

[133] 鉄筋コンクリート造壁・骨組境界面の直接せん断伝達機構

正会員 ○細川 洋治 (東京大学工学部)
 正会員 塩原 等 (東京大学大学院)
 正会員 中村 哲也 (東京大学大学院)
 正会員 青山 博之 (東京大学工学部)

1 序

鉄筋コンクリート部材のせん断抵抗機構を直接せん断加力時の挙動から実験的に明らかにしようとする研究は、従来から多く行なわれている[1]。実験は補強の効果を直交補強筋量を変えて調べるもの[2]、一定ひび割れ幅で載荷し、骨材のかみ合い摩擦を検討したもの[3]などが主となっている。しかし、せん断面を拘束する応力レベルとせん断剛性や耐力、破壊性状との関係を調べた実験は少なく、しかもその応力レベルの範囲は狭い。そのため壁のすべりせん断破壊や増設耐震壁の打継部のすべりを検討するために、せん断面を拘束する応力レベルが異なる時のせん断剛性、耐力を知るためには、従来の実験の結果を外挿して推定するしかなかった。

そこで本研究は、鉄筋コンクリート耐震壁の挙動を理解することを目的に、模型及び実大の壁板と周辺骨組の境界面を取り出した試験体を製作し、直応力度一定の拘束条件の下で、引張から高圧縮の場合について、静的・動的・直接せん断加力実験を行ない、せん断面にコンクリートの打継部の有る場合と、一体打ちした場合の破壊性状の差異を耐力・剛性・せん断抵抗機構について検討したものである。

2. 実験の方法

鉄筋コンクリート造耐震壁と周辺骨組との境界部分の形状を模した試験体29体について、境界部分に沿って破壊するよう一定拘束軸力の下で静的直接せん断加力をして、その耐力と変形を検討した。
 試験体：鉄筋コンクリート造増設耐震壁の打継接合部を模した試験体(以下後打ち試験体)と、一体成型した骨組・壁の境界面を模した試験体(以下一体打ち試験体)の2種類を同一形状に製作した。但し、実大の試験体4体だけは異なる形状である。破壊面を規定するために、境界面にそって、両端から中央に向かう切り欠きを設けた。試験体のおもな変数は、打設法、スケール、直交補強筋の種類であり表1に示す。図1は、表1のうちI、III、Vの試験体の配筋を示す。ひび割れを横切る補強筋はすべてせん断面に垂直で、補強筋比(鉄筋断面積とせん断面積の比)は一体打ち、実大、後打ちで、0.85%、0.95%、0.95%とほぼ共通にした。せん断面以外の部分は十分に補強した。

加力：図2に示す加力装置を用い、せん断面に一定の直応力度を作用させながら一方向および繰り返し直接せん断加力した。2台の鉛直ジャッキを手動操作して試験体に作用する直応力度を保ちさらに加力ばりを実験室床面に平行保持させた。こうすると必ずしもせん断面内の直応力分布は一定にならない。しかし実験で平行保持に必要な力は小さくかったので直応力分布

表1 試験体の仕様

打設法	スケール	直交筋	せん断面積	試験体番号
I	後打ち	模型-1/3	アンカーボルト D 10	普通型 — #1-8, #10-15 (300 cm ²)
II			高軸力型 — #9-10 (150 cm ²)	
III		実大-1/1	アンカーボルト D 19	普通型 — #26-29 (900 cm ²)
IV	一体打ち	模型-1/3	アンカーボルト D 10	普通型 — #16-17 (300 cm ²)
V			壁筋 D 6	普通型 — #18-21 (300 cm ²)
VI				高軸力型 — #24-25 (150 cm ²)

表2 加力のパラメーター

試験体	加力履歴	直応力 (kgf/cm ²)
#1-10	一方向	-25 - 180
#11	一方向	注
#12-15	繰り返し (計3サイクル)	0 - 120
#16-17	繰り返し (計3サイクル)	0 - 60
#18-25	一方向	-36 - 180
#26-29	繰り返し (計4サイクル)	-15 - 15

注：せん断力一定 (=10kgf/cm²) での引き抜き実験

表3 材料の力学特性

(a) コンクリート

試験体	圧縮強度			最大強度時歪	ヤング率	引張強度 平均
	平均	最大	最小			
模型試験体	267	295	232	0.00236	245000	23.9
実大試験体	205	---	---	0.00249	203000	---

(b) 鉄筋

鉄筋種類	公称径 mm	公称断面積 mm ²	降伏応力 kgf/cm ²	降伏歪 cm/cm	歪硬化時歪 cm/cm	最大応力 kgf/cm ²
D 6	6.4	31.7	3590	0.0019	-----	5840
D 10	9.5	71.3	3630	0.0020	0.018	6040
D 19	19.1	286.5	3750	0.0020	0.024	5630

は一定とみなせる。直応力は -36 kgf/cm^2 から 180 kgf/cm^2 (圧縮正)の範囲とした。表2に、全29体の加力パラメーターを示す。

測定： せん断面のずれ、開き、直交鉄筋の材長にそった歪の分布、および荷重を測定した。せん断面のずれおよび開きは、試験体の壁部分(せん断面から 225 mm)と、骨組部分(せん断面から 100 mm ないし 150 mm (実大試験体))に埋め込まれたインサートボルトを介して取りつけた2つのゲージホルダーの相対変位として測定した。鉄筋の歪はせん断面から $2d$ $8d$ $14d$ (d :鉄筋の公称径)位置に加力方向に対して表裏に1枚ずつはった歪ゲージにより測定し、鉄筋の軸方向の歪と曲げ歪成分を分離しようとした。

ロードセルにより鉛直力と水平力を測定し、公称せん断面積で除してそれぞれ直応力度、せん断応力度とした。

試験体の製作： 後打ち試験体は、骨組のコンクリートを先打ちし打ち継ぎ面の目荒らし(最大深さ 5 mm)をした後、カプセル式樹脂アンカーを取り付け、壁部分のコンクリートを縦打ちし一体化した。コンクリートは実大試験体も含めすべて最大粗骨材粒径 10 mm 、設計強度 210 kgf/cm^2 の普通コンクリートを用い全9回で打設した鉄筋はD6とSD30のD10、D19を用いた。表2に、鉄筋とコンクリートの材料特性を示す。壁筋に用いたD6には明瞭な降伏点がなく弾性限度を超えるとすぐに歪硬化に入るので弾性限度の応力を降伏応力度として示した。

3 実験の結果

試験体いずれもせん断面規定する切り欠きの先端から斜め上に向かってせん断亀裂が生じたが破壊への進展はなく、最後はせん断面の近くで破壊した。但し実大試験体では壁のせん断補強が少なくせん断亀裂の広がりによる変形が大きい。破壊面の位置は一定直応力の圧縮引張に拘らず境界面から高さ 5 cm のあたりであった。変形が大きくなるとこの位置のコンクリートのはく離または圧壊が目立った。直応力が大きい試験体の破壊は耐震壁のすべりせん断破壊面の様子と類似していた。

4 実験の考察

紙面の都合上、試験体個別に結果を吟味することはせず、試験体をせん断耐力時のせん断抵抗機構により(1)ダボ効果支配型、(2)せん断摩擦型、(3)直応力摩擦型、(4)コンクリート圧壊型、の4つに分類し説明する。図5は、それぞれの破壊性状に典型的なせん断面のずれおよびせん断面の開き幅とせん断応力の関係を示す。以下にそれぞれの破壊となるための条件と、それぞれの破壊経過の特徴を説明する。
ダボ効果支配型： この型ではダボ作

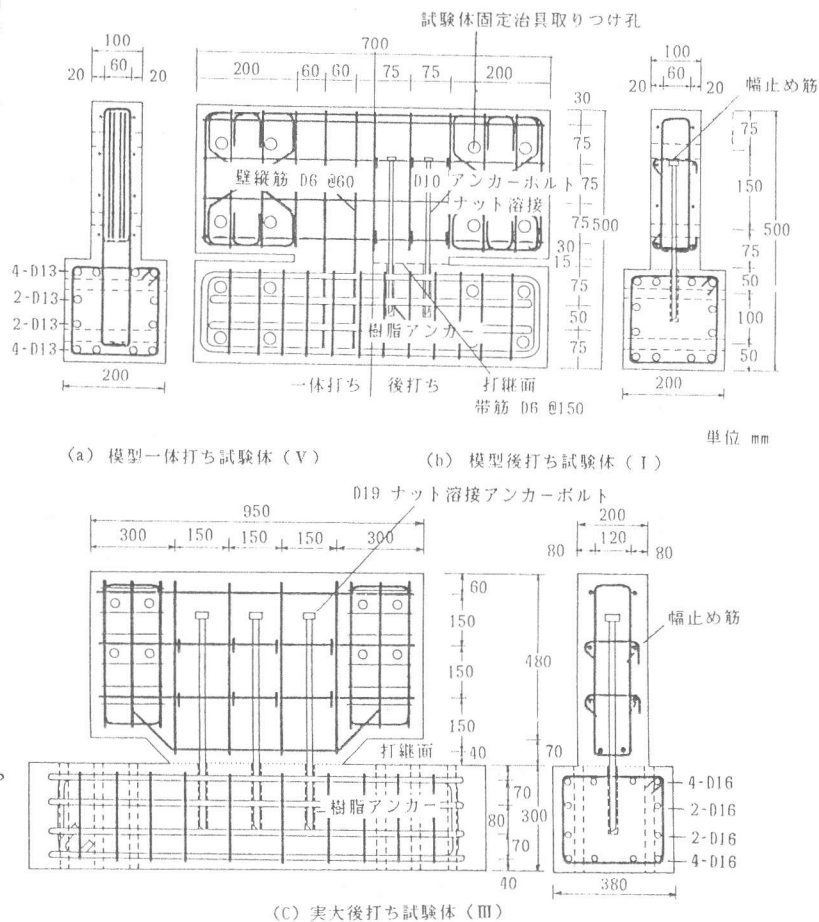


図1 試験体の配筋

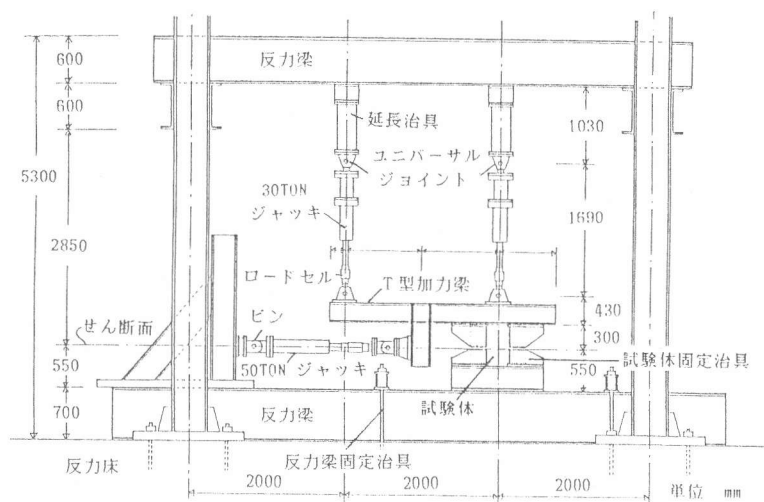


図2 加力装置の概要

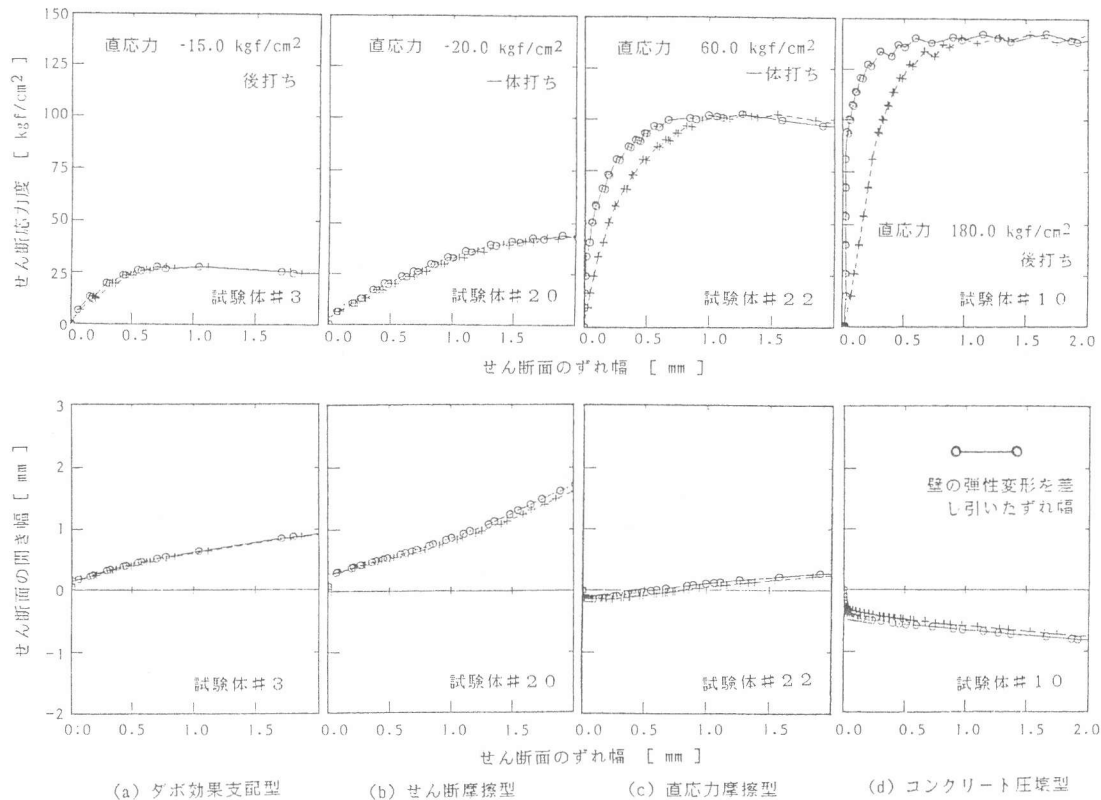


図3 直接せん断の典型的なせん断力-スリップ、ひび割れ幅-スリップの関係

用が主なせん断抵抗機構である。鉄筋の歪を検討した結果、剛性が低下するのはせん断面を横切る鉄筋が局部的に曲げ降伏するためであり、鉄筋の平均軸方向歪は弾性に留っていた。この結果は引き抜けに対する定着が不完全であること、一定直応力がゼロまたは引張の試験体に共通して見られた。またせん断力に明瞭なピークが表われず、すべりの増大に伴いせん断力が漸増する傾向がある。

せん断摩擦型： せん断摩擦の仮説 (Mast [4]) のように、直交鉄筋が引張降伏して最大耐力に達する。初期剛性は壁筋の曲げ剛性が小さい分だけダボ効果支配型より小さくなったと考えられる。同じ補強筋量と直応力であれば耐力はダボ効果支配型より高い。最大耐力に達した後耐力はかなり低下した。直交鉄筋の定着が良く抜け出しが少なく、圧縮直応力が小さいかまたは引っ張りの試験体に共通して見られるせん断抵抗性状である。常に鉄筋の局部的な曲げ歪は小さいので、ダボ作用の負担するせん断力は少ないと考えられる。

直応力摩擦型： せん断面を拘束する直応力が圧縮の時、鉄筋の局部曲げ降伏の発生がせん断力のピークにつながる。しかし、やはりせん断力の大部分は拘束外力によるコンクリートの骨材のかみ合いが負担している。Shaikh [5] の指摘しているように、圧縮軸力が大きいとひび割れが開かないので鉄筋に引張力が作用せず、せん断摩擦理論の仮定するメカニズムが働かない。この実験の限りでは、せん断耐力の大きさは鉄筋の定着の良否や打継面の有無には関係が見られない。後打ちと一体打ちのせん断変形の初期の剛性は大きくほぼ等しい。初期剛性の大きさは壁部分をせん断面積を底面とする弾性コンクリート柱のせん断剛性にほぼ一致する。図5の実線は、この方法で計算した弾性変形分を差し引いたものでひび割れ面のずれ量を表わすと予想される。せん断応力が直応力の 60-70% を超えるとひび割れ面にずれが始まり、同時に漸増していたコンクリートの圧縮歪が減少に転ずる。これはコンクリートが、破壊に近づくとき非弾性体積膨張を示す性質 (ダイレイタンス) による。この時の直応力とせん断応力の関係を図6に示す。せん断応力は直応力に比例し増加すること、その傾向は一体打ち後打ちに無関係なことがわかる。またこの荷重に達する以前は鉄筋の歪が小さいことからせん断面にずれの始まるせん断応力は、コンクリートに関係する量で直交補強筋のおよぼす影響は小さい事が予想される。

コンクリート圧壊型： せん断面でのコンクリートの圧縮歪が減少しないほどせん断面を拘束する圧縮応力がさらに大きい場合 (この実験では σ_n が 180 kgf/cm^2 : $0.65 F_c$ より大きい時) には直応力に比例したせん断力の増加が頭打ちになる。破壊面では耐震壁のすべりせん断破壊に似たコンクリートの圧壊と剝離が観察された。

実験結果との関係： 一方向載荷した模型試験体（#1-#10, #18-#25）の最大せん断耐力と直応力の関係を一体打ちと後打ちで比較して、図9に示す。両者の共通点は直応力が増加するにつれせん断耐力 τ_{max} が比例的に増加し、直応力が大きくなると破壊が鉄筋からコンクリートの圧壊に移りせん断耐力は一定値以上には増加しない点である。その臨界点は $\rho_s f_y + \sigma_n$ （ここに、 ρ_s ：せん断補強筋比、 f_y ：鉄筋の降伏応力度、 σ_n ：直応力度）で表わすと、一体打ちでおよそ 120 kgf/cm^2 （ $= 0.45 f_c$ ）、後打ちでおよそ 160 kgf/cm^2 （ $= 0.6 f_c$ ）であった。一方その相違点は後打ちの試験体では直応力が引張で、引張応力が大きいほど一体打ちに比べ耐力が劣る。反対に 120 kgf/cm^2 を超える高拘束力では後打ちの耐力が高くなる。耐力の高い理由はひとつはアンカー筋はD10とD6の壁筋より径が大きいのでダボの負担で

きるせん断力が高いことが考えられる。図10は、せん断耐力時のせん断面の開き幅と直応力度との関係を示した。直応力がない時にはひび割れ幅が $0.4-0.5 \text{ mm}$ でせん断力が最大になるが、一般的には、直応力により変動し直応力がゼロの点を交点とした2本の折れ線の上に分布するように見える。後打ちと一体打ちに傾向の差はない。

5 結論

一定せん断補強筋比の条件で、直応力度レベルと直交補強筋の種類を実験変数として鉄筋コンクリート直接せん断試験体の漸増一方向載荷実験を行なった結果、次のような結論が得られた。

1 直接せん断加力に対して有効に作用するせん断抵抗機構は直応力のレベルにより異なる。しかし直応力が引張の時、圧縮のときおよびコンクリートの圧壊するような高直応力の場合に分類できる。

2 せん断耐力に寄与する直交補強筋の効果を支配するのは、直交補強筋量が同じ条件の下では、直応力が引張の時直交補強筋の定着の良否、直応力が圧縮の時には直交補強筋の径である。

3 直応力が圧縮のとき、ひび割れ面でずれが始まる時のせん断の大きさは一体打ち後打ちによらずほぼ直応力に正比例する。

<謝辞>

本研究は、昭和58年度文部省科学研究費一般研究（C）（代表者、細川洋治）、同試験研究（1）、（代表者、青山博之）により行なわれた。

<引用文献>

- 1 ASCE Task Committee, "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete," State-of-the-Art Report, American Society of Civil Engineers, New York, 1982.
- 2 Matlock, A. H., "Shear Transfer in Concrete Having Reinforcement at an Angle to the Shear Plane," Volume 2, Special Publication SP42, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1974, pp.119-128.
- 3 Paulay, T. and P. J. Loeber, "Shear Transfer by Aggregate Interlock," Volume 1, Special Publication SP42, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1974, pp. 1-15.
- 4 Mast, R. R., "Auxiliary Reinforcement in Concrete Connections," Proc. of ASCE, Vol. 94., No. ST4, June 1968, pp.1485-1504.
- 5 Shaikh, A. F., "Proposed Revision to Shear-Friction Provision," PCI Journal, Vol. 23, No. 2, March-April 1978, pp.12-21.

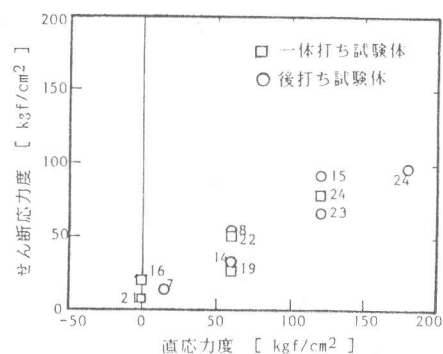


図4 拘束応力度とタイレタシ開始応力度の関係

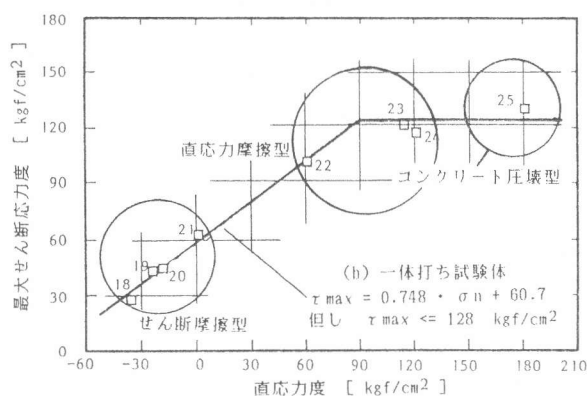
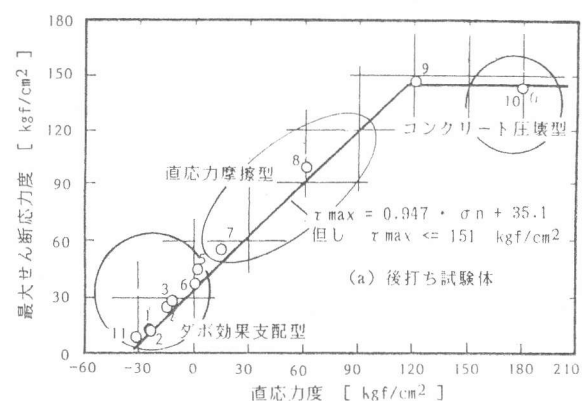


図5 最大せん断耐力と直応力度の関係

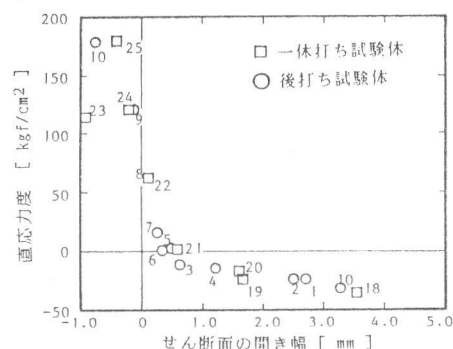


図6 最大せん断耐力時のひび割れ幅と直応力度の関係