

高強度コンクリート及び高強度鉄筋を用いた RC橋脚の耐震性

宮路健太郎¹・中澤宣貴¹・川島一彦²・渡邊学歩³

¹ 学生会員 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻（〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1）

² F会員 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科土木工学専攻（同上）

³ 正会員 工修 東京工業大学助手 大学院理工学研究科土木工学専攻（同上）

1. はじめに

高強度コンクリート及び高強度鉄筋を用いれば、強度の増加だけでなく、断面の減少とそれに伴う慣性力の減少により、耐震性能の向上に資することができる。本文は、RC橋脚に高強度コンクリート及び高強度鉄筋を採用した場合の耐震性をくり返し載荷実験によって検討した結果を報告するものである。

2. 実験供試体および載荷方法

くり返し載荷実験には、表-1及び図-1に示す5体の供試体を用いた。供試体は、いずれも400mm x 400mmの正方形断面を有するRC単柱式橋脚である。基部から水平力作用点までの有効高さは1350mmで、せん断支間比は3.75である。これらの供試体は、もともと、別の研究目的のために、コンクリート強度を25MPa、軸方向鉄筋をD13（SD295A）、橋脚1基あたりの上部構造重量を160kN（橋脚基部の応力=1MPa）、固有周期を1秒、地盤種別をII種と想定し、模型橋脚を小さな実橋脚と見なして、1996年道路橋示方書に従い、地震時保有耐力法で設計したものである¹⁾。このようにして定めた断面と鉄筋配置をそのままにして、今回の研究では、コンクリートを高強度コンクリート、軸方向鉄筋を高強度鉄筋に置き直した。高強度コンクリートや高強度鉄筋を見込んで、設計したわけではないため、後述するように、曲げ耐力とせん断耐力のバランスが崩れており、せん断破壊寸前までいったものもある。

コンクリートとしては、水セメント比を約24%とし、混和剤としてはシリカヒュームを用いた。スラ

ンプフローは600mmを目標とした。強度としては、90MPaを目標としたが、実際にはこれよりも多少低く、70~80MPaとなった。最大粒径20mmの粗骨材を用いた。

軸方向鉄筋としては、P-1では普通強度鉄筋を、また、P-2~P-5では高強度鉄筋を用いた。普通強度鉄筋としてはSD295A、高強度鉄筋としては新日本製鐵製のSD685を用いた。ミルシートによれば、SD685は破断強度828MPa、破断ひずみ16%を持つ。軸方向鉄筋径はいずれもD10であり、軸方向鉄筋比は1.6%である。これに対して、帯鉄筋としては、いずれの供試体にもD6(SD295A)を50mm間隔に配置した。道路橋示方書の定義に基づく帯鉄筋体積比 ρ_s は0.79%である。

くり返し載荷には、東京工業大学耐震実験施設の3台の動的アクチュエータを用いた。載荷履歴は図-2に示すとおりであり、1方向載荷の他、矩形、円形及び楕円形載荷とした¹⁾。載荷変位はドリフト0.5%（=6.75mm）を基準にし、その整数倍で順次変位を増加させていった。同一変位によるくり返しは3回とした。

3. 高強度鉄筋の特性

1方向載荷において、高強度鉄筋を用いた場合（P-2）の履歴特性を普通鉄筋を用いた場合（P-1）の履歴との比較で検討する。載荷に伴う損傷の進展は、図-3に示すとおりである。普通鉄筋を用いた場合には典型的な曲げ破壊先行型の損傷であり、曲げ水平クラックから、塑性ヒンジ区間におけるコンクリートの圧縮破壊に伴うかぶりおよびコアコンクリ

表-1 実験供試体と載荷方法

供試体	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5
軸方向鉄筋	普通	高強度			
コンクリート強度(MPa)	72.1	71.2	72.5	72.5	72.5
載荷方法	1方向載荷	矩形	円形	楕円	

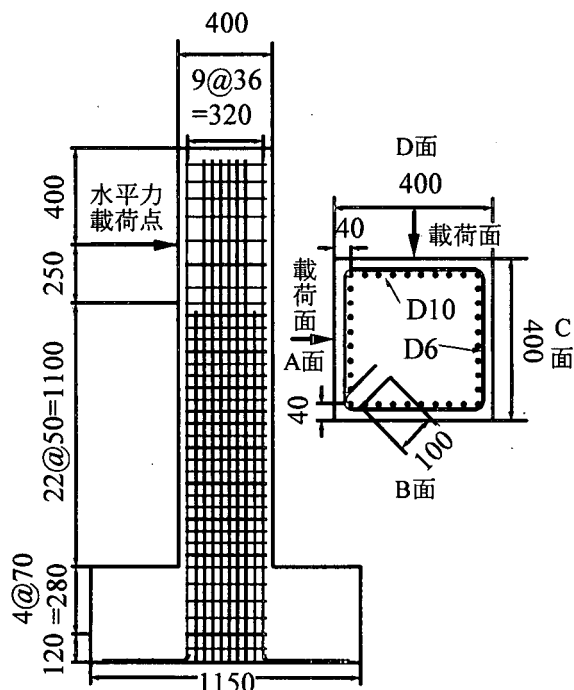


図-1 実験供試体

ートの剥離、剥落へと損傷が進んでいく。これに対して、高強度鉄筋を用いた場合には、普通鉄筋を用いた場合よりも、曲げ耐力が上がるため、ドリフト2%程度までは曲げ水平クラックしか生じないが、その後、載荷方向に平行な面においてせん断クラックが生じ始める。ドリフト3%になるとせん断クラックがかなり進み、せん断変形が目視できる程度になった。しかし、最終的には、P-2はせん断破壊せず、曲げ破壊した。

これを水平力～水平変位の履歴曲線で比較すると、図-4のようになる。また、表-2は最大曲げ耐力及び終局変位を示した結果である。ここで、終局変位とは、降伏後安定した曲げ耐力が20%程度以上低下し始める時のドリフトと定義している。これによれば、普通強度鉄筋を用いた場合には、1%ドリフトあたりで曲げ耐力は正負の平均値で189.7kNと安定し、その後、4.5%ドリフトから曲げ耐力が低下し始めるまで、ほぼ曲げ耐力は一定となる。これに対して、高強度鉄筋を用いた場合には、ドリフト1%程度ですでに上述した普通鉄筋を用いた場合の平均曲げ耐

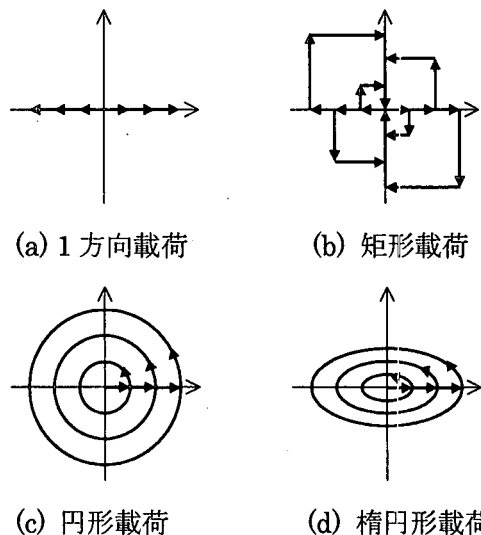


図-2 水平面内の載荷履歴

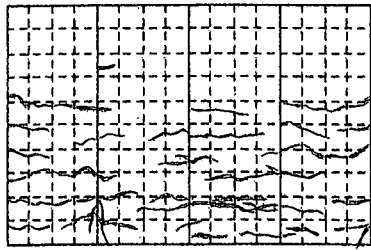
力189.7kNに達し、その後も載荷の進展とともに耐力は増加し続けて、ドリフト2%程度となって、正負の平均で338.3kNに達する。その後、5%ドリフトあたりから曲げ耐力は急速に低下し、終局状態に至る。終局変位は、高強度鉄筋を用いた場合には5%ドリフトと、普通強度鉄筋を用いた場合の4.5%ドリフトよりも大きい。

このような履歴特性の違いは、軸方向鉄筋の降伏強度の違いによるが、これを示した結果が、図-5である。これは、載荷方向に直行する面（A面）の中央に位置する軸方向鉄筋のひずみを、基部から25mm位置で計測した結果である。これによれば、普通鉄筋を使用した場合には、すでに1%ドリフトの段階で引張ひずみが2100 μ と降伏ひずみ（1800 μ ）を上回り、1.5%ドリフトになるとひずみは計測不能な大きな値になる。これに対して、高強度鉄筋を用いた場合には、ドリフト1%で降伏ひずみ1800 μ に達するが、その後も2.5%ドリフトまで安定したひずみを保っている。軸方向鉄筋の降伏後の履歴は橋脚の履歴に大きな影響を与えるため、図-4に示したように普通鉄筋と高強度鉄筋とで大きな履歴の違いをもたらしている。

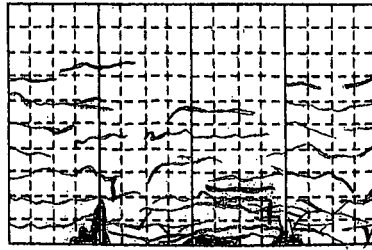
図-6及び図-7は、それぞれ等価剛性及び履歴吸収エネルギーで、P-1とp-2を比較した結果である。高強度鉄筋を用いた場合には、載荷変位が大きくなると軸方向鉄筋が降伏しないため、当然、普通鉄筋を用いた場合よりも、等価剛性は大きい。反対に、高強度鉄筋を用いた場合には普通鉄筋を用いた場合よりも塑性化が遅れるため、エネルギー吸収は普通鉄筋を用いた場合よりも高強度鉄筋を用いた場合の

表-2 最大耐力、終局変位に対する高強度鉄筋の効果

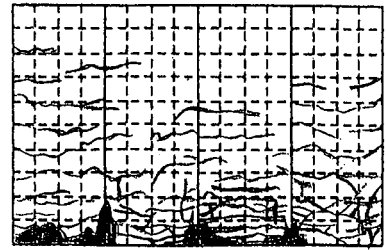
軸方向鉄筋	最大耐力(kN)			終局変位 (ドリフト)		
	+側	-側	平均	+側	-側	平均
普通強度	180.9	198.5	189.7	4.5	4.5	4.5
高強度	349.8	326.8	338.3	5.0	5.0	5.0



(a) ドリフト 2.0%

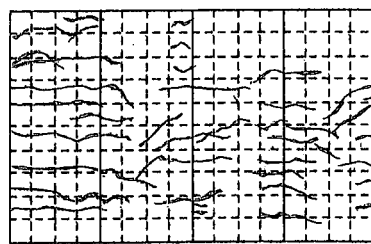


(b) ドリフト 3.0%

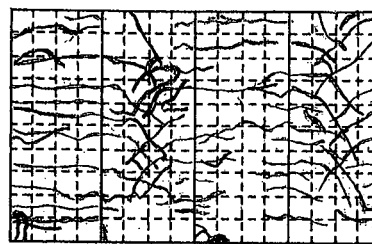


(c) ドリフト 4.0%

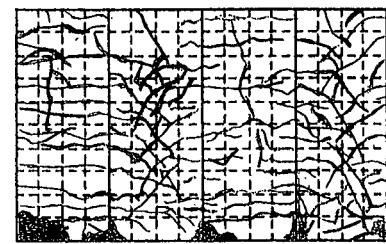
(1) 普通鉄筋 (P-1)



(a) ドリフト 2.0%



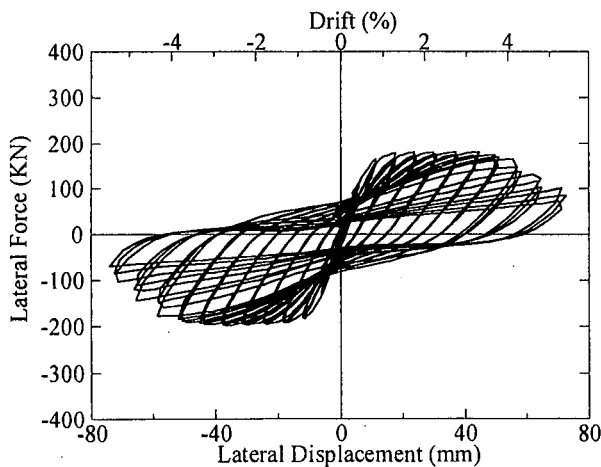
(b) ドリフト 3.0%



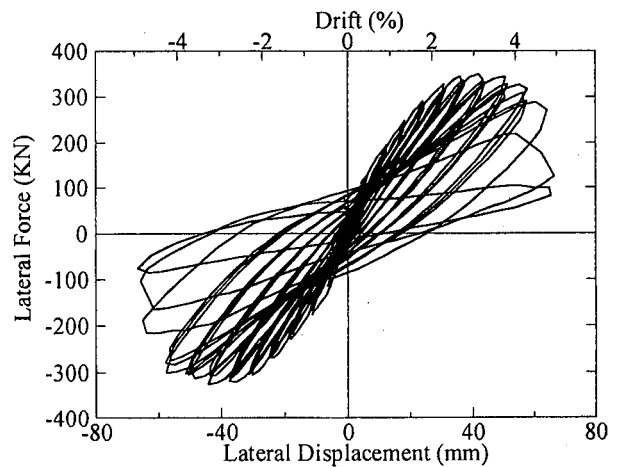
(c) ドリフト 4.0%

(2) 高強度鉄筋 (P-2)

図-3 高強度鉄筋と普通鉄筋の違いが損傷モードに与える影響

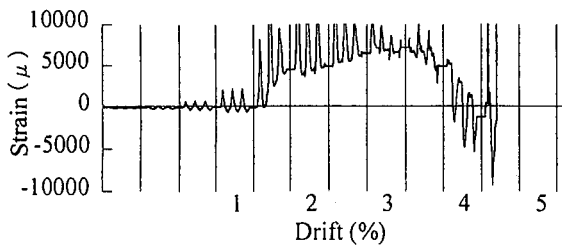


(a) 普通鉄筋 (P-1)

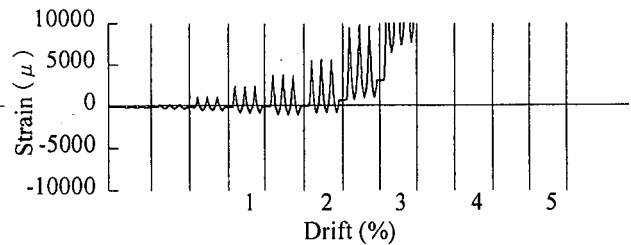


(b) 高強度鉄筋 (P-2)

図-4 高強度鉄筋と普通鉄筋の違いが履歴曲線に与える影響



(a) 普通鉄筋 (P-1)



(b) 高強度鉄筋 (P-2)

図-5 軸方向鉄筋に生じるひずみの履歴 (基部から 25mm 位置、A 面)

表-3 最大耐力、終局変位に対する載荷履歴の影響

載荷方法	最大耐力 (kN)						
	x 方向			y 方向			(1)、 (2) の 平均
	+側	-側	(1) 平均	+側	-側	(2) 平均	
1 方向	349.8	326.8	338.3	—	—	—	338.3
矩形	298.5	301.0	299.8	232.6	232.0	232.3	266.1
円形	314.9	292.4	303.7	256.3	252.1	254.2	279.0
楕円形	319.2	344.3	331.8	151.6	145.9	148.7	240.3

載荷方法	終局変位 (ドリフト)						
	x 方向			y 方向			(1)、 (2) の 平均
	+側	-側	(1) 平均	+側	-側	(2) 平均	
1 方向	5.0	5.0	5.0	—	—	—	5.0
矩形	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
円形	3.5	3.5	3.5	4.0	4.0	4.0	3.75
楕円形	4.0	4.0	4.0	4.5	4.5	4.5	4.25

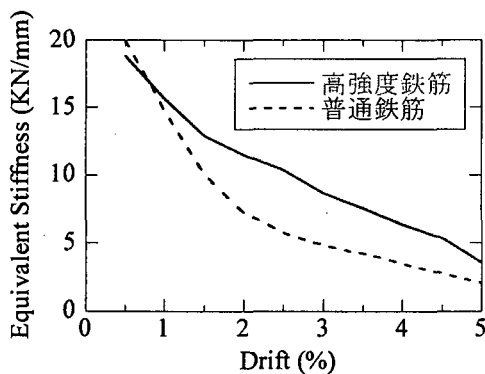


図-6 高強度鉄筋 (P2) と普通強度鉄筋 (P1) の違いが等価剛性に与える影響

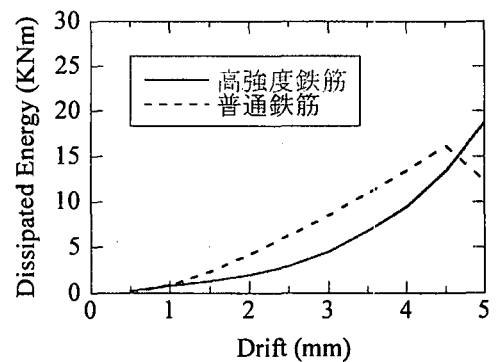


図-7 高強度鉄筋 (P2) と普通強度鉄筋 (P1) の違いが履歴吸収エネルギーに与える影響

方が小さくなる。

4. 載荷履歴の影響

1 方向載荷した場合に比較して、2 方向載荷した場合には、損傷が大きく、曲げ耐力、終局変位が小さくなることが知られている¹⁾。これが、高強度鉄筋を用いた場合にどのようなようになるかを示すと、図-8 のようになる。矩形載荷した場合には、基部から 400mm 程度の範囲で隅角部からかぶりコンクリートが剥落し始める。ドリフト 2% 程度になると、曲げ水平クラックだけではなく、斜めクラックも生じ始め、ドリフト 3% になると、かなり斜めクラックも発達する。しかし、1 方向載荷した場合と同様に、斜めクラックはこれ以上は発達せず、ドリフト 4% 程度になると圧縮破壊により、基部から 400mm 程度

の範囲のかぶりコンクリートはほぼ剥落し、最終的には曲げ破壊する。

円形載荷した場合にも、矩形載荷した場合と同様に、隅角部から損傷が進展し、ドリフト 3% になると、基部から 200mm 程度の範囲でかぶりコンクリートの剥落が生じる。ドリフト 4% になると、損傷はさらに進展し、基部から 500mm 程度の範囲までかぶりコンクリートは剥落し、コアコンクリートも損傷する。楕円載荷した場合には、円形載荷した場合と図-3 に示した 1 方向載荷した場合との中間的な損傷状況となる。

図-9 は履歴曲線によって、載荷履歴の影響を示した結果である。また、表-3 は最大曲げ耐力及び終局変位を示した結果である。矩形載荷した場合には、変位が 0 および最大となる箇所で曲げ耐力がほぼ垂

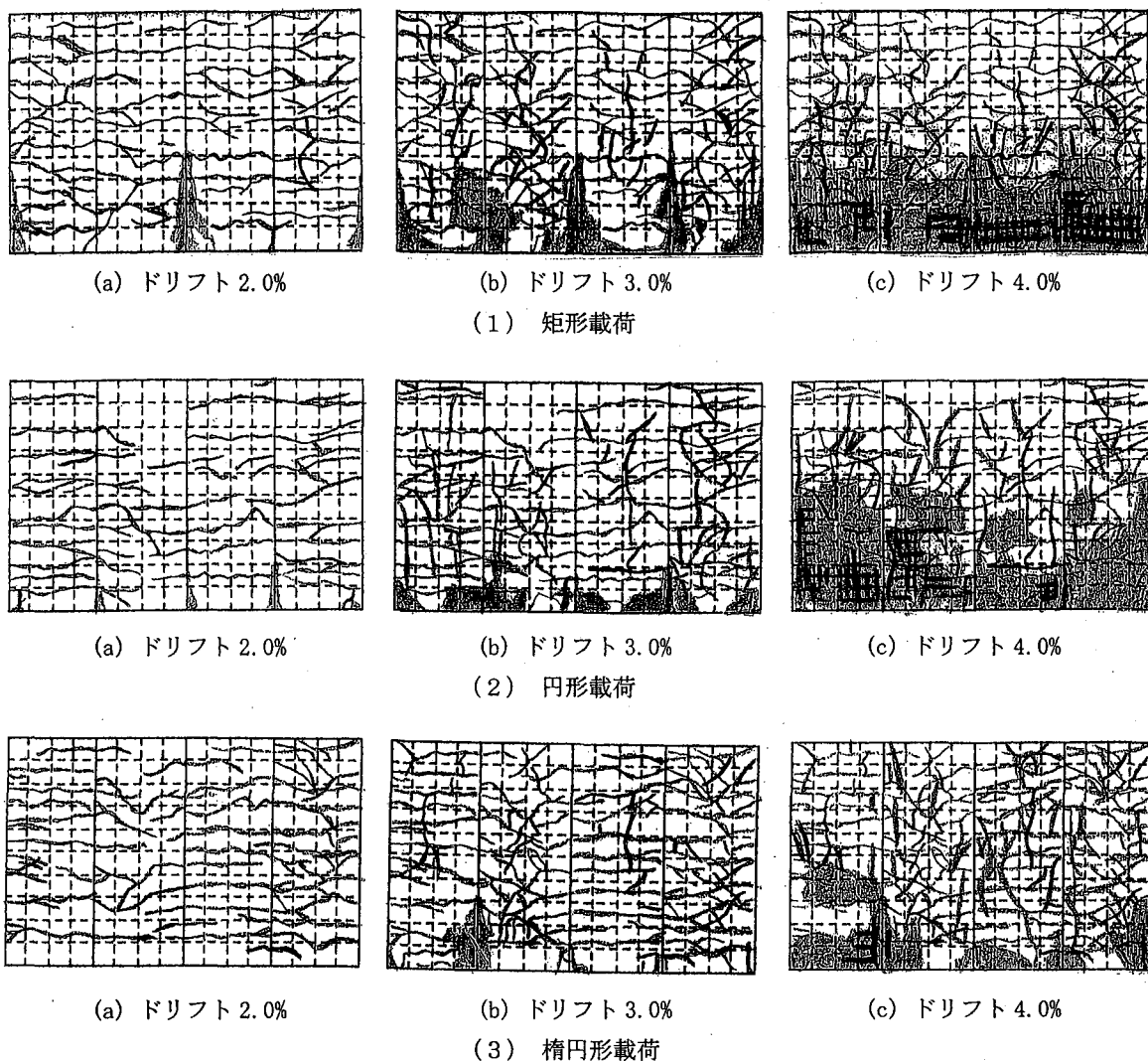


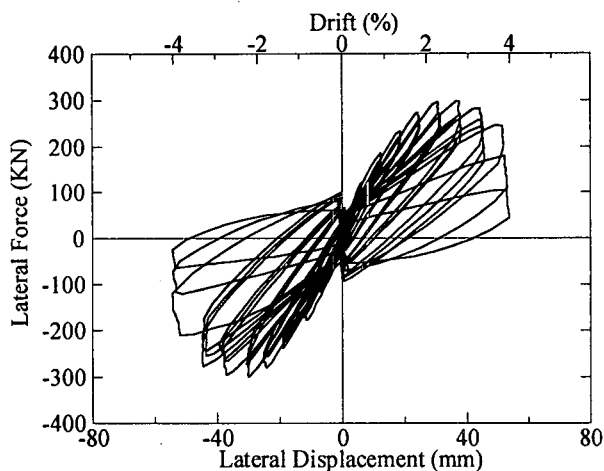
図-8 高強度鉄筋と普通鉄筋の違いが損傷モードに与える影響

直に低下し、結果として変位が0の付近でくびれ、最大変位の部分で角張った特異な履歴曲線となる。これは、ある方向の載荷変位を0に戻す過程で他方向の復元力が減少するため起こる現象であり、2方向載荷に伴う2方向間の復元力のインターアクションを表している¹⁾。矩形載荷した場合には、正側、負側の平均最大曲げ耐力を水平2方向でさらに平均すると266.1kNであり、これは上述した1方向載荷したP-2の平均最大曲げ耐力338.3kNの79%と小さくなっている。また、終局変位も、1方向載荷した場合には5%ドリフト程度であるのに対して、矩形載荷した場合には4%ドリフト程度と、80%程度に小さくなっている。

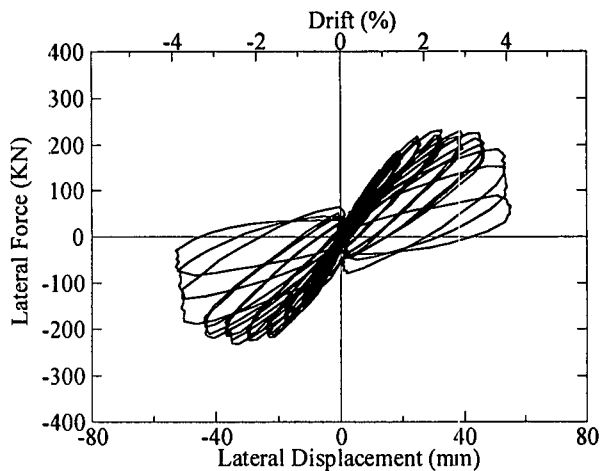
次に、円形載荷、楕円形載荷した場合には、ともに履歴曲線のコーナーが丸くなっているが、これは上述したある方向の載荷に伴う他方向の耐力低下が2方向の載荷変位のベクトル和が最大となる付近で連続的に起こるためである。円形載荷した場合には、正側、負側の平均曲げ耐力を水平2方向でさらに平

均すると279.0kNであり、これは水平1方向に載荷した場合の曲げ耐力(338.3kN)の82%に相当する。終局変位は3.75%ドリフトで、上述した矩形載荷した場合よりもさらに小さくなっている。楕円形載荷した場合には、載荷変位振幅が小さいy方向の耐力は上述した結果と直接の比較できないため、x方向の耐力に注目すると、正側、負側の平均曲げ耐力は331.8kNで、1方向載荷した場合(338.3kN)とほぼ同じである。したがって、2方向載荷しても、当該方向に比較して他方向の載荷変位振幅が50%と小さい場合には、当該方向の曲げ耐力に及ぼす他方向の載荷の影響は大きなものではない。ただし、終局変位は、x方向には4%ドリフト、y方向には4.5%ドリフトであり、2方向載荷の影響は無視できない。

5. 結論

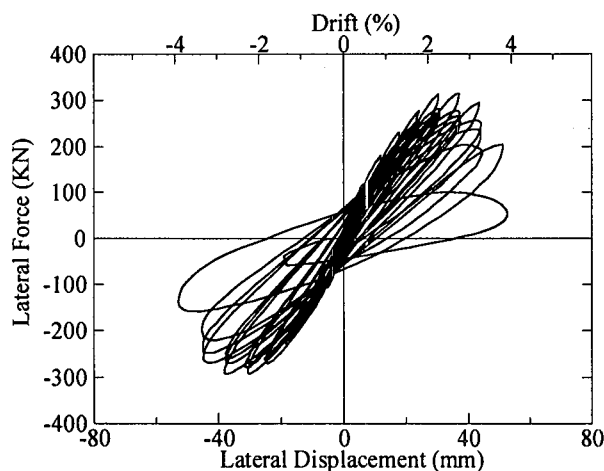


(a) x 方向

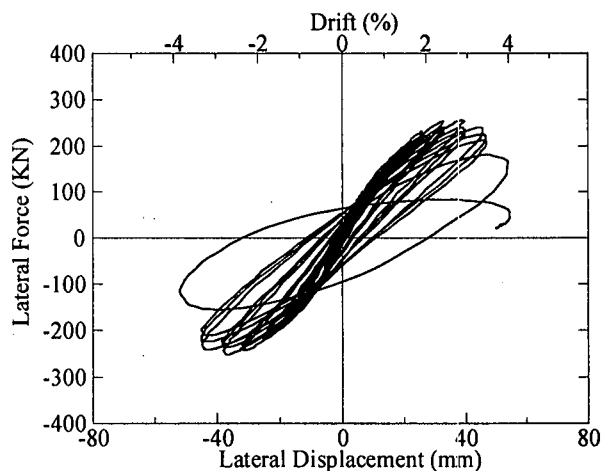


(b) y 方向

(1) 矩形載荷した場合の履歴曲線

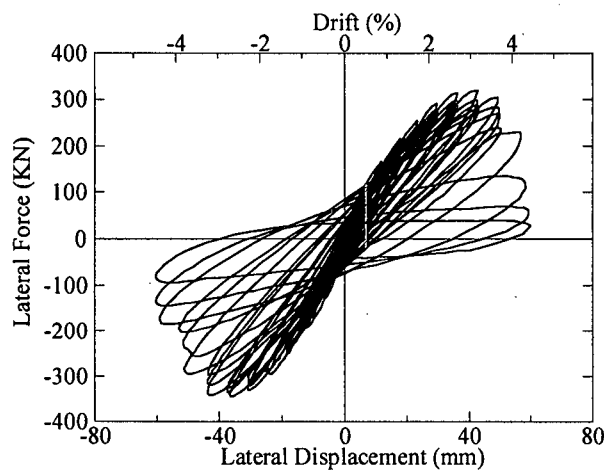


(a) x 方向

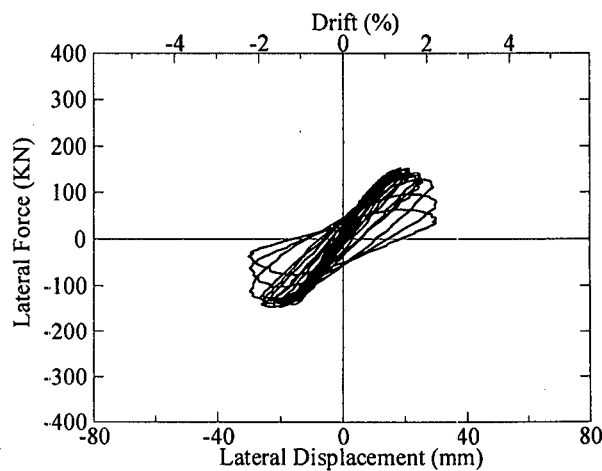


(b) y 方向

(2) 円形載荷した場合の履歴曲線



(a) x 方向



(b) y 方向

(3) 楕円形載荷した場合の履歴曲線

図-9 載荷履歴が履歴曲線に及ぼす影響

本研究では、高強度コンクリート及び高強度鉄筋を用いた場合のRC橋脚の耐震性をくり返し載荷実験に基づいて検討した。対象としたのは、同一断面、

同一配筋をし、軸方向鉄筋だけが普通鉄筋とした場合と高強度鉄筋とした場合の比較である。本研究で得られた結論は、以下の通りである。

1) 高強度鉄筋を軸方向筋として用いると、普通鉄筋よりも軸方向鉄筋が降伏する載荷変位が大きくなる結果、ドリフト2%程度まで橋脚の曲げ耐力は増加し続け、結果として、普通鉄筋を用いた場合の曲げ耐力の1.78倍となった。

2) この結果、普通鉄筋を用いた場合に比較して、橋脚が弾性的に変形できる範囲が増加する。終局変位も普通鉄筋を用いた場合に比較して0.5%ドリフト程度増加するが、結果的に降伏後の曲げ耐力がほぼ一定の値を持って安定する領域は短くなる。

3) 等価剛性は普通鉄筋を用いた場合よりも高くなる。しかし、普通鉄筋を用いた場合に比較して、軸方向鉄筋の降伏が遅れるため、エネルギー吸収は小さくなる。

4) 1方向載荷した場合に比較して、2方向載荷した場合には、最大曲げ耐力、終局変位ともに小さくなる。

謝辞：高強度コンクリートの製作に関しては中島商

事（有）、高強度鉄筋の入手に関しては新日本製鐵の川端規之氏にお世話になりました。また、本実験の実施に際しては、東京工業大学土木工学専攻川島研究室の下山田英介、永田聖二、松川亮平、中澤宣貴、中村剛、早川涼二、福田智之の各氏のご支援を得ました。本研究を実施するに際しては、（財）国土開発研究センターの研究助成を得ました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

1) 早川涼二、川島一彦、渡邊学歩：2方向地震力を受けるRC橋脚の耐震性に関する研究、第6回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム、土木学会、2003

2) 中澤宣貴、川島一彦：高強度コンクリートの横拘束モデルの開発、第6回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム、土木学会、2003