

等価線形化法による鉄筋コンクリート ラーメン橋脚の地震応答解析

田崎 賢治¹・浅野 恵哉¹・吉澤 努¹・川神 雅秀²

¹正会員 工修 大日本コンサルタント 技術本部耐震技術室 (〒170-0003 東京都豊島区駒込三丁目23-1)

²正会員 工博 大日本コンサルタント 技術本部耐震技術室 (〒170-0003 東京都豊島区駒込三丁目23-1)

ゴム支承を有する地震時水平力分散構造の鉄筋コンクリートラーメン橋脚について、最大点剛性による等価線形化法の適用を提案し、当該解析法による解析結果の精度検証を、等価エネルギー法・非線形時刻歴応答解析法との比較により実施した。検証モデルは、T型の単柱橋脚と門型ラーメン橋脚を対象とし、ゴム支承のせん断剛性などのパラメーターに着目し、大規模地震動による応答結果を相互に比較した。

これより、今回対象としたラーメン橋脚モデルでは、構造系の固有周期帯の領域や橋脚の応答塑性率の違いなどにより、等価線形化法による解析結果が非線形時刻歴応答解析法と整合しない結果が得られ、当該解析手法が有する課題について考察を加えた。

Key Words : seismic response, concrete rigid frame pier, equivalent linearization, non-linear dynamic analyses

1. まえがき

現在、平成8年版道路橋示方書・耐震設計編においては、地震時水平力分散構造のけた橋に対して静的な設計法である地震時保有水平耐力法の採用を許容している。しかし、ゴム支承を有する橋脚の構造特性によっては、非線形時刻歴応答解析と比較し十分な精度が確保されない場合のあることが指摘されている¹⁾。

本稿では、まず、単柱橋脚を対象とした最大点剛性による等価線形化法¹⁾を鉄筋コンクリート（以下、RC）ラーメン橋脚に適用する際の手法を提案した。

続いて、RC単柱橋脚とRCラーメン橋脚を対象に、当該手法と非線形時刻歴応答解析法・等価エネルギー法の三者について応答結果の比較を行い、ゴム支承のせん断剛性のパラメーターが解析精度に与える影響を考察し、当該解析手法が有する課題について報告した。

2. 等価線形化法によるRCラーメン橋脚の解析

RCラーメン橋脚に等価線形化法を適用する手法として、ここでは、以下のように提案する。

まず、対象とするラーメン橋脚について、以下のような構造条件を仮定した。これにより、RC単柱橋脚に対する等価線形化法は、若干の修正を行うだけで、RCラーメン橋脚に適用可能となると考えられる。

①門型ラーメン橋脚を対象とし、脚柱部の構造形状・断面諸元は左右同一とする。

②ラーメン橋脚のフーチングは一体構造とする。

最大点剛性による等価線形化法を、RCラーメン橋脚に適用する具体的な手順は、以下ようになる。
STEP1: 橋脚の重量に乗じる等価重量算出係数の設定

ラーメン橋脚では、下部構造の重量に横ばりの占める割合が、単柱橋脚に比較して一般に大きい。このため、等価重量算出係数 C_p について、ラーメン橋脚に適用する値を別途算出するのがよいと考えられる。そこで、ラーメン橋脚単体に着目して求めた、水平方向の自重慣性力による橋脚天端の変位と、橋

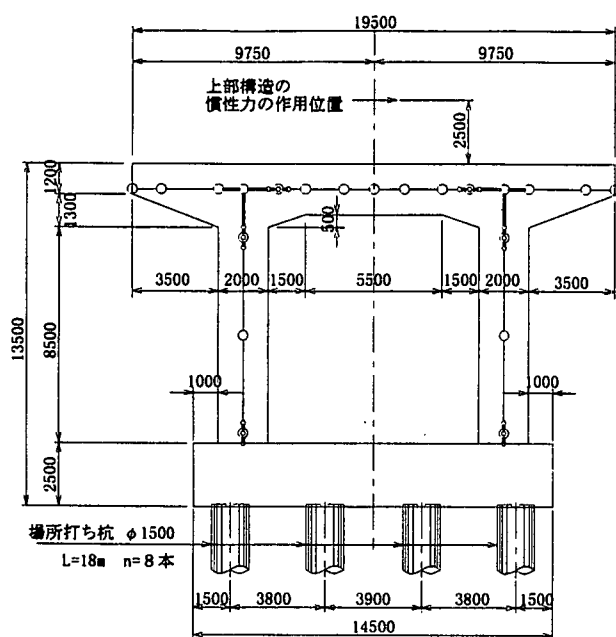


図-1 解析対象となるラーメン橋脚

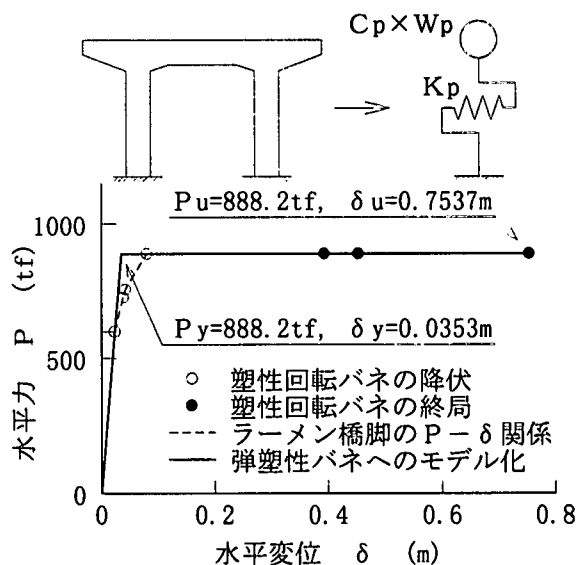


図-2 ラーメン橋脚のP-δ関係

脚の変形性能を表す水平バネ $K_{py}=P_y/\delta_y$ による変位が等価となるよう、 C_p の値を算定するものとした。

STEP2: ラーメン橋脚の水平荷重—水平変位関係

脚柱の上下端部に塑性特性を有する部材を設定したラーメン骨組みモデル（図-1）を準備する。このモデルに対してpush-over解析を行い、ラーメン構造系に関する水平荷重—変位関係骨格曲線（P-δ関係）を求め、塑性化のイベント履歴をプロットする（図-2）。

STEP3: 最大点剛性による等価線形化法の適用

橋脚の荷重—変位関係曲線として、STEP2で算出したラーメン構造系に関する骨格曲線を適用し、単柱橋脚を対象とした最大点剛性による等価線形化法に従って計算を行う。

3. 等価線形化法の解析精度の検証

(1) RC単柱橋脚の場合

対象橋りょうモデルは、支承が固定支持の時に固有周期が0.67秒となるけた橋を想定し、橋脚は、非線形時刻歴応答解析による応答塑性率が2.9となる降伏耐力を対象に検証した。解析ケースは、支承のせん断剛性を、表-1に示すCASE1～CASE6（ $T=1.60\sim 0.67$ 秒）に変化させた場合を考え、等価線形化法・非線形時刻歴応答解析法および等価エネルギー法の各設計方法による上部構造慣性力作用位置における

表-1 単柱橋脚の解析ケース

解析ケース	ゴム支承の剛性 K_B (tf/m)	1 次の固有周期 T_1 (sec)
Case1	1178	1.542
Case2	2356	1.155
Case3	3535	0.996
Case4	11782	0.732
Case5	58909	0.633
Case6	1178182	0.610

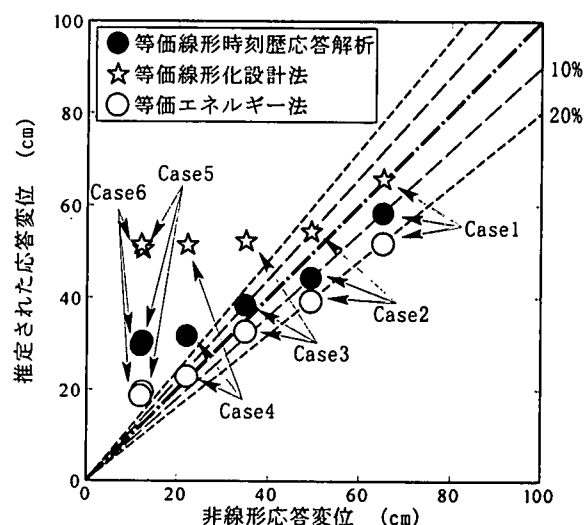


図-3 単柱橋脚の解析結果

応答変位を算出した。応答結果を図-3に示す。グラフの縦軸は、等価エネルギー法および等価線形化法による応答値を、横軸は、非線形時刻歴応答解析法による応答値を示している。

表-2 等価線形化設計法による単柱橋脚の計算結果

項 目	記 号	単 位	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
橋脚の等価剛性	K_{Peq}	tf/m	4460	2635	2172	1673	1542	1528
橋脚の等価減衰定数	h_{Peq}	—	0.223	0.268	0.282	0.298	0.303	0.303
一次振動モードの固有周期	T_1	sec	1.723	1.544	1.519	1.526	1.535	1.532
一次振動モードの減衰定数	h_1	—	0.091	0.172	0.215	0.278	0.299	0.301
減衰定数補正係数	C_D	—	0.822	0.690	0.656	0.624	0.616	0.615
標準加速度応答スペクトル	S_{no}	gal	957	1150	1181	1172	1161	1165
加速度応答スペクトル	S_n	gal	787	794	776	731	715	716
上部構造慣性力作用位置の水平変位	δ_u	m	0.657	0.543	0.523	0.514	0.515	0.515
上部構造慣性力作用位置の水平変位 (非線形時刻歴応答解析)	δ_d	m	0.652	0.494	0.350	0.222	0.124	0.120
非線形時刻歴応答解析に対する比率	δ_u/δ_d	—	1.007	1.100	1.493	2.316	4.156	4.293
支承の変形	δ_B	m	0.506	0.253	0.169	0.051	0.010	0.005
橋脚天端の水平変位	δ_P	m	0.193	0.311	0.368	0.468	0.506	0.510

等価線形化法による解析結果のうち、グラフ中の●印は、等価線形時刻歴応答解析結果を、☆印は、参考文献¹⁾で提案されている応答スペクトルを適用した簡易設計法の応答変位を示す(表-2)。なお、入力地震動は、Ⅱ種地盤用の地震波を用い、応答結果は3波形の平均値を示した。

これによると、今回対象とした橋りょうモデルでは、等価線形化法による応答変位が、短周期領域に移行するに従い非線形時刻歴応答解析結果と比べ大きくなる傾向となった。この理由は、短周期側では、橋脚の応答塑性率が小さくなっており、等価線形化法において、橋脚の等価剛性を最大応答変位の70%の剛性を有する等価パネに置き換えて算出したことに起因するものと考えられる。

次に、等価線形化法と等価エネルギー法による応答変位を比較すると、固有周期によらず、等価線形化法の値が大きく、その差は短周期側に移行するにつれて大きくなることわかる。

(2) RC門型ラーメン橋脚の場合

対象橋りょうモデルは、文献²⁾に示されたRC門型ラーメン橋脚とした。解析ケースは、支承のせん断剛性を、表-3に示す、CASE1~CASE5($T=1.90\sim0.62$ 秒)に変化させた場合を考え、(1)と同様に他の解析手法との比較を行った。ここで、CASE3($T=1.27$ 秒)が文献²⁾と等価なモデルである。

応答結果を、(1)と同様の書式により図-4に示す。

表-3 ラーメン橋脚の解析ケース

解析ケース	ゴム支承の剛性 K_B (tf/m)	1次の固有周期 T_1 (sec)
Case1	1280	1.899
Case2	1920	1.581
Case3	3200	1.272
Case4	6400	0.980
Case5	∞	0.622

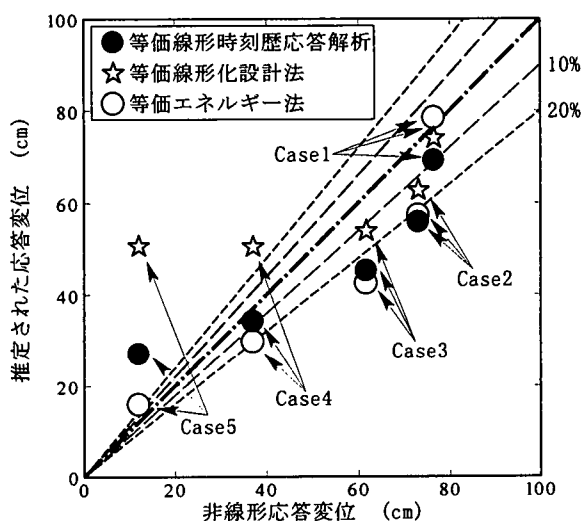


図-4 ラーメン橋脚の解析結果

また、☆印で示す等価線形化設計法による計算結果を表-4に示す。

等価線形化法による応答変位は、CASE1とCASE4では非線形時刻歴解析結果に近い値を示しているが、CASE2およびCASE3では、20%以上の違いが生じた。このため、本稿で提案したラーメン橋に対する等価線

表-4 等価線形化設計法によるラーメン橋脚の計算結果

項 目	記 号	単 位	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
橋脚の等価剛性	K_{Peq}	tf/m	13770	9141	5873	3943	2754
橋脚の等価減衰定数	h_{Peq}	—	0.234	0.276	0.303	0.316	0.324
一次振動モードの固有周期	T_1	sec	1.871	1.632	1.471	1.422	1.444
一次振動モードの減衰定数	h_1	—	0.068	0.101	0.164	0.245	0.324
減衰定数補正係数	C_b	—	0.905	0.798	0.698	0.639	0.608
標準加速度応答スペクトル	S_{II0}	gal	835	837	1246	1319	1285
加速度応答スペクトル	S_{II}	gal	755	837	870	843	781
上部構造慣性力作用位置の水平変位	δ_u	m	0.740	0.627	0.539	0.505	0.507
上部構造慣性力作用位置の水平変位 (非線形時刻歴応答解析)	δ_d	m	0.765	0.731	0.617	0.371	0.120
非線形時刻歴応答解析に対する比率 δ_u/δ_d		—	0.967	0.858	0.874	1.363	4.227
支承の変形	δ_B	m	0.639	0.555	0.333	0.167	0.000
橋脚天端の水平変位	δ_P	m	0.101	0.118	0.234	0.352	0.507

形化法の適用手法では、単柱橋脚に対し同手法を適用した場合に比べ、非線形時刻歴解析との整合性が十分ではないと考えられる。これは、ラーメン橋脚が単柱橋脚と違い、複数の塑性ヒンジを有する構造系であるため、地震時の挙動がより複雑であったことによると推定される。このため、解析精度を向上させるためには、複数の塑性ヒンジの挙動を適切に評価できる、ラーメン橋脚に対応した減衰の評価手法を検討し、これを用いる等、単柱橋脚に対する等価線形化法に対し修正を行う必要があると考えられる。

支承のせん断剛性を剛と仮定したCASE5では、単柱橋脚の短周期領域の応答と同様に、等価線形化法による値が、非線形時刻歴解析結果をかなり上回る結果となった。これは、(1)で推定したものと同様の理由によると考えられる。

等価線形化法と等価エネルギー法による応答変位を比較すると、単柱橋脚と異なり、長周期領域のCASE1およびCASE2において、等価エネルギー法による値が等価線形化法の値を上回った。CASE3～CASE5の傾向は単柱橋脚と似ており、等価線形化法の値が卓越する。また、短周期側に移行するにつれて等価エネルギー法との差が大きくなっている。

4. おわりに

本研究では、等価線形化法をラーメン橋脚に適用

する事例を示した。今回の検討では、単柱形式の橋脚と同様に扱うことができる構造形式に対する解析を行った。

等価線形化法をラーメン橋脚に適用した結果は、短周期領域の解析ケースにおいて、単柱橋脚に対し同手法を適用した結果と似た傾向を示した。一方、長周期領域の解析ケースではやや異なった傾向を示し、非線形時刻歴解析結果との整合性が単柱橋脚に比べ十分ではなかった。

ラーメン橋に対する解析精度を向上させるためには、塑性ヒンジが複数発生するラーメン橋脚に対応した減衰の評価手法を用いる等、単柱橋脚に対する等価線形化手法をさらに修正することが必要であろう。また、柱ごとにフーチングが分離している基礎形式を採用したラーメン橋脚や、ラーメン橋についても、等価線形化手法を適用できるよう、検討を続けてゆく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所: ゴム支承を用いた地震時水平力分散構造を有する道路橋の非線形地震応答の簡易推定法, 1999. 3
- 2) 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 1997. 3