

# 論文 高強度せん断補強筋を用いる RC 梁部材の変形能に関する 実験的研究

鈴木幹夫\*1・平松和嗣\*2・斉藤賢二\*3・横田和伸\*4

**要旨：**8000kgf/cm<sup>2</sup>級の高強度せん断補強筋を用いる梁部材の曲げせん断加力実験を行い、ヒンジ領域に比べ非ヒンジ領域のせん断補強筋比 (pw) を減らす場合でも、適切なせん断設計をすれば十分な変形能を確保できること、2段配筋される引張側主筋の付着応力は、pwが大きいほど内側主筋に比べ外側主筋が大きくなり、外側主筋に付着破壊が生じると減少分は内側主筋に移行すること、床スラブが取付くとコンクリート圧縮束の部材軸方向力が主筋のみでなく直接床スラブに伝達されること、同一変形時の梁端部塑性回転量はスラブ引張側に比べスラブ圧縮側の方が大きくなることを示している。

**キーワード：**せん断強度、付着、コンクリート圧縮束、床スラブ

## 1. はじめに

本研究は、せん断補強筋に高強度材料を用いた鉄筋コンクリート造梁部材の変形能に関する基礎的資料を得ることを主目的としたものであり、2段筋をカットオフする一般的な配筋の梁部材曲げせん断加力実験を行い、ヒンジ領域に比べ非ヒンジ領域のせん断補強筋量を減らすことおよび床スラブが取付くことが与える梁部材の性状への影響について検討を行った。なお、本研究の一部は拙論 [1] で報告済みである。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体および使用材料

試験体の形状寸法は、断面が21×30cm、内法スパン長さが150cm（せん断スパン比=2.5）であり、全試験体とも主筋は2段配筋、せん断補強筋は外周筋と中子筋を組合せた配筋とし、2段筋は中子筋の内側に配筋しカットオフしている。試験体の形状寸法を図-1に、試験体諸元を表-1に示す。

パラメータは、床スラブの有無と、非ヒンジ領域のpwである。G1は、pwを全域にわたり0.4%とした梁部材のみの試験体であり、G2は、G1に直交梁と薄肉プレキャスト板を用いた床スラブを付加した試験体である。G3、G4は、非ヒンジ領域のpw以外は全てG1と同じであり、非ヒンジ領域のpwをG3はヒンジ領域の75% (pw=0.3%)、G4は50% (pw=0.2%) とした試験体である。なお、G2の梁芯から直交梁・床スラブ端までの長さは85cmであり、梁スパン長さ180cmのほぼ半分の長さとした。また、薄肉プレキャスト板にはトラス状に加工した鉄筋を、梁と床スラブの間にもスラブ連結補強筋を配筋し一体性を保つようにした。

コンクリートは、 $F_c=420 \text{ kgf/cm}^2$ の普通コンクリートで、梁上端側より一度に打設した。主筋には降伏強度4000kgf/cm<sup>2</sup>級のD13を、せん断補強筋には降伏強度8000kgf/cm<sup>2</sup>級の突き合わせ溶接による高強度溶接閉鎖型鉄筋φ5を用いた。コンクリートおよび鉄筋の力学的性質を表-2、3に示す。

- 
- \*1 (株) エヌ・ティ・ティファシリティーズ 研究開発部研究主任、工修 (正会員)
  - \*2 (株) エヌ・ティ・ティファシリティーズ 研究開発部主任研究員、工修 (正会員)
  - \*3 (株) エヌ・ティ・ティファシリティーズ 都市・建築デザイン部課長、工修
  - \*4 (株) エヌ・ティ・ティファシリティーズ 都市・建築デザイン部主査、工修

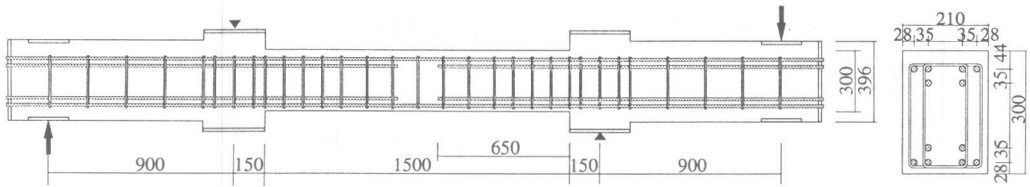


図-1 形状寸法

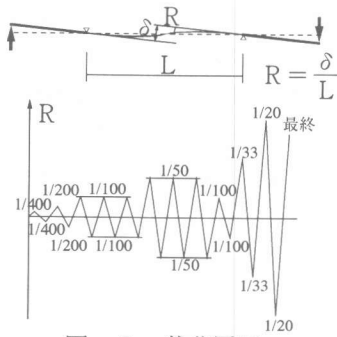


図-2 载荷履歴

表-1 梁試験体諸元

試験体名		G 1	G 2	G 3	G 4
梁	主筋 上端 (pt%)	6-D13 (1.49)	6-D13 (1.49)	6-D13 (1.49)	6-D13 (1.49)
	主筋 下端 (pt%)	6-D13 (1.40)	6-D13 (1.40)	6-D13 (1.40)	6-D13 (1.40)
	肋筋 ヒンジ領域 (pw%)	4-φ5@93 (0.402)	4-φ5@93 (0.402)	4-φ5@93 (0.402)	4-φ5@93 (0.402)
	肋筋 非ヒンジ領域 (pw%)	4-φ5@93 (0.402)	4-φ5@93 (0.402)	4-φ5@126 (0.297)	4-φ5@189 (0.198)
スラブ	上端		D6@120 C.		
	薄肉PC板内		φ3.2@60 C.		

表-2 コンクリートの力学的性質

試験体名	種類	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (tonf/cm <sup>2</sup> )	割裂強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	備考
G 1	普通	531	242	28.8	
G 2	普通	555	250	28.6	
	モルタル	558		29.8	薄肉PC板
G 3	普通	518	247	28.6	
G 4	普通	535	248	32.5	

\* ヤング係数は1/3σ<sub>B</sub>時の割線剛性

表-3 鉄筋の力学的性質

呼び名	降伏強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (tonf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	破断伸び (%)
D13	4021	1953	5844	19.8
φ5	8937*	2108	9972	11.4
D6	3475*	1721	5345	17.5
φ3.2	7287*	1936	7965	6.0

\* 0.2% Offset

## 2. 1 加力および測定方法

加力は、大野式逆対称モーメント正負繰り返し载荷とし、柱形部分の中心間距離に対する支点間相対変位の比Rが、図-2となるような载荷履歴とした。測定は、荷重をロードセル、支点間相対変位等を電気式変位計、鉄筋の歪をワイヤーストレインゲージにより行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3. 1 破壊経過

各試験体の最終破壊状況を図-3に示す。G 1、G 3、G 4は、R=1/200rad.サイクルに主筋の一部が、R=1/100rad. サイクルまでに全ての主筋が引張降伏し、G 1はR=1/20rad.サイクルに、G 3は最終サイクルに、G 4はR=-1/20rad.サイクルにヒンジ領域の溶接閉鎖型せん断補強筋の溶接部が破断し、最終的に溶接部の破断した側のヒンジ領域におけるせん断破壊に至った。

床スラブの取付くG 2は、R=1/200rad.サイクルまでに下端主筋が1、2段筋とも、R=1/100rad. サイクルにスラブ引張側の上端1、2段筋およびスラブ圧縮側の上端2段筋が引張降伏し、R=-1/33rad. サイクルに、上端中央部においてスラブと梁に分離が生じ、その後の繰り返して耐力が低下していった。スラブ筋はR=1/50rad.サイクルまでに全て引張降伏し、また、スラブには、R=1/100rad. サイクルより梁中央部付近よりスラブ圧縮側端部方向に向かい、ハの字に広がる斜めひび割れが生じ、変形の増加とともに増加、進展した。

せん断補強筋については、全試験体とも外周筋と中子筋が概ね同じ歪を示し、端部のみでなく中央部においても中子筋が有効に働いていた。

### 3.2 変形性状

各試験体のせん断力-支点間相対変位関係を図-4に示す。表-4に、RC終局強度型耐震設計指針[2]A法による終局せん断強度とACI規準による終局曲げ耐力を用いて算出したせん断力との比較を示す。図-4には、指針A法による終局せん断強度を併記する。

梁部材のみのG1、G3、G4は、ほぼ同じ性状を示しpwの違いによる影響は見られず、最もpwが小さいG4では、指針A法により定まる変形能以上の変形能があった。床スラブの取付くG2は、床ス

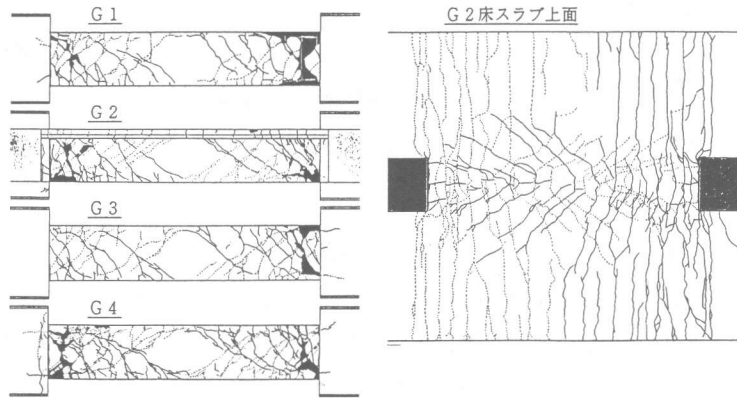


図-3 最終破壊状況

表-4 試験体計算耐力一覧

	bQu	Rp	ヒンジ領域			非ヒンジ領域			全域ヒンジ領域の場合		
			0	1/50	1/20	0	1/50	1/20	0	1/50	1/20
G1	10.4	Vu	32.5	15.5	12.4	32.5	28.9	12.4	32.5	18.24	12.4
			Vu/bQu	3.13	1.49	1.20	3.13	2.78	1.20	3.13	1.76
G2	12.2	Vu	32.6	15.5	12.6	32.6	29.2	12.6	32.6	18.32	12.6
			Vu/bQu	2.68	1.27	1.04	2.68	2.40	1.04	2.68	1.50
G3	10.4	Vu	32.5	15.5	12.3	24.4	21.2	11.4			
			Vu/bQu	3.12	1.49	1.18	2.35	2.04	1.10		
G4	10.4	Vu	32.6	15.5	12.5	16.9	14.3	7.6			
			Vu/bQu	3.13	1.49	1.20	1.62	1.37	0.73		

\* Rp: 保証ヒンジ回転角

\* Vu: 指針A法による終局せん断強度 (tonf)

\* bQu =  $\Sigma cMu/Lo$  (tonf) cMu: ACI規準による曲げ耐力 Lo: 梁内のりスパン長さ

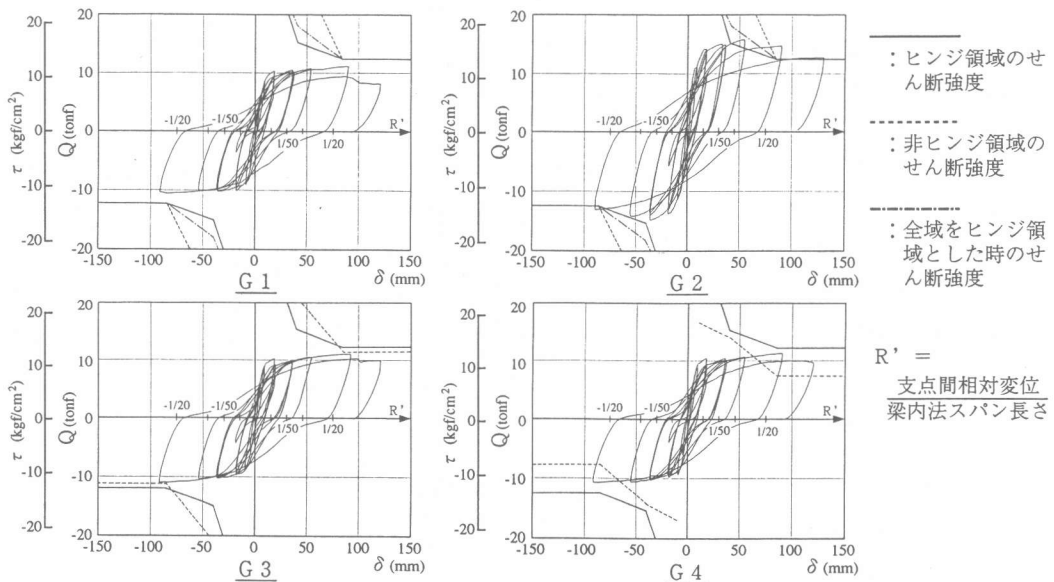


図-4 せん断力(Q)-支点間相対変位( $\delta$ )関係

ラブと梁の分離により  $R = -1/33\text{rad}$  サイクル以降に耐力が低下しているのであるが、結果的にヒンジ領域の計算値と概ね一致した。

### 3.3 主筋の平均付着応力度

図-5に、主筋の歪より算定した梁中央部の平均付着応力度-支点間相対変位関係を示す。G1、G3、G4を比較すると、区間2では、 $p_w$ が小さくなるほど、正加力時（端部から中央部に向かって主筋の引張応力が小さくなる）の付着応力は1段筋が小さく2段筋が大きくなり、逆に、負加力時には1段筋が大きく2段筋が小さくなっている。2段筋のカットオフされる区間1では、全試験体とも正加力時に1段筋が早期に付着破壊を起こし、2段筋に大きな付着応力が生じているが、負加力時には2段筋の付着応力が小さくなり1段筋の付着応力が大きくなっている。

これらは、引張側主筋の付着応力は、 $p_w$ が大きいほど1段筋が大きく2段筋が小さいこと、付着破壊が1段筋の引張側で生じると付着による応力の伝達が圧縮側に移動し、引張側1段筋の減少分が2段筋に移行することを示している。梁中央部において1段筋が早期に付着破壊を起こすのは、コンクリートの応力状態の連続性を保つために、1段筋と2段筋の付着応力の総和も梁部材軸方向に連続しようとし、2段筋のカットオフされる中央部で1段筋にかなり大きな付着応力が生じているためと思われる。また、中子筋の内側に配筋された2段筋は、 $p_w$ の最も小さなG4においても付着破壊は見られなかった。

床スラブの取付くG2は、下端筋については概ねG1と同じ性状を示すが、上端1段筋には  $R = 1/50\text{rad}$  サイクルより付着の劣化が見られる。これは、梁上部のコンクリートを持ち上げるような形状に床スラブが変形するためと思われる。

床スラブの取付くG2は、下端筋については概ねG1と同じ性状を示すが、上端1段筋には  $R = 1/50\text{rad}$  サイクルより付着の劣化が見られる。これは、梁上部のコンクリートを持ち上げるような形状に床スラブが変形するためと思われる。

### 3.4 コンクリート圧縮束の検討

梁主筋とせん断補強筋の歪から算出した、せん断補強筋による部材軸直角方向力と主筋の付着によりコンクリートに伝達される部材

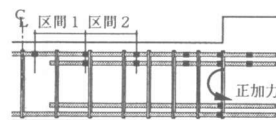
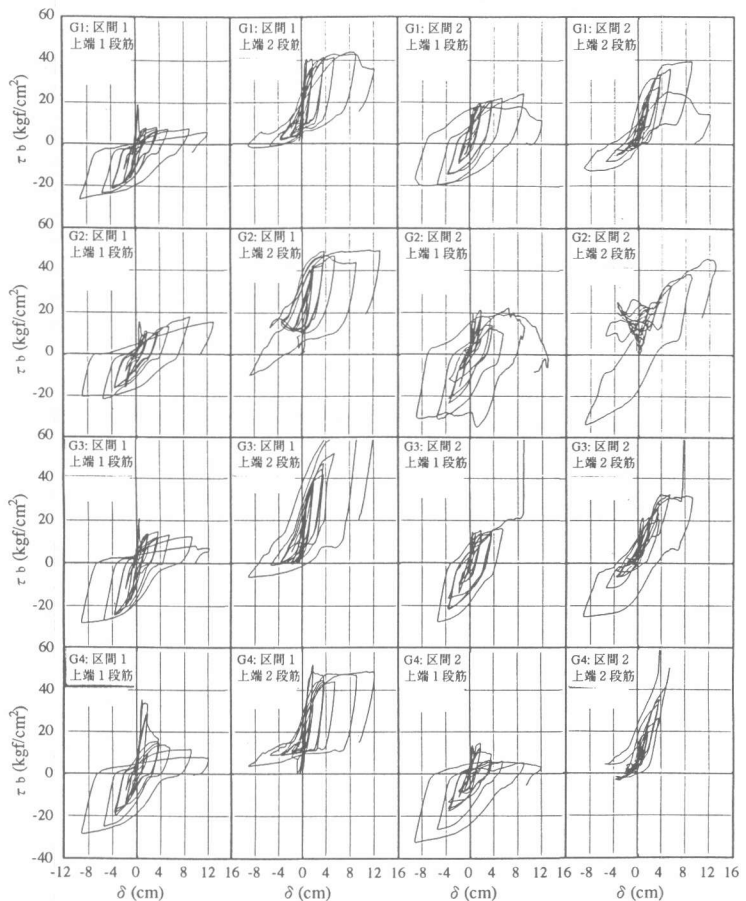


図-5 平均付着応力度( $\tau_b$ )-支点間相対変位( $\delta$ )関係

軸方向力のベクトル和としての合力を、 $R=1/100\text{rad}$ . サイクルピーク時について図-6に示す。

コンクリート圧縮束の角度は、端部より中央部に向かい扇形状に小さくなっているが、中央部において再度大きくなる。これは、中央部において2段筋がカットオフされること、中央部で1段筋に付着破壊が生じることにより、主筋の付着応力の総和が部材軸方向に不連続になるためと思われる。

床スラブの取付くG2の上端圧縮側については、コンクリート圧縮束の角度が大きく90度を超えるものもあり、コンクリート圧縮束の部材軸方向力が付着力により主筋に伝達されるのみでなく、床スラブ圧縮側のハの字のひび割れからも、直接床スラブに伝達されているものと思われる。

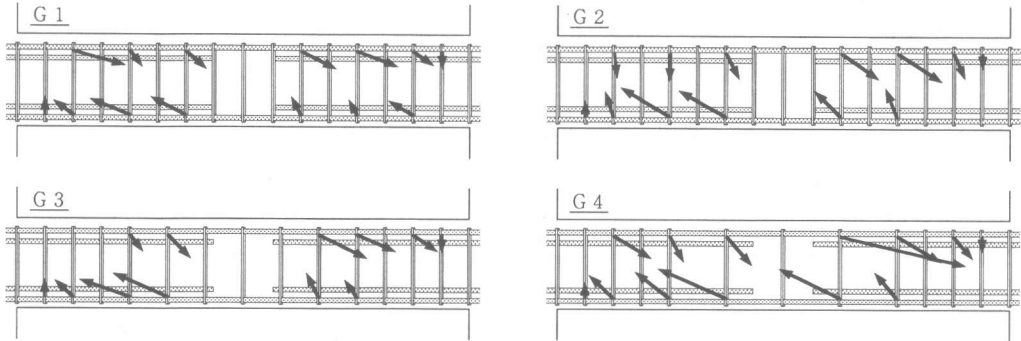


図-6 コンクリート圧縮束

### 3.5 梁の曲率の検討

G1とG2の、各サイクルピーク時の梁の平均曲率の分布を図-7に、梁端部における曲げモーメントと平均曲率の関係を図-8に示す。G1、G3、G4は、正加力時および負加力時とも、全ての鉄筋が引張降伏する $R=1/100\text{rad}$ . サイクルに最も梁端部側の区間1において曲率が増加しており、 $R=1/50\text{rad}$ . サイクル以降は区間1の曲率が更に増加するとともに、主筋の降伏域が進展するため区間2の曲率も増加している。

床スラブの取付くG2では、基本的に他の試験体と同じ性状を示すが、床スラブの取付く上端が引張側となる負加力時の区間1における曲率の増加量が小さく、他の試験体が正・負加力時とも概ね似た値となるのに対し、上端引張時の梁端部の曲率は下端引張時の曲率の半分以下となっており、床スラブによりかなり拘束されていることがわかる。

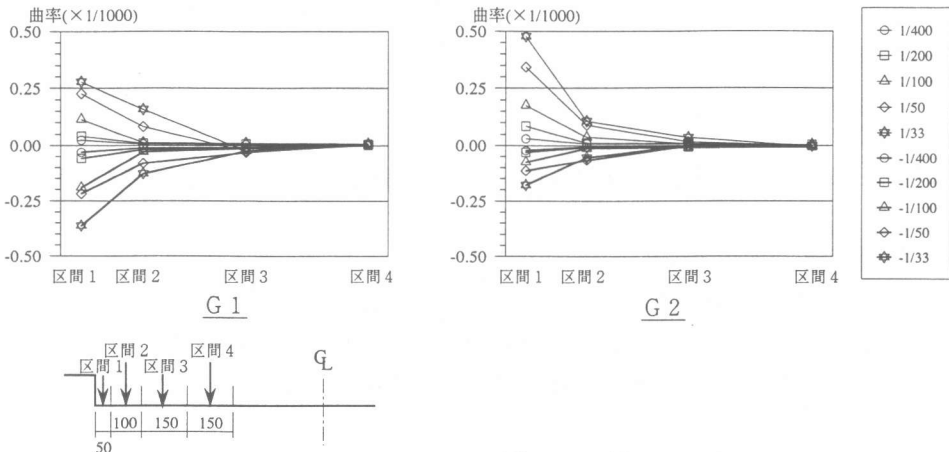


図-7 平均曲率分布図

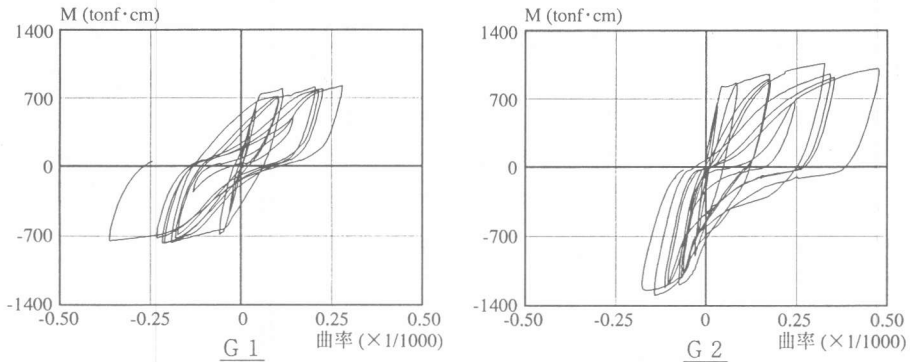


図-8 曲げモーメント(M)–区間1平均曲率関係

#### 4. まとめ

- (1) ヒンジ領域のpwを0.4%とし、非ヒンジ領域のpwをそれぞれ0.4%、0.3%、0.2%と変えた高強度せん断補強筋を用いる梁部材の逆対称変形下での繰り返し加力実験を行ったが、本実験の範囲では、変形能にpwの影響は見られず、0.2%の試験体は「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説（日本建築学会）」の終局せん断強度算定法A法により定まる変形能以上の変形能があった。
- (2) 引張側主筋の付着応力は、pwが大きいほど1段筋が大きく2段筋が小さくなり、引張側1段筋に付着破壊が生じると、付着による応力の伝達が圧縮側に移動するとともに、引張側1段筋の減少分は2段筋に移行し、その総和がせん断力と釣り合うように付着応力が生じる。
- (3) 床スラブの取付く試験体では、梁中央部から床スラブ圧縮側に向かうハの字のひび割れが生じており、コンクリート圧縮側の部材軸方向力が付着力により主筋に伝達されるのみでなく、直接床スラブに伝達されていると思われる。
- (4) 床スラブが取付くと、スラブ引張側は床スラブの拘束を受け、スラブ圧縮側は中立軸がスラブ側に移動し、同一変形時の梁端部塑性回転量はスラブ引張側に比べスラブ圧縮側の方が大きくなり、本実験では2倍程度であった。
- (5) 梁部材中央部で2段筋をカットオフすると、2段筋先端付近で1段筋に大きな付着応力が生じ、早期に付着破壊が生じる恐れがあり、付着破壊が生じると中央部でのコンクリート圧縮側の角度が変化する。

#### 【謝 辞】

本研究を行うにあたり、東京理科大学松崎育弘教授のご指導を賜りました。ここに、深く感謝の意を表します。

#### 【参考文献】

- [1] 鈴木他：高強度せん断補強筋を用いるRC造梁部材の変形能に関する実験的研究—端部と中央部におけるせん断補強筋比の違いによる影響—、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.833~834、1994.9
- [2] 日本建築学会編：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990.11