

[119] 鉄筋コンクリート耐震壁のひびわれ面のせん断伝達機構に関する研究

正会員 野口 博 (千葉大学工学部)

落合 正雄 (大建設計東京事務所構造部)

正会員 〇堀川 孝助 (千葉大学大学院)

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材では、収縮、温度応力や地震時の曲げモーメント等によりひびわれが発生した状態で、せん断力を受ける場合がある。また、実際の地震被害においてもひびわれ面に沿ってすべる直接せん断すべり破壊が観察されている。このひびわれ面での主なせん断抵抗要素として、骨材のかみ合い (IST: Interface Shear Transfer) と鉄筋のダボ作用が挙げられ、それらについての研究は Mattock,²⁾ Gergely³⁾ 等により、直接せん断試験法により行なわれている。本研究では、より実状に近い形として耐震壁のモデル試験体を作成し、せん断面に一樣な垂直応力が作用する場合と曲げモーメントによるひずみ勾配が存在する場合についての破壊実験を行ない、破壊性状を検討した。

2. 試験体

試験体はせん断面(ひびわれ面)に一樣な垂直応力の作用するAシリーズ4体と、せん断面に曲げモーメントの作用するBシリーズ4体に分けられる。Bシリーズの配筋図を図1に示す。縦筋の鉄筋比は、 $p_w = a_w / bD = 1.0\%$ 、横筋は $p_w = 3.55\%$ である。

Aシリーズは横筋も $p_w = 1.0\%$ で、折り曲げ筋がない他は、すべてBシリーズと同じである。試験体の中央部分には、ノッチを入れてせん断面を設定する。ノッチの深さはせん断面で破壊するように計算を行ない20cmとした。各試験体の変数を表1に示す。A1 (Tension) は引張応力 $\sigma_0 = 10 \text{ Kg/cm}^2$ 、A2 (Compression) は圧縮応力 $\sigma_0 = -10 \text{ Kg/cm}^2$ を与えながら、繰返しせん断力を加える。

A3 (IST) はせん断面を横切る縦筋にビニール製スリーブをかぶせ、ダボ作用を消失させISTの効果を観察する。A4 (Dowel) はグリスを塗布した薄銅板により初めから幅0.1mmの、なめらかな面を持つひびわれを入れて骨材のかみ合いを消失させ、ダボ作用の効果を観察する。その他はA3、A4ともにA1と同様である。

Bシリーズはせん断面に軸力の他に曲げモーメントも作用させて、ひずみ勾配を生じさせるもので、曲げモーメントの大きさは、計算耐力時にひずみ分布が、表1に示すように、B1で引張縁ひずみが零で断面全体が圧縮側となるように、B3では引張側、圧縮側ともに存在するように、B4ではB1と曲率が同じになるようにして決めた。またB2はA3と同様にしてISTの効果を観察するもので他はB1と同様である。軸力はB1~B3が圧縮応力 $\sigma_0 = -60 \text{ Kg/cm}^2$ で、B4が $\sigma_0 = -20 \text{ Kg/cm}^2$ である。A4を除

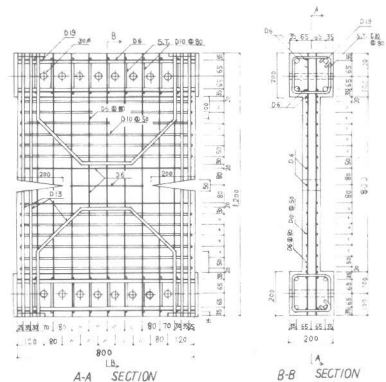


図1 試験体の配筋図

表1 試験体

試験体	軸力 σ_0 (Kg/cm ²)	せん断抵抗機構	曲げモーメント (t·cm)	ひずみ分布
Aシリーズ	A1	+10	IST+DOWEL	無し
	A2	-10	IST+DOWEL	無し
	A3	+10	IST	無し
	A4	+10	DOWEL	無し
Bシリーズ	B1	-60	IST+DOWEL	Q x 4.88
	B2	-60	IST	Q x 4.88
	B3	-60	IST+DOWEL	Q x 14.2
	B4	-20	IST+DOWEL	Q x 4.97

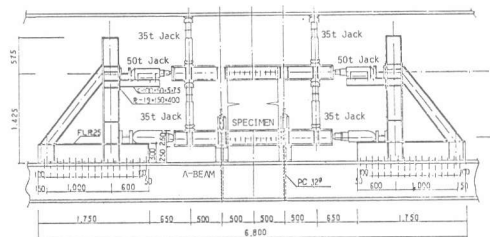


図2 加力装置

いて各試験体共、純引張によりせん断面に自然なひびわれを発生させておく。

コンクリート及び鉄筋の材料の性質を表2に示す。

3. 実験方法

加力装置を図2に示す。加力は左右の反力フレームから油圧式50tジャッキにより水平せん断力を加え、4基の35tジャッキにより軸力とせん断面の曲げモーメント調節用の偶力を与えた。載荷方法はBirkeland式⁸⁾により耐力を求め、耐力計算値の50%、70%、90%、

100%で1回ずつ繰返した後破壊に至るように荷重制御した。ただし、A3、A4はA1に、B2はB1に従って変形制御により行なった。変形についてはせん断面のすべりと分離、壁全体のずれ等を測定し、さらに補強筋のひずみを測定した。

4. 破壊状況

A1とB1の最終ひびわれ状況を、図3に、また、荷重とせん断面でのすべり関係を図4に示す。各試験体の破壊経過は、せん断面のノッチ先端から斜めひびわれが発生し、その後試験体全域に斜めひびわれが発生した。ただしA4ではほとんど発生しなかった。ひびわれの傾きは、Aシリーズではほぼ45°で、圧縮軸力の大きいB1～B3では大きくなる。また、圧縮軸力の作用する試験体では、せん断面付近にコンクリートの圧壊が見られた。最終的にはAシリーズでは、せん断面を横切る鉄筋が順次降伏し、変形が急激に増大し荷重が上昇しなくなったのでこれを破壊とみなして実験を終了した。Bシリーズでは、B4を除いて鉄筋は降伏せず、4サイクル以降、せん断面付近に新たな斜めひびわれが入り、最終的にそのせん断面上下10cm位の領域が破壊ゾーンとなり、音をたてて一挙に2～3cmすべって破壊に至った。

荷重とせん断面でのすべり関係を見ると、A1では2サイクル目からスリップ型を示し、繰返しによる剛性低下が大きい。A2では剛性は耐力付近まで弾性的で高いが、4サイクル目から急に変形が進み以後スリップ型となった。両者の違いは、A2は圧縮軸力が作用するため軸方向の拘束が大きくひびわれ面の摩擦が大きくなるためである。A3はダボ作用が働かないため、A1に比べ剛性が低めである。A4は剛性は低いですが、各繰返しでの

残留変形はほぼ零に近づいている。Bシリーズでは各試験体とも履歴ループの形状はスリップ型とはならず、

表2 材料の性質

コンクリート (普通ポルトランドセメント)						
シリズ	ヤング係数 (Kg/cm ²)	圧縮強度 (Kg/cm ²)	最大応力時歪 (%)	引張強度 (Kg/cm ²)	材令 (days)	
A	1.9x10 ⁵	161.9	0.20	19.5	15	
B	2.49x10 ⁵	266.4	0.23	24.45	15.6	
鉄筋						
	断面積 (cm ²)	降伏強度 (Kg/cm ²)	最大強度 (Kg/cm ²)	ヤング係数 (Kg/cm ²)	伸び率 (%)	
A	D-13	1.27	3389	5168	1.88x10 ⁶	19.5
	D-6	0.32	3953	5155	1.75x10 ⁶	10.0
D	D-13	1.27	3381	4984	1.66x10 ⁶	20.3
B	D-10	0.71	3732	5389	1.93x10 ⁶	16.7
	D-6	0.32	3706	4944	1.69x10 ⁶	10.4

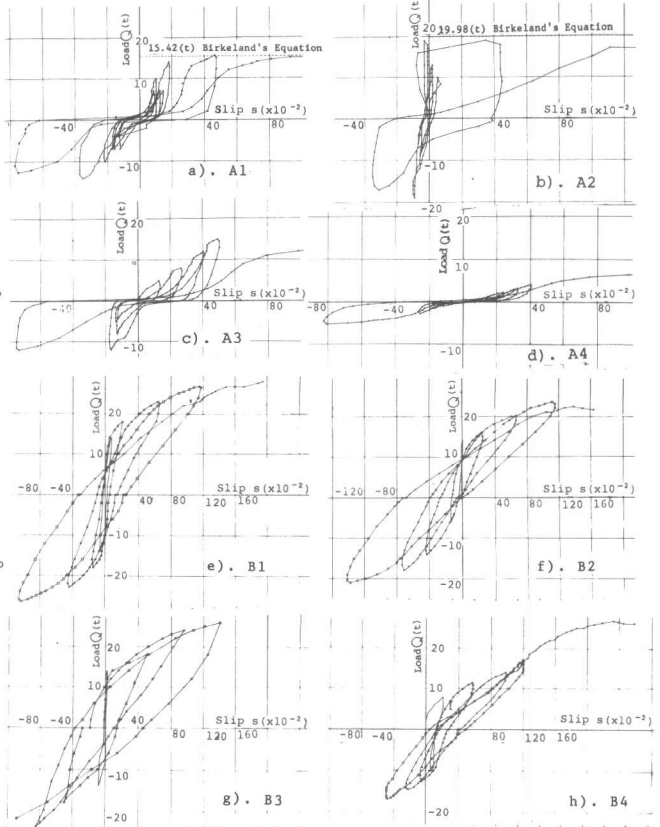


図4 荷重とせん断面でのすべり関係

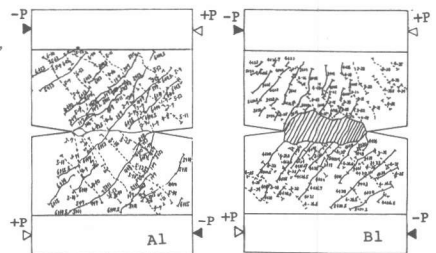


図3 ひびわれ図

紡錘型を示している。これは、曲げモーメントが作用することと、変形測定位置がAシリーズと異なりノッチ付近の斜めひびわれの開口の影響が大きいためである。B1, B2は比較的やせたループ形状を示し、除荷剛性は負荷剛性に比べて大きくなっていない。またダボ作用を除去したB2の方が剛性は低めとなっている。大きな曲げモーメントの作用するB3ではループの囲む面積が他のものより大きめとなっている。圧縮軸力の小さいB4では繰返しによる剛性低下が大きかった。

5. 補強筋のひずみとせん断摩擦理論

A1, B1, B4の縦筋のせん断面ででの代表的な荷重-ひずみ関係を図5に示す。Aシリーズの各試験体では繰返しによるひずみの累積が見られ、最大耐力付近ではほとんどの鉄筋が降伏している。Bシリーズでは荷重を零に戻した時にひずみが圧縮側へ流れる傾向が見られ、B4では鉄筋が降伏に至っているが、B1~B3では最大耐力付近でも鉄筋は降伏しなかった。従って圧縮軸力が60 Kg/cm程度になると最大耐力は鉄筋の降伏ではなくコンクリートの凹凸の圧壊により決まると思われる。

次に、「せん断摩擦理論」による最大耐力の計算値と実験値とを比較する。一体打ち普通コンクリートで、せん断面に垂直応力 $\sigma_v = N/bD$ (圧縮が正) が作用する場合の終局せん断応力 v_u についてのMattock, Birkeland, Rathsによる実験式⁸⁾を次に示す。

$$\text{Mattock} : v_u = 0.8(\rho_v f_y + \sigma_v) \quad (\text{Kg/cm}^2) \cdots (1)$$

$$\text{Birkeland} : v_u = 8.87 \sqrt{\rho_v f_y + \sigma_v} \quad (\text{Kg/cm}^2) \cdots (2)$$

$$\text{Raths} : v_u = 9.92 \sqrt{\rho_v f_y + \sigma_v} \quad (\text{Kg/cm}^2) \cdots (3)$$

ここで ρ_v は補強筋比, f_y はその降伏応力度である。各式による計算値と実験値を表3に示す。これによるとA1, A2はBirkeland式による値にほぼ一致している。また、曲げモーメントの作用する場合はこのままでは適用できないため、次のように式を修正して計算を行なった。せん断面に平面保持を仮定してコンクリートの応力 σ_c と鉄筋の応力 σ_s (引張を正) を求め、その状態から鉄筋が引張降伏に至るとして、鉄筋による付加的圧縮力の項 $\rho_v \cdot f_y$ を $\rho_v \cdot (f_y - \sigma_s)$ とする。従って、Birkeland式について示すと

$$v_u = 8.87 \sqrt{\rho_v (f_y - \sigma_s) + \sigma_v} \quad (\text{Kg/cm}^2) \cdots (4)$$

となる。(4)式によって計算した曲げモーメントと最大せん断力の関係を図6に示す。B1, B3の実験値は鉄筋が降伏していないにもかかわらずよい対応を示した。また、B4については(4)式は控えめな値となっている。また、(4)式によると、せん断耐力に対する曲げモーメントの影響は比較的小さく、これはMattock⁹⁾による定性的な結果と対応する。さらに図6によると、引張側はせん断力を負担しないと仮定した場合はせん断耐力を過小評価すると考えられる。

6. I S Tとダボ作用のせん断力負担率

A3とA4はせん断伝達機構が、それぞれI S T, ダボ作用だけであり、その他はA1と同じなので、A3とA4の荷重-せん断面のすべり関係を重ね合わせると、A1のそれに対応すると考えられる。履歴特性を考慮して重ね合わせた結果を図7に示す。A1とA3+A4の履歴ループはかなり良い一致を示している。最大耐力付近で、A3+A4の方が荷重がやや大きくなっているのは、A4でひびわれ面の分離が少なく、ダボ作用による抵抗が

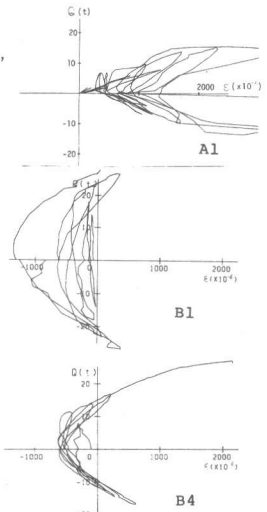


図5 縦筋の荷重-ひずみ関係

表3 終局せん断強度の計算値と実験値の比較

	終局せん断強度 $Q_u(t)$			
	Experiment	Mattock	Birkeland	Raths
A1	15.75 (49.22)	16.52 (51.62)	15.42 (48.20)	17.25 (53.91)
A2	19.00 (59.38)	21.64 (67.62)	19.98 (62.42)	22.34 (69.81)
B1	27.9 (87.19)	27.8 (86.88)	28.1 (87.81)	31.4 (98.13)
B3	27.0 (84.38)	20.3 (63.44)	26.1 (81.56)	29.2 (91.25)
B4	26.9 (84.06)	21.0 (65.63)	20.5 (64.06)	22.9 (71.56)

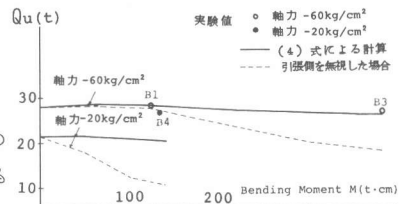


図6 終局せん断強度-曲げモーメント関係

A1 の場合の場合より大きくなったためと考えられる。図7の結果より、せん断力は I S T とダボ作用の両者だけで負担されていることがわかり、両者の負担の割合は、I S T が75～83%、ダボ作用が17～25%となっている。また、圧縮軸力 ($\sigma_c = -60 \text{ Kg/cm}^2$) が作用する B1 と B2 (I S T のみ) の比較からも同様に、I S T が86～88%、ダボ作用が12～14%となった。

次に、せん断面を横切る鉄筋の3方向ひずみゲージ測定値により求めたダボ作用による負担せん断力 Q_d と全せん断力 Q の関係を図8に示す。ダボ作用によるせん断力負担率は A1 では載荷が進むにつれて減少する傾向がみられ、各繰返し最大の荷重では20%以下となる。A2 では負担率は零に近く、垂直応力が圧縮の場合、I S T による負担率が増加するものと考えられる。A3, A4 ではほぼ設計どおりに、それぞれ0%、100%となっていた。Bシリーズについては、 $Q-Q_d$ 関係は B1 以外の試験体も B1 と同様の結果であり、圧縮軸力の作用下では、A2 同様負担率が零に近いことがわかる。

ただし、B3, B4 では曲げモーメントによる引張側も存在するが、挙動にはまったく差が見られなかった。これは、引張側においては、せん断面の分離が大きく、付着のない部分が長くなることと、高い圧縮軸力の下での繰返し載荷により、コンクリートの劣化が非常に進んでいるために、ダボ力を支持できなかったためと考えられる。以上の $Q-Q_d$ 関係からも、I S T とダボ作用による負担率が導びかれ、引張軸力の作用下では、I S T が75～80%、ダボ作用が20～25%となり、圧縮軸力の作用下ではダボ作用による負担率がほぼ零になる。なお、既往の研究では、引張軸力の場合、Mattockによると、I S T が68～77%、ダボ作用が23～32%となり、Whiteによると、I S T が75～80%、ダボ作用が15～25%となる。以上より、せん断面に引張軸力が作用する場合、本実験結果は、Mattock, Whiteらの実験結果とほぼ対応している。また、圧縮軸力が作用する場合は、A1 と A2 の比較によると、ダボ作用は12～14%となり、また $Q-Q_d$ 関係では零に近い値となっていることから、I S T による負担の割合が増加するものと考えられる。

7. むすび

耐震壁のひびわれ面でのせん断耐力は、曲げモーメントが作用する場合、既往の実験式を修正した(4)式により求められ、また曲げモーメントの影響は比較的小さいので、曲げモーメントが零の場合の既往の実験式でも大体予測できることがわかった。また、高い圧縮応力の作用下で繰返しせん断力を受ける場合は、鉄筋は降伏せず、コンクリートの圧壊によりすべり破壊を起す。I S T とダボ作用の負担の割合は、引張軸力の場合、I S T が75～83%、ダボ作用が17～25%となり、圧縮軸力の場合は I S T の負担率が増加することがわかった。

謝 辞 東京大学青山博之教授、小谷俊介助教授、細川洋治助手の暖い御指導に感謝致します。

参考文献

- 1) 東大梅村研究室、「鉄筋コンクリート耐震壁と復元力特性に関する実験的研究」昭和50年9月
- 2) Mattock, A.H., "The Shear Transfer Behavior of Cracked Monolithic Concrete Subjected to Cyclically Reversing Shear" Report SM 74-4, Univ. of Washington, November 1974.
- 3) Gergely, P., "Experimental and Analytical Investigations of Reinforced Concrete Frames Subjected to Earthquake Loading," Workshop on ERCBC, Univ. of California, Berkeley, July 1977.
- 4) White, R.N., Jimenez, R. and Gergely, P., "Sliding Shear and Dowel Forces in Cracked Reinforced Concrete Subjected to Seismic Loading", AICAP-CEB Symp-Rome, May 1979.
- 5) Paulay, T. and Loeber, P.J., "Shear Transfer by Aggregate Interlock", ACI SP-42, 1974.
- 6) 電力中央研究所(青柳征夫), 「昭和53年度原子力設備改良標準化(コンクリート製格納容器に関するもの)調査報告書-コンクリート格納容器技術基準(案)確証のための実験結果の検討-」昭和54年3月
- 7) 青山博之, 細川洋治, 若松一善, 「鉄筋コンクリート造開口耐震壁の開口補強方法に関する実験的研究」日本建築学会, 昭和54年9月
- 8) Shaikh, A.F., "Proposed Revision to Shear-Friction Provisions", PCI Journal, March-April 1978.
- 9) Mattock, A.H., "Effect of Moment and Tension across The Shear Plane on Single Direction Shear Transfer Strength in Monolithic Concrete", Report SM 74-3, Univ. of Washington, October 1974.

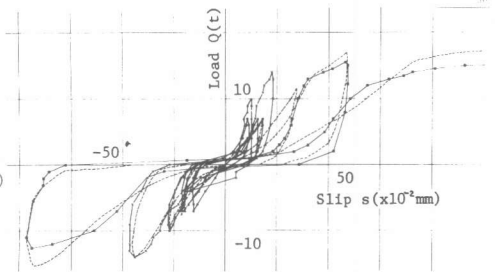


図7 A1とA3+A4の荷重-せん断面のすべり関係の比較

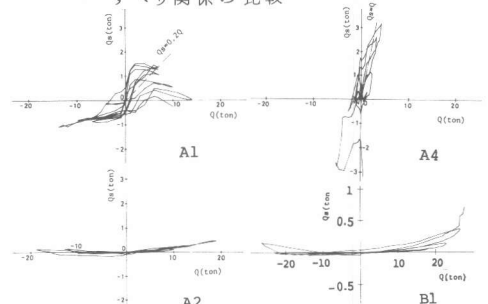


図8 ダボせん断力-全せん断力関係