

論文 軸変形拘束が高強度コンクリート梁の曲げ・剪断挙動に与える影響

楊恩翼*¹・沖田浩嗣*²・森田司郎*³

要旨：本研究では、打設直後から載荷試験時までの水和熱、乾燥収縮に起因する軸方向変形と、載荷により生じる軸方向変形を完全拘束した高強度コンクリート梁の曲げ破壊および剪断破壊実験を行い、軸変形拘束が梁の付加軸力、最大耐力、変形性能に与える影響を調べた。載荷前の変形拘束による引張力によって生じた貫通ひび割れの影響を受けて載荷時の初期剛性は低下するが、載荷時の変形拘束による圧縮拘束力が発達するに従い剛性は回復し、曲げ耐力は上昇し、塑性変形能力は低下することを明らかにした。また、載荷前の拘束引張力と貫通ひび割れは、剪断耐力に明確な影響を与えないことを示した。

キーワード：軸変形拘束、高強度コンクリート梁、剪断耐力、拘束軸力、拘束ひび割れ

1. はじめに

鉄筋コンクリート梁はひび割れ発生によって鉄筋の弾性範囲でも曲げ変形に伴う軸方向伸びが著しい。その変形を拘束することによって梁部材の構造性能が変わるだけではなく、構造物全体の挙動にも大きく影響を及ぼす。

例えば、藤沢ら[1]はT形梁に逆対称加力装置を用い繰り返し載荷を行った結果、軸変形を拘束した部材では、耐力上昇し、履歴性状が大きく変わることを実験と解析結果から確認した。坂田ら[2]は、軸変形拘束を受ける鉄筋コンクリート梁部材には圧縮力が作用し、耐力が上昇し、変形能力が低下すること、スパン数が多い骨組み構造の場合には梁の降伏による影響が顕著に現れ、柱の剪断負担が梁の軸方向伸びによって大きく異なることを報告した。一方、田村ら[3]は乾燥収縮などによって梁部材に生じる軸方向引張力を想定し、RC梁の剪断耐力を調べた結果、軸方向引張力が大きくなるほど部材耐力は低下し、剪断破壊から曲げ破壊に移行する可能性が高くなることを示した。

これらを含めて、今まで行われた梁部材の軸拘束効果に関する研究は数少なく、拘束による影響をとり上げる時、部材の自由伸縮量と載荷による軸方向伸びを別々に考慮しており、これらを総合した影響は明らかではない。

本研究では、実部材の約1/3に縮小した鉄筋コンクリート梁に対して打設直後から載荷試験時までの水和熱、乾燥収縮に起因する変形と、載荷により生じる軸方向変形を完全に拘束した高強度コンクリート梁の曲げ破壊および剪断破壊実験を行い、軸変形拘束が梁の軸方向力、剛性、最大耐力、変形性能に与える影響を明らかにすることを目的としている。

2. 実験概要

* 1 韓国科学技術院研究員 土木工学科、工博（正会員）

* 2 東日本旅客鉄道（株）（原稿提出時京大大学院学生）、工修（正会員）

* 3 京都大学教授 工学研究科環境地球工学専攻、工博（正会員）

2. 1 使用材料

本実験で用いたコンクリートは材令28日で気中養生の圧縮強度が 690kgf/cm^2 の高強度コンクリートで、その配合を表1に示す。

主筋は $f_y = 6920 \text{ kgf/cm}^2$ (D13) の高強度鉄筋、補強筋は $f_y = 3690 \text{ kgf/cm}^2$ (D6) の普通強度鉄筋を用いた。

2. 2 試験体製作

試験体としては曲げ破壊実験(Fシリーズ)および剪断破壊実験(Sシリーズ)の各々に対して、コンクリート硬化と共に始まる水和熱と乾燥による部材伸縮を図3に示す装置の中で作成することで完全拘束し、そのままこの装置によって載荷実験中も軸方向変形を拘束した試験体、

試験体の製作養生時は外部拘束はなく、載荷時のみ図 3 の装置で軸変形を拘束した試験体および試験体製作養生時も載荷時にも軸方向外部拘束が全くない無拘束試験体を製作した。各試験体に付けた記号の説明を図 1 に示す。製作時の供試体は型枠の外側に放熱を防ぐための断熱層を配置して、実大部材における水和熱による温度上昇と同程度の履歴を与えた。

製作した試験体の断面は $18 \times 25\text{cm}$ であり、試験体の両端支点間の長さは 2.4m である。曲げ破壊実験および剪断破壊実験の各々に用いた試験体の配筋詳細を図2に示す。

2. 3 軸方向變形拘束方法

図3に軸変形拘束、裁荷装置を示す。軸方向変形を持続的に完全拘束するため、試験体両端支点水平変位を検出するようにセットした変位計から軸方向長さ変化を検出し、制御設定値(軸方向伸縮量 $\pm 0.02\text{mm}$; ひずみ換算 $\pm 8.3\mu$)以下になるように油圧を自動的にコントロールする装置とした。ただし、軸方向変形拘束下での載荷中に軸拘束力が 40tonf を超えると、支点の水平力支持能力の限界に達するので軸拘束力が 36tonf に達するとやむを得ず軸変形制御から 36tonf の一定軸力制御に変えることにした。その後の正負繰り返し載荷中も一定軸力制御を継続した。

2. 4 載荷方法および加力装置

(1) Fシリーズ

表1 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G	Ad* (%)
		(kg/m ³)				
27	48	165	611	756	857	1.1

* 高性能減水混和剤(セメントに対する重量比)



図1 各試験体の記号の説明

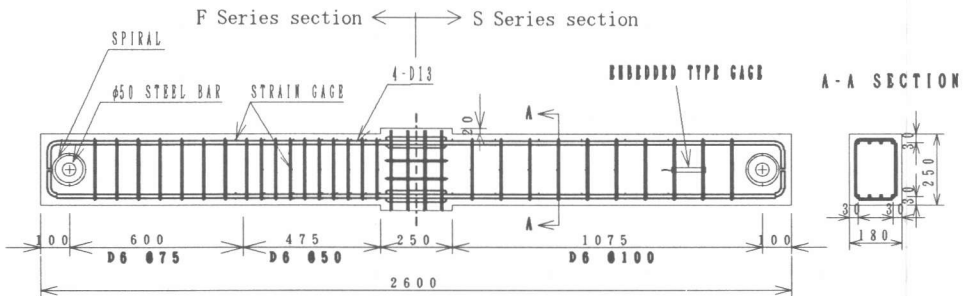


図2 試験体断面および配筋の詳細

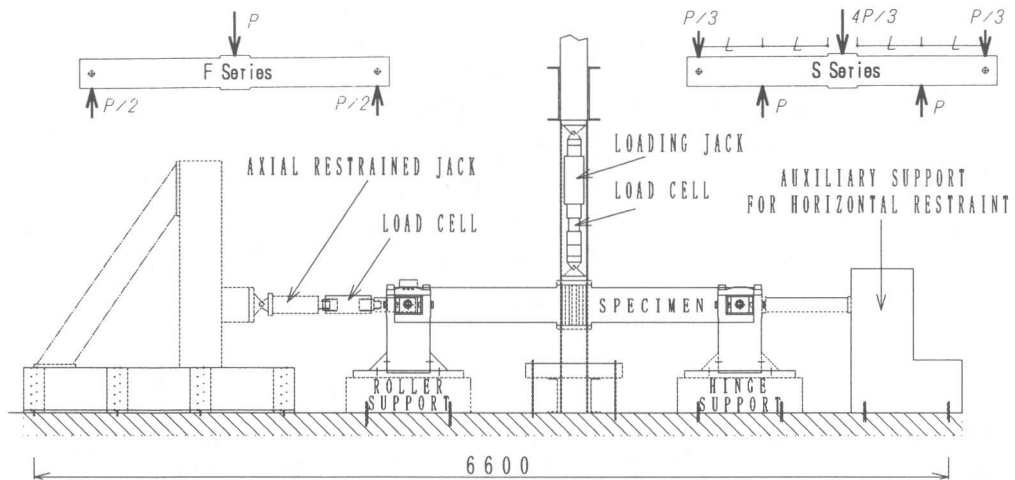


図3 拘束および加力装置の配置

曲げ破壊実験では $0.5\Delta_y^*$, Δ_y^* , $2\Delta_y$, $3\Delta_y$, $4\Delta_y$ のたわみ振幅漸増正負繰り返し載荷を行った。ここで、 Δ_y^* は危険断面の鉄筋歪が鉄筋降伏歪の 3500μ になった時のたわみ量であり、 Δ_y は荷重-たわみ曲線から求めた部材の降伏たわみである。載荷は図3に示すように中央集中載荷方式で行なった。

(2) Sシリーズ

剪断破壊実験では、図3の中央載荷点と両端支点の中央部に載荷床から油圧ジャッキを配し、中央載荷点と中間載荷点のスパンに逆対称モーメントが生じるように3本のジャッキをコントロールした。剪断スパン比(a/D)は $1075/2 \times 25 = 2.15$ であった。Sシリーズでは単調漸増載荷とした。

3. 曲げ破壊実験結果および結果検討

3.1 横荷重と横たわみの関係

各試験体の荷重-たわみ関係を図4に示す。試験体FFRおよびFR Rの最大耐力は軸変形拘束を受けることによって上昇し、無拘束試験体FFFより約20%増加した。FFFでは載荷履歴の範囲中では破壊に至らなかったが、FFR、FR Rでは載荷履歴の範囲で曲げ圧縮部コンクリートの圧壊に至った。なお、FR Rではピン支持側の支点の水平移動が生じたため、計画通りの履歴を与えずに終了した。

3.2 横荷重による軸方向変形および軸方向拘束力の変化

無拘束試験体FFFにおける横荷重によって生じる軸方向変形を図5に、拘束試験体FFRとFR Rの横荷重と軸方向拘束力の関係を図6に示す。

図5によると、弾性範囲内では残留変形はあるものの載荷荷重に比例して軸方向伸び変形が生じることが判る。しかし、塑性変形が進むに従い、軸方向変形が急速に増大し、大変形が生じた状態では除荷する過程においても軸変形がむしろ増加する傾向が見られる。

図6の結果によると、軸変形拘束されると軸方向拘束力は横荷重にほぼ比例して圧縮側に増加することを示す。FFRとFR Rの軸拘束力の変化を比較して見ると、FR Rでは低荷重段階で試験体の載荷までの軸変形拘束による引張拘束軸力の影響があるが、高荷重段階になるとその影響がなくなり両者が同様の挙動を示すことが判る。

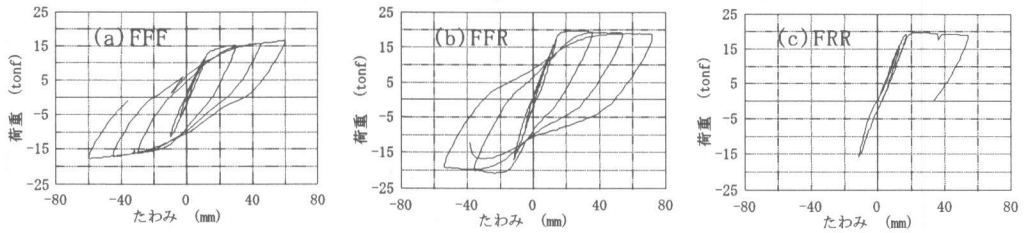


図4 横荷重—横たわみ曲線

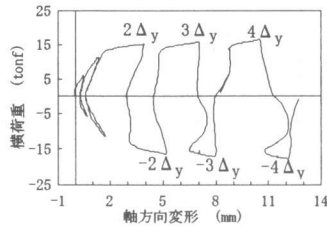


図5 横荷重と軸方向変形の関係 (FFFの場合)

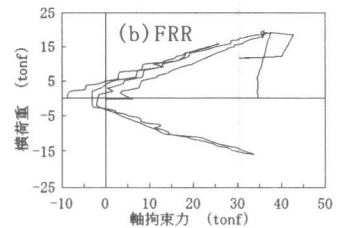
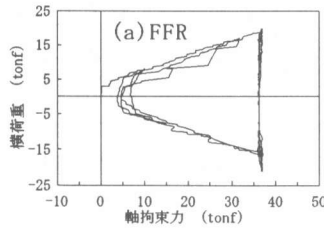


図6 横荷重と軸方向拘束力の関係

3. 3 軸変形拘束下での部材の剛性および塑性挙動

拘束条件が異なる各試験体の横荷重—横たわみ曲線の鉄筋降伏以前のものの比較を図7に、降伏たわみ以後の塑性領域での荷重—たわみ関係を図8に示す。図8に示した点線は拘束条件を変形完全拘束から一定軸力拘束に切替えた時点を表す。図7から判るようにFRRは載荷前の引張拘束力による貫通ひび割れの影響を受けて初期剛性がFFFより低い値を示すが、荷重の増加に伴い剛性は回復して、FFRの剛性に一致し、軸拘束試験体の剛性が無拘束試験体より大きくなることを示す。図8によると、軸変形拘束から定軸力拘束への拘束切替点は降伏たわみの値と一致することが示された。即ち、完全変形拘束条件下では塑性変形が制限されて降伏点が現れなかったが、軸拘束を一定荷重拘束条件に切り替えると危険断面での塑性変形が始まるのが分かる。

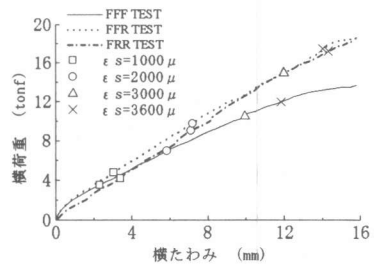


図7 各試験体の剛性の比較

4. 剪断破壊実験結果および結果検討

4. 1 剪断力と変形の関係

中央両側の1075mm/2の区間で逆対称モーメントを受けるように載荷した各試験体の試験区間での剪断力と相対変位を調べ、その結果を図9に示す。図9から分かるように軸変形拘束を受ける試験体では最大剪断耐力の寸前まで剪断力と変位がほぼ直線的な関係を保つが、無拘束試験体の場合には初期曲げひび割れが生じてから曲線が急激に変化して拘束試験体の剛性よりかなり低い剛性を示した。剪断力—変位曲線から求めた各試験体の剪断耐力、その時の変位および危険断面での主筋歪を表2に示す。表2には比較のため、終局強度型耐震設計指針・同解説による無拘束下での剪断耐力と横荷重と軸力の実験値を用いて曲げ解析から求めた危険断面の引張主筋歪を合わせて示した。

表 2 各試験体の剪断耐力および変位の比較

試験体名	実験値			計算値	
	剪断耐力 (tonf)	剪断耐力時の変位 (mm)	剪断耐力時の主筋歪 (μ)	剪断耐力 ⁶⁾ (tonf)	剪断耐力時の主筋歪 (μ)
SFF	19.3	4.53	2,613	20.7	2,473
SFR	15.9	1.58	1,019		1,323
SRR	23	2.43	1,323		1,673

図 9 と表 2 によると、SFF 試験体の最大剪断耐力より SRR の方が 19% 大きい値を示し、軸拘束による剪断耐力の上昇が認められる。それに対して、SFR の場合には拘束を受けるにも拘わらず、SFF より低い最大剪断耐力を示したが、ひび割れ状況および剪断補強筋の歪

変化を調べた結果、剪断ひび割れ発達も殆どなく、主剪断ひび割れのほぼ中央に位置する剪断補強筋が破断しており、補強筋の歪も破断したものに限って大きく進行していることから SFR の剪断破壊は危険断面位置の剪断補強筋の破断によって誘発されたものと推定された。したがって、この結果から載荷前の引張拘束軸力とそれによる貫通ひび割れの存在の影響は、載荷時の拘束軸圧縮力によって相殺され、多くの場合剪断耐力を低下させる要因とはならないと考えられる。

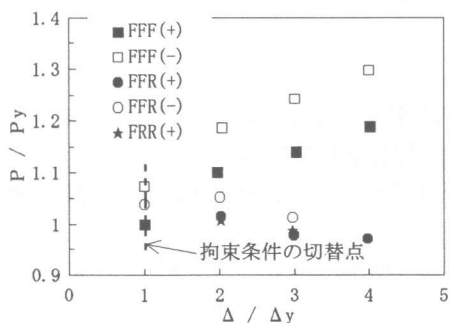


図 8 塑性領域での荷重とたわみの変化

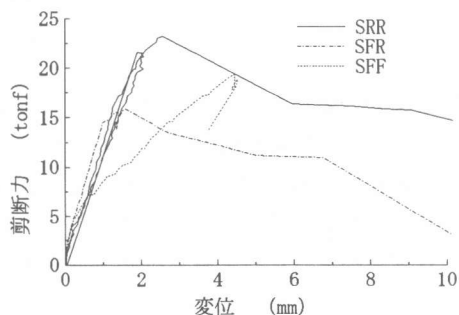


図 9 剪断力-変位曲線の比較

4. 2 ひび割れ形状の比較

各試験体の破壊時のひび割れパターンを図 10 に示す。図 10 の SRR に示した点線は載荷前まで受けた引張拘束力によって生じたひび割れを表す。図 10 によると、SFF の場合には剪断ひび割れが多数分散して発生するパターンを示すが、拘束を受ける SRR の場合には軸圧縮力の影響を受けて載荷点間を直線的に繋ぐ剪断ひび割れが破壊モードを支配した。載荷前の引張拘束力によって既に生じていた材軸直交貫通ひび割れは載荷時の斜め剪断ひび割れのパターンに影響を与えないことがわかる。ただし、この場合の貫通ひび割れのひび割れ幅は 0.08mm が最大値であり、この程度のひび割れ幅の範囲内であればひび割れ面の剪断伝達が期待できると推定される。

5. まとめ

本研究の範囲内での結果をまとめると：

1) 軸変形拘束下での梁部材は横荷重と比例して増大する軸圧縮拘束力の影響を受けて無拘束梁より曲げ耐力が増大し、曲げ剛性の低下が少ない。コンクリート打設直後から軸方向変形を拘

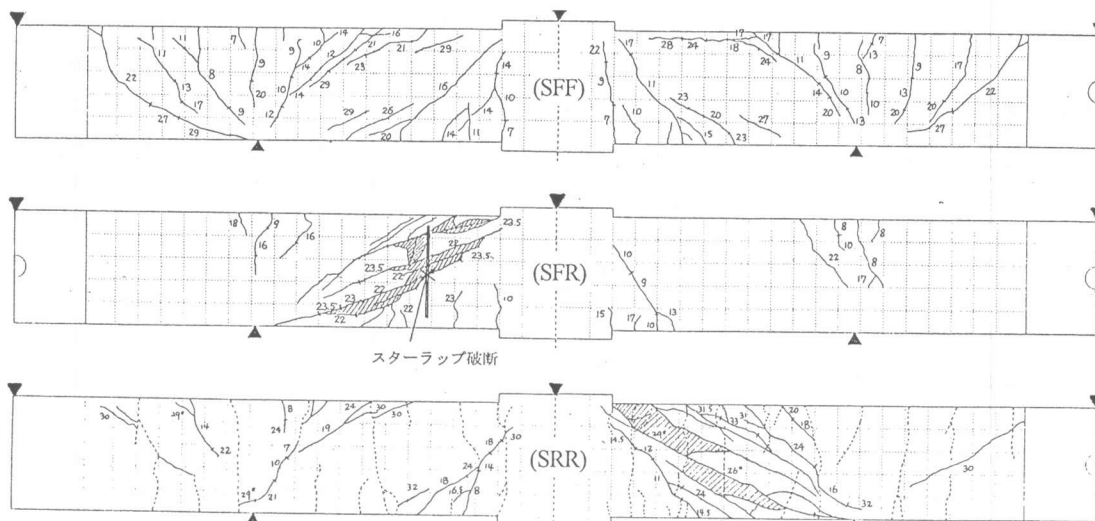


図 10 各試験体のひび割れ形状

束される場合、載荷前の引張拘束力による貫通ひび割れの影響を受けて初期の剛性が無拘束梁より低い値を示すが載荷荷重の増大に伴いこの引張拘束力の影響は低下する。

2) 軸変形完全拘束下で載荷した梁に生じる軸圧縮拘束力によって、最大曲げ耐力は無拘束梁より少なくとも20%以上大きくなる。

3) 軸変形拘束される部材では軸圧縮力のために変形能力が制限され、コンクリートの曲げ圧縮破壊が小さい変形領域で生じる破壊モードになる。

4) 載荷前の変形拘束によって生じたひび割れは載荷による曲げひび割れの誘発点にはなるが、載荷によって生じる曲げ、剪断ひび割れパターンにはほとんど影響を及ぼさない。

5) 水和熱による伸縮や乾燥収縮を拘束することによって生じる載荷以前の拘束引張力による軸直交貫通ひび割れ幅がおよそ0.08mm以内であれば、拘束引張力の剪断耐力に与える影響はないと推定される。

参考文献

- [1] 藤沢正視他：T形ばりの靱性におよぼす肋筋量の影響（その1、その2、その3）－高層壁式ラーメン構造に関する研究－、日本建築学会大会学術講演梗概集C、pp. 205-208、225-226、1987
- [2] 坂田弘安、林静雄、和田章、黒正清治：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報告集、No. 380、pp. 45-55、1987. 10
- [3] 田村隆弘、重松恒美、原隆、中野修治：軸方向引張り力を受けるRC梁のせん断耐力に関する実験的研究、コンクリート工学論文集、V. 2、No. 2、pp. 153-160、1991

[付記] 本研究は（株）フジタとの共同研究として行われたものであり、また実験遂行にあたり、京都大学工学部研究生藤井鉄男君の協力を得た。なお、本研究で用いた載荷システムは平成6年度文部省科研費一般（A）（研究代表者：森田司郎）によって製作されたものである。