

論文 SD490 を用いた高鉄筋比の RC 柱の正負交番載荷実験と数値解析

村田 裕志*1・福浦 尚之*2・渡辺 典男*3

要旨: 本研究では、高強度鉄筋 SD490 の軸方向鉄筋と SD345 の帯鉄筋および設計規準強度 30N/mm^2 のコンクリートを組み合わせた RC 高橋脚の実用化を目的として実施した縮小模型試験体による正負交番載荷実験に対して、ファイバー解析を行い、コンクリートの応力ひずみ関係、鉄筋座屈と耐荷性能の関係について検討を行った。これより、コアコンクリートの圧壊と鉄筋座屈を分けて、段階的に起こる挙動としてとらえることで合理的な終局変位の予測ができる可能性を示した。

キーワード: 高強度鉄筋, SD490, RC 柱, 正負交番載荷, ファイバーモデル解析, 靱性

1. はじめに

道路橋では、一般に設計基準強度 30N/mm^2 以下のコンクリートと材質 SD345 以下の鉄筋を組み合わせた RC 橋脚が広く採用されている。しかし、山岳橋梁などでは、高橋脚が採用されることが多く、一般の橋梁と比較して、軸方向鉄筋比や軸方向圧縮応力が大きくなり、断面仕様が大きくなる傾向にある。

このような高橋脚に対して、鉄筋やコンクリートに高強度材料を使用することで材料の使用量を低減でき、合理的な設計が期待できる。

高強度材料を使用した RC 部材の研究・開発は、建築分野が進んでいるが、土木分野においても研究が進められており^{1), 2)}, SD490 以上の軸方向鉄筋を適用した RC 橋脚の耐震性能を実験で確認しながら適用している^{3), 4)}。

著者らは既報⁵⁾にて、高軸圧縮応力、軸方向鉄筋比も 3% 以上と高い場合の耐荷・変形性能について、軸方向鉄筋に SD490 を用いた縮小柱部材の正負交番載荷実験を行い、変形・耐荷性能に与える影響を把握し、道路橋示方書の適用性について検証し、その安全性を確認した。

ただし、その検討条件（高軸方向鉄筋比、高横拘束筋体積比）において、道路橋示方書の算定結果を大きく上回る裕度が得られている。既往の実験^{3), 6)}においても同様の傾向が得られており、その要因を検討することは構造物の設計合理化に繋がるものと考えられる。

そこで、本研究では、既報⁵⁾の実験のうち、Case1 についてファイバー解析および実験データの追加整理を行い、この点について検討を行った。

対象実験を Case1 のみとしたのは、他の Case2, 3 は軸方向鉄筋比は同じでコンクリート強度、帯筋強度を変えたものであり、本研究の着目点からはほぼ同じ条件といえることまた、実験結果もほぼ同じであったことによる。

2. 正負交番載荷実験

2.1 試験体概要

試験体の寸法および配筋は、橋脚高さが 30m を越える中空断面の高橋脚を検討対象とし、表-1 ならびに図-1 のように定めた。橋脚断面を $6\text{m} \times 6\text{m}$ 程度と想定し、試験体の断面は、縮尺を 1/10 とし $600\text{mm} \times 600\text{mm}$ とした。高橋脚では一般に中空断面となるが、湯川らの中空断面を対象とした実験⁷⁾より、1) 中間帯鉄筋を配置することで変形性能が改善されること、2) 中空断面では壁外側の軸方向鉄筋が座屈した後に内側鉄筋が座屈する破壊進行過程であることが示されている。これより、中実断面で耐力・変形性能を確認することで、中空断面においても内側鉄筋が先に座屈しないように帯鉄筋による拘束が与えられることを前提として、実橋で想定される中空断面にも適用は可能と考えた。

軸方向鉄筋には 56 本の D16 SD490 を 2 段に配置し、帯鉄筋は D13 SD345 とし内外の軸方向鉄筋を囲むように 2 重に配置した。軸方向鉄筋比 p は、3.09% である。横拘束筋の体積比 ρ_s は実績から道路橋示方書の耐震設計編の上限である 1.8% を目標とした。鉄筋径やかぶりを実物の縮小とすることは材料調達で困難であることから、厳密に反映することは出来なかった。ただし、塑性ヒンジ長は、変形能と密接に関係し、重要であることから、浅津らによる研究成果⁸⁾に基づき 0.5D (D: 断面高さ) 程度となるように帯筋の仕様を定めた。軸圧縮応力については、高橋脚を想定して中空断面のものと同等の 3.0N/mm^2 と設定した。コンクリートの目標圧縮強度は 30N/mm^2 とした。表-2 にコンクリート配合を示す。

2.2 載荷方法

載荷装置概要を図-2 に示す。試験体の載荷は、最初に柱基部の軸応力度が 3.0N/mm^2 となるように軸力を載荷した後、基部から 3.2m の載荷点位置に水平力を与え、

*1 大成建設(株) 土木本部土木設計部設計計画室 博(工) (正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室土木構造チームチームリーダー 博(工) (正会員)

*3 大成建設(株) 土木本部土木設計部橋梁設計室課長 修(工) (非会員)

正負交番繰返し載荷を行った。軸力は、正負交番繰返し載荷を通して一定値となるよう制御し、軸力装置が試験体の変位に追従して移動できるように水平ローラー装置を鉛直ジャッキ上部に設置した。

図-1 に載荷ステップを示す。まず、予備載荷を実施後、本載荷を行った。本載荷は、軸方向鉄筋が降伏に達したときの変位量 δ_y を基準として、 δ_y の整数倍の変位量（ $\pm\delta_y$, $\pm 2\delta_y$, $\pm 3\delta_y$ ・・・）において、各3サイクルの載荷を変位制御で行った。なお、降伏の判定に関しては、正側・負側それぞれについて引張縁側の3本の軸方向鉄筋の柱基部位置に裏表にひずみゲージを貼付し、裏表の平均値が1つでも実降伏ひずみ（ $=3037 \times 10^{-6}$ ）に達した時を降伏と判定した。このようにして得られた正側・負側の初降伏変位を平均して δ_y とした。載荷は、部材が終局にいたったステップ以降も、可能な限り続けることとした。

計測項目は、荷重、変位、鉄筋ひずみに加え、図-3 に示す柱基部の区間変位とした。載荷の制御に用いる水平変位は、載荷位置での水平変位とした。また、実験上の終局は、各ステップの1サイクル目で初降伏荷重を下回らず、かつ軸方向鉄筋の破断が生じない最大のステップと定めた。

2.3 実験結果

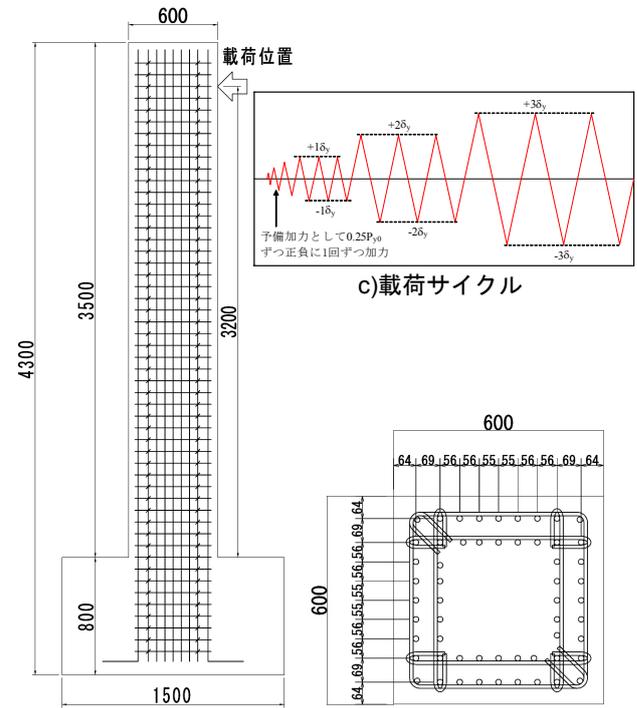
材料試験結果を表-3、表-4 に示す。また、SD490 鉄筋の引張試験の結果、明確な降伏棚があることを確認した。

試験体の損傷過程を表-5 に示す。表中で剥離とは、圧縮力によってコンクリート表面が薄く剥がれ落ちた時とした。剥落は、かぶりコンクリートが比較的深く剥がれ落ち、外側の軸方向鉄筋を固定している中間帯鉄筋がわずかに露出した時とした。軸方向鉄筋座屈は、さらに剥落が進展し、軸方向鉄筋が露出して目視により軸方向鉄筋のはらみ出しが明瞭に確認できた時とした。軸方向

鉄筋破断は音と目視により確認した。また、表中で例えば $-4\delta_y-2$ となっているものは、負側 $4\delta_y$ ステップの2サイクル目を意味している。

水平荷重-水平変位関係を図-4 に示す。水平荷重は、軸力による偏心モーメント分を加えた補正值である。水平加力によって試験体に水平変位が生じると、鉛直荷重と水平変位の積の偏心モーメントが発生するため、この偏心モーメントを柱基部から水平荷重載荷位置までの高さで除した値を実測水平荷重に加算して補正した。

$\pm 4\delta_y$ まで1サイクル目で初降伏荷重を上回っており、さらに $\pm 5\delta_y$ では軸方向鉄筋の破断が生じたため、終局は $4\delta_y$ となった。荷重は、正負ともに $\pm 3\delta_y$ の1サイクル目



a) 載荷軸直角面 b) 断面図

図-1 試験体概要

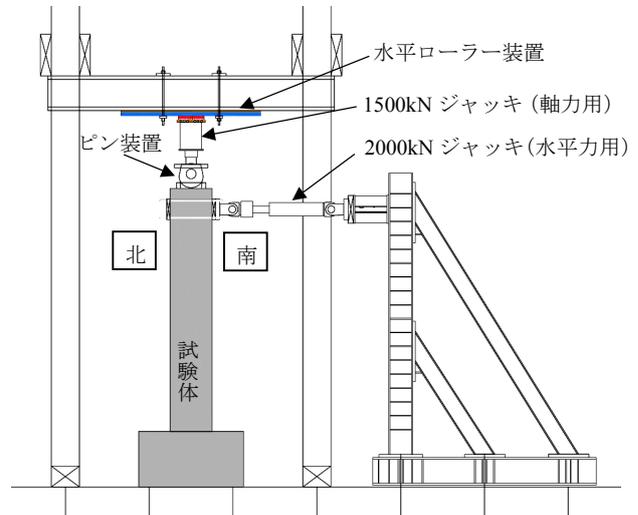


図-2 載荷装置概要

表-1 試験体諸元

			Case1
試験体寸法	載荷方向	[mm]	600
	直角方向	[mm]	600
目標コンクリート強度			[N/mm ²] 30
軸応力度			[N/mm ²] 3.0
鉄筋 軸方向	種別		SD490
	本数-径		56-D16
	鉄筋比	[%]	3.09
横拘束鉄筋	種別		SD345
	径@鉛直方向間隔	[mm]	D13@80
	横拘束筋有効長	[mm]	363
	体積比	[%]	1.75
塑性ヒンジ長の計算値 ⁸⁾			[mm] 276 (0.46D)

表-2 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
20	50	162	324	840	1004	1.62

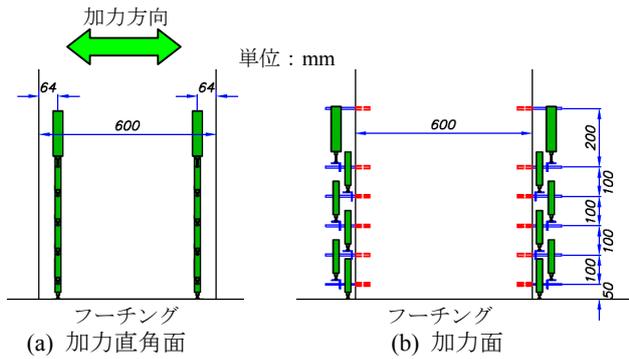


図-3 基部区間変位の計測

表-3 コンクリートの材料試験結果

	圧縮強度 [N/mm ²]	割裂引張強度 [N/mm ²]	ヤング係数 [kN/mm ²]
Case1	30.8	2.22	33.5

表-4 鉄筋の材料試験結果

	降伏強度 [N/mm ²]	ヤング係数 [kN/mm ²]	備考
D16 SD490	577	190	軸方向鉄筋
D13 SD345	372	186	帯鉄筋

のサイクル終了時に最大となり、それぞれ+476kN、-455kN となった。最終的に±5 δ_y のステップでは引張縁の軸方向鉄筋9本中、北側は東西両端2本ずつを残して5本が破断し、南側は東西両端の2本を残して7本が破断し、耐力が低下した。

軸方向鉄筋の破断については、座屈後に引張力を受けた際に、変形した部分の圧縮側から亀裂が進展し、破断に至ったことが数本の軸方向鉄筋において目視で確認できた。

2.4 実験結果の考察

道路橋示方書の下部構造編では SD490 やコンクリート強度 40N/mm² の高強度材料は適用範囲外であるが、保有水平耐力法で算出されるタイプII地震動の終局耐力と終局変位（以降、計算値）を実験値が満足することが確認されれば、現行の安全係数 α と規格強度を用いて耐震設計手法が適用できるものと考えた。

図-5 に骨格曲線の比較を、表-6 に各ステップの荷重と変位の比較表を示す。荷重は、前章と同様に軸力による偏心モーメント分を補正した値である。実験の水平変位は、フーチングからの軸方向鉄筋の伸出しによる水平変位を除くために、図-3 に示す柱基部の最下段区間変位に基づき基部の回転変形角を算定し、これによる水平変位を除いたものである。道路橋示方書の終局変位に対応する実験の終局変位は、前項で定めた終局時の変位とした。計算値はコンクリートと鉄筋の実強度を用いてタイプII地震動を設定して求めた。実験の包絡線は各ステップの1サイクル目のピーク値を結ぶ線となっている。±5 δ_y 以降は軸方向鉄筋の伸出しを計測していた変位計

表-5 試験体損傷過程

	Case1
ひび割れ発生 (正/負)	+88/-75kN
初降伏変位 δ_{y0} (正/負)	+46.4/-45.2mm
初降伏変位 δ_{y0} (平均)	45.8mm
初降伏荷重 P_{y0} (正/負)	+409/-402kN
最大荷重 P_{max} (正/負)	+476/-455kN
かぶり剥離 (南/北)	+2 δ_y -1/-2 δ_y -1
かぶり剥落 (南/北)	-2 δ_y -2/+2 δ_y -2
軸方向鉄筋座屈 (南/北)	+4 δ_y -1/-4 δ_y -2
軸方向鉄筋破断 (南/北)	-5 δ_y -1/+5 δ_y -1

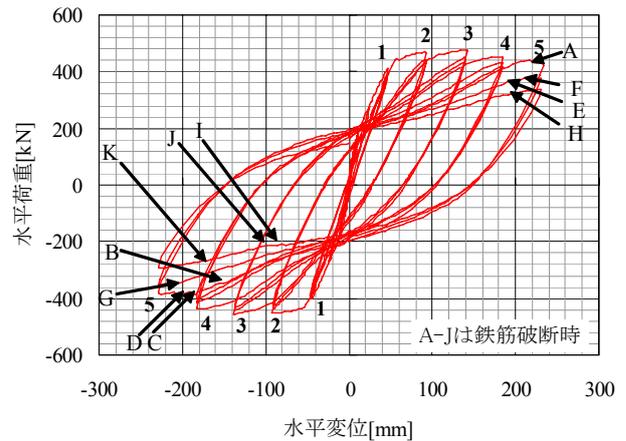


図-4 水平荷重-水平変位関係

が試験体の損傷により固定装置が外れたため、実験値は終局と判定した±4 δ_y までを表示している。

図-5 および表-6 より、実験の終局耐力および終局変位は、計算値を上回っている。特に終局変位においては、実験値が計算値に対して正負の平均で1.88倍となっており、十分な裕度を有しているものと考えられる。

3. 解析シミュレーション

3.1 解析モデルと材料モデル

解析は、ファイバー解析を行った。解析に用いるファイバー要素は、要素内で平面保持を仮定し、断面内を複数のセルに分割してそれぞれのセル位置での部材軸方向ひずみに関して材料モデルに基づくコンクリートおよび鉄筋応力を算定し、これを断面に関して積分して曲げモーメントと軸力を求めることができるものである。これより、鉄筋とコンクリートの非線形な応力ひずみ関係をモデル化することで、柱部材の非線形挙動を表現することができる。

コンクリートの材料モデルは、包絡線に関しては道路橋示方書に示される関係式⁹⁾を用いる。内部曲線については、簡易に原点志向型の2次曲線型の挙動することとした。また、載荷方向に関する両側のかぶり部分に関しては、道路橋示方書に示されるコンクリートの応力ひずみ関係において横拘束筋の拘束効果を考慮しないものとし、そ

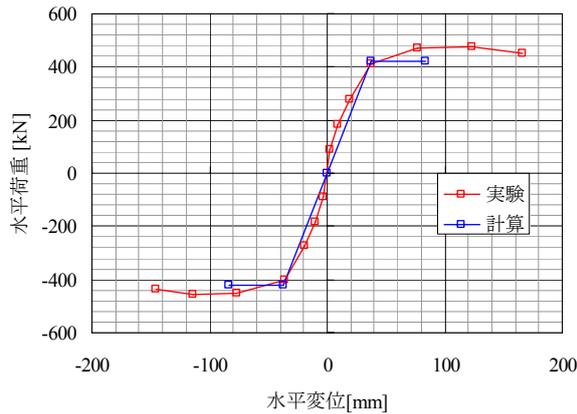


図-5 骨格曲線の比較

表-6 実験値と計算値の比較

		Case1					
		正側		負側		平均	
		荷重 [kN]	変位 [mm]	荷重 [kN]	変位 [mm]	荷重 [kN]	変位 [mm]
実験	1δ _v	409	37.4	-402	-35.8	406	36.6
	2δ _v	469	76.4	-452	-77.2	461	76.8
	3δ _v	476	123.1	-455	-113.8	466	118.5
	4δ _v	453	166.5	-438	-145.7	446	156.1
計算	初降伏	358	31.8	降伏曲率:0.0118/m 終局曲率:0.0619/m			
	降伏	421	37.3				
	終局	421	83.2				

れ以外の部位に関しては、拘束効果を見込んだ応力ひずみ関係を適用した。図-6 にコンクリートの材料モデルを示す。

鉄筋に関しては、コンクリート標準示方書「設計編」に示される鉄筋の硬化とバウジナグ効果による繰返し挙動を再現できるモデル¹⁰⁾とした。ただし、鉄筋モデルには、はらみ出し・座屈を考慮していない。図-7 に鉄筋の材料モデルを示す。

柱部材の要素分割は、部材軸方向に 10 要素に分割し、載下端の要素の長さは塑性ヒンジ長に一致させた。ファイバー解析において、塑性ヒンジ長を適切にモデル化する方法に関してはいくつかの考え方があがるが、本解析では、極力、簡易なモデル化をするものとし、以下の理由により道示に示される塑性ヒンジ 0.5D (=300mm) を載下端の要素の長さに一致させることとした。

- 1) 実際の柱部材において、かぶりの剥落等で柱基部にヒンジ領域が生じた場合、この領域では鉄筋とコンクリートとの付着が非常に弱いため鉄筋ひずみの発生状況を適切にモデル化することは困難と考えられる。
- 2) ファイバー解析では要素内でコンクリートと鉄筋は完全付着となるため、柱基部を細かく分割すると柱最下端の要素に鉄筋降伏が集中し、ひずみが非常に大きくなり実際の状況とは異なるものになる。
- 3) 塑性ヒンジ領域を 1 要素とし、解析上、塑性ヒンジ領域内を平均化した一定ひずみ状態とすることで、実際の挙動を近似的にモデル化することが可能と考えられる。

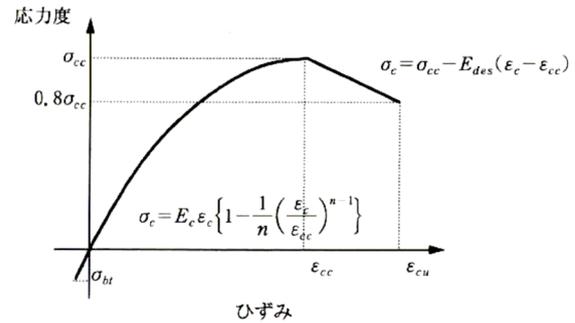


図-6 コンクリート応力ひずみ関係⁹⁾

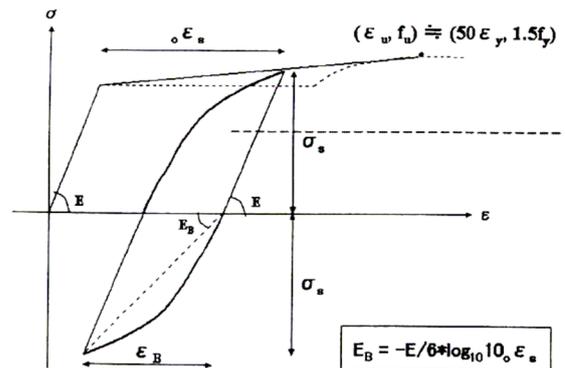


図-7 鉄筋応力ひずみ関係¹⁰⁾

また、本解析では基部よりの伸び出し変形は考慮していないことから、実験での計測変位から 2.4 に示した方法による伸び出し変形を除いた柱部材自体の変形と比較した。

荷重サイクルは、実験結果の水平変位より伸び出し変形を除いた荷重サイクルに基づき、荷重点位置に強制変位を与えた。実験では同一サイクルに対して 3 回の繰返しを実施したが、解析に用いた材料モデルには同一サイクルによる繰返し劣化は考慮していないので 1 回の繰返しとした。荷重は、実験において終局と判定された 4 サイクルの次の 5 サイクル分まで行った。

3.2 解析ケース および比較検討

解析ケースは、コア内部の拘束のあるコンクリート応力ひずみ関係において、道示の終局ひずみ ϵ_{cu} 以降は応力は消失するとした場合(ケース A)と終局ひずみ ϵ_{cu} 以降も同じ勾配(E_{des})で応力低下していく場合(ケース B)とした。ケース B は、設計上の安全を見込んだケース A に対して、より実際の挙動を想定した比較ケースとして定めた。

(1) P-δ関係

荷重-変位関係の比較を図-8 に示す。図中には、道路橋示方書に基づき、材料強度を実強度とした場合の計算値を併記した。また、図-9,10 にケース B における鉄筋、コンクリートの応力ひずみ関係を示す。

ケース A・B ともに、最外縁鉄筋位置で終局ひずみ($\epsilon_{cu}=9150\mu$)となる時の変形は、道示計算値が 83mm に対し約 100mm 程度(図-8 中★)であった。これは、1) 解析上の塑性ヒンジ領域の長さ、2) 作用モーメントは最

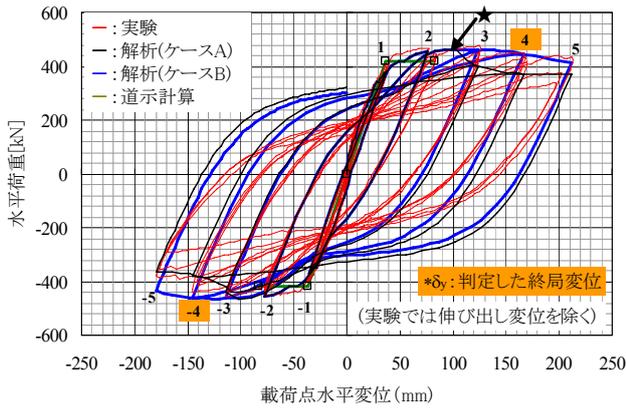


図-8 荷重変位関係の比較

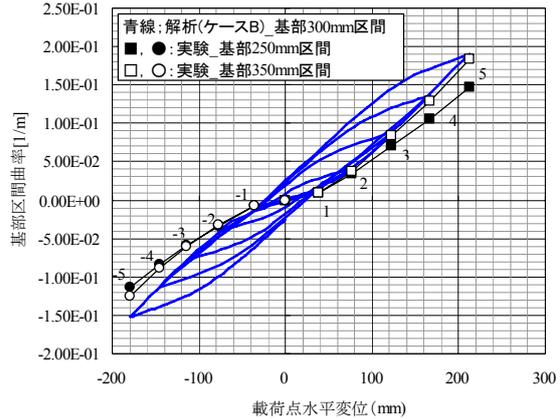


図-11 基部の曲率の比較

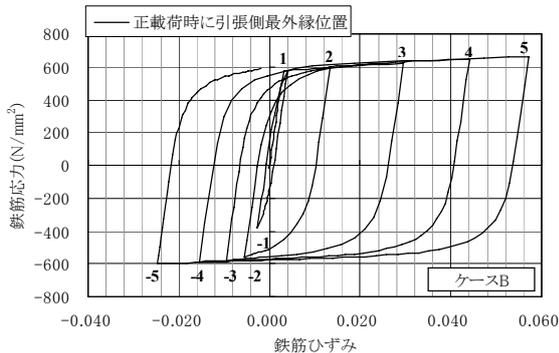


図-9 鉄筋の応力ひずみ関係

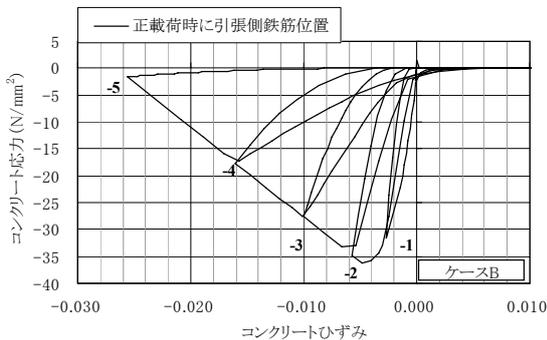


図-10 コンクリートの応力ひずみ関係

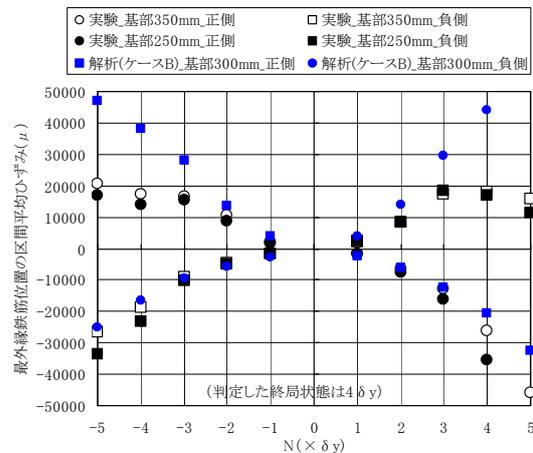


図-12 最外縁鉄筋位置での平均ひずみ比較

下端で最大になるが要素中央の積分点で非線形応力ひずみ関係が適用されること、の影響が考えられる。

ケース A はその後、急激な荷重低下にいたり道示耐力をも下回った。これは、実際にはコンクリートが圧壊した場合の挙動といえるが、実験ではこのような急激な荷重低下はなかった。

これに対し、ケース B では降伏から実験で判定した終局変位までの範囲において実験と解析は概ね一致しているといえる。内部曲線については、解析のほうが膨らみが大きくなっているが、実験の傾向を捉えることが出来ている。また、図-11 に示すように、実験での区間変位の計測結果に基づく塑性ヒンジ領域の曲率と解析の最下端要素の曲率も同様な傾向であった。また、図-12 に示す、実験の区間変位の計測結果に基づく、最外縁鉄筋位置での平均ひずみ履歴と解析との比較より、 $3\delta_y$ 以降の引

張ひずみにおいては解析と実験は乖離しているものの、それ以外については同様の傾向を示している。実験結果と解析結果の双方について詳細な検討が必要ではあるが、解析は概ね実験の挙動を再現できていると考えられる。

ただし、終局変位以降については、実験ではかぶりの剥落、鉄筋の座屈（はらみ出し）・破断などが生じ荷重の低下にいたっているが、その領域に関しては十分なモデル化が出来ていないことから、解析では荷重が低下せずに変形が進行し、実験との整合性は取れていない。これについて、次項で検討する。

(2) 鉄筋の座屈（はらみ出し）時期

実験では、かぶりの剥落、鉄筋の座屈（はらみ出し）、破断などが生じ荷重が低下して道路橋示方書の終局状態にいたっているが、主要な要因として、鉄筋の座屈（はらみ出し）が生じたことが上げられる。

鉄筋の座屈（はらみ出し）のメカニズムについては、既往の研究成果がいくつかある。本研究では、図-13 に示すように、ある曲率を持った鉄筋が圧縮力を受けている際に外側にはらみ出す力とそれに抵抗する力との関係に基づく鉄筋の座屈時期の判定方法により、ケース B の解析結果を用いて検討した。

外側にはらみ出す力¹¹⁾は、解析結果の基部要素の曲

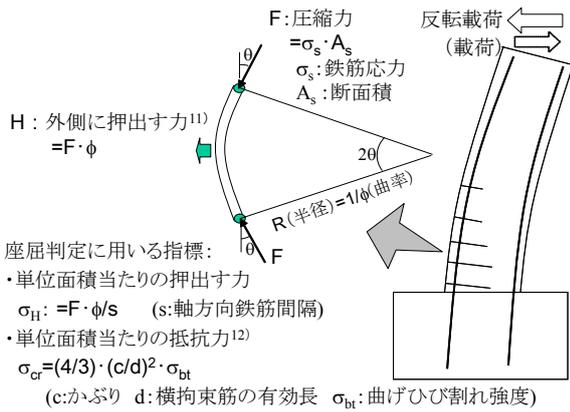


図-13 鉄筋の座屈判定方法

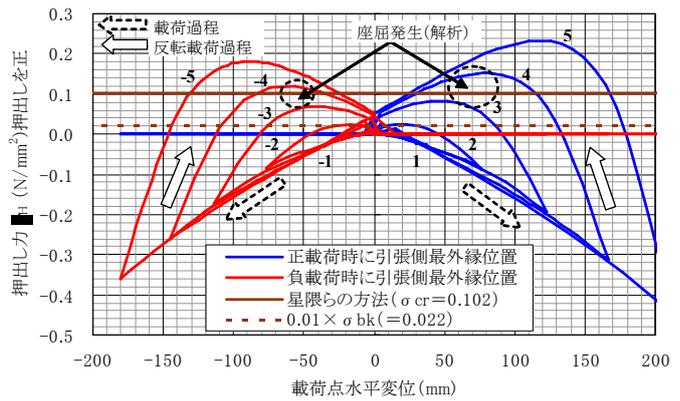


図-14 鉄筋座屈の判定

率および鉄筋応力に基づき算定した。抵抗する力は、星隈らの方法¹²⁾により算定した。また、参考として、引張強度の1/100との比較も行った。

検討結果を図-14に示す。はらみ出しのタイミングは、実験では表-5に示したように4 δ_y で生じているが、解析では3 δ_y 以降4 δ_y までの範囲で生じることとなり、ほぼ同じである。その時の圧縮ひずみは、実験・解析ともに20000 μ 程度(図-12参照)であり、道路橋示方書による終局ひずみ(9150 μ)を大きく上回っている。

以上より、実験と解析の比較およびケースAとケースBの比較より、ケースAの道示設計モデルは十分に安全ではあるが、今回の実験条件では道路橋示方書の終局ひずみ ϵ_{cu} 以降も実際にはコンクリートが圧縮応力を分担し、それにより試験体の変形能が増大し、最終的には鉄筋の座屈(はらみだし)により終局状態にいたったものと考えられる。

4. まとめ

本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 本実験において得られた実験の終局耐力と終局変位は、道路橋示方書による計算値を上回っており、終局変位においては、1.88倍の裕度があった。
- (2) ファイバー解析により、実験において鉄筋座屈(はらみだし)が生じるまでは、荷重-変形のみならず、局率、鉄筋位置での圧縮ひずみに関しても概ね整合性がある解析結果が得られた。
- (3) 本実験における鉄筋座屈(はらみだし)の時期は、既往の研究成果による判定と概ね整合性があった。
- (4) 解析と実験を合わせて考察した結果、実験の破壊のプロセスは、鉄筋座屈前に道路橋示方書の終局ひずみ ϵ_{cu} に達したことで、 ϵ_{cu} 以降も実際は圧縮応力を分担してじん性を保持し、その後、剥落、座屈が生じ終局に達したものと考えられる。
- (5) コアコンクリートの圧壊と鉄筋の座屈(はらみだし)を分けて、段階的に起こる挙動としてとらえることで合理的な終局変位の予測ができる可能性を示した。

謝辞

最後に、本研究の実験の遂行にあたり貴重な御意見をいただきました東京工業大学大学院 二羽淳一郎教授に深く感謝し、誌面を借りてお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 西田秀明, 運上茂樹, 河籾千尋: コンクリートおよび軸方向鉄筋に高強度材料を用いたRC橋脚の耐力変形性能, 土木学会第58回年次学術講演概要集, pp.43-44, 2003.9
- 2) 佐藤大, 西田秀明, 運上茂樹: 高強度材料を用いた円形RC橋脚の耐力および変形性能に関する考察, 土木学会第61回年次学術講演概要集, pp.55-56, 2006.9
- 3) 仲谷邦博, 木村祐司, 上田喜史, 山脇正史: 高強度鉄筋SD490を使用した七色高架橋の計画と設計(下), 橋梁と基礎, pp.41-49, 1999.12
- 4) 西尾宗雄, 橋本和重, 森信幸, 大塚一雄: 東海北陸自動車道鷺見橋橋脚の施工, 基礎工, pp.62-65, 1998.10
- 5) 村田裕志, 渡辺典男, 水谷正樹, 小尾博俊, 福浦尚之: SD490を用いた高鉄筋比のRC橋脚の耐震性能に関する実験的研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.56A, 2010.3 (投稿中)
- 6) 浅井洋, 春日昭夫, 飯田字朗, 梅原秀哲: SD390を軸方向鉄筋に用いたRC橋脚の実用化に関する研究, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp.91-108, 2004.5
- 7) 湯川保之, 緒方辰男, 須田久美子, 齊藤宗: 中空断面鉄筋コンクリート高橋脚の耐震性能, 土木学会論文集, No.613/V-42, pp.103-120, 1999.2
- 8) 浅津直樹, 運上茂樹, 星隈順一: 軸方向鉄筋の座屈長からみたRC橋脚の塑性ヒンジ長算定式, 土木学会第55回年次学術講演会, I-B211, 平成12年9月
- 9) 日本道路協会: 道路橋示方書V耐震設計編, 平成14年3月
- 10) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編, 2007年
- 11) 島 弘, 伊藤圭一, 水口裕之: 曲げ破壊型RC橋脚における鉄筋座屈モデルによる靱性解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.2, pp.741-746, 1990.6
- 12) 星隈 順一, 運上 茂樹, 塩島 亮彦: RC橋脚における軸方向鉄筋の座屈抑制効果に及ぼすかぶりコンクリートの影響に関する研究, 土木学会地震工学論文集, Vol.27, pp.1-7, 2003.12