

標準的な道路橋の耐震設計例による日米の比較

A comparison of the seismic design between Japan and U.S.A. by design examples of standard highway bridges

北海学園大学大学院工学研究科 ○学生員 村上健志 (Takeshi Murakami)
北海学園大学工学部土木工学科 フェロー 当麻庄司 (Shouji Toma)
株式会社ドーコン橋梁部 正 員 杉野仁志 (Hitoshi Sugino)
Earthquake Engineering, California Dept. of Transportation Mark S. 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。日米両国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。耐震設計は国の環境が違ってもその目的はまったく同じであり、共通の問題である。これまでお互い独自に開発してきた設計基準の相違点あるいは類似点を比較検討することは、お互いの気づかなかった問題点を明確にすることができる。

筆者らは、これまで米国の耐震設計をリードしているカリフォルニア州の基準^{1)~3)}について調査を行ってきた⁴⁾⁵⁾。しかし、設計基準の比較だけでは具体性に欠け、より深く理解するためには設計例に基づいた比較が最適であると思われる。そこで、本論文では日米両国の設計基準で設計された典型的な道路橋の設計例をとりあげ、その設計手法を具体的に比較検討する。対象とした橋は多径間連続 PC 箱桁橋であり、比較した内容は性能基準、構造システム、安全照査基準、構造解析法、地震力、等である。

2. 性能基準

耐震設計の基本となる性能基準については文献¹⁾³⁾⁴⁾に詳しく論じられているが、それによると日米でほとんど同様な基準となっている。すなわち、表-1 にカリフ

オルニア交通局 (California Department of Transportation, 以降 Caltrans と呼ぶ) の性能基準を示すが、重要度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ックスに対応する耐震性能 (損傷度) は、道路橋示方書 V 耐震設計編⁶⁾ (以下道示と呼ぶ) とほぼ同じような内容となっている。しかし設計基準の根本は同じでも、それを適用した具体的な設計の結果はここで述べるように大きく異なっている。

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。

3. 構造システム

3. 1 全体構造

検討の対象とした橋は図-1, 2 に示すように日米共に PC 連続箱桁橋である。図-2 の Salinas River Bridge の側面図は、全長の内 1 部を示している。それらの橋諸元の比較を表-2 に示す。両者は橋長において異なるが、Caltrans の設計例は中間ヒンジを有しており、また支間長および幅員はかなり近く、総体的によく似た橋であると言える。ただ、Caltrans の Salinas River Bridge は単純な線形をもつものの、橋脚はコンクリート充填の鋼管柱であるため構造的に非標準な橋に分類されている。

日本と Caltrans の橋における最大の相違点は、最も耐震設計の根本である全体構造のシステムにある。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。

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: 直ちにできる 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: 直ちにできる 損傷: 補修可能

表-2 設計例の橋諸元の比較

	日本 (桜岱高架橋)	Caltrans (Salinas River Bridge)
形式	4径間連続PC箱桁高架橋	11径間連続PC箱桁橋 (1 中間ヒンジあり)
支間	4@41=164m	9@42.672+2@43.358=470.764m
幅員	10.5m	11.887m
上部工	単室箱桁 (高さ2.6m)	多室箱桁 (高さ1.753m)
下部工	矩形橋脚 (6.5x2.5m) + 杭基礎	ラーメン橋脚 (シャフト柱 φ1520x2本)
支承	ゴム支承 (水平力分散型)	なし (上下部一体型)

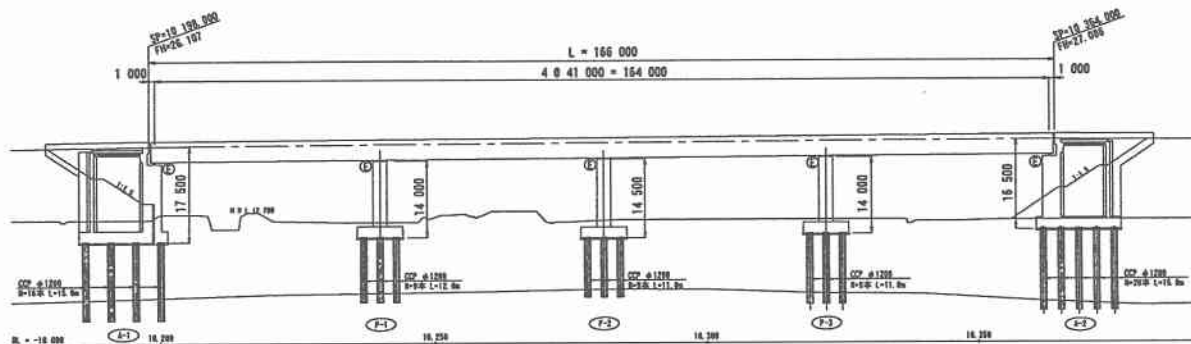
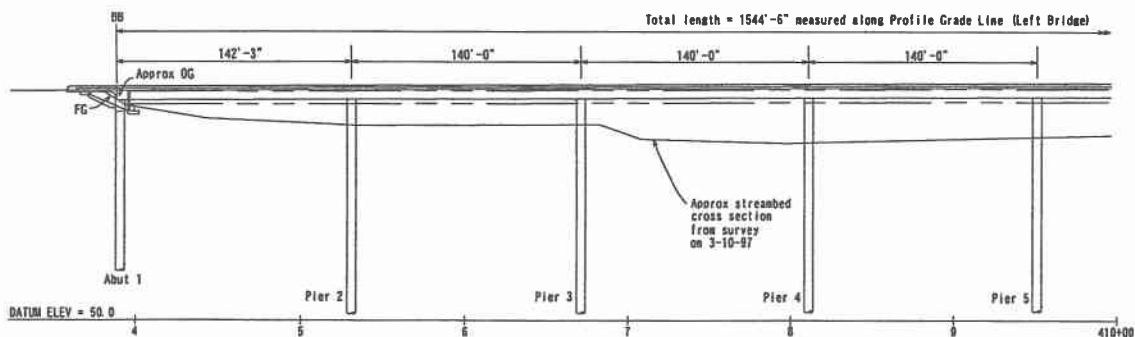


図-1 桜岱高架橋



(a) 全体図

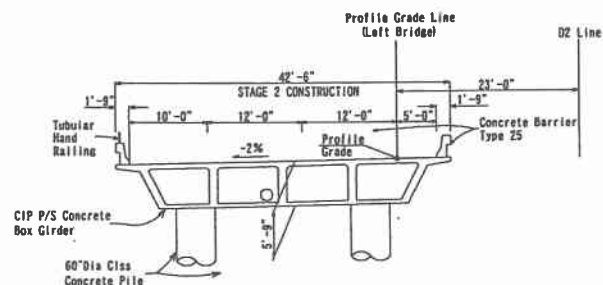
3. 2 キャパシティデザイン

キャパシティデザインでは破壊のメカニズムを予め想定して設計する。そこで構造物中で破壊する犠牲的な部材を決め、その部材に十分な靱性をもたせることによって耐震性を確保する。その犠牲部材に隣接する部材には、決して犠牲部材よりは大きな強度をもたせないようにする。もし隣接部材が犠牲部材よりも大きな強度をもつと、想定した破壊メカニズムのシナリオが狂ってしまうからである。橋梁の場合、犠牲部材として通常補修の容易さから下部工である橋脚が選定される。

Caltrans では、このキャパシティデザインの概念を採用しており、矩形橋脚の下部工はできるだけ採用しないようにしている。矩形橋脚は橋軸直角方向に強度が大きくなり過ぎ、地震時に基礎杭に損傷を起こし補修が困難になる。矩形橋脚の強軸方向は一般的に平面保持の法則が成り立たないせん断優位の部材であり、変形能を必要とするキャパシティデザインの概念を適用し難い。これらのことから、Caltrans ではラーメン形式が好まれる。日本で矩形橋脚が好まれるのは、設計上の理念よりも施工上の利便性あるいは慣習的な背景からであろうと推察される。

3. 3 固有周期と変形性能

本設計で取り上げた桜岱高架橋と Salinas River Bridge の固有周期の比較を表-3 に示すが、両者の設計の大きな違いがここに端的に現れている。すなわち、桜岱高架橋の方が Salinas River Bridge よりはるかに剛性が高い。日本の橋梁構造物の場合、固有周期は1秒前後のことが多い。これに対し、Caltrans では1.5秒程度を目標としているようである。Salinas River Bridge



(b) 断面図

図-2 Salinas River Bridge

表-3 固有周期の比較

(単位:秒)

	桜岱高架橋		Salinas River Bridge
	震度法レベル	保耐法レベル (タイプⅡ)	保耐法レベル
橋軸方向	0.993	1.274	1.89
橋軸直角方向	0.884	1.223	2.24

は鋼管柱を用いているため比較的剛性が小さくなっている。両者の固有周期は約1.5倍以上の差があるが、これは仮に質量を同じとした場合剛性に約2.2倍以上の差があるということである。

図-3 に両者の橋軸直角方向の荷重変形曲線を示す。この図から、両者の構造上の違いにより橋軸直角方向の変形挙動には顕著な差があることがわかる。したがって、地震時の挙動にも大きな違いが生じる。橋軸方向については表-3 の固有周期の比較からもわかるように、橋軸直角方向ほどその差は大きくないものの、やはりかなり Caltrans の方が柔らかい構造となっている。

4. 安全照査

日米共に、大地震に対しては保有耐力法により安全性の照査を行うのが基本である。しかし道示の場合は、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。

図-4 に両橋の設計に用いられた加速度応答スペクトル曲線を示す。Salinas River Bridge の設計スペクトル曲線は桜岱高架橋に比べ、かなり小さい。日本の場合固有周期が約 1 秒前後であることが多く、道示の設計加速度スペクトル曲線のほぼピークに近いところにある。Salinas River Bridge の橋軸直角方向の 2.24 秒では、図-4 を見ると分かるようにかなり小さいところにある。桜岱高架橋の橋軸直角方向の場合、固有周期 1.225 秒に対し図-4 より標準設計水平震度 1.70 が得られるが、これに地域別補正係数 0.85 および許容塑性率 3.9 を考慮すると、エネルギー一定則により等価水平震度は $k_{he} = 0.55$ となる。そして、安全照査は次式により行われる。

$$k_{he}W < P_a \tag{1}$$

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

一方、Salinas River Bridge では図-4 より設計水平震度 0.38 が得られる。そして、この震度を用いて弾性解析を行い要求変位を求め、次式により安全照査を行う。

$$\Delta_D < \Delta_c \tag{2}$$

ここに、 Δ_D =要求変位、 Δ_c =保有性能変位

表-4 にこの安全照査の結果を示す。この表を見ると桜岱高架橋の場合、橋軸方向は要求性能と保有性能との間にバランスはとれているが、橋軸直角方向は矩形橋

脚を採用していることから当然強度に大きな余裕がある。この余裕は、フーティングや杭の設計を圧迫するので、キャパシティデザインの概念に適合し難い。

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。Caltrans では設計者の判断により、表-4 にあるように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。

桜岱高架橋では耐力による安全照査の外に、橋軸方向橋軸方向の残留変形が設計を支配している。道示では、残留変形の基準を満たすことが耐震設計における一つの大きな要素になっている。

5. 断面性能

構造物の挙動を検討する場合、全て材料の応力・ひずみ関係に基礎を置く。両者の設計に用いられているコンクリートの応力・ひずみ曲線の比較を図-5、6 に示す。Caltrans の結果は、その設計基準の基となった Manderらの式⁷⁾によって求めた。図-5 に見られるように、矩形断面のコンクリートに対しては Caltrans の方が横拘束効果により、より大きな靱性が得られるとしている。

表-4 安全照査

照査式	桜岱高架橋		Salinas River Bridge
	$K_{he} \cdot W < P_a$		$\Delta_D < \Delta_c$
橋軸方向	TYPE I	TYPE II	44.2cm < 101.6cm
	4954kN < 6915kN	5675kN < 6916kN	
橋軸直角方向	6205kN < 14615kN	7804kN < 14658kN	47.2cm < 101.6cm

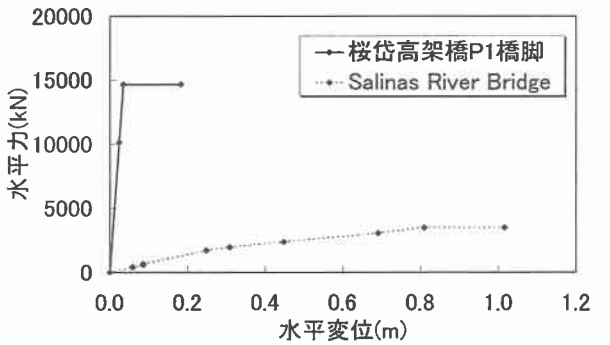


図-3 荷重変位曲線(橋軸直角方向)

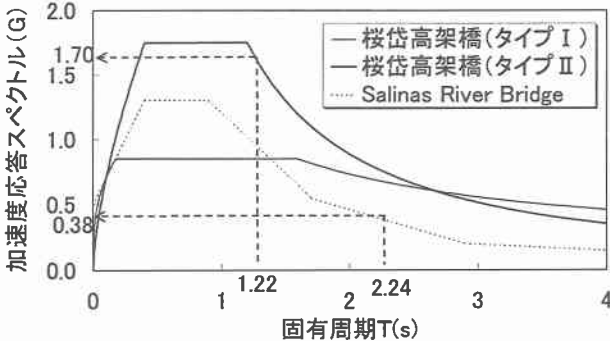


図-4 設計加速度応答スペクトル曲線

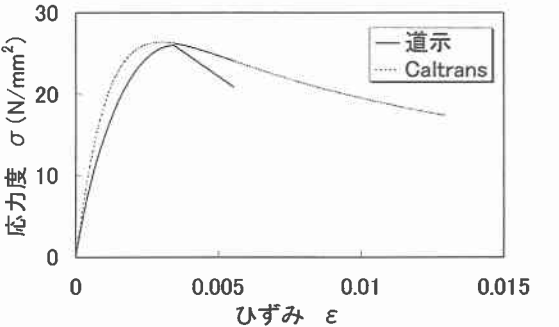


図-5 コンクリートのS-S曲線(桜岱高架橋)

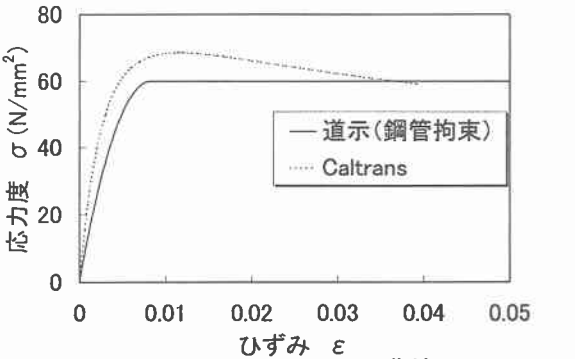


図-6 コンクリートのS-S曲線 (Salinas River Bridge)

図-6 の鋼管内コンクリートの場合、両者はかなり近いものの道示では限界ひずみが規定されていない。Caltrans の曲線では鋼管を等価な横方向鉄筋に置き換えて求めた。また鋼材に対しては、Caltrans ではひずみ硬化型を用いているが、道示では完全弾塑性型である。このような材料の応力-ひずみ曲線の違いは、断面および部材性能の評価に直接的な影響を及ぼす。また以上のように材料構成則が異なると、断面の曲げモーメント-曲率の関係にも影響を与える。

6. 地震力

地震力は、日米共に地盤種別毎の加速度応答スペクトル曲線から、構造物の固有周期に対応する設計水平震度により求める。日米間の大きな違いは、道示ではプレート境界型地震（タイプⅠ）と直下型地震（タイプⅡ）に分けて標準スペクトル曲線を示しているが、Caltrans ではそのような分類をしていない。道示の場合、震度法では弾性範囲内にあるのでそのまま地震力として用いるが、保有耐力設計法では材料非線形の影響を考慮するために、許容塑性率にエネルギー一定則を適用して等価水平震度を求め地震力とする。時刻歴応答解析に必要な地震波として、地震と地盤の種類に応じて加速度応答スペクトルから作成した模擬的な標準地震波を提示している。

一方、Caltrans においては、活断層のハザードマップと標準スペクトル曲線を提供し、それらを基にして建設地点の設計用加速度応答スペクトル曲線を作成している。Caltrans の標準スペクトル曲線は、マグニチュード 6.5 ± 0.25 , 7.25 ± 0.25 , 8.0 ± 0.25 の3種類と5種類の土質に対して準備されている。図-7 にはその標準加速度応答スペクトルの1例を示す。設計用加速度応答スペクトル曲線は、これらの標準加速度応答スペクトルを参考にして建設地点の地質条件、ハザードマップによる断層の状況とそこからの距離等を考慮して地質技術者が作成し、構造技術者へ提示される。図-4 はこのようにして提供された Salinas River Bridge の設計用加速度応答スペクトル曲線である。Caltrans では道示と同様に加速度応答スペクトル曲線から地震力を得るが、変位一定則を適用しているためにその地震力を直接用いて弾性解析により変位を求め、要求変位とする。

図-7 にはまた、道示のⅡ種地盤に相当する標準加速

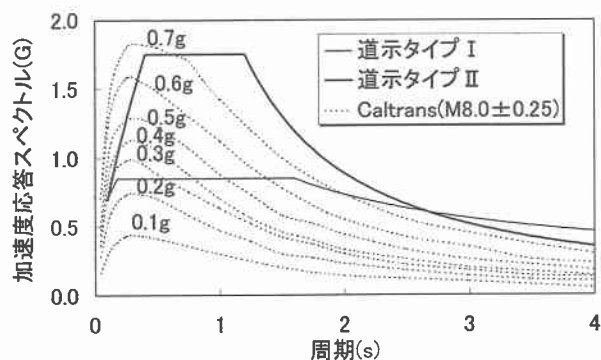


図-7 応答スペクトル曲線比較
(Ⅱ種地盤(道示)と土質D[硬い土](Caltrans)の場合)

度応答スペクトル曲線について、Caltrans との比較を示す。土質の分類が必ずしも厳密に一致している訳ではないので一概には言えないが、図-7 を見る限りでは両者にはかなりな差がみられる。

7. まとめ

ここでは多径間連続 PC 箱桁橋の設計例を基に、日米の違いを検討した。その結果をまとめると次の通りである。

- (1) 構造形式に対する考え方が大きく異なる。
- (2) 安全照査は、日本はエネルギー一定則に基づく力低減法によるが、Caltrans は変位一定則に基づく変位靱性法である。
- (3) 設計地震力の評価が異なる。
- (4) Caltrans で適用しているキャパシティデザインの概念は、日本では厳密には適用していない。
- (5) 材料の応力-ひずみ曲線が異なる。

以上のことから、本設計例比較で見たように、同様な橋を設計するとしても日米ではかなり違った結果が得られる。耐震設計の発展における歴史的な違いもあり、現時点ではどちらが優れているかは何とも言えない。その結論に答えるには、これからのさらなる検討が必要である。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、設計資料の提供をして頂いた開発土木研究所の池田憲二構造研究室長および Caltrans の Earthquake Engineering 部門のチーフである Mr. Ray J. Zelinski に深く感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) California Department of Transportation: Memo to Designers 20-1 Seismic Design Methodology, January, 1999.
- 2) California Department of Transportation: Seismic Design Criteria, Version 1.1, July, 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) 本田明成，当麻庄司，Lian Duan，倉 真也：CALTRANS（カリフォルニア交通局）における道路橋の耐震設計について，第 2 回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，土木学会，1998 年 11 月。
- 5) 当麻庄司，本田明成，Tom Ostrom：CALTRANS（カリフォルニア交通局）の道路橋耐震設計の考え方，土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集，第 I 部 B，1999 年 9 月。
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，平成 8 年 12 月。
- 7) Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 8, August 1988.