論文 橋脚く体の塑性ヒンジ位置を変化させた地震応答解析

渡部 太一郎^{*1}·小林 薫^{*2}

要旨:橋脚く体の中間部に位置する主鉄筋段落し部で損傷した場合を想定して,橋脚く体の塑性ヒンジ位置 を変化させた地震応答解析を行い,橋脚の塑性ヒンジ位置が塑性ヒンジの地震応答に与える影響について検 討を行った。解析の結果,塑性ヒンジ位置が橋脚く体上部になるに従って,塑性ヒンジの応答塑性率が一定 の場合に塑性ヒンジに要求される降伏震度は大きくなり,塑性ヒンジの降伏震度を一定とした場合に塑性ヒ ンジの応答塑性率が大きくなることが確認された。

キーワード:橋脚,段落し,塑性ヒンジ位置,降伏震度,応答塑性率,地盤種別,地表面設計地震動波形

1. はじめに

1995年1月に発生した兵庫県南部地震や2004年10月 の新潟県中越地震等,過去の大地震において,鉄道構造 物の橋脚では,橋脚の中間部の主鉄筋量を減らしている 段落しと呼ばれる部分の鉄筋がはらみ出し,コンクリー トが剥がれ落ちる損傷を受けている(写真-1参照)。こ れは,橋脚部材では,地震時の水平力による曲げモーメ ントが橋脚基部で最大となる三角形分布となるため,橋 脚の中間部において,曲げモーメントに対して不要とな った主鉄筋を減らしており,昔の設計基準で設計された 橋脚の中には,段落し部の設計に関する配慮が不足して いたものがあるためと思われる。

近年の設計基準では、橋脚の段落し部で損傷させない 設計法となっているが、逆に段落し部に変形性能を持た せて、塑性ヒンジを形成させることが出来れば、基部で 変形した場合に比べて震災後の復旧性の面で有利にな る場合があると考えられる。しかしながら、主鉄筋段落 し部が十分な変形性能を有しているとした場合におい て、橋脚の中間部に位置する段落し部で損傷した場合の 地震応答は、現状では明らかとなっていない。そこで本 研究では、橋脚の塑性ヒンジ位置を変化させた場合の地 震応答解析を実施し、橋脚の塑性ヒンジ位置が塑性ヒン ジの地震応答に与える影響について検討を行った。

2. 動的応答解析の概要

2.1 解析モデル

ー般的な寸法を有する橋脚をモデルとして,橋脚く体 の塑性ヒンジ位置(フーチング天端からの鉛直距離), 塑性ヒンジの応答塑性率,地盤条件および橋脚の固有周 期を変化させた動的応答解析を行った。

解析の対象とした橋脚およびその解析モデルを図-1 に示す。対象とした橋脚は、フーチング天端から橋脚天 端までの高さ 12m、断面高さ 1.8m の橋脚である。解析



写真-1 橋脚段落し部の損傷状況

モデルは、橋脚く体を 19 質点で表現し、桁の死荷重お よび地震時の列車荷重を最上端の質点に集中した多質 点系モデルを用いた。橋脚は梁要素でモデル化し、塑性 ヒンジ位置には、M-θ 関係となる材端剛塑性の非線形 ばねを設定した。非線形ばねの骨格曲線と履歴モデルは, 図-2 に示すような鉄道構造物等設計標準・同解説 耐 震設計¹⁾(以下,耐震標準とよぶ)の所要降伏震度スペ クトルを算定したモデルを用いた。また、逸散減衰の効 果は、運動方程式を解く際の初期の減衰定数hに考慮し た。耐震標準と同様、周期依存型として、G0~G3 地盤 では、h=0.04/T (T:固有周期, 0.10≦h≦0.20), G4~G7 地盤では、h=0.04/T(0.15≦h≦0.20)に設定した。また、 非線形剛塑性ばねの塑性変形時に考慮する初期剛性は, 図-1 に示すように、水平力による曲げモーメント分布 と要素長および塑性化後の要素材端条件を考慮して設 定した。図中の式に示した係数kの値として、今回の解 析では,橋脚基部の塑性ヒンジで回転変形した場合の予 備解析を行い、耐震標準の所要降伏震度スペクトルと一 致するように便宜的に k=1.7 として,全ての解析を行っ た。非線形ばね(要素下端に設定)を設定した要素の他

*1 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 新構造 IG 工修 (正会員) *2 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 新構造 IG 課長 博(工)(正会員)



図-1 解析対象橋脚と解析モデル





端と他の要素は全て線形とした。また,橋脚天端の質点 と桁・列車荷重の質点とは剛な部材で結合した。橋脚下 端の境界条件は,フーチング上端の位置で固定とし,こ の位置に地震動を入力した。

2.2 入力地震波

地盤種別として,耐震標準では,地盤構成および表層 地盤の固有周期に応じて G0~G7 までの 8 種類の地盤区 分としている。今回の解析では,耐震標準の内陸型大規 模地震を対象とした L2 地震動(スペクトルII)の弾性 加速度応答スペクトルに適合させた地盤種別毎の地表 面設計地震動波形を使用した。解析で対象とした地震動 は,全地盤中最大の地表面加速度を示す G3 地盤用の地 表面設計地震動と G3 地盤に次いで大きい最大加速度を 示す G2 地盤用地震動の他,やや長周期成分が卓越する G4 地盤用地震動を全地盤中最も長周期成分が卓越する G7 地盤用の地震動を用いることで,地震波の周波数特性 を変化させた場合の塑性ヒンジの地震応答に関する検 討を行った。解析で用いた入力地震動を図-3 に示す。

2.3 解析パラメータ

解析パラメータとしては,第一に,橋脚の塑性ヒンジ 位置(高さ)hの橋脚高さHに対する比h/Hを0,0.25, 0.50,0.75の4通りに変化させ,その上で各塑性ヒンジ





-1000





図-3 入力地震動波形¹⁾

位置に対して, 塑性ヒンジの応答塑性率および固有周期 を変化させた。実際の橋脚の損傷位置は, 基部と段落し それぞれの断面耐力の大小で決まってくるが,今回の解 析では,段落しが損傷した場合の地震応答を調べるため, 橋脚の損傷位置を任意に変化させて,解析を行った。

損傷位置に設定している材端剛塑性ばねの最大応答 回転角度の降伏角度に対する比で表される応答塑性率 μの値としては,μ=4~25の任意の値を設定した。

解析対象橋脚の固有周期は,基本モデル(実橋脚モデル)の質点分布の全質量に一定の倍率を乗じて,構造系 全体の質量を変化させることにより変化させた。

橋脚の質量(固有周期)および入力地震動,応答塑性 率を変数とした各解析ケースでは,非線形回転ばねの降 伏震度(降伏曲げモーメント)を変化させ,非線形回転 ばねの応答塑性率が設定した値に収束するまで繰り返 し動的応答解析を行った。なお,非線形回転ばねの降伏 震度は,式(1)により求めた。

 $K_y=M_y/\Sigma(M_i \times h_i)$ (1) ここで、 K_y :降伏震度、 M_y :非線形ばねの降伏曲げモー メント(kN・m)、 M_i :各質点の重量(kN)、 h_i :非線形ばね 位置から各質点までの鉛直距離(m)

3. 解析結果

3.1 橋脚塑性ヒンジ位置による影響

橋脚の塑性ヒンジ位置を h/H=0.0(橋脚基部に塑性ヒ ンジがある場合)から 0.75 まで変化させたときの解析結 果を非線形回転ばねの降伏震度を縦軸に,橋脚の固有周 期(単位:秒)を横軸に変化させてプロットした降伏震 度スペクトルで比較したものを図-4に示す。この図は、 非線形回転ばねの応答塑性率μ=10として、解析で対象 とした各地盤種類に対して検討したものである。

応答塑性率が同じ場合,橋脚の塑性ヒンジ位置が橋脚 上部になるにしたがって,非線形回転ばね(塑性ヒンジ) の降伏震度が大きくなる結果となっている。これは,塑 性ヒンジの応答塑性率が同一の場合,塑性ヒンジ位置が 橋脚のより上部にある方が橋脚天端の応答変位は小さ くなり,地震時のエネルギー吸収が小さいためと思われ, 橋脚天端の応答変位が小さい分,同じ応答塑性率となる ための降伏震度は大きくなるためと考えられる。なお, 各解析ケースとも,塑性ヒンジ位置より上部の1次モー ドで振動している。

図-5に、 μ =10の場合における,各h/Hによるh/H=0.0時(橋脚基部に塑性ヒンジがある場合)降伏震度に対する増分量の比率の比較を地盤種別毎に示す。G3地盤の場合,応答塑性率 μ =10のとき,h/H=0.75で最大32%程度,h/H=0.5で最大22%程度,h/H=0.25で最大12%程度,基部に塑性ヒンジがある場合に比べて,非線形回転ばねには、より大きな降伏震度が必要となる。

地盤種別の比較では,G2 地盤が降伏震度の増分比率が 最も大きくなり,以下G3,G4,G7 地盤の順に増分比率 が小さくなる結果となった。





図-5 h/H=0時降伏震度に対する各h/H時降伏震度の増分量の比率(応答塑性率 µ=10時)





また,これらの図から h/H に概ね比例する形で,塑性 ヒンジ位置の降伏震度の h/H=0.0 時降伏震度に対する増 分比率が大きくなることがわかった。

G3 地盤の解析結果において,固有周期と塑性ヒンジ (非線形回転ばね)の応答塑性率との関係を塑性ヒンジ の高さ毎にプロットしたものを図-6 に示す。この図に おいて,塑性ヒンジの降伏震度は0.3 で一定としている。 図より,固有周期0.5~1.5 秒程度では,固有周期および 降伏震度を一定とした場合,塑性ヒンジ位置が橋脚く体 の上部になるに従って,塑性ヒンジの応答塑性率が大き くなることがわかる。これは,塑性ヒンジ位置が橋脚く 体の上部になるほど,塑性ヒンジに要求される塑性回転 性能が大きくなることを表している。前述したように, 塑性ヒンジ位置が橋脚上部になるに従って,塑性ヒンジ の回転角が同じ場合に橋脚天端に発生する応答変位は 小さくなり,逆に塑性ヒンジ位置の塑性回転変形をより



大きくすることで, 地震エネルギーを吸収しているもの と思われる。

3.2 地盤条件による影響

図-7に, 非線形回転ばねの応答塑性率 µ=10, 非線形 回転ばね位置 h/H=0.0~0.75 の各場合における地盤種別 の違いによる降伏震度スペクトルの比較を示す。塑性ヒ ンジ位置によらず、地表面設計地震動の最大加速度の大 きさが小さくなるほど(G3,G2,G4,G7地盤の順), 降伏震度が小さくなる傾向となった。また、固有周期が 大きくなると、地盤条件の違いによる降伏震度の差異は



小さくなる傾向となった。

3.3 応答塑性率µによる影響

図-8,9に、G3、G7地盤の場合について、塑性ヒンジ位置(h/H)と地盤種別毎の降伏震度スペクトルを示す。これらの図より、非線形回転ばねの応答塑性率μを大きく設定できれば、降伏震度はかなり小さくなることがわかる。

4. まとめ

橋脚の塑性ヒンジ位置を変化させた動的応答解析を 行い,塑性ヒンジ位置の違いによる塑性ヒンジの地震応 答の検討を行った。今回の解析から得られた知見は以下 の通りである。

(1)橋脚部材の塑性ヒンジ位置が部材上部になるに従っ て、塑性回転性能が同じならば、塑性ヒンジに要求され る降伏震度の値は大きくなる。また、h/H に概ね比例し て、基部に塑性ヒンジがある場合の降伏震度に対する降 伏震度の増分量の比率が大きくなることがわかった。 (2)橋脚く体の塑性ヒンジ位置の降伏震度を一定とした 場合、塑性ヒンジ位置が橋脚上部になるにしたがって、 同一の固有周期、地盤種別に対して、塑性ヒンジに要求 される塑性回転性能は大きくなる。

(3)橋脚の塑性ヒンジ位置の応答塑性率が大きくなると, 塑性ヒンジに要求される降伏震度の値は小さくなる。橋 脚く体の上部に塑性ヒンジがある場合においても,塑性 ヒンジに十分な塑性回転性能を与えることにより,塑性 ヒンジ位置に要求される降伏震度を低減することがで きる。

(4) 耐震標準の地盤条件のうち、G2、G3、G4、G7 の 4 種類の地表面設計地震動波形を用いて解析を行った。入 力地震動の周波数特性を変化させることにより、橋脚の 塑性ヒンジ位置の降伏震度は大きく変化することがわ かった。G3 地盤で降伏震度は最大となり、以下 G2、G4、 G7 の順に降伏震度が小さくなる。固有周期が大きくなる と、地盤条件による差異は小さくなる。

参考文献

 運輸省鉄道局監修,鉄道総合技術研究所編:鉄道構 造物設計標準・同解説 耐震設計,丸善,1999.10