

(204) 現行設計法に基づく免震設計の比較検討に関する研究

日 本 道 路 公 団 上 高 原 正 弘
豊 橋 技 術 科 学 大 学 大 学 院 猪 野 健 吾
豊 橋 技 術 科 学 大 学 正 員 栗 林 栄 一

1. まえがき

諸外国で橋梁の免震設計が盛んに行われている。これは、アイソレーターやダンパーといった装置を用いて構造物の地震時振動を低減するという考え方の設計法であり、近年、橋への適用が可能となってきたことから脚光を浴びている。日本の道路橋においても、この設計法が導入され始め、免震設計として平成元年に道路橋示方書V耐震設計編に基づく道路橋の免震設計法ガイドライン(案)¹⁾が出された。

しかし、わが国における橋梁設計に関する示方書には、道路橋示方書とコンクリート標準示方書の二種類がある。道路橋示方書は許容応力度設計法のみで規定されている。コンクリート標準示方書に規定されている限界状態設計法は、主に、鉄道橋において採用されているが、近年、道路橋示方書においても、構造部材の塑性化を考慮し、照査及び検討を行うといった、構造物の安全性に適正な裏付けを持つ限界状態設計法の考え方が導入されつつあり、将来的には限界状態設計法の諸項を多く取り入れた設計法に変わると考えることができる。

そこで、本研究では、それぞれの示方書に基づく免震設計法を考慮する必要性があると考え、その研究の第一歩として、それぞれの示方書、つまり許容応力度法と限界状態設計法の二種類によって設計された橋梁に対し免震設計を施し、限界状態設計法により設計された橋梁における免震設計の適合性の検証を目的とし、支間長と径間数の変化によるそれぞれの橋梁の比較検討を行った。

2. 構造の概要及び設計

1) 構造形式の選定

モデル橋梁の選定にあたり、既存の多径間連続橋の実績調査を基に、図-1に示すような、上部工：鋼箱桁、下部工：T型RC橋脚の3径間連続橋を選定した。下部構造及び地盤条件は、軟弱な地盤上に免震橋梁を建設した場合の耐震性が明確でないこととコンクリート標準示方書において設計された橋梁の免震設計の事例が無いことを配慮し直接基礎及びI種地盤とした。径間数・支間長は図-2に示すような、3径間(L=30m:TYPE-1及び50m:TYPE-2)及び5径間(L=30m:TYPE-3)連続橋の3種類を考えた。

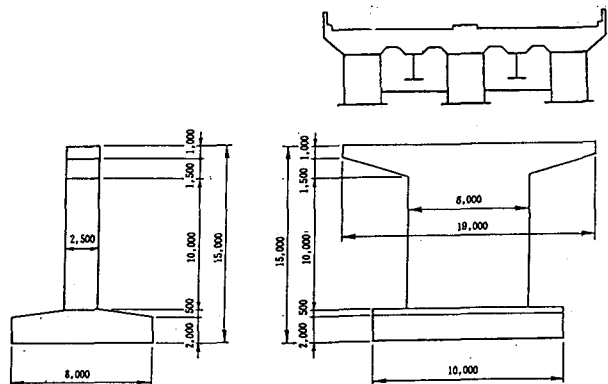


図-1 上部及び下部構造断面

2) 構造のモデル化

対象橋梁の設計振動単位は、連続桁部とこれを支持する各橋脚で構成されるため、これらを図-3に示すような離散型の骨組構造にモデル化した。

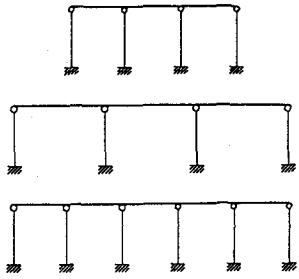


図-2 径関数(3径間L=30,50m,
5径間L=30m)

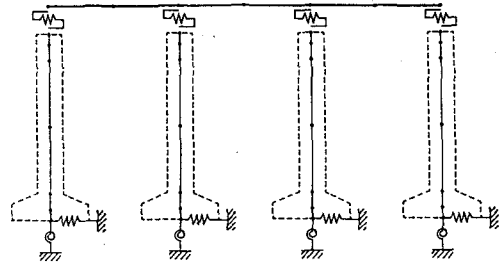


図-3 骨組構造モデル

上部構造は梁要素として評価し、断面積及び断面2次モーメントには、主桁とともに床版を考慮した。下部構造の節点は、張り出し部・脚部・フーチングの重心及びそれらの結合部に設け、脚部は梁要素で、張り出し部とフーチングは、剛体要素でモデル化している。基礎の支持条件は、回転バネ及び水平バネでモデル化した。また、免震橋梁における免震装置は、等価剛性 K_B に相当する水平バネで表し、上部構造と橋脚を連結するような形にモデル化し、非免震橋梁における上部・下部構造間は剛体要素としてモデル化した。

3) 橋脚の設計

橋脚はRCとし、許容応力度設計法による設計においては、道路橋示方書V耐震設計編に基づき、震度法による設計を行った後、地震時保有水平耐力法によって照査を行った。限界状態設計法においては、コンクリート標準示方書に基づき終局限界状態を考慮し設計を行ったが、橋脚断面については、許容応力度設計法による橋脚の断面を約10%削減した断面寸法を用いて設計を行った。

3. 免震設計

1) 免震装置の設計

免震装置としては、ニュージーランドで使用実績の多い鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)を使用した。免震装置の種類は端部橋脚及び中間橋脚の2種類とし、各橋脚に3個ずつ設置した。設計に際しては、下部構造は剛であると仮定し、上部構造の質量と免震装置の剛性から算出される等価固有周期をもとに設計震度および免震装置の設計変位を求める。なお、免震装置の設計変位 u_B の値は、計算の初期には仮定値を用い、 $u_B = k_h \cdot W / K_B$ (K_B :免震装置の等価剛性、 k_h :設計水平震度、 W :免震装置が支持する上部構造重量)を満足する値を繰り返し計算により求める。表-1に免震支承の諸元、表-2に構造形式別の免震支承の動的特性を示す。

表-1 免震装置の諸元

| 項目 | 位置 | 端部橋脚 | 中間橋脚 |
|------------------------------|----|------------|------------|
| ゴムの弾性係数(kg/cm ²) | | 8.0 | 8.0 |
| 平面形状(mm) | | 600×600 | 750×750 |
| ゴムの総厚(mm) | | 18層×12=218 | 14層×18=252 |
| 鉛プラグ直径(mm) | | 130 | 160 |
| 支承全高(mm) | | 435 | 464 |

表-2 免震装置の動的特性

| 項目 | 形式及び位置 | | 3径間・支間長30m | | 3径間・支間長50m | | 5径間・支間長30m | |
|--------------------|--------|--------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|
| | 端部橋脚 | 中間橋脚 | 端部橋脚 | 中間橋脚 | 端部橋脚 | 中間橋脚 | 端部橋脚 | 中間橋脚 |
| 第1剛性 K_1 (kg/cm) | 12,181 | 16,171 | 12,181 | 16,171 | 12,181 | 16,171 | 12,181 | 16,171 |
| 降伏荷重Q(t) | 10.353 | 15.683 | 10.353 | 15.683 | 10.353 | 15.683 | 10.353 | 15.683 |
| 変位 U_B (cm) | 7.65 | 7.65 | 12.08 | 12.08 | 9.13 | 9.13 | 9.13 | 9.13 |
| 等価剛性 K_B (kg/cm) | 3,228 | 4,539 | 2,731 | 3,788 | 3,035 | 4,184 | 3,035 | 4,184 |
| 等価減衰率 h_0 (%) | 23.2 | 24.5 | 14.98 | 16.34 | 20.05 | 19.57 | 20.05 | 19.57 |

2) 設計水平震度の算定

道路橋示方書に基づく免震設計に用いる設計水平震度 k_h ^{2) 3)} は、次式により求める。

$$k_h = C_z \cdot Z_G \cdot C_1 \cdot C_T \cdot C_E \cdot k_{h0} \geq 0.1$$

ただし、

$$C_T \cdot C_E \geq 0.8$$

ここで、 C_z :地域別補正係数、 Z_G :地盤条件別補正係数、 C_1 :重要度別補正係数、 C_T :固有周期別補正係数、 k_{h0} :標準設計水平震度(=0.2)で、これらは道路橋示方書に規定される通りである。 C_E は、免震装置のエネルギー吸収特性に基づく補正係数で、橋の1次のモード減衰定数 h に応じて決定される。

また、コンクリート標準示方書に基づいて設計された橋梁の免震設計に用いた設計水平震度 k_h は、次式を仮定し求めた。

$$k_h = \nu_1 \cdot \nu_2 \cdot \nu_3 \cdot \nu_4 \cdot \nu_5 \cdot \nu_6 \cdot k_0 \geq 0.1$$

ただし、

$$\nu_3 \cdot \nu_6 \geq 1.0 \quad \text{及び} \quad \nu_3 \cdot \nu_4 \geq 0.5$$

ここで、 ν_1 :地域別補正係数、 ν_2 :地盤別補正係数、 ν_3 :固有周期による補正係数、 ν_4 :構造物の限界状態による補正係数、 ν_5 :計算上考慮しない部材の耐震効果による補正係数、 k_0 :標準水平震度(=0.2)で、これらは、コンクリート標準示方書に規定される係数である。 ν_6 は、先の C_E に値する補正係数である。表-3に構造形式及び設計法別の固有周期、表-4に上記の式により求められた設計水平震度を示す。固有周期 T は、橋軸方向、橋軸直角方向ともに、また免震、非免震ともにTYPE-1,TYPE-3,TYPE-2の順に長くなっており支間長に比例する。免震による長周期化の割合は約1.8~2.0倍となった。また許容応力度法よりも限界状態設計法の方が全体的に小さい。設計水平震度 k_h は、限界状態設計法では固有周期同様、TYPE-1,TYPE-3,TYPE-2の順に小さくなり、また免震の方が慣性力が低減されることがわかる。

表-3 固有周期

固有周期

| 形式及び設計法 | 項目 | 免震橋 | | 非免震橋 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 橋軸方向 | 直角方向 | 直角方向 |
| 3径間 (支間長 30m) | 許容応力度 | 1.301 | 1.325 | 0.738 |
| | 限界状態 | 1.167 | 1.191 | 0.673 |
| 3径間 (支間長 50m) | 許容応力度 | 1.527 | 1.561 | 0.892 |
| | 限界状態 | 1.430 | 1.487 | 0.856 |
| 5径間 (支間長 30m) | 許容応力度 | 1.454 | 1.473 | 0.819 |
| | 限界状態 | 1.367 | 1.405 | 0.794 |

表-4 設計水平震度

設計水平震度(橋軸直角方向)

| 形式及び設計法 | 項目 | 免震橋 | 非免震橋 |
|---------------------|-------|------|------|
| | | 免震橋 | 非免震橋 |
| 3径間 (支間長 30m) | 許容応力度 | 0.18 | 0.20 |
| | 限界状態 | 0.15 | 0.25 |
| 3径間 (支間長 50m) | 許容応力度 | 0.16 | 0.20 |
| | 限界状態 | 0.12 | 0.21 |
| 5径間 (支間長 30m) | 許容応力度 | 0.16 | 0.20 |
| | 限界状態 | 0.13 | 0.22 |

4. 動的解析

動的解析の手法は、モード解析による応答スペクトル法を用いた。解析は全体骨組モデルにより行い、検討ケースは免震支承と非免震支承を使用した場合の2ケースについて行った。非免震支承は、免震支承と同じ線形パネを有し減衰定数を5%以下に低減したものをを用いた。許容応力度設計法によって設計された3径間・支間長30mの橋梁の動的解析の応答値と静的解析を比較したのが表-4である。免震支承を使用した場合、静的解析に対し動的解析の応答値は約60%となっ

表-4 橋脚下端部における断面力

た。また、非免震支承を使用した場合、静的解析に対し、主桁の相対変位はほぼ同じであったが、橋脚下端の断面力は約80%となった。これは、免震の減衰効果により橋脚に作用する地震力をかなり低減できることを示し、耐震安全性を向上させることを確認した。しかし、設計水平震度の結果より、限界状態設計法による橋梁に免震設計を行う場合、長周期化により免震装置に過度な影響を及ぼす場合があると考えられる。

| 形式 | 設計法及び方向 | 項目 | 動的解析 (免震) | | 動的解析 (非免震) | | 静的解析 | |
|--------|---------|--------|-----------|--------|------------|--------|--------|--------|
| | | | 端部橋脚 | 中間橋脚 | 端部橋脚 | 中間橋脚 | 端部橋脚 | 中間橋脚 |
| TYPE 1 | 許容応力度 | 橋軸方向 | 1792.1 | 1805.7 | 2631.3 | 2654.3 | 2957.8 | 2979.0 |
| | | 橋軸直角方向 | 1720.7 | 2084.6 | 2163.7 | 2894.1 | 2915.3 | 3348.3 |
| | 限界状態 | 橋軸方向 | 2119.5 | 2132.4 | 3106.1 | 3121.4 | 3494.3 | 3543.5 |
| | | 橋軸直角方向 | 2046.3 | 2457.6 | 2540.3 | 3426.1 | 3463.2 | 4005.1 |
| TYPE 2 | 許容応力度 | 橋軸方向 | 2330.9 | 2354.8 | 3392.8 | 3409.3 | 3814.1 | 3867.6 |
| | | 橋軸直角方向 | 2142.3 | 2539.8 | 2643.2 | 3557.6 | 3595.9 | 4155.2 |
| | 限界状態 | 橋軸方向 | 2539.1 | 2554.4 | 3711.2 | 3729.4 | 4172.4 | 4230.9 |
| | | 橋軸直角方向 | 2486.4 | 2981.9 | 3081.5 | 4148.7 | 4193.4 | 4846.3 |
| TYPE 3 | 許容応力度 | 橋軸方向 | 2032.0 | 2044.1 | 2967.9 | 2982.3 | 3336.1 | 3382.9 |
| | | 橋軸直角方向 | 1837.5 | 2202.6 | 2276.1 | 3062.5 | 3095.4 | 3576.4 |
| | 限界状態 | 橋軸方向 | 2262.1 | 2275.7 | 3305.3 | 3321.5 | 3715.7 | 3767.8 |
| | | 橋軸直角方向 | 2191.5 | 2626.6 | 2714.2 | 3653.3 | 3692.7 | 4261.2 |

5. まとめ

二種類の現行設計法により設計された橋梁に免震設計を行い、固有周期と設計水平震度の比較および橋脚下端部における動的解析を行った。以下に得られた結果をまとめる。

- ① 免震橋梁および非免震橋梁の固有周期は、支間長・径間数の順に影響されるが、その変化のしかたは、免震橋梁および非免震橋梁においての相違はさほど見られない。
- ② 許容応力度法によって設計された橋脚断面を約10%削減した断面を用いて、限界状態設計を行った橋梁の固有周期は短くなる。
- ③ 許容応力度法により設計された免震橋梁の設計水平震度は、非免震橋梁に比べ、約10~20%低減される。また限界状態設計した免震橋梁の場合は、約40%低減される。
- ④ 限界状態設計法により設計された橋梁に、免震設計を行う場合、非免震橋梁の固有周期が0.5秒以下の場合のみ、免震設計の適用が望ましい。
- ⑤ 動的解析結果より、限界状態設計法により設計された橋梁に免震設計を適用することにより、耐震安全性を向上することができる。

参考文献

- 1) (財) 国土開発技術研究センター：道路橋の免震設計法ガイドライン (案)，1989年3月
- 2) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1990年2月
- 3) (社) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編，1991年9月