

道路橋の耐震技術

運上 茂樹*

1. はじめに

平成 7 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震は、各種の構造物に大正 12 年の関東大震災以来最大の被害を引き起こした。道路橋においても、橋脚の倒壊、橋桁の落下を始め、多数の橋梁で大きな被害が発生したり。このような甚大な被害の経験を踏まえ、道路橋の耐震設計技術は、従来の弾性設計から破壊に至る塑性域の挙動を追跡して耐震性能を評価する本格的なじん性設計に大きく転換した。

さて、道路橋に関する技術基準である道路橋示方書は、「橋、高架の道路等の技術基準」の略称であり、Ⅰ共通編、Ⅱ鋼橋編、Ⅲコンクリート橋編、Ⅳ下部構造編、Ⅴ耐震設計編の 5 編から構成されている。耐震設計にかかわる事項は、主として・耐震設計編に規定される。Ⅴ耐震設計編は、わが国の道路橋の耐震設計基準として初めてまとめられた昭和 46 年の道路橋耐震設計指針が、昭和 52 年の建設省新耐震設計法（案）の研究成果を踏まえて改訂されて、昭和 55 年に通達されたときに始まる。

その後、平成 2 年、平成 8 年、そして平成 14 年に改訂が行われている²⁾。平成 2 年には関東大震災級の大規模地震に対して鉄筋コンクリート橋脚の非線形域の耐力を照査するじん性設計法の導入、平成 8 年には兵庫県南部地震による道路橋の甚大な被害の経験を踏まえ、マグニチュード 7 級の内陸直下で発生する地震による地震動を考慮するとともに、このような強い地震動に対して必要な耐震性を確保するために、橋脚のみならず、基礎、支承などの主要構造部材に対して地震時保有水平耐力法による耐震設計を行うことを主な内容とする改訂が行われた。そして、平成 14 年 3 月には、性能規定型の技術基準を目指し、要求する事項とそれを満たす従来からの規定とを併記する書式とすることを基本とする改訂が行われた。さらに、大規模地震に対する橋台基礎、上部構造、鋼製橋脚等の耐震性能の照査法等、平成 8 年の改訂以降の調査研究成果を踏まえた改訂が行われている。



* Shigeki UNJOH

独立行政法人
土木研究所耐震研究グループ
首席研究員

本文では、道路橋示方書Ⅴ耐震設計編の規定を中心として、道路橋の耐震設計技術を解説する。

2. 性能規定型の技術基準

道路橋示方書では、平成 14 年 3 月に国際化や多様な構造・工法等への柔軟な対応を可能とする性能規定型基準を目指した改訂が行われた。性能規定型基準は、構造物が有すべき性能（要求性能）および設計された構造物が要求性能を満足することを確認するために照査する項目等を規定する基準であり、要求する事項とそれを満たす従来からの規定とを併記する書式が採用されている。たとえば、荷重に対する構造物の応答値の算定方法や構造部材の仕様等については検証方法や適合みなし仕様として位置付けられ、性能の検証を前提として設計者等が新たな構造を提案することも可能な基準体系となっている。

性能規定型基準で最も重要な点は、どこからどこまでが遵守すべき要求事項で、どこからどこまでが性能の検証を前提として設計者等の判断により変更あるいは別の選択を可能とする事項であるのが明確にされていることである。道路橋示方書では、このような要求事項と検証方法あるいはみなし適合仕様の区分に関して、表現方法を含めて明確に整理、規定されている。今後、新構造や新工法の開発やその検証、あるいは解析法等の性能検証方法の高度化に応じて、みなし適合仕様等は順次拡大されていくことが想定されている。

Ⅴ耐震設計編は、図 - 1 に示すような基準構造となっている。静的照査法や動的照査法、各部材の限界状態の評価式等は、検証を前提として変更あるいは別の選択が可能な性能検証法あるいは適合みなし仕様といった位置付けとされている。

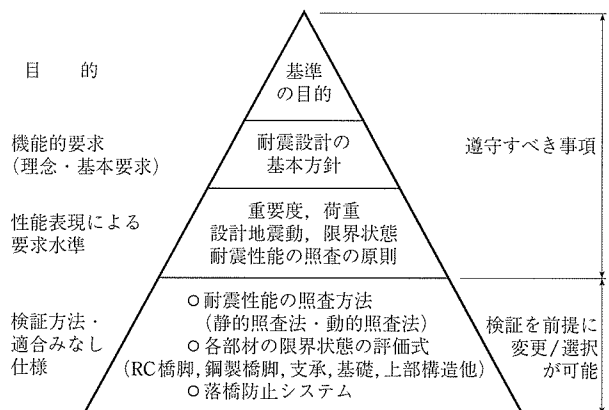


図 - 1 道路橋示方書Ⅴ耐震設計編の階層化構造

3. 耐震設計の基本方針

表 - 1 は、道路橋の耐震設計で考慮する地震動と目標とする橋の耐震性能を示したものである。

表 - 1 設計地震動と目標とする橋の耐震性能

設計地震動		A 種の橋	B 種の橋
レベル 1 地震動		地震によって橋としての健全性を損なわない性能 (耐震性能 1)	
レベル 2 地震動	タイプ I の地震動 (プレート境界型の大規模な地震)	地震による損傷が橋として致命的とならない性能 (耐震性能 3)	地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能 (耐震性能 2)
	タイプ II の地震動 (兵庫県南部地震のような内陸直下型地震)		

耐震設計で考慮する地震動としては、橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動 (レベル 1 地震動) および供用期間中に発生する確率は低い大きな強度をもつ地震動 (レベル 2 地震動) の 2 段階の地震動を考慮する。ここで、レベル 1 地震動としては、比較的生じる可能性の高い中規模程度の地震による地震動とし、従来の耐震設計において弾性設計に用いられてきた地震力が踏襲されている。また、レベル 2 地震動としては、平成 2 年の道路橋示方書において規定された大正 12 年の関東地震の際の東京周辺における地震動のように発生頻度が低いプレート境界型の大規模な地震による地震動 (タイプ I の地震動) と、平成 7 年兵庫県南部地震のように発生頻度が極めて低いマグニチュード 7 級の内陸直下で起こる地震による地震動 (タイプ II の地震動) が考慮されている。

なお、平成 14 年 3 月に改訂された道路橋示方書では、適切に推定できる場合には建設地点の地震情報や地盤条件

等を考慮して設計地震動を設定することとされている。しかしながら、設計地震動の設定に関しては、現段階では地震情報や深部地盤構造などの条件が十分に明らかにされている状況にはなく、また、地震動の推定法に関しても現在研究が進められているところであり、今後の調査研究の進展に応じて適切に対応していく必要があることが解説されている。

これらの地震動に対して、橋の耐震設計は、橋の重要度に応じて必要とされる耐震性能を確保することを目標として行う。橋の重要度は、道路種別と橋の構造・機能により分類され、重要度が標準的な橋 (A 種の橋) については、大規模地震に対して致命的な被害を防止すること (耐震性能 3) を目標とし、また、高速道路、一般国道、緊急輸送道路等におけるとくに重要度が高い橋 (B 種の橋) では、限定された損傷にとどめること (耐震性能 2) が目標とされている。

4. 耐震性能の照査の原則

目標とする橋の耐震性能を具体的に耐震設計において実現するためには、橋梁の構造条件に応じて耐震性能を満足する限界状態を適切に設定する必要がある。

道路橋示方書では、限界状態の設定の原則が規定されており、たとえば、耐震性能 2 に対しては、塑性化を考慮した部材にのみ塑性変形が生じ、その塑性変形が当該部材の修復が容易に行い得る範囲内で適切に定めるものとする。塑性化を考慮する部材としては、確実にエネルギー吸収を図ることができ、かつ速やかに修復を行うことが可能な部材を選定すること、橋の構造特性を踏まえ、塑性化を考慮する部材を適切に組み合わせるとともに、その組合せに応じて、各部材の限界状態を適切に設定すること、が規定されている。図 - 2 は、塑性化あるいは非線形性を考慮

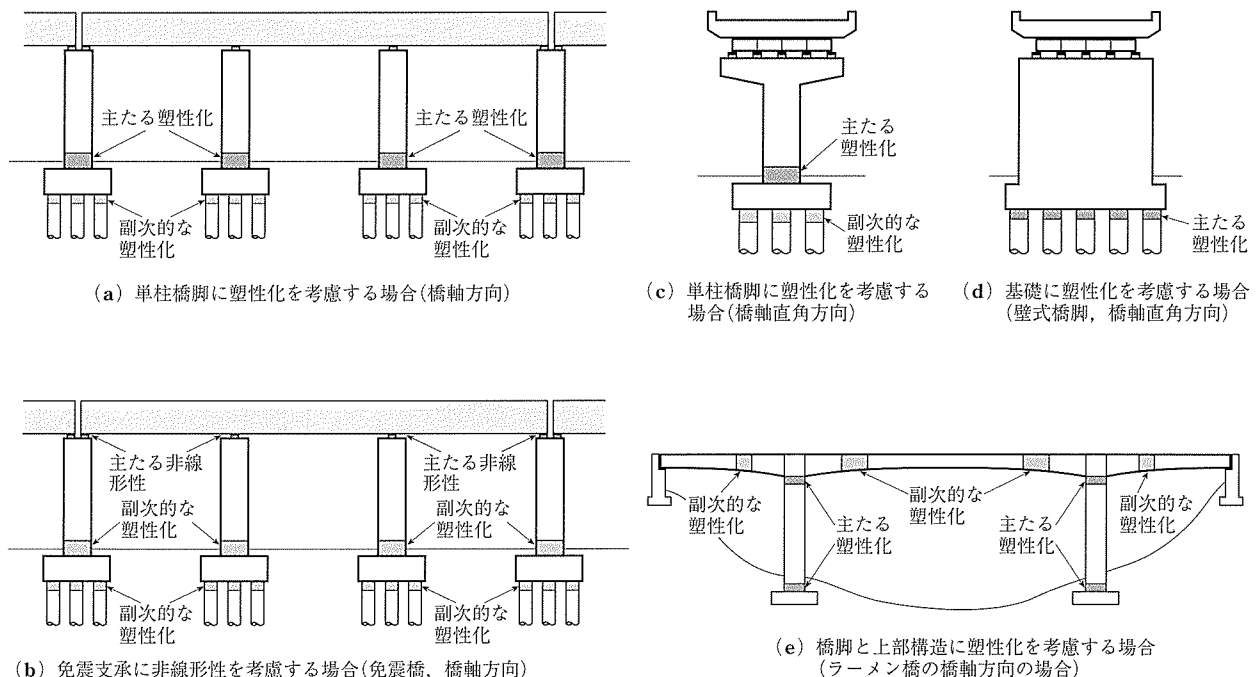


図 - 2 塑性化あるいは非線形性を考慮する部材の組合せの例

表 - 2 地震時の挙動の複雑さと耐震性能の照査に適用できる耐震計算法

耐震性能	橋の動的挙動が複雑ではない橋	塑性化や非線形性が複数箇所 に生じる橋およびエネルギー 一定則の適用性が十分検討 されていない構造の橋	静的解析の適用性が限定される橋	
			高次モードの影響が懸念さ れる橋	塑性ヒンジの発生箇所がは っきりしない橋、複雑な振 動挙動をする橋
耐震性能 1	静的照査法	静的照査法	動的照査法	動的照査法
耐震性能 2 耐震性能 3	静的照査法	動的照査法	動的照査法	動的照査法
適用する橋の例	右記以外の条件の橋	・ゴム支承を用いた地震時 水平力分散構造を有する 橋 ・免震橋 ・ラーメン橋 ・鋼製橋脚に塑性化を考慮 する橋	・固有周期が長い橋 ・橋脚高さが高い橋	・斜張橋、吊橋等のケー ブル系の橋 ・上・中路式アーチ橋 ・曲線橋

する部材の組合せの例を示したものである。このように塑性化を考慮する部材を適切に選定するとともに、後述する 7. に示すように各部材・部位の限界状態を設定する。

耐震性能の照査は、想定する地震動に対する橋の挙動が上記の限界状態を越えない状態にあることを照査することが基本となる。耐震性能の照査方法は、「静的照査法」と「動的照査法」の 2 つに分類され、表 - 2 に示すように橋の地震時の挙動の複雑度に応じて選択される。静的照査法としては、地震時の挙動が単純で主たる振動モードが 1 つとなるような橋を対象に、従来の構造部材の弾性域を考慮した震度法と構造部材の非線形域のじん性を考慮した地震時保有水平耐力法を用いる。地震時の挙動が複雑な橋に対しては、これらの静的照査法の適用性が限定されるため、動的照査法により耐震性能の照査を行う。

5. 設計地震動

レベル 1 地震動およびレベル 2 地震動は、それぞれ、次のように与えられている。

$$\begin{aligned}
 S &= c_z c_D S_0 \\
 S_I &= c_z c_D S_{I0} \\
 S_{II} &= c_z c_D S_{II0}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

ここに、

S, S_I, S_{II} : レベル 1 地震動, レベル 2 地震動 (タイプ I), レベル 2 地震動 (タイプ II) の加速度
応答スペクトル (gal)

c_z : 地域別補正係数

c_D : 減衰定数別補正係数で、減衰定数 h に応じて次式により求める。

$$c_D = \frac{1.5}{40h + 1} + 0.5
 \tag{2}$$

S_0, S_{I0}, S_{II0} : レベル 1 地震動, レベル 2 地震動 (タイプ I), レベル 2 地震動 (タイプ II) の標準加速度応答スペクトル (gal, 図 - 3 および図 - 4 参照)

レベル 1 地震動は、従来からの慣行と経験上の事実を統合した上で、わが国の地盤上において観測された 394 成分の強震記録から求めた加速度応答スペクトルの統計解析結果に基づき、これに既往の地震被害の特性、地盤の振動特性、その他の工学的判断を加えて、地盤種別ごとに定められている。

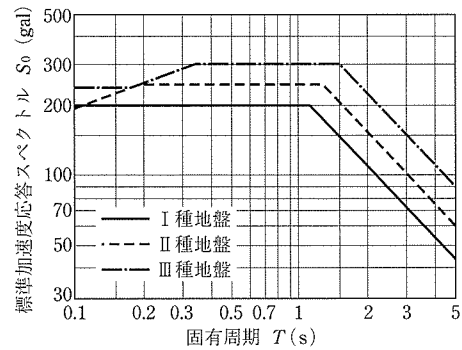
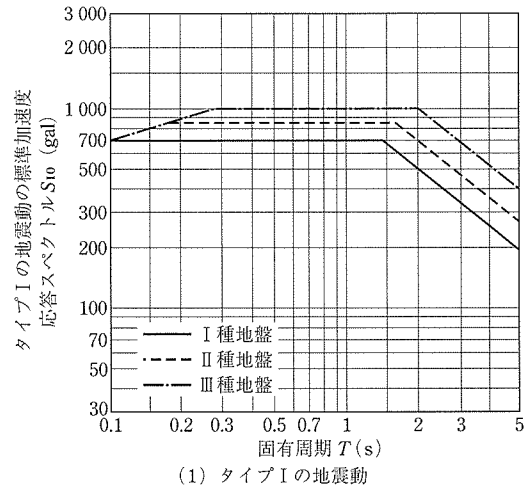
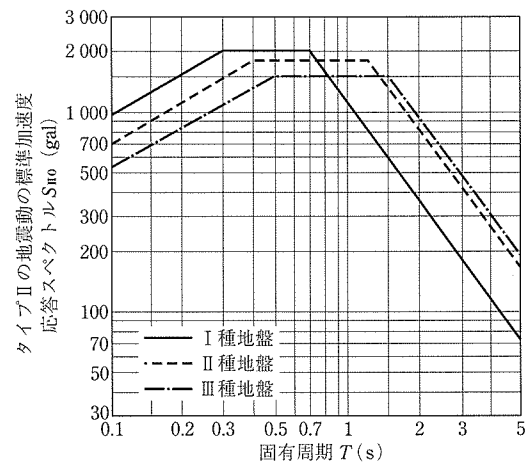


図 - 3 レベル 1 地震動の標準加速度応答スペクトル



(1) タイプ I の地震動



(2) タイプ II の地震動

図 - 4 レベル 2 地震動の標準加速度応答スペクトル

一方、レベル2地震動(タイプI)としては、大正12年の関東地震に際して東京周辺で生じた地震力をこのタイプの地震動の例としてとらえられている。関東地震当時には、強震観測が行われていなかったため、強震記録のように科学的な根拠に基づく地震動の評価はできないが、距離減衰式等により地盤上の加速度は0.3~0.4G程度と推定されている。地盤にある振動が生じた場合に橋に生じる加速度は、一般には地盤の加速度の2~3倍程度になることから、橋が弾性挙動するとすれば、その橋に生じる加速度はおおむね0.7~1G程度となる。このような事実とわが国で観測された394成分の強震記録の加速度応答スペクトルの統計解析結果をもとに定められている。

また、タイプIIの地震動は、平成7年兵庫県南部地震により地盤上で実測された加速度強震記録に基づき、この加速度応答スペクトルを地盤種別ごとに分類して定められたものである。すなわち、兵庫県南部地震では、神戸海洋気象台(I種地盤)、JR西日本鷹取駅(II種地盤)、東神戸大橋近傍地盤上(III種地盤)等において加速度が大きく構造物に破壊的な影響を与えた地震動加速度が観測されている。これらの加速度応答スペクトルを計算し、特別に大きなピークは平滑化して求めたスペクトルとして定められている。

なお、静的照査法である震度法や地震時保有水平耐力法で用いられる設計水平震度は、以上に示した加速度応答スペクトルに対して減衰定数の補正を行って設定されている。

6. 地震時保有水平耐力法による耐震性能の照査

地震時保有水平耐力法による耐震性能の照査では、当該部材の地震時保有水平耐力が設計水平震度に構造物の等価重量を乗じて求められる地震力を上まわることを照査する。各構造部材の安全性の判定は以下のように行われる。

6.1 橋脚

橋脚に対しては、式(3)を満足することを照査する。さらに、重要度の高いB種の橋に対しては、原則として地震後の残留変位を式(4)により判定する。

$$P_a \geq k_{hc} W \quad (3)$$

$$\delta_R \leq \delta_{Rn} \quad (4)$$

ここに、

P_a : 橋脚の地震時保有水平耐力

k_{hc} : 地震時保有水平耐力法に用いる設計水平震度

W : 地震時保有水平耐力法に用いる等価重量

δ_R : 橋脚の残留変位

δ_{Rn} : 橋脚の許容残留変位で、原則として橋脚下端から上部構造の慣性力の作用位置までの高さの1/100とする。

橋脚の非線形域において大きなじん性を許容する設計を行えば、それだけ大きな非線形応答変位が生じることになり、これに伴って地震後に橋脚に生じる残留変位が大きくなる。地震後に下部構造躯体に生じる残留変位が大きくなると、復旧工事が困難となることなどが懸念される。このため、地震時保有水平耐力法による耐震設計では、過度のじん性に頼った設計とならないように残留変位応答スペク

トルに基づき、式(4)に示すように残留変位に対する照査を行う。残留変位応答スペクトルは、わが国の地盤上で得られたマグニチュード6.5以上の63成分の強震記録に対してバイリニア型の履歴特性を有する橋脚に平均的に求められた残留変位を設計用のスペクトルとして与えたものである。許容残留変位としては、原則として橋脚下端から上部構造の慣性力の作用位置までの高さの1/100、すなわち、橋脚の回転角として1/100(rad)とされている。兵庫県南部地震により被災した橋脚では、橋脚の残留変位が橋脚高さの1/60程度、または、15cm程度以上生じた場合には、残留変位を強制的に修復することが困難であったこと、支承部の嵩上げが必要になる等復旧が困難であることから橋脚の取り替えを必要とした事例があったこと、また、B種の橋は地震による損傷を限定された範囲にとどめ、橋としての機能の回復をより速やかに行うことを目標とすることから、これらの点を考慮して許容残留変位が1/100と定められている。

6.2 橋脚基礎

橋脚基礎の耐震設計では、死荷重および式(5)により算出する設計水平震度に相当する慣性力を設計地震力として考慮する。橋脚に生じる応答が弾性域の場合は、橋脚基部の断面力を荷重として考慮する。

$$k_{bp} = c_{df} P_U / W \quad (5)$$

ここに、

k_{bp} : 地震時保有水平耐力法による基礎の設計に用いる設計水平震度

c_{df} : 地震時保有水平耐力法による基礎の設計に用いる設計水平震度の算出に用いる補正係数で1.1とする

P_U : 基礎が支持する橋脚の終局水平耐力

W : 地震時保有水平耐力法に用いる等価重量

図-5は、地震時保有水平耐力法による橋脚基礎の耐震設計の考え方を示したものである。橋脚基礎は、式(5)の荷重を作用させたときに、基礎の降伏に達しないように耐震設計することを原則としている。これは、橋脚基礎の耐力が橋脚躯体の終局耐力を下回ると、基礎~地盤系にも非線形性が生じることになり、一般に基礎の被害は橋脚の被害よりも発見が困難であり、また、復旧も大がかりなものとなるためである。ただし、橋軸直角方向において壁式橋脚のように橋脚躯体が設計水平震度に対して十分大きな終局水平耐力を有している場合、あるいは、液状化の影響により基礎に降伏以降の塑性化を許容し、基礎でのエネルギー吸収を期待する場合には、基礎の応答塑性率および応答変位が許容値以下となることを照査する。

橋脚基礎の変位により橋の安全性が損なわれないようにする必要があるが、その影響の程度は上部構造、橋脚および落橋防止システムの形式や特性により異なることや、また、基礎の変形による影響については未解明な点が多いことから、基礎天端での変位を制限することとされている。基礎の変位の制限値としては、回転角0.02radが目安とされている。

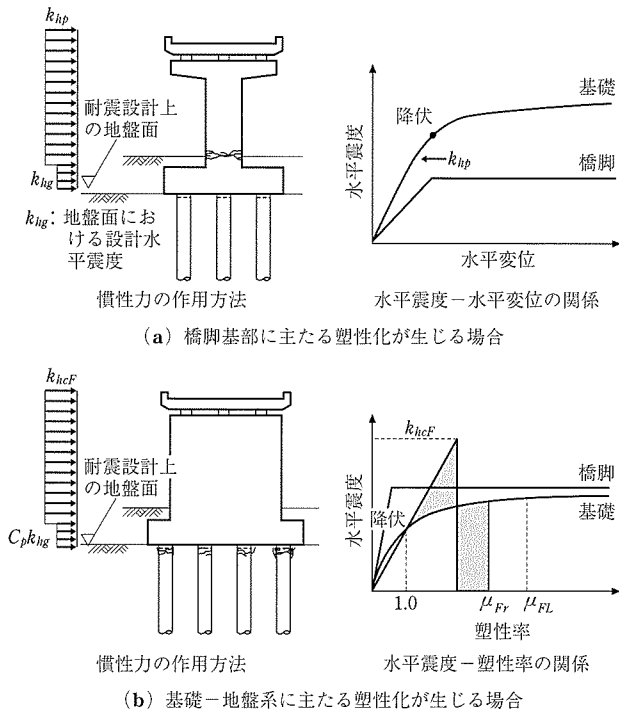


図-5 地震時保有水平耐力法による橋脚基礎の耐震設計

7. 構造部材の限界状態の評価と耐震性能の照査

7.1 鉄筋コンクリート橋脚

鉄筋コンクリート橋脚については、破壊形態に応じて図-6に示すフローに従って地震時保有水平耐力および許容塑性率

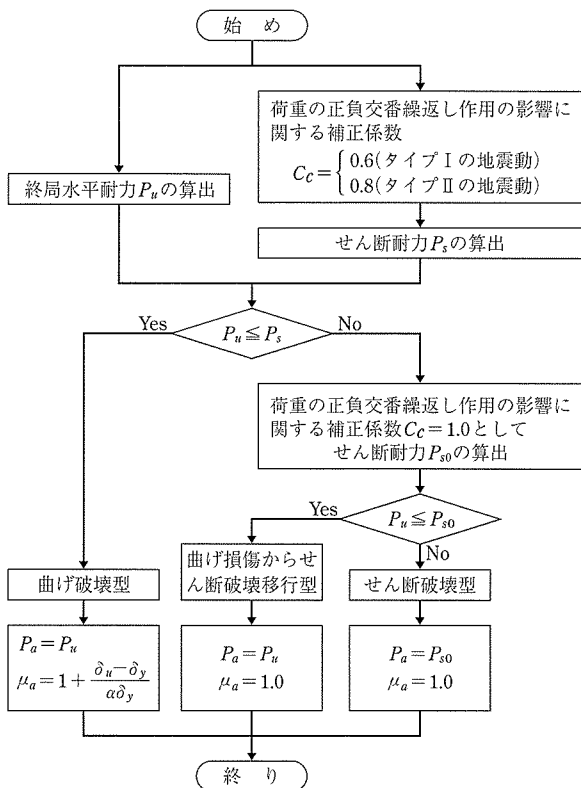


図-6 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力と許容塑性率

性を評価する方法が規定されている。これらの評価においては以下の点の特徴となっている。

- ①帯鉄筋による拘束効果を考慮したコンクリートの応力度-ひずみモデル
- ②塑性ヒンジを考慮した鉄筋コンクリート橋脚の変形性能の解析法
- ③震動の繰返し特性に応じた許容塑性率の評価
- ④寸法効果、荷重の正負交番作用の影響を考慮したコンクリートのせん断耐力の評価法

さらに、地震時に正負交番の繰返し変形を受け、部材の塑性変形性能を期待して耐震設計がなされる鉄筋コンクリート橋脚を対象として、十分な変形性能を発揮するために必要な鉄筋の配筋に関する構造細目が規定されている。

7.2 鋼製橋脚

鋼製橋脚については、平成7年兵庫県南部地震による被災状況を踏まえ、水平地震力による補剛板や鋼管の座屈、割れ等に伴って、上部構造等の死荷重に対する鉛直方向の耐力を失い橋脚の崩壊につながるような破壊を防ぐことを目的として設計することが規定されている。

鋼製橋脚の内部に適切にコンクリートを充填することにより地震時保有水平耐力および変形性能を向上させることができる。コンクリートを充填した鋼製橋脚の模型実験データに基づく地震時保有水平耐力および許容塑性率の算定法が規定されている。また、コンクリートを充填しない鋼製橋脚についても、じん性を向上させるための構造細目が示されるとともに、模型実験データに基づく地震時保有水平耐力および許容塑性率の算定法が規定されている。

7.3 橋台基礎

従来、橋台に対しては、レベル2地震動に対する耐震性能の照査を行っていなかった。これは、①既往の橋台および橋台基礎の被災事例によると、地盤に液状化が生じていない場合には大きな被害が生じた事例は少ないこと、②橋台は、橋脚のように地上に突き出した構造物と比較して背面土の挙動の影響が大きく、橋台自身の慣性力の影響が相対的に小さいこと、③橋台は土圧に抗する構造物であり、通常、前面に押し出される方向に変位することから、橋台に過大な損傷が生じた場合であっても落橋に至る可能性が小さいこと、等が考慮されたものである。

一方、近年、レベル2地震動に対する修正物部・岡部法による地震時土圧の算定方法が提案され、橋台基礎の地震時挙動を具体的に評価することができるようになった。このため、橋台および橋台基礎に対する既往の被災事例も鑑み、橋に影響を与える液状化が生じると判定される地盤上にある橋台基礎のみを対象として、橋台基礎に所要の耐力を付与するとともに、基礎に損傷が生じた場合でも過大な残留変位が生じないようにするために、レベル2地震動に対する照査を行うこととされている。

図-7は、逆T式橋台基礎の照査において想定する荷重状態を示したものであり、これより算定される橋台基礎の変形を許容値以内に収めるように設計を行うものである。橋台および橋台基礎の地震時挙動は、背面土の振動に支配されると考えられることから、橋台の慣性力および地震時

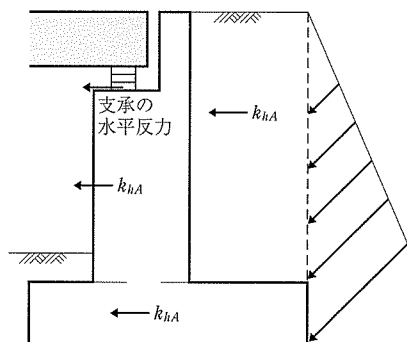


図-7 逆T式橋台基礎の照査において想定する荷重状態

土圧を算定するための設計水平震度は、地盤面の設計水平震度に基づき式(6)により算出する。

$$k_{hA} = c_A k_{hg} \quad (6)$$

ここに、

k_{hA} : 橋台基礎の照査に用いる設計水平震度

c_A : 橋台基礎の設計水平震度の補正係数で、1.0としてよい。

k_{hg} : レベル2地震動の地盤面における設計水平震度

7.4 上部構造

上部構造においては、上部構造と下部構造の接点となる支承部周辺を除いて、一般に地震の影響が支配的とならない。しかしながら、ラーメン橋やアーチ橋が橋軸方向に地震力を受ける場合などには、地震の影響が上部構造の設計に支配的となる場合がある。

最近の研究等により繰返し荷重下における上部構造の非線形挙動特性が明らかにされつつあり、地震時のエネルギー吸収を図る主たる塑性化は橋脚に考慮することを前提として、上部構造に副次的な塑性化を考慮する場合の照査方法が新たに規定されている。表-3は、コンクリート上部構造に対する限界状態を示したものであり、模型実験データに基づき、恒久復旧が不要となる限界、かぶりコンクリートが大きく剥離しない限界の評価法が設定されている。

7.5 支承部構造

支承部は、レベル2地震動により生じる水平力および鉛

直力に対しても、上部構造の慣性力を確実に伝達できる構造（タイプBの支承）とすることを基本とされている。ただし、橋台の拘束によりけたに大きな振動が生じにくい場合や支承部の構造上やむを得ない場合には、落橋防止システムと補完しあって慣性力に抵抗できる構造（タイプAの支承）としてもよいとされている。

タイプBの支承を用いる場合には、レベル2地震動に対する支承部の設計水平地震力は、橋脚に塑性化を考慮する場合には橋脚の終局水平耐力に相当する水平力、また、基礎に塑性化を考慮する場合には基礎の最大応答変位に相当する水平力とする。一方、タイプAの支承を用いる場合には、レベル1の設計水平震度を用いて算出される慣性力に相当する水平力を支承部の設計水平地震力とする。

8. 落橋防止システム

設計で想定されない地震動が作用したり、周辺地盤の破壊や構造部材の予期しない複雑な振動によって、想定を超える地震力や変位、変形が橋に生じる場合がある。このような不測の事態に対するフェイルセーフ機構として、落橋防止システムを設けることが規定されている。

落橋を確実に防止するために、落橋防止構造の機能を明確にし、桁かかり長、落橋防止構造、変位制限構造、および段差防止構造が落橋防止システムとして位置付けられ、これらの設計方法が規定されている。

9. おわりに

本文では、道路橋示方書V耐震設計編の規定を中心に道路橋の耐震設計技術を解説した。道路橋示方書は、性能規定型規定として明確に一步踏み込んだ基準体系となっており、今後、新たな技術開発の促進や新しい技術の現場への早期の反映などが期待される場所である。

【参考文献】

- 1) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部 地震における道路橋の震災に関する調査報告書，平成7年12月
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・耐震設計編，平成2年2月，平成8年11月，平成14年3月

【2002年8月19日受付】

表-3 コンクリート上部構造の限界状態の評価法

限界状態	照査の方向	応答曲げモーメントに対する引張縁側に、緊張したPC鋼材を配置している場合	応答曲げモーメントに対する引張縁側に、緊張したPC鋼材を配置していない場合
		耐震性能2 恒久復旧が不要となる 限界状態	橋軸方向 PC鋼材が弾性限界に達する曲率
	橋軸直角方向	ウェブ外縁鉄筋が降伏またはPC鋼材が弾性限界に達する曲率	
耐震性能3 コンクリートが大きく 剥離しない限界状態	コンクリート	最外縁コンクリートの圧縮ひずみが0.002以下	
	PC鋼材	PC鋼材の引張ひずみが0.035以下（伸びの最小値）	