

## 橋梁の耐震

立命館大学理工学部 伊津野和行

### 1. 橋梁の地震被害

地震によって地面が動き、それによって橋が揺れると、橋脚や桁には、見かけ上慣性力が働くことになる。この運動方程式をたてると、地面が止まっていて、構造物の質量と地震動の加速度との積で表される力が、構造物各部に作用する場合と等価になる。したがって、構造物が重いほど、また、地震動の加速度が大きいほど、大きな力が構造物に働くことになる。上部に桁の質量が集中しているため、橋脚の上部を、巨大な力がかんで振り回すことを想像していただくとよいと思う。

橋梁構造物の被害形態を、被害箇所と構造材料別に分類すると表1のようになる。

表1 被害形態の分類

	コンクリート構造	鋼構造
橋脚	曲げ破壊・せん断破壊・曲げせん断破壊	曲げ圧縮座屈・せん断座屈・圧壊・亀裂
桁	落下・端部の損傷	落下・移動・座屈・桁端部の座屈損傷
その他	支承破壊・耐震連結装置の破壊・伸縮装置の破損・付属物の損傷	

橋梁構造物の被害原因を大きく分けると、a. 過大な慣性力によるものと、b. 地盤変状によるものの2つに分類できる。慣性力が原因だと考えられるものは、さらに破壊形式によって、橋脚の曲げ破壊、橋脚のせん断破壊、支承破壊と桁の移動、想定外の荷重分布による橋脚の破壊の4つに分類できる。

#### a. 慣性力が原因となる被害

##### a-1. 橋脚の曲げ破壊

地震力によって橋脚上部に大きな力が作用すると、曲げによるモーメントが、部材が耐え得るモーメントより大きくなって破壊する。その場合、曲げモーメントが最大になる橋脚基部で破壊が生じることが予測される。しかしながら、鉄筋コンクリート橋脚では主として鉄筋量の違い、鋼製橋脚では主として部材厚の違いにより、各断面における力学的特性が異なるため、橋脚中間で破壊することもある。例えば図1は、主鉄筋を中間部で段落しさせた橋脚、あるいは部材厚が中間部で変化する橋脚の例である。設計で考慮する曲げモーメントに対しては、十分抵抗できるように設計されていても、設計荷重をはるかに超えた大きな地震荷重が作用した場合、曲げモーメントが最大となる橋脚基部で破壊せず、抵抗モーメントが減少した橋脚中間部で曲げ破壊が生ずる可能性がある。

鉄筋コンクリート橋脚では、かぶりコンクリートの剥落や、剥落にともなう主鉄筋の座屈が生じる。阪神・淡路大震災でも、T型の単柱式橋脚で多く見られた被害形式である。揺れが繰り返されるにつれて破壊が緩やかに進行することもあるが、橋脚の最終的な崩壊にまでは至っていない。ある程度の被害を許容することができるのであれば、破壊形式としては基部における曲げ破壊を起こすことが望ましい。

鋼製橋脚でも、部材厚の変化部やコンクリート充填の境界部において、曲げ圧縮による局部座屈が生じる可能性がある。阪神・淡路大震災でも、このタイプの破壊が見られたが、鋼製橋脚が大きな被害を受けたのは世界で初めてである。座屈後も大きな揺れが繰り返されることによって、亀裂が生じることもある。

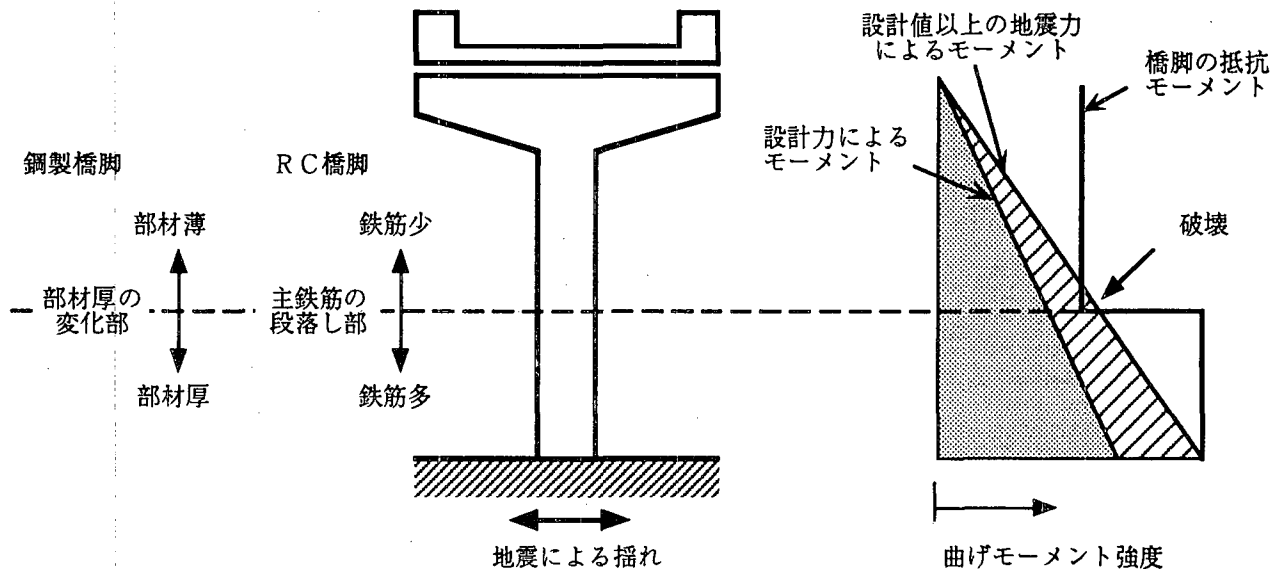


図1 曲げ破壊の発生位置

#### a-2. 橋脚のせん断破壊

橋脚の断面が比較的大きく、背の高さが低い橋脚は、せん断力による破壊も生じやすい。橋脚のせん断耐力が、終極的な曲げ変形に対する耐力より小さければ、曲げ破壊よりもせん断破壊が先行すると考えられる。

鉄筋コンクリート橋脚では、曲げに抵抗する主鉄筋が、橋脚上部では基部ほど必要ではないため、前述のように鉄筋量を途中で減らすことがある。この主鉄筋の段落し部での破壊から、せん断破壊が生じやすいことが過去の地震被害からわかってきた。そのため、最近の設計示方書では詳細な規定により、この被害を防ぐ対策がなされている。阪神・淡路大震災では、古い設計示方書によって設計された橋脚に、このタイプの被害が見られ、桁の落橋を伴った大きな被害を引き起こした。

また、鉄道橋の立体ラーメン形式橋脚では、橋脚上端部の、せん断力も曲げモーメントも大きい箇所でも曲げせん断破壊をし、被害の大きな箇所では桁の落下を引き起こした。鉄道高架橋は全国的に同じ形式の橋脚が多いため、同じ形式の破壊が生じやすい。橋脚の基礎部も含めた構造物全体系の、全国的な再照査が求められる。

このように、鉄筋コンクリート橋脚では、せん断破壊（あるいは曲げせん断破壊）を防ぐことが肝要である。落橋までには至らなくとも、橋脚が破壊した場合、桁の損傷は免れないところである。一般的にせん断破壊は、曲げ破壊よりも脆性的で急激な破壊になるため、鉄筋コンクリート橋脚では特に注意が必要である。古い設計のものに対しては、耐震補強を早急に施す必要がある。

鋼製橋脚では、ラーメン橋脚の横梁部に、せん断座屈が入ることがあるが、耐力的にみると被害程度は軽微である。それよりも、衝撃的な地震力あるいは瞬間的な変形による亀裂が、ラーメン形式橋脚の隅角部に入るという被害や、鋳鋼製橋脚が脆性破壊するなど、せん断力によって脆性的に亀裂が入る被害形態のほうが、鋼構造物にとっては危険であろう。

### a-3. 慣性力による支承破壊と桁の移動

1995年兵庫県南部地震の地震動は、鉛直成分が比較的大きかったことが報告されているが、橋脚そのものが1g程度の上下動のみで大きく破壊することはほとんど考えられない。しかし、上部工を支えている支承の破壊には、大きな上下動の影響もあったものと考えられる。鉛直および水平方向の衝撃的な大きな力によって、多くの支承が破壊した。ただし、上下動成分が仮にこれほど大きくなかったとしても、水平動成分のみで支承はかなり破壊したものと考えられる。

阪神・淡路大震災では、支承の破壊に伴う桁の移動が数多く見られ、それが原因で落橋した例もあった。しかしながら、これらの被害を無くすために単に支承部を強くするだけでは、桁と橋脚が一体化された構造であるピルツ橋のように、橋脚基部や基礎に非常に大きな力がかかるという、別の問題が発生する。終極的な破壊形態も視野に入れた、詳細な検討が必要となる。

また、高速道路のように高架橋が連続する場合には、重量のある多径間連続桁が支承の破壊により橋軸方向に移動して、隣接する単純桁を押しこき、移動量が限界に達した地点で落橋する例もあった。支承の強度とともに、耐震連結装置の強度あるいは変形能力の検討も重要である。

落橋には至らなくとも、桁が支承から落ちて鋼製桁端部が損傷したり、桁に支承が突き刺さったり、桁の移動に伴う桁自体の損傷も問題点の一つである。

### a-4. 想定外の荷重分布による被害

高架橋のように連続した構造物の場合、地震によって一部の橋脚に被害が出ると、設計で想定している荷重条件とは、まったく異なった荷重のかかりかたを引き起こす場合がある。まわりの荷重を1本の橋脚で受けてしまって圧壊するという例や、橋脚の破壊によって連続桁にかかる力の方向が設計と逆になってしまう例、あるいは隣接するRC橋脚の揺れによって鋼製橋脚に大きな変形が生じる例などがある。

また、高架橋では桁と桁とを耐震連結装置等で結んでいることが多いため、地震によって高架橋全体としての振動挙動がある。例えば、ある区間の両側がラーメン形式の橋脚で支えられており、橋軸直角方向に揺れにくくなっているとす。その中間に線路や川を渡る地点があって、上下線が別々の一本柱橋脚となっているような場合、高架橋全体系として見ると、その区間のみが橋軸直角方向に振動しやすい構造となってしまう。これは実際にも存在する例であり、地震による加振で、大きな応答を示しやすいことになる。同様に、鉄道の高架橋では、道路を跨ぐ架道部分が他の部分と比較して剛性が高い構造になっており、高架橋全体で見ると一部分だけ揺れ方に違いが生じ、その隣接部で大きな被害を引き起こすことも考えられる。また、鉄筋コンクリート橋脚が並んでいる中で、一部分だけ鋼橋脚が存在する場合のように、振動特性の異なる橋脚が並んでいる時や、すぐ横に川があって地盤の拘束条件にわずかな違いがある時など、隣接する橋脚同士の相互作用によって、複雑な振動現象が生じる時もある。このように、設計では個別に扱われる橋梁でも、別途考慮される耐震連結装置や支承部の摩擦等によって、高架橋全体としての挙動を示す場合があることに注意をすべきである。

### b. 地盤変状が原因となる被害

橋梁構造物を支えている地盤が、地震によって側方流動を起こし、それによって橋脚基礎が大移動すると、落橋や桁の移動など大きな被害を生じる。埋立地など軟弱地盤では特に注意が必要である。落橋という最悪

の事態を防ぐためには、地盤対策はもちろんのこと、耐震連結装置のさらなる改良や、力だけではなく大変形も考慮した設計法の検討などが必要である。

以上、橋梁の地震被害形態について概説した。阪神・淡路大震災では、多くの橋梁構造物が被害を受けたが、総体的に被害の大きい地域にありながら、被害程度が小さかった構造物、あるいはまったく被害を受けなかった構造物も存在する。例えば、耐震連結装置が有効に働いて落橋しなかった桁の例や、オイルダンパーが設置されたラーメン橋脚が被害をあまり受けなかった例、あるいは地震前に既に耐震補強済みの橋脚がほとんど被害を受けなかった例など、被害の小さかったものの分析も重要である。

## 2. 橋梁の地震応答

橋梁の地震応答を考えると、単純な構造の橋脚を単体で解析する場合を除き、多自由度系の構造物としてモデル化する必要がある。多自由度系の運動方程式は、 $N$ 自由度系なら $N$ 元の連立方程式となり、自由度が多くなれば数値的に解くのも大変であった。そこで、固有値解析を行って基本的な振動特性を把握するとともに、その結果を用いて運動方程式を単純化する方法がよく用いられた。最近の計算機の発達により、大規模な地震応答計算も、パソコンレベルで可能になってきたが、固有振動解析（モード解析）の意義は大きい。以下、固有値解析の手法と、多自由度系の地震応答に関連する問題について述べることにする。

### a. 固有値解析

多自由度系の運動方程式（非減衰自由振動）は、次のように表される。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ は質量マトリックス、 $[K]$ は剛性マトリックス、 $\{x\}$ は変位ベクトル、ドット( $\cdot$ )は時間に関する微分を表す。変位 $x$ を時間に無関係なベクトル $\{\phi\}$ で次式のように表す。

$$\{x\} = \{\phi\} \exp(i\omega t) \quad (2)$$

これを式(1)の運動方程式に代入すると次式を得る。

$$([K] - \omega^2 [M])\{\phi\} = \{0\} \quad (3)$$

$\{\phi\}$ が $\{0\}$ 以外の解を持つ条件より、次の振動数方程式が得られる。

$$|[K] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (4)$$

ここで、 $\omega$ は固有円振動数であり、この式を満たす $\omega$ は、 $N$ 自由度系なら $N$ 個存在する。これを小さいものから1次、2次、...、 $N$ 次の固有円振動数といい、 $\omega_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ )と表す。なお、固有円振動数 $\omega_i$  (rad/sec)と、日常的にもよく用いられる固有振動数 $f_i$  (Hz)、固有周期 $T_i$  (sec)の関係は、次式となっている。

$$\omega_i = 2\pi f_i = 2\pi / T_i \quad (5)$$

$\omega = \omega_i$ を式(3)の運動方程式に代入して $\{\phi\} = \{\phi\}_i$ を求める。

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{\phi\}_i = \{0\} \quad (6)$$

この式からは、 $\{\phi\}_i$ の絶対値は決められないが、各要素の相対的な大きさが得られる。この $\{\phi\}_i$ を $i$ 次の固有ベクトルと呼ぶ。固有ベクトルには直交性という性質があり、 $i$ 次モードの固有ベクトル $\{\phi\}_i$ と $j$ 次モード

$(i \neq j)$  の固有ベクトル  $\{\phi\}_j$  を質量マトリックス、剛性マトリックスに次式のようにかけると 0 になり、 $i=j$  の対角項だけが残る。

$$\{\phi\}_j^T [M] \{\phi\}_i = \begin{cases} 0 & (i \neq j) \\ M_n & (i = j = n) \end{cases}, \quad \{\phi\}_j^T [K] \{\phi\}_i = \begin{cases} 0 & (i \neq j) \\ K_n & (i = j = n) \end{cases} \quad (7)$$

減衰マトリックスにも、この直交性を仮定すれば、これらの関係式を用いて多自由度系の地震応答解析を簡単化することができる。まず、多自由度系の地震に対する運動方程式は、次式で表せる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{\mathbf{1}\}\ddot{z} \quad (8)$$

ここで、 $[C]$  は減衰マトリックス、 $\ddot{z}$  は地震加速度、 $\{\mathbf{1}\}$  は地震の入力方向を示す 1 と 0 からなるベクトルである。固有ベクトルをまとめて行列表示したモーダルマトリックス  $[\Phi]$  を用いて  $\{x\}$  を表す。

$$\begin{aligned} [\Phi] &= [\{\phi\}_1, \{\phi\}_2, \dots, \{\phi\}_N] \\ \{x\} &= [\Phi]\{q\} \end{aligned} \quad (9)$$

これを式 (8) の運動方程式に代入して、前から  $[\Phi]^T$  をかける。

$$[\Phi]^T [M] [\Phi] \{\ddot{q}\} + [\Phi]^T [C] [\Phi] \{\dot{q}\} + [\Phi]^T [K] [\Phi] \{q\} = -[\Phi]^T [M] \{\mathbf{1}\} \ddot{z} \quad (10)$$

前述の直交性より、次式のように各モードの運動方程式が、連立しないで解けることになる。

$$M_n \ddot{q}_n + C_n \dot{q}_n + K_n q_n = -\{\phi\}_n^T [M] \{\mathbf{1}\} \ddot{z} \quad (11)$$

ここで、 $n$  次モードの運動方程式を、1 自由度系の運動方程式と比較すると、右辺の入力地震動が何倍かされているだけである。両辺を  $M_n$  で割ったときの、この倍率を刺激係数 (participation factor)  $\beta_n$  と呼び、第  $n$  次モードが全体の応答にどれだけ寄与しているかを表す指標として用いることができる。

$$\beta_n = \{\phi\}_n^T [M] \{\mathbf{1}\} / M_n \quad (12)$$

また、水平地震加速度による構造物基部におけるせん断力 (ベースシヤ) を求める場合、各質点に働く地震の慣性力の総和に対する第  $n$  次モードによる寄与を表現すると、次式のようになる。

$$Q_n = \sum_{j=1}^N \{F\}_{n,j} = \{\mathbf{1}\}^T \{F\}_n = \{\mathbf{1}\}^T [M] \{\phi\}_n \beta_n S_A = M_n \beta_n^2 S_A \quad (13)$$

ここで、 $Q_n$  は第  $n$  次モードによるベースシヤ、 $\{F\}$  は慣性力ベクトル、 $S_A$  は加速度応答スペクトルである。この式の左辺が力で、右辺の  $S_A$  が加速度だから、右辺の  $M_n \beta_n^2$  という係数は質量の次元をもつ。これを有効質量という。全質量に対する各モードの有効質量の比を、有効質量比 (effective mass ratio)  $\gamma$  という。有効質量のすべてのモードに対する総和は系の全質量に等しくなるので、有効質量比によって、構造物に作用する地震力に対する各モードの寄与率を知ることができる。

## b. 多点入力問題

長大橋や多径間連続橋などでは、各橋脚が同じ震動を受けるとは限らない。それぞれの橋脚への入力地震動に、位相差や波形変化が生じる。これを構造物の多点入力問題という。入力位相差の影響は、一般的には、変位応答が減少し、一部の断面力は増大することになるが、個別の検討が必要である。

## c. 動的相互作用

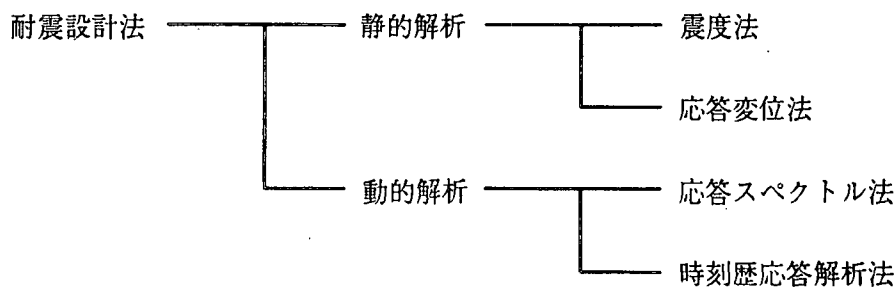
構造物は地盤で支持されているため、構造物と地盤との間で相互作用の影響が生じる場合がある。地盤震

動によって構造物が振動し、その構造物の振動によって地盤の振動が影響される。構造物の大きさから見ると、地盤は半無限連続体とみなされるため、構造物と同様な有限要素法による解析法の他に、解析解の利用や境界要素法の利用などの手法もある。大規模構造物では、この問題についても考慮する必要がある。

### 3. 橋梁の耐震設計

構造物が地震に耐えられるよう設計する場合、表2のように、地震の力を静的な力や変形に置き換えて考える方法と、地震の際に構造物がどう揺れるのか動的に検討する方法とがある。前者には静的な力を考える震度法と、変形を考える応答変位法がある。応答変位法は地中埋設管等、地震による慣性力よりも変形が重要な構造物に用いられ、橋梁の設計には震度法が用いられる。また、後者の動的な検討を行う場合にも、単純な構造物の動的解析結果を応用して最大応答値を推定する応答スペクトル法と、地震の際の構造物の揺れをずっと計算していく時刻歴応答解析法とがある。

表2 耐震設計法の分類



平成2年2月に改訂された道路橋示方書<sup>1)</sup>では、通常は震度法で設計し、地震時の挙動が複雑な橋は、動的解析で安全性照査をするよう規定されていた。阪神・淡路大震災を受けた「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様」<sup>2)</sup>（以下、復旧仕様と記す）では、動的解析が推奨されており、非線形性を等価線形化手法で考慮した応答スペクトル法等が述べられている。

#### a. 震度法による橋梁の耐震設計

動的な力を静的な力に置き換えて考える方法で、理論的には、地震による動的な応答変位が静的な変位とほぼ等しい時に有効である。つまり剛性が高い構造物で有効な手法といえる。道路橋示方書では、考慮すべき荷重の組み合わせとして、主荷重+従荷重（地震の影響）と規定されており、活荷重や衝撃は考慮しないでよいとされている。しかし、近年の慢性的な交通渋滞を鑑みて、活荷重の影響について検討した研究もなされている。また、地震の影響としては、慣性力、地震時土圧、地震時動水圧が挙げられている。

橋梁を震度法によって設計する場合、基本的には、水平方向に重力加速度の何倍かがかかった時を想定し、許容応力度、許容支持力、許容変位、安全率の検討を行うことになる。水平方向に重力加速度の何倍を考慮するかという係数を、水平震度（地震による揺れの強さを表す震度階とは異なる）と呼ぶ。構造物の質量に水平震度をかけたものが、水平方向に慣性力として作用する。鉛直方向の地震動に対しては、耐力的に余裕のある場合が多いので、動的解析によって別途照査することで対応可能だと考えられる。また、水平方向に対しても、橋軸方向と橋軸方向の応答が、同時に最大値をとることは希だと考えられるため、水平2方向別々

に慣性力をかけて設計することとなっている。

設計にあたって考慮すべき要因としては、1) 固有周期、2) 地盤種別、3) 地域、4) 重要度が挙げられる。これらの要因が異なると、地震時の挙動や要求される耐震性が異なるため、水平設計震度に補正係数をかけることで、対応することになっている。

#### 1) 構造物の固有周期の考慮

構造物には、それぞれ揺れやすい周期（固有周期）が存在し、地震動にその周期の波が多く含まれていると、共振現象をひきおこす。概して短周期の構造物より長周期の構造物の方が、地震による慣性力は小さくなる。耐震設計には、このような構造物の固有周期を考慮することが必要である。

応答スペクトルの項で説明されているとおり、構造物の固有周期を横軸に、縦軸に構造物の応答量をとったグラフが応答スペクトルである。構造物の設計にあたっては、水平方向にかける加速度を規定するために、絶対加速度応答スペクトルが用いられ、設計スペクトルと呼ばれる。個々の実際の地震動による応答スペクトルは、周期特性にばらつきがあり、そのままの形で設計に用いるには適さない。設計スペクトルは、日本全国でこれまでに得られた波形を基に、次に述べる地盤種別ごとに設定されている。

#### 2) 地盤種別の考慮

地盤の堅さは、構造物の地震応答に大きな影響を及ぼす。地盤が軟らかいほど、地震動の卓越する成分が長周期化する。同じ種類の構造物でも、地盤によって応答が当然異なる。道路橋示方書では、せん断波速度によって地盤の堅さを3つに分け、岩盤等のI種地盤、洪積層を中心とするII種地盤、軟弱沖積層等のIII種地盤に区別している。

#### 3) 地域特性の考慮

日本は一般的に地震国と呼ばれているが、これまでに地震の被害をよく受けた地域もあれば、まったく地震被害のない地域もある。構造物の設計には、これらの地域特性を考慮することが求められる。道路橋示方書では、これまでの被害地震の分布を考慮して、都道府県別にA、B、Cの3種類に区別して補正係数を定めている。

注意点としては、人間の歴史に比較して、地震の活動状況は時間規模が圧倒的に長いということが挙げられる。歴史の長い地域は結果的に係数が高くなり、歴史的な記録のあまり残っていない地域で最近数百年地震活動のない地域は係数が低くなる。このため、活断層をも考慮した地震危険度解析の例もある。

#### 4) 構造物の重要度の考慮

必要度・迷惑度・代替性・機能回復の難易を考慮するとあり、具体的には、交通量、幹線道路かどうか、迂回路の有無、落橋後の復旧の難易度から、1級と2級に分類している。橋梁単体ではなく、ライフラインの一部として考えた場合の橋梁という位置づけをすると、重要度に今まで以上の差をつけるべきではないかという議論もある。なお、鉄道橋では、道路と違って迂回路がないことが普通であるので、重要度の区別はない。

以上のことを考慮して、道路橋示方書の耐震設計編では、各種の補正係数を与えている。0.2 gを基本とし、次式によって設計水平震度を決定している。水平方向に静的な力がかかったときの、応力や転倒の危険性を検討することになっている。

$$k_h = c_z \cdot c_G \cdot c_I \cdot c_T \cdot k_{h0} \quad (14)$$

ここで、 $c_z$  は地域別補正係数、 $c_G$  は地盤別補正係数、 $c_I$  は重要度別補正係数、 $c_T$  は固有周期別補正係数、 $k_{h0}$  は標準設計震度 0.2、 $k_h$  が設計水平震度であり 0.1 を下回らないことと規定されている。

#### b. 地震時保有水平耐力の照査

前述の震度法は、許容応力度設計である。しかし、大地震の際には、構造物が塑性領域に入ることを許容し、十分な変形性能によって壊滅的な破壊を防ぐことは、防災・減災に有効である。平成 2 年の道路橋示方書改訂<sup>1)</sup>によって、RC 橋脚に対する規定ができ、復旧仕様<sup>2)</sup>では鋼製橋脚も保有水平耐力を照査することとなった。さらに、復旧仕様では、橋脚基礎の地震時保有耐力および変形性能の照査という項も新しく設定されている。

橋脚上部に水平方向に力を加えていったときの、力と変形の関係を調べ、非線形領域に入ることも考えて、地震時の保有耐力を照査する。それには、橋脚を高さ方向にいくつかの断面を考え、それぞれの断面を細かいファイバー要素に分割して、断面のモーメント-曲率関係を調べる。橋脚上部に力がかかったときの各断面に作用するモーメントを計算し、そこから各断面の曲率を計算する。その曲率を積分することによって、変形量を求めることになっている。

構造物が変形性能に優れていると、地震のエネルギーを塑性変形によって消費することになり、地震時挙動に有利である。そのため、道路橋示方書ではじん性を考慮して、エネルギー一定則によって震度を低減できると規定している。

また、RC 橋脚では曲げ破壊が先行するか、せん断破壊が先行するか、破壊形式によっても保有耐力の定義をかえている。1. で述べたように、曲げ破壊では揺れが繰り返されるにつれて破壊が緩やかに進行することもある。橋脚の最終的な崩壊にまでは至りにくい。それに対して、せん断破壊は脆性的なため、それぞれの破壊形式に対して安全率を変えている。図 2 に、復旧仕様の地震時保有耐力照査用設計震度を示す。

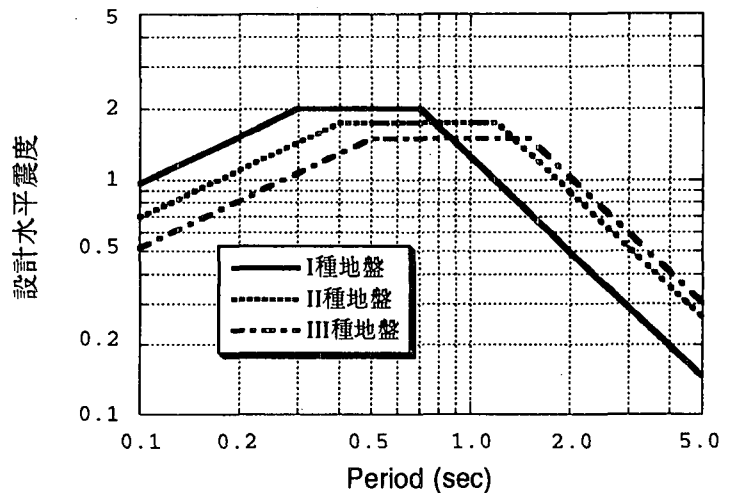


図 2 復旧仕様の地震時保有耐力照査用設計震度<sup>2)</sup>

#### c. 構造細目

耐震設計は耐震計算に加え、構造的な検討と配慮が必要である。示方書に規定されている内容は、現在までの知識と経験で計算を単純化したものである旨が記されている。これは、土木工学、特に防災工学に経験工学的な色合いが強いためであるが、実際には、示方書に書かれていることを機械的に適用してしまう面が強いと思う。より安全な構造物を建設するために、1) 軟弱地盤上の下部構造の安定性、2) 下部構造の形式・地盤条件が異なる橋、3) 上部と下部の接点：構造上・施工上の継ぎ目、4) 下部の躯体と基礎との接合部、という 4 点の留意点が述べられている。

復旧仕様<sup>2)</sup>では、震災状況をふまえて、1) 軸方向鉄筋の段落とりの廃止、2) 落橋防止構造の複数設置、3) ゴム支承の推奨、の 3 点について改訂している。



1. でも述べたとおり、軸方向鉄筋の段落とし部は弱点となりやすく、復旧仕様では段落としを行わないことを基本とした。落橋防止構造としては、可動支承に移動制限装置を設け、かけ違い部の長さを十分にとり、桁と下部構造を繋ぐ、桁または下部構造に突起をつける、桁と桁を繋ぐなど複数の落橋防止装置を付けることとしている。それぞれが1gに耐えることが求められているが、さらに衝撃力に耐えることも必要だと考えられる。支承部の問題としては、通常の固定支承と可動支承の組み合わせでは、固定支承が上部工の慣性力をほとんど受け持つことになるため、効果的な反力の分散が必要なことが挙げられる。復旧仕様ではゴム支承による半固定支承が望ましいとされているが、免震化に関する問題については後述する。

#### 4. 橋梁の動的解析手法

地震によって橋梁が被害を受けるのは、振動という動的現象が主因であり、動的な解析によって設計を照査することが重要である。動的解析手法としては、地震の際の構造物の揺れを、時間を追って逐一計算していく時刻歴応答解析法と、単純な構造物の動的解析結果を応用して最大応答値を推定する応答スペクトル法とがある。

##### a. 時刻歴応答解析法

橋梁を有限要素法でモデル化し、時刻歴応答解析をすることによって、構造物の非線形性も考慮した耐震性を照査することができる。非線形性を表す履歴復元力モデルとしては、鋼構造物に対してはバイリニアモデル、RC構造物に対しては武田モデル等の劣化型トリリニアモデルがよく用いられる。非線形地震応答解析には、2. で述べたモード解析手法が使えず、計算量が多くなる。運動方程式を直接計算する解法の他に、等価な線形系におきかえる手法もあるが、現在では計算機の発達によって、パソコンでも非線形系の直接計算が簡単にできるようになった。

入力地震波は、架橋地点でこれまでに得られた波形を基に設定するのが望ましい。標準的な波形としては、道路橋示方書・V耐震設計編<sup>1)</sup>や道路橋の免震設計マニュアル(案)<sup>2)</sup>に、設計スペクトルに適合する模擬地震波形が記載されている。復旧仕様<sup>3)</sup>では、1995年兵庫県南部地震時の記録として、I種地盤では神戸海洋気象台の記録、II種地盤ではJR鷹取駅の記録<sup>4)</sup>、III種地盤では東神戸大橋周辺部の記録を参考にすることとなっている。

時刻歴応答解析は、入力地震波形の特性に大きく影響を受けるので、実地震波形を用いる際には、その卓越周波数等、十分に注意する必要がある。応答結果の評価指標としては、最大変位を降伏変位で割った最大塑性率(じん性率)や、履歴ループが囲む面積として表される履歴エネルギー吸収量などがある。

##### b. 応答スペクトル法

時刻歴応答を逐一計算するかわりに、応答スペクトルから最大応答値を推定する手法である。前述の固有値解析(モード解析)によって構造物の固有周期を計算し、それぞれの周期に対する最大応答値を応答スペクトルから求める。各モードの最大応答値をすべて加えたものは、各モードの応答波形が同時に最大になることが少ないために、構造物全体の最大応答値としては過大評価になってしまう。そのため、各振動モードの最大応答値の2乗和平方根、あるいはモード間の相関も考慮した完全2次結合法(CQC法)によって最大応答値を推定するという工学的手法が用いられる。

参考までに、図3に道路橋示方書にある標準加速度応答スペクトルを、図4に復旧仕様の標準加速度応答スペクトルを示す。

### 5. 橋梁の免震化

従来の橋梁設計では、地震をあるがままに受けて、強度やエネルギー吸収などねばりのある構造で対処して地震に耐えるという「耐震設計」が主体であった。それに対して、地震の入力エネルギーを小さくすることを目指し、地震の力から免れる「免震設計」の考え方がある。

免震設計の考え方自体は古くから存在し、鎌倉の大仏をはじめ、実際の構造物に適用された例も多い。しかし、橋梁の免震化に適用するためには、野外で使用するために十分な耐久性や、 $\pm 30$ 度に耐えられる温度特性とを兼ね備えた、安定した性能の材料が開発されることが必要であった。近年、それらの条件を満足するゴム系材料が開発され、免震橋梁が現実の物となった。

免震構造物の原理は、固有周期の長周期化と、減衰性の付加である。一般的な加速度応答スペクトルは、固有周期が長くなるほど応答が小さくなる。よって、構造物を長周期化することによって、構造物に作用する地震力を小さくすることができる。一方、一般的な変位応答スペクトルは、固有周期が長くなるほど応答が大きくなる。したがって、単に構造物を長周期化しただけでは、地震力は小さくなくても、その応答変位が非常に大きくなり、橋梁の場合には継ぎ手部の仕様などに工夫が必要である。そこで、長周期化と同時に減衰性を持たせることによって、応答変位もある限度内に抑えることが重要となる。

従来の固定支承と可動支承という考え方では、地震時の大きな力を、固定支承がほとんどすべて受け持つことになってしまい、合理的ではない。免震ゴム支承によってすべての支承を半固定とすることで、地震時の反力を各橋脚に分散させることができるという意義もある。また、効果的な反力分散によって、多径間連続化、ノージョイント化も可能である。

道路橋の免震設計マニュアル(案)<sup>3)</sup>では、注意点として、1) 橋の固有周期とエネルギー吸収性能を増大させる効果を検討すること、2) 上部構造の地震時変位に注意すること、3) 免震装置を用いないで設計される一般の橋と同等以上の耐震性を確保すること、4) 地盤に不安定な層があれば免震化しないこと、5)

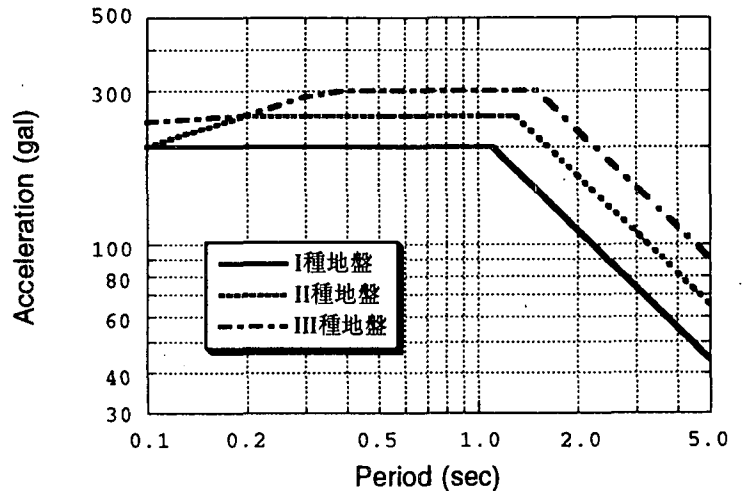


図3 道路橋示方書による標準加速度応答スペクトル<sup>1)</sup>

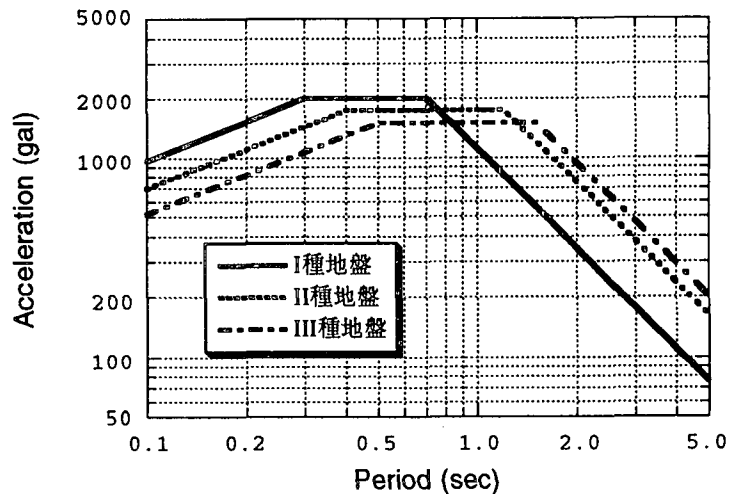


図4 復旧仕様による標準加速度応答スペクトル<sup>2)</sup>

簡単な機構の装置を力学的挙動が明確な範囲で使うこと、が記されており、かなり慎重な立場をとっている。しかしながら、復旧仕様でゴム支承の利用が推奨されていることもあり、今後免震橋梁はますます増えることが予想される。また、免震化することは、既存橋梁の耐震補強方法としても有効である。

橋梁の免震装置としては、免震支承やダンパーがあり、その両者を兼ね備えた高減衰ゴム支承(HDR)や、鉛プラグ入りゴム支承(LRB)などが実用化されている。

## 6. おわりに

大きな地震は、橋梁の耐用年間にたかだか数度しか発生しないが、発生すれば非常に大きな力が作用する。このため、耐用年間に数度は発生する可能性のある中規模地震に対しては、発生しても通常の使用が可能でなければならないが、耐用年間に1度あるかないかの大地震に対しては、完全な破壊はせず、人命が損なわれないことを目標とすべきだという二段階設計の考え方もある。また、個々の橋梁の耐震設計という観点の他に、ライフラインとして見た場合の橋梁という視点から、橋梁の重要性にランク付けを施すべきだという考え方もある。橋梁の耐震安全性として、どのレベルを目標とすべきかという社会的合意を得る必要もある。橋梁の耐震問題には、まだまだ検討すべき項目が数多く残されている。なかでも、古い橋梁の耐震補強問題は、早急に対策を施す必要性がある。

新しい橋梁の耐震設計に十分な配慮をすることは、もちろん重要なことである。しかし、数の上で圧倒的に多い既存橋梁の耐震性を高めることは、都市全体の耐震性向上に与える影響が非常に大きい。十分な維持管理とともに、新しい橋梁と同程度の機能を持つよう、常に最新化していくことが必要であろう。耐震補強効果を定量的に確認した上で工事を行うことも重要である。補強を行うことによって耐震性がどの程度向上するのか、それでも破壊するときにはどのような破壊形式になるのか、破壊や震災復旧までを視野に入れた評価を行うことが必要である。現時点では、震度法レベルの設計法、地震時保有水平耐力レベルの設計法、復旧仕様の設計法、さらに免震設計法と、道路橋に限っても様々な設計法がある。現在、示方書の改訂作業が進められているが、体系的に整った設計法の早急な整備が望まれる。

阪神・淡路大震災によって、阪神間の橋梁構造物は、かつてない規模の被害を受けた。防災工学は経験工学的な性格が強く、数百年単位で起きる大地震によってひきおこされる現象の解明と対策は、未だ完璧であるとは言えない。しかし、これまでの地震によって、耐震工学は少しずつ進歩してきている。今回大きな被害を受けた橋梁構造物が設計され建設される時にはわからなかった問題点も、いくつかは解決され、新しい構造物の設計に活かされている。今回の地震も含めて、多くの尊い犠牲を無駄にしないよう、さらに破壊原因の追究と対応策の検討を進めていかなければならない。

## 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，平成2年2月。
- 2) 日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様」の準用に関する参考資料（案），平成7年6月。
- 3) 土木研究センター：道路橋の免震設計法マニュアル（案），平成4年3月。
- 4) Nakamura, Y.: Waveform and its Analysis of the 1995 Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake, JR Earthquake Information No.23c, Railway Technical Research Institute, Feb. 1995.