論文　コンクリート要素実験のための中型純せん断試験装置の開発検討

久部　修弘[*1]・吉武　勇[*2]・田中　浩[*3]・浜田　純夫[*4]

要旨：純せん断力を受けるコンクリート要素の挙動を把握・定量化する目的から，これまでの研究では小型供試体を用いた純せん断試験装置の開発を行ってきた。同装置では，プレーンコンクリート要素の挙動評価はできるものの，補強材を有する複合構造要素の挙動評価は困難なものであった。そこで本研究では，補強材を有する供試体の純せん断挙動も定量化できる中型純せん断試験装置の開発を行った。その結果，連続繊維シートで補強したコンクリート要素の破壊挙動をとらえることが可能となった。

キーワード：純せん断試験装置，中型コンクリート要素，連続繊維シート

1　はじめに

コンクリート構造物の安全性を照査する上で，脆性的な破壊形態であるせん断破壊に対する安全性を確保することは極めて重要な課題のひとつである。特に近年では，構造物の長寿命化が求められる社会的背景から，連続繊維シートなどを用いたせん断補強に関する実験的・解析的研究が数多くなされてきた[1)]。

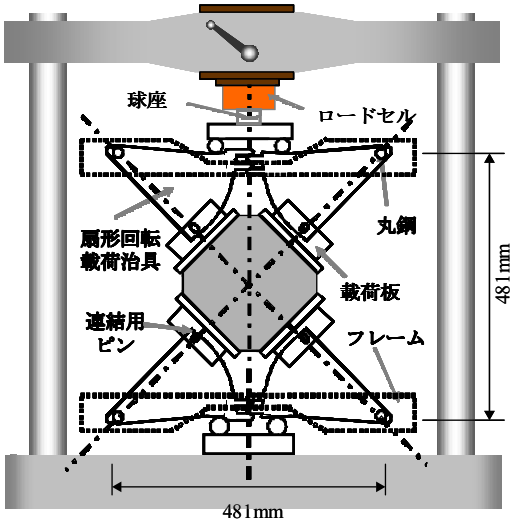
これらの研究では，主に棒部材を対象として，連続繊維シートを完全閉塞型に巻き立てた状態で評価したものが多い[2)]。しかるにコンクリート面部材の要素レベルにおいて(面内)せん断補強効果に関してはほとんど論じられていないのが現状である[3)]。これは，連続繊維シートによりせん断補強したコンクリート面部材の強度には，連続繊維シート～コンクリート間の付着力が支配的となり，完全閉塞型に巻き立てたものに比べ，せん断補強効果が小さいことが原因のひとつと考えられる。

一方，軽量で耐久性に優れた連続繊維シート貼付は適した補強工法のひとつであり，このようなせん断補強に関する設計手法の確立が不可欠な課題といえよう。そのためには，連続繊維シートで補強したコンクリート面部材の強度・変形性状を定量評価する必要がある。すなわち，せん断力が作用する要素レベルにおいて，ひび割れ強度や終局強度，変形挙動等を評価することはコンクリート構造物の繊維シート補強を考える上で有用なデータになりうると考えられる。

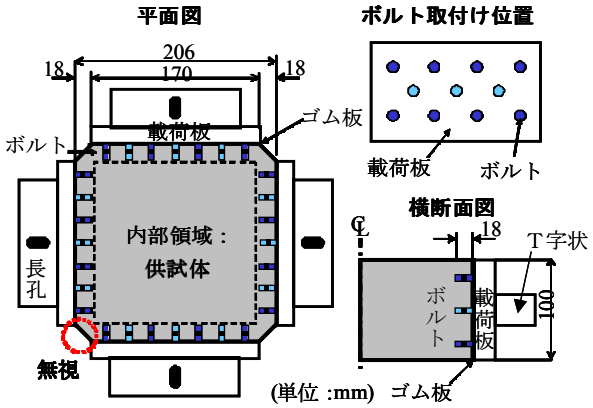
これまでの研究では，**図-1**に示すように一般的なアムスラー型載荷装置による一軸載荷荷重を純せん断力に変換できる装置(以下「小型純せん断試験装置」と称す)を開発し[4)]，補強材を有さないプレーンコンクリート要素の純せん断強度特性について検討をすすめてきた[5)]。この小型純せん断試験装置を用いれば，せん断補強を要するコンクリート面部材の要素レベルにおける強度・変形性状の評価が可能であると考えられる。しかしながら同装置では比較的小さい供試体(170×170×100mm)を用いるため，鉄筋や連続繊維シートといった補強材の定着領域の確保が難しく，複合構造要素の強度・変形性状の評価が困難なものであった。

そこで本研究では，連続繊維シートのような補強材を含むコンクリート要素の純せん断挙動を定量化できる試験装置(以下「中型純せん断試

*1 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)
*2 山口大学　工学部社会建設工学科　助教授　博(工)　(正会員)
*3 立花マテリアル株式会社　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)



図－１　小型純せん断試験装置



図－２　小型純せん断試験用供試体

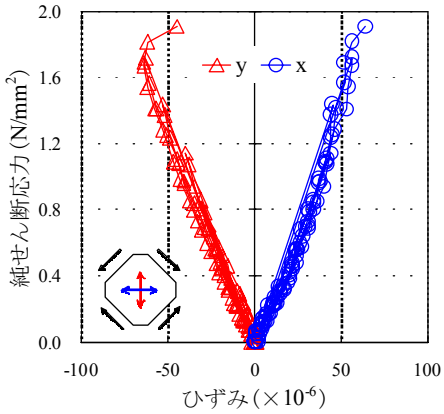
験装置」と称す）の開発検討を行うことを目的とする。さらに，ここで開発した中型純せん断試験装置を用いて炭素繊維シートを貼付したコンクリート要素の強度・変形性状を明らかにするものである。

2　既往の純せん断試験

2.1 純せん断試験の概要と課題

図－１に示す既往の純せん断試験装置は，扇形回転載荷治具を介して（鉛直）一軸載荷荷重を45°方向に分配し，コンクリート供試体に純せん断力を負荷する構造である。

これに用いるコンクリート供試体は，図－２に示すように，鋼製ボルト（M12×11 本，埋設長18mm）を用いて（鋼製）載荷板を４辺に取り付けたものである。ここでコンクリート供試体に過



図－３　純せん断応力―主ひずみの例

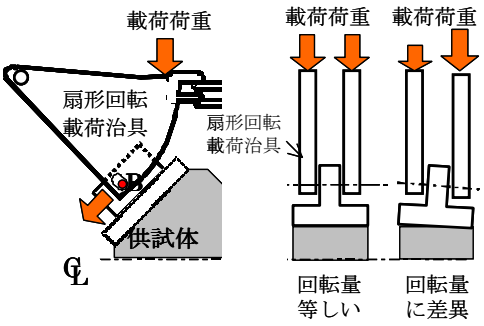
度な変形拘束を与えないよう載荷板とコンクリート間には 1mm 厚のゴム板を設置した。なお，これらの領域は，載荷板を取り付けるためのものであり，純せん断力応力の評価には，その内部領域（170×170×100mm）に対して行った。

このように比較的小型な領域であることから，連続繊維シートを貼付する場合，その定着領域が充分に確保できず，結果的にはプレーンコンクリート要素の純せん断強度・変形性状試験が限界であった。

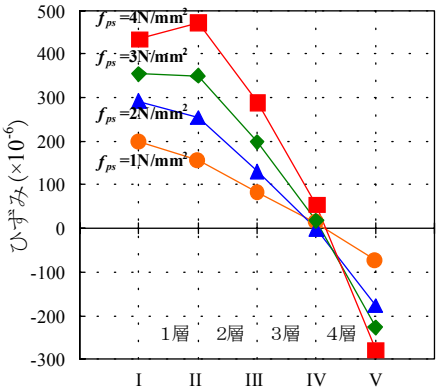
2.2 純せん断力の伝達機構上の課題

既往の小型純せん断試験装置を用いて得られた純せん断応力－主ひずみの一例（石炭灰系軽量骨材コンクリート W/C=60%）を図－３に示す。ここで弾性学において，純せん断応力下にある理想材料の変形は，圧縮・引張の主ひずみ成分の大きさが等しくなる。図－３の結果に示されるように，同装置では各種骨材や水和化合物から構成されるコンクリートのような不均質な複合材料においても，概ね上記の応力－主ひずみ関係が成立することが実験的に確認できるものであった。

一方で，理想上の主ひずみ状態とは大きく異なり，圧縮・引張の主ひずみの大きさに有意な関係がなく，極端なケースでは各ひずみ値が正負逆転するような事例もみられた。これは，加力に応じてコンクリート要素に面外変形が生じたためである。本来，コンクリートのような不均質な材料では，ブリージングなどの影響によ



図−４　せん断力の伝達方法



図−５　厚さ方向における主ひずみ分布の例

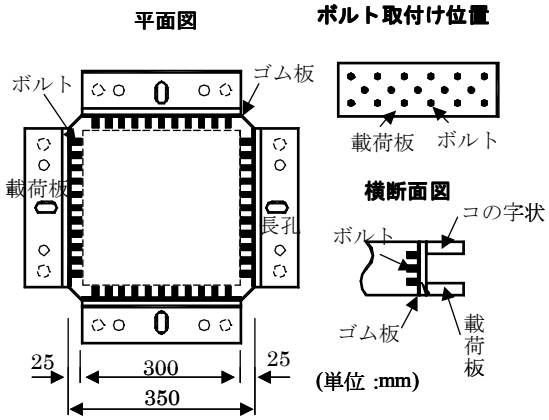
り厚さ方向にも強度分布が生じる可能性がある。さらに，**図−４**に示すように小型純せん断試験装置では，各辺に取り付けた載荷板の突起部を２枚の扇型回転載荷治具に挟んでピン結合することで，せん断力を伝達するため，供試体製作精度や各装置設置状況によっては，２枚の扇型回転載荷治具の回転に差異が生じ，結果的に面外曲げ応力が生じたものと考えられる。

これを実験的に確認するため，各層をそれぞれ別途打設した 4 層構造のエポキシ樹脂供試体を作製し，x 方向(引張)の主ひずみ分布を求めたところ，**図−５**に示す結果が得られた。このようにせん断力の伝達機構上から，厚さ方向にもひずみ分布が生じる可能性もあることが分かった。

3　中型純せん断試験装置の開発

3.1 開発目的

本研究では，連続繊維シートのような補強材を有するコンクリート要素の純せん断強度・変形性状を実験的に評価するため，小型純せん断



図−６　中型純せん断試験用供試体

試験装置の基本的構造を参考に，新たに純せん断試験装置の開発検討を行うこととした。ここで，前述の課題を解決するため，コンクリート供試体をより大型化することで補強材の定着領域の拡大を図るとともに，偏心載荷による面外応力をできるだけ小さくするような載荷機構を考案した。

3.2 コンクリート供試体

本研究では，中型純せん断試験装置も一般的なアムスラー型載荷装置内に設置し，一軸圧縮荷重を加力することで純せん断力を与える構造とした。そこで，この中型純せん断試験に用いるコンクリート供試体は，載荷装置寸法の制約範囲内において，できるだけ大きくなるような寸法に決定した。中型純せん断試験に用いるコンクリート供試体および載荷板類を**図−６**に示す。

コンクリート供試体の大型化に伴い，載荷板には 1 枚あたり M12 の鋼製ボルト(埋設長 25mm)を千鳥状に計 17 本取り付けた。小型純せん断試験同様に，この鋼製ボルト埋設部位は内部のコンクリート要素(300×300×100mm)の取り付け部位として考えた。

小型純せん断試験装置では，T 字状の載荷板形状とすることで，突起部を２枚の扇形回転載荷治具で挟んでピン結合していたが，中型純せん断試験装置では，**図−７**に示すように載荷板形状をコ字状にすることで，その内部に回転載荷治具を配置する方法とした。

さらに，コ字状にした載荷板は，連続繊維シートを貼付する際において，コンクリートおよび載荷板の表面が連続的になるため，接着領域の確保および同部位の接着補強が可能となる。本研究では，連続繊維シートをコンクリート表面同様，載荷板上に接着後，その上から鋼板とボルトで圧着することで連続繊維シートの定着性を確保できると考えた。

また，コ字状化することで外周型枠の代替となる載荷板の設置が容易となり，コンクリート供試体作製および表面仕上げの精度向上も図ることができる。

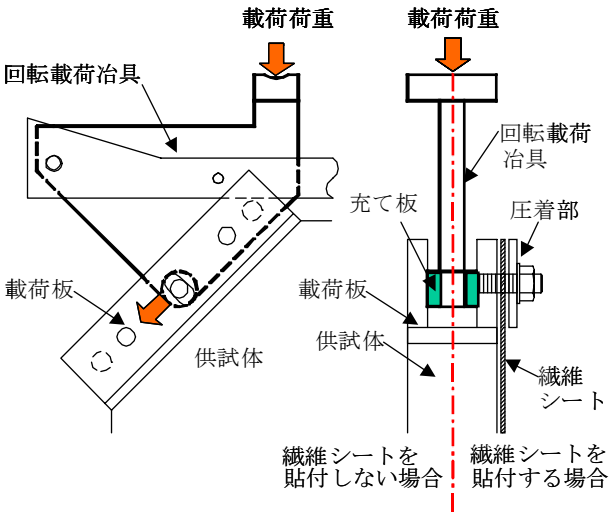
3.3 せん断力伝達機構

小型純せん断試験で用いたような扇形回転載荷治具を，中型純せん断試験では，**図−７**に示す形状の回転載荷治具に変更した。さらに，前述のように２枚の回転載荷治具では，安定したせん断力の加力が困難であることから，１枚の回転載荷治具とすることで，面外曲げ変形の影響をできるだけ小さくなるようにした。なお，コ字状の載荷板と薄板状の回転載荷治具の結合には，高耐力ピン(SUS630)を用いるが，これが加力によって曲げ変形が生じないよう，ピン結合箇所の回転載荷治具に充て板として鋼板を溶接した。これにより中型純せん断試験装置の設置等に伴う各部位の所定位置からのずれは小さくできるものと考えた。

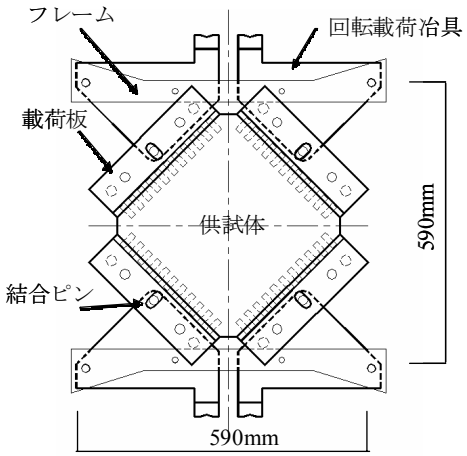
3.4 中型純せん断試験装置

本研究で開発した中型純せん断試験装置の概念図とその試験状況写真を**図−８**に示す。なお同装置は，アムスラー型載荷装置の可動クロスヘッドに対してワイヤー掛けすることで，比較的容易に設置することができるため，特別な設置吊り部材は必要としない。

図−８に示すように，連続繊維シートのような補強材の接着領域をできるだけ広く確保することで，複合構造部材の代表的部位として，より現実的なコンクリート要素の強度・変形性状を求めることができるものと考えられる。



図−７　回転載荷治具とせん断力伝達機構



a)　概念図

b)　供試体設置状況写真

図−８　中型純せん断試験装置

4　中型純せん断試験装置の検証

4.1 実験目的

本研究では，開発した中型純せん断試験装置

表-１　コンクリートの材料と配合

	W/C	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad
種類 (密度 g/cm^3)	---	水道水 (1.0)	早強ポルトランド セメント(3.13)	海砂 (2.60)	安山岩砕石 (2.70)	高性能 AE 減水 剤(1.05)
単位量	45%	160kg/m^3	355kg/m^3	774kg/m^3	1023kg/m^3	C×0.5～1.0%

表-２　中型純せん断試験用供試体

供試体	寸法	補強材	層数	角度
N-S	300× 300× 100mm	――	――	――
CF-S-0		炭素繊維 シート	表裏面 各１層	0°
CF-S-45				45°

表-３　炭素繊維シートの力学性質

繊維目付量(g/m^2)	200
引張強度(N/mm^2)	3400
ヤング係数(kN/mm^2)	245

表-４　コンクリートの強度試験結果 (N/mm^2)

供試体		N-S	CF-S-0	CF-S-45
圧縮強度		49.6	48.6	49.4
割裂引張強度		3.23	3.89	3.09
純せん断強度	小型	2.33	――	2.59
	中型	2.54	3.33※	2.87※

※ひび割れ発生荷重から換算

の性能検証を目的としている。先ず，小型純せん断試験装置によるプレーンコンクリート要素と中型純せん断試験装置によるコンクリート要素(N-S)における破壊状況や純せん断強度を比べ，両者間に大きな相違点がないことを確認する。さらに連続繊維シート補強を施したコンクリート要素(CF-S-0，CF-S-45)の純せん断破壊挙動とせん断補強効果の確認を行うものとする。

4.2 実験条件

本研究で作製したコンクリート材料と配合条件を**表-１**に示すとともに，本検証実験において作製したコンクリート供試体を**表-２**に示す。

本研究で採用した連続繊維シートは，**表-３**に示す力学性質を有する炭素繊維シートである。同シートを貼付する供試体には，材齢 7 日においてコンクリート表面をケレンした後，プライマー(エポキシ樹脂)を塗布することで表面処理を施した。さらにプライマー硬化後には，主引張応力方向に対して 0°，45°方向に炭素繊維シートを貼付した。

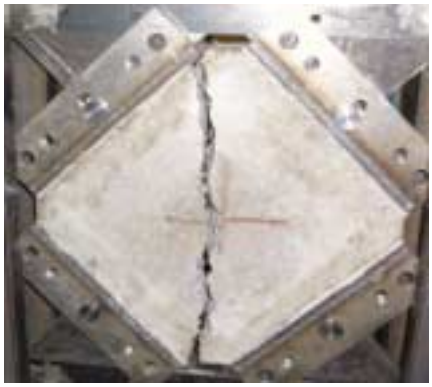


図-９　純せん断破壊状況(N-S 供試体)

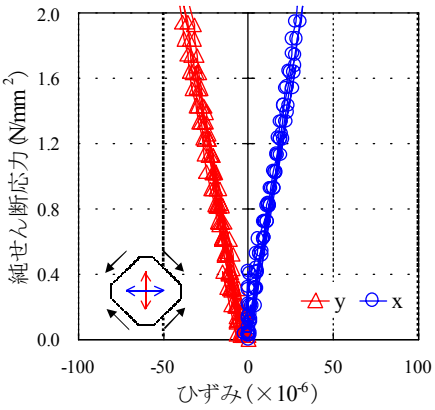


図-10　純せん断応力－主ひずみ(N-S 供試体)

ここで，中型純せん断試験に供したコンクリートの強度を**表-４**に示す。なお同表では，小型純せん断試験装置による純せん断強度も併せて示している。

無補強の N-S 供試体には，表裏面の中央において，x-y 方向にそれぞれひずみゲージ(検長 60mm)を貼付した。さらに CF-S-0，CF-S-45 供試体には，それぞれ繊維方向およびその直角方向にひずみゲージ(検長 60mm)を貼付した。

4.3 無補強供試体(N-S)の純せん断破壊特性

表-４の最下段に示すように，中型純せん断試験装置を用いた無補強コンクリート要素(N-S 供試体)の純せん断強度は，2.54N/mm^2 となり，小型純せん断試験とほぼ同等の値が得られた。さらにその破壊挙動は，これまでの小型純せん断

試験と同様に，ほぼ中央断面における縦ひび割れ 1 本が発生・進展による脆性的な劈開破壊であった(**図−９**参照)。

ここで, N-S 供試体の表裏面において x-y 方向に生じた主ひずみの計測値を**図−10** に示す。これにより，除荷時の残留ひずみ成分もほとんどなく，x-y 方向の主ひずみ(x : 引張，y : 圧縮)の大きさはほぼ等しいことから，理想的な純せん断応力状態にあることが窺える。**図−３**に示した小型純せん断試験装置による計測値と比較すると，ひずみ挙動に若干の差異がみられるが，この原因は配合の違いや供試体寸法の大型化によるひずみの局所化等の影響が考えられる。

4.4 炭素繊維シート補強供試体の純せん断破壊

CF-S-0，CF-S-45 供試体を用いた中型純せん断試験では, N-S 供試体同様に縦ひび割れが発生した後，断続的なシート剥離音とともに破壊が進行し，繊維方向に沿ったエポキシ樹脂の割れが観察された(**図−11** 参照)。なお，最大荷重まで炭素繊維シート端部定着部における剥離がなかったことから，本定着方法の有効性が確認された。

表−４に示すように，CF-S-0，CF-S-45 供試体は，N-S 供試体に比べそれぞれ＋31%，＋13%ほど高い純せん断強度(コンクリートのひび割れ発生荷重より換算)を示した。これは x 方向に劈開破壊するコンクリートに対して，炭素繊維シートによる補強効果が著しいことを表している。なお，連続繊維シートの繊維方向がおよぼす(純)せん断補強効果の詳細な検討は，今後検討すべき課題と考えている。

5　まとめ

本研究では，連続繊維シートのような補強材を含むコンクリート要素の純せん断破壊挙動を求める試験装置の開発検討を試みた。本研究のまとめを以下に列挙する。

(1) 小型純せん断試験装置の問題点を整理し，その改良型として中型純せん断試験装置の開発を行った。

(2) 開発した装置の性能検証にあたり，無補強のコンクリート要素のひずみ挙動から，概ね理想上の純せん断応力状態にできることが確認された。

(3) 炭素繊維シート端部を載荷板に接着し，且つその上から鋼板とボルトで圧着する方法を用いることで，純せん断破壊に至るまで充分な定着性を確保できた。

図−11　純せん断破壊状況例(CF-S-45 供試体)

参考文献

1) 例えば, 土木学会　コンクリート委員会　連続繊維シート補修補強研究小委員会編 : コンクリートライブラリー101　連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，2000.7.

2) 例えば，上原子晶久，下村　匠，丸山久一：連続繊維シート補強コンクリート部材のせん断耐力の評価法に関する研究，土木学会論文集，No。648/V-47，pp.217-226，2000.5.

3) 例えば，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.25, No.2, pp.1003-1008, 2003.7.

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.21, No.3，pp.1459-1464，1999.7.

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.