

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

寺山 徹¹・運上 茂樹²・近藤 益央³

¹正会員 工修 建設省土木研究所 耐震研究室(〒305 つくば市旭1番地)

²正会員 工博 建設省土木研究所 耐震研究室(〒305 つくば市旭1番地)

³正会員 建設省土木研究所 耐震研究室(〒305 つくば市旭1番地)

1. まえがき

ラーメン形式(柱部材とはり部材より構成される骨組構造)の鉄筋コンクリート橋脚については、不静定な構造系であることから、従来大地震に対する耐震性評価法に関しては十分研究が行われてこなかった。しかし、平成7年1月に発生した兵庫県南部地震ではラーメン橋脚に損傷を生じた事例があり、こうした構造系についても動的耐力や変形性能の検討が必要となり、道路橋示方書・V耐震設計編¹⁾には、一本柱形式の地震時保有水平耐力法に準じる形で新たに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(以下RCラーメン橋脚と称す)の耐震設計法が規定された。

道路橋示方書・V耐震設計編に新たに規定されたRCラーメン橋脚の地震時保有水平耐力法では、図-1に示すように地震時に塑性化することを許容する箇所を塑性回転バネとしてはり両端部および柱上下端部に想定した骨組構造によりモデル化し、このモデルに対して静的非線形解析を実施して、耐震性を判定するものである。このようにして、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²⁾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、海外では、1989年のロムプリータ地震や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して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(たとえば³⁾)。

このような背景のもとで、本文では、RCラーメン橋脚のT型のはり柱節点部の動的耐力と変形性能を把握することを目的として、はり柱節点部を対象とした繰返し載荷実験結果を報告するものである。さらに、筆者らが提案したはりや柱が終局曲げモーメントに達したときにはり柱節点部に生じる引張主応力度を算出する解析手法⁴⁾と実験結果を比較考察するものである。

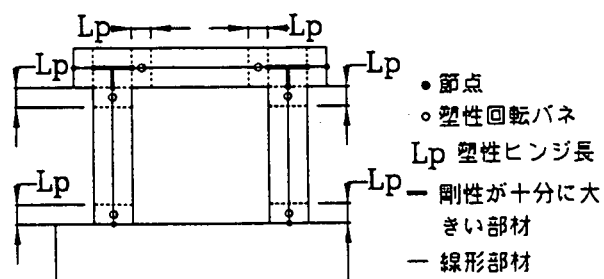


図-1 鉄筋コンクリートラーメン橋脚の骨組モデル

2. はり柱節点部の繰返し載荷実験

(1) 実験方法

図-2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を行った。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。柱およびはりともに節点部中心からピンまでの距離は2900mmである。載荷は変位制御で行い、はりと柱のどちらかの軸方向鉄筋が降伏したときの変位 δy を基準として、その整数倍で3回ずつ加振し順次変位を増大させていった。

表-1は実験ケースを示したものである。G1供試体は柱およびはりともに断面は600mm×600mmであり、節点部のつけねから2100mmの高さをもつ。はりの軸方向鉄筋はD13×17本であり、軸方向鉄筋比は0.60%である。帯鉄筋としては、D6を125mmピッチで配筋し、断面内には2本の中間帯鉄筋を配筋した。この結果、断面の横拘束筋の体積比は0.24%となった。柱には軸方向鉄筋としてD13を16本配筋しており、軸方向鉄筋比は0.56%である。帯鉄筋はD6を125mmピッチで配筋し、断面内には2本の中間帯鉄筋を配筋した。この結果、断面の横拘束筋の体積比は0.36%となった。また、G1供試体の柱にだけはPC鋼棒により54tfの軸力を導入した。これは応力度として15kg/cm²に相当する。

G2供試体のはり柱断面はG1供試体と同じであるが、はりの軸方向鉄筋としてはD19を16本配置し、軸方向鉄筋比は1.27%となった。帯鉄筋としては、D6を150mmピッチで配筋し、断面内には2本の中間帯鉄筋を配筋した。この結果、断面の横拘束筋の体積比は0.47%となった。柱には軸方向鉄筋としてD19を20本配筋しており、軸方向鉄筋比は1.59%である。帯鉄筋はD6を125mmピッチで配筋し、断面内には2本の中間帯鉄筋を配筋した。この結果、断面の横拘束筋の体積比は0.62%となった。柱には軸方向鉄筋としてD25を20本配筋しており、軸方向鉄筋比は2.82%である。帯鉄筋はD10を125mmピッチで配筋し、断面内には2本の中間帯鉄筋を配筋した。この結果、断面の横拘束筋の体積比は1.26%となった。

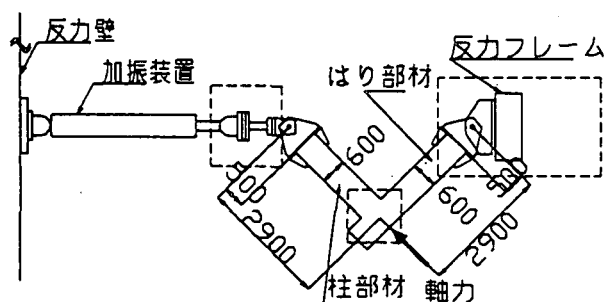


図-2 実験状況図

表-1 実験ケース

実験供試体	はり		柱		備考
	軸方向鉄筋 (軸方向鉄筋比)	横拘束筋 (横拘束筋の本数比)	軸方向鉄筋 (軸方向鉄筋比)	横拘束筋 (横拘束筋の本数比)	
G1	D13×17本 0.60%	D6ctc125mm 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%	

表-2 材料強度

実験供試体	コンクリートの圧縮強度 kgf/cm ²	鉄筋の降伏強度 kgf/cm ²	
		軸方向鉄筋	横拘束筋
G1	274	3762	3620
G2	312	3696	3446
G3	314	3909	3738

間帯鉄筋を配筋した。この結果、断面の横拘束筋の体積比は0.53%となった。

G3供試体のはり柱断面はG1およびG2供試体と同じである。はりの軸方向鉄筋としてはD25を16本配置し、軸方向鉄筋比は2.25%となった。帯鉄筋としてはD10を250mmピッチで配筋し、断面内には2本の中間帯鉄筋を配筋した。この結果、断面の横拘束筋の体積比は0.62%となった。柱には軸方向鉄筋としてD25を20本配筋しており、軸方向鉄筋比は2.82%である。帯鉄筋はD10を125mmピッチで配筋し、断面内には2本の中間帯鉄筋を配筋した。この結果、断面の横拘束筋の体積比は1.26%となった。

図-3に一例としてG1供試体の配筋を示す。

また、各供試体の実験当日のコンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏強度を表-2に示す。

(2) 実験結果

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ず、最終的には9

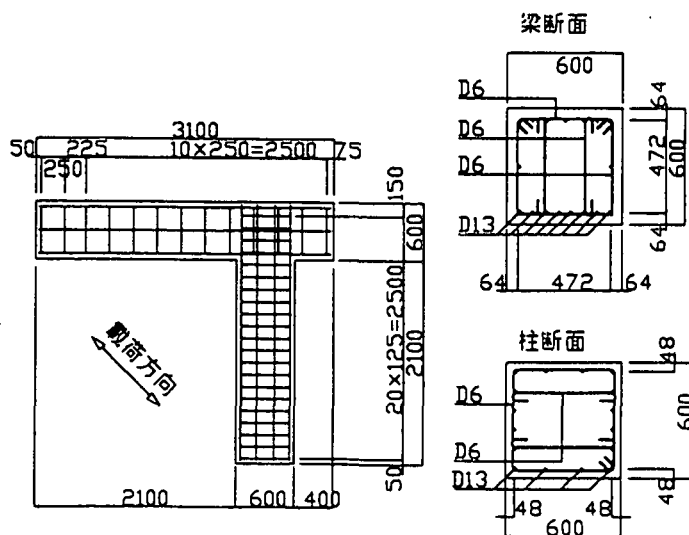
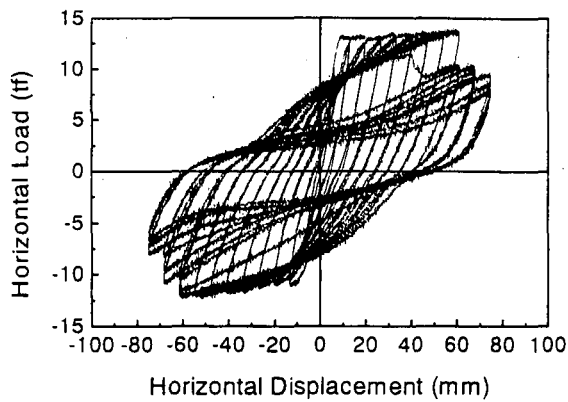
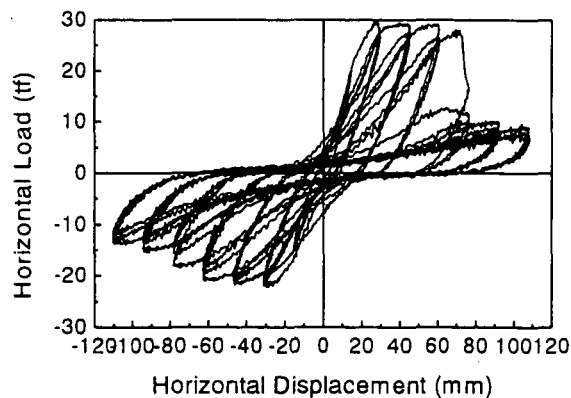


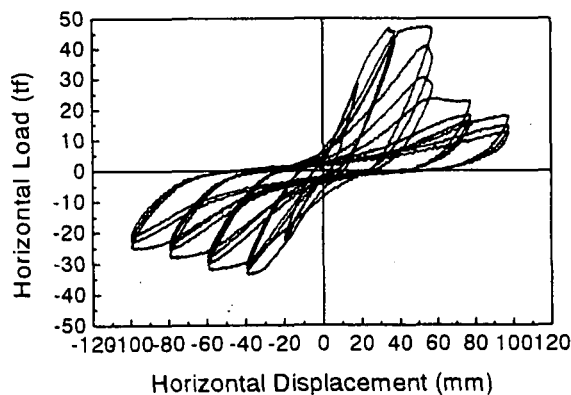
図-3 実験供試体 (G1供試体)



(1) G1 供試体



(2) G2 供試体



(3) G3 供試体

図-4 荷重-変位履歴曲線

δy 載荷時に、はり付け根部のかぶりコンクリートが剥落しその部分の軸方向鉄筋が座屈することにより耐力の低下が見られた。これに対してG2供試体では、 $4\delta y$ 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。 $5\delta y$ 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、 $2\delta y$ 載荷時ではり柱節点部にななめひびわれが発生し、 $3\delta y$ 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は各供試体の荷重-変位関係を示している。ここで示している荷重と変位はそれぞれ図-2に示した加振装置が加振する方向の荷重と変位であ

る。図-4によると、G1供試体が $8\delta y$ まで安定した履歴曲線を有しているのに対して、G2供試体は $5\delta y$ で、G3供試体は $3\delta y$ で大きく耐力が低下しているのがわかる。

3. 解析手法

R C ラーメン橋脚の動的耐力や変形性能を算出する場合のT型のはり柱節点部を対象として、引張主応力度とコンクリートの引張強度を比較する。T型の節点部の力のつりあいは、図-5のように考える。ここでは、はりが終局曲げモーメントに達したときの力のつり合いからはり柱節点部に生じる引張主応力度を算出する例を示すが、柱が終局曲げモーメントに達する場合も同様にして算出できる。はり柱節点部のせん断力 V_{jh} は(1)式により求められる。

$$V_{jh} = Tr + Cl \quad (1)$$

一般に、R C ラーメン橋脚では Cl は 0 となり、 V_{jh} は式(2)のようにして算出される。

$$V_{jh} = Tr = Mur / hb \quad (2)$$

ここに、 hb ははりの有効高さ、 Mur ははりの終局曲げモーメントである。はりには側面の軸方向鉄筋が配筋されていることが多いが、ここでは簡単のために側方鉄筋を含めたすべての鉄筋を考慮して終局曲げモーメント Mur を算出し、それをはりの有効高さで除することにより Tr を算出することとした。また、水平方向のせん断応力度 v_j は

$$v_j = V_{jh} / (bj \times hc) \quad (3)$$

となる。ここに、 bj は節点部の奥行長さ、 hc は柱の断面高さである。また、節点部の鉛直方向の応力度 f_v は

$$f_v = Paxial / (bj \times hc) \quad (4)$$

として求められる。ここに $Paxial$ は、慣性力による軸力の変動の影響を考慮に入れた柱に作用する軸圧縮力とする。したがって、節点部における引張主応力度 p_t は図-6に示すモールの円による解法により

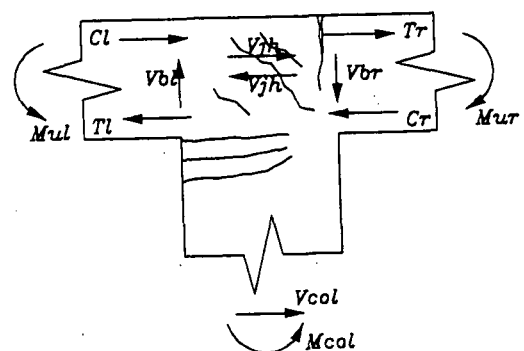


図-5 はり柱節点部での力のつりあい

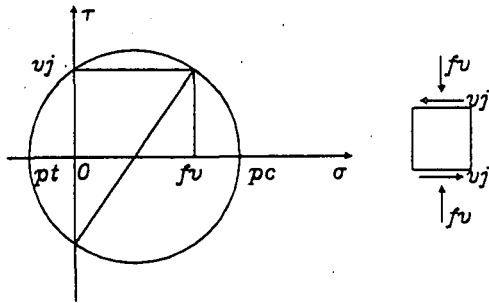


図-6 モールの円

(5)式によって算出される。

$$pt = \frac{fv}{2} - \sqrt{\left(\frac{fv}{2}\right)^2 + vj^2} \quad (5)$$

この引張主応力度 pt が、コンクリートの引張強度より小さければコンクリートにひびわれは生じず、節点部が剛域として挙動することを期待できることになる。

4. 実験結果と解析との比較

3つの実験供試体を対象として、提案した解析手法に基づきはり柱節点部に生じる引張主応力度を、コンクリート標準示方書²⁾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-3に示す。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、繰返し載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。

表-3 実験供試体の解析結果

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 ²)	ftk(N/mm ²)	
G1	0.62	2.06	0.30
G2	2.22	2.25	0.99
G3	4.00	2.26	1.77

5. 結論

本研究の結果および今後の課題は以下のようにまとめられる。

(1) R C ラーメン橋脚のはり柱節点部を剛域として仮定することが可能な解析手法として、はり柱節点部に生じる引張主応力度とコンクリートの引張強度を比較する手法を提案した。

(2) R C ラーメン橋脚のはり柱節点部の模型供試体に対して繰返し載荷実験を行った結果、(1)の手法に基づき算出した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。この結果、安定した変形性能が得られた。

(3) (1)の手法に基づき算出した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、繰返し載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かった。

(4) 提案した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。はり柱節点部にひびわれが生じた後においても、配筋されている鉄筋にせん断力を負担させることによって、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と考える。

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。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編、1996年12月
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編、1996年制定
- 3) M. J. N. Priestley, F. Seible, G. M. Calvi: Seismic Design and Retrofit of Bridges, 1996
- 4) 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年7月