

報 文

横拘束筋を有するRCはりの
耐震せん断補強に関する一考察

岡山職業訓練短期大学校 宮内 克之

Study on Web Reinforcement for RC Beams
with Transversely Confining Reinforcement

Katsuyuki Miyauchi

要 約 曲げじん性改善を目的とした横拘束筋を有するRCはりの場合、地震動のような正負交番繰返し荷重が作用すると、通常のRCはりに比較して、よりぜい性的なせん断破壊を生じ易いものと考えられる。そこで横拘束筋を有するRCはりに対し、鉄筋比、コンクリート強度、せん断補強筋間隔を要因とした正負交番繰返し載荷試験を実施し、はりの挙動を明らかにするとともに、耐震せん断補強についての検討・提案を行なった。

その結果、横拘束筋を有するRCはりの場合、せん断補強に対する安全率が、示方書に示されるような値では十分でない場合が存在することが明らかとなった。これを受けて耐震せん断補強法の新たな提案を行ない、その設計計算例を示した。

I まえがき

鉄筋コンクリート部材の終局限界を考えると、一般に曲げ破壊はせん断破壊よりも塑性変形能に優れ、エネルギー吸収能が大きいとされている。従って、耐震設計においては、ぜい性的なせん断破壊よりも韌性に富んだ曲げ破壊を先行させることが原則である。また終局限界状態における設計に韌性の概念を導入することにより、いままで以上に材料の特性を評価できることになる。曲げ韌性の改善に関しては、横拘束筋で圧縮側コンクリートを拘束する研究⁽¹⁾が幾つかなされており、いずれもよい結果を得たと報告している。筆者も、耐震性及び資源の有効利用の両面から、横拘束筋を有する鉄筋コンクリートはりに対し一方向繰返し載荷試験を行なうことにより、韌性の改善方法⁽²⁾、横拘束筋を有するはりの挙動⁽³⁾、韌性の評価⁽⁴⁾等についての一連の研究を行なってきた。しかしながら、鉄筋コンクリート部材に地震動のような正負交番繰返

し荷重が作用すると、一方向載荷においては曲げ破壊を生じ韌性が大きい部材でも、韌性の低いせん断破壊を生じることが多いことが指摘されている。このことは鉄筋コンクリート部材の耐震性を評価する上で極めて重要な問題である。この点に関し土木学会標準示方書⁽⁵⁾、せん断によるぜい性的な破壊を避けるために、部材係数を一般の場合の1.2倍程度とするのがよいとしている。これについて矢村ら⁽⁶⁾は、鉄筋コンクリートはりに対し、降伏点をはるかに越えるような大変形の正負交番繰返し載荷試験を行ない、耐震設計においては、土木学会標準示方書に示すようにせん断補強鉄筋量を20%程度割増すことが適切であるとしている。

以上のことにより本研究においては、曲げスパンに曲げ韌性改善を目的とした横拘束筋を有する鉄筋コンクリートはりに対し、鉄筋比、コンクリート強度、せん断スパン比、せん断補強鉄筋間隔を要因とした正負交番繰返し載荷試験を実施し、はりの挙動を明らかにするとともに、耐震せん断補強についての検討・提案を行なった。

II 実験概要

実験に用いたはりの形状寸法を図-1に、各はりの条件を表-1に示す。主鉄筋にはSD30(D13:fsy=3730kgf/cm², D16:fsy=3240kgf/cm², D19:fsy=3360kgf/cm²)を、せん断補強用の閉合スターラップにはD6(fs_y=3370kgf/cm²)を使用し、間隔は、部材の割増し係数(後述)が $\alpha=1.0\sim 1.7$ 程度となるように、S=3.5~12.5cmの範囲で決めた。また横拘束筋にはD6の角形スパイラル筋を用い、間隔はせん断補強筋と同一とした。コンクリートは、W/C=60%(配合I)と50%(配合II)の2種類のものを使用した。

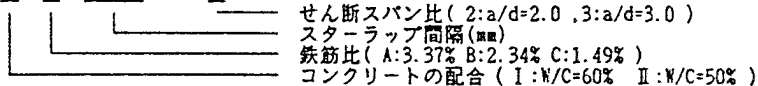
載荷試験は原則として材令28日において実施し、一端正方向載荷ではりを降伏させ、そのときのスパン中

央の変位 δy を基準にして、 $\delta y, 2\delta y, 3\delta y\cdots$ と破壊もしくは変形が著しくて載荷不能となるまでそれぞれ5回の正負交番繰返し載荷とした。試験中は、スパン中央における変位と、せん断スパンにおける正負鉄筋位置間でのせん断変形量を測定した。また主鉄筋およびせん断変形測定位置でのスターラップのひずみを電気抵抗線式ひずみゲージにより測定した。測定は図-2に示す様な計測システムによる自動計測とした。試験中は、変位、せん断変形量、主鉄筋ひずみをCRTによりモニターし、測定データは、GP-IB I/Fを介してデータファイルに収録し、後の解析に用いた。

表-1 RCはり供試体の条件及び実験結果

供試体の記号	鉄筋比 p (%)	鉄筋強度 f _{sy} (kg/cm ²)	コンクリート強度 f _c ' (kg/cm ²)	終局曲げ耐力 P _u		終局せん断耐力 計算値 V _u	割増し係数 α	λ	靱性率 μ	塑性エネルギー吸収能 Q
				実験値	計算値					
I B100-3	2.34	3240	276	8.66	7.48	8.54	1.14	0.275	2.0	3.42
I B75-3	2.34	3240	249	9.22	7.44	10.26	1.38	0.304	2.0	1.74
I B60-3	2.34	3240	249	9.33	7.44	12.09	1.63	0.304	2.0	2.09
I C50-3	1.49	3730	289	6.52	5.61	13.63	2.43	0.192	4.0	11.12
II A75-3	3.37	3360	302	13.34	11.02	10.86	0.99	0.375	1.0	0.31
II A50-3	3.37	3360	365	11.08	11.12	14.75	1.33	0.310	3.0	4.72
II A40-3	3.37	3360	450	12.60	11.25	17.77	1.58	0.252	3.0	4.32
II B100-3	2.34	3240	365	8.70	7.61	8.83	1.16	0.208	2.0	2.90
II B75-3	2.34	3240	325	8.84	7.55	10.54	1.40	0.233	3.0	3.82
II B65-3	2.34	3240	383	9.30	7.63	11.84	1.55	0.198	4.0	6.43
II B50-3	2.34	3240	358	8.75	7.60	14.30	1.88	0.212	4.0	7.29
II C125-3	1.49	3730	336	6.40	5.68	7.19	1.27	0.165	4.0	5.54
II C100-3	1.49	3730	397	6.27	5.76	8.45	1.47	0.140	5.0	5.88
II C75-3	1.49	3730	336	6.14	5.68	10.12	1.76	0.165	4.0	8.75
II B50-2	2.34	3240	410	13.92	11.51	14.45	1.26	0.185	2.0	2.55
II B40-2	2.34	3240	386	14.32	11.46	17.12	1.50	0.196	3.0	1.89
II B35-2	2.34	3240	386	14.46	11.46	19.08	1.67	0.196	3.0	2.21
II C75-2	1.49	3730	302	10.50	8.45	10.02	1.19	0.184	3.0	2.73
II C60-2	1.49	3730	352	9.98	8.55	11.99	1.40	0.158	4.0	5.04
II C50-2	1.49	3730	352	9.84	8.55	13.82	1.62	0.158	5.0	4.78

* 供試体の記号: I B 100 - 3



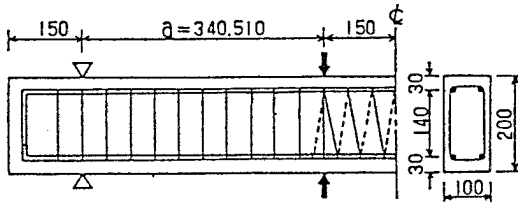


図-1 はりの形状寸法 (mm)

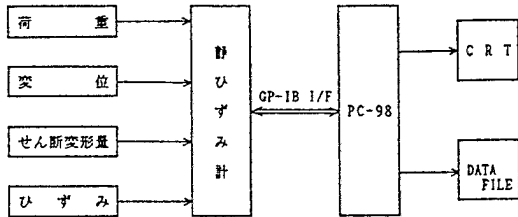


図-2 計測システム概略図

III 結果及び考察

1 はりの挙動

実験結果を表-1に示す。また図-3、4、5にはそれぞれ荷重変位曲線、せん断変形の推移、及び最終ひびわれ状況の一例を示す。供試体は、本来静的な載荷においては曲げ破壊を生じるはりも含め、すべてのはりがせん断破壊を生じた。

破壊に至る状況は、 $a/d=2.0$ のはりでは、初期段階から明瞭なせん断ひびわれが発生し、正反ひびわれの交差部を中心に復部コンクリートが崩壊するという完全なせん断破壊を示した。また靱性も著しく小さかった (例えばII B50-2)。 $a/d=3.0$ の場合、比較的鉄筋比の小さいはり (IC及びIICのはり) やスターラップ間隔が狭いはりについては、 $3\delta_y$ 程度まではせん断ひびわれの発展がみられず靱性に富んだものであったが (例えばIC50-3)、鉄筋比の比較的大きいもの (例えばIB50-3)、及びスターラップ間隔が広いはり (例えばIIB75-3) については、 $2\sim 3\delta_y$ 辺りから急激にせん断ひびわれの増加を示し、せん断破壊を生じた。また急激なせん断ひびわれの増加を示した時点は、スターラップの降伏が確認された時点とよく一致していた。

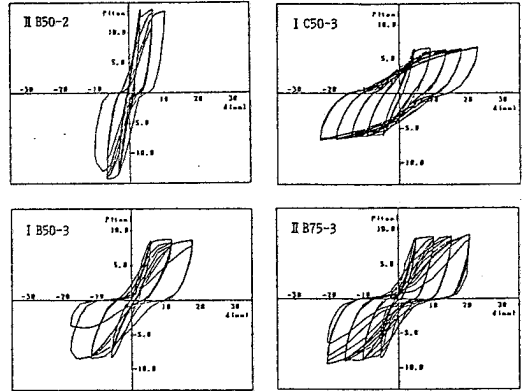


図-3 荷重変位曲線

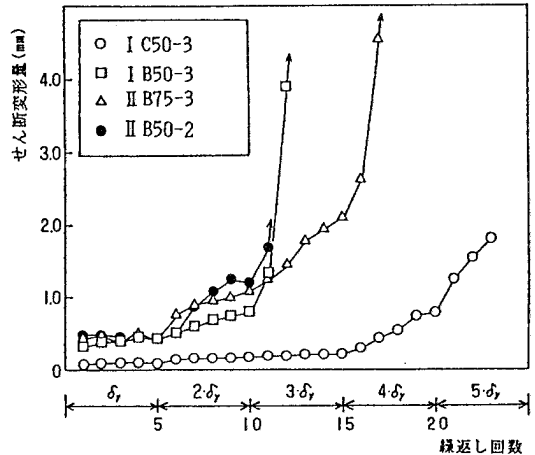


図-4 せん断変形の推移

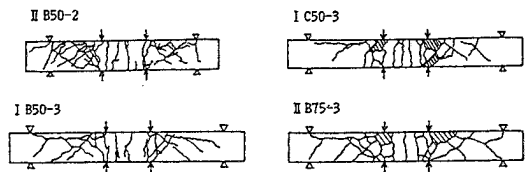


図-5 最終ひびわれ状況

2 部材係数の割増しと靱性との関係

先に述べたように土木学会コンクリート標準示方書は、耐震に関する設計においては、せん断に対する部材係数を一般の場合の1.2倍程度とするのが良いとしている。そこで耐震設計においてせん断に対する部材係数を一般の場合よりも高める割合を割増し係数 α と

定義して以下の考察を行なうこととする。また割増し係数 α は、はり部材のせん断スパン長 a 、終局曲げモーメント Mud (付録A-1)、終局せん断耐力 Vud (付録A-2)を用いて

$$\alpha = a \cdot Vud / Mud \quad \dots\dots\dots(1)$$

としても与えられる。

図-6にせん断補強に対する割増し係数 α と靱性率 μ との関係を、更に図-7には割増し係数 α と塑性エネルギー吸収能 Q との関係を示す。ここで塑性エネルギー吸収能 Q は、終局変位における5回目の履歴吸収エネルギーを変位 δy の1回目の履歴吸収エネルギーで除した値である。靱性を評価する方法として履歴吸収エネルギーの比を用いた理由は、靱性率よりも吸収エネルギーのような二次元的扱いをしたほうがより適切と思われること、更にその比を用いることにより、部材間の比較検討が容易に行えること等による⁴⁾。また同一の終局変位であっても、履歴ループが紡錘型のもとの逆S型のもとの靱性が異なるので、履歴ループとしては5回目のものを用いた。図-6、7より割増し係数 α が増大すると、靱性(μ 、 Q)が大きくなる傾向にあるものの、鉄筋比、コンクリート強度、せん断スパン比等により大きくバラつくことがわかる。従って示方書が示すように一概に $\alpha = 1.2$ 程度を確保しても十分な靱性が得られない場合があるものと考えられる。

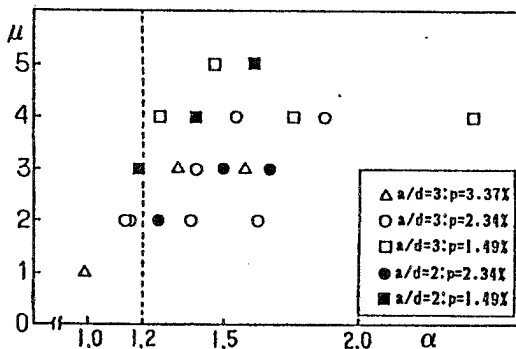


図-6 $\mu \sim \alpha$ 関係

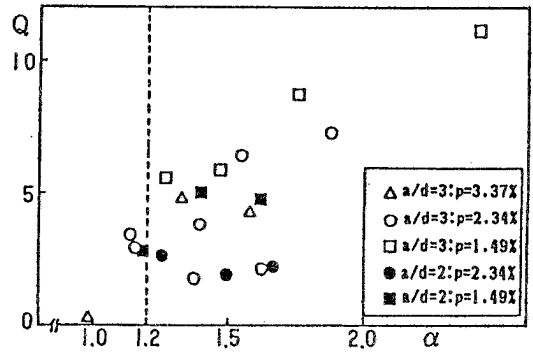


図-7 $Q \sim \alpha$ 関係

IV せん断補強法の提案

1 せん断補強法の提案

実用性を考えた場合、部材の設計段階において割増し係数 α に材料特性、断面特性、構造特性などを容易に取り入れることができるようにしておく必要がある。割増し係数 α は、曲げ耐力に対するせん断耐力の相対的強さを表わす係数であり、例えばせん断スパン比などの構造特性は別にして、割増し係数 α に影響を及ぼす主要な材料特性、断面特性は、鉄筋強度 f_{sy} 、コンクリート強度 f_c' 、鉄筋比 p であることを考慮すると、曲げ耐力に最も関係の大きい一般的指標 $p \cdot f_{sy} / f_c'$ と α を関係付けることが望ましい。そこで、

$$\lambda = p \cdot f_{sy} / f_c' \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$Q = \lambda^m \cdot \alpha^n \quad \dots\dots\dots(3)$$

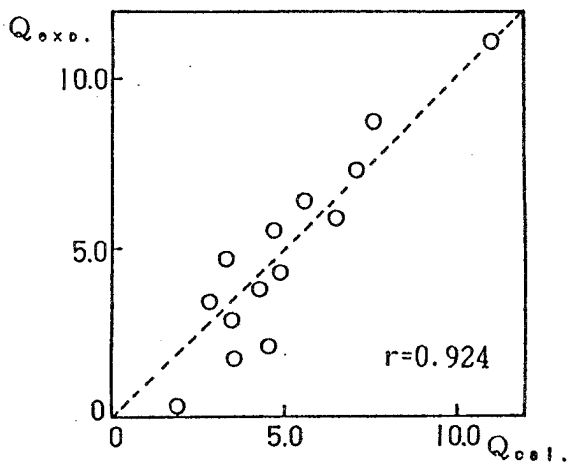
とおくと、十分な靱性を確保するのに必要な塑性エネルギー吸収能 Q_0 に対して、割増し係数は次式で与えられる。

$$\alpha = (Q_0 / \lambda^m)^{1/n} \quad \dots\dots\dots(4)$$

実験結果より $a/d=3.0$ のとき $Q_0=4.00$ として係数 m 、 n を決定すると、

$$\left. \begin{aligned} m &= -0.664 \\ n &= 1.471 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(5)$$

となる。図-8は、 λ 、 α に対する塑性エネルギー吸収能の計算値 Q_{cal} と実験結果 Q_{exp} との関係を示したものであるが、両者には強い相関関係($r=0.924$)が存在する。従って実際の設計においては、材料特性、断面特性より λ を求め、これを(4)式に代入することにより、必要な割増し係数 α を求めることができる。



図一8 塑性エネルギー吸収能の
計算値と実験結果との比較

2 せん断補強設計計算例

本研究において新たに提案したせん断補強法による具体的な計算例を以下に示す。

(1) 設計条件

①材料特性

コンクリート強度 $f_c' = 300 \text{ kgf/cm}^2$
鉄筋強度 $f_{sy} = 3000 \text{ kgf/cm}^2$

②断面特性

はり幅 $b = 17 \text{ cm}$
有効高さ $d = 22 \text{ cm}, d' = 3 \text{ cm}$
鉄筋量 $A_s = A_s' = 3\text{-D19} = 8.59 \text{ cm}^2$
スターラップ $A_w = 2\text{-D10} = 1.427 \text{ cm}^2$

③構造特性

せん断スパン比 $a/d = 3.0$
せん断スパン長 $a = 66 \text{ cm}$

(2) 設計計算

式(A-4)より、 $x = 3.76 \text{ cm}$ 。更に式(A-5)より終局曲げモーメントは次のようになる。

$$M_{ud} = 509800 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$$

また終局曲げ耐力は、

$$P_{ud} = 2 \cdot M_{ud} / a = 15450 \text{ kgf}$$

鉄筋比 $p = A_s / b \cdot d = 0.023$ より $\lambda = 0.230$ であるから、割増し係数 α は式(4), (5)より

$$\alpha = 1.32$$

となる。

一方、式(A-7)よりコンクリート部材の受け持つせん断抵抗は、 $V_{cd} = 3320 \text{ kgf}$ であるから

$$\begin{aligned} V_{sd} &= P_{ud} \cdot \alpha - V_{cd} \\ &= 15450 \times 1.32 - 3320 \\ &= 17070 \text{ kgf} \end{aligned}$$

に耐えるせん断補強が必要である。式(A-9)よりスターラップ間隔を求めると $S_s = 4.17 \text{ cm}$ となる。

従って、スターラップとしては、D10を4cm間隔に配置すれば良いことになる。

V 結論

本研究により次のような結論を得た。

(1) 曲げ靱性改善を目的とした横拘束筋を有するはりにおいては、示方書が示すようなせん断補強に対する安全率では、条件によっては必ずしも満足でない場合が生じ得る。従ってこのようなはりに対しては別途新たなせん断補強法が必要である。

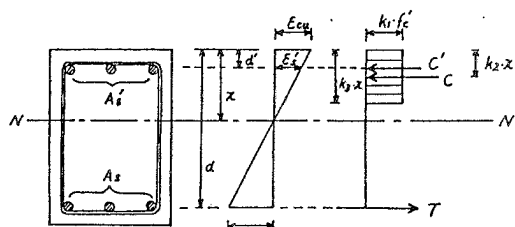
(2) 新たなせん断補強法として、材料特性、断面特性より決まる係数 $\lambda = p \cdot f_{sy} / f_c'$ と、十分な靱性を確保するのに必要な塑性エネルギー吸収能 Q_0 とを考慮して、せん断補強に対する部材係数の割増し係数 α を

$$\alpha = (Q_0 / \lambda)^{1/n}$$

の形で提案した。

付録

A-1 終局曲げ耐力計算式⁷⁾



付図一1 設計計算用断面

付図一1に示す複鉄筋長方形断面に対し、曲げ引張り破壊を想定すると、

$$T = A_s \cdot f_{sy} \quad \dots\dots\dots (A-1)$$

$$C = k_1 \cdot k_3 \cdot b \cdot x \cdot f_c' \quad \dots\dots\dots (A-2)$$

$$C' = A_s' \cdot E_s \cdot \epsilon_s' \\ = A_s' \cdot E_s \cdot \epsilon_{cu} \cdot (x-d') / x \quad \dots\dots\dots (A-3)$$

力のつり合いより、

$$T = C + C'$$

これを解いて中立軸位置xは、

$$x = \left((A_s \cdot f_{sy} - A_s' \cdot E_s \cdot \epsilon_{cu}) \right. \\ \left. + ((A_s \cdot f_{sy} - A_s' \cdot E_s \cdot \epsilon_{cu})^2 \right. \\ \left. + 4k_1 \cdot k_3 \cdot b \cdot f_c' \cdot A_s \cdot E_s \cdot \epsilon_{cu} \cdot d')^{1/2} \right) \\ / (2k_1 \cdot k_3 \cdot b \cdot f_c') \quad \dots\dots\dots (A-4)$$

引張り鉄筋図心に関するモーメントのつり合いにより、
終局曲げモーメントMudは、

$$Mud = C \cdot (d - k \cdot x) + C' \cdot (d - d') \\ \therefore Mud = k_1 \cdot k_3 \cdot b \cdot f_c' \cdot x \cdot (d - k_2 \cdot x) \\ + A_s' \cdot E_s \cdot \epsilon_{cu} \cdot (x - d') \cdot (d - d') / x \quad \dots\dots (A-5)$$

ここに、 $k_1 = 0.85$

$$k_2 = 0.40$$

$$k_3 = 0.80$$

$$\epsilon_{cu} = 0.0035^9)$$

A-2 セン断補強計算式⁹⁾

終局せん断体力Vudは、せん断補強筋を用いない
部材のせん断耐力Vcdと、せん断補強筋によるせん断
耐力Vsdとの和として与えられる。すなわち、

$$Vud = Vcd + Vsd \quad \dots\dots\dots (A-6)$$

$$\text{ここに、} Vcd = f_{vcd} \cdot b \cdot d / \gamma_b \quad \dots\dots\dots (A-7)$$

$$f_{vcd} = 0.9 \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot (f_c')^{1/3} \quad \dots\dots (A-8)$$

$$\beta_d = (100/d)^{1/4}$$

$$\beta_p = (100 \cdot p)^{1/3}$$

$$\beta_n = 1$$

$$\gamma_b = 1.3$$

また、スターラップ間隔をSsとすると、

$$Vsd = A_w \cdot f_{sy} \cdot z / S_s / \gamma_b \quad \dots\dots\dots (A-9)$$

$$\gamma_b = 1.15$$

$$z = d / 1.15$$

参考文献

- 1) 例えば、藤井学他：過多鉄筋コンクリートはりの横拘束筋によるじん性改善、土木学会論文集第348号/V-1、p.77-86、1984年8月
- 2) 宮内克之ら：鉄筋コンクリートはりの曲げ靱性に関する実験的研究、岡山職業訓練短期大学校紀要・第2号、p.21-26、1987年3月
- 3) 宮内克之：横拘束筋を有する鉄筋コンクリートはりの挙動に関する一考察、岡山職業訓練短期大学校紀要・第3号、p.12-19、1988年3月
- 4) 宮内克之：横拘束筋を有する鉄筋コンクリートはりの靱性評価について、職業訓練開発報文誌第1巻第2号、p.49-54、1989年
- 5) コンクリート標準示方書、土木学会、1986年
- 6) 矢村潔ら：鉄筋コンクリートはりのせん断耐震評価に関する基礎的研究、第40回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集、p.434-435、1988年5月
- 7) 岡村甫：コンクリート構造の限界状態設計法、p.38-43、共立出版、1980年