

道路橋の耐震性能基準に関する日本とカリフォルニア州の比較

A comparison of the seismic design criteria of highway bridges between Japan and California

北海学園大学工学部土木工学科 フェロー 当麻庄司 (Shouji Toma)
Earthquake Engineering, California Dept. of Transportation Mark Mahan

1. はじめに

米国カリフォルニア州では、1995年に起きた日本の兵庫県南部地震よりも前にサンフランシスコおよびロスアンジェルス地方で道路橋に大きな地震被害を受け、耐震設計に積極的に取り組んできた。日本とカリフォルニア州ではこれまでの設計上あるいは施工上の慣習の違いから、また技術者の組織構成上の違いから耐震設計に対する考え方かなり異なる部分がある。筆者らはこれまで日本とカリフォルニア州の立場から共同でその解明に携わってきた¹⁾。

そこで、本論文では日本とカリフォルニア州の設計基準において、設計に大きな影響を与える性能基準に焦点を絞って検討を加えることにする。

2. 性能基準

表-1にカリフォルニア交通局(以降Caltransと呼ぶ)の耐震設計の基本となる性能基準^{2) 3)}を示す。同表中の機能性評価用地震動は道示のレベル1地震動(中地震)に相当し、安全性評価用地震動がレベル2(大地震)に相当する。表-2には道路橋示方書⁴⁾(以下道示と呼ぶ)の耐震性能基準を示す。

道示のいう耐震性能1はCaltransでの通行が直ちにでき、損傷は微小であることに相当している。また、耐震性能2は速やかに通行でき、補修可能な状態を言い、耐震性能3は通行に制限を受け、損傷が重大である場合である。重要度区分が普通の橋と重要な橋および中地震と大地震の分類方法、そしてそれらの分類されたマトリ

表-1 耐震設計基準 (Caltrans)

現地の地震動	損傷の程度と地震後のサービス度	
	普通の橋	重要な橋
機能性評価用 地震動	通行:速やかにできる 損傷:補修可能	通行:直ちにできる 損傷:微小
安全性評価用 地震動	通行:制限を受ける 損傷:重大	通行:速やかにできる 損傷:補修可能

表-2 耐震性能基準 (道示)

設計地震動	A種の橋	B種の橋
レベル1	(耐震性能1)	
レベル2	タイプI	(耐震性能3) (耐震性能2)
	タイプII	

ックスに対応する耐震性能(損傷度)は、両者ともほぼ同じような内容となっている。

若干の異なる点は、レベル1の地震に対して、道示では橋種に関わらず同じ耐震性能1の要求であるのに対し、Caltransでは普通の橋に対しては耐震性能2でよいとしており、Caltransの方が要求性能が少し緩い。

3. 橋の重要度区分

橋の重要度による分類は、表-1、2でみたように日米両国共に橋は普通の橋(A種)と重要な橋(B種)に分けられている。この点において両者は非常に近いが、次に説明するように対象とする橋において両者は決定的に異なる。

それぞれの分類に対してどのような橋を対象としているかを表-3に示す。道示では、重要な橋とは高速道路、国道、および都道府県道や市町村道の内重要な橋となっている。結果的に、日本で建設されるほとんどの橋は重要な橋として設計され、大地震に対し速やかに通行できるように補修可能な耐震性能2を要求している。

一方、Caltransでは重要な橋とはGolden Gate BridgeやSan Francisco-Oakland Bay Bridgeのように一日の交通量が20~30万台あるような大型の有料橋およびそこに接続されている高速道路の第1出口までの橋、等である。有料橋から第1出口までもし通行障害が起こると、有料橋の通行が確保されていても意味をなさないことになるので、その部分は重要な橋に含まれている。その外の橋はすべて普通の橋である。したがって、カリフォルニア州で設計される橋はそのほとんどが普通の橋であり、相当の損傷があっても落橋を防止すればよいという耐震性能3を要求しているのみである。

このように、橋の分類の仕方は同じでもそれぞれの対象とする橋は大きく異なっており、そこに要求している耐震性能は日米で大きく異なる結果となっている。

表-3に示した重要な橋の分類は日本とカリフォルニア州の設計に決定的な違いを生じさせているが、この分

表-3 橋の分類

	普通の橋	重要な橋
Caltrans	右記以外	有料橋, 有料橋に直接接続する橋, 等
道示	右記以外	高速道路, 国道, 都道府県道, 等

類の工学的根拠は曖昧である。その違いの根拠としては、アメリカの平坦な広い国土と日本の密集した山々に囲まれた国土の地理的要因が考えられるが、むしろ日本では完全性を求める傾向がアメリカよりも強いという国民性の違いによるところが大きいと思われる。

4. 性能基準の考察

耐震性能2と3の間には大きな相違がある。耐震性能2は損傷の補修が可能であり、そのために同示では残留変位の制限を規定している。この残留変位の制限は、設計を支配することが多い。Caltransでは重要な橋に対する要求性能2の詳細はプロジェクトごとに定められているが、残留変位の正確な予測は解析技術の発達した現代においても困難であるため、残留変位の制限には消極的である。

一方、耐震性能3は損傷が重大であって、もはや補修はできないことを意味している。したがって、耐震性能3では損傷を受けた後橋は撤去することを想定している。

耐震性能3を満足するためには、橋に靱性を与え変形性能を十分生かした設計をすることができる。橋の一部に塑性ヒンジを生じさせ、変形を大きく許容する。また、剛性を小さくして地震力を低減させることをねらっている。このことがCaltransではキャパシティデザインの概念や変位靱性法を採用することの背景になっている。

このように日本ではほとんどの橋を耐震要求性能2で設計し、Caltransでは耐震要求性能3で設計することは、以下に述べるように設計の手法や結果に根本的な相違をもたらしている。

5. 全体構造システム

以上のような性能基準の違いは、最も耐震設計の根本である全体構造のシステムに現れている。日本の橋は、ゴム支承によって上下部を分離して地震力の分散と低減を図っている。それに対し、Caltransでは上下部一体型のラーメン構造として不静定度を上げ、また個々の構成要素の変形能を高めることによって構造全体の靱性を上げている。

日本で設計された橋は剛性が大きく、固有周期は1秒前後のことが多いが、Caltransでは1.5秒程度を目標としている。この結果、両者に作用する地震力は大きく異なってくる。日本の橋では剛性が高いために、応答スペクトル曲線のピークに近い地震力で設計しなければならないのに対し、Caltransではピークからかなり低下した地震力で設計している。特に、日本でよく採用されている矩形橋脚の橋軸直角方向では剛性が非常に大きいためこの傾向が強い。したがって、Caltransでは矩形橋脚の採用を避けている。矩形橋脚の橋軸直角方向の大きな強度は、大地震時に橋脚を支える杭に損傷が起こることにもなりかねず、耐震設計にとってむしろ邪魔になるこの考え方である。

6. 安全照査

道示の場合は、構造物の抵抗力（保有耐力）が地震による作用力（要求耐力）よりも大きくなるように設計す

る力低減法を採用しているのに対し、Caltransでは構造物の変形性能（保有変位）が地震による変形（要求変位）より大きくなるように設計する変位靱性法の立場をとる。道示の安全照査は次式により行われる。

$$k_{h_e} W < P_a \quad (1)$$

ここに、 k_{h_e} = 等価水平震度、 W = 構造物の等価重量、 P_a = 保有水平耐力

ここでの等価水平震度の算定にはエネルギー一定則が用いられる。

一方、Caltransでは次の安全照査式が用いられる。

$$\Delta_D < \Delta_c \quad (2)$$

ここに、 Δ_D = 要求変位、 Δ_c = 保有性能変位
ここでの要求変位の算定には変位一定則が用いられる。

エネルギー一定則は、安全側を与えるがときとして過大設計になることが一般的に言われている。一方、変位一定則はケースによっては過小評価になる危険性があることが指摘されている。日本ではエネルギー一定則を、またCaltransでは変位一定則を採用している背景には、工学的根拠とともにここでも国民性の違いが大きく影響しているものと思われる。

一般に、日本では設計基準から得られる安全性は必要十分な要件と考えられており、一方Caltransでは必要最小限としている。特に靱性（強度ではなく）に少しでも多くの余裕をもたせることは、比較的少ないコストで安全性を高めることになるので、Caltransでは設計者の判断により、変形性能は要求性能よりもかなり余裕をもたせていることが多い。

安全照査の対象とする地震としては、道示は標準的な橋に対して中地震には震度法、大地震には保有耐力法や動的解析法を用いて設計するのを基本としている。一方、カリフォルニア州では普通の橋の場合、大地震に対しての性能を保有耐力法で確かめれば中地震に対する性能確認は通常省略される。

7. 結語

日本とカリフォルニア州では耐震性能基準はほとんど同じであるが、橋の重要度区分が異なるため要求する性能レベルが大きく異なることが判明した。日本ではほとんどの橋が耐震性能2のレベルまで要求するのに対し、カリフォルニア州では耐震性能3まで許容している。

参考文献

- 1) 村上健志, 当麻庄司, 杉野仁志, Mark Mahan: 標準的な道路橋の耐震設計例による日米の比較, 論文報告集, 第58号, 土木学会北海道支部, 平成14年2月。
- 2) California Department of Transportation: Memo to Designers 20-1 Seismic Design Methodology, January, 1999.
- 3) 当麻庄司: CALTRANSの耐震設計の基本方針(翻訳), 橋梁と基礎, Vol. 35, No. 9, 2001年9月。
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 平成14年3月。