論文 中層梁を増設した RC ラーメン高架橋の耐震性能に関する解析的検討

古屋 卓稔*1・中田 裕喜*1・田所 敏弥*2・岡本 大*3

要旨:本研究は, RC ラーメン高架橋の耐震補強として,中層梁を増設することによる構造物全体系の耐震性 向上効果を検討したものである。二次元モデルでの検討の結果,中層梁の増設により,無補強時に比べて柱 の損傷レベルが抑えられること,また増設される中層梁の曲げ耐力を指標として損傷レベルの抑制効果を表 現できることが分かった。また,三次元の時刻歴動的解析により,部分的な中層梁の増設であっても構造物 全体系の耐震性能が向上する結果が得られた。ただし,中層梁を増設した柱のせん断力が増加するため,柱 の部材性能の向上を目的とした鋼板巻き補強工法等の従来工法の併用が必要となる場合がある。 キーワード:耐震補強,中層梁,変形性能,曲げ耐力,時刻歴動的解析,部分補強

1. はじめに

今後発生が危惧されている大地震に備え,既設ラーメ ン高架橋に対する耐震補強の実績は年々増加している。 その実績の多くが,主に鋼板や RC,繊維等を巻き立て る工法によるものである。これらの巻き立て工法は施工 が簡易であり,柱部材の変形性能やせん断耐力を向上さ せることで構造全体の安全性・復旧性を向上させる工法 である。ただし,ラーメン高架橋に対する巻き立て工法 では,全柱部材に対して巻き立てることが前提となって いる。そのため,高架下利用の状況によっては,施工が 困難な場合がある。

ー方, ラーメン高架橋下の一部にダンパーブレースを 増設し,構造全体系の耐荷力を向上させる工法も提案さ れ実際に施工がなされている¹⁾。同工法においては,部 分的な補強を施すことで地震時における変形を抑制する ことが可能となる。ただし, ラーメン高架橋に対して部 分的な補強ではあるものの,高架下の利用状況によって は採用できない等の課題がある。

また,既設のラーメン高架橋では,高架下が利用され ている場合も多い。そのため,高架下利用に対する制限 が少なく,耐震性を確保する工法が望まれる。そこで, 高架下利用の制約が少ない補強として,図-1に示すよ うな,部分的にプレキャストの中層梁を増設した補強工 法について検討した。

本工法であれば、中層梁を部分的に増設することによ り、構造物全体系の耐荷力の改善が期待される。さらに、 全体系における変形が抑制され、走行安全性も向上する と考えられる。また、中層梁を取り外し可能なものとす ることで、地震後の復旧も容易なものとなり得る。

しかしながら、本工法は中層梁の部分的な増設が構造 全体系に与える影響が明らかになっていない。特に、中



図-1 端部柱のみに中層梁を増設したラーメン高架橋

層梁の増設によって柱のせん断スパンが短くなることで, 柱がせん断破壊する可能性が懸念される。また,上部構 造の剛性が向上することで,基礎に負荷がかかることも 懸念される。以上より,本研究では中層梁の増設による 構造全体系の耐震性能の向上について明らかにすること を目的として検討を行った。

2. 検討方法

2.1 検討内容

本検討では、二次元解析と三次元解析の2種類の解析 を行っている。なお、両検討ともに、鉄道高架橋の設計 に用いられる汎用ソフトを使用した。

二次元解析では、中層梁が増設された二次元の橋軸直角 方向ラーメン高架橋モデルに対し、静的非線形解析(プ ッシュオーバー解析)によって補強効果の確認を行った。 耐震性能の評価においては非線形応答スペクトル法を用 いた。三次元解析では、部分的に中層梁を増設した場合 の構造全体系の補強効果を確認するために、三次元モデ ルによる時刻歴動的解析を行った。特に、中層梁がない 柱の影響について検討した。

*1 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 研究員 修(工) (正会員) *2 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 主任研究員 博(工) (正会員) *3 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 室長 博(工) (正会員)



2.2 対象構造物

対象とする RC ラーメン高架橋を図-2 に示す。橋軸 方向 5 径間(端部柱間隔 9565mm,中間部柱間隔 10000 mm),橋軸直角方向 1 径間(柱間隔 5000 mm)であり, 柱高さは中層梁の無い一層ラーメン高架橋の柱の上限を 想定し 10 m とした。また,柱は図-3 に示す諸元として いる。接続形式はゲルバー桁形式とし,地盤は鉄道構造 物等設計標準・同解説(耐震設計)²⁾(以下,耐震標準 という)に示される普通地盤である G3 とした。

2.3 解析モデル

(1) 二次元解析

図-4に解析モデルを示す。解析モデルは橋軸直角方 向のラーメン高架橋端部を対象に、二次元の骨組み構造 とした。また、構造モデルは上部構造と基礎構造の一体 モデルとした。部材の非線形特性は、材端に配置した回転ばねによりモデル化し、地盤については、地盤ばねによりモデル化した²⁾。柱や梁の曲げモーメント分布が線形となる部材については $M-\theta$ 要素、曲げモーメント分布が非線形となる杭は $M-\varphi$ 要素とした。また、柱と杭に対して、軸力変動範囲における曲げモーメントおよび回転角の軸力相関を部材性能に与えることで、軸力変動の影響を考慮した。

図-5 に曲げモーメントに対する回転ばねの非線形特性を示す。非線形特性は三次元解析も同様である。ここで、C点:ひび割れ点、Y点:軸方向鉄筋の降伏点、Y_b点:降伏に伴う部材剛性の変化点、M点:最大荷重を維持できる最大の部材角、N点:降伏荷重を維持できる最大の部材角である。

解析は静的非線形解析とし,考慮した荷重は固定死荷



図-7 入力地震波

重,付加死荷重,列車荷重である。地震時応答解析では これらの荷重が慣性力として作用する。列車荷重による 慣性力については,車両の動的制振効果があること,ま た車両と構造物とが必ずしも同位相で応答しないことを 考慮し,応答加速度の上限値を300galとしている²⁾。

(2) 三次元解析

図-6 に解析モデルを示す。二次元モデルと同様に, 上下部一体の骨組み構造とした。また,部材の非線形特 性も同様としており,ここでは橋軸方向及び橋軸直角方 向に性能を与えている。

荷重は各節点に対して実配置通りの質量配置とし,考 慮した荷重も二次元解析と同様である。また,減衰とし て,本検討ではレーリー減衰を使用した²⁾。レーリー減 衰では,固有値解析によって得られる有効質量比から支 配的な振動モードを2つ選定する。なお,本検討で選定 したモードは,柱の変形が支配的となる振動モードであ り,概ね減衰定数が0.05程度となった。

図-7 に、本検討で用いた G3 地盤のスペクトルII地 震動(内陸活断層型)の入力地震波を示す²⁾。これは、 これまでの観測記録及び断層破壊過程を考慮した手法に より位相をモデル化し、弾性加速度応答スペクトルに適 合させることによって算定した波形であり、一般的な鉄 道構造物の設計に用いられるものである。本検討では、 この一波のみを用いて解析を行った。また、本検討では 上部構造に着目して解析を行うため、地盤変位や液状化



を考慮しないものとする。

2.4 解析ケース

解析では、中層梁の断面高さと引張鉄筋比を中層梁の パラメータとして与えるものとする。現実的な中層梁を 想定し、中層梁の断面高さ h=400,600,800,1000,1200mm と引張鉄筋比 pt=0.3,0.6,0.9,1.2,1.5%の全25 ケース 行った。なお、中層梁のせん断補強鉄筋は全て同じもの とし、D19 の鉄筋を2組、100mm ピッチとしている。

2.5 照查指標

γi

解析によって得られる応答値に対し,部材の変形 $\theta_d \varepsilon$ 指標として照査を行う。照査に用いる部材変形の限界値 θ_{rd} は,図-8に示す部材の損傷レベル毎に設定される²⁾。 また,照査値は式(1)によって与える。

$$\cdot \theta d / \theta r d \leq 1.0 \tag{1}$$

ここで, γi は構造物係数であり, γi =1.0 とする。

したがって,損傷レベル2の照査値が1.0を超える場合に損傷レベル3の照査を行い,損傷レベル3での照査 値が1.0を超える場合に損傷レベル4となる。

3. 二次元静的非線形解析結果による補強効果の検討

引張鉄筋比0.6%での静的非線形解析結果を図-9に示 す。ここで、縦軸は水平震度、横軸は柱天端での水平変 位である。

検討結果より, 無補強時で最大震度 k_h=0.39 の構造物 が, 最大(h=1200mm)で k_h=0.61 まで向上した。また, 中



図-10 全解析ケースでの最大応答変位結果



層梁の断面高さが大きくなるに伴い,最大震度が増加し ていることがわかる。さらに,最大応答変位結果から, 地震時に発生する変位が抑えられる傾向となることが確 認できる。

図-10 に全解析ケースでの最大応答変位結果を示す。 ここでは、横軸を中層梁の曲げ耐力とした。図-9 より 無補強時で最大応答変位が 588mm であることから、全 結果において最大応答変位が減少する結果となる。

また,柱の損傷レベルが3となる時の応答変位は,曲 げ耐力の増加に伴い変位が抑えられる傾向がある。一方, 損傷レベル2に関しては,曲げ耐力の増加に伴い,変位 が一定の数値に収束することが確認できる。なお,柱の 損傷レベル2の領域では,柱への応答が抑えられるのに 対し,杭と地盤の応答が大きくなることから最大応答変 位が大きくなっていると考えられる。

降伏順序については、柱の損傷レベルが2であった中 層梁の曲げ耐力が比較的大きい数ケースを除き、全て中 層梁が柱に先行して降伏する結果となった。なお、基礎 が先行降伏するケースは無かったものの、中層梁の曲げ 耐力が最大となるケース(pt=1.5%, h=1200mm)では、柱 の降伏変位が341mmに対して杭の降伏変位が344mmと 僅差であった。このことから、中層梁の曲げ耐力がより 大きくなる場合には基礎への損傷が発生すると考えられ る。今回の検討では、設定した柱が細く背の高い構造と したことから、基礎の損傷が発生しなかったものと考え られる。また,基礎が先行降伏する場合,別途補強が必要となるため中層梁の補強に際しては注意が必要である。

図-11 に柱部材の損傷レベルについて着目した結果 を示す。横軸は中層梁の曲げ耐力,縦軸は柱の損傷レベ ルについての照査値である。解析結果より,中層梁の曲 げ耐力の上昇に伴い照査値が減少していることが確認で きる。また,中層梁の諸元によらず,照査結果が同様の 曲線上にあることから,中層梁の曲げ耐力によって杭の 損傷レベルを設定することが可能となるといえる。つま り,所定の曲げ耐力が確保されるものであれば, RC部 材に限らずどのような部材を用いても柱の損傷を制御で きると考えられる。

また、今回の検討では、柱の破壊モードが全て曲げ破壊モードとなる結果が得られた。曲げ破壊とせん断破壊のどちらが先行するかについては、耐震標準では式(2)によって判定している²⁾。

 $V_{mu}/V_{ud} \le 1.0$ ・・・ 曲げ破壊形態 $V_{mu}/V_{ud} \ge 1.0$ ・・・ せん断破壊形態 ここに、 V_{mu} は部材が曲げ耐力に達する時のせん断力で あり、 V_{ud} は設計せん断耐力である。照査値が 1.0 を超え る場合、部材はせん断破壊が先行すると判定される。 V_{mu} は柱のせん断スパンに起因しており、 $V_{mu}=M_u/L_a$ で与え られる。ここで、 M_u は柱の曲げ耐力、 L_a は柱のせん断 スパンである。

せん断スパン L_a が小さくなるに従ってせん断破壊形 態の傾向となる。柱の高さが低い場合や中層梁を過度に 高く配置した場合には,せん断破壊形態となるため,せ ん断破壊とならない範囲での補強とするか,または,柱 のせん断耐力を向上させる巻き立て工法を併用すること が必要と考えられる。

4. 三次元動的非線形解析結果による補強効果の検討 4.1 中層梁増設による応答低減効果について

C1 柱列, C6 柱列(図-6 参照)の橋軸直角方向に中 層梁を増設し,三次元でモデル化したラーメン高架橋の 橋軸直角方向の解析を行った。また,本検討の対象構造 物のように剛性の異なる柱列がある場合に,ねじりの発 生が懸念される³⁾。この場合には,非線形スペクトル法 を用いることが困難である。そのため,ここでは時刻歴 応答解析を用いて,ラーメン高架橋の三次元的な挙動を 検討した。

時刻歴応答変位結果を図-12 に示す。二次元解析結果 より得られた変形抑制効果と同様に、応答が低減される 傾向が得られた。また、中層梁の曲げ耐力に影響を受け ることも確認できる。なお、無補強での最大応答時で 730 mm の変位が発生し、中層梁の断面高さ h=1200mm では 583mm に最大応答変位が抑制される結果となった。



表-1 中層梁配置ケース

基本ケース	C1,	C6					
CASE1	C1,	С2,	СЗ,	С4,	С5,	C6	全柱配置
CASE2	C1,	СЗ,	С4,	C6			中間列補強追加
CASE3	C1,	C2					非対称配置

図-13 に中層梁のパラメータを変化させた場合の C1 柱での結果を示す。三次元解析では損傷レベル2の照査 値が 1.0 を下回る結果が得られなかったため、本結果以 降では損傷レベル3 での結果のみを示す。解析結果より、 二次元解析と同様に、中層梁の曲げ耐力の増加に伴い照 査値が減少する傾向が得られた。ただし、二次元解析で の照査結果に比べて照査値が大きい傾向となる。これは、 二次元解析では考慮されていない無補強の柱列の影響に よるものであり、剛性の増加した柱列が応力を負担した めであると考えられる。

図-14 に C2 柱についての照査結果を示す。解析結果 より、中層梁の増設位置が端部(C1 柱列, C6 柱列)の みではあるが、無補強柱であっても中層梁の曲げ耐力の 増加に伴い応答が低下することが確認できる。

図-15 に、端部(C1 柱列,C6 柱列)を中層梁で補強 した場合の各柱の損傷レベルと中層梁の曲げ耐力の関係 を示す。解析結果より、C2 柱とC3 柱に比べてC1 柱の 方が応答の低減がされていることがわかる。また、C2 柱とC3 柱では大きな差はない。

また,中層梁の曲げ耐力が 2800kN・m 付近で補強柱 と無補強柱の照査値が逆転する結果が得られた。この時, 2800kN・m 以下では中層梁が先に損傷し, 2800kN・m よ り大きい場合では柱が先に損傷する結果が得られた。中 層梁の増設により全体系の耐荷力も向上するものの,補 強が施されていない柱への負担も増加するため,柱の耐 力に合わせて中層梁を増設する必要がある。

検討結果より,中層梁の増設による柱損傷の低減効果 について,三次元解析も二次元解析と同様の傾向が得ら れてはいるものの,現状では無補強柱列への影響を考慮 するためには,三次元解析が必要といえる。

4.2 中層梁の増設位置の影響

三次元の全体系解析により、C1 柱列とC6 柱列を補強 したケースにおいて耐震性能に効果があることが確認で きた。次に,より効果的な補強配置について検討を行う。 (1) 解析ケース

(1) 解析ケース

中層梁の引張鉄筋比を 0.6%で固定し,高さを 400,800, 1200mm の 3 ケースで解析を行った。配置についてのケ ースを表-1 に示す。なお,表-1 に示す基本ケースは, 4.1 と同様であるため,基本ケースの結果は図-15 を参 照とする。

(2) 解析結果

中層梁の配置変更を行った解析結果について CASE1 から CASE3 までの照査結果を図-16 に示す。CASE3 の C4 柱列以降の結果を除き,これまでと同様に柱の損傷が 中層梁の曲げ耐力に依存することが確認できる。全ての 解析結果から, CASE1 において最も応答が抑えられて いることがわかる。これは、全ての柱列を補強したこと



図-17 基本ケース及び CASE3 の C6 柱上端における 変形挙動結果

で一部の柱に応答が集中しなかったためである。

また、基本ケース、CASE1、CASE2の照査結果から、 中層梁による補強本数が増えるほど応答値も下がるもの と考えられる。さらに、基本ケース及びCASE1の2ケ ースと、CASE2の比較から、無補強の柱列があることで 補強された柱列に応答が集中することが改めて確認できた。なお, C2, C5 柱列配置, C3, C4 柱列配置でも検討を行ったところ,上記と同じ傾向が得られている。

CASE3 では、C3 柱列までの結果は中層梁の影響を受けているものの、C6 柱列へ近づくに従い、照査値が増加していることがわかる。また、C6 柱列については、無補強時よりも照査値が増加していることが確認できる。

図-17 に基本ケースと CASE3 における橋軸直角方向 に地震波を入力した時の C6 柱列柱天端の変形挙動を示 す。基本ケースでは橋軸直角方向に変形しているのに対 し、CASE3 では橋軸方向に変形していることから、斜め 方向に柱の変形が発生していることがわかる。また、橋 軸方向の変形量も基本ケースに比べて大きな応答となっ ている。これは、剛性の向上効果が C1 柱列や C2 柱列に 集中したためと考えられる。このことから、中層梁の増 設に際しては、剛心と重心が一致するように対称配置と することが望ましい。また、施工条件等により非対称で の増設となる場合には、より詳細な検討が必要であると 考えられる。

5.まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) RC ラーメン高架橋に中層梁を増設することで、地 震時の応答を低減することが可能であり、構造物全 体系の耐荷力を向上することを解析により示した。
- (2) 増設される中層梁の曲げ耐力を指標として柱の損 傷レベルの抑制効果を表現できることが分かった。 このため、所定の曲げ耐力を確保できれば、鋼部材 等を用いても同様の効果が得られると考えられる。
- (3) 三次元時刻歴応答解析より、補強が施されていない 柱であっても(2)と同様の補強効果が得られること が分かった。ただし、中層梁の曲げ耐力の向上に伴 い、補強がされていない柱列への負担が増加する。
- (4) 中層梁の増設は、配置箇所によっては、柱にねじり が発生し、変形も大きくなることから、剛心と重心 が一致するよう対称となるように配置することが 望ましい。

参考文献

- 喜多直之,吉田幸司,岡野素之,関雅樹:鉄道 RC ラーメン高架橋を対象とした圧縮型ダンパーブレ ース工法の実用化,土木学会論文集 F, Vol.63, No.3, pp.277-286, 2007.7
- 鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物等設計標準・同 解説-耐震設計-,丸善,2012
- 田所敏弥,谷村幸裕,中田裕喜:ねじりと曲げを受けるラーメン高架橋柱の変形性能と地震被害,土木 学会論文集 E2, Vol.68, No.3, pp.166-177, 2012.7