルの異なるコンクリートの単純せん断試験を行ったところ，全ての試験において主応力場となる引張力成分に起因した引張ひび割れが生じた。また，純せん断強度と圧縮・割裂引張強度との相関性を求め，純せん断強度は，割裂引張強度より 0～35%ほど小さい値となることが示された。

キーワード：単純せん断力，簡易型載荷装置，純せん断強度

1．はじめに

ディープビームの斜めせん断ひび割れやフラットスラブの押し抜きせん断破壊など，せん断力によってもコンクリート(構造物)は破壊に至るものである。そのため，これまでコンクリート部材のせん断耐力に関する研究が数多く行われてきており，その基礎的資料として，コンクリート要素のせん断強度を求める材料実験が実施されてきた。例えば，コンクリート断面の一面あるいは二面に強制的なずれを与えて破壊面を生じさせるせん断強度試験が挙げられる[1)]。しかしながら，これらの試験においては，曲げモーメントや軸力の影響を取り除くことは困難であり，実際には多軸応力状態にあるコンクリートの強度を捉えることとなる。単純なせん断力作用状態を再現できる方法としては，中空円筒のねじり試験[1)]あるいは二軸方向の加力装置を用いた平板載荷試験[2),3)]があるが，供試体製作や載荷方法(装置)等が複雑なため，広く普及するまでには至っていない。

コンクリートのような連続体においては，主応力となる引張力成分によって引張破壊に至ることが多く，「せん断強度」という普遍的な値が存在しないことは広く知られたことではあるが，コンクリートの耐荷性能や破壊現象を知る上で，単純せん断力作用下におけるコンクリートの挙動を求める試験は有用なものと思われる。特に種々の配合や補強材の配置など様々な条件の下に，単純せん断力作用下でのコンクリートの(破壊)挙動を知ることは，コンクリート構造物のせん断破壊に関する研究の発展に寄与できるものと考えられる。

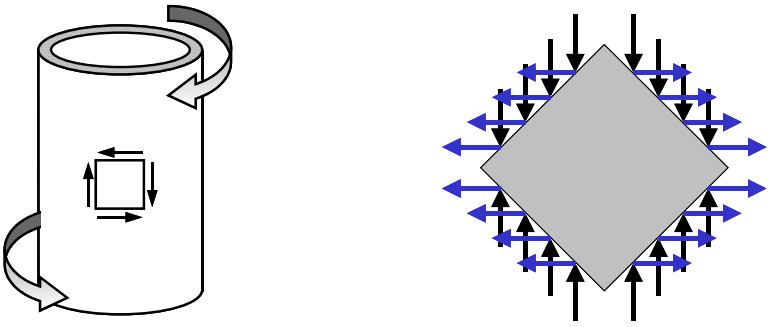
本論文では，できるだけ簡易な試験方法となるよう，多くの研究機関等で広く使用されている一軸載荷装置(万能試験機)を用いて，コンクリート供試体に単純せん断力を与える方法を示す。さらに，この装置を用いて行った単純せん断試験を基に，コンクリートの破壊挙動とその時の最大せん断応力(純せん断強度)を示すとともに，若干の考察を加えるものとする。

2．単純せん断力載荷装置

2.1 単純せん断力の導入方法

コンクリートに対して，単純せん断力を与え

*1 株式会社栗本鐵工所　大阪臨海工場　鉄構事業部　(正会員)
*2 山口大学助手　工学部　社会建設工学科　博(工)　(正会員)
*3 株式会社銭高組　(元　山口大学大学院)　修(工)　(正会員)
*4 山口大学教授　工学部社会建設工学科　Ph.D　(正会員)



a)中空円筒ねじりせん断試験　　b)二軸平板載荷試験

図-1　従来の単純せん断試験装置

る方法として，**図-1** に示すような先述の中空円筒ねじりせん断試験や二軸平板載荷試験等が挙げられる。前者の試験では，供試体の製作ならびに載荷方法が困難なことに加え，せん断破壊面が円周上のあらゆる点で生じる可能性があり，ひずみ等の計測には不利な場面も考えられる。また，後者の装置は，コンクリートに生じる様々な応力状態を再現できるため，優れた試験装置であるが，専用のフレームや複数の加力装置等が必要とされるばかりでなく，加力の制御が複雑であり，試験装置の経済性・汎用性の点では難があるものと思われる。

本研究で考案した単純せん断試験装置における加力方法は，**図-2** 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分配することで，コンクリート供試体にせん断力を導入するものである。この扇形回転載荷治具は，表裏二枚からなり，T 型状の載荷板を挟む形でピン結合とした。なお，できるだけコンクリート供試体にせん断力以外の荷重が作用しないよう，ピン結合部は作用するせん断力に対して直交方向の長孔とするとともに，扇形回転載荷治具～載荷板間にはピン結合部を除いて接触しないように配慮した。

平板形状のコンクリート供試体は，**写真-1** に示すようにセットされ，**図-2** の載荷(扇形回転載荷治具など)がその上下面に配されることで，単純せん断応力状態となる。なお，**写真-1** に示す載荷装置を保持するための垂直部材には，長孔を設けており，載荷荷重を負担しない構造と

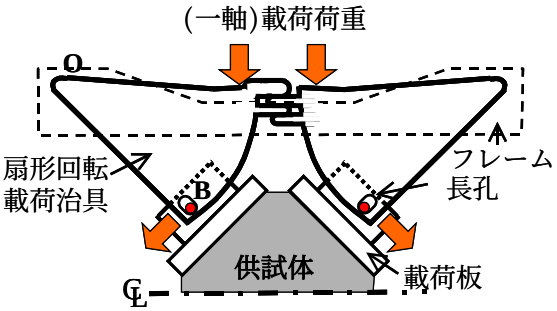


図-2　せん断力導入方法の模式図

写真-1　簡易せん断試験のセット状態

なっている。ここで作製した載荷装置の質量は，上下の載荷装置が各々約 39kg，載荷板とコンクリート供試体一式で約 21kg であり，特別な装置を用いずとも操作可能な程度としている。

2.2 載荷板の接合方法

本研究で示す単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。予備実験において，エポキシ樹脂系の各種接着剤を用いて接合を行ったが，接着剤のみ(コンクリート硬化後に塗布)の接合では，いずれの試験も低い荷重レベルで載荷板とコンクリート供試体間で剥離破壊に至り，コンクリート供試体には十分なせん断力を伝達することができなかった。また，載荷板表面に波状のプレートを用いて接着面積を増加する方策もとったが，同様に剥離破壊が生じる結果となった。

そこで，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-3** 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。

2.3 供試体の考え方

本研究の単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。ここで先述のように，載荷板に取り付けられた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。これは，切り欠きによる応力集中の影響を小さくするための配慮でもあり，実際切り欠きを設けた予備試験を行ったところ，比較的小さい荷重レベルで切り欠き部先端からひび割れが進展・破壊に至るものであった。

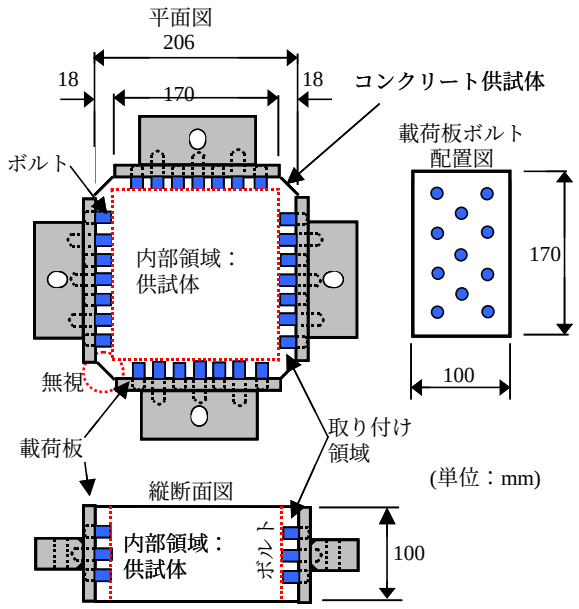


図-3　載荷板の取り付け状況と供試体の考え方

3．純せん断強度の定義

先にも述べたようにコンクリートのような材料では，せん断強度という普遍的な特性値は存在せず，せん断力成分から 45°をなす引張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-4** の模式図に示すように単純せん断力状態の最大値(純せん断強度)は，一軸引張強度の絶対値と同じくなる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 τ 軸との交点(**図-4** 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 τ の評価にしばしば用いられる式(1)などは，(一軸)圧縮強度 σ_C と(一軸)引張強度 σ_T の応力円双方に接する接線の交点(同 **B** 点)を表すものであり，その代表例といえよう [4)]。

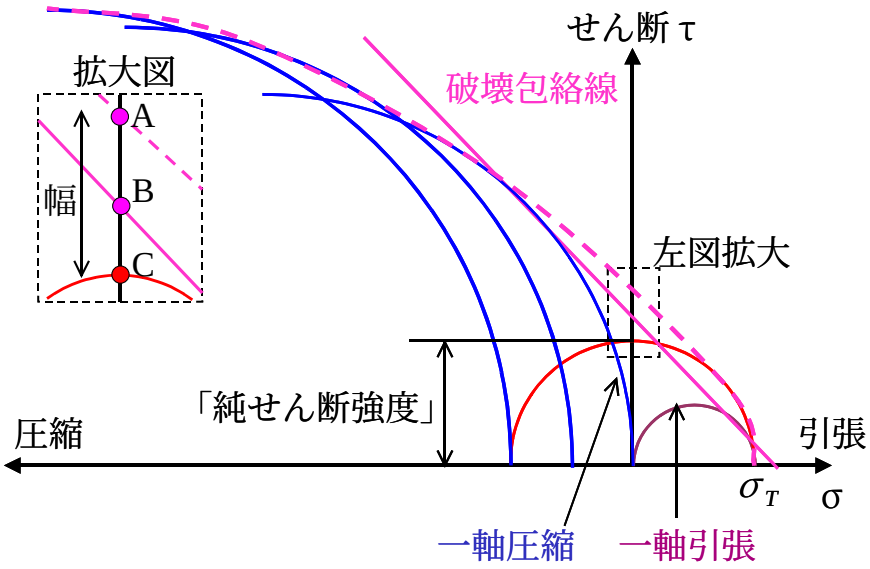


図-4　モールの応力円に基づく純せん断強度

$$\tau = 0.5 \times (\sigma_C \cdot \sigma_T)^{1/2} \qquad (1)$$

しかしながら，これらのせん断強度は求める破壊包絡線のタイプによっても異なり，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のとり方によっても異なるもので，モールの応力円に表されるτ軸上においても，ある幅をもった値と捉えることができる。

本研究では，単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，普通・中・高強度コンクリートの「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-4** の拡大図 C 点に示されるように，基本的に(一軸)引張強度の絶対値相当の値を示し，ある幅を有するせん断強度の中でも最も小さな値となるものである。

4．単純せん断試験

4.1 実験条件

本研究では，**表-1** に示すように W/C を 30，45，60%の 3 水準のコンクリートを作製し，単純せん断試験を行った。なお，ここで用いたセメントは，早強ポルトランドセメントであり，打設後 1 日までは気中養生し，以降試験を行う材齢 7 日までは湿布で覆い十分な養生を施した。単純せん断試験は，1 打設ごとに 3 体ずつ行い，併せてφ100×200mm の円柱供試体を用いて圧縮・割裂引張強度を求めた。

表-1　配合条件

W/C (%)	単位量　(kg/m³)				
	水 W	セメント C※	細骨材 S※※	粗骨材 G※※※	高性能 AE 減水剤
30	160	533	709	937	標準使用量 0.01C
45	160	355	774	1023	
60	160	267	806	1066	

※早強ポルトランドセメント※※若松産海砂(2.60g/cm³)

※※※宮野産安山岩系砕石(最大 20mm，2.70g/cm³)

4.2 破壊状況

本研究で実施した単純せん断試験では，破壊に至るまで有意な挙動を示すことなく，ある荷重(最大荷重)で瞬時にひび割れが生じて破壊

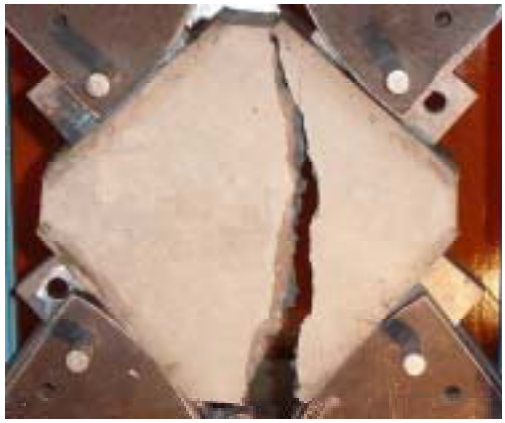
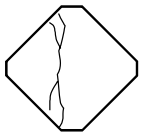
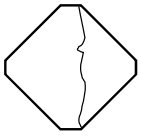
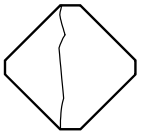
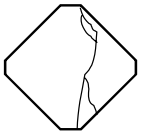
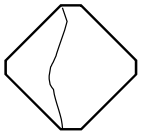
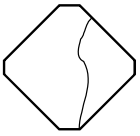
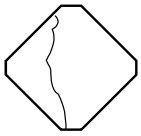
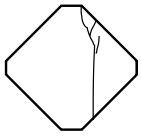
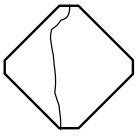
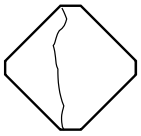
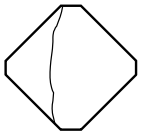
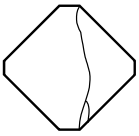


写真-2　破壊状況

表-2　破壊状況スケッチと純せん断強度

W/C	30%			30%		
破　壊　状　況						
純せん断強度(N/mm^2)	2.88	2.68	2.75	3.21	3.65	3.63
コンクリート強度(N/mm^2)	圧縮強度 51.9	割裂引張強度 3.80		圧縮強度 66.0	割裂引張強度 4.72	

W/C	45%			60%		
破　壊　状　況						
純せん断強度(N/mm^2)	3.36	3.25	3.06	2.33	2.24	2.53
コンクリート強度(N/mm^2)	圧縮強度 49.9	割裂引張強度 3.36		圧縮強度 27.4	割裂引張強度 2.94	

する脆性的なものであった。単純せん断試験によるコンクリートの破壊状況の一例(W/C=60%)を**写真-2** に示す。また，全ての試験における破壊状況スケッチを**表-2** にまとめて示す。

ここで示す結果より，いずれの結果も単純せん断応力下において，ほぼ供試体中心近傍で縦方向にひび割れが発生していることが分かる。これは，単純せん断応力状態において主応力場となる水平方向の引張力成分が卓越し，引張破壊に至ったものと推察される。

一部の試験では，複数本のひび割れが認められるが，これは破壊後の衝撃で生じた可能性もあり，そのほとんどはある一本の大きなひび割れが発生・進展することで破壊に至ったものであった。

4.3 純せん断強度の評価

本研究で作製したコンクリートの純せん断強度ならびに圧縮・割裂引張強度の試験結果を**表-2** にまとめて示す。W/C=30%のコンクリートにおいて，コンクリートの圧縮・割裂引張強度が大きく異なるが，これはコンクリート製作工程に依存する結果である。

ここで，純せん断強度に着目すると，1 打設あたりに作製した 3 体の単純せん断試験用供試体では，圧縮・割裂引張強度レベルに応じた強度値を示していることが分かる。特に 3 体の試験結果には，大きな差異は認められず，純せん断強度のばらつきは大きなものではなかった。

ここで，一般にコンクリート強度の指標として用いられる圧縮強度，ならびに純せん断強度値に大きな影響を与えると考えられる割裂引

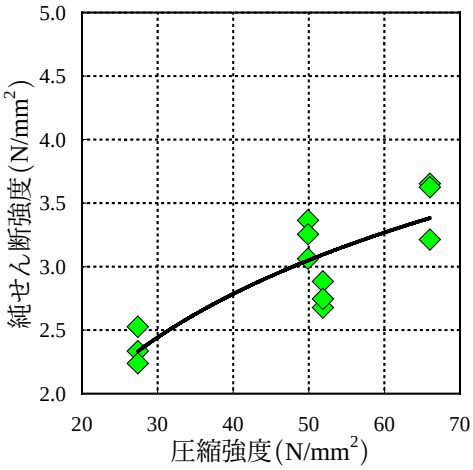


図-5　純せん断強度と圧縮強度の相関性

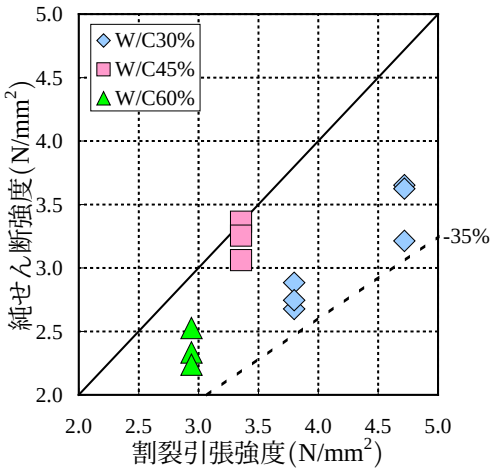


図-6　純せん断強度と割裂引張強度の相関性

張強度について，それぞれ純せん断強度との相関性を求めた(**図-5** および**図-6** 参照)。

図-5 の結果では，コンクリートの圧縮強度が高くなるにつれて，純せん断強度は大きくなっている。しかしながら，純せん断強度と圧縮強度の比が，普通・中・高強度コンクリートでそれぞれ 1/12，1/15 および 1/19 となり，純せん断強度は圧縮強度の増進量に比べて極めて小さいものとなった。このことから，引張強度や曲げ強度と同様に，純せん断強度は高強度なコンクリートほど圧縮強度に対する強度比が小さくなる傾向が確認された。

また，**図-6** に示す相関から，純せん断強度は割裂引張強度に比べて 0～35%の範囲で小さいものとなっていることが分かる。これは，φ100×200mm から得られる割裂引張強度試験に比べて，本研究で用いた純せん断試験用の供試体では，引張破壊に至る領域(長さ：約 240mm)が大きいため，破壊に対する寸法効果の影響が表れたものと推察される。さらに，**図-7** の模式図に示されるように，単純せん断応力状態では，与える純せん断力の合力が，横方向の引張力のみならず，同等量で縦方向の圧縮力としても作用するため，その圧縮力成分に応じたポアソン作用が加味され，割裂引張強度に比べて若干小さくなったものと推察される。

5．まとめ

本研究では，コンクリートの単純せん断力作用下における力学的性質を調べるため，比較的簡易な単純せん断力載荷装置の作製を行った。さらに，ここで作製した単純せん断載荷装置を用いて，強度レベルの異なるコンクリートの単純せん断試験を行った。本研究の範囲内で得られた知見を以下にまとめて列挙する。

1. 扇形回転載荷治具を介して，一軸載荷荷重から単純せん断力を与える載荷試験装置を作製した。
2. 単純せん断力を与えた場合，供試体のほぼ中央付近で垂直方向にひび割れが生じ，脆性的な破壊に至った。
3. 純せん断強度は，高強度なコンクリートほど圧縮強度に対する強度比が小さくなるものの，圧縮強度の増加に伴い大きくなる傾向にあった。
4. 寸法効果ならびにポアソン作用の影響により，純せん断強度は割裂引張強度に比べて 0～35%の範囲で小さい値となった。

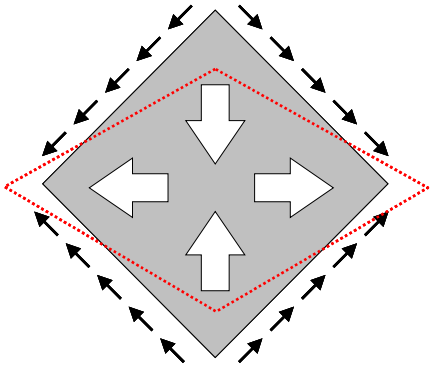


図-7　単純せん断応力状態の模式図

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) Collins, M.P., and Mitchell, D.: Prestressed Concrete Structures, Prentice Hall, pp.309-379
3) 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.
4) 稲田善紀：岩盤工学，森北出版，pp.79-94, 1997.2.