

複合ラーメン橋と免震橋の耐震性の比較検討

中島章典¹・小関聡一郎²・長瀬嘉理³

¹フェロー 宇都宮大学大学院工学研究部学際先端研究部 (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

²学生会員 宇都宮大学大学院工学研究部学際先端システム学専攻 (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

³(株) 総合技術コンサルタント 構造I部 構造設計課 (〒101-0048 東京都千代田区神田司町 2-7)

1. はじめに

連続高架橋の設計に際しては、耐震性の観点から、長周期化とエネルギー吸収による地震力の低減を期待できる免震支承を採用するのが一般的である。これに対して最近では、高い耐震性や将来的な維持管理の軽減を期待して、鋼上部構造と鉄筋コンクリート橋脚（以下、RC橋脚と呼ぶ）を剛結し、支承を省略した鋼コンクリート複合ラーメン橋が採用される例も増えてきている¹⁾。しかし、RC橋脚などの諸元に着目した場合、両橋梁形式のどちらがより有利であるかはあまり明確にされていない。

そこで、同じ上部構造諸元をもつ免震支承を有する連続桁橋（以下、免震橋と呼ぶ）と複合ラーメン橋を対象とし、特にRC橋脚の基本的な耐震性能の限界状態に対してどちらの橋梁形式がより有利であるのかについて基礎的検討を行った。

2. 検討対象構造

ここでは、図-1に示すような同じ諸元の上部構造断面を有する複合ラーメン橋と免震橋を対象とする。上部構造は、プレストレストコンクリート床版を有する3径間連続非合成の鋼2主桁橋で、B活荷重に対して許容応力度法によって設計を行い、幅員10450mm、床版厚300mm、鋼桁断面の鋼種はSM490およびSM570で、上フランジが650×31mm、ウェブが2700×13mm、下フランジが650×37mmとしている。また、上部構造のスパン構成は40m、50m、40mとしている。

免震橋の概形を図-2に、複合ラーメン橋の概形を図-3に示す。複合ラーメン橋の場合には上部構造と橋脚の結合部が剛結構造であり、免震橋の場合には免震支承を設置している。同じ諸元の上部構造を有する両橋梁形式において、1つの主要な比較項目は、整合性の取れた思想で耐震設計を行った場合のRC橋脚の断面諸元

になると考えられる。なお、上部構造の両端は可動支承とし、橋脚基部は固定とした。また、橋脚高さとして、20、30、40、50mの場合を考える。

ここでは、上述のような観点から、免震橋と複合ラーメン橋のRC橋脚の断面諸元を比較することを目的としている。そこで、耐震設計に際して用いるすべての部分係数はどちらの橋梁形式においても1.0として比較を行っている。

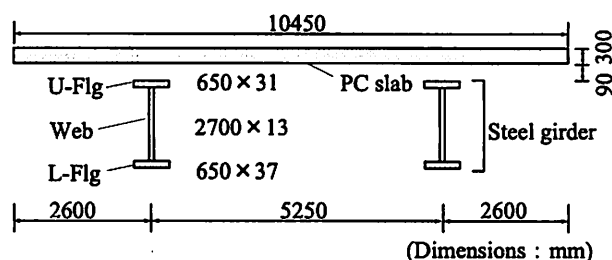


図-1 上部構造断面の諸元

3. 橋脚の耐震設計方法

3.1 設計概要

複合ラーメン橋と免震橋の両橋梁形式のRC橋脚は図-4に示すような、圧縮鉄筋と引張鉄筋をそれぞれ1段有する長方形断面とし、橋軸方向の寸法を断面高さH、橋軸直角方向の寸法を幅Bと定義する。なお、橋梁の設計を想定する地域区分はA、地盤はI種地盤として、対応する設計地震動を設定し震度の算出を行う。

両橋梁形式において、最適な橋脚断面の設計を試み、その橋脚断面の諸元を比較することでどちらの橋梁形式が有利であるかを判断する。ここでの最適な橋脚断面とは、考慮する地震動に対して以下に定義する限界状態に至らない中で、できるだけ断面高さHが小さい橋脚断面とする。

次に限界状態を定義する。レベル1地震動に対しては、橋脚基部断面の引張鉄筋が降伏する時をレベル1

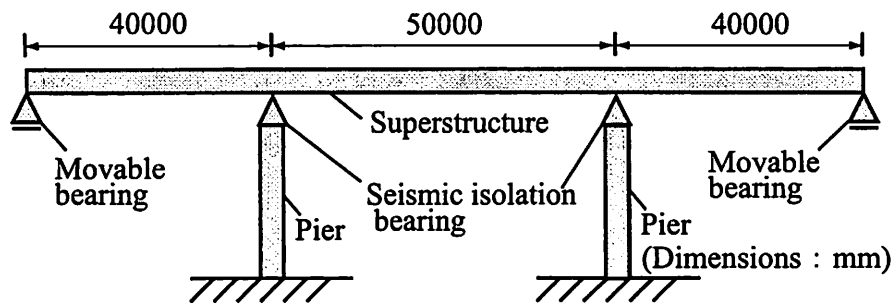


図-2 免震橋の概形

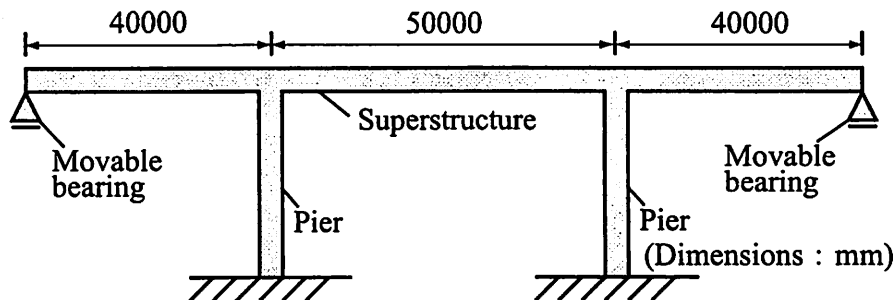


図-3 複合ラーメン橋の概形

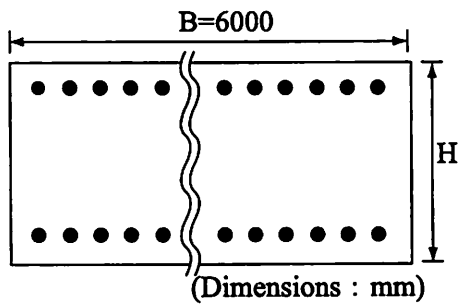


図-4 RC 橋脚の断面形状

地震動の限界状態と定義する。一方、レベル2地震動に対しては、橋脚基部断面の圧縮側コンクリートの最外縁が終局ひずみ(0.0035)に達するときをレベル2地震動の限界状態と定義する。この2つの限界状態に対応する限界値は、後述するプッシュオーバー解析において、橋脚基部のひずみがレベル1地震動の限界状態、あるいは、レベル2地震動の限界状態に達するときの水平力に対応する震度として求めている。

プッシュオーバー解析の例を図-5に示す。右縦軸が水平力、左縦軸が対応する震度を表し、横軸が変位を表している。図中の実線がプッシュオーバー解析で求められた水平力と水平力作用位置の変位の関係を表しており、線上の○および●がそれぞれレベル1限界状態およびレベル2限界状態の位置を表している。震度は水平力を上部構造重量で除して求めている。

最適な橋脚断面を決定するために、対象構造系の固有周期によって決まる応答値(震度)よりも大きい限界値(震度)を有する橋脚断面をプッシュオーバー解析に

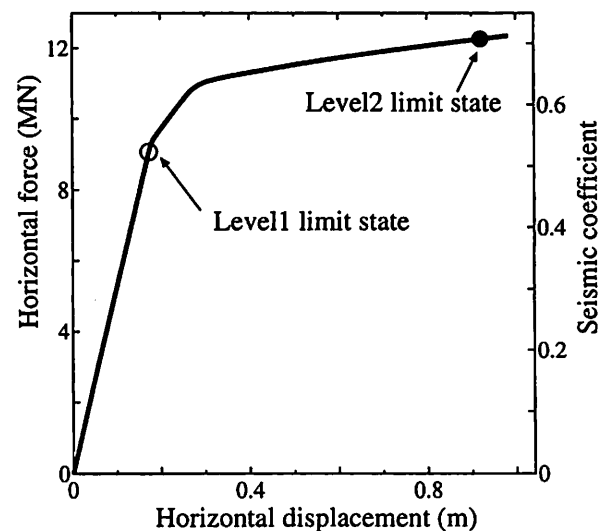


図-5 プッシュオーバー解析の例

よって求める必要がある。そのため、鉄筋本数あるいは橋脚断面高さ H などの橋脚のパラメータを変化させ繰り返し計算を実施する。ここでは、変化させるパラメータとして断面高さ H 、鉄筋径、鉄筋量を考慮している。橋脚断面の幅 B は上部構造の鋼主桁の間隔に合わせて6mに固定した。橋脚の鉄筋にはSD490を用い、その降伏強度は 490N/mm^2 、ヤング係数は 200kN/mm^2 とし、鉄筋径がD32, D35, D38のものをを用いて、圧縮鉄筋および引張鉄筋を同量配置する。また、必要とされる鉄筋のあき(40mm以上)を考慮し、D32を用いる場合には最大82本、D35を用いる場合には最大78本、D38を用いる場合には最大75本までとした。さら

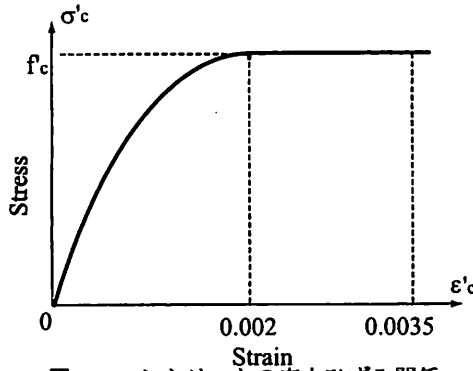


図-6 コンクリートの応力ひずみ関係

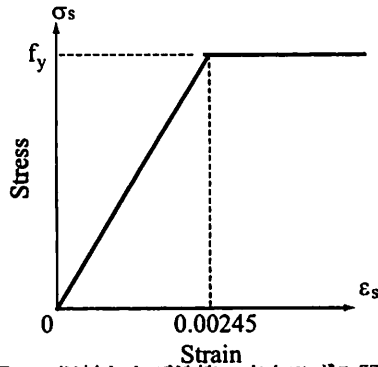


図-7 鋼材および鉄筋の応力ひずみ関係

に、鉄筋量は鉄筋比が0.008～0.06に収まる範囲内で決定した。コンクリートの圧縮強度は40N/mm²で、そのヤング係数は31kN/mm²とした。これらのパラメータの範囲を前提条件として最適な橋脚断面の設計を行う。

3.2 プッシュオーバー解析

以上のような条件の下、橋脚の限界状態を確認するためには、対応する地震動を対象構造系に作用させた時刻歴応答解析を行うことが望ましい。しかし、ここでは、複合ラーメン橋と免震橋のRC橋脚の断面諸元を相対的に比較することが目的であるので、そのための解析方法として、プッシュオーバー解析を用いた。

対象構造系に対して地震による慣性力に対応した静的な水平力を漸増载荷して、橋脚基部の位置のひずみを求め、限界状態に達する水平力を算出した。ここでは、RC橋脚のコンクリートと鉄筋あるいは上部構造のコンクリートと鋼桁の間に平面保持が成り立つと仮定し、RC橋脚および上部構造に平面ファイバー要素を適用した解析モデルを用いている。なお、RC橋脚のコンクリート断面を断面高さ方向に60分割し、圧縮鉄筋および引張鉄筋をそれぞれ4分割している。また、複合ラーメン橋の解析では、上部構造のコンクリート床版部分を高さ方向に60分割し、鋼桁部分は上下フランジをそれぞれ2分割、ウェブを6分割している。そして、コンクリートの応力ひずみ関係には図-6のような

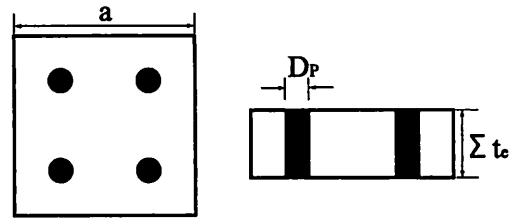


図-8 免震支承の寸法

2次放物線と直線からなる関係を、鉄筋および鋼桁には図-7に示すようなバイリニア型の応力ひずみ関係を用いている。

免震橋のプッシュオーバー解析では、RC橋脚を10要素に分割してモデル化している。一方、複合ラーメン橋の場合、RC橋脚は免震橋と同様10要素に分割し、上部構造は24要素（基本的に要素長さ5m）に分割している。ただし、上部構造とRC橋脚の剛結部の範囲（上部構造とRC橋脚が重なる範囲）には剛域を設けるために、非常に剛な要素を配置し、剛域を表す要素に隣接する要素の長さは、剛域を表す要素の長さ（橋脚の断面高さ）に合わせて要素長さを調節して解析モデルを構成している。

3.3 免震橋のRC橋脚の設計

前述のように設計されたRC橋脚の断面諸元を比較する免震橋と複合ラーメン橋では、応答値の算定方法が異なるので個別に説明する。まず、免震橋のRC橋脚の設計方法を説明する。

1. 免震支承の形状の仮定

免震支承は、図-8に示すような鉛プラグ入り積層ゴム支承で、1支承の中の鉛プラグの個数は4個とした。ここで、 D_p は鉛プラグの直径、 $\sum t_e$ は総ゴム厚を表している。積層ゴム支承は一辺が長さ a の正方形とし、形状を仮定する際、以下の条件を満足するものとする。

- (a) ゴム支承1個の鉛直反力による最大許容圧縮応力度 $\leq 7.84\text{N/mm}^2$
- (b) $1.25 < (\sum t_e / D_p) < 5.0$
- (c) $(a / \sum t_e) \geq 4$

これらの条件を満足することを確認し、以下の計算を行う。

$$A_r = a^2 \quad (1)$$

$$A_p = \left(\frac{D_p}{2}\right)^2 \pi \times 4 \quad (2)$$

ここで A_r は免震支承1個の総断面積、 A_p は免震支承1個の鉛プラグの総断面積である。式(1)、式(2)から導かれた A_r 、 A_p を用いて免震支承1個の

純断面積 A_R を求める。

$$A_R = A_r - A_p \quad (3)$$

これによって、免震支承の基本形状が決定される。

2. 免震支承の設計変位および等価剛性の仮定

免震支承の設計変位 u_B を仮定する。レベル 1 地震動に対しては、総ゴム厚 $\sum t_e$ の 20% 程度に設計変位を設定する。この値に基づいて、以下の手順により、免震支承の有効設計変位 u_{Be} および鉛、ゴム支承のせん断ひずみ γ を求め、さらに、免震支承の最大せん断力 F を算定する。

$$u_{Be} = 0.7u_B \quad (4)$$

$$\gamma = u_{Be} / \sum t_e \quad (5)$$

$$F = A_R G \gamma + A_p q \quad (6)$$

ここに、 G はゴムのせん断弾性係数で 98N/mm^2 で、 q は鉛プラグの最大せん断応力 (N/mm^2) であり、せん断ひずみ γ の大きさに応じて決定される。

$$q = -27.7928\gamma^2 + 18.0124\gamma + 8.33 \quad (7)$$

$$(0 \leq \gamma \leq 0.5)$$

$$q = 2.7734\gamma^2 - 12.5538\gamma + 15.974 \quad (8)$$

$$(0.5 \leq \gamma \leq 2.0)$$

以上より、レベル 1 地震動に対する免震支承の等価剛性 K_B 、免震支承をバイリニア型にモデル化した場合の 1 次剛性 K_1 および 2 次剛性 K_2 、降伏せん断力 Q_d が以下の式を用いて求められる。

$$K_B = F/u_{Be} \quad (9)$$

$$Q_d = A_p q_0 \quad (10)$$

$$K_1 = 6.5K_2 \quad (11)$$

$$K_2 = (F - Q_d)/u_{Be} \quad (12)$$

ここに、 q_0 は免震支承の降伏せん断力時における鉛プラグの降伏せん断応力 8.33N/mm^2 である。

3. 固有周期の算出

免震支承の等価剛性 K_B が求まったので、1 橋脚上の免震支承の個数 $n_p (= 2) \times K_B$ をゴム支承のばね定数 k_{bi} とする。これより、橋脚のばね定数 k_{pi} 、橋脚と免震支承の合成ばね定数 k_{gi} 、橋梁の固有周期 T を以下の式を用いて求める。

$$k_{pi} = \frac{3EI_i}{L_i^3} \quad (13)$$

$$k_{gi} = 1 / \left(\frac{1}{k_{pi}} + \frac{1}{k_{bi}} \right) \quad (14)$$

$$T = 2.01 \sqrt{W / \sum k_{gi}} \quad (15)$$

橋脚と免震支承の合成ばね定数 k_{gi} は、2 つのばねが直列につながれている時の合成ばね定数算出式を用いている。ここで、 W は上部構造の全重量と橋脚重量の 80% を足し合わせたもので、RC 橋脚の重量も考慮している。

- レベル 1 地震動の設計水平震度の標準値の算出
固有周期 T を用いて、道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編)²⁾ に定められている設計水平震度 k_{h0} がより求められる。同じ諸元の橋脚 2 本が水平力を受けるので、1 本の橋脚に作用する水平力 H_i とその時の各免震支承の水平変位 u は以下の式で求められる。

$$H_i = k_{h0} W / 2 \quad (16)$$

$$u = H_i / k_{bi} \quad (17)$$

得られた変位 u が仮定した免震支承の設計変位 u_B の $\pm 10\%$ 以内で一致しない場合には、免震支承の設計変位を変更し、両者が許容できる範囲で一致するまで繰り返し計算を実施する。

仮定した設計変位が満足された時点で、レベル 1 地震動に対する応答値としての震度 k_{h0} が決定する。

5. レベル 2 地震動の設計水平震度の算出

ここまでの手順において、既に、免震支承の形状、寸法は決定しているので、まず、レベル 2 地震動に対する免震支承の設計変位 u_B を仮定する。この時、設計変位は総ゴム厚 $\sum t_e$ の 200% 程度とする。免震支承の設計変位が仮定されれば、レベル 1 地震動の場合と同様の手順により、橋梁の固有周期と免震支承の等価剛性が求まる。また、各免震支承の減衰定数が次式より算定される。

$$h_B = \frac{2Q_d \{u_{Be} + Q_d / (K_2 - K_1)\}}{\pi u_{Be} (Q_d + u_{Be} K_2)} \quad (18)$$

さらに、ここに求めた各免震支承の減衰定数に基づいて、橋梁の減衰定数が算定される。

参考のために、ここで対象とした免震橋に対して算定された免震支承の減衰定数 h_B および免震橋の減衰定数 h を表-1 に示す。

以上から、橋梁の固有周期に加えて減衰定数が求められたので、固有周期に基づいて道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編)²⁾ に定められているレベル 2 地震動タイプ I の設計水平震度の標準値、タイプ II の設計水平震度の標準値が求められる。そして以下の関係によって、免震支承の等価水平震度 k_{hem} が求まる。

$$k_{hem} = c_s k_{hc0} \quad (19)$$

$$c_s = c_E \frac{1}{\sqrt{2\mu_m - 1}} \quad (20)$$

表-1 免震橋の減衰定数と免震支承の減衰定数

橋脚高さ (m)	20	30	40	50
橋梁の減衰定数 h	0.261	0.243	0.248	0.233
免震支承の減衰定数 h_B	0.274	0.263	0.275	0.266

ここに、 c_s は式 (20) で与えられる構造物補正係数であり、 c_E は免震橋の減衰定数に基づく補正係数で、橋梁の減衰定数に基づいて算出される。なお、 μ_m は免震設計に用いる場合の橋脚の許容塑性率であり、以下の式から求められる。

$$\mu_m = 1 + \frac{\delta_u - \delta_y}{\alpha_m \delta_y} \quad (21)$$

ここで、 δ_y, δ_u は橋脚の降伏変位ならびに終局変位である。降伏変位ならびに終局変位は、単柱式橋脚にモデル化した橋脚に水平力を作用させるプッシュオーバー解析によって求めている。降伏変位は橋脚基部の引張鉄筋が降伏する時の橋脚の頂部の変位、終局変位は橋脚基部の圧縮縁位置のコンクリートのひずみが終局ひずみに達する時の橋脚の頂部の変位である。また、 α_m は免震橋における鉄筋コンクリート橋脚の許容塑性率を算出するための安全係数で以下の式で与えられる。

$$\alpha_m = 2\alpha \quad (22)$$

ここで、上式中の α は道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編)²⁾ に与えられるものを用いている。なお、ここでは照査する耐震性能を耐震性能 2 としている。

6. 限界値の算定法

プッシュオーバー解析において、単柱式橋脚にモデル化した橋脚頂部に水平力を作用させ、橋脚基部断面の引張鉄筋が降伏する時の水平力に対応する震度をレベル 1 限界値とする。また、橋脚基部断面の圧縮側コンクリートの最外縁が終局ひずみに達する時の水平力に対応する震度をレベル 2 限界値とする。この限界値が、前述の応答値を下回らない範囲で、できるだけ限界値に近づくような最適な橋脚断面を繰り返し計算によって決定する。

3.4 複合ラーメン橋の RC 橋脚の設計

複合ラーメン橋の場合には、RC 橋脚と上部構造の全体系を平面骨組要素によりモデル化した解析モデルを用い、線形解析あるいはプッシュオーバー解析を行って、固有周期を算定し、また、応答値、限界値を算定している。以下にその手順を説明する。

1. 固有周期の算出

複合ラーメン橋の固有周期は以下の式を用いて算出する。

$$T = 2.01\sqrt{\delta} \quad (23)$$

$$\delta = \frac{\int w(s)u(s)^2 ds}{\int w(s)u(s) ds} \quad (24)$$

ここで、 T は固有周期、 $w(s)$ は上部構造および下部構造の位置 s における対応する要素長さの重量 (kN/m)、 $u(s)$ は上述の線形解析モデルを用いて、上部構造重量と橋脚重量に相当する水平力をそれぞれの慣性力の作用位置 (解析モデルの節点) に作用させた場合にその方向に生じる位置 s の変位 (m) (節点の変位) である。これによって、橋脚高さを変えたそれぞれの解析モデルの固有周期が算定される。

2. レベル 1 地震動の設計水平震度の算出

上述においてそれぞれの対象構造系の固有周期が算定されるので、設計水平震度の標準値 k_{h0} は免震橋と同様に道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編)²⁾ から求められる。ここでは、地域別補正係数 c_z を 1.0 としているので、設計水平震度の標準値 k_{h0} に等しい震度 k_h がレベル 1 地震動に対する応答値となる。

$$k_h = c_z k_{h0} \quad (25)$$

3. レベル 2 地震動の設計水平震度の算出

レベル 2 地震動に対する応答値は、RC 橋脚の塑性変形による震度の低減を行う必要がある。まず、レベル 1 地震動の場合と同様に対象構造系の固有周期が算定されているので、道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編)²⁾ に基づいて、設計水平震度の標準値 k_{hc0} を求める。そして、次式により地域別補正係数 c_z 、構造物特性補正係数 c_s による震度の低減を行う。ただし、ここでも地域別補正係数 $c_z = 1.0$ である。

$$k_{hc} = c_s c_z k_{hc0} \quad (26)$$

構造物特性補正係数は塑性変形による震度の低減を考慮するための係数であり、対応する構造系の塑性率を求める必要がある。ここでは、対象構造系のプッシュオーバー解析において求めた RC 橋脚の鉄筋降伏時の降伏変位 δ_y および圧縮縁コンクリートが終局ひずみに達するときの終局変位 δ_u を

表-2 複合ラーメン橋と免震橋の RC 橋脚の設計結果

	複合ラーメン橋				免震橋			
橋脚高さ (m)	20	30	40	50	20	30	40	50
橋脚断面高さ H (m)	1.8	2.4	2.0	2.2	2.1	2.7	3.4	3.7
鉄筋径 (mm)	D32	D32	D35	D38	D32	D35	D35	D38
鉄筋本数 (本)	82	82	78	78	82	78	78	73
鉄筋比	0.012	0.009	0.012	0.011	0.010	0.009	0.008	0.008
固有周期 (s)	0.555	0.721	1.350	1.720	2.839	3.309	3.798	4.283
レベル 1 応答値	0.200	0.200	0.174	0.148	0.172	0.145	0.152	0.114
レベル 1 限界値	0.524	0.475	0.354	0.327	0.336	0.333	0.326	0.303
レベル 2 応答値	0.682	0.662	0.433	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
レベル 2 限界値	0.707	0.668	0.455	0.411	0.402	0.402	0.409	0.402

用いて、以下の式より塑性率 μ_m を算定する。

$$\mu_m = 1 + \frac{\delta_u - \delta_y}{\alpha \delta_y} \quad (27)$$

ここに、 α は許容塑性率の算出に用いる安全係数である。ここでは、耐震性能 2 を満足する安全係数を採用している。以上の式により塑性率 μ_m が算定されるので、構造物特性補正係数 c_s は以下の式より求められる。

$$c_s = \frac{1}{\sqrt{2\mu_m - 1}} \quad (28)$$

ここで求められた構造物特性補正係数 c_s を式 (26) に代入することによりレベル 2 地震動に対する応答値としての震度が求まる。

4. 限界値の算定法

レベル 1、レベル 2 地震動に対して設定した RC 橋脚の限界状態は免震橋の場合と同じである。つまり、複合ラーメン橋を平面骨組要素にモデル化した解析モデルに対して、プッシュオーバー解析を行い、RC 橋脚基部の引張鉄筋が降伏する状態および圧縮縁コンクリートが終局ひずみに達する状態を求め、上述で設定された応答値をわずかに上回る限界値をもつ RC 橋脚を設計する。

4. 複合ラーメン橋と免震橋の RC 橋脚の設計結果および考察

以上のような手順で設計した橋脚高さ 20、30、40、50m に対応する複合ラーメン橋および免震橋の RC 橋脚断面の諸元、鉄筋径、鉄筋本数、鉄筋比および応答値と限界値に対応する震度を表-2 に示している。なお、レベル 2 ではタイプ I とタイプ II を比べてより応答値が大きくなる方の値を採用して RC 橋脚を設計している。

以上の結果をみると、複合ラーメン橋および免震橋とも、RC 橋脚断面はレベル 2 地震動において、応答値

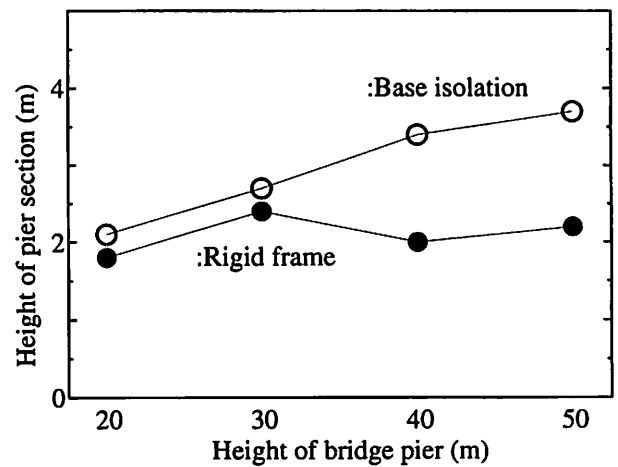


図-9 橋脚断面高さおよび固有周期と橋脚高さの関係

表-3 コンクリート床版の最大引張りひずみ

橋脚高さ (m)	20	30	40	50
最大引張りひずみ ($\times 10^{-6}$)	1324	1550	1324	1397

が限界値よりもわずかに大きいように設計されており、レベル 1 地震動に対する応答値は、その限界値よりもかなり小さい値となっていることがわかる。また、免震橋では、すべての橋脚高さにおいてレベル 2 地震動に対応する固有周期が 2.8 秒以上と長周期であるため、算定される応答値としての震度が 0.4 を下回る。そのため、レベル 2 地震動に対する応答値は道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編)²⁾ で規定される下限値の 0.4 に設定されている。一方、複合ラーメン橋においても、橋脚高さが 50m になると、結果的に算定される応答値としての震度が 0.4 を下回るために、レベル 2 地震動の応答値は下限値の 0.4 となっている。

免震橋と複合ラーメン橋の橋脚断面の比較を行うために、橋脚高さごとに、免震橋と複合ラーメン橋の RC 橋

表-4 温度変化の影響を調べる荷重の組合せ

作用の種類	項目		作用係数（作用修正係数）
永続作用	死荷重	上部構造の自重	1.0
変動作用	活荷重	B 活荷重	1.65
	衝撃	B 活荷重	1.65
	温度変化の影響	$\pm 40^{\circ}\text{C}$	1.0

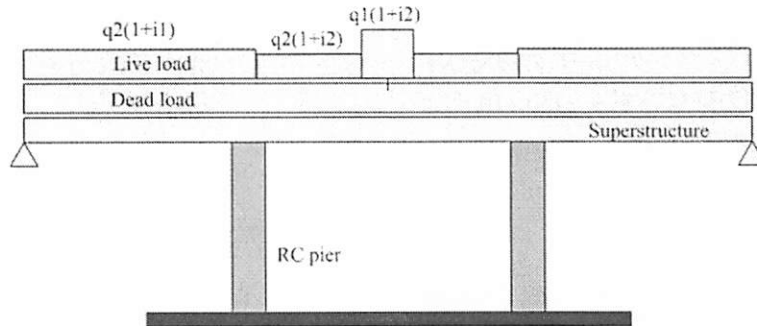


図-10 温度変化の影響を調べるための死荷重および活荷重の載荷状況

脚の断面高さ H と橋脚高さの関係を図-9 に示す。図の縦軸は断面高さ H を丸印で示している。この図から、免震橋の RC 橋脚断面高さに比較して複合ラーメン橋の RC 橋脚の断面高さの方が小さく、特に、橋脚高さが 40m 以上でその差は大きいことがわかる。

なお、橋脚高さが 40、50m において複合ラーメン橋は長周期となるために、設計水平震度の標準値が、橋脚高さ 20、30m の場合よりも低減される。そのために、橋脚高さ 40、50m の場合と橋脚断面高さが、橋脚高さ 30m の場合の橋脚断面高さよりも小さくなっている。

5. 複合ラーメン橋のコンクリート床版の引張ひずみ

レベル 2 の限界状態に対応する地震動が作用する複合ラーメン橋では、すべての橋脚高さにおいて上部構造の剛結部付近の負の曲げモーメントによりコンクリート床版には引張ひずみが生じ、ひび割れが発生する可能性がある。そこで、レベル 2 限界値の状態における上部構造コンクリート床版の引張ひずみを確認している。

表-3 には、複合ラーメン橋のレベル 2 の限界状態において、解析モデルの剛結部（剛域とした要素）に接する上部構造端部のコンクリート床版上縁の最大引張ひずみをまとめている。この表から、橋脚高さによらず最大引張ひずみは $1400 \sim 1500 \times 10^{-6}$ 程度となることがわかる。このような引張ひずみが生じることに對しては、鉄筋による補強を施すなど別途対策を考慮する必要があると考えられるが、この点については今後の課題としたい。

6. 複合ラーメン橋における温度変化の影響

複合ラーメン橋では、2 本の RC 橋脚が上部構造に剛結されているが、温度変化による上部構造の伸縮を RC 橋脚が拘束するために、RC 橋脚には温度応力が生じる。同じ温度変化の大きさが生じる場合には、上部構造の伸縮の大きさは同じであるため橋脚高さが小さい場合ほど温度変化によって橋脚に生じる温度応力は大きくなると考えられる。

そこで、橋脚高さが 20m の複合ラーメン橋を対象として、永続作用、温度変化の影響を含む変動作用の組合せが作用することによって RC 橋脚基部に生じる温度応力を調べる。ここで、考慮する作用の組合せと項目およびその作用係数は表-4 示すように設定している。

なお、B 活荷重は道路橋示方書・同解説 (I 共通編)³⁾ の考え方にに基づき、中央径間のセンター 10m 部分には、幅員方向 5.5m まで 10kN/m^2 、それを越える範囲は 5kN/m^2 として単位長さあたり分布荷重 q_1 を算定している。また、それ以外の部分では、幅員方向 5.5m まで 3.5kN/m^2 、それを越える範囲 1.75kN/m^2 として、単位長さあたり分布荷重 q_2 を算定している。

一方、衝撃係数についても、道路橋示方書・同解説 (I 共通編)³⁾ の考え方にに基づき、側径間の衝撃係数 $i_1 = 20/(50 + 40)$ 、中央径間の衝撃係数 $i_2 = 20/(50 + 50)$ として算定し、作用修正係数 1.65 を考慮して、側径間に載荷する分布荷重、中央径間に載荷する分布荷重をそれぞれ算定している。

さらに、温度変化 40°C の影響は、線膨張係数 10×10^{-6} として、中央径間にのみ 400×10^{-6} のひずみ

を与えることによって考慮している。

温度変化の影響を調べる解析モデルには、プッシュオーバー解析に用いたものをそのまま用いる。そして、図-10 に示すように死荷重および活荷重に相当する静的荷重を与えた後に、上部構造の中央径間部分に 40°C の温度変化に対応した 400×10^{-6} のひずみを与え、それによって生じる RC 橋脚基部の応力、ひずみを求めた。

その結果、得られた RC 橋脚基部の圧縮縁コンクリートの最大ひずみは 135×10^{-6} であり、引張鉄筋位置のひずみは 172×10^{-6} であり、コンクリートの終局ひずみ 3500×10^{-6} および鉄筋の降伏ひずみ 2450×10^{-6} よりもかなり小さいことが確認された。

7. まとめ

本報告では、同じ諸元の上部構造断面をもつ免震橋と複合ラーメン橋を対象とし、RC 橋脚の基本的な耐震性能の限界状態に対して、どちらの橋梁形式が有利であるのかについて基礎的検討を行った。その結果、ここで検討した範囲では、橋脚高さが高くなる程、免震橋よりも複合ラーメン橋の方が、RC 橋脚の断面諸元の観点からは有利な結果となった。また、複合ラーメン橋に対する温度の影響は地震の影響よりも小さいことを確認した。

参考文献

- 1) 岩立次郎, 忽那幸浩: 剛結構造—鋼上部構造とコンクリート橋脚の剛結—, 橋梁と基礎, 建設図書, 2002.8.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編), 丸善, 2002.3.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (I 共通編), 丸善, 2002.3.