

論文

[2081] X型鋼板を用いたRCはりのせん断抵抗挙動

山田昌昭*1・吉田義隆*2

1. はじめに

近年X型配筋によりせん断破壊を防止し、部材のじん性の向上を計る方法が実施されるようになり、その効果の大であることが実験等で確認されている。しかし、X型配筋は施工がやや困難であり、とくに柱部材のように2方向からの力をうける場合、その配筋が一段と困難となる。このような問題を解決する方法として著者らはX型鋼板を用いたRCはりを作成し、そのせん断抵抗挙動を初歩的な実験により検討した。その結果、X型鋼板を使用することによりRCはりのせん断抵抗力とじん性は非常に改善することが判明した。本研究ではとくに鋼板断面積と拘束筋ならびに a/d の影響について検討した。また、鋼板端部の定着方法についても若干の検討を加えた。

なお、X型配筋は曲げ耐力の増加にも寄与し得るものであるが、本研究で使用したX型鋼板はせん断のみに抵抗するものである。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

実験に使用した試験体は12cm×20cmの断面で図-1に示すような形状寸法をした単純はりである。No.1～No.3は図-1, a), b), c) に示すように $a/d=2.5$ (せん断スパン $a=42.5$ cm) のはりで、No.4～No.6は $a/d=3.5$ ($a=59.5$ cm) のはり (a の長さが異なるだけなので図は省略) である。荷重の荷重位置はいずれも中央1点荷重である。各供試体とも主鉄筋は2×D16 (SD30) を使用し、

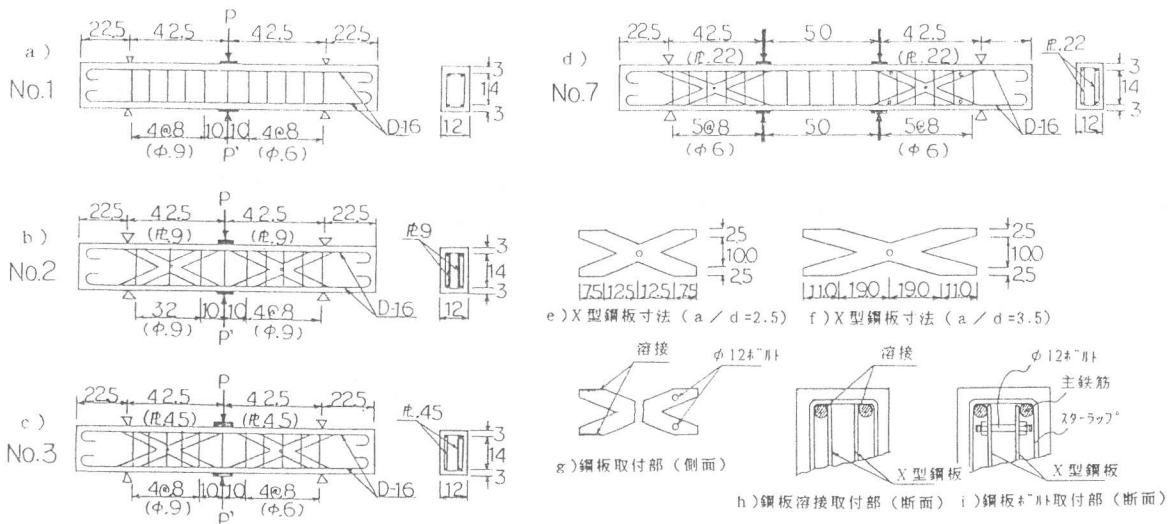


図-1 供試体およびX型鋼板寸法とその取付詳細図 (単位: cm)

*1 大阪府立工業高等専門学校教授、建設工学科、工修 (正会員)

*2 同上 技師、建設工学科

スターラップは $\phi 9$ および $\phi 6$ (SR30)を使用した。X型鋼板は幅5cmで、厚みをそれぞれ9mm、4.5mm、2.2mmの3種類とし形状寸法は図-1 e), f)に示す通りである。鉄筋および鋼板の力学的特性は表-1に示すとおりである。使用したコンクリートの示方配合ならびに試験時の圧縮強度と弾性係数の平均値は表-2に示すとおりである。No.1~No.3のうちNo.1は鉛直スターラップを有する通常のRCはりである。はりの左側には $\phi 9$ のスターラップを右側には $\phi 6$ のスターラップを8cm間隔に配置した。これらのせん断補強筋比はそれぞれ、1.3%および0.6%である。スターラップはすべて溶接接合された閉鎖形のものを用いた。はりの曲げ終局荷重は $P = 9.9\text{tf}$ (計算値)であり、せん断終局荷重(計算値)

表-1 鉄筋の力学的特性(単位: kgf/mm^2)

	種類	公称断面積	降伏点	引張強さ
スターラップ	$\phi 6$	28.3	32	46
	$\phi 9$	63.6	34	35
主鉄筋	D16	198.6	34	51
X型プレート	PL 2.2	11.0	32	37
	PL 4.5	22.5	27	41
	PL 9.0	45.0	34	52

表-2 コンクリートの示方配合

骨材の最大寸法(mm)	スランブの範囲(cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kgf/m^3)			
				W	C	S	G
20	14~16	54	44	195	360	780	1000

圧縮強度 = $460 \text{ kgf}/\text{cm}^2$
 弾性係数 = $3.28 \times 10^5 \text{ kgf}/\text{cm}^2$

は 12.0tf ($\phi 6$ 側)および 21.2tf ($\phi 9$ 側)である。計算値はいずれも土木学会コンクリート標準示方書の式によった。No.2のはりは厚さ $t = 9 \text{ mm}$ のX型鋼板を左右に配置したもので、はりの左側には $\phi 9$ のスターラップを3本、右側には $\phi 9$ のスターラップを5本(8cm間隔)、それぞれ拘束筋として配置した。X型鋼板の厚みははりの終局荷重 10tf によって生じるせん断力 5tf をすべてX型鋼板の引張力で抵抗させた場合の必要断面積 4.5cm^2 より厚み $t = 9\text{mm}$ (降伏応力 = $30 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ と仮定)を決定したものである。また、No.3のはりは厚さ $t = 4.5\text{mm}$ のX型鋼板を左右に配置したもので、左右の拘束筋は図-1に示すように $\phi 9$ 、と $\phi 6$ を8cm間隔に配置した。No.2、3のはりとも、X型鋼板は主鉄筋に図-1 g), h)のように溶接固定し、斜め引張力が十分主鉄筋に伝達できるようにした。なお、鋼板は座屈防止のため中央部で相互に $\phi 9$ のボルトで締結した。一方、No.4~6の供試体は $a/d = 3.5$ のはりで、No.4はNo.1と同様の通常のRCはりで左側に $\phi 9$ 右側に $\phi 6$ のスターラップを8cm間隔に配置したものである。No.5とNo.6は a/d の違いを除いてはNo.2および3と同じはりである。No.7の供試体(図-1, d))は $a/d = 2.5$ でX型鋼板の厚みを2.2mmにしたものである。荷重は2点荷重とした。X型鋼板は溶接により主鉄筋に結合したものと(左側)と溶接しないで図-1 g), i)のように鋼板端部を互いに $\phi 12$ のボルトで締結して、ボルト前面のコンクリートの支圧力で引張力に抵抗させるタイプ(右側)のものにした。

2.2 試験方法

本実験に用いた荷重装置は最大荷重 20tf のRCはり用の正負交番荷重試験機で、荷重は変位制御で実施した。荷重は弾性変位の整数倍の変位を各3回繰り返して荷重した。はり中央部の変位と主鉄筋およびスターラップのひずみをそれぞれ1回目の変位振幅に対して測定した。

3. 実験結果とその考察

実験結果の概略は表-3(実験結果一覧表)に示したとおりである。表中の斜めひびわれ荷重は土木学会コンクリート標準示方書に提示されている棒部材のせん断耐力式における V_{cd} (コンクリートのせん断耐力)により計算された値である。また、ひびわれ状況図は図-1の供試体形状図に対応させている。たとえば、No.1供試体では、左側が $\phi 9$ 、右側が $\phi 6$ のスターラップを

配置したものである。また、図-2には各供試体の荷重～変位図を示した。一方、表-4にはスターラップおよびX型鋼板のせん断分担率を示した。ここで、せん断分担率とは載荷時の作用せん断力に対する斜めひびわれを横切るスターラップの全引張力の割合(%)をひずみ測定結果より計算したものである。X鋼板のせん断分担率は鋼板に生じた引張力の鉛直分力の作用せん断力に対する割合を計算したものである。なお、X鋼板を配置したはりでも斜めひびわれの生じたNo.3とNo.7の供試体についてはスターラップのせん断分担率もX鋼板のせん断分担率とともに表示した。表-4を図で表したものが図-3～5である。図-6はX鋼板を使用したはりを解析するために使用した解析用トラスモデルを図示したものである。表-5はトラス計算の結果求められた圧縮斜材と引張斜材のせん断分担率を示したものである。以下、実験結果について考察する。

〈破壊状況〉

載荷試験の結果、7本のはりのうちX型鋼板を有しないNo.1とNo.4の供試体のみ斜めひびわれに沿うウェブのせん断引張破壊によって破壊した。とくにa/dの小さいNo.1はり (a/d=2.5) はφ6スターラップを配置した側で斜めひびわれ幅が拡大して、ウェブコンクリートが完全に破壊した。この際、斜めひびわれを横切るスターラップは全て降伏した。一方、φ9スターラップを配置した側も斜めひびわれ幅が拡大し、ウェブコンクリートが破壊した。一方、No.4のはりはa/d=3.5で、曲げ終局荷重がNo.1供試体に比べて低いため、φ6スターラップの側のみウェブコンクリートが破壊した。一方、X型鋼板を配置したNo.2～3供試体(a/d=2.5)、No.5～6

表-3 実験結果一覧表

供試体 No.	a/d	曲げひび割れ荷重 (tf)		斜めひび割れ荷重 (tf)		終局曲げ荷重 (tf)		破壊荷重 (tf)	最大変位	破壊形態	ひび割れ状況図
		計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値				
1	2.5	3.9	5.0 -4.0	5.3	7.0 -6.0	9.9	11.0	±3Δy	せん断破壊		
2	2.5	3.9	3.0 -2.3	5.3	なし	9.9	13.5	±4Δy	曲げ破壊		
3	2.5	3.9	4.0 -2.0	5.3	10.0 -10.0	9.9	15.4	±4Δy	曲げ破壊		
4	3.5	2.8	2.0 -1.0	5.3	6.0 -5.0	8.1	7.8	±4Δy	せん断破壊		
5	3.5	2.8	2.0 -2.0	5.3	なし	8.1	10.0	±5Δy	曲げ破壊		
6	3.5	2.8	2.0 -2.0	5.3	なし -8.0	8.1	10.0	±5Δy	曲げ破壊		
7	2.5	3.9	2.2 -1.5	5.3	6.7 -4.7	9.9	11.0	±5Δy	曲げ破壊		

(a/d=3.5) およびNo.7供試体(a/d=2.5、鋼板厚=2.2mm)はいずれも曲げひびわれが拡大して、上下縁のコンクリートが圧潰し、曲げ破壊を生じた。X型鋼板(厚さt=9mm)を使用したNo.2とNo.5のはりは腹部に若干の曲げひびわれは生じたものの、せん断ひびわれは発生しなかった。一方、鋼板厚の薄いNo.3、No.5(t=4.5mm)およびNo.7(t=2.2mm)供試体では変位振幅の増大に伴って斜めひびわれが発生したが、せん断破壊を生じることなく、はり曲げで破壊した。

〈荷重～変位関係〉

荷重～変位関係図をみると、せん断破壊を生じた、No. 1 および No. 4 供試体は S 字型の脆性的な曲線を描くのに対し、曲げ破壊を生じた他の供試体はいずれも、じん性に富む、紡錘形の荷重～変位曲線を描いている。X 型鋼板の使用が RC はりのじん性の向上に役立ったことがわかる。

〈せん断に対する抵抗挙動〉

— No. 1 供試体 —

表-4 および図-3 より $\phi 9$ 側のスターラップの分担率は $\pm 1\Delta y$ のとき 70% および 52% であるが、 $\pm 3\Delta y$ でいずれも 100% に増大した。すなわち変位振幅の増大とともに、スターラップに働く引張力が増大し最終的には全せん断力がスターラップにより分担されることになった。一方、 $\phi 6$ 側のスターラップの分担率は $\pm 1\Delta y$ のとき、54%、23% であり、 $\pm 3\Delta y$ で 66% と 78% に増大するが、100% とはならなかった。これはスターラップ量が少ないため、終局せん断荷重をスターラップのみで負担できず、コンクリートの抵抗成分

(Aggregate Interlock 作用や、ダウエル作用および、斜圧縮応力束によるアーチ作用など) によって抵抗したためと思われる。とくに斜めひびわれの外側に形成されたアーチ作用が影響していると考えられる。 $\phi 6$ のスターラップのうち斜めひびわれを横切るものはすべて降伏した。

— No. 2 供試体 —

せん断スパン内に斜めひびわれが生じなかったため、全せん断力は X 型鋼板で受け持たれたものと考えられる。X 型鋼板に生じた引張ひずみより引張側鋼板で抵抗したせん断力を計算し、それを分担率で示した (表-4、図-3)。これによると、拘束筋を $\phi 9 @ 16$ cm に配置した側では全せん断力の 30~48% を、また拘束筋を密に ($\phi 9 @ 8$ cm) 配置した側では全せん断力の約 20% を X 型鋼板の引張力で負担していることがわかる。したがって、残りのせん断力はコンクリートの斜圧縮力によ

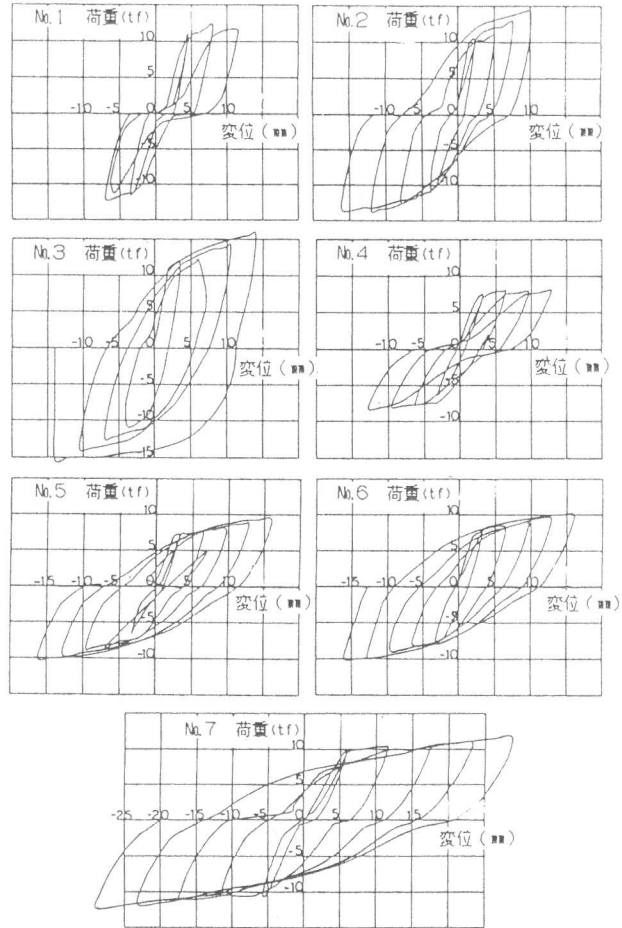


図-2 荷重～変位関係図

表-4 スターラップ^oおよびX鋼板のせん断分担率

供試体 No.	荷重方向	左側・せん断分担率 (%)				右側・せん断分担率 (%)			
		1 Δy	2 Δy	3 Δy	4 Δy	1 Δy	2 Δy	3 Δy	4 Δy
1		$\phi 9$ スターラップ ^o @ 8 cm				$\phi 6$ スターラップ ^o @ 8 cm			
	正	70	92	100	—	54	64	66	—
	負	52	85	100	—	23	32	78	—
2		X-P 9mm (拘束筋 $\phi 9 @ 16$ cm)				X-P 9mm (拘束筋 $\phi 9 @ 8$ cm)			
	正	37	29	28	31	27	10	18	23
	負	35	29	41	49	33	26	23	23
3		X-P 4.5mm (拘束筋 $\phi 9 @ 8$ cm)				X-P 4.5mm (拘束筋 $\phi 6 @ 8$ cm)			
	正	31	29	30	36	36	42	44	55
	負	35	34	42	48	46	42	48	73
4		$\phi 9$ スターラップ ^o @ 8 cm				$\phi 6$ スターラップ ^o @ 8 cm			
	正	54	78	100	100	40	56	92	100
	負	54	94	100	100	24	50	68	64
5		X-P 9mm (拘束筋 $\phi 9 @ 24$ cm)				X-P 9mm (拘束筋 $\phi 9 @ 8$ cm)			
	正	67	46	43	40	11	7	8	7
	負	43	35	23	22	9	10	12	13
6		X-P 4.5mm (拘束筋 $\phi 9 @ 8$ cm)				X-P 4.5mm (拘束筋 $\phi 6 @ 8$ cm)			
	正	35	42	39	42	41	30	31	32
	負	47	31	33	36	26	32	32	34
7		X-P 2.2mm (溶接定着)				X-P 2.2mm (ボルト定着)			
	正	26	24	22	23	21	16	14	14
	負	28	28	29	32	15	15	15	18
		$\phi 6$ スターラップ ^o @ 8 cm				$\phi 6$ スターラップ ^o @ 8 cm			
	正	22	24	24	29	37	35	37	40
	負	15	21	22	24	14	26	36	58

って負担されているものと思われる。このことから拘束筋を密に配置することにより、コンクリート圧縮束のせん断抵抗力を増大させることができ、X型鋼板に作用する引張力を低減させることができると思われる。トラスモデルによる解析結果（表-5）によると、鋼板厚 9mm の場合、コンクリート圧縮束の幅を7cm とした場合、鋼板引張力によるせん断分担率は17%で、拘束筋の密な場合の実験値と比較的一致しているように思われる。圧縮側の鋼板ひずみの測定結果はばらつきが大きく一様ではないが、最大で 500×10^{-6} 程度であった。コンクリートのヤング率を $3.2 \times 10^5 \text{ kmf/cm}^2$ 、圧縮束の断面積を $7\text{cm} \times 12\text{cm} = 84\text{cm}^2$ と仮定するコンクリートの斜圧縮力は 13440 kgf となり、せん断抵抗成分は約4.9tf、せん断分担率で約70%となり、ほぼ実験値および計算値と一致する。なお、破壊荷重が計算値を大幅に上回ったのは、はりのアーチ作用が影響を及ぼしたものと思われる。

— No. 3 供試体 —

この供試体はX型鋼板厚さが 4.5mm であるため、若干の斜めひびわれが発生した。X型鋼板の引張力によるせん断分担率とスターラップによるせん断分担率は表-4 のとおりである。X型鋼板による分担率は拘束筋の多い左側 ($\phi 9 @ 8\text{cm}$) で 31~48%、少ない右側 ($\phi 6 @ 8\text{cm}$) で 36~73% と No. 2 供試体同様の傾向を示している。一方、斜めひびわれ発生によってスターラップ（拘束筋）にも引張力が作用したが、これの分担率は左側 ($\phi 9 @ 8\text{cm}$) で 15~42%、右側 ($\phi 6 @ 8\text{cm}$) で 8~28% と鉄筋量の多いほど大きなせん断分担率を示している。X鋼板とスターラップを合計したせん断分担率では左・右とも 40~90% のせん断分担率を示した。当初の想定では供試体の設計荷重として10tf（せん断力として5tf）を見込んでいたのに対し、載荷荷重として15.7tfが作用したため、鋼板およびスターラップのせん断分担率が增大したものと思われる。破壊荷重の増大はアーチ作用の影響と考えられる。コンクリート斜圧縮束の影響はNo. 2 供試体ほど大ではないが、それでも約50%程度のせん断力は斜圧縮力で抵抗していたものと思われる。

— No. 4 供試体 —

a/d が大きくなったため、曲げ終局荷重が低下し、作用せん断力も低くなった。したがって $\phi 6$ スターラップを配置した右側のはりでせん断破壊を生じた。 $\phi 9$ 側（左

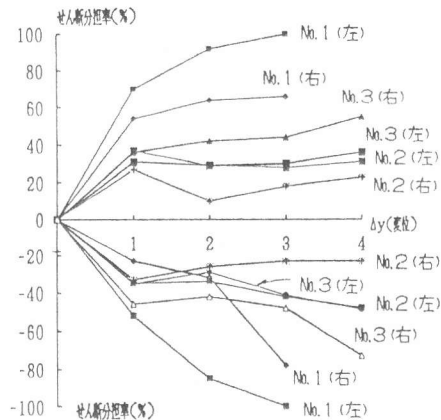


図-3 変位振幅とせん断分担率の関係 (a/d=2.5)

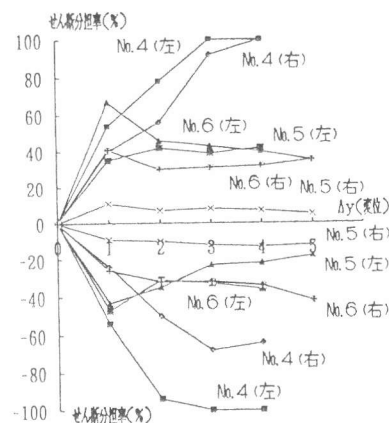


図-4 変位振幅とせん断分担率の関係 (a/d=3.5)

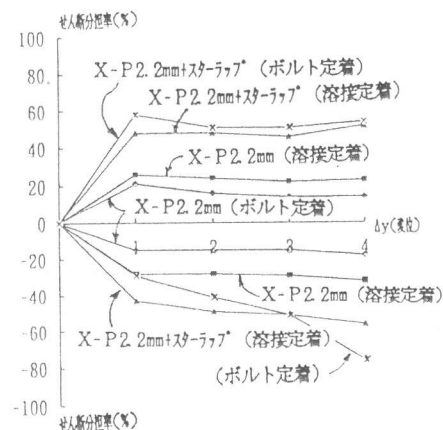
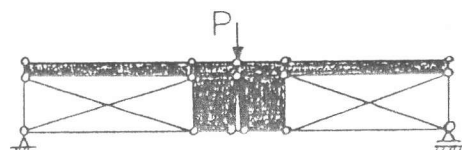


図-5 2.2mmとスターラップのせん断分担率の割合



■ : 平面部材
○—○ : トラス部材

図-6 解析用トラスモデル

側)は斜めひびわれは生じたものの破壊には至らなかった。破壊の様子やスターラップのせん断分担率の傾向はNo. 1のはりと同様であった。

— No. 5 供試体 —

No. 2 供試体と同様に、若干の曲げひびわれが生じのみで、はりには斜めひびわれは発生せず、X鋼板のせん断分担率もNo. 2と同様にはり左側(拘束筋φ9@16cm)で約40%、右側(拘束筋φ9@8cm)で約10%と拘束筋の効果の大であることを示している。

— No. 6 供試体 —

No. 5 供試体と比べX型鋼板が薄いため、はり左側(φ9側)で斜めひびわれが1本生じたが、No. 3ほど破壊荷重が高くないため、スターラップに働く引張力は小さく、せん断分担率も最大で10%であった。したがって、大部分のせん断力はX型鋼板とコンクリートの斜圧縮応力束で受け持たれた。X型鋼板のせん断分担率は左側(φ9@8cm)で35~40%、右側(φ6@8cm)で30~35%と拘束筋の少ない方の分担率が低くなっており、他の供試体の傾向と逆になった。これは右側(φ6@8cm)の鋼板ひずみゲージ4枚のうち2枚が測定不能となったため平均値がとれず、測定値がやや小さく出たために原因があるのかもしれない。いずれにしろ、設計荷重10tf程度の荷重であれば厚さ4.5mmの鋼板で十分せん断に抵抗でき、斜めひびわれの発生も防げることが判明したものと考えてよい。

— No. 7 供試体 —

No. 1~6の供試体と異なり、鋼板厚さをさらに薄く $t=2.2\text{mm}$ としたため、はりのせん断スパン内には斜めひびわれが発生した。しかし、はりのせん断破壊は生ぜず、はりは曲げにより破壊した。X型鋼板のせん断分担率ははり左側(端部溶接固定)で、20~30%、右側(ボルト固定)で約15%であった。スターラップの分担率は左側で約25%右側で約40%であり、鋼板とスターラップの合計分担率ではそれぞれ左側で約45~55%、右側で約55%と同程度の値となる。これらのことから、コンクリートの斜圧縮応力束によるせん断分担率は約50%程度と考えられる。斜めひびわれの発生は左側(溶接固定)では少なく、右側(ボルト固定)で多いので、ボルト定着は、溶接に比べてやや効果が劣ることが判った。端部の定着さえ十分できれば設計荷重(10tf)に対してX型鋼板の厚さは2.2mmでも十分と思われる。

4. 結 論

本研究で得られた結果をまとめると下記のとおりである。

- 1) X型鋼板はせん断破壊の防止に役立つものと思われる。
- 2) 鋼板の断面積は全せん断力を鋼板引張力で抵抗させるのに必要な断面積の1/2~1/4程度でよい。1/4の場合には斜めひびわれが多少発生する可能性がある。
- 3) 拘束筋の効果が非常に大きいので、腹鉄筋比は0.5~1%程度、(間隔は1/2d程度)配置する必要があるように思われる。

参考文献

- 1) 南 宏一、松谷輝雄ほか：X形配筋ガイダンス、建築技術、No.483、pp. 101~162、May. 1991

表-5 トラスモデル解析結果

a/d	仮定 コンクリート幅	トラスモデル解析によるせん断分担率(%)			
		鋼板厚 9 mm		鋼板厚 4.5 mm	
		圧縮	引張	圧縮	引張
2.5	3 cm	67	24	66	21
	5 cm	72	20	72	17
	7 cm	75	17	77	14
3.5	3 cm	69	21	65	19
	5 cm	74	17	73	15
	7 cm	78	14	78	12