

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

寺山 徹¹・運上 茂樹²・佐藤 貴志³

・林田 充弘⁴

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 中部地方建設局沼津工事事務所 (〒410 沼津市下香貫外原3244-2)

⁴正会員 阪神高速道路公団 保全施設部保全技術課 (〒541 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

鉄筋コンクリートラーメン橋脚の面内方向の地震時挙動を解析する場合、地震時に塑性化する箇所としては、はり両端部および柱上下端部に想定した骨組モデルにより解析する手法が一般に用いられる。この手法を適用するためには、塑性化することを想定していないはり柱節点部が塑性化することは望ましくない。本研究では、はりや柱が終局曲げモーメントに達した状態で、はり柱節点部に生じる引張主応力度をコンクリートの引張強度と比較する解析手法を提案するものである。さらに、はり柱節点部の縮尺模型供試体を対象として行った正負繰返し載荷実験結果と解析結果を比較することにより、解析手法の妥当性を考察するものである。

Key Words : Seismic Performance, Reinforced Concrete, T-Joint, Multi-Column Bent, Cyclic Loading Test

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た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する。このモデルに対して静的非線形解析を実施して、RCラーメン橋脚の終局水平耐力および許容塑性率を算出することにより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、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より、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

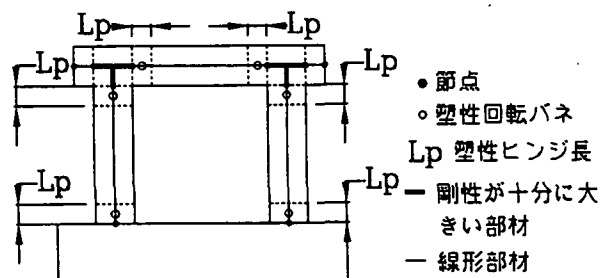


図-1 鉄筋コンクリートラーメン橋脚の骨組モデル

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、建築分野では、はり柱節点部に関して多くの研究成果があり、たとえば鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)・同解説³⁾においては、柱梁接合部の力のつりあいを考慮した上で実験結果による経験則に基づく接合部のせん断強度を規定する設計手法が示されている。海外では、1989年のロサンゼルス地震や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⁴⁾)。

このような背景のもとで、本研究では、RCラーメン橋脚のT型のはり柱節点部を剛域と仮定できるには、どのような条件が必要なのかという点を把握することを目的として、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を提案する。また、任意に抽出したRCラーメン橋脚について本解析手法を適用し、既設のはり柱節点部の特性について検討する。さらに、はり柱節点部を対象とした繰返し載荷実験結果を行い、解析手法の妥当性を検証した結果を報告するものである。

2. 解析手法の提案

RC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-2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、RC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

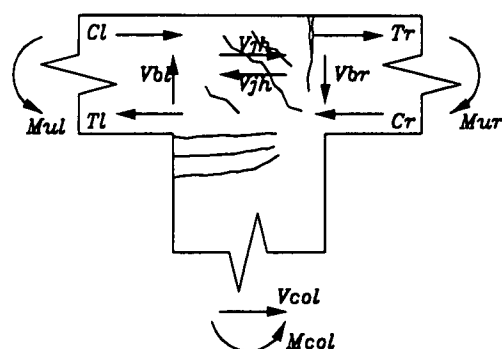


図-2 はり柱節点部での力のつりあい

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

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

となる。ここに、 b_j 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

$$f_v = P_{axial} / (b_j \times hc) \quad (4)$$

として求められる。ここに P_{axial} 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-3に示すモールの円による解法により(5)式によって算出される。

$$p_t = \frac{f_v}{2} - \sqrt{\left(\frac{f_v}{2}\right)^2 + v_j^2} \quad (5)$$

この引張主応力度 p_t 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。

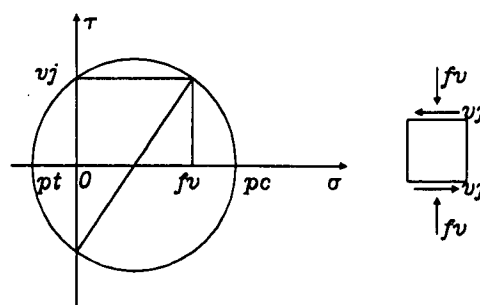


図-3 モールの円

3. 既設橋脚への適用

既設のRCラーメン橋脚を任意に抽出し、39カ所のT型のはり柱節点部について、解析を行った結果を図-4に示す。図の縦軸は $p_t / f_{ck}^{2/3}$ を示し、横軸

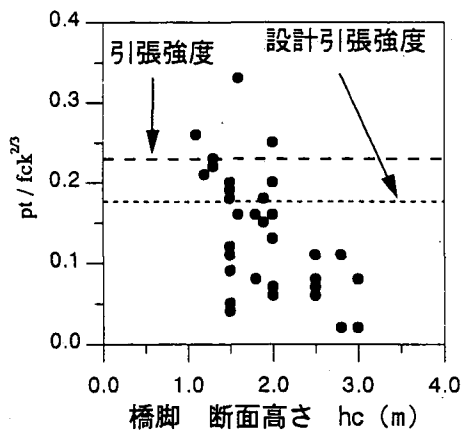


図-4 既設橋脚での解析結果

は各節点部の柱部材の断面高さを示している。コンクリート標準示方書²⁾ではコンクリートの引張強度 f_{tk} として $f_{tk}=0.23f_{ck}^{2/3}$ という式が与えられているので、はり柱節点部に生じる引張主応力度を評価するために、縦軸は $pt/f_{ck}^{2/3}$ とした。各節点部において縦軸の値が 0.23 より大きい場合は、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を越えていることになる。また、コンクリートの材料係数として 1.3 という値が与えられているので、各節点部において縦軸の値が $0.23/1.3=0.177$ を越えている場合は、節点部に生じている主引張応力度が設計引張強度を越えていることになる。

図-4 からわかるように、3ヶ所をのぞいた 36ヶ所のはり柱節点部で、引張主応力度は引張強度を下回っており、その中でも 28カ所のはり柱節点部で設計引張強度を下回っている。これは、震度法で設計された既設の RC ラーメン橋脚の大半は、はりや柱部材の一部が塑性域に達するような大地震が生じた場合でもはり柱節点部は剛体として挙動することが期待できることを表している。

これに対して、引張主応力度が設計引張強度を上回っているのは、橋脚の断面高さが 2.0m 以下の場合にかぎられており、橋脚断面を絞った設計を行った場合に隅角部に生じる引張主応力度が大きくなる場合があることがわかる。

本解析手法では、はり柱節点部に生じる引張主応力度をコンクリートの引張強度と比較しているの、あくまでもコンクリートにひびわれを生じる以前の段階で評価している。図-4 において引張強度を上回っているはり柱節点部においても、ひびわれが生じた後は、はり柱節点部に配筋されている鉄筋がせん断力を負担することが予想されるが、そのような状態での解析法についてはトラス理論の適用等を含めて今後の検討課題と考える。

4. はり柱節点部の繰返し載荷実験

(1) 実験方法

図-5 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 δ_y 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。

図-6 には、供試体の図を示す。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。柱の軸方向鉄筋は D13 × 16 本であり、軸方向鉄筋比は 0.56% 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 0.56% となる。また、柱には PC 鋼棒により 54tf の軸力を導入した。これ

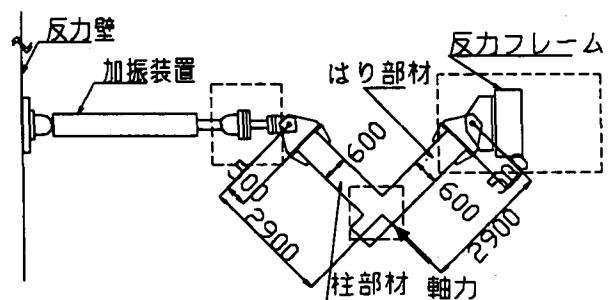


図-5 実験状況図

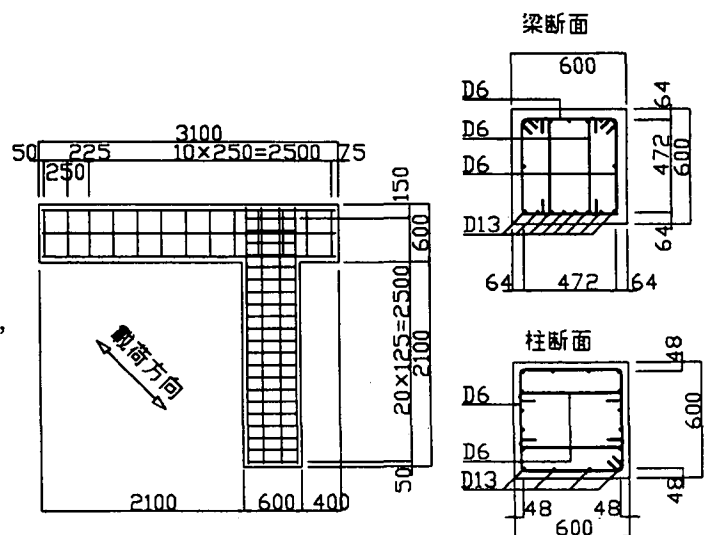


図-6 実験供試体

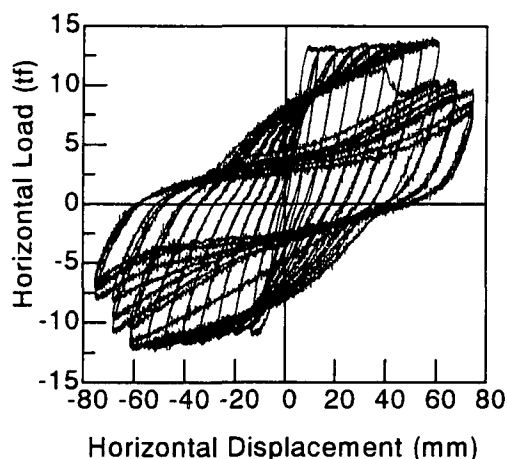


図-7 荷重-変位履歴曲線

は応力度として 15kg/cm^2 に相当する。はりには軸方向鉄筋として $D13 \times 17$ 本配筋しており、軸方向鉄筋比は 0.60% である。帯鉄筋は $D6$ 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 0.24% となる。

(2) 実験結果

図-7 に荷重-変位の履歴曲線を示す。本図中での荷重および変位の方法はともに加振装置方向の荷重と変位であり、正の向きがはり柱節点部に対して閉じる方向のモーメントを与える向きであり、負の向きが開く方向のモーメントを与える向きである。供試体では、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。正の向きでは最大荷重が約 13tf であり、負の向きでは約 12tf であった。この差は、加振装置による荷重がはりの付け根の塑性ヒンジ部に対して、正の向きでは圧縮方向の軸力として作用するのに対して、負の向きでは引張方向の軸力として作用するため、終局曲げモーメントが正の向きの方が負の向きよりも大きくなるためである。

また、はり柱節点部に関しては、ひびわれは生じず、剛体として挙動したと考えられる。このようにはり柱節点部が剛体として挙動し、期待しているとおりはりもしくは柱に塑性ヒンジが形成されると、構造物はじん性に富み、図-7 のようなエネルギー吸収性能のある履歴曲線が得られる。

(3) 解析結果

本供試体を対象として、引張主応力度を計算すると、閉じる方向のモーメントに対しては 4.3kg/cm^2 、開く方向のモーメントに対しては 4.1kg/cm^2 となった。図-4 の縦軸に相当する $pt/fck^{2/3}$ を算出すると、両者とも約 0.05 という値となる。したがって、解析

上でもはり柱節点部にはひびわれは生じず、剛体として挙動することが予想される。(2)で述べたように実験においてははり柱節点部にはひびわれは生じず、本解析手法により実験結果は説明できることがわかった。

5. 結論

本研究の結果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、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) 提案した手法により既設の R C ラーメン橋脚を照査すると、柱断面をしぼっていない橋脚では、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以下となっていることが確認された。これに対して、柱断面をしぼっている橋脚では、引張主応力度がコンクリートの引張強度を上回る場合がある。
- (3) 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り返し載荷実験を行った結果、損傷ははり部材に生じ、はり柱節点部にはひびわれは生じなかった。この模型供試体を対象として提案した解析手法により引張主応力度を算出すると、コンクリートの引張強度より小さくなり、解析によってもはり柱節点部にはひびわれが生じない結果となり、実験結果を説明できた。
- (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り、ひびわれが生じた後は、はり柱節点部に配筋されている鉄筋がせん断力を負担することが予想されるが、そのような状態での解析法についてはトラス理論の適用等を含めて今後の検討課題と考える。

なお、本研究は(社)日本道路協会橋梁委員会震災対策特別分科会補強 WG における活動の一部として行われた。

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) 日本建築学会：R C 建造物の終局強度型耐震設計指針(案)・同解説，1988
- 4) M. J. N. Priestley, F. Seible, G. M. Calvi: Seismic Design and Retrofit of Bridges, 1996