

## 4 ラーメン橋脚の耐震設計

### 4-1 はじめに

我が国でも従来から、宮城県沖地震による構造物の被災を契機としてラーメン構造物に関する多くの研究が実施されてきた（たとえば<sup>1)~3)</sup>）。ラーメン構造物は一本注形式の橋脚と比較して耐震性に優れていると考えられてきており、平成2年2月の道路橋示方書V耐震設計編<sup>4)</sup>には、鉄筋コンクリート（以下、RCと称す）橋脚の地震時保有水平耐力の照査として、大正12年関東大地震級の大規模地震に対する耐震設計法が示されていたが、規定には次のように解説されていた。「RC橋脚の中でも、以下のものは一般に十分な変形性能があり、地震時保有水平耐力の照査を省略してもよい。①壁式橋脚の橋軸直角方向、②不静定の橋脚、③橋脚躯体の高さが15mを越える橋脚。ここで、不静定の橋脚とは、ラーメン橋やラーメン橋脚を指し、面内および面外いずれの方向についても一般に地震時保有水平耐力の照査を省略してもよい。」

しかし、兵庫県南部地震において、RCラーメン橋脚にも被災を生じた例があったこと等から、平成2年の道路橋示方書に示されるような不静定な構造物であるという理由だけで大きな地震力を受けたときの動的耐力や変形性能を把握しないままで耐震設計を行う手法は合理的とは考えられなくなってきた。さらに、橋全体系の耐震性を考える場合には、基礎や支承の地震時保有水平耐力と橋脚の地震時保有水平耐力との大小関係を算出し、最終的にどの部材が損傷を受けるのかということ把握することは欠かすことができないこととなってきた。

これらの考えを背景にし、さらに諸外国の研究の状況を参考にして道路橋ラーメン橋脚の地震時保有水平耐力法による耐震設計法が、道路橋示方書V耐震設計編（平成8年）<sup>5)</sup>に取り入れられた。

本文は、主に道路橋ラーメン橋脚に着目して兵庫県南部地震での被災例、従来の道路橋RCラーメン橋脚の設計法の変遷、RCラーメン橋脚供試体を用いた繰返し載荷実験、そしてRCラーメン橋脚の地震時保有水平耐力法と実験結果との比較について述べる。

### 4-2 兵庫県南部地震での道路橋RCラーメン橋脚の被災

土木学会等によってまとめられた阪神・淡路大震災調査報告書<sup>6)</sup>によると、兵庫県南部地震において、阪神高速道路神戸線のRC橋脚の被害に関しては、RC橋脚全数で倒壊したものや損傷変形が著しく大きいものと判定される被災度Asランクの橋脚の割合が6.8%であったのに対して、ラーメン橋脚では2.5%であった。逆に、損傷がなかったり、あってもほとんど耐力に影響のない極めて軽微なものと判定される被災度Dランクの橋脚の割合はRC橋脚全体では50.4%であったのに対して、ラーメン橋脚では85.7%であった。このように、RCラーメン橋脚の被害の割合は、他の形式の橋脚に比較して際だって小さいことがわかっている。

このように被災した割合が極めて少なかったRCラーメン橋脚であるが、その中から主に面内方向の比較的大きな損傷を受けた2基を抽出し、写真4.1および写真4.2に示す。これらの橋脚はいずれも阪神高速3号神戸線にあり、気象庁震度階で7の激震地域に非常に近い神戸市の岩屋地区に位置している。

写真4. 1は神-346橋脚の被災状況である。本橋脚は支間長26mの単純鋼鉄桁を支持しており、支承構造は可動固定型の支承板支承である。上部構造および支承構造の被災度はいずれもC損傷と判定されているが、神-346橋脚自体は、B損傷の被災度と判定された。橋脚の損傷状況を見ると、左柱基部外側で地中深くまでかぶりコンクリートが剥離しており、右柱の隅角部直下でも大きくかぶりコンクリートが剥離していた。また、はりにもクラックの発生が見られた。いずれの損傷も主に帯鉄筋が少ないことによる変形性能の不足に伴う曲げせん断による損傷と考えることができる。

また、写真4. 2は神-348橋脚の柱に生じた面内方向のせん断破壊を示す。柱の帯鉄筋の量が不十分であることによるせん断耐力不足が主な原因であると推定できる。

これらの損傷を見ると、RCラーメン橋脚においても一本柱形式の橋脚と同様に破壊モードとしてせん断破壊を避けることにより曲げ破壊型に誘導し、その上で所定の変形性能を有する構造物を設計することが重要であることがわかる。



写真4. 1 P346橋脚の被災状況

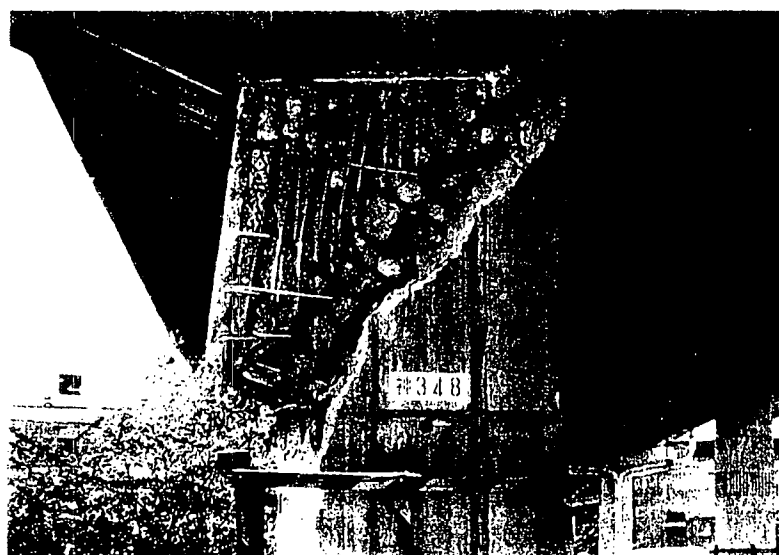


写真4. 2 P348橋脚の被災状況

#### 4-3 ラーメン橋脚の設計法の変遷

道路橋示方書V耐震設計編（平成2年）<sup>4)</sup>に一本注形式のRC橋脚に地震時保有水平耐力法が導入された際でも、RCラーメン橋脚の地震時保有水平耐力法は示されず、RCラーメン橋脚は震度法に基づいて耐震設計が行われてきた。

しかし、従来からRCラーメン橋脚に関しては配筋細目が規定されており、これを満足している場合は十分な耐震性を確保できるものとされてきた。以下にRCラーメン橋脚の配筋細目に関する規定の経緯を示す。

道路橋示方書VI下部構造編（昭和55年）<sup>7)</sup>には、ラーメン構造の最小鉄筋径は13mmとし、鉄筋間隔は300mm以下とし、かつ軸方向鉄筋の12倍以下、かつ柱の径もしくは短辺の1/2より小さくする規定があった。その後、道路橋示方書IV下部構造編（平成2年）<sup>4)</sup>には、適切な帯鉄筋比が推奨された。すなわち、引張主鉄筋比が0.5%以下の柱には0.15%の帯鉄筋比、引張主鉄筋比が0.5%から1.0%の柱には0.2%の帯鉄筋比、引張主鉄筋比が1.0%以上の柱には0.25%の帯鉄筋比が推奨された。また、道路橋示方書IIIコンクリート橋編（平成2年）<sup>4)</sup>には、図4.1に示すI区間、II区間、III区間、IV区間それぞれにおいて、帯鉄筋比を0.2%、0.2%、0.25%、0.15%とするのがよいものとされた。

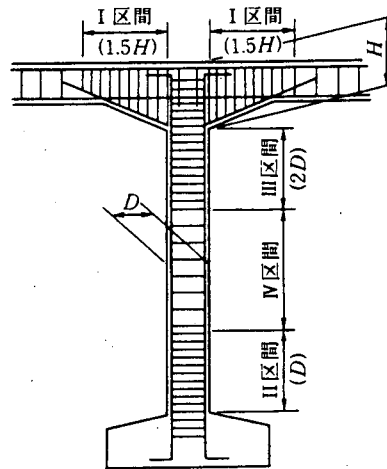


図4.1 道路橋示方書IIIコンクリート橋編（平成2年）に示された配筋細目

#### 4-4 ラーメン橋脚の繰返し載荷実験

建設省土木研究所では写真4.3に示すように、RCラーメン橋脚の模型供試体を横に寝かせた形でフーチングをRC製の治具を介して反力壁に固定し、RCラーメン橋脚の面内方向に水平力を載荷する手法でRCラーメン橋脚の繰返し載荷実験を行った<sup>8)</sup>。この実験では、図4.2に示すように、上部構造の死荷重に相当する軸力になるべくはりに均等に作用するように軸力載荷装置から剛性の高い治具を介してはりに軸力を作用させた状態で、反力壁に固定した動的加振機で正負交番で水平力を加えた。水平力は変位制御により作用させ、両柱基部の鉄筋のどちらかが降伏したときの水平変位 $\delta_y$ を基準として、その整数倍で3回ずつ順次変位を増大させていった。実験は表4.1に示す3つの供試体を使って実施された。

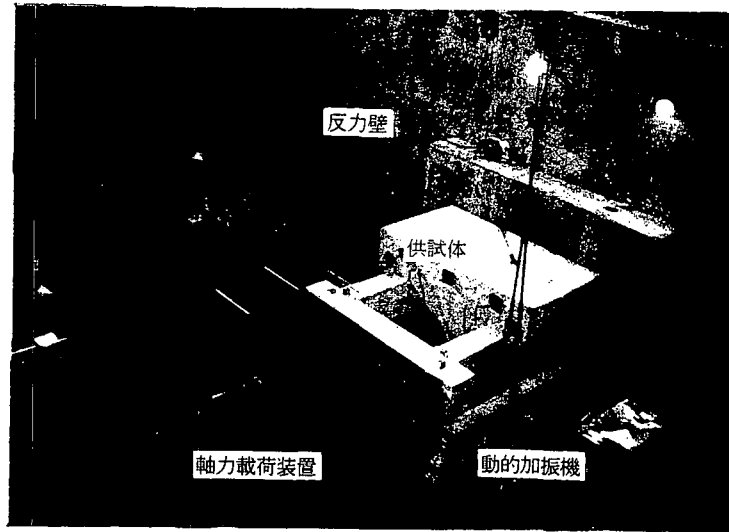


写真4. 3 RCラーメン橋脚模型供試体の実験状況

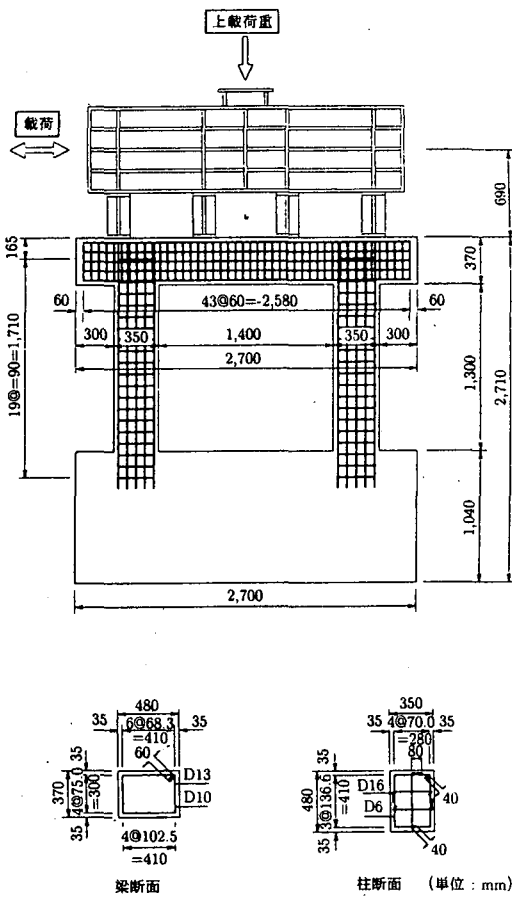


図4. 2 ケース1 供試体の配筋図と  
載荷荷重

表4. 1 実験供試体の諸元、断面、配筋

供試体	ケース1	ケース2	ケース3
柱基部からはり 天端の高さ	1.67m	1.67m	2.17m
柱断面	35×48cm	35×48cm	35×48cm
柱軸方向鉄筋	D16×14	D16×14	D16×14
柱帯鉄筋	D6@9cm	D6@9cm	D6@9cm
はり断面	37×48cm	37×48cm	37×48cm
はり軸方向鉄筋	D13×18	D16×17	D16×17
はり帯鉄筋	D10@6cm	D10@6cm	D10@6cm
鉄筋材質	SD295	SD295	SD295

3体の供試体においてかぶりコンクリートが剥離し始めた状態と最終的な損傷状態を図4. 3、図4. 4および図4. 5に示す。この図中のΠ型のラーメン橋脚のひびわれ状況図は載荷方向に平行な面の図であるが、かぶりコンクリートが剥離するのは一般に載荷方向に直交する面であるので、かぶりコンクリートが剥離するときでもその状況は明らかではない。ラーメン橋脚の内側に描かれている2本の柱が柱の内側の面であり、この面が載荷方向に直交する面であり、損傷が大きいことに注意する必要がある。

ケース1供試体は、3~4 $\delta y$ までは柱よりもはりにひびわれが多く生じた。しかし、5 $\delta y$ で柱下端部のかぶりコンクリートが剥離した後は、柱下端部のひびわれが進展し、はり両端部と柱下端部の損傷が広がった。柱下端部の軸方向鉄筋が破断し終局状態となったときでも柱上端部では大きな損傷は生じなかった。

ケース2供試体は、4 $\delta y$ で柱下端部のかぶりコンクリートが剥離するまでは、柱およびはりに一様にひびわれが生じた。柱下端部でかぶりコンクリートが剥離した後は、柱下端部だけでなく柱はり接点部そして柱上端部にもひびわれが生じた。ケース1供試体同様に、柱基部の軸方向鉄筋の破断により終局状態に達した。

ケース3供試体は、ケース2供試体同様4 $\delta y$ で柱下端部のかぶりコンクリートが剥離するまでは、柱とはりに一様にひびわれが生じた。それ以降は柱下端部および柱上端部でコンクリートの剥離が進展し、やはり柱下端部において軸方向鉄筋が破断して終局状態に達した。ケース2供試体に比較すると、柱上端部に大きい損傷が生じていることがわかる。

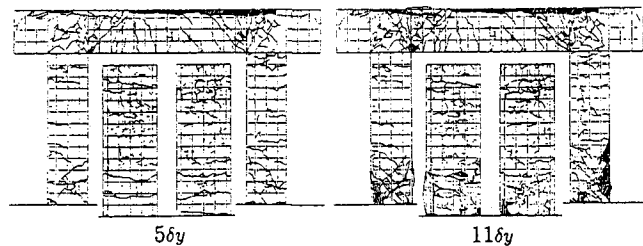


図4. 3 ケース1供試体の損傷状況図

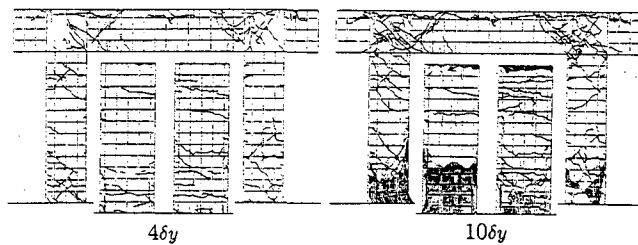


図4. 4 ケース2供試体の損傷状況図

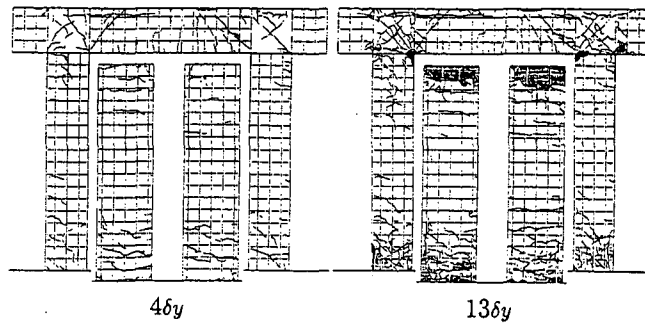


図4.5 ケース3 供試体の損傷状況図

水平荷重の載荷高さが同じケース1とケース2を比較すると、はりの配筋の違いによりケース1では柱上端部よりもはりに損傷が集中しているのに対して、ケース2でははりよりも柱上端部に損傷が生じている。また、配筋は同じであるが柱高さが違うケース2とケース3を比較すると、ケース3の方がより柱上端部に損傷が生じた。

ここで、道路橋示方書V耐震設計編（平成8年）<sup>9)</sup>に示される手法でRCラーメン橋脚供試体の水平荷重－水平変位曲線を算出し、実験の結果得られた水平荷重－水平変位曲線の包絡線と比較した一例が、図4.6である。

この供試体では、解析上複数箇所が生じる塑性ヒンジのうち1つ目の塑性ヒンジが終局状態に達する水平変位で水平荷重は最大となった。また、解析上4箇所が生じる塑性ヒンジが全て終局状態に達する水平変位では、水平荷重はやや低下しているものの、軸方向鉄筋の破断はこれより大きい水平変位で生じた。このような損傷の形態は本解析で想定している終局状態よりはやや安全側の状態ではあり、設計用の値としては合理的な値であると考えられる。

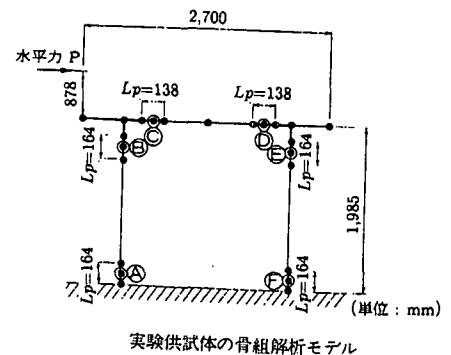
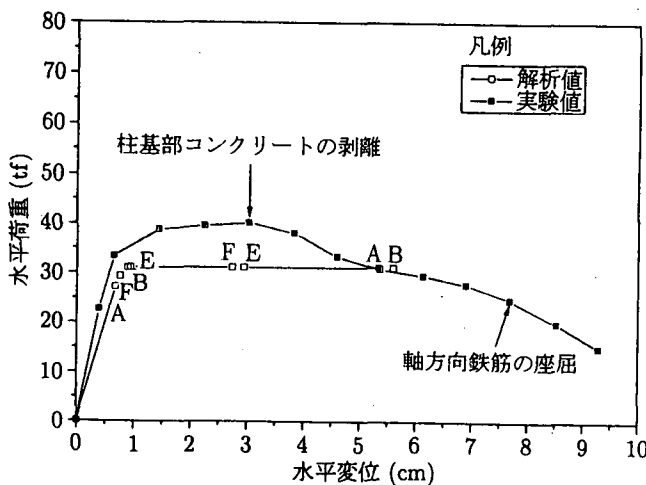


図4.6 ケース1 実験供試体の水平荷重－水平変位関係

#### 4-5 ラーメン橋脚のはり柱節点部

道路橋示方書V耐震設計編(平成8年)<sup>9)</sup>に基づいて、RCラーメン橋脚に地震時保有水平耐力法を適用して耐震性の判定を行う場合には、塑性化を想定している以外の箇所が塑性化することは望ましくない。たとえば、はり柱節点部については剛域と仮定して解析を行うが、はりや柱が塑性化する荷重より小さい荷重ではり柱節点部が塑性化することは、設計上想定していない箇所が塑性化することになり、また、はり柱節点部が塑性化すると一般にぜい性的な損傷に結びつきやすいため避ける必要がある。

しかし、繰返し荷重をうけたときのはり柱節点部の挙動に関しては未解明の部分が多く、土木構造物としてははり柱節点部の諸元や配筋から直接動的耐力や変形性能を算出できる設計手法はないのが現状である。たとえば、コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>では、ラーメン構造の構造細目として「柱とはりの節点部付近では、帯鉄筋またはスターラップを密に配置しなければならない」という規定があるのみで、具体的な設計法は規定されていない。これに対して、本講演会で紹介するように、1989年のロマプリータ地震や1994年のノースリッジ地震における橋脚のはり柱節点部の損傷を契機にして、米国のカリフォルニアを中心に研究が進められており、はり柱節点部の圧縮ストラットに期待する手法等いくつかの設計手法が提案されている。

はり柱節点部の動的耐力や変形性能を検討するために、建設省土木研究所では、図4.7に示すように、はり柱節点部の模型供試体を横に寝かせた形で、加振装置による繰返し載荷実験を行った<sup>10)</sup>。はりの端部は反力フレームにピンを介して固定され、柱の端部をピンを介して加振した。表4.2は実験ケースを示したものである。図4.8に一例としてG1供試体の配筋を示す。

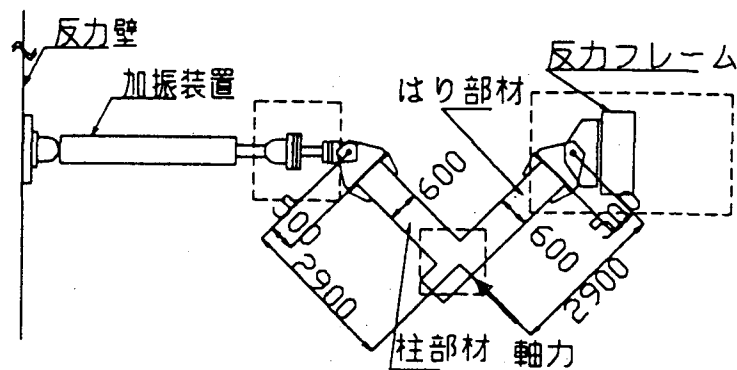


図4.7 実験状況

表 4. 2 実験ケース

実験供試体	はり		柱		備考
	軸方向鉄筋	横拘束筋	軸方向鉄筋	横拘束筋	
	(軸方向鉄筋比)	(横拘束筋の体積比)	(軸方向鉄筋比)	(横拘束筋の体積比)	
G1	D13×17本 0.60%	D6ctc250mm 0.24%	D13×16本 0.56%	D6ctc125mm 0.36%	柱に軸力導入
G2	D19×16本 1.27%	D6ctc150mm 0.47%	D19×20本 1.59%	D6ctc125mm 0.53%	
G3	D25×16本 2.25%	D10ctc250mm 0.62%	D25×20本 2.82%	D10ctc125mm 1.26%	

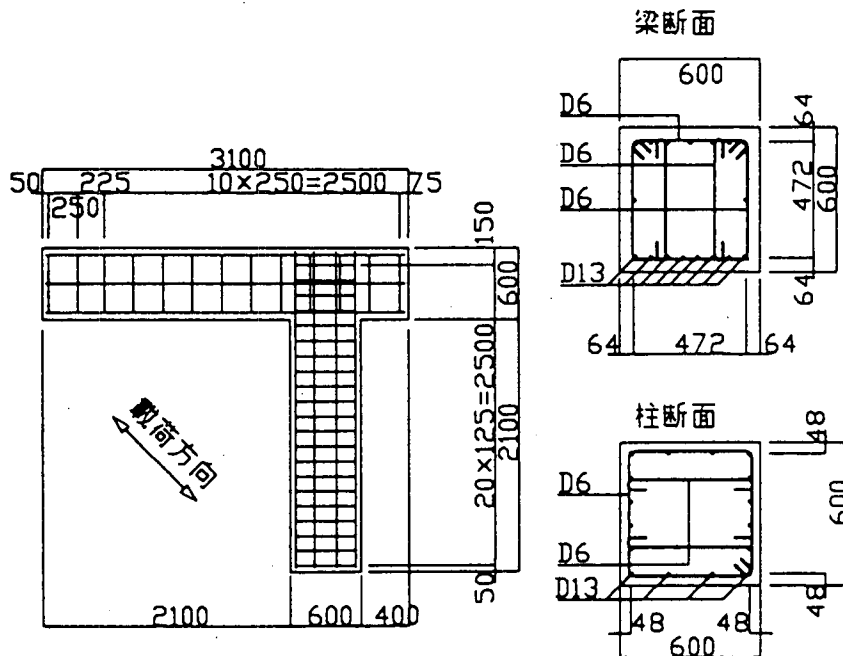
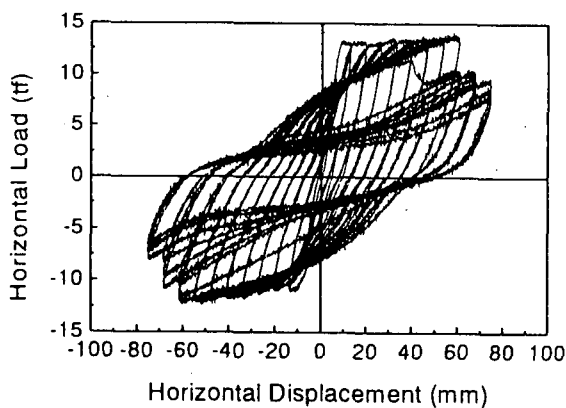


図 4. 8 G1供試体の配筋図

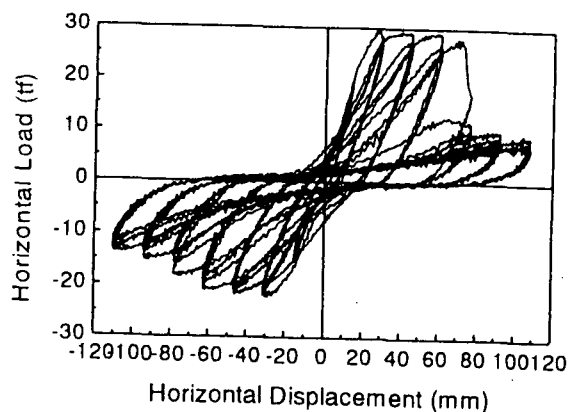
G1供試体は、加振する変位の増加とともにはりの付け根部に塑性ヒンジに相当する損傷が生じたが、はり柱節点部にはひびわれは生じなかった。これに対してG2供試体では、4δy載荷時にはり柱節点部にななめひびわれが発生し、さらにかぶりコンクリートのはらみ出しが始まった。5δy載荷時にさらにひびわれが進展し、大きく耐力が低下した。G3供試体では、2δy載荷時で、はり柱節点部にななめひびわれが発生し、3δy載荷時でこのひびわれが大きく進展し耐力が低下した。図4.9は各供試体の荷重-変位関係を示している。

3つの実験供試体を対象として、はり柱節点部に生じる引張主応力度とコンクリート標準示方書<sup>9)</sup>に基づきコンクリートの引張強度をそれぞれ算出した結果を表4.3に示す<sup>11)</sup>。G1供試体では、はり柱節点部に生じる引張主応力度がコンクリートの引張強度の30%であるのに対して、G2供試体では99%、G3供試体では177%となっている。G1供試体については、引張強度に対して作用する引張主応力度が十分に小さく、解析でははり柱節点部にひびわれが生じないことが予想された。実験の結果、はり柱節点部にひびわれは生じず、繰返し載荷実験の間ほぼ剛体として挙動し、これは解析結果と整合する結果となった。これに対して、G2供試体については、はり柱節点部に作用する引張主応力度がコンクリートの引張強度と概ね等しくなっており、解析ではひびわれが発生する領域と発生しない領域

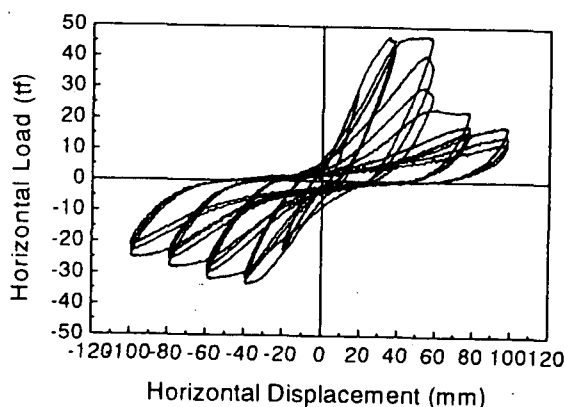




(1) G1 供試体



(2) G2 供試体



(3) G3 供試体

図 4. 9 各供試体の荷重-変位関係

表 4. 3 はり柱節点部の引張主応力度とコンクリートの引張強度の比較

実験供試体	引張主応力度	コンクリートの引張強度	pt/ftk
	pt(N/mm <sup>2</sup> )	ftk(N/mm <sup>2</sup> )	
G1	0.62	2.06	0.30
G2	2.22	2.25	0.99
G3	4.00	2.26	1.77

の境界にある供試体と考えられたが、実験の結果、はり柱節点部にはななめひびわれが発生し剛体としては挙動しなかった。また、はり柱節点部に一度ななめひびわれが発生すると、繰返し载荷に伴い急激に耐力が低下し、安定した変形性能は得られなかった。G3供試体については、解析の結果、はり柱節点部にひびわれが生じることが予想され、実験でもはり柱節点部にななめひびわれが発生し解析結果と整合した。また、G2供試体と同様に、はり柱節点部に一度ななめひびわれが発生すると急激に耐力が低下した。

これらの実験結果から、はり柱節点部に生じる引張主応力度がコンクリートの引張強度の30%と十分に小さい供試体では、はり柱節点部にはひびわれは生じず剛体として挙動し、損傷ははり部材に生じたが、はり柱節点部に生じる引張主応力度がコンクリートの引張強度の99%や177%となる供試体では、繰返し载荷に伴いはり柱節点部にななめひびわれが生じ、安定した変形性能は得られないことがわかった。また、この解析法はコンクリートの

ひびわれが生じる前のメカニズムを解析するものであるので、さらにははり柱節点部に十分な変形性能を期待するためには、構造細目等についての工夫が必要である。また、はり柱節点部に一般に設けられるハンチ部の評価法についても今後の課題と考える。

#### 4-6 今後の課題

本講演会で紹介される海外の研究や我が国の現状の研究成果等から、RCラーメン橋脚の耐震設計に関する今後の課題は以下のように挙げることができる。

- (1) はり柱節点部の動的耐力、変形性能の評価法
- (2) はり柱節点部のハンチの評価法
- (3) RCラーメン橋脚の各部材の変形性能と構造系全体の変形性能の関係

#### 4-7 参考文献

- 1) 鈴木基行, 武山泰, 菊池春海, 尾坂芳夫: 宮城県沖地震によるRCラーメン高架橋被害の解析的研究, 土木学会論文集, No. 384/V-7, pp. 43-52, 1987. 8
- 2) 石橋忠良, 吉野伸一: 鉄筋コンクリートラーメン構造物の耐震性に関する実験, 第5回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 221-224, 1983. 6
- 3) 町田篤彦, 睦好宏史, 鶴田和久: 地震力を受ける鉄筋コンクリートラーメン構造物の弾塑性応答に関する研究, 土木学会論文集, No. 378/V-6, 1987. 2
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書 I ~ V, 1990
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書 I ~ V, 1996
- 6) 土木学会, et al: 阪神・淡路大震災調査報告, 1996
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書 I ~ V, 1980
- 8) 寺山徹, 大塚久哲, 長屋和宏, 佐藤貴志, 田崎賢治: 地震時保有水平耐力法による鉄筋コンクリートラーメン橋脚の耐震設計, 土木技術資料Vol. 39, No. 2, 1997. 2
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書耐震設計編, 1996
- 10) 寺山徹, 運上茂樹, 佐藤貴志, 林田充弘: 鉄筋コンクリートラーメン橋脚のはり柱節点部の地震時挙動, 第25回地震工学発表会, 1997. 7
- 11) 寺山徹, 運上茂樹, 近藤益央: 鉄筋コンクリートラーメン橋脚のはり柱節点部の動的耐力と変形性能, 第1回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 1998. 1