

鋼製橋脚の要求性能と保有性能

水越秀和¹・宇佐美勉²・鈴木森晶³

¹学生会員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程 (前期課程) (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

²フェロー会員 D.Sc. 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

³正会員 工博 愛知工業大学講師 工学部土木工学科 (〒470-03 愛知県豊田市八草町八千草1247)

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震以降、静的解析に基づく従来の耐震設計法を再考することが求められている。また地震後の機能保持を考慮した耐震設計が重視されるようになっている。本研究では、土木構造物の耐震設計に関する基本フォーマットを要求性能 (Demand) と保有性能 (Supply) の観点から整理し、静的並びに動的照査法の具体的な照査項目を提示する。ついで、レベル2・タイプII地震波に対する動的照査の具体例を示す。

Key Words : Seismic design format, Steel bridge pier, Response displacement, Residual displacement

1. 緒言

兵庫県南部地震以降、機能保持を考慮した耐震設計が重要視されている。しかし、機能保持の照査を明確に規定した示方書は世界にまだないが、土木学会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計研究WGで検討されてきた機能保持を前提とした鋼橋の耐震設計指針案¹⁾がある。本論文は、文献1)の考え方を要求性能 (Demand) と保有性能 (Supply) の観点から整理し、鋼製橋脚の動的照査法の具体例について触れたものである。

2. 耐震設計の基本フォーマット—要求性能と保有性能

耐震設計法に限らず、構造設計法の基本フォーマットは表1のように表されよう³⁾。構造設計とは、構造物が保有する性能 (Supply) が、地震荷重などの外力から構造物に要求される性能 (Demand) を上回るようにすることである。保有性能 (S) および要求性能 (D) の内容は想定する限界状態によって決まり、耐震設計の場合には、表1に示すような内容の例が考えられる。表中、項目0は震度法による1次設計 (許容応力度設計) を表す。照査項目1および3の組み合わせは静的解析による2次設計である。項目1は地震時保有水平耐力照査であり、項目3は地震終了後の残留変位の照査で、機能保持の照査はここで行われる。照査項目2、3および4は動的解析に基づく2次設計である。なお、静的解析による2次設計では、照査項目1の強度照査の代わりに、項目2による変形照査を行うことも可能である。そのときは、照査項目が動的照査と同一になる利点がある。

上記より、合理的な耐震設計法を策定する場合に欠

かせない情報として、地震荷重、保有性能、要求性能の3つが挙げられる。この論文では、地震荷重として道路橋示方書²⁾ (平成8年) のレベル2・タイプII地震波を用い、動的照査 (照査項目2および3) の具体的内容について触れる。

3. 要求性能—最大応答変位および残留変位

鋼製橋脚が水平地震動をうける場合を想定し、橋脚を片持柱の先端に集中荷重を有する1自由度系モデルに置きかえ、線形加速度法を用いて弾塑性地震応答解析を行い、要求性能として、最大応答変位および残留変位を求める。計算に際し、減衰定数 $\xi = 0.05$ 、時間間隔 $\Delta t = 0.01$ 秒とした。

復元力モデルは局部座屈および $P-\Delta$ 効果の影響を考慮したトリリニア型の復元力モデルである2パラメータモデルを使用した⁴⁾。このモデルの詳細に関しては文献4)を参照されたい。

解析用橋脚モデルは、フランジ板幅厚比パラメータ R_f ¹⁾ を0.35に固定し、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ ²⁾ を0.20から0.70まで0.05刻みで変化させる。このように $\bar{\lambda}$ を変化させることにより橋脚の固有周期を概略0.3秒から1.5秒と変化させることができる。地盤種はI種、II種、III種地盤を想定し、道路橋示方書²⁾の震度法に基づき、1次設計を行った。

解析に用いる入力地震波は、道路橋示方書・V耐震設計編²⁾に規定される鉄筋コンクリート製橋脚、鋼製橋脚、基礎、支承部などの地震時保有水平耐力の照査に用いるレベル2・タイプII地震波に適合するように調整された地震波形 (以下レベル2・タイプII地震波) を使用する。このレベル2・タイプII地震波は、兵庫県南部

表 1 耐震設計の基本フォーマットと照査例

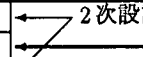
照査項目	フォーマットおよび要素の内容				備考
	要求性能 (Demand) ≤ 保有性能 (Supply) (D ≤ S)				
0	D0	応力 変形	S0	許容応力 許容変形	震度法による 1次設計
1	D1	設計水平荷重	S1	保有水平耐力	 2次設計 (静的照査) 2次設計 (動的照査)
2	D2	最大応答変位	S2	変形性能	
3	D3	残留変位	S3	許容残留変位	
4	D4	累積塑性ひずみ	S4	低サイクル疲労強度	

表 2 許容損傷度の分類と機能保持限界

記号	損傷内容および復旧期間	橋脚限界値 δ_R/h
As	崩壊と見なされる程度の損傷 撤去・建て替えが必要(崩壊)	1/100以上
A	崩壊はしていないが機能を失う 復旧には2カ月以上を要する(大破)	1/100
B	最低限の機能を維持している程度 復旧には2週間～2カ月必要(中破)	1/150
C	補修しながら普通車両が通行可能 数日内の補修で復旧可能(小破)	1/300
D	目視点検後、すぐに通行可能 損傷がほとんどない(無損傷)	1/1000

地震観測地震波を道路橋示方書・V耐震設計編²⁾に規定されるレベル2・タイプIIの標準加速度応答スペクトル S_{II0} に適合するよう調整した地震波であり、動的応答解析用に各地盤種ごとに3波ずつ提供されている。

4. 保有性能—変形性能および残留変位制限値

最大応答変位に関する保有性能すなわち変形性能として δ_{95} を採用する¹⁾。 δ_{95} とは、鋼製橋脚の準静的載荷実験から得られる水平荷重—水平変位履歴曲線の包絡線において、最大水平荷重 H_m の95%の荷重 H_{95} に対応する変位である。 δ_{95} の値は以下に示す推定式¹⁾から求めた。

$$\frac{\delta_{95}}{\delta_y} = 0.0147 \left\{ (1 + P/P_y) R_f \sqrt{\lambda} \right\}^{-3.5} + 4.20 \quad (S = 1.40) \quad (1)$$

ここで、 P = 橋脚に作用する鉛直荷重、 P_y = 全断面降伏軸力である。上式は準静的載荷実験をもとに作成された平均値曲線であり、括弧内の S は条件付標準偏差を表している。 δ_{95}/δ_y の平均値曲線から標準偏差 (S) だけ下方に平行移動することで実験値の下界値曲線を得ることができる。

次に、残留変位に関する保有性能すなわち残留変位制限値は、文献1)で提案されている δ_R/h を指標として採用する(表2)。ここで δ_R は地震動入力後の残留変位、 h は橋脚高さである。文献1)で提案されている

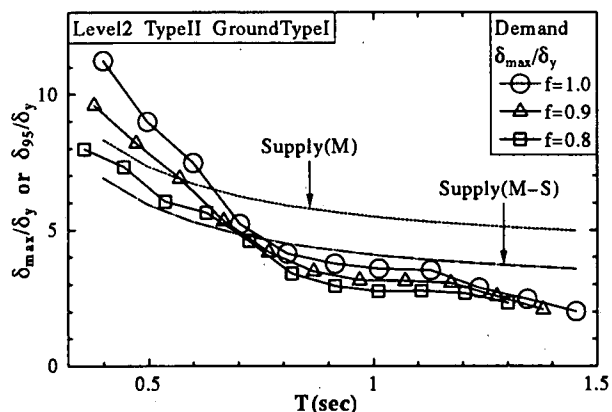
この指標は δ_R/h の値によって橋脚の損傷内容と復旧期間を定めたものである。 δ_R/h の値が小さいほど地震動入力後の橋脚の損傷の程度が軽く、復旧までの期間が短いことを示している。

5. 解析結果

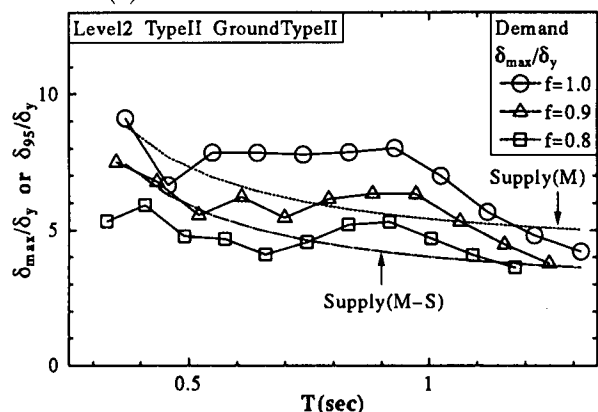
図1、図2にパラメトリック解析結果を示す。図1には、横軸に橋脚の固有周期を、縦軸に最大応答変位をとり、Demandとして最大応答変位を降伏変位 δ_y で無次元化した値(図中の丸印で、 $f = 1.0$ に対応する値で $f < 1.0$ の結果については後述する)を、Supplyとして δ_{95} を降伏変位 δ_y で無次元化した値をプロットしてある。図2には、横軸に橋脚の固有周期を、縦軸にDemandとして残留変位を橋脚高さで無次元化した値を、Supplyとして残留変位制限値をプロットしてある。また、道路橋示方書²⁾に動的応答解析においては、3波程度の波を用いてその平均を動的応答解析の結果とするのがよいとされているので、図1、図2ともに提供されている3波を用いた結果の平均値がプロットしてある。図1、図2ともに(a)がレベル2・タイプII地震波(I種地盤)を、(b)がレベル2・タイプII地震波(II種地盤)を、(c)がレベル2・タイプII地震波(III種地盤)を入力地震波とした場合の結果である。

最大応答変位

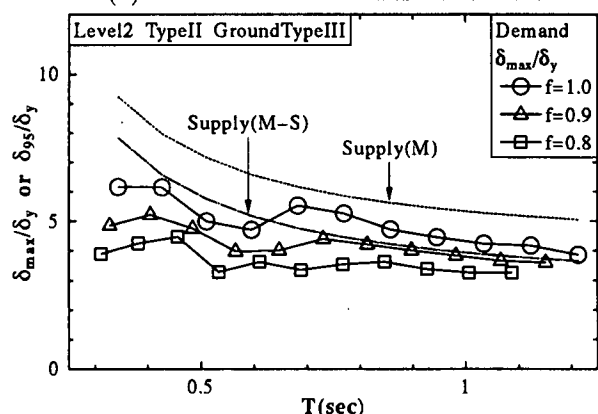
- (1) レベル2・タイプII地震波(I種地盤)を入力した場合、固有周期が0.6秒以下の橋脚ではDemandがSupplyを上回り、危険な応答を示すことがわかる。この領域では最大応答変位が $7\delta_y$ 以上と非常に大きくなっている。固有周期が0.7秒以上ではDemandがSupplyを下回っており、安全と言える。
- (2) レベル2・タイプII地震波(II種地盤)を入力した場合、固有周期が0.55～1.1秒と広範囲でDemandがSupplyを上回っており、DemandがSupplyを下回るのは固有周期が0.45秒付近と1.2秒以上のわずかな領域のみである。このことから、レベル2・タイプII地震波(II種地盤)を入力した場合では、免震化やコンクリートを基部に充填するなど方法、



(a) レベル2・タイプII地震波 (I種地盤)

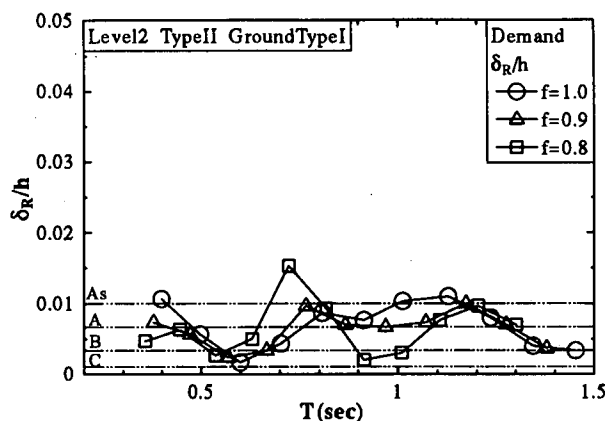


(b) レベル2・タイプII地震波 (II種地盤)

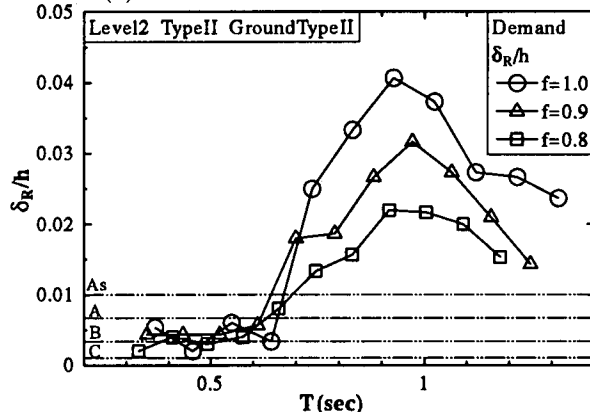


(c) レベル2・タイプII地震波 (III種地盤)

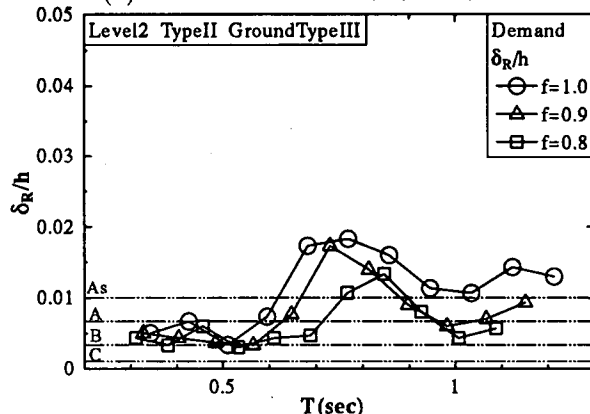
図1 要求性能と保有性能 (最大応答変位)



(a) レベル2・タイプII地震波 (I種地盤)



(b) レベル2・タイプII地震波 (II種地盤)



(c) レベル2・タイプII地震波 (III種地盤)

図2 要求性能と保有性能 (残留変位)

または次章で述べるような方法による最大応答変位を小さくする対策が必要となると言える。

- (3) レベル2・タイプII地震波 (III種地盤) を入力した場合、固有周期の全領域においてDemandがSupplyを下回っており、固有周期については特に慎重になる必要はないと言える。

残留変位

- (1) レベル2・タイプII地震波 (I種地盤) を入力した場合、固有周期が0.8～1.25秒の領域で最大応答変位ではDemandがSupplyを下回っているにもかかわらず残留変位ではAsまたはAランクとなっている。その他の領域ではB、Cランクとなっている。

- (2) レベル2・タイプII地震波 (II種地盤) を入力した場合、固有周期が0.7秒以上の領域でAsランクとなっている。0.7秒以下ではB、Cランクとなっている。

- (3) レベル2・タイプII地震波 (III種地盤) を入力した場合は、最大応答変位に関しては固有周期の全領域でDemandがSupplyを下回っているのに対して、残留変位では固有周期が0.6秒以上の広い領域でAsまたはAランクとなっている。0.6秒以下ではBランクとなっている。

これらのことより、最大応答変位についてDemandがSupplyを下回り、変形性能では安全と判定されても、

残留変位による地震後の機能保持を考慮した照査基準による判定では必ずしも安全とは言えないことがわかる。

6. 低減係数の変更による応答変位への影響

前節で、橋脚と地震波の組み合わせによってはDemandがSupplyを上回り危険な応答を示す場合があることや、最大応答変位について安全であると判定されても、残留変位による判定では橋脚が機能を失っている場合があることを示した。

ここでは橋脚の1次設計に用いる設計条件式(式(2)、(3))の右辺の値を変更することにより安全率を変更すると同等の効果をえられることに着目し、最大応答変位および残留変位を低減する方法について述べる。

震度法によって橋脚の1次設計を行う場合には、式(2)、(3)の設計条件式を満足するように設計される。

$$\frac{\nu P}{P_u} + \frac{C_m \nu M_0}{M_y(1 - \nu P/P_E)} \leq f \quad (2)$$

$$\frac{\nu P}{P_y} + \frac{\nu M_0}{M_y} \leq f \quad (3)$$

ここで、 ν = 安全率 (= 1.14), C_m = 等価モーメント修正係数 (= 0.85), P = 軸力, P_y = 全断面降伏軸力, P_u = 有効座屈長を用いて計算した中心軸圧縮強度, P_E = 有効座屈長を用いて計算したオイラー座屈強度, M_0 = 部材基部の曲げモーメントである。 f = 低減係数であり、震度法による通常の1次設計では $f = 1.0$ として設計を行う。この低減係数 f を通常の 1.0 から 0.9, 0.8, ... と小さくして1次設計を行った橋脚モデルを用いて前章と同様の解析を行い、それらの解析結果を図1、図2にあわせて示してある。図中で丸印が $f = 1.0$ の場合、三角印が $f = 0.9$ の場合、四角印が $f = 0.8$ の場合の結果である。これらの図より以下のことが言える。

- (1) 図1より、低減係数 f を小さくすることによってDemand (最大応答変位) を低減することができる。また、この効果はDemandが大きい場合に顕著である。
- (2) 図1より、低減係数 f が1.0の時にDemand (最大応答変位) がSupplyを上回っている場合でも、低減係数 f を小さくすることによって、DemandをSupplyより小さくすることができる。
- (3) 図2より、低減係数 f を小さくすることによってDemand (残留変位) を低減することができる。また、この効果もDemandが大きい場合に顕著である。
- (4) 図2より、低減係数 f が1.0の時にもともとDemand (残留変位) が小さい (B, Cランク程度)

ものでは、低減係数 f を小さくすることによって場合によってはDemandが大きくなることもある。

以上のように、式(2)、(3)の低減係数 f の値を小さくすることによって、最大応答変位、残留変位ともに小さくすることができる。特に、最大応答変位に関しては、 $f = 1.0$ の時にDemandがSupplyを上回っている場合でも低減係数 f を0.9, 0.8とすることでDemandをSupplyより小さくすることができる。しかしながら、残留変位に関しては、低減係数 f を0.9, 0.8と小さくしても表2に示す照査のランクを改善できない場合がある。このような場合には免震化、コンクリートを基部に充填するなどの対策が必要になると考えられる。

7. 結言

本研究では、文献1)の耐震設計指針案を要求性能と保有性能の観点から再整理し、動的照査法の適用例としてレベル2・タイプII地震波に対する補剛箱形断面鋼製橋脚の終局及び機能保持の照査を行った。本研究で得られた結論をまとめると以下ようになる。

1. 最大応答変位について要求性能が保有性能を下回り終局限界に対して安全であると判定されても、残留変位による照査基準による判定で機能保持照査を満足しない場合がある。特に、II種地盤に対しては、固有周期 T が0.7秒から1.3秒の広い領域でこのような結果が得られた。
2. 設計条件式の右辺である低減係数 f (式(2)、(3)) を1.0より小さくすることにより最大応答変位ならびに残留変位を共に小さくすることができる。しかし、II種地盤上の $T = 0.7 \sim 1.3$ 秒の橋脚では、残留変位に関してその効果があまり期待できない。
3. 鋼製橋脚のみで残留変位を小さくできない場合には、免震支承、コンクリートを基部に充填するなどの対策が必要となり、今後この方面の研究を進める必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計研究WG (主査：宇佐美勉)：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術，1996.7
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編)，丸善，1996.12
- 3) Bertero, V.V. and Uang, C.M.: Issues and future directions in the use of an energy approach for seismic-resistant design of structures, in "Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings", edited by Fajfar, P. and Krawinkler, H., Elsevier Applied Science, London, 1992.
- 4) 鈴木森晶，宇佐美勉，寺田昌弘，伊藤努，才塚邦宏：鋼製箱形断面橋脚の復元力モデルと弾塑性地震応答解析，土木学会論文集，No.549/I-37，pp.191-204，1996.