

論文 梁端にスロットを設けた梁下端筋降伏型 RC 造骨組の 水平加力実験

大久保全陸*1・松岡忠生*2・吉岡智和*3

要旨: 鉄筋コンクリートラーメン構造の梁端に下端から梁せい¹の3/4の高さまで幅の狭い鉛直なSLOTを設けて梁のコンクリートを柱から絶縁したスロット付き梁と通常の柱から構成される梁降伏型骨組について正負繰返し²の水平加力実験を行い、大変形に至るまでの力学的特性、破壊性状、梁の軸方向変形挙動について、通常工法による骨組と比較検討した。スロット付き梁を有する骨組の荷重変形曲線は層間変形角1/25の大変形まで安定した性状を示した。また、梁の上端筋が降伏せず、左右両端の下端筋が降伏するスロット付き梁では、梁の軸方向変形が通常工法の場合に比べて極めて小さくなることを示した。

キーワード: スロット付き梁、梁降伏型骨組、軸方向変形、鉄筋コンクリート

1. はじめに

鉄筋コンクリートラーメン構造において、地震時における正負の繰返し曲げモーメントの作用に対して梁上端筋の降伏を許容せず、常に下端筋の引張降伏と圧縮降伏によって抵抗させる梁端下端筋エネルギー消費機構の開発研究を進めている。この抵抗機構では梁端の柱との接合部に梁下端からスラブ下面の高さまで幅の狭い鉛直なSLOTを設けてコンクリートを絶縁し、かつ上端筋量は下端筋量より多くする、及び梁端領域で梁せい¹の約1/2に相当する長さの間の下端筋を鋼管で被覆して鉄筋をアンボンドとするとともに、鉄筋の圧縮座屈の防止・軽減を図ることを基本としている。

この抵抗機構の開発目的と特徴は、①上端筋の引張降伏を許容しないため、スラブを含め梁上端コンクリートのひび割れ幅拡大が抑制され、震後の補修軽減が図れる可能性があること、②下端筋の降伏によって梁の曲げ耐力が決定されるため、曲げ耐力に影響するスラブの有効幅の評価に関する曖昧さの問題が無関係となること、③正負の曲げモーメントに対して同一鉄筋(下端筋)が引張降伏と圧縮降伏を繰返すため、ループ面積の大きい

荷重変形曲線が期待できる可能性があること等であり、これらについてこれまで実験によって検討し、その結果を報告した。^{1), 2)} また、この抵抗機構特有の梁端におけるせん断力伝達機構について検討し、梁端領域に折り曲げ筋や下端筋に沿ったカットオフ筋の配筋が必要となることを報告した。³⁾

さらに、この抵抗機構では、在来の梁降伏型ラーメン構造で問題となる梁の軸方向変形がかなり軽減される可能性がある。そこで、本論文ではこの点を骨組形式の実験によって検討するとともに、力学的特性等に関する実験結果をあわせ報告する。

2. 実験計画

2.1 試験体の概要

今回行った骨組形式の試験体を図-1に示す。試験体は多層多スパン骨組の中間1層1スパン分をモデル化した中型骨組(SL-FRAMEと呼ぶ)である。SL-FRAMEは、図示のように上下の左右梁端に梁下端から幅10mm、高さ150mmのSLOTが設けられている。梁の上端筋は3-D13で、下端筋2-D13より多く配筋されている。下端筋の梁端には長さ100mm、内径22mmの鋼管が被せられており、その

*1 九州芸術工科大学教授 芸術工学部環境設計学科 工博(正会員)

*2 九州芸術工科大学大学院 芸術工学研究科生活環境専攻

*3 九州芸術工科大学助手 芸術工学部環境設計学科 工修(正会員)

間は鉄筋とコンクリートがアンボンドとなっている。また、この構造独特のせん断ひび割れ(S-crack と呼ぶ)の拡大防止に対して、折り曲げ筋の配筋や、下端筋沿いにカットオフ筋を配筋することが有効であることが文献3)の実験により分かっていることから、両者の配筋効果が対比できるように本実験では上梁の梁端には折り曲げ鉄筋 2-D6 を配筋し、下梁には SLOT 上部の折り曲げ筋 2-D6 と梁下端のカットオフ筋 2-D10 を配筋した。梁の肋筋は 2-D6@50 であるが、梁端 SLOT 際ではこれを2重巻きとした。

本実験では、以上の SL-FRAME の他に、比較用の在来構法型の骨組(RC-FRAME と呼ぶ)1体の実験を行っている。RC-FRAME の柱梁の部材寸法は SL-FRAME と同じである。また、梁端に SLOT が無いこと、梁主筋が上下とも 2-D13 であること、梁端に折り曲げ筋等の特殊配筋が無いこと等を除くと、他の条件は SL-FRAME と同じである。

梁の片側から加力する本実験の場合には、梁に水平力の 1/2 に相当する変動軸力が作用する。この変動軸力の影響を考慮して梁降伏型の崩壊機構が形成されるように RC-FRAME の梁についてせん断設計を行い、SL-FRAME の梁はこれと同じせん断補強とした。

2.2 使用材料の性質

鉄筋とコンクリートの材料試験結果を表-1及び表-2に示す。コンクリートは普通コンクリートであり、粗骨材の最大寸法は 15mm である。

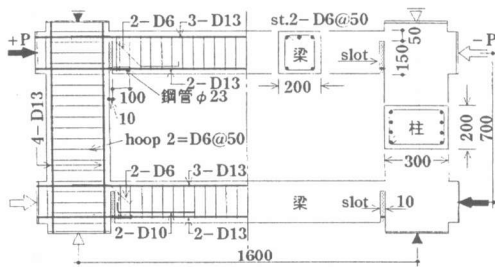


図-1 試験体(SL-FRAME)の形状、寸法、配筋等

2.3 加力測定方法

加力は図-1に示すように骨組の上梁の左右から

表-1 鉄筋の材料試験結果

	σ_y (MPa)	ϵ_y	σ_t (MPa)	Note
D13	353	0.0020	487	梁柱主筋
D10	379	0.0022	532	cut-off 筋
D6	395	0.0037	499	肋筋, 帯筋

表-2 コンクリートの材料試験結果

σ_B (MPa)	ϵ_B	E_c (GPa)	σ_t (MPa)
19.0	0.00202	20.1	1.70

正負の水平力を加え、下梁と左右の柱上下で水平力と骨組全体回転に対する反力をとる方法とした。

荷重履歴は変位制御とし、層間変形角 $R=0.25\%$ 、 0.5% で正負各1回、 $R=1, 2, 4\%$ でそれぞれ正負各2回の繰り返し荷重を加えた。ここに、 R は層間変形 δ を上下梁芯間距離 h で除した値である。

測定項目は、水平荷重のほか、図-2に示す方法により、層間変形、梁の軸方向変形、梁軸方向の区間変形を測定した。また、梁主筋に至ゲージを貼付し、各部の歪を測定した。

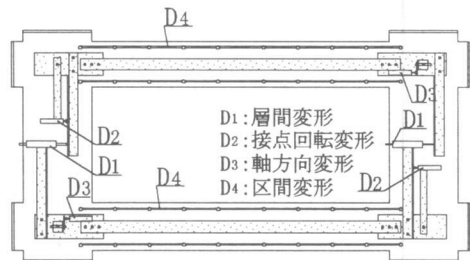


図-2 変形等の測定方法

3. 実験結果

3.1 荷重変形曲線について

SL-FRAME と比較用 RC-FRAME の水平荷重 P と層間変形角 R との関係(荷重変形曲線)を図-3と図-4に示す。

SL-FRAME (図-3)の荷重変形曲線の形状及びループ性状は、 $R=4\%$ の変形レベルまで終始安定した曲げ降伏型の性状を示している。しかし、耐力に関しては、SL-FRAME の荷重は、比較用の RC-FRAME (図-4)と比べて $R=0.25\%$ の初期の段階で約 23%、 $R=4\%$ の大変形レベルで約 12%それぞれ

れ低い。この原因としては、SL-FRAME では、曲げモーメントによって梁の下端が圧縮となる梁端において、下端筋をアンボンドとするため鋼管で被覆したが、その下端筋が鋼管内で座屈を起し、曲げ抵抗が低下したものと考えている。すなわち、本実験では使用した梁下端筋は D13 であり、それを覆っている鋼管の内径は鉄筋に歪ゲージを貼付する関係からやや大きく約 22mm であり、両者間のクリアランスが約 10mm 存在したため、鋼管内で下端筋の座屈が容易に起った可能性がある。この点を検討するため、下端筋の座屈長さ l_k を SLOT 幅を含めたアンボンド区間(110mm)と仮定して鋼構造で一般的に使われている座屈強度 σ_k の式

$$\sigma_k = \{1 - 0.4(\lambda / \Lambda)^2\} F \quad (1)$$

$$\Lambda = \sqrt{\pi^2 E / 0.6 F} \quad (2)$$

を用い、 $\lambda = l_k / i$ 、 $F = \sigma_y$ として σ_k を計算した結果、座屈強度は降伏点強度の約 0.775 倍となり、RC-FRAME の荷重に対する SL-FRAME の初期の荷重低下率に近い値となることが分かった。

なお、鉄筋は座屈により鋼管内壁に接触後は、その横方向変形はクリアランスの分以上には進行しないので、層間変形の増加に伴って鉄筋の座屈モードが次第に複雑に変化し、下端筋の圧縮耐力の増加が起こり、骨組の水平荷重の低下には至らなかったものと考えられる。

また、曲げモーメントに対して梁下端が引張となる他端においては、鉄筋の座屈は起らないので通常の梁と同様な曲げ降伏による抵抗が発揮されるため、曲げ降伏後の層間変形の増加につれて SL-FRAME と RC-FRAME との耐力差は減少して行ったものと考えられる。

本工法では梁端の下端筋が引張となる曲げモーメントを受けるときに SLOT 部の小区間で鉄筋の引張歪集中を避けるとともに、柱からの主筋の抜けだし量の軽減と梁下端の曲げひび割れ発生の回避を考えて、下端筋の一定区間を鋼管で被覆しアンボンドとすることとしているので、実用化に際しては下端筋の鋼管内での座屈変形ができるだけ小さくなるように鋼管内径と鉄筋外径とのクリアランスを小さくすることが重要となる。

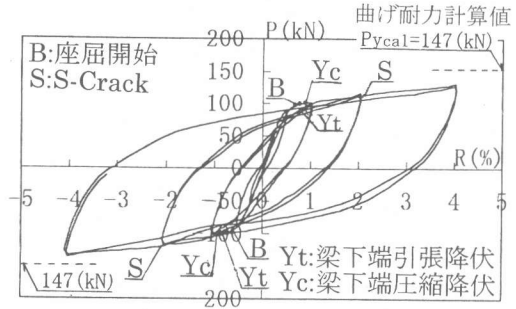


図-3 SL-FRAME の荷重変形曲線

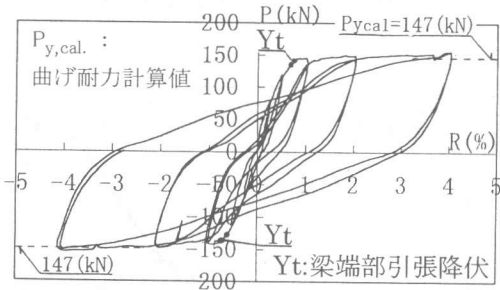
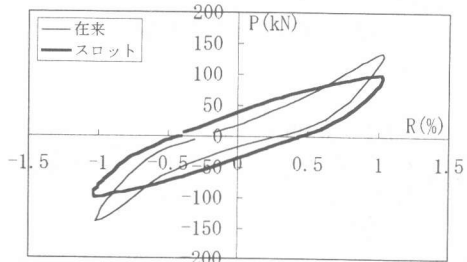
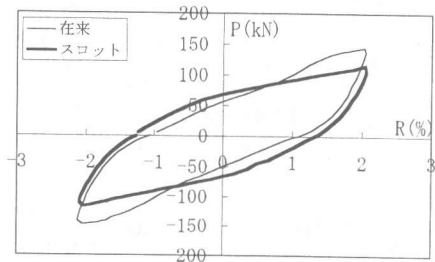


図-4 RC-FRAME の荷重変形曲線



(a) R=1% 時のループの形状



(b) R=2% 時のループの形状

図-5 ループ形状の比較

3.2 荷重変形曲線のループ性状

SL-FRAME の繰り返し加力中のループ性状を RC-FRAME と比較して図-5(a),(b)に示す。各ループは R=1% と 2% の各変形レベルでの繰り返し加力

の負加力から正加力までの閉じた1サイクル分である。このループで囲まれる面積を求めた結果を図-6に示す。

図-5から SL-FRAME のループ形状は RC-FRAME のそれと比べてすべりの無い紡錘形となっていることが観察される。また、SL-FRAME での下端筋座屈による荷重低下分のループ面積の減少が、ループ形状の改善によって相殺される形で表れ、図-6では SL-FRAME と RC-FRAME のループ面積がほとんど同等となっていることが分かる。

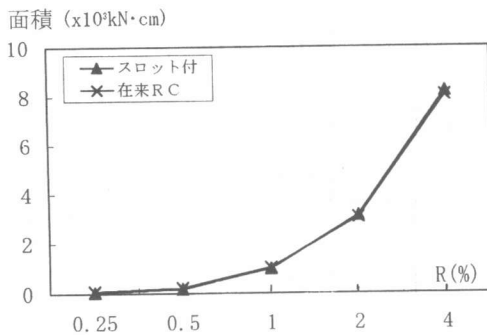


図-6 ループ面積の比較

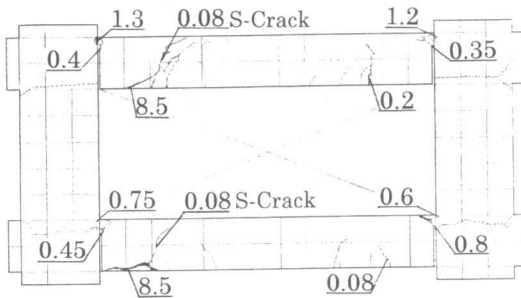


図-7 SL-FRAME のひび割れ状況

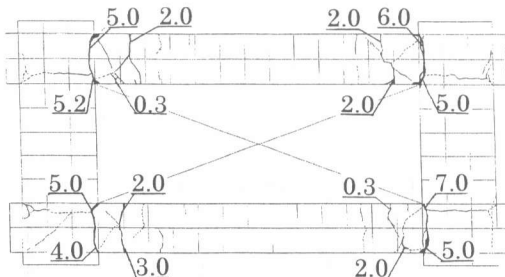


図-8 RC-FRAME のひび割れ状況

3.3 ひび割れ性状

両試験体の R=4% での加力終了後のひび割れ状況を図-7と図-8に示す。両試験体とも破壊モードは梁の曲げ破壊であり、上下左右の梁端近傍に曲げひび割れが発生している。SL-FRAME では、R=4% の変形レベルで鋼管の終端近傍から斜めに向けたせん断ひび割れ(S-crack)が発生したが、図-1に示した梁端の折り曲げ鉄筋やカットオフ筋が S-crack の幅の拡大を拘束し、ひび割れ幅は大きなものとなっていない。

両ひび割れ図中にひび割れ幅を記入した。図に観られるように、SL-FRAME では梁端上端の曲げひび割れ幅が RC-FRAME の場合に比べて小さい。この点が本抵抗機構の大きな特徴の一つであり、SL-FRAME と RC-FRAME との間のこのひび割れ幅の違いが後に考察する梁の軸方向変形の性状に関係することとなる。

4. 梁の軸方向変形

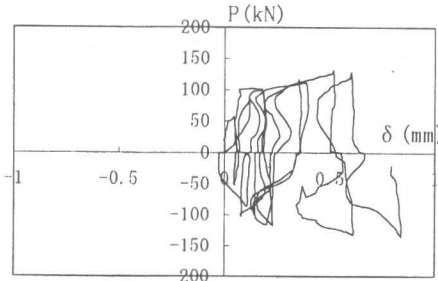
図-2に示した方法により、梁の軸方向変形(左右の梁柱接合部中心間距離の変化量)を測定した。その結果を水平荷重と軸方向変形との関係で図-9と図-10に示す。

図-9は SL-FRAME の上梁(a図)と下梁(b図)について示し、図-10は RC-FRAME について同様に示しているが、図-9 (SL-FRAME) の横軸のスケールは図-10 (RC-FRAME) の 1/10 である。

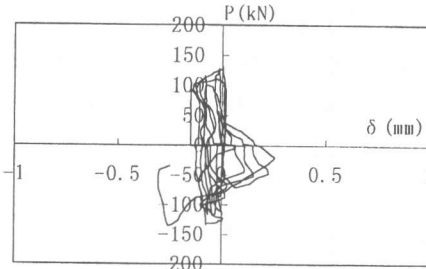
両図の比較から、SL-FRAME の梁の軸方向変形は、RC-FRAME の約 1/15 ないし 1/20 程度であり、梁の両端に SLOT を設けて下端筋のみを塑性変形させる本抵抗機構では、通常の梁降伏型骨組に比べて梁の軸方向変形をかなり軽減できる可能性があることが分かる。梁降伏型骨組で梁の軸方向変形が大きくなると同一層における柱の変形が個々に異なる結果になったり、柱からの拘束力が梁に軸方向力として作用し、梁の曲げ抵抗を増加させることにつながったりすることが以前から指摘されているが^{4)~6)}、SL-FRAME はこの問題を軽減する方向の性質を有している。

図-11 は、梁の曲げひび割れ幅を梁端に寄せ集

め、梁両端の圧縮縁(c 点)で梁が剛体的に回転を起こすと仮定した梁の変形とそれに伴って生じる梁の軸方向変形の関係を表すマクロモデルである。

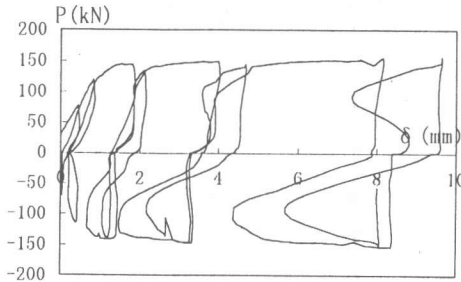


(a)上梁の軸方向変形挙動

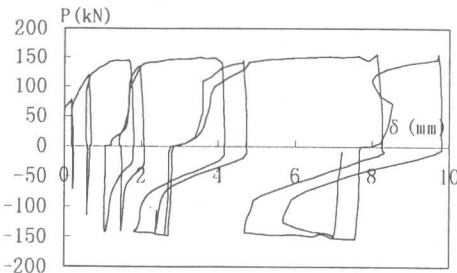


(b)下梁の軸方向変形挙動

図-9 SL-FRAME の軸方向変形挙動



(a)上梁の軸方向変形挙動



(b)下梁の軸方向変形挙動

図-10 RC-FRAME の軸方向変形挙動

このモデルから幾何学的に誘導される梁中心線上の軸方向変形量 ΔL_0 は、RC-FRAME(a 図)の場合、

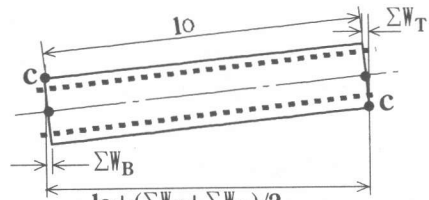
$$\Delta L_0 = (\Sigma W_T + \Sigma W_B) / 2 \quad (3)$$

となり、SL-FRAME(b 図)では

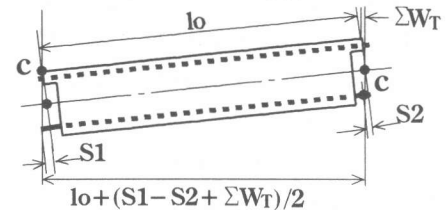
$$\Delta L_0 = \Sigma W_T / 2 \quad (4)$$

となる。ただし、上式では梁の剛体回転に伴う梁長自体の変化量は微小であるとして無視している。

式(3)、式(4)の ΣW_T と ΣW_B は、それぞれ梁の上端と下端の曲げひび割れ幅の合計を示す。また、SL-FRAME では、梁端の SLOT 幅の開閉量(図-11b)の $S1, S2$ の絶対値は左右で同じ($S1=S2$)であると仮定している。この仮定は、図-12 に観られるように SLOT を挟む両梁端の下端筋位置での区間(150mm)の変形 $S1, S2$ がほぼ等しくなっていることから肯定できる。



(a) RC-FRAME 場合



(b) SL-FRAME の場合

図-11 梁の軸方向変形のマクロモデル

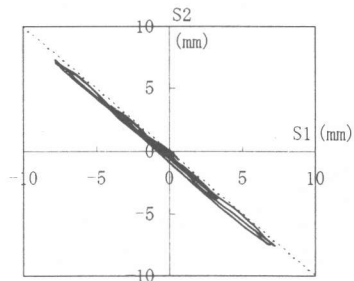


図-12 SL-FRAME 梁端下端筋位置の区間変形

R=0.25% から R=4% の各変形レベルでの荷重変形曲線のピーク時に実測したひび割れ幅を用いて、式(3)と式(4)で求めた梁の軸方向変形 ΔL_0 と図-9及び図-10に示した軸方向変形の実測値との比較を行った。その結果を図-13に示す。

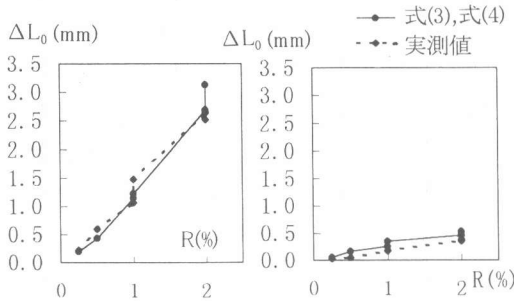


図-13 マクロモデルから予測される梁の軸方向変形と実測値との比較

文野ら⁶⁾は、梁の軸方向変形の問題を検討する中で梁の軸方向変形量は梁に発生した曲げひび割れ幅と大きく関係することを指摘し、曲げひび割れ幅の合計値が軸方向変形の実測値とほぼ対応していたことを示している。

本実験では、梁のひび割れ幅の実測値を使って式(3)と(4)から求めた梁の軸方向変形は、図-13に観られるように実測した梁の軸方向変形と良く一致した。

以上から、結局、梁の軸方向変形は梁に生じる曲げひび割れ幅を如何に評価するかと言う問題に帰することとなる。この点、SL-FRAMEの場合には、軸方向変形と関係する梁のひび割れ幅は主に梁の上端のものだけとなること、また梁の上端筋は引張降伏させず弾性範囲に保たれること等により、軸方向変形は通常のRC梁の場合より小さくなると言える。

5. 結び

本研究により得られた結果を以下に要約する。

(1) SLOT 付き梁降伏型骨組は R=4% の変形まで安定した荷重変形関係を示した。骨組の耐力は、曲げモーメントによって圧縮力を受ける下端筋の

鋼管内での座屈により通常構法の RC-FRAME の耐力より R=4% で約 10 数% 低いことが、これは鉄筋と鋼管とのクリアランスが大き過ぎたことによるものと考えられる。鉄筋の鋼管内での座屈を防止・軽減するためには、鉄筋と鋼管との間のクリアランスを極力無くすようにすることが必要である。

(2) SLOT 付き梁降伏型骨組は、すべりの少ない紡錘形の荷重変形曲線を示した。

(3) SLOT 付き梁特有のせん断ひび割れ(S-crack)については、折り曲げ筋やカットオフ筋の配筋によってひび割れ幅の拡大が抑制できることを、本骨組実験でも再確認した。

(4) SLOT 付き梁降伏型骨組では、梁の軸方向変形の発達がかかなり軽減できた。この骨組の軸方向変形量は梁上端の曲げひび割れ幅の合計値とほぼ近似した。

参考文献

- 1) 大久保全陸, 松岡忠生; 梁端下端筋限定曲げ降伏機構に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.803-808, 1996
- 2) 大久保全陸, 張 愛暉; 梁端下端筋限定曲げ降伏機構を有する梁柱部分骨組の水平加力時挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.867-872, 1997
- 3) Ohkubo, M., et al.; Shear Transfer Mechanism of Reinforced Concrete Beams with a Slot at the Beam-end, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.523-528, 1999
- 4) 坂田弘安, ほか; 軸方向変形の拘束効果を考慮した鉄筋コンクリートはりの弾塑性性状に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 380 号, pp.45-55, 1987.10
- 5) 大久保全陸, ほか; 鉄筋コンクリート造ウォールガーダーの強度変形性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.2, pp.63-68, 1989
- 6) 文野正裕, ほか; 軸方向変形拘束を受けるRC梁部材の挙動に関する実験研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.517-522, 1999