

[177] せん断力を受ける鉄筋コンクリート壁の力学的性質に関する実験研究

正会員 六車 熙 (京都大学工学部)
 正会員 ○ 渡辺 史夫 (京都大学工学部)
 藤井 正則 (京都大学大学院)

1. はじめに

中低層鉄筋コンクリート(以下RC)建物においては、柱及び梁からなる骨組だけで地震水平力に抵抗するのは極めて困難であり、主としてせん断変形により抵抗する耐震壁が配置される。このようなRC耐震壁のせん断抵抗挙動は、ひびわれ面での力の伝達(骨材の噛合い、主筋のダウエル作用)、主筋の付着特性(ひびわれ間隔、主筋の引張硬化)およびコンクリートの力学的特性等によって大きく影響される。

本実験研究は、これらの諸要因がRC壁のせん断抵抗挙動に及ぼす影響を実験的に把握し、解析を行う際の基礎資料とする為に実施されたもので、既往の実験方法^{1),8)}に比べてより経済的かつ載荷の確実なせん断力加力方法の開発も研究目的に含まれる。計8体のRC壁板に体するせん断力加力実験が行われ、実験方法の妥当性が確認されると同時に、得られた実験データに基づいて、せん断力-せん断変形関係、ひびわれ面での伝達力および鉄筋引張力の変化等が論じられた。また、ひびわれ面での力の伝達および主筋の付着作用を考慮した、ひびわれを含むRC板要素に関する解析方法が示され実験結果と比較された。

2. せん断力加力実験の方法

2.1 実験供試体 --- 図2に供試体の寸法および配筋を示す。

供試体は、主筋に6mm丸鋼を用いたRシリーズ4体と、7mm異形鉄筋を用いたDシリーズ4体の計8体であり、各供試体ともに直交XY2方向にダブル配筋されており、その詳細は表2に示す通りである。なお、表2中の値は、実験時に於ける主引張力方向とX鉄筋の角度を表す。さて、このようなせん断力加力試験に於ては、加力部(シャーキ)の設計が極めて難しく場合によってはこのシャーキ部分で破壊してしまい、実験の継続が不可能となる。本研究に於ては、集中荷重による局部破壊を防止する為に、図1に示す様にシャーキ部分の両側面にモルタルを介して鋼板を圧着し、この鋼板とコンクリート間の摩擦力によりせん断力を伝達する方法をとった。なお、使用コンクリートは最大粒径10mmの粗骨材を用いた普通コンクリートで、 $w/c = 68\%$ 、 $C : S : G = 1 : 2.76 : 3.63$ であった。

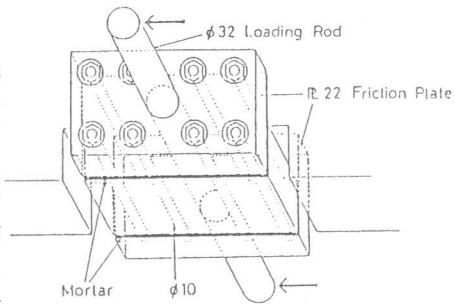


図1. 加力部(シャーキ)の詳細

2.2 せん断力載荷方法 --- 供試体周辺に配置された16個のシャーキに対して、図3に示す載荷システムによりせん断力が加えられた。Collins等¹⁾によって開発された多数のジャッキによる載荷システムもあるが極めて大掛りな為、より簡単な方法として本方法が考案された。せん断力は、計6台のオイルジャッキにより加えられ、各オイルジャッキの載荷力は図3中に示すPC鋼棒に貼付された抵抗線ひずみ計により検出されデジタルひずみ計とそれに接続されたマイクロコンピュータにより、常に同一となるよう監視された。

2.3 ひずみ計測の方法 --- 図2に示す様に、RC板の試験域表面に描かれた間隔20cmの格子の交点に貼付されたコンタクトポイントを用いて、それらの間の直交2方向(検長20cm)および斜め45度方向(検長28.28cm)に関する

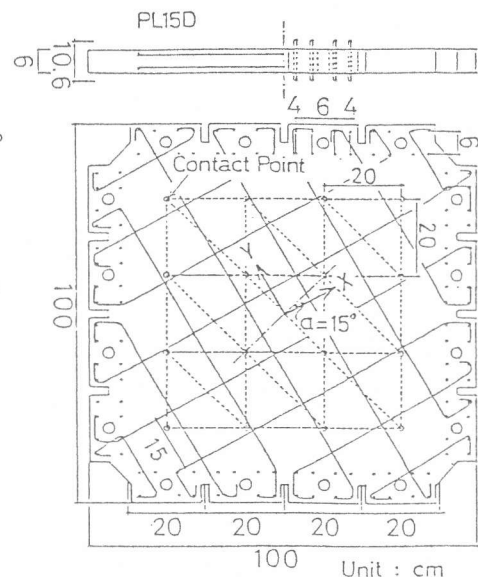


図2. 供試RC板の寸法、配筋

相対変位が、押しあて式ひずみ計により計測された。これらの計測変位より、コンタクトポイントにより囲まれた一辺 20 cm の正方形要素のひずみが算出された。また、X および Y 方向鉄筋には所定の位置に抵抗線ひずみ計が貼付（供試体により異なり 26 ~ 52 箇所）

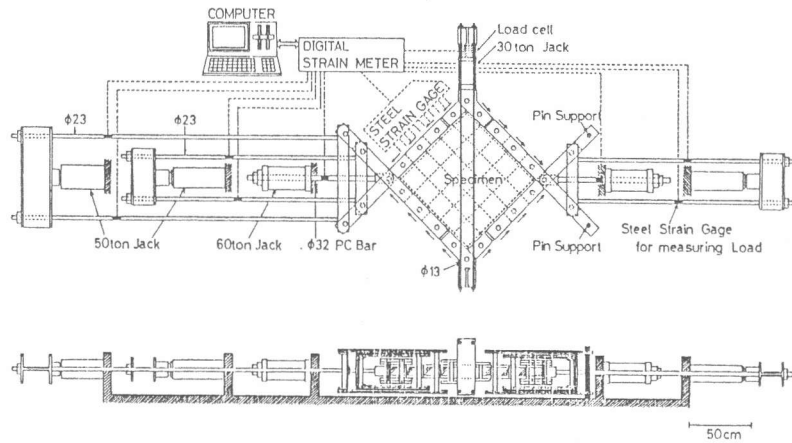


図 3.せん断力載荷システムの概要

され、鉄筋軸方向ひずみが検出された。

3. 実験結果

表 1 に鉄筋および試験時コンクリートの力学的性質を、表 2 に実験より得られた結果をまとめて示す。表 2 中のひびわれせん断応力および鉄筋降伏時せん断応力はすべて、それらの現象が最初に観察された時に対応している。また、図 4 に載荷実験終了時に於けるひびわれ状況の 1 例を示した。図より解るように、外力せん断力は供試体に対して偏ること無く均等に加わっていたものと推察される。なお最終的な破壊は X および Y 方向鉄筋の両者が降伏した時点と考えられコンクリートの圧壊は生じていない。

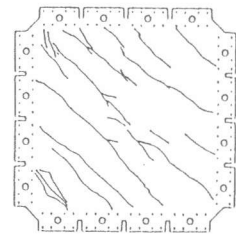


図 4. ひびわれ状態 (PL30D)

3.1せん断応力 (v) - 平均せん断ひずみ ($m\gamma_{av}$) 関係 --- 図 5 および図 6 に $v - m\gamma_{av}$ 関係を示す。 $m\gamma_{av}$ は、図 2 中に示した試験域各要素ひずみの平均値である。図 5 の PL15R および PL45R に於て、剛性の低下がかなり初期の段階から生じている。これは、RC 板に対してせん断力と同時に若干の曲げモーメントが加わった為であろう。

3.2せん断応力 (v) - 鉄筋応力ひびわれ面直交方向成分 (a_{on}^S)

関係 --- 図 7 に $v - a_{on}^S$ 関係をまとめて示す。ここで、

a_{on}^S は実測鉄筋ひずみより求めた応力を全計測点に対して平均し、さらにコンクリート単位面積あたりに換算したものである。図中

45 度方向の破線は、鉄筋のみに依ってせん断力が負担されると仮定した場合に対応している。実験曲線との差は鉄筋とコンクリートの間の付着作用に起因しており、同図より、異形鉄筋を用いた D

シリーズのほうが丸鋼を用いた R シリーズよりも付着作用が大きく生じていることがわかる

3.3せん断応力 (v) - 鉄筋応力ひびわれ面方向成分 (a_{ont}^S) 関係

図 8 に $v - a_{ont}^S$ 関係をまとめて示す。なお a_{ont}^S は先に述べた a_{on}^S と同じ手順で算出されており、

表 1. 材料の力学的性質

Concrete	Compressive Strength	286.5
	Tensile Splitting Strength	27.2
	Modulus of Elasticity *	2.37×10^6
Steel	D7 Yield Strength	3240
	Modulus of Elasticity	1.98×10^6
	Yield Strength **	3159
	φ6 Modulus of Elasticity	1.96×10^6

* Secant Modulus at $1/3 f_c'$ unit: kgf/cm^2
** 0.2% off-set stress

表 2. 供試体配筋および実験結果一覧

	Reinforcement	α^* (°)	Cracking		Yielding in X-bar		Yielding in Y-bar		Maximum Capacity		Average Crack Spacing Δm (cm)
			V (kgf/cm^2)	$m\gamma_{av}$ (%)	V (kgf/cm^2)	$m\gamma_{av}$ (%)	V (kgf/cm^2)	$m\gamma_{av}$ (%)	V (kgf/cm^2)	$m\gamma_{av}$ (%)	
	S = 11 cm $\rho_x = \rho_y = 0.857\%$ R6 : SR 24	0	12.0	0.020	19.1	0.025	---	---	32.0	0.924	11.3
PLO0R		15	8.0	0.014	17.0	0.081	29.6	0.488	32.1	1.730	
PL15R		30	12.0	0.011	20.0	0.069	29.0	0.335	31.9	1.770	
PL30R		45	14.0	0.034	24.0	0.169	25.0	0.190	34.9	1.570	
	S = 15 cm $\rho_x = \rho_y = 0.870\%$ D7 : SD 30	0	14.0	0.028	20.0	0.042	---	---	30.3	1.670	10.7
PLO0D		15	20.0	0.006	---	---	---	---	24.1	0.442	
PL15D		30	14.0	0.009	21.1	0.075	25.7	0.495	26.1	1.230	
PL30D		45	14.0	0.014	26.9	0.188	28.0	0.404	29.0	1.150	

* The Angle of X Reinforcement with respect to The Direction of Principal Tensile Stress

骨材の噛合いおよび主筋のダウエル作用で表されるひびわれ面での伝達せん断力に対応している。α = 15度および30度のひびわれ面でせん断滑りの生じる供試体に於ては、ひびわれの発生後徐々に a_{0nt}^S が増大し、或る最大値に到達して後はひびわれ幅の漸増およびひびわれ面に於けるせん断滑り方向の逆転により急激に減少する。このせん断滑り方向の逆転は、実測データにより確認されている。

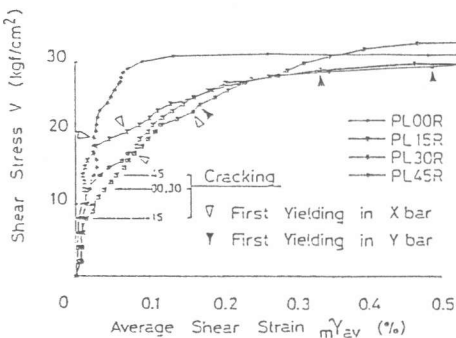


図5. v - mγav 関係 (Rシリーズ)

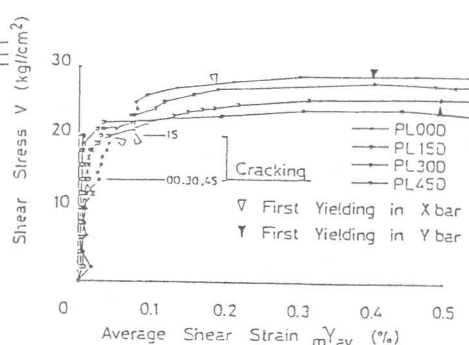


図6. v - mγav 関係 (Dシリーズ)

4. RC板の解析

4.1解析の方法——解析は、Gambarova²⁾により示された方法に幾つかの修正を加えて行った。コンクリート板には最初からひびわれが生じているものと仮定し、微小なひびわれ幅 δ_n およびひびわれ面での滑り δ_t の生じている初期状態を以下の手順で求める。なお、以下の各式に於ける単位はすべてcm, kg/cm²である。

(i) δ_n の初期値を与える。

(ii) δ_t の仮定 $\{\epsilon^{CR}\} = \{\sigma\} / a_m$ a_m : 実測ひびわれ間隔

(iii) 骨材の噛合いによるひびわれ面直交方向およびひびわれ面方向の伝達応力 σ_{nt}^{CR} および σ_{nt}^{CR} をFenwick等³⁾の実験結果に基づいて、若干の変更を加えたWalraven⁴⁾の実験式により求める。

$$\sigma_{nt}^{CR} = \{32.36n^{-0.63} + (0.536n^{-0.552} - 1.5)fc'\}(\delta_t - 0.00436\delta_n) \quad (1)$$

$$\sigma_{nt}^{CR} = \{29.16n^{-0.8} + (0.459\delta_n^{-0.707} - 2.0)fc'\}(\delta_t - 0.00436\delta_n) \quad (2)$$

(iv) X方向およびY方向鉄筋のダウエル作用による伝達応力 σ_{nt}^{DX} および σ_{nt}^{DY} を、Dulaeskaの実験式⁵⁾により求める。

$$\delta_t = \frac{3.58A_o\sigma_{nt}^D}{10^4\phi} \sqrt{\frac{1}{fc'} \tan\left(\frac{A_o\sigma_{nt}^D}{TF} \frac{\pi}{2}\right)} \quad (3)$$

$$TF = 0.201\phi^2\rho fy \left\{ \sqrt{\sin^2\theta + \frac{fc'}{0.03fy}} - \sin\theta \right\} \quad (4)$$

fc' : コンクリート圧縮強度, ϕ, fy, θ : 鉄筋の直径, 降伏強度および傾斜角, A_o : 鉄筋一本の負担断面積, $\rho: 1 - (\sigma_s/fy)^2$

(v) ひびわれ面直交方向およびひびわれ面方向伝達応力 σ_{nt}^{SC} および σ_{nt}^{SC} の計算。

$$\sigma_{nt}^{SC} = \sigma_{nt}^{CR} \quad (5) \quad \sigma_{nt}^{SC} = \sigma_{nt}^{CR} + \sigma_{nt}^{DX} + \sigma_{nt}^{DY} \quad (6)$$

(vi) ひびわれ面方向のコンクリート直応力 σ_{tt}^{SC} の仮定。

(vii) ひびわれを含むコンクリート要素の $\{\epsilon^S\}$ の計算。

$$\{\epsilon^S\} = \{\epsilon^{SC}\} + \{\epsilon^{CR}\} \quad (7) \quad \{\epsilon^{SC}\} = [D^{SC}]\{\sigma^{SC}\} \quad (8)$$

$[D^{SC}]$: コンクリートの柔性マトリックス

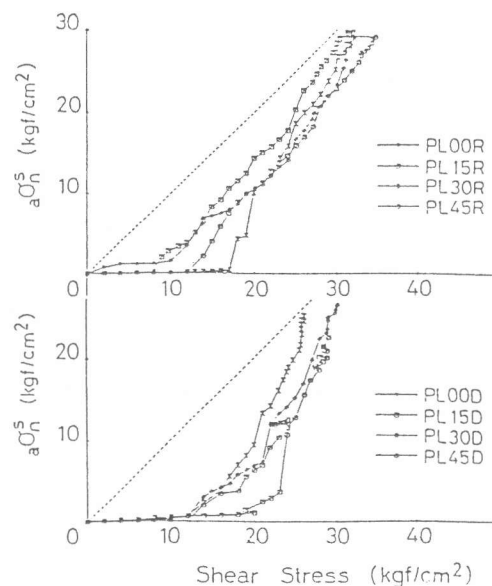


図7. v - a0nt^S 関係

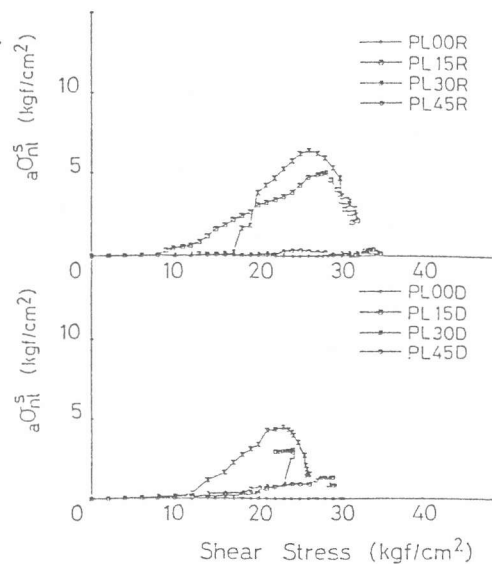


図8. v - a0nt^S 関係

表 3. 解析結果一覧

	Cracking		Yielding in X-bar		Yielding in Y-bar	
	V (kgf/cm ²)	m _{av} (%)	V (kgf/cm ²)	m _{av} (%)	V (kgf/cm ²)	m _{av} (%)
PL00R	21.5	0.022	27.1	0.147	—	—
PL15R	21.0	0.022	24.8	0.191	28.5	0.750
PL30R	20.0	0.022	24.3	0.253	27.3	0.404
PL45R	19.5	0.022	27.1	0.310	27.1	0.310
PL00D	21.5	0.022	28.2	0.141	—	—
PL15D	21.0	0.022	25.6	0.147	28.2	0.655
PL30D	20.0	0.022	25.8	0.219	28.2	0.308
PL45D	19.5	0.022	28.2	0.272	28.2	0.272

(ix) 鉄筋応力を CEB-FIP Model Code⁶⁾に基づいて求める。

$$\{\sigma^S\} = 2.5E_s\{\epsilon^S\} \quad (9) \quad E_s: \text{鉄筋弾性係数}$$

(ix) ひびわれを含む要素全体に対する応力およびひびきを求める。

$$\{\sigma\} = \{\sigma^{SC}\} + \{\sigma^S\} \quad (10) \quad \{\epsilon\} = \{\epsilon^{SC}\} + \{\epsilon^{CR}\} \quad (11)$$

(x) $\sigma_{tt} = k_1 \sigma_{nn}$ なら次のステップへ進む。 $\sigma_{tt} \neq k_1 \sigma_{nn}$ ならば σ_{tt}^{SC} を再仮定してステップ (vii) に戻る。 k_1 : 外力条件係数

(xi) $\sigma_{nt} = k_2 \sigma_{nn}$ なら次のステップへ進む。 $\sigma_{nt} \neq k_2 \sigma_{nn}$ ならば δt を再仮定してステップ (iii) に戻る。 k_2 : 外力条件係数

以上の手順により初期状態が求まれば、以後はほぼ同じ手順を増分形式で実行すればよい。ただし、ステップ (iii) は、森田による付着応力-滑り関係

を用いて鉄筋の引張硬化現象を解析し結果を等価鉄筋比の概念で表して鉄筋の剛性マトリックス $[C^S]$ を求め $\{\sigma^S\} = [C^S]\{\epsilon^S\}$ により鉄筋応力を求める方法で置換える。解析結果を表 3, 図 9, 10 に示す。

なお、同図に於て解析結果は、原点より始まる破線で表されておりひびわれの発生に至る迄は、上で述べた解析とは異なりひびわれの無い連続体として解いた結果を実線で示した。実験結果との比較より、鉄筋降伏時期等に若干の相違が認められるものの全体としての変形挙動は大略一致しており本解析法により RC 板の解析が可能であると考えられる。また、先に述べたひびわれ面に於けるせん断滑り方向の逆転現象もまた解析によって確認されている。

5. 結語

鉄筋コンクリート壁板のせん断抵抗挙動を明らかにする為に新たに考案されたせん断力載荷方法を用いて RC 板のせん断力加力実験が実施され、載荷方法の妥当性が示されると同時に鉄筋の付着挙動、ひびわれ面での伝達力などに関して幾つかの知見が得られた。また、ひびわれを含む鉄筋コンクリート要素に対して、ひびわれ面での力の伝達および鉄筋の引張硬化現象を考慮した解析が行われ、実験結果と比較的良好一致をみた。

参考文献

- 1) F. Vecchio and M. P. Collins, "The Response of Reinforced Concrete to In-Plane Shear and Normal Stress", University of Tront. Pub. No. 82-03, March, 1982.
- 2) Z. P. Bazant and P. Gambalova, "Rough Cracks in Reinforced Concrete", J. of Structural Division, ASCE, April/1980.
- 3) R. C. Fenwick et al., "Mechanics of Shear Resistance of Concrete Beams", J. of Structural Division, ASCE, Oct./1968.
- 4) H. W. Reinhardt and J. C. Walraven, "Cracks in Concrete subjected to Shear", J. of Structural Division, ASCE, Jan./1982.
- 5) H. Dulakuska, "Dowel Action of Reinforcement Crossing Cracks in Concrete", J. of the ACI, Dec./1972.
- 6) CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, 1978.
- 7) 森田 司郎, "鉄筋コンクリートにおける付着とひびわれに関する研究", 京都大学博士学位論文, 昭和43年4月,
- 8) 青柳 征夫, "鉄筋コンクリートシェル要素の面内せん断", RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, JCI, 昭和57年, 6月

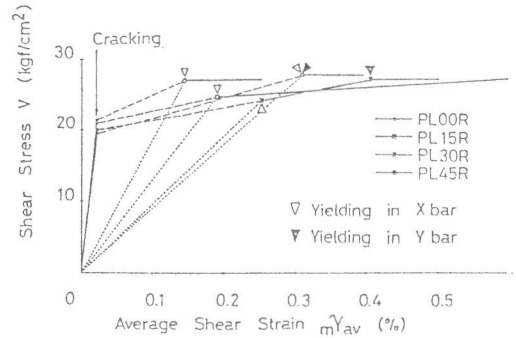


図 9. v-γ 関係解析結果 (R シリーズ)

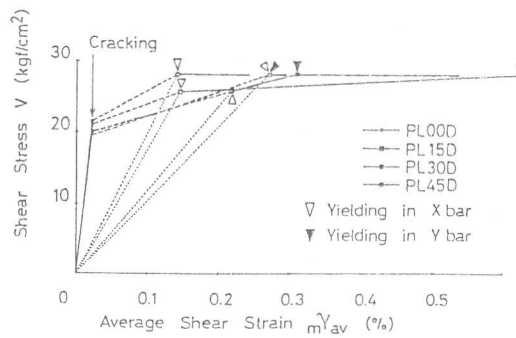


図 10. v-γ 関係解析結果 (D シリーズ)