

標準的な道路橋の耐震設計例による日米の比較

当麻庄司¹、杉野仁志²、Mark S. Mahan³、村上健志⁴

¹フェロー Ph. D. 北海学園大学教授 工学部土木工学科 (〒064 - 0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目)

²正会員 株式会社ドーコン 橋梁設計部 (〒004 - 8585 札幌市厚別区厚別中央 1 条 5 丁目 4 - 1)

³Ph. D. Earthquake Engineering, California Dept. of Transportation (Sacramento, California, CA 94274-0001)

⁴学生会員 北海学園大学 大学院工学研究科 (〒064 - 0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目)

これまで独自に開発されてきた日米の耐震設計法を比較することは、枝葉的な解析技術論に陥りがちな耐震設計の本質を議論する上で非常に有益である。本研究では、日米の標準的な橋梁の設計例について、構造系、構造解析法、地震力、安全照査法等の観点から比較検討するものである。その結果、耐震性を確保するための構造システムの考え方に大きな違いがみられた。日本ではゴム支承を用いて下部工への地震力を低減させようとするのに対し、カリフォルニア州では不静定次数を上げて靱性をもたせようとしている。また安全照査は、日本では構造物の保有耐力が地震力を上回るようにするのに対し、カリフォルニア州では構造物の保有する変位性能が地震時の変位を上回るように設計する。

Key Words: *Seismic design, Bridge design, Structural design, Earthquake engineering, Concrete bridges*

1. はじめに

米国カリフォルニア州では、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ゼルス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) 2)}について調査を行ってきた^{3) 4)}。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)}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、標準的な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)は同じような内容となっている。まったく異なるところで作成された性能基準がよく似た内容になることは注目すべきであるが、目的とするところが同じであることから設計基準の根本は必然的に同じになるということの結果であると思われる。

安全照査の対象とする地震としては、道示⁵⁾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。

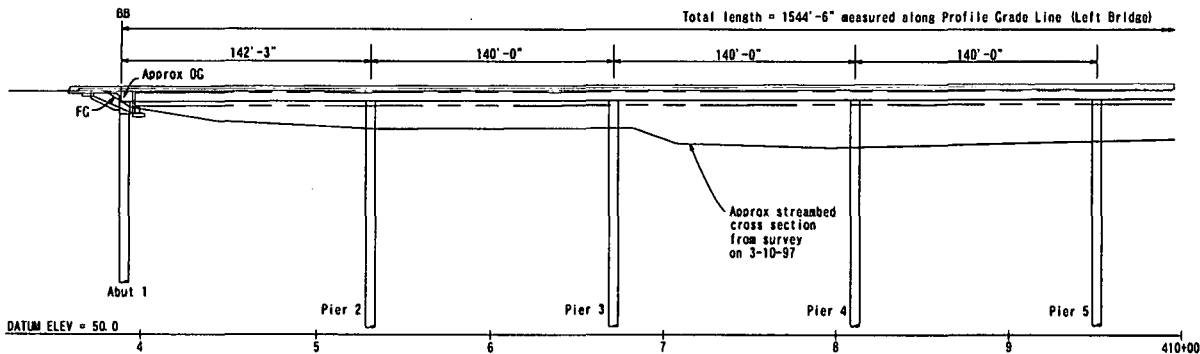
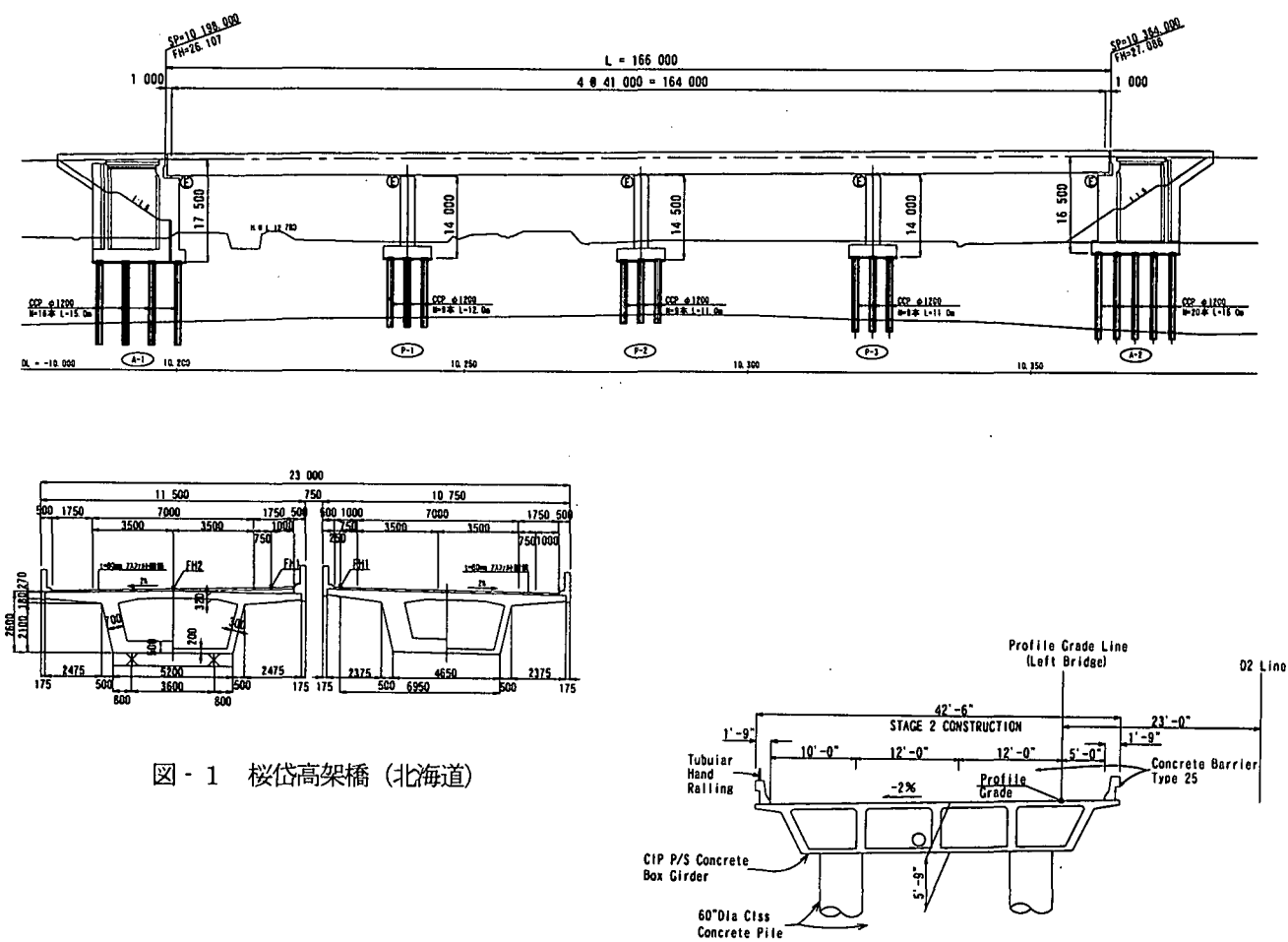
3. 構造システム

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 PC 連続

表 - 1 設計例の橋諸元の比較

	日本	Caltrans
形式	4 径間連続 PC 箱桁高架橋	11 径間連続 PC 箱桁高架橋（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	壁式橋脚+杭基礎	シャフト橋脚
支承	ゴム支承（水平力分散型）	なし（上下部一体型）



高架橋である。それらの橋諸元の比較を表-1に示す。両者は橋長において異なるが、カリフォルニア交通局（California Department of Transportation, 以降 Caltrans と呼ぶ）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。

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構造系の固有周期を長くし地震力の分散を図っているのに対し、Caltrans では上下部一体型として不静定度を上げ、塑性ヒンジを多く作ることによって地震力に抵抗させようとしている。Caltrans の本設計例の場合、全橋長が比較的長く上部工の温度変化による長さの伸縮がやや大きくなり、橋脚に導入される温度応力に対応するのが困難になる。ゴム支承を用いるとこのような問題は解決できるが、一般的に Caltrans ではゴム支承は用いず、上下部一体のフレーム形式を採用することが多い。日本ではこのような形式は、温度応力の問題がない比較的長い橋脚の場合に用いられる。

3. 2 上下部構造

日本の下部工は壁式橋脚とそれを支持する杭基礎からなっているのに対し、Caltrans の場合は2本のシャフト柱が上部では上部工内の梁と剛結され、下部ではそのまま土中の基礎となる非常に単純なラーメン構造となっている。幅員が大きな場合でも、同様に扁平な多室箱桁の上部工を多数の柱で支持する形式が多い。Caltrans ではキャパシティデザインの概念を採用しており、地震時の損傷は補修のしやすい橋脚に生じるように設計する。そのためにはこのようなラーメン形式が好まれる。日本の壁式構造で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。

上部構造は両者とも同じ箱桁形式であるが、日本は単室箱桁であるのに対し、Caltrans は多室箱桁の扁平な形となっている。これは施工上の難易等もからんでそれぞれの歴史的な発展の経緯からきた特徴であろうと思われるが、Caltrans の多室箱桁構造は単室構造に比べ施工がかなり難しいと思われ、独特のものであるといえる。

このような構造の基本的な違いは、日本の場合主として河川橋を対象としてきたのに対し、Caltrans の場合は高架橋が主であることに起因するのではないと思われる。河川橋では、水流に対する抵抗を減じる必要から小判形の橋脚が採用されるが、壁式構造はその流れから来ているものと推測される。しかし、ここで比較に取り上げた2橋は、1部河川を跨ぐものの高架橋としての要素が強いといえる。

4. 安全照査

4. 1 設計指標

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。しかし道示の安全照査は、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。いずれも非線形性および変形性能（靱性率）を考慮して設計することには変わりがないが、変位靱性法においては変位を設計指標として扱うので、力よりも数値のもつ意味が設計者にとって感覚的に理解しやすいと言える。

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が、Caltrans では残留変形は安全照査の対象外である。

4. 2 構造解析

道示の構造解析は、震度法（弾性解析）、保有耐力法（Pushover 解析）および動的解析法（非線形時刻歴応答解析）の3つを地震の強さや構造系の複雑さに応じて組み合わせる。

一方 Caltrans では、保有耐力法（Pushover 解析）により保有変位性能を求め、要求変位は弾性静解析により求めた変位とする（変位一定則）。また、複雑な構造では動的解析法（スペクトル応答解析、弾性解析）により要求性能を求める。ここでの要求性能は弾性解析であるので、非線形性を考慮するために変位一定則が用いられ、簡略化されている。もしこれが成り立つのであれば非常に簡単になるが、場合によっては危険側となるケースも出てくる。Caltrans ではこの点に関し、構造物の固有周期が0.7~3.0秒の間という制限を設けて調整を図っている。道示ではより安全側の設計となるエネルギー一定則を適用しているが、ここでは逆に安全側過ぎるケースが出てくる。

4. 3 保有性能の算出

保有性能の算定は日米共に似たような方法を用いる。すなわち、終局ひずみから終局曲率を求め、それにヒンジ長を乗じることにより塑性ヒンジの回転性能が得られる。これらの終局性能値のいずれかを制限値として、Pushover 解析により終局変位（保有変位性能）あるいは終局強度（保有水平耐力）が得られる。また、簡略的には塑性ヒンジの回転性能からヒンジ間距離を乗じると終局変位（保有変位性能）が求められる。Caltrans ではこの終局変位を直接要求変位と比較して安全性を照査す

るのに対し、道示では終局変位から許容塑性率を求め、さらにそれを基にしてエネルギー一定則により弾性的な外力を低減するための等価水平震度を求める。道示では、この等価水平震度に対応する地震力に対して構造物が抵抗できるように設計する。ここでも Caltrans の手法は道示に比べ、非常に簡略化されていると言える。

5. 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られるが、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て地震力とする。時刻歴応答解析に必要な地震波としては、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供している。

Caltrans においては、活断層のハザードマップを提供し、それを基にして加速度応答スペクトル曲線を作成する。加速度応答スペクトル曲線は、建設地点の地質条件、断層の状況とそこからの距離等を考慮して地質技術者から構造技術者へ提示される。そして、道示と同様にこの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用いて弾性変位を求め、要求変位とする。

6. まとめ

日本では設計はコンサルタントが行い、それに対する報酬を得る。したがって、コンサルタントはある程度の設計の作業量をこなさなければ報酬を得にくい体制になっている。また日本人の完全主義的な性格から、設計はあらゆるケースを想定して安全照査を行っている。たとえば、中地震に対する震度法、大地震に対する保有耐力法と動的解析法による照査、残留変形の制限、そして非線形時刻歴応答解析の適用と耐震設計の体系がかなり複雑になっている。このような完全

主義的な緻密さの反面、地震力の作用方向や位相差への配慮の欠如、非線形時刻歴応答解析や残留変形解析の不確実性等には目をつむっている感がある。

会計監査制度においても、日本では設計基準よりも余裕があると過剰設計とみなされやすく、基準にちょうど収まるように計算合わせの苦勞をするところがあるようである。

一方 Caltrans では、標準的な橋の設計は役所内の技術者が行う。また設計基準^{1) 2)}も役所内の技術者により作成されるため、日本の場合に比べて簡略化の方向に向かいやすい。技術者の職務も米国では P.E. 制度が発達しているため、技術者個人の考え方がかなり設計に織り込まれる。たとえば、基準に対して少しぐらい余裕があっても技術者がよしと判断する場合もあるし、また反対に基準を少しぐらい満足していなくてもよしとする場合もある。

以上のようなそれぞれの国の事情による違いの結果として、日本の耐震設計計算書は約 13cm の厚さになっているのに対し、Caltrans の場合はわずか 1cm 未満である。当然ながら、図面の数はほぼ同じである。

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北海道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) 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。
- 4) 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。
- 5) 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。

（平成 13 年 5 月 25 日受付）