

論文 中層はりの質量が RC 2 層ラーメン高架橋の地震応答に与える影響

小林 薫^{*1}

要旨：2層ラーメン高架橋の地震応答特性は、中層はりの力学的特性によって影響を受けることが既往の研究において指摘されている。本研究は、2層ラーメン高架橋の中層はりの力学特性とともに中層はりの質量効果にも着目し、柱部材の軸方向力の変動を考慮した部材レベルの静的および動的弾塑性解析から検討を行った。その結果、静的弾塑性解析からは中層はりがせん断降伏すると構造系の耐荷特性が下り勾配域になること、動的弾塑性解析から、中層はりが負担する曲げモーメントが低下する、あるいは全く負担しない場合では柱部材の応答塑性率が大きくなることを明らかにした。

キーワード：2層ラーメン、弾塑性解析、応答塑性率

1. はじめに

鉄道の鉄筋コンクリート（以下「RC」という）構造物に多く見られるラーメン高架橋は、その機能と経済性から、鉄道の高架化工事に比較的多く用いられている構造形式である。

RC ラーメン高架橋では、フーチング上面から軌道階スラブまでの高さが 10m を超える場合、中層はりを設け 2 層構造とする場合が多い。この場合の中層はりは、主に柱部材に発生する曲げモーメントを低減する目的で設けられる。

このような中層はりを有し 2 層構造となるラーメン高架橋は、中層はりの存在によって、さらに高次の不静定次数を有する構造物となる。このことは、地震時において、仮に部材 1 本が終局回転角、あるいは終局曲率を超えるような挙動を示したとしても直ちに構造物が崩壊する可能性はないので、構造物の耐震性能を考えると望ましいことといえる。しかしながら、2 層ラーメン高架橋に対する既往の研究^{1) 2)}では、中層はりの力学的特性によって、構造系の耐荷特性や地震時の挙動が影響を受けることが指摘されている。このことからも、中層はりを有する 2 層構造のラーメン高架橋の合理的な耐震設計法を確立する上で、中層はりの力学的特性の影響を詳細に検討する必要がある

ものと思われる。

以上のことから、本研究では、中層はりを有する 2 層構造のラーメン高架橋を対象に、柱部材の軸方向力の変動を考慮した部材レベルでの弾塑性解析から中層はりの力学特性とともに中層はりの質量が柱部材の地震応答特性に与える影響についても検討を行ったものである。

2. 弾塑性答解析

2.1 検討対象ラーメン高架橋

図-1 に、解析対象とした 3 径間連続 RC 2 層ラーメン高架橋の一般図を示す。本ラーメン高架橋は、フーチング上面から軌道階のスラブ上面までの高さが 12m となっており、中層はりが設けられ 2 層構造となっている。本ラーメン高架橋は、許容応力度法により、設計水平震度 0.25 とした震度法から耐震設計が行われている。柱の断面は、上・下層ともに 1.1m × 1.1m で、中層はりは 0.95m × 1.2m である。図-2 に、各部材断面に配置されている軸方向鉄筋の状況を示す。

2.2 解析モデル

表-1 に、本解析に用いた各モデルのスケルトンを示す。本検討では、中層はりの力学特性によ

* 1 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事部構造技術センター 主席（正会員）

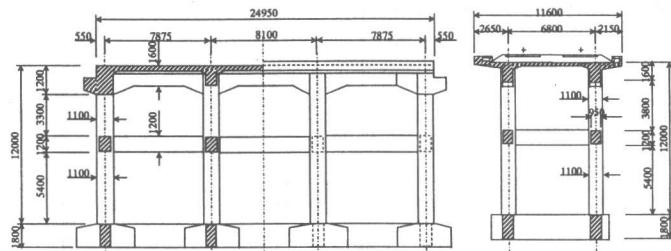


図-1 解析対象 RC2 層ラーメン高架橋一般図(単位:mm)

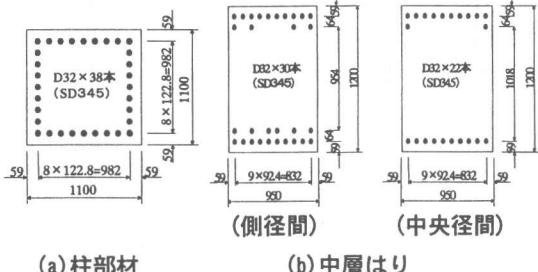


図-2 各部材断面(単位:mm)

り、以下に示す4種類の解析モデルを設定した。

- ①曲げ降伏タイプ(中層はりが曲げ降伏し、曲げ降伏以降のせん断破壊とならないタイプ)
- ②せん断降伏タイプ(中層はりが曲げ降伏する前にせん断補強鉄筋の降伏が先行するタイプ)
- ③ピン接合タイプ(中層はりと柱の接合条件をピン接合としたタイプ)
- ④中層はりがないタイプ(中層はりを取り除いて1層ラーメン構造としたタイプ)

これらの解析モデルは、中層はりが負担する曲げモーメントに着目しており、曲げ降伏タイプの中層はりとは十分な変形性能と安定した耐荷特性を有する部材の場合で、せん断降伏タイプの中層はりとはせん断降伏以降の曲げモーメントの負担が大きく低下する部材の場合である。ピン接合タイプでは、最初から中層はりが曲げモーメントを負担しないとしたものである。中層はりがないタイプについては、中層はりが負担する曲げモーメントとともに柱を結ぶタイとしての機能をもなくした場合で、中層はりを有する解析モデルと比較するために設定した。なお、中層はりのせん断降伏耐力は、せん断補強鉄筋 D13 を 1 組 30cm 間隔の配置から定めた。

本検討では、構造物全体系の地震時挙動を把握

するだけでなく、構造物を構成している各部材の弾塑性挙動にも着目している。このため、解析モデルには、部材レベルの復元力特性から構造物全体の応答を求める方法を採用した。構成部材の力学モデルとしては、比較的精度よく構造物の応答を解析できるといわれている材端弾塑性ばねモデル³⁾

表-1 解析モデルスケルトン

	線路方向	線路直角方向
曲げ降伏タイプ せん断降伏タイプ		
ピン接合タイプ		
中層はりがないタイプ		

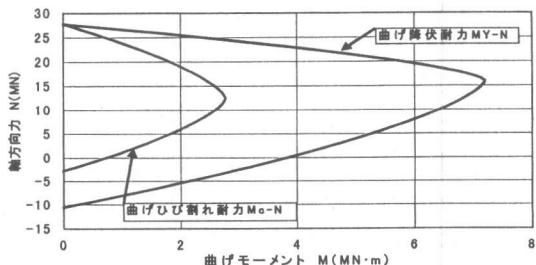


図-3 柱部材 M-N interaction curve

を用いた。

各部材の復元力特性における曲げモーメント-回転角関係は、通常の曲げ理論の仮定から曲げモーメント-曲率関係を計算し、曲率を材軸方向に沿って積分することにより回転角を求めて、これを定めた。さらに、フーチングおよび柱-はり接合部から主鉄筋の抜け出しによる回転変形については、文献4)に示されている方法を用いて考慮した。

柱部材の復元力特性については、曲げモーメントと軸方向力の相関(M-N interaction)を考慮した TAKEDA 型の履歴ループを用い、スケルト

ンカーブはトリリニア型としている。図一3に、柱部材のM-N曲線を示す。中層はりの復元力特性については、軸方向力の影響が小さいことから曲げ降伏タイプでは軸方向力の影響を無視したTAKEDA型の履歴ループとし、せん断降伏タイプでは、中層はりがせん断降伏耐力に達した直後からの耐力低下を材端弾塑性バネに設定する履歴特性のスケルトンカーブの第3勾配を負勾配として考慮し、原点指向型の履歴ループを用いた。なお、第3勾配の設定は、本解析に入る前に予備解析を行い、地震応答中に下り勾配上で曲げモーメントの値が0とならないように初期剛性の10%に定めた。図一4に、せん断降伏タイプに用いた中層はりの履歴特性を示す。

スケルトンカーブの設定では、上層はりの負の曲げモーメントに対して、軌道階のスラブの引張部材としての有効幅⁵⁾内に配置されている全軸方向鉄筋を考慮し、その他の部材では断面内に配置されている全軸方向鉄筋を考慮して定めた。

2.3 解析に用いた地震波

表一2に、本解析に用いた地震波の諸元を示す。本検討には、最大加速度を800galに振幅調整した5種類の地震波を用いた。このように設定した理由は、構造物にとっての最悪地震を兵庫県南部地震規模として想定したためである。

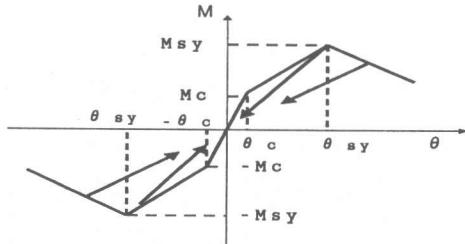
地震波の継続時間は、地震波の主揺動部分の15秒間とした。図一5に減衰定数を0.05としたときの解析用各地震波の応答スペクトルを示す。解析に用いた地震波の特徴としては、最大応答加速度が各地震波で2000galを超える、JR鷹取駅EW波では固有周期2.5秒前後においても2000galを超える応答加速度を示している。

表一2 解析用地震波諸元

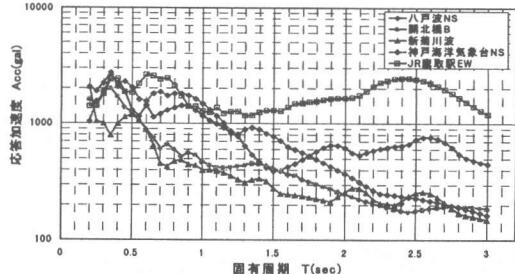
地震波名称	最大加速度	地震名称
八戸波NS	225gal	1968十勝沖地震
開北橋B	271gal	1978宮城県沖地震
新菊川波	74gal	1978伊豆大島近海地震
神戸海洋気象台NS	818gal	1995兵庫県南部地震
JR鷹取駅EW	660gal	1995兵庫県南部地震

3. 解析結果

3.1 固有値解析結果



図一4 せん断降伏タイプ中層はり履歴特性



図一5 解析用地震波応答スペクトル

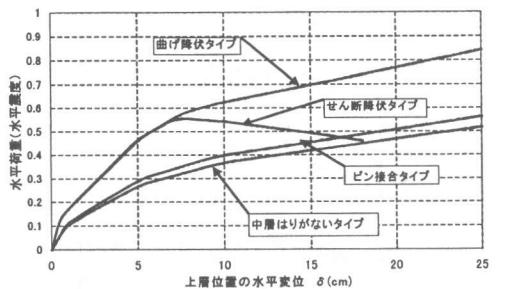
表一3に、橋軸方向、橋軸直角方向の各解析モデルにおける1次モードの弾性固有周期を示す。固有周期は、曲げ降伏タイプとせん断降伏タイプで同じ固有周期となるが、ピン接合タイプでは、中層はりが剛結されている場合より1.5倍程度固有周期が長くなっている。また、中層はりがないタイプでは、ピン接合タイプより固有周期が若干短くなっている。これは、ピン接合となる中層はりは、構造系全体の剛性に有効に働かないので、中層はりの質量が固有周期に影響を与えたためである。このことについては、ピン接合タイプの中層はりの質量を全てゼロにして再度固有値解析を行ったところ、中層はりがないタイプでの固有値解析結果とほぼ一致したことからも頷ける。

表一3 固有値解析結果

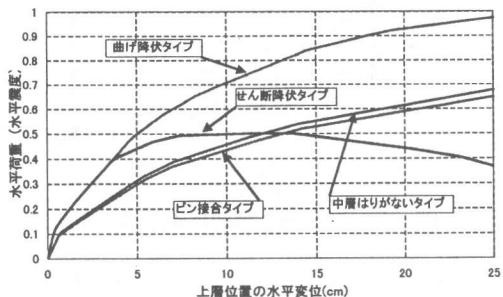
	線路 方向	線路 直角 方向
曲げ降伏	0.314秒	0.302秒
せん断降伏	0.314秒	0.302秒
ピン接合	0.488秒	0.457秒
中層はりなし	0.477秒	0.448秒

3.2 静的弾塑性解析

各解析モデルの構造系としての耐荷特性を把握する目的で静的弾塑性解析を行った。解析は、上層はり位置で設定した節点の変位を逐次増加させ、それに釣り合う水平荷重を求める変位増分解析法により行った。作用する水平荷重は、上層はり位



(a) 線路方向



(b) 線路直角方向

図一 6 静的弾塑性解析結果

置と中層はり位置の2箇所に集中荷重で与え、柱部材自重分は部材長の1/2を各層の水平荷重に加算した。図一6に、線路方向・線路直角方向の上層位置での荷重-変位曲線を示す。荷重-変位曲線は、X軸に上層はり軸線位置の水平変位量、Y軸は各層に作用する水平荷重を各層の重量で除して水平震度として表している。

本解析結果からは、線路方向・線路直角方向で同じ傾向の耐荷特性を示しており、曲げ降伏タイプでは各部材の降伏以降でも安定した耐荷特性になるのに対し、せん断降伏タイプでは、上層はり位置の水平変位が小さい範囲では曲げ降伏タイプと同じ荷重-変位曲線上を動くが、中層はりがせん断降伏すると、柱部材のスケルトンカーブに耐力低下領域が設定されていなくても、それ以降の水平変位からは水平耐力が徐々に低下するようになる。これは、中層はりで負担する曲げモーメントが徐々に小さくなり、2層構造が1層構造に変化する過程において、柱部材の曲げモーメント分布が2層構造の上層と下層の各層でそれぞれ逆対称形

表一 4 静的弾塑性解析結果

	線路方向		線路直角方向	
	水平震度	水平変位(cm)	水平震度	水平変位(cm)
曲げ降伏タイプ	0.449	4.84	0.473	4.60
せん断降伏タイプ	0.442	4.65	0.389	3.55
ピン接合タイプ	0.251	4.60	0.320	5.52
中層はりがないタイプ	0.278	4.72	0.331	5.40

となっていたものが、1層構造での逆対称形の曲げモーメント分布形状になるため、柱部材のせん断スパンが急激に大きくなることによって、相対的に柱部材の降伏曲げモーメントに達するときの層せん断力が小さくなるためと考えられる。

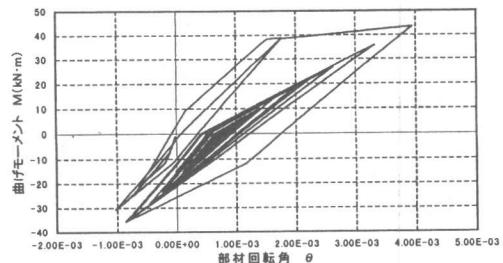
ピン接合タイプと中層はりがないタイプでは、中層はりがないタイプの方が線路直角方向で約3%，線路方向で約11%程度大きな水平耐力を示した。これは、ピン接合された中層はりは構造系全体の水平耐力に全く寄与しないことから、中層はりの重量分だけ中層はりがないタイプより水平耐力が小さくなったためである。静的弾塑性解析結果において、各解析モデルで最初に部材降伏したときの水平震度、上層位置の変位を表一4に示す。

3.2 動的弾塑性解析結果

柱部材の応答塑性率に着目し、動的弾塑性解析結果を以下に示す。

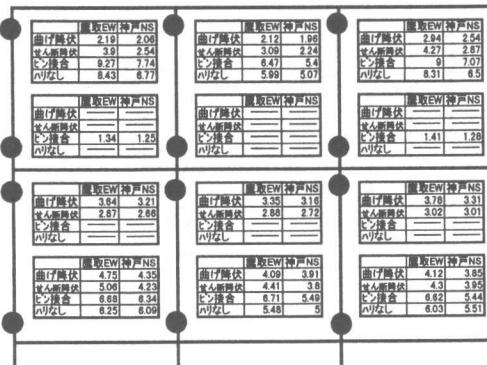
(1) 線路方向

表一5に、神戸海洋気象台 NS 成分、JR 鷹取駅 EW 成分における柱部材の応答塑性率の最大値をそれぞれ示す。なお、その他の地震波では、最大で2.0程度の応答塑性率であった。柱部材の応答塑性率は、各柱部材に設定した材端バネのM-θの履歴図から部材の応答回転角の最大値 θ_{max} を降伏時の部材回転角 θ_y で除して求めた。図一7に、



図一 7 柱部材 M-θ の履歴図の例

表-5 柱部材応答塑性率(線路方向)



柱部材のM-θの履歴図の例を示す。

柱部材の応答塑性率の最大値は、ピン接合タイプにおいて、JR 鷹取駅 EW 成分が作用したときの最外縁の柱部材最上端位置で発生し、その値は 9.27 であった。

曲げ降伏タイプとせん断降伏タイプを比較すると、柱部材の最上端、および、最下端位置の応答塑性率は、せん断降伏タイプの方が大きな値を示した。これは、中層はりがせん断降伏すると曲げモーメントの分担が低下し、その分柱最上端、および、最下端の曲げモーメントが増加するためである。ピン接合タイプと中層はりがないタイプを比較すると、柱最上端と最下端の応答塑性率は、ピン接合タイプの方が約 1.0 度大きくなつた。

(b) 線路直角方向

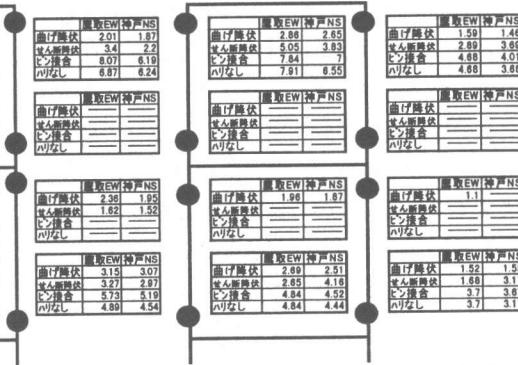
表-6 に、神戸海洋気象台 NS 成分、鷹取駅 EW 成分における柱の応答塑性率の最大値をそれぞれ示す。線路直角方向の解析結果で特徴的なところは、ピン接合タイプと中層はりがないタイプで、柱の応答塑性率がほぼ同じ値になったことである。これは、線路直角方向の中層はりが短いため、中層はりの質量による慣性力の影響が小さかつたためと思われる。

4. 解析結果に対する検討

4.1 地震応答中の構造物の等価剛性が柱応答塑性率に与える影響

せん断降伏タイプにおいて、中層は

表-6 柱部材応答塑性率(直角方向)



りがせん断降伏し、曲げモーメントを負担する能力が低下すると構造系の剛性が大幅に低下することが静的弾塑性解析結果からも推察された。ここでは、地震応答中の各時刻における構造系の等価剛性に着目し、構造系の等価剛性の変化が柱部材の応答塑性率に影響があるものと考えて検討を行つた。ここで、地震応答中の時刻 t における構造系の等価剛性は、原点を結ぶ割線剛性を意味し、次式から求めた。

$$K(t) = \frac{m \cdot \alpha(t)}{\delta(t)}$$

ここに、

$K(t)$: 時刻 t の構造系の等価剛性(kN/cm)

$\alpha(t)$: 時刻 t の上層位置の応答加速度(gal)

$\delta(t)$: 時刻 t の上層位置の応答変位(cm)

m : 上層部の質量(kN·sec²/cm)

検討対象としたのは、線路方向の曲げ降伏タイプとせん断降伏タイプについて、JR 鷹取駅 EW の解析結果を用いた。図-8 に、構造系の等価剛

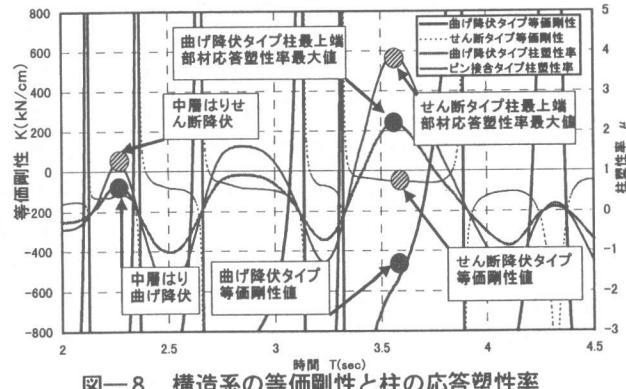


図-8 構造系の等価剛性と柱の応答塑性率

性と柱の応答塑性率の時系列を時刻 $t=2.0$ 秒～4.5 秒間の結果を示す。時刻 $t=2.25$ 秒で検討対象解析モデルの中層はりが、曲げ降伏、せん断降伏し、その後、構造物の各部材が降伏することによって構造系の等価剛性が変化するが、柱部材が最大応答塑性率となる時刻で、曲げ降伏タイプとせん断降伏タイプの構造系の等価剛性を比較するとせん断降伏タイプの方が小さな値となることから、地震応答中の構造系の等価剛性の変化が柱部材の応答塑性率に影響を与えることがわかる。

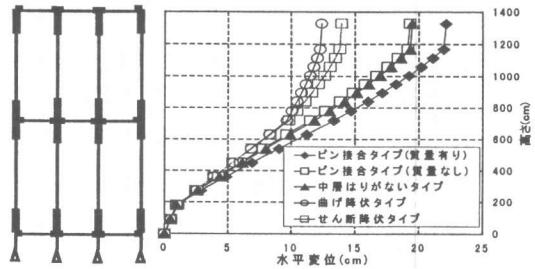
4.2 中層はりの質量が応答変位に与える影響

ピン接合タイプと中層はりがないタイプの解析結果では、ピン接合タイプの方が柱部材の応答塑性率で 1.0 程度、構造物の応答変位で 5%～18%程度大きくなつた。これは、中層はりの質量による慣性力が影響を与えているものと考え、ピン接合タイプの中層はりの質量をゼロとし、慣性力が作用しない場合の検討を行つた。図一9に、JR 鷹取駅 EW での解析結果を上層位置が最大応答変位となるときの高さ方向の応答変位分布図を示す。この図から、ピン接合タイプの中層はりの質量をゼロにして動的解析を行うと中層はりがないタイプとほぼ同じ値になつた。このことは、RC 2 層ラーメン高架橋が地震応答中に中層はりがせん断破壊し、曲げモーメントの負担がゼロになると、中層はりの質量による慣性力が柱部材の応答塑性率を増加するように働き、本解析結果からは表4、5に示したように曲げ降伏タイプとピン接合タイプでは最大で 5.3 程度の応答塑性率の差が生じることがわかつた。また、せん断降伏タイプと中層はりがないタイプで応答変位を比較すると、せん断降伏タイプの方の応答変位が小さくなつた。これは、中層はりがせん断降伏すると曲げモーメントの負担割合は小さくなるものの完全にゼロとはならないため、構造系全体の等価剛性は中層はりがないタイプよりも大きくなるためと思われる。

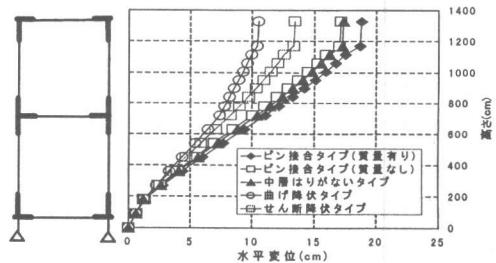
5.まとめ

本検討結果を以下にまとめる。

- (1) 静的弾塑性解析結果から、中層はりがせん断降伏すると柱部材に耐力低下領域が設定



(a) 線路方向



(b) 線路直角方向

図一9 応答変位の高さ方向分布

されていなくても、構造系の耐荷特性は耐力低下を示すようになる。

- (2) 地震応答中に構造系の等価剛性が、小さくなると柱部材の応答塑性率が大きくなる。
- (3) 中層はりの質量による慣性力によって、中層はりが曲げ降伏する場合とピン接合状態となった場合では、応答塑性率で最大 5.3 程度の差が生じる。

【参考文献】

- 1) 小林、松田、奥石：2 層ラーメンの中層梁の耐力が地震応答に与える影響、第 51 回土木学会年次学術講演会概要集、V-522, PP1042～1043, 1996. 10
- 2) 鈴木、綿貫、滝沢、尾坂：時刻歴応答解析に基づく RC 2 層ラーメンの耐震性能評価、コンクリート工学論文集、第 4 卷第 1 号、PP67～78, 1993. 1
- 3) 柴田明徳著：最新建築学シリーズ 9 最新耐震構造解析、森北出版、1995. 4
- 4) 石橋忠良、吉野伸一：鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形性能に関する研究、土木学会論文集、第 390 号 /V-8, PP57～66, 1988. 2
- 5) 道路橋示方書・同解説、Ⅲコンクリート橋編、PP113～114、平成 8 年 12 月