Japan Concrete Institute

コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 21，No. 3，1999

論文　RC2層ラーメン構造物の合理的耐震設計法の提案

秋山充良*1・田中慎介*2・丸中孝通*3・鈴木基行*4

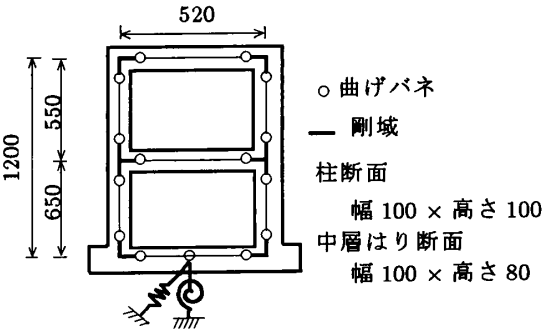
要旨：本研究ではまず，柱や中層はりの剛性をパラメータにとり，RC 2層ラーメン構造物の耐震性に影響を及ぼす部材の降伏過程を時刻歴地震応答解析により検討した．また，エネルギー一定則に基づき弾塑性応答変位を推定し，動的解析との整合性を検討した．そして，高架橋の降伏過程を考慮した静的非線形解析に基づくRC 2層ラーメン高架橋の面内方向を対象とした耐震設計法の提案を行った．

キーワード：RC 2層ラーメン，降伏過程，静的非線形解析，エネルギー一定則，動的解析

1. はじめに

平成8年に道路橋示方書が改訂され，荷重漸増法に基づく1層ラーメン橋脚の耐震設計法が取り入れられた[1)]．その後も，多径間連続ラーメン橋などを対象として，荷重漸増法にエネルギー一定則や変位一定則を取り入れることで非線形系の最大応答変位を推定し，動的解析結果との整合性が検討されてきた．その結果，高次の振動モードが支配的な場合を除いて，1層ラーメン橋脚に対するものと同様の手法により耐震設計を行うことが可能であることが示された[2)]．一般的に用いられる規模のRC 2層ラーメン高架橋も1次振動モードが他のモードに比べ支配的であり，こうしたエネルギー一定則と静的非線形解析に基づく耐震設計法の適用が可能であると考えられる．一方，2層ラーメン高架橋では，各部材降伏の形成順序(降伏過程)が高架橋の応答に与える影響を検討する必要があることや，ダブルデッキ構造などでは，中層はりに過度な塑性化を生じさせないなど塑性ヒンジの発生個所にも留意する必要があると考えられる．

本研究で対象とする鉄道橋の場合には，振動中の変位や残留変位が大きくなると走行安定性を失う問題が生じるため，天端位置の変位により2層ラーメン高架橋の耐震性能を評価することが妥当と考えられる．そこで本研究では，まず柱や中層はりの剛性を変化させることで様々な降伏過程を持つ高架橋に対して動的解析を実施し，降伏過程がRC 2層ラーメン高架橋の天端変位に与える影響を検討した．次に，RC 2層ラーメン高架橋を静的非線形解析から得られる水平力－天端位置変位の関係に着目する1質点モデルとみなし，エネルギー一定則によって近似される非線形最大応答変位と動的解析から得られる最大応答変位との比較を行い，その精度を検証した．そして，設計者の意図する降伏過程を持つRC 2層ラーメン高架橋を静的非線形解析に基づき耐震設計する手法を提示する．



図－1 高架橋モデル　単位：(cm)

2. 動的解析に基づく部材の降伏過程が高架橋応答に与える影響の検討

2.1 高架橋モデル

本研究で対象としたのは，東北新幹線標準設計の高さ10mから14mの線路軸直角方向のRC

*1 東北大学助手　大学院工学研究科土木工学専攻，工修（正会員）
*2 長崎県土木部，工修（正会員）
*3 東北大学大学院　工学研究科土木工学専攻（正会員）
*4 東北大学教授　大学院工学研究科土木工学専攻，工博（正会員）

NII-Electronic Library Service

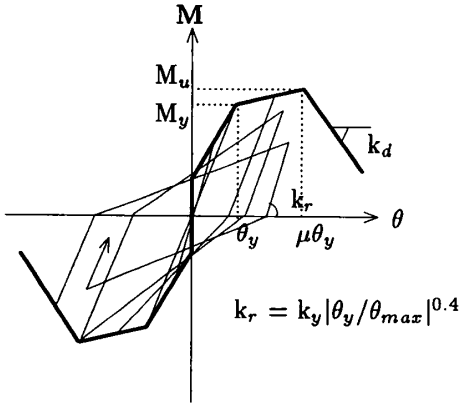


図-2 曲げモーメント-回転角関係

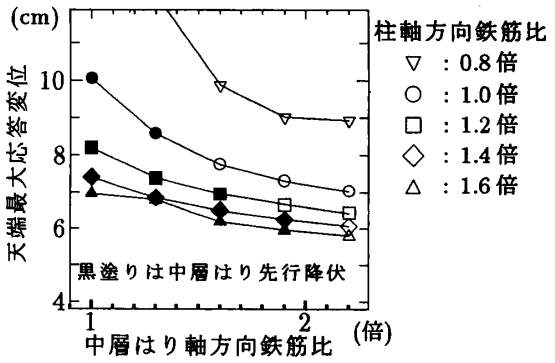


図-3 部材降伏過程と天端最大応答変位の関係

2層ラーメン高架橋である．**図-1** に高さ12mの時の解析対象モデルを示す．図中の太線は剛域を表し，また下端のばねは杭および地盤をモデル化したものである．地盤モデルとしては，耐震設計上の地盤種別I種～III種よりそれぞれ任意に2種類を選定した．なお，本研究では各部材の破壊モードが曲げ破壊型となるようにせん断耐力を各部材に与えている．

2.2 動的解析法および入力地震動

(1) 動的解析法

図-1 のモデルに対して動的解析を行った．部材モデルには，Gibersonモデルを用いた．そして，高架橋の各節点での回転慣性を無視することにより，水平層の変位数にマトリクスを縮小し，これに地盤変形による基礎のスウェイとロッキングを考慮することで3質点4自由度系にモデル化した．また，各要素の減衰定数は，RC部材を0.02，杭・地盤バネを0.10とした．数値積分法は，β=1/4としたNewmarkのβ法を用い，計算の時間刻みは1/500秒とした．

(2) スケルトンカーブおよび復元力特性

高架橋の挙動を考えるにあたり，RC部材の曲げモーメント-回転角関係は，**図-2** に示すようなテトラリニアー型の骨格曲線を持つ耐力低下型モデルとした．この時，部材終局後の剛性k_dは，町田ら[3]の提案した次式を用いた．

$$(-\frac{k_d}{k_y}) = \frac{1.299}{\mu - 1} - 0.0539 \qquad (1)$$

ここにμは部材靭性率であり，次式を用いた[4]．

$$\mu = \mu_0 + (1 - \mu_0)(\sigma_0/\sigma_b) \qquad (2)$$

$$\mu_0 = 12\left(\frac{0.5V_c + V_s}{V_{mu}}\right) - 3 \qquad (3)$$

ここに，σ_0：作用圧縮応力(tf/m^2)，σ_b：釣り合い破壊時の作用軸圧縮応力(tf/m^2)，V_c：コンクリートの負担するせん断力(tf)，V_s：せん断補強鉄筋が負担するせん断力(tf)，V_{mu}：曲げ耐力(tf)

なお，本研究では地震時に生じる柱の作用軸力の変動は考慮しておらず，常時の軸力から求められる曲げモーメント-曲率関係のみを用い，動的解析を行った．RC部材の履歴特性は武田モデル(γ=0.4)を基本とした．また，杭・地盤バネは，道路橋示方書[1]に基づく線形バネとした．

(3) 入力地震動

入力地震波としては，兵庫県南部地震で観測された基盤波形と見なせる神戸ポートアイランド-86mの加速度波形のNS成分を用いた．そして，この地震波を解析対象地盤の基盤部に入力し，重複反射理論を用いて基礎底面での地震波を推定し，動的解析に用いた．

2.3 解析結果

図-1 に示す標準設計高架橋(柱軸方向鉄筋比2.44%，中層はり軸方向鉄筋比1.60%)を基準とし，柱および中層はりの軸方向鉄筋比をそれぞれ0.8～1.6倍，1.0～2.2倍の範囲で変化させた．そして，このような各高架橋と地盤モデルを組み合わせることで動的解析を行った．

図-3 に高さ12mの高架橋とIII種地盤の地盤モデルを選択した時の結果を示す．**図-3** は，柱の軸方向鉄筋比を固定し，中層はりの軸方向鉄筋比を増加させた時の高架橋天端位置での最大

NII-Electronic Library Service

応答変位を示しており，柱の軸方向鉄筋比5種類についてそれぞれ同様な解析を行ったものである．なお，他の高架橋や地盤モデルを組み合わせた時の解析結果も同様な傾向を示した．**図-3**より，柱および中層はりの軸方向鉄筋量を同時に高めることにより，効果的に高架橋の天端最大応答変位を低減できることがわかる．しかしながら，軸方向鉄筋量を増加させることによる高架橋の応答変位の低減への寄与を比較すると，中層はりは柱に比べて小さい．従って，後述するようにラーメン高架橋を天端位置の変位を用いて耐震設計する場合には，柱部材の降伏が先行する高架橋は，中層はりに多くの軸方向鉄筋量を必要とする．この場合には，中層はりのせん断降伏を防ぐために，せん断補強鉄筋量も密に配筋する必要が生じる．また，地震時の損傷配分を考えた場合には，中層はりの損傷でエネルギーの吸収を図ることが効果的と考えられる．よって，2層ラーメン高架橋の天端位置の変位を低減させるためには，中層はりの降伏が先行する範囲内で，各部材の耐力を高めることが望ましいと言える．

次に本研究で解析したすべての動的解析モデルを対象に，柱の曲げ耐力に対する中層はりの曲げ耐力の比 η (= 中層はりの曲げ耐力 / 柱の曲げ耐力) と部材の降伏過程について検討した結果を**表-1**に示す．この結果は地震動の大きさや地盤種別によらず，ラーメン高架橋の各部材が持つ断面諸元固有のものであった．この表から中層はりの曲げ耐力が柱の曲げ耐力の0.7倍より小さいと中層はりが先に降伏し，0.7倍より大きくなると柱が先に降伏することがわかる．上記の結果より，中層はりが上部構造を支持しない2層ラーメン高架橋のように中層はりの塑性化が問題とならない場合には，柱の曲げ耐力と中層はりの曲げ耐力の比 η を0.7以下に抑えるように各部材を設計し，想定する地震力に対して所定の安全性を満足させることが合理的な耐震設計であると言える．一方ダブルデッキ構造などでは逆に η を0.7より大きく設定し，中層はりに過度の塑性化が生じないようにすることが必要である．このように降伏過程を考慮することで，地震時に生じる損傷配分の検討が可能となり，地震後の構造物の損傷状態を意識した耐震設計が可能になる．

表-1 中層はりと柱の曲げ耐力の比が部材の降伏過程に与える影響

η	部材降伏過程
～0.7	中層はり降伏 → 柱下端降伏 → 柱上端降伏 → 中層はり終局 → 柱上端終局 → 柱下端終局
0.7	中層はり・柱下端同時降伏 → 柱上端降伏 → 中層はり終局 → 柱上端終局 → 柱下端終局
0.7～	柱下端降伏 → 中層はり降伏 → 柱上端降伏 → 中層はり終局 → 柱上端終局 → 柱下端終局

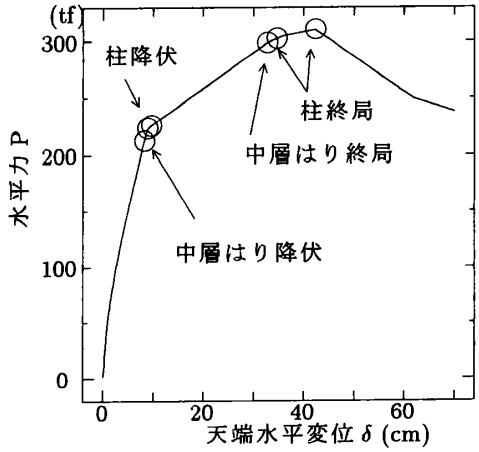


図-4 高架橋全体の水平力－水平変位関係

3. エネルギー一定則による弾塑性応答変位の推定

3.1 静的非線形解析

図-1の骨組みモデルに対して，静的に水平変位を漸増させて2層ラーメン高架橋の耐力および変形性能の検討を行った．各部材の骨格曲線は，2.2で述べたテトラリニアー型を用いた．また，ここでは高架橋自体の水平力－水平変位関係に着目するため，杭・地盤バネを取り外した基礎固定型の高架橋モデルに対して検討した．

2.で解析した様々な降伏過程を持つ高架橋に対して固有値解析を行った結果，本研究で対象

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

とした高架橋モデルは一様に1次モードが他の振動モードに比べて卓越していることが確認された．そこで，静的非線形解析で与える変形モードベクトル $\{\phi\}$ は，1次固有振動モードに比例させた水平変位を1層目と2層目に漸増させることとした．

3.2 ラーメン高架橋の終局変位

解析対象としたのは，高さ10mから14mの高架橋であり，2.で提示した解析例と同様に中層はりと柱の耐力比 η を変化させることで，降伏過程および固有周期の異なる高架橋モデルを準備した．前記の条件で水平変位を漸増させた高架橋全体の水平力－水平変位 (P-δ) 関係の一例を**図-4** に示した．ここに，水平力Pは1層目と2層目の水平力の合計を表し，水平変位は高架橋天端位置の変位を表している．

静的解析における各部材の降伏過程はモデル毎に異なるが，全ての高架橋モデルで6個の曲げバネが降伏点に到達すると高架橋全体のP-δ関係は第2勾配に入り，同じく6個の曲げバネが終局点に到達したときに，P-δ関係は下り勾配に入る．よって本研究では，降伏過程に関わらず2層ラーメン高架橋としての降伏点を6個の曲げバネが降伏点に達した時，終局点を6個の曲げバネが終局に達した時とした．

また，各高架橋モデルの静的解析から得られる降伏過程は，同じモデルに対して各種の入力地震波を用いて動的解析したものと概ね一致した．従って，4.で提案する静的非線形解析に基づいて耐震設計される2層ラーメン高架橋に対して，**表-1** に示した中層はりと柱の曲げ耐力の比 η を決定することで設計者の意図する降伏過程を設定することができると考えられる．

3.3 エネルギー一定則に基づく弾塑性応答変位の推定

静的非線形解析より得られた高架橋全体としてのP-δ関係にエネルギー一定則を適用して弾塑性応答変位を推定する．まず，本研究で用いた部材モデルから得られる高架橋全体のP-δ関係から降伏剛性および降伏点と終局点を結んだ2次剛性を求める．そして，降伏後の勾配が大きいため，2次剛性を考慮した式(4)を用いて地震時の応答変位を推定した．

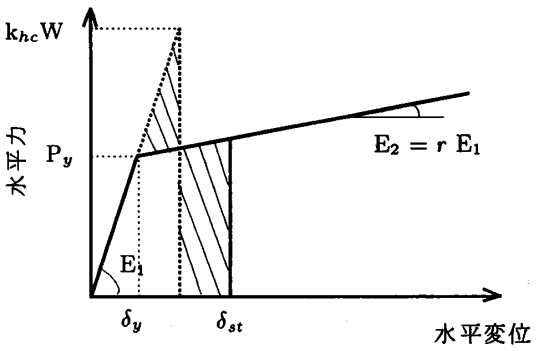


図-5 エネルギー一定則による弾塑性応答値の推定

$$\delta_{st} = \frac{1}{r}\left\{r - 1 + \sqrt{1 - r + r\left(\frac{k_{hc}\cdot W}{P_y}\right)^2}\right\}\delta_y \quad (4)$$

ここに，r：降伏剛性と2次剛性の比，k_{hc}：道路橋示方書に規定される地震時保有水平耐力法に用いる設計水平震度[1]，P_y,δ_y：高架橋全体のP-δ関係より得られる降伏水平耐力(tf)と降伏変位(cm)，W：上部構造と橋脚の等価重量(tf)で式(5)により算出する[5]．

$$W = \frac{gKT^2}{4\pi^2} \quad (5)$$

ここに，T：ラーメン高架橋の1次モードの固有周期(s)，K：ラーメン高架橋の初期剛性(tf/m)，g：重力加速度(m/s^2)

3.4 解析結果

地盤バネを除いた**図-1** の骨組みモデルに対して，動的解析から高架橋天端位置の最大応答変位 δ_{dy} を算定し，式(4)に示したエネルギー一定則に基づく静的非線形解析から得られる弾塑性応答変位 δ_{st} との比較を行った．なお，動的解析に用いた入力地震動は，道路橋示方書[1]に規定されるタイプIIの地震動(各地盤種別に対してそれぞれ3波)である．δ_{dy} を各地盤種別毎にそれぞれ3波を用いて計算し，δ_{st}/δ_{dy} の平均値を算出した．

図-6～図-8 に示す結果より，δ_{st}/δ_{dy} はI種地盤で0.97～1.86程度であり，II種では0.75～1.25，III種で0.73～1.19であり比較的よい精度で動的解析を行うことなく地震時の非線形系の応答変位を推定できていると考えられる．また，いずれの地盤種別においても降伏過程の違いに

NII-Electronic Library Service

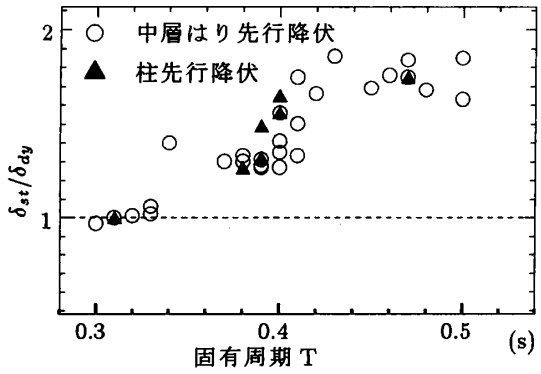


図-6 静的解析と動的解析の比較 (I種地盤)

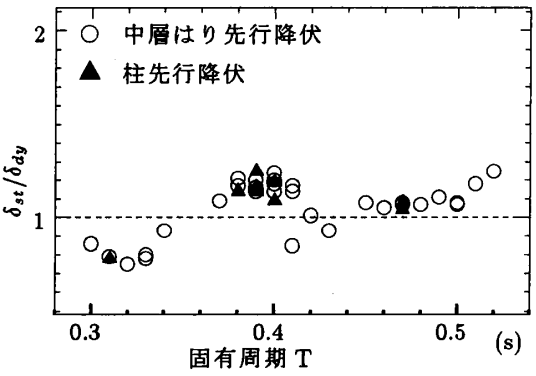


図-7 静的解析と動的解析の比較 (II種地盤)

よる推定精度の差は見られなかった．ただし，3つの地盤種別のいずれの場合においても，高架橋の固有周期が短周期側となるにつれて δ_{st} / δ_{dy} の値が小さくなる傾向にあり，推定された応答変位が動的解析結果に比べ危険側の評価になることがある．また，地盤種別毎の比較から，I種地盤ではほとんどの周期区分において安全側の評価となるのに対して，II種地盤からIII種地盤となるにつれて危険側の解析になることがわかる．1自由度系モデルを対象にして，エネルギー一定則に基づき弾塑性応答変位を推定した時にも，短周期領域やI種地盤からII種地盤，III種地盤となるにつれて，地震時の最大応答変位が過小評価されることが指摘されているが，2層ラーメン高架橋を対象に同様の手法を適用した場合にも同じ傾向が見られる．従って，本研究で提示したモデルに従い最大応答変位を推定する場合，構造物の固有周期や地盤種別によっては危険側の評価になる可能性があることを考慮に入れなければならない．

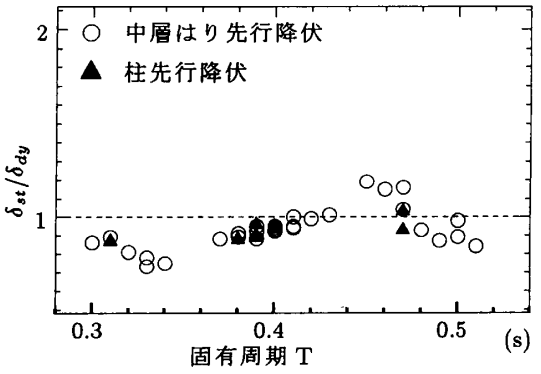


図-8 静的解析と動的解析の比較 (III種地盤)

4. 静的非線形解析に基づく2層ラーメン高架橋の耐震設計法

前章でエネルギー一定則に基づく静的非線形解析を用いた応答変位の推定法について検討した結果，周期領域や地盤種別によっては，危険側の評価になることがわかった．そこで，動的解析より得られる応答変位を過小評価する場合にも高架橋の安全性を確保することのできる許容変位を検討した．

許容変位として，① 静的非線形解析より1つの曲げバネが終局に達する時の変位，② 4つの曲げバネが終局に達する時の変位，③道路橋示方書に規定される式(6)から算出される変位，の3種類の許容変位を定義した．

$$\delta_a = \delta_y + \frac{\delta_u - \delta_y}{\alpha} \tag{6}$$

ここに，δ_a：高架橋の許容変位(cm)，δ_y：高架橋の降伏変位(cm)，δ_u：高架橋の終局変位(cm)，α：安全率(= タイプII地震動に対して1.5)

それぞれの許容変位に基づいて試設計した結果，どの許容変位を用いても設計される断面諸元への影響は小さいことがわかった．また，様々に試設計した高架橋の動的解析より求められる天端最大応答変位 δ_{dy} を，エネルギー一定則により推定した弾塑性応答変位が過小評価していても，δ_{dy} は高架橋の終局変位に対して十分な安全性を確保できていた．各許容変位に対する試設計の例を**表-2**に示した．そこで，実設計への適用に際し，最も安全側の評価を与え，部材の過度の塑性化を防ぐことを目的に式(6)から

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

表-2 各許容変位に対する柱および中層はりの軸方向鉄筋比 ($\eta = 0.65$)

	定義 ①	定義 ②	定義 ③
式(4)による推定変位 (cm)	27.8	27.8	26.4
動的解析結果 (cm)	28.6	28.6	31.1
終局変位 (cm)	37.1	37.1	38.7
許容変位 (cm)	30.1	30.3	28.7
中層はりの軸方向鉄筋比 (%)	2.10	2.10	2.10
柱の軸方向鉄筋比 (%)	2.20	2.20	2.44

算出される許容変位 δ_a を用いることとした.

以上より，エネルギー一定則を取り入れた静的非線形解析に基づく耐震設計法を提案する. 設計法のフローを**図-9** に示す. この中では，まず設計段階で望ましいと考える高架橋の降伏過程や部材の損傷配分を検討し，**表-1** を参考に部材耐力間の階層化を図る. そして，静的非線形解析より算出される弾塑性応答変位が，式(6)の許容変位を満足することで設計を終了する.

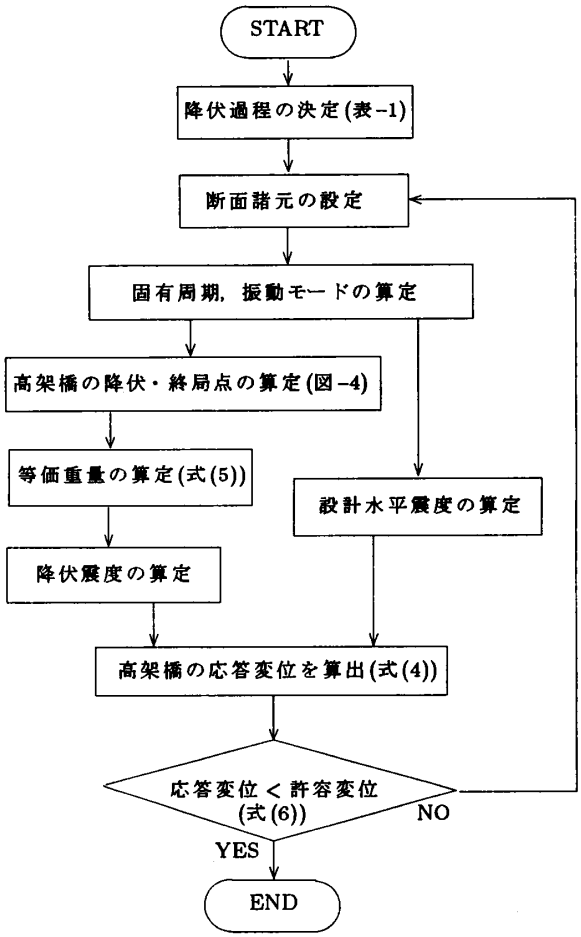


図-9 2層ラーメン高架橋の耐震設計フロー

5. 結論

本研究により得られた結論は以下のとおりである.

(1) 高架橋の降伏過程の相違が，天端応答変位に与える影響を明らかにした. また，設計者の意図する降伏過程を有するRC 2層ラーメン高架橋を設計するための中層はりと柱の耐力の階層化を提示した.

(2) 2次剛性を考慮したエネルギー一定則に基づく静的非線形解析より弾塑性応答変位を算定する手法を提示した. また，動的解析より得られる最大応答変位と比較し，本研究で提示した手法により精度よく2層ラーメン高架橋の地震時応答変位が推定できることを確認した.

(3) 高架橋の降伏過程を考慮した静的非線形解析に基づくRC 2層ラーメン高架橋の面内方向を対象とした耐震設計法を提案した.

参考文献

1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，1996.12
2) 小川富士夫・松村英樹・緒方紀夫：RCラーメン橋の地震時保有水平耐力法の適用に関する検討，土木学会第2回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.19-24，1998.12
3) 町田篤彦・睦好宏史・鶴田和久：地震力を受ける鉄筋コンクリートラーメン構造物の弾塑性応答に関する研究，土木学会論文集，第378号，pp.117-126，1987.2
4) 土木学会：阪神淡路大震災被害分析と靭性率評価式，コンクリート技術シリーズNo.12，1996.7
5) 田崎賢治・運上茂樹・寺山徹：ダブルデッキ2層式RCラーメン橋脚面内方向の耐震計算法，平成10年度土木学会年次学術講演会概要集，I-B128，pp.256-257，1998.9

NII-Electronic Library Service