

# 高橋脚橋梁の耐震設計

## Design of Earthquake-Resistant High Pier Bridges

梅澤 宣雄\*  
Nobuo UMEZAWA

### 1. はじめに

橋梁の地震による被害は、一般的に下部構造に多く、支承部を除く上部構造が直接地震により被害を生ずることに比較的少ないとされている。しかし、下部構造の移動・沈下・傾斜・損壊、支承部の破壊、アンカーボルトの切断や引抜、セットボルトの破損、これらにともなう上部構造の沈下・水平移動・落下などによる被害が予測され、その被害は構造物だけにとどまらず、人命や社会に多大の影響を与える。

それゆえ、橋梁については、土木構造物の中でも特に耐震設計には十分注意が払われ、予測される地震に対して安全な構造となるように耐震設計は漸次進歩してきた。

今回、耐震設計の対象とした高橋脚橋梁は、比較的長周期の構造であり、従来から慣用されてきた震度法によるだけでは安全かつ経済的な耐震設計ができるとはいえない。したがって、道路橋耐震設計指針<sup>1)</sup>では、従来の高さに応じた設計震度の割増しにかえて、構造物の応答を考慮した修正震度法によって耐震設計を行ない、なおかつ、安全性や経済性に問題点が生じたときには、地震応答解析などによって検討することを規定している。ここでは現在行われている耐震設計について概略述べるとともに、地震応答解析の評価やその問題点について述べてみる。

### 2. 震度法

従来から慣用されている震度法は、架橋地点の地震状況、地盤の硬軟、構造物の重要度などに応じて、地震の影響を設計震度によって表わし、地震時の構造物の動的挙動を設計々算の便宜上静的な慣性力におきかえて、これが構造物各部に均等に作用するものとして応力や安定などを検討する方法である。

地盤に固定された剛な構造物があり（図-1参照）、この地盤の水平加速度 $\alpha_h$ 、鉛直加速度 $\alpha_v$ で動くとすれば、構造物も地盤とともに運動して慣性力が作用する。水平

震度 $k_h$ 、鉛直震度 $k_v$ は構造物の重量を $W=mg$ とすると次のように表わされる。ここで $g$ は重力の加速度とする。

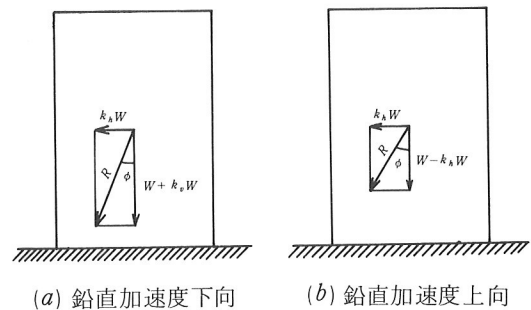


図-1 構造物に作用する外力(震度法)

$$k_h = \frac{m \alpha_h}{W} = \frac{\alpha_h}{g} \quad (1)$$

$$k_v = \frac{m \alpha_v}{W} = \frac{\alpha_v}{g}$$

したがって、構造物に作用する外力は、地震による慣性力と重力との合力で表わされ、その大きさ $R$ と鉛直に対する傾斜角 $\phi$ は次式で与えられる。

$$R = \sqrt{(W \pm k_v W)^2 + (k_h W)^2}$$

$$= W \sqrt{(1 \pm k_v)^2 + k_h^2} \quad (2)$$

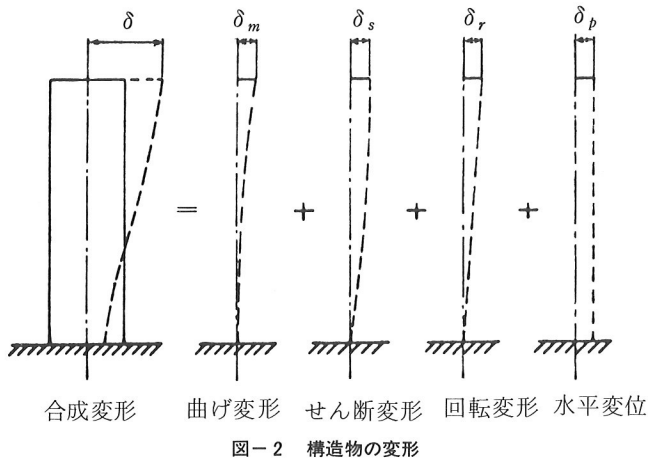
$$\phi = \tan^{-1} \frac{k_h}{1 \pm k_v}$$

ここで符号は $k_v$ の方向が下向きするとき正、上向きするとき負とする。それゆえ、地震時の計算は常時の水平面を $\phi$ だけ傾け、これに見掛けの外力 $R$ が静的に働く条件におきかえて行うことができる。

以上のように、震度法は地震動、地盤、構造物の特性、部材や基礎の強度などの諸条件が互に影響する複雑な現象を非常に単純化して取り扱っているが、比較的剛な構造物や規模の小さな構造物では、震度法により耐震設計

\* 川田工業㈱技術本部研究室係長

で必要とする耐震安全性が確保されることが経験的に知られており、また、解析が容易であるので今後ともよく用いられると思われる。



しかし、高橋脚のようにスレンダーな構造物が曲げ変形を伴うときは、地盤の変位に構造物のつりあい位置からの変形が加わるので、加速度は高さ方向に一様ではなく、あるいは、基礎に回転振動が加わる時は上部ほど振幅が大きく、逆三角形の加速度分布になるなど実際の振動性状とはあわず不合理である(図-2 参照)。

### 3. 修正震度法

静的震度法は前節で述べたように、適用範囲に限界があり、次節に述べる地震応答解析は合理的な手法であるが計算が複雑であり、計算に用いる諸定数の仮定、計算結果の評価などに問題点が残されているために一般的でない。

この点、応答を考慮した修正震度法は強震観測に基づく地震動の特性、地盤の特性、着目する構造物の種類や固有周期、振動のモード、振動時の減衰性などの動的特性を同時に考慮して震度法を修正したものである。震度法が用いられている点から分類すれば、前に述べた比較的剛な構造物に適用する震度法と、ここで述べる応答を考慮した修正震度法は、地震の影響を静的なものにおきかえて応力や安定などの検討を行なっている点については同一の考え方である。

修正震度法による設計震度は、道路橋耐震設計指針<sup>1)</sup>では図-3に示すように、震度法における設計水平震度に

構造物の固有周期と地盤種別に応じて定まる設計震度の補正係数  $\beta$  を乗ずることにより求められる。また、本州四国連絡橋耐震設計指針<sup>2)</sup>では図-4に示すように、基本応答震度は構造物の固有周期と種類によって定まる。ここでは(d)は吊橋の主塔と吊構造物(減衰定数0.02に

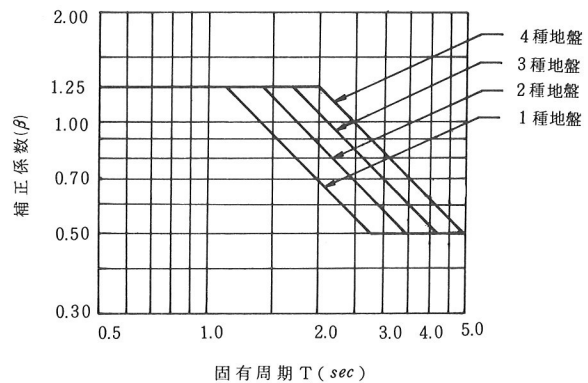


図-3 設計水平震度の補正係数(道路橋耐震設計指針)

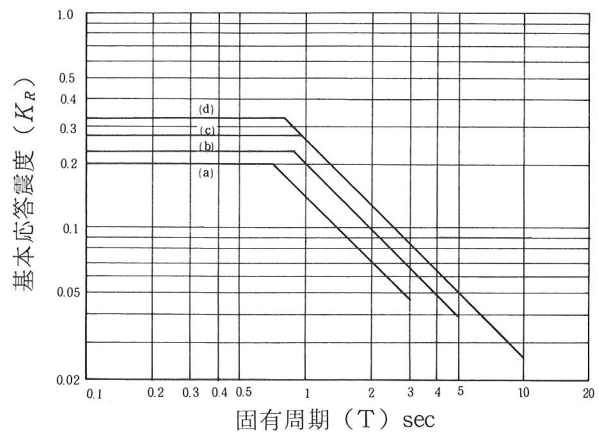


図-4 設計に用いる基本応答震度(本州・四国連絡橋耐震設計指針)

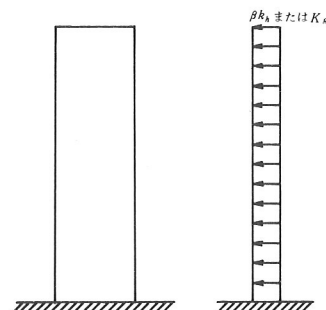


図-5 地震力の作用方法

相当), (a), (b), (c)は下部構造部(減衰定数はそれぞれ 0.10, 0.05, 0.02としたものに相当)に適用される。ただし, 地盤条件は瀬戸内地方に限っているので岩盤としている。

このようにして求めた設計震度を図-5に示すように作用させれば地震時の検討ができるわけであるが, ここで固有周期の算定が問題となる。本来, 固有周期は橋全体を1つの構造系として算定すべきものであるが, このようにして取扱うと, 固有周期の算定式は非常に複雑なものとなる。そこで, 道路橋耐震設計指針では, 橋全体を1基の下部とそれが支持する上部構造を単位とする構造系に分割して固有周期を求めている。この方法により算定される固有周期は, 元来, ある程度の誤差を伴ったものであるが, しばしば固有周期がかなり異った結果を示す場合<sup>3)</sup>があるので, この算定式を用いる場合にはその適用範囲などを十分注意する必要があると思われる。

#### 4. 地震応答解析法

静的震度法の適用をはずれるスレンダーな構造物や大規模な構造物の耐震設計を安全かつ合理的に行うために, 地震の特性や構造物の動的な影響を考慮した手法である。

構造物の地震応答解析にはいろいろな方法がある<sup>4)</sup>が橋の耐震設計によく用いられている2つの方法について概略説明する。

##### 4-1 地震応答スペクトル曲線を用いる解析法

###### 1) 地震応答スペクトル

線型なばね, 粘性減衰をもつ1自由度の質点系(図-6参照)が地震動変位をうけた場合の運動方程式は, 次式で表わすことができる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{z}(t) \quad (3)$$

あるいは,

$$\ddot{x} + 2h p \dot{x} + p^2 x = -\ddot{z}(t) \quad (3')$$

ここで,  $m$ は質点の質量,  $c$ は粘性減衰係数,  $k$ はばね係数,  $x$ は質点と基礎との相対変位

( $\ddot{x} = \frac{d^2 x}{dt^2}$ ,  $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ ),  $\ddot{z}(t)$ は地震動の加速度,

$t$ は時刻である。式(3)は Duhamel 積分によって理論的に解くことができる。

$$x = -\frac{1}{p\sqrt{1-h^2}} \int_0^t \ddot{z}(\tau) \exp\{-ph(t-\tau)\} \sin\{p\sqrt{1-h^2}(t-\tau)\} d\tau \quad (4)$$

ここで  $p = \sqrt{k/m}$  (非減衰固有円振動数, 固有周期は  $T = 2\pi/p$ ),  $h = c/2\sqrt{mk}$  (減衰定数),  $\tau$ は時間に関する積分変数である。

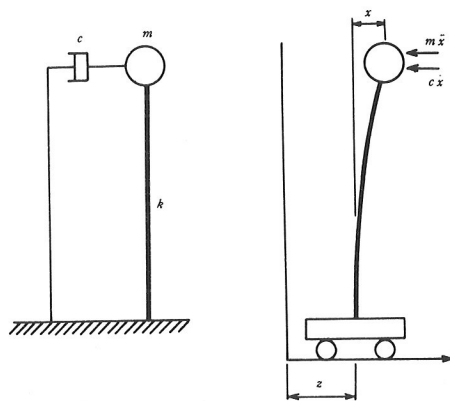


図-6 1自由度の質点系

式(4)は  $t$  時間内で  $\ddot{z}$  の地震加速度をうける固有円振動数  $p$ , 減衰定数  $h$  の構造物が示す変位の応答経過を表わしている。しかし, 設計において問題となるのはこの変位の最大値である。それゆえ, ある地震加速度に対して系に生ずる最大応答変位  $|x|$  は,  $p$  あるいは  $T$  と  $h$  の関数になり, 応答変位スペクトル  $S_d$  は次式により定義される。

$$S_d = |x|_{\max} = \frac{1}{p\sqrt{1-h^2}} \left| \int_0^t \ddot{z}(\tau) \exp\{-ph(t-\tau)\} \sin\{p\sqrt{1-h^2}(t-\tau)\} d\tau \right|_{\max} \quad (5)$$

減衰が小さいものとすれば, 応答速度スペクトル  $S_v$  および応答加速度スペクトル  $S_a$  は次のように求められる。

$$S_v = \frac{2\pi}{T} S_d$$

$$S_a = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 S_d \quad (6)$$

地震加速度の大きさが直接的に計算に影響させないように, スペクトルを無次元的に表示するものに, 式(7)で定義される加速度応答倍率  $\beta$  のスペクトル(基準化加速度

応答スペクトルと呼ぶ)がある。

$$\beta = \frac{S_a}{|\ddot{z}|_{max}} \quad (7)$$

一方、式(3)の運動方程式は Runge-Kutta-Gill 法<sup>5)</sup>などの方法により数値積分することにより、 $x$ ,  $\dot{x}$ ,  $\ddot{x}$ が求まり、その最大値から  $S_d$ ,  $S_v$ ,  $S_a$  を求めることもできる。

Imperial Valley 地震(1940年5月18日、マグニチュード  $M = 7.1$ )の El Centro で記録された加速度記録(俗称でエル・セントロ地震波と呼んでいる、図-7参照)について各応答スペクトルの計算結果を示せば図-8~図-10のようになる。ここで、加速度応答スペクトルについては基準化加速度応答スペクトルを示してある。

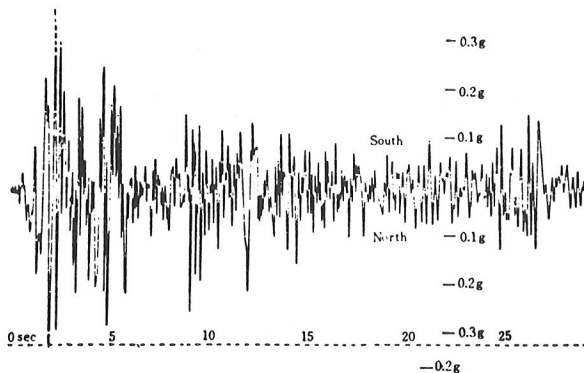


図-7 Imperial Valley地震のEl Centro加速度記録

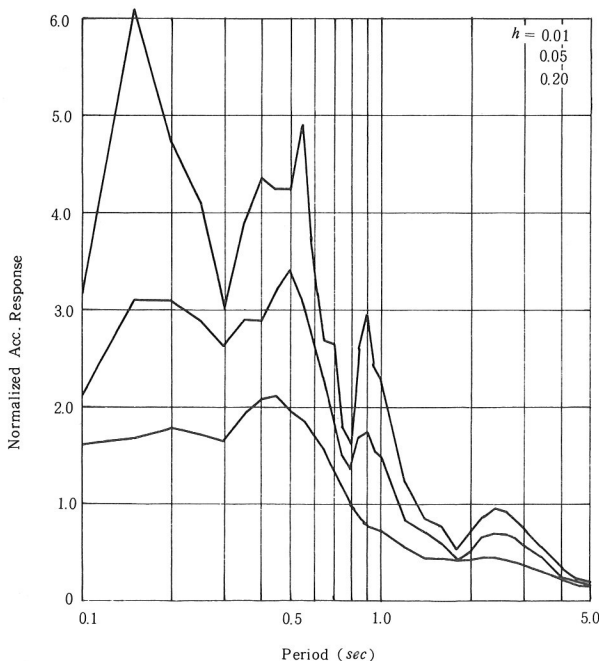


図-8 基準化加速度応答スペクトル

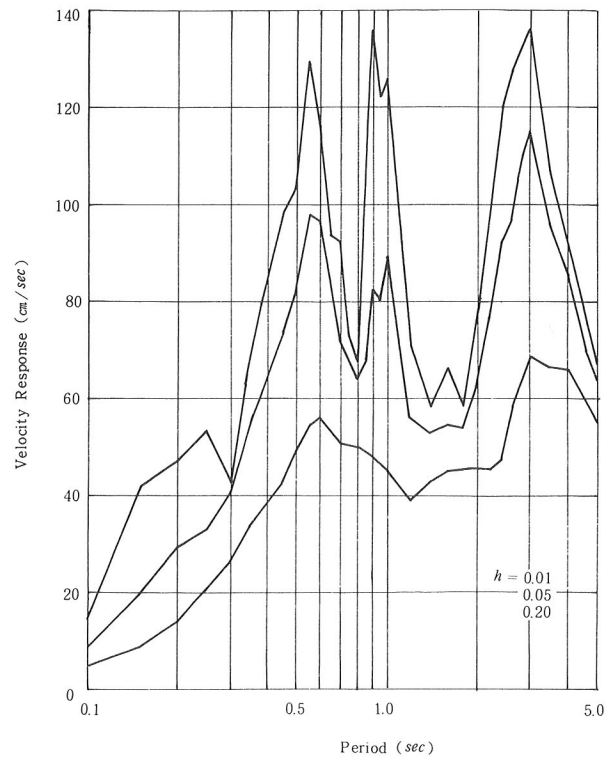


図-9 速度応答スペクトル

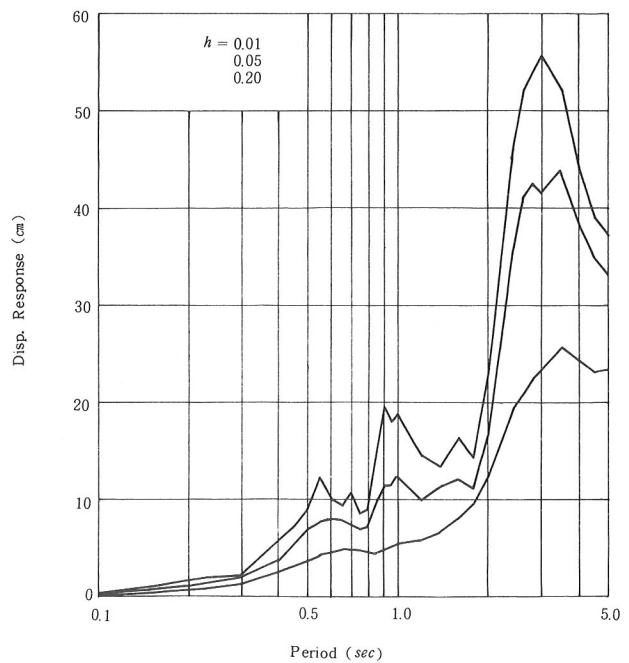


図-10 変位応答スペクトル

しかるに、加速度応答倍率  $\beta$  を用いると、多数のスペクトル間の平均値を求めることができ、ある特定の地震波のみでなく、多くの地震の包絡線的な応答スペクトル



を求めることができる。このようにして求めた地盤条件別の平均応答スペクトル曲線が道路橋耐震設計指針や本州四国連絡橋耐震設計指針の応答加速度スペクトルの基本になっている。

## 2) 地震応答スペクトル曲線を用いる解析法

一質点系の運動方程式と同様にして、多質点系の運動方程式は次式で表わすことができる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = -\mathbf{M}\mathbf{F}\ddot{z}(t) \quad (8)$$

ここで $\mathbf{M}$ は質量マトリックス、 $\mathbf{C}$ は減衰マトリックス、 $\mathbf{K}$ は剛性マトリックス、 $\mathbf{F}$ は地震作用方向に関係する割合を示すマトリックス、 $\mathbf{X}$ は変形ベクトルである。

上式で右辺の外力項を零にして、左辺の減衰力を省略すると、減衰作用のない自由振動の運動方程式が得られる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{0} \quad (9)$$

各節点の運動を正弦波 $\mathbf{X} = \phi \sin pt$ で仮定して上式に代入すれば次式が得られる。

$$-(\mathbf{M}\phi p^2 - \mathbf{K}\phi) \sin pt = \mathbf{0} \quad (10)$$

上式が零でない解をもつためには上式の係数行列が零でなければならない。

$$\mathbf{K}\phi = \mathbf{M}\phi p^2 \quad (11)$$

上式は固有値問題であるので、何らかの方法で固有値解析を行えば固有振動数 $p_i$ 、固有振動モード $\phi_i$ が求まる。

求まった振動モードマトリックス $\phi$  ( $\phi$ は正規化してあるものとする)を用いて、式(8)の変数 $\mathbf{X}$ を $\mathbf{X} = \phi q$ によって $q$ に変換する。 $\phi$ としてはすべての振動モードを採用する必要はなく、振動の大勢を支配する $m$ 組の振動を採用すればよい。このためには、 $r$ 次の規準振動系の応答が全応答に占める寄与の割合を示す係数すなわちモード寄与率( $D_r$ )を考慮すればよい。

$$D_r = \frac{\sum_{i=1}^{n'} M_i \phi_{ir}}{\sum_{i=1}^n M_i \phi_{ir}^2} \quad (12)$$

ここで、 $M_i$ :各質点の質量、 $n$ :自由度数、 $n'$ :地震が作用している方向に変位することができる質点の数である。 $\mathbf{X} = \phi q$ を式(8)の運動方程式に代入して、減衰を固有円振動数に比例するものとするれば、

$$\ddot{q} + 2h p \dot{q} + p^2 q = -\phi^T \mathbf{M} \mathbf{F} \ddot{z}(t) \quad (13)$$

が得られる。上式は $m$ 組の連立常微分方程式であるが、一行ずつわけて表わすと、

$$\ddot{q}_j + 2h_j p_j \dot{q}_j + p_j^2 q_j = -\sum_{k=1}^n \phi_{jk}^T M_k F_k \ddot{z}(t) \quad (j=1 \sim m) \quad (14)$$

となり、変数 $q_i$ が完全に独立であることがわかる。それゆえ、一質点系の理論解を参照すれば、式(14)の解は次のようになる。

$$q_j = \sum_{k=1}^n \phi_{jk}^T M_k F_k S_{dj} \quad (j=1 \sim m) \quad (15)$$

ここで $S_d$ は応答変位スペクトルを用いればよい。

$q_j$ が求まれば、変形スペクトル $\mathbf{X}$ は容易に求まるが $S_{dj}$ にその最大値を入れて加えあわせると、結果が大きくなりすぎるので、次に示すように、各応答の自乗和の平方根をとり真の応答を近似する方法が一般的に用いられている。

$$|X_i|_{max} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (\phi_{ij} \sum_{k=1}^n \phi_{jk}^T M_k F_k S_{dj})^2} \quad (16)$$

## 4-2 地震波形を用いる方法

ある特定の地震波形に対して、構造物の応答を時間的にとらえたい場合、構造物の非線型や弾塑性的な性質を考慮したい場合、波動伝播の影響を考慮したい場合、さらに、応答値の統計処理を実施したい場合などに用いる方法で、線型構造物にはモード解析法、非線型を含む構造物の応答計算には直接積分法が用いられる。

### 1) モード解析法

多質点構造物の運動方程式(8)は振動モードマトリックスを用いて、式(13)に示したように、一般座標で表わすことができる。式(13)は前にも述べたように、式(14)のように $m$ 組の独立した二階の常微分方程式であるので、新しい変数 $y$ を用いて、次に示すように一階の連立常微分方程式に直すことができる。

$$\begin{aligned} \frac{dq_j}{dt} &= y_j \\ \frac{dy_j}{dt} &= f_j(t) - 2h_j p_j y_j - p_j^2 q_j \end{aligned} \quad (17)$$

このようにすれば、一般に用いられているルンゲ・クッター・ギル(Runge Kutta Gill)法<sup>5)</sup>やミルン(Millne)の方法<sup>5)</sup>などの数値積分の手法が利用できる。

$q_j$ が求まれば $\mathbf{X} = \phi q$ により変形ベクトルは計算

できるので、これを微小時間間隔毎に繰り返すことにより、応答計算を進めることができる。

## 2) 直接積分法

物理座標系で表わした多質点の運動方程式(8)は、2階の連立常微分方程式を連立させたものであるもので、振動モードに分解して一般座標で表わさなくとも、直接に数値積分することができる。

直接数値積分の手法としては、モード解析法で述べたように、1階の連立微分方程式、すなわち

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{Y} \\ \dot{\mathbf{Y}} &= \mathbf{P}(t) - \mathbf{K}\mathbf{X} - \mathbf{C}\mathbf{Y}\end{aligned}\quad (18)$$

に分解してルンゲ・クッター・ギル法やミルンの方法を用いたり、そのままの形でニューマーク(Newmark)の $\beta$ 法<sup>6)</sup>やクラフ(Clough)の方法<sup>7)</sup>、ウィルソン(Wilson)の $\theta$ 法<sup>8)</sup>などを用いて積分することが考えられる。当然ながら、微小時間間隔ごとに繰返し計算を行なわなければならないので、計算時間は長くなるとともに、特定の地震波に対する応答計算となる。

## 5. 地震応答解析法の評価

前節では、地震応答解析の方法について概略述べたが、ここでは、土木構造物、特に橋梁を設計するにあたって、どの方法が最も適切であるか検討してみる。次に、解析を実施する場合の注意事項や設計に反映させる方法などを述べてみる。

### 5-1 橋梁の設計に適切な方法

橋梁の設計に適切な方法を検討する前に、解析法として必要な条件をあげてみる。

- 1) 解析方法が簡単かつ明瞭で、計算の手間が少ない。
- 2) 解が安定しており、解析結果を容易に設計に反映させることができる。
- 3) 解析ミスの発見が容易である。
- 4) 特定の地震に対する応答はもちろん、多くの地震の包絡線的な応答を求めるのに、計算の手間が少ない。
- 5) 解析方法そのものに問題点が少ないと同時に、各定数のとり方にも問題点が少ない。

これらの諸条件を考慮すると、一般に、4-1の方法すなわち、構造物を線型のモデルに仮定し、モ

ード解析を行ない固有周期と固有振動モードを求め、地震外力として応答スペクトル曲線を入力して、応答変位や応答断面力の最大値を求める方法がすぐれていると言われている。しかし、これは統一化された標準的な手法として、設計者に判断の材料を提供する場合を想定したものであり、解析法が正確かつ実際の現象に最も近いことは必ずしも意味していない。

次に、上記の方法で安全性や経済性に疑問が生じたときは、4-2の方法すなわち、地震外力として架橋地点付近における強震記録のうち加速度の大きな代表的なもの、あるいは、地盤条件などが似かよった地点における記録など特定地震波に対して構造物の応答を計算して、地震時の検討をする必要があると思われる。

### 5-2 解析する場合の注意事項

地震応答解析において、次の3つの条件が最も重要であると考えられる。

- 1) 構造物をそのままの状態で解析することは不可能であるので、ある力学モデルに置換しなければならない。そのため、このモデル化を正しく評価して振動性状を適確につかむことが必要である。
- 2) 統一化された標準的な解析法を用い、設計者に対して正確な判断材料を提供する。
- 3) 解析結果の妥当性が類似した例、地震観測、実橋や模型試験の値などと比較検討される。

上述の理念に従って、信頼における応答解析を行うためには、次に述べる事項について十分検討する必要がある。

#### 1) 地震動の強さと特性

構造物の建設位置や地盤状況により、将来どのような地震対が作用するか不明であるが、地震応答解析を進めるには、まず第一に、地震動の強さとその特性が決定されなければならない。一般的には架設地点での過去の強震記録は少ないので、地震動の強さを過去の地震活動状況や地震工学の知識を活用しながら決めており、地震動の特性(地震波またはスペクトル曲線)は、常時微動や中小地震から得られる周波数特性の類似した特性を有する他地点での記録や地盤条件の類似した地点で得られる記録などにより決めている。しかし、強震記録の数はまだ少い

ので、適当な地震動が過去の記録から得られないような場合には、その地点に将来起こりそうな地震動を推定することも必要となろう。

## 2) 基礎地盤の動的性質や支持力

地盤によって構造物の振動性状は非常に異なるが、建設前に十分地盤の性質を調査して、解析に際してはこの結果を反映させることが重要である。また、地震時にゆるくつまった飽和砂質地盤が流動化したり、鋭敏比の高い粘土地盤が地震によって大きな変形をうけると強度が低下することも予想される。砂の流動化と粘土の強度低下は基礎構造としては構造系全体と耐震性に大きな影響を与える。それゆえ、基礎を安定した地盤に置き、不安定な地盤については人工的な改良を加えることも必要になろう。

## 3) 構造物の動的性質と強度

構造物の動的性質により、その振動性状に与える影響は非常に大である。それゆえ、構造物の選択にあたっては、地震の衝撃的な荷重に対して抵抗力が大きく、破壊に至るまでの変形によって大きなエネルギーを吸収でき、地震による加振に対して応答が下がるような材料を採用することが望まれる。

## 4) 構造物の境界条件

構造物をモデル化する場合の問題点の1つである。構造物のもつ力学的性質を十分考慮して、技術上無理のない境界条件を選択すべきである。

## 5) 構造物の環境状態

水中にある構造物が地震時にうける動水圧、周囲の土の質量の影響、軟弱地盤などの取扱い、構造物に作用する浮力または揚圧力についてはその特性を十分把握する必要がある。ただし、軟弱地盤の問題は地震動の波形の問題をも含むので十分検討する必要がある。

## 5-3 解析結果の評価

一般に、強震時における橋梁の応答は非線形的な挙動を示すことが知られている。この原因としては、応力とひずみの関係が非線形領域に入るため、全体系としての剛度が低下することや減衰定数が増加することが考えられる。この他に、強震時には構造基礎と地盤の動的相互作用や基礎を通じての地下逸散減衰が無視できなくなる。それゆえ、構造物の強震時の応答はこれらを考慮した非線形応答解析を行い、耐震性を評価するのがよいと思

れる。

しかし、現時点で、地震応答解析の結果を設計に反映させようとした場合、5-1にも述べたように、計算の複雑さを軽減すると同時に、構造物の非線形特性が十分に解明されていないために、構造物の力学特性を線形とする場合が多い。

線形解析と非線形解析のギャップをうめるものとして、設計に線形解析の結果を反映させる場合には、強震時の解析結果を割引して評価<sup>9)</sup>したり、減衰定数などを強震時を想定して決定<sup>4)</sup>するなどの配慮が必要である。

表-1 地震応答解析の設計への反映程度

|   | 反 映 程 度               | 設計時 | 施工後 |
|---|-----------------------|-----|-----|
|   |                       | ○   |     |
| 1 | 構造物の破壊に対する検討          | ○   |     |
| 2 | 構造型式(基礎・下部・上部)の再検討    | ○   |     |
| 3 | 応答解析の結果をそのまま設計値とする    | ○   |     |
| 4 | 応答解析と静的設計の大きい方を設計値とする | ○   |     |
| 5 | 一部の断面の補強を行う           | ○   | ○   |
| 6 | 移動制限装置や落下防止などを採用する    | ○   | ○   |
| 7 | 支承を含む支持点の強化           | ○   | ○   |
| 8 | その他(ダンパーなどの採用)        | ○   | ○   |

何らか手法で地震応答解析を行って場合、それを設計に反映させる程度のしは、表-1に示すようないろいろな程度があると思われる。この程度の決定にあたっては、橋の重要度(地震時における橋の機能の確保の必要性)、橋の規模、震害がおよぼす影響などを考慮する必要がある。ここで重要なことは、地震応答による構造物の応力や変位の検討とあわせて破壊に達する検討も行い、強震時の落橋防止に特に注意することである。

## 6. 高橋脚橋梁の耐震検討例

### 6-1 耐震設計の方針

道路橋耐震設計指針にも述べられているように、耐震設計にあたっては、個々の上部構造・下部構造の設計に対してのみならず、架橋地点の全体の地形・地質などをふくめて橋全体の構造系が耐震的になるように配慮し、落橋の防止には特に注意する必要がある。ここでは、図-11に示すような岩盤上に高橋脚をもつ3径間連続桁橋の耐震設計を実施すると仮定した場合の方針を述べてみる。

#### 1) 震度法による概略設計

上下部構造を一体とした全体系のモデルに、橋軸

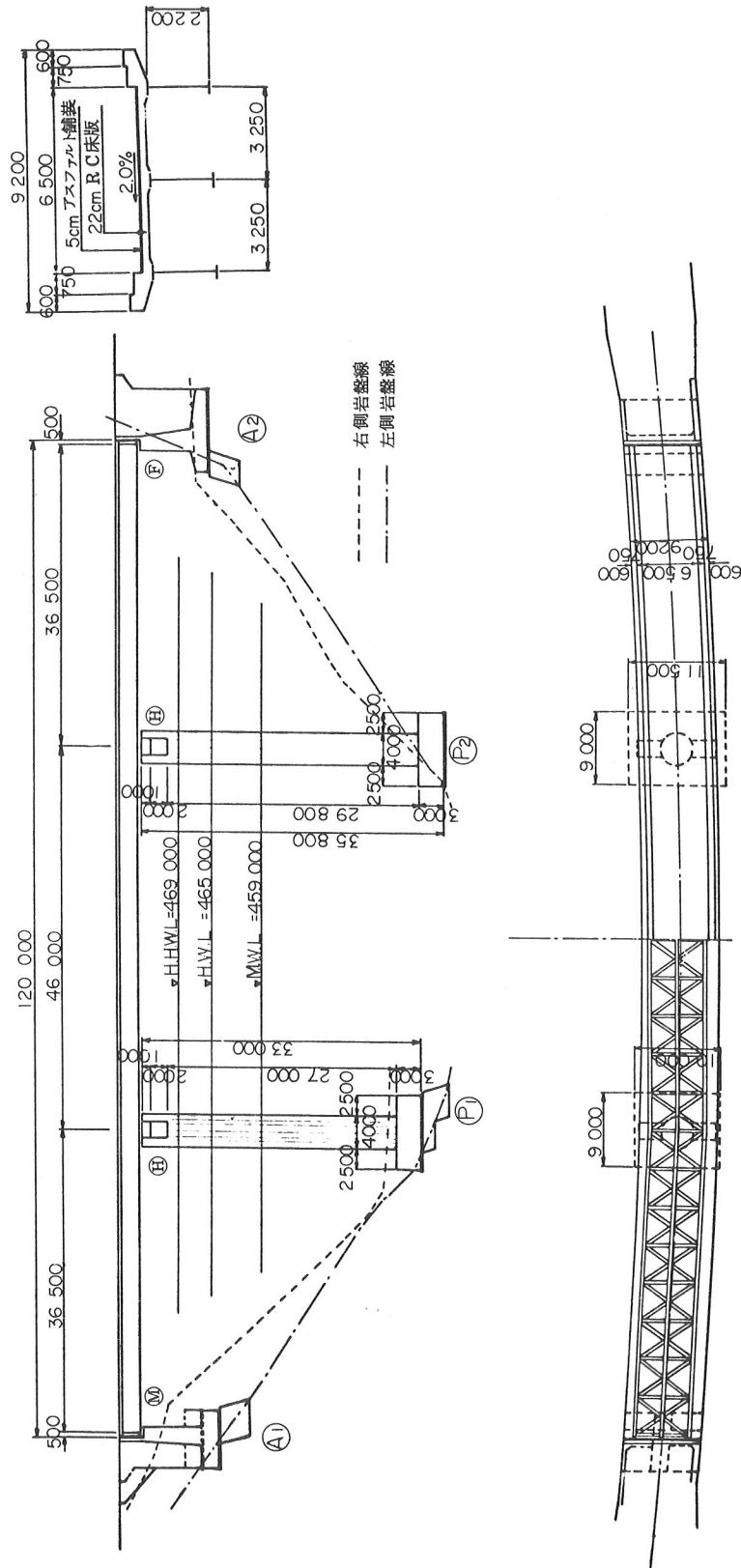


図-11 全体一般図(耐震検討例)

方向と橋軸直角方向の地震力を静的に作用させ、概略の断面の算定を行なう。

## 2) 修正震度法による耐震設計

道路橋耐震設計指針では、橋全体を1基の下部構造とそれが支持する一連の上部構造部分を単位とする構造系に分割して固有周期を求め、この固有周期を用いて設計震度の補正係数を計算している。しかし、固有周期は本来、橋全体を1つの構造系として算定すべきものであり、この両者に著しい差があり、ひいては設計水平震度に大きな影響を与える場合がある。それゆえ、修正震度法を用いる場合の固有周期の計算にあたっては、次に示す地震応答解析において全体系の固有周期と振動モードを計算するので、この結果を用いるものとする。その後の計算方法は1)と同じである。

## 3) 地震応答解析による耐震設計

地震応答解析を実施するにあたっては、まず第一に、地震応答スペクトル曲線を用いる応答スペクトル解析を行い、上述の計算値と修正震度法による設計値の間に著しい差が見られるときには、地盤の似ている箇所を得られた地震波形を用いて、モード解析法によって検証する。

解析にあたっては、橋軸方向は平面骨組構造、橋軸直角方向については平面格子骨組構造として多質点系モデル<sup>10)</sup>を仮定する。また、用いるスペクトル曲線は建設省土木研究所で作成した平均応答スペクトル曲線(岩盤)<sup>1)</sup>を用いるものとし、最大加速度は架橋地点の設計水平震度にあわせる。

## 6-2 地震応答解析モデル

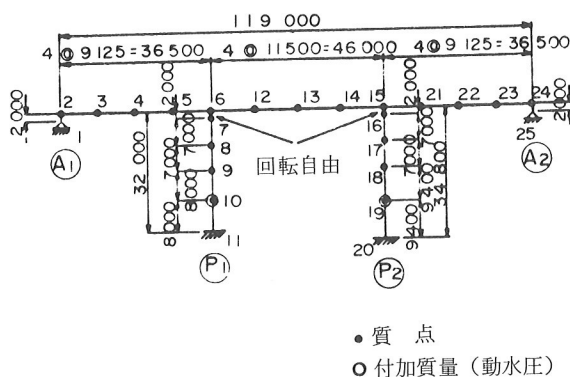


図-12 橋軸方向解析モデル

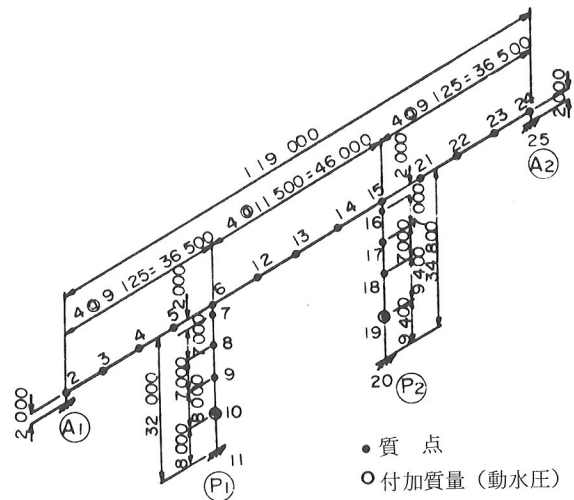


図-13 橋軸直角方向解析モデル

橋軸方向のモデルを図-12、橋軸直角方向のモデルを図-13に示す。このモデルの作成にあたって留意した事項を次に示す。

### 1) 軸線

上部工の桁の軸線の位置は上部工の重心位置とする。また、上部工の曲率半径が小さいので、この影響は無視する。一方、下部工については断面の図心位置とする。

### 2) 仮想部材

桁端および  $P_1, P_2$  上で上部工の桁高の影響を考慮するために、仮想鉛直部材を想定するが、支点上で固定の場合には上部工の桁の重心位置でも固定条件を満足させる程度の剛度を持つ部材すなわち、曲げ変形が生じない部材として入力する。

### 3) 橋軸方向の境界条件

桁端:  $A_1$  可動,  $A_2$  固定(回転自由)

$P_1 \cdot P_2$  天端: 鉛直および水平変位は拘束, 回転自由

$P_1 \cdot P_2$  下端: フーチング上面で固定

### 4) 橋軸直角方向の境界条件

$A_1$  端: 水平変位に対して固定, 鉛直軸まわりの回転は自由

$A_2$  端: 水平変位, 鉛直軸まわりの回転に対して固定

$P_1 \cdot P_2$  天端: 鉛直軸まわりの回転のみ自由, 他は拘束

$P_1 \cdot P_2$  下端: フーチング上面で固定

### 5) 動水圧

設計水平震度を生ずるような地震時に、水位が  $H$ 。

W.L. までである確率は小さいので、水位を M.W.L. まで考慮して、動水圧を計算する。地震応答解析においては、水の影響を直接動水圧ではなく、次式で与えられる仮想質量として取り扱う。

$$M_v = \frac{P}{k_h \cdot g} \quad (19)$$

ここで、 $M_v$ ：全仮想質量、 $P$ ：全動水圧、

$k_h$ ：設計水平震度、 $g$ ：重力の加速度である。この仮想質量を構造物の質量に付加して解析を行う。

#### 6) 上部工の断面剛性

上部工の断面剛性（曲げ剛性やねじり剛性）を計算する場合、床版の影響を無視できないので、なんらかの形で考慮する必要がある。

#### 7) その他

可動支承部については、移動制限装置や落橋防止装置をとりつけるが解析上は考慮しない。

### 7. おわりに

以上、高橋脚橋梁の耐震設計の現状を概略述べてみたが、一般論に終始してしまった。実際の設計にあたっては個々の設計者が架橋地点の地形・地質・上下部構造をふくめた全体系を十分検討しながら設計を進めることを希望する。高橋脚橋梁の耐震設計は当社においてもまだ実施例が少ないので、考え違いや疑問点が多々あると思う。御指摘いただければ幸いである。

今回は設計の立場から地震応答解析を述べたが、当社においてはこの汎用プログラム<sup>10)</sup>を作成して設計者の便宜を計っている。次回にはこのプログラムの内容とその利用法などを述べたいと考えている。

最後に、本報告をまとめるにあたっては、大地研究室長に多大なる助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋耐震設計指針・同解説，昭和47年4月
- 2) 土木学会・本州四国連絡橋耐震研究小委員会：本州四国連絡橋耐震設計指針（1974），昭和49年9月
- 3) 広瀬・南・五十嵐・佐伯：高橋脚を有する2径間連続ゲタ橋の耐震設計，橋梁と基礎，昭和50年12月
- 4) 土木学会編：地震応答解析と実例，技報堂，昭和48年1月  
栗材栄一：耐震工学入門(1)～(15)，橋梁と基礎，昭和44年2月～45年5月  
大地羊三：構造解析とコンピューター，産業図書，昭和46年5月
- 5) 大地羊三：電子計算機の手法とその応用，森北出版，1970年5月  
赤坂 隆：数値計算，コロナ社
- 6) N. M. Newmark : A Method of Computation for Structural Dynamics , ASCE EM3 July 1959
- 7) R. W. Clough : Analysis of Structural Vibrations and Dynamic Response , Japan - U.S. Seminar on Matrix Method of Structural Analysis and Design, August 1969
- 8) E. L. Wilson, I. Farhoodmand, K. J. Bathe : Nonlinear Dynamic Analysis of Complex Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 1, 1973
- 9) 岩崎敏男：橋梁基礎の耐震設計に関する動的検討，橋梁と基礎，昭和44年10月
- 10) 川田工業㈱技術本部研究室：振動解析プログラム説明書，昭和49年8月