

4. CALTRANS における取り組み

4.1 米国における道路橋設計基準の現状

4.1.1 概説

米国の道路橋の設計示方書は、基本的に各州で異なる。多くの州ではワシントン D.C.にある American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc. (AASHTO)の定める基準を自州の基準として採用しているが、中にはカリフォルニア州のように AASHTO を修正した独自の基準をもつ州や、AASHTO 基準を準用するものの荷重だけを独自に定めている州もある。AASHTO 設計基準は米国全体の設計基準であり、その策定には 50 州全体の合意を必要とするので技術の進歩への対応が遅く、各州ごとに対応せざるを得ない事情もあるようである。

AASHTO では 1994 年に LRFD (Load and Resistance Factor Design)の設計基準を認可し、1998 年にはその改定第 2 版²⁾が発刊された。これは建築物を対象とした AISC (American Institute of Steel Construction)の LRFD²⁾の第 1 版が 1986 年に出されたのに対し、少し遅れをとっている。現在は従来の Standard Specifications が実務では支配的であるものの、徐々に LRFD への傾斜を強めつつある。

以上のように米国の設計基準は LRFD の規範にしたがっているが、これらは性能設計の形式をとっておらず、いわゆる仕様規定である。したがって、米国の橋梁設計においてはまだ性能設計への移行がなされていない。その中で唯一性能設計基準となっているのは、後述する Caltrans (California Department of Transportation)の耐震設計の基本方針 (MTD20-1) と思われる。

また、米国では 1996 年に SI 単位を採用したが、2000 年までの緩和措置を経て、現在実務でもようやく SI 単位への対応がとられるようになってきた。新設の橋梁は SI 単位が、既存の橋梁の補修には慣用単位 (ft - lbs 系) が用いられている。

以降、これらの設計示方書の概要と設計の現状について述べる。

4.1.2 設計基準

(1) AASHTO Standard Specifications (16th edition, 1996)³⁾

AASHTO の Standard Specifications は、ASD (Allowable Stress Design)と LFD (Load Factor Design)の二つの設計法についての基準を示している。Caltrans の BDS (Bridge Design Specifications)⁴⁾を含め、多くの州では AASHTO にならい LFD フォーマットによって設計しているが、中にはまだ WSD (Working Stress Design, ASD と同義)で設計している州もあるとのことである。そのような州は、LFD と同じ限界状態設計法の範ちゅうに入る LRFD に一挙に移行するのはより困難が伴うであろう。AASHTO の基準改定作業は、非常にスローで公式な会合は年に 1 回程度しか開かれず、そこでは州の代表が集まり承認されなければならないので手続に時間がかかる。しかも、AASHTO には専任のスタッフも、例えば Caltrans のスタッフに比べ非常に少ない。

AASHTO の Standard Spec.は第 16 版と改定を重ね、その間 ASD から LFD へ移行し、また規定の内容も膨らんで現在ではもはやすっきりとした形に整理し直すのは難しい状況になっている。基準としての形態も、コンクリート橋と鋼橋あるいはその他の構造とでは ASD と LFD に対するまとめ方

も異なり、統一性に欠けている。このような基準や SI 単位への移行あるいはスタッフ不足等の事情から、AASHTO では 2000 年以降は LRFD の改定のみとし、Standard Spec.の維持作業は行っていない。

(2) AASHTO/LRFD Specifications (2nd edition, 1998)¹⁾

1994 年に AASHTO/LRFD が正式に採用され第一版が発行されたが、現実には技術者の不慣れのため実際の設計にはまだあまり適用されていない。AISC (American Institute of Steel Construction) の LRFD²⁾は多くの大学で教育しているため浸透が進んでいるが、橋梁設計についてはたいいていの大学では開講しておらず、それが LRFD の実務への適用が遅れる原因となっている。また、LRFD への移行は大幅なコンピュータソフトウェアの改定を必要とし、なかなか容易ではないのもその大きな理由である。その他に、Standard Specification では鉄筋コンクリート橋とプリレストコンクリート橋は別の章に分かれていたが、LRFD ではこれらは同じコンクリート橋として統合され、一つの基準としてまとめられている。

AASHTO/LRFD の鋼橋については、4つの設計計算例³⁾が SI 単位と慣用単位 (ft-lbs 系) の両方でまとめられている。それらは単純支持合成プレートガーダー、2 径間連続合成プレートガーダー、3 径間連続合成プレートガーダーおよび 3 径間連続合成ボックスガーダーといずれも合成桁である。非合成桁は、連続桁といえども米国ではほとんど採用されていない。鋼橋の分野は業界がバックアップするのでこのように基準の支援整備も進んでいるが、コンクリート橋の方はなかなか進んでいないとのことである。

4.2 Caltrans の道路橋設計基準

Caltrans (California Department of Transportation)における正式な道路橋設計基準は、2000 年 4 月に発行された BDS (Bridge Design Standards)⁴⁾であり、AASHTO/LFD (1996) を基にして 1998 年より 15 人の技術者が携わってまとめたものである。この BDS は技術の進歩にしたがって、常に部分的な修正が繰り返される。その修正の前段階として、まず MTD (Memo To Designers)が構造設計部の課長クラスの承認を経て内部通達として出され、その後適用の実績を積みながら時機を見て BDS に組み込まれる。現在の Caltrans の設計基準(BDS)は、MTD により逐次改正されほとんど原形を留めないものになっていたものを、2000 年の改訂により整理した。このような修正のあり方は、後述するように柔軟に内部の技術者の合意によって変更できる Caltrans という役所の性格からきている。

現在の基準は、基本的に AASHTO/LFD に準拠しているが、他の多くの州でも同様にこの AASHTO/LFD を採用しているとのことである。その AASHTO が現在 LRFD へ移行しており、Caltrans も BDS の改定やソフトウェアの開発等においてそれに追随しようとしている。したがって、近い将来には AASHTO/LRFD が道路橋設計基準の中心になる。

次節で述べる MTD20-1 Seismic Design Methodology⁵⁾は、耐震設計の基本方針に関する通達である。そして SDC (Seismic Design Criteria)⁶⁾は、MTD20-1 の基本方針に則って定めた耐震設計基準である。これらは、いずれ将来 BDS の一部になり得るものである。

Caltrans には以上の設計基準の外に、設計詳細を述べた Design Details Manual, 設計データを掲載した Design Aids, そして研修用に設計計算例をまとめた Design Practice がある。

4.3 Caltrans の耐震設計基準

4.3.1 MTD 20-1 Seismic Design Methodology⁶⁾

これは Caltrans の耐震設計の基本方針を示したものであり、道路橋が地震時に保持すべき性能基準を述べている。ここでは、橋の満足すべき性能基準を表 - 1 のように定めている。この MTD 20-1 は、橋の分類および区分、耐震性能基準、耐震設計の方針と手法、構造要素への要求性能と保有性能、および Caltrans の耐震設計法の集成となる耐震設計の実際について総括するものである。その詳細は文献⁸⁾の翻訳に譲り、ここでは、以下概要のみを記す。

(1) 橋の分類

橋は望ましい耐震性能の程度により、“普通の橋”と“重要な橋”とに分類される。さらに“普通の橋”は、構造的な特徴から“標準橋”と“非標準橋”に区分される。これらの分類や区分によって、耐震性能のレベルや要求性能と保有性能の算定法が異なってくる。

“普通の標準橋”の耐震設計は、別に定める耐震設計基準(Seismic Design Criteria, SDC)⁷⁾に従う。

“重要な橋”や“非標準橋”の耐震設計基準は、ケースバイケースでプロジェクトチームによって決められ、構造設計部(Office of Structures Design, OSD)によって承認される。その設計基準では、下記に示す耐震性能基準を満足するように、設計パラメータを決めなければならない。この性能基準は日米で独自に定められたにもかかわらず、我が国の道示と非常に近いものになっていることは興味深い。

(2) 耐震性能基準

すべての橋は、表 4.1 に示すサービス度と損傷度で表される耐震性能基準を満たすように設計しなければならない。

表 4.1 耐震性能基準

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

“普通の橋”に対しては、もし MTD 20-1 や SDC に含まれる安全評価性能基準および要求事項を満たしていれば、厳密な機能性評価を行う必要はない。

(3) 地震力

機能性評価地震動 (Functional-Evaluation Earthquake, FEE)：この地震動は、決定論的あるいは確率論的に評価する。この地震動は、Caltrans が承認した検討グループによって見直しをする。

安全性評価地震動 (Safety-Evaluation Earthquake, SEE)：この地震動は、決定論的あるいは確率論的に評価する。決定論的な評価は、最大生起地震 (MCE) に相当する。確率論的な安全性評価地震動は、一般に長期の再現期間 (約 1000~2000 年) を考慮する。

最大生起地震 (Maximum Credible Earthquake, MCE)：最大生起地震は、Caltrans 地震災害地

図（1996年）に基づいて決めるが、それは地震断層に沿って起こり得る最大の地震である。

(4) サービス度

通行が直ちにできる：地震後、ほぼ直ちに通常の交通が可能になる。

通行が制限を受ける：制限を受けた通行（例、車線の削減、軽量の緊急車両等）が、地震後数日の内に可能になる。数ヶ月の内には全面通行ができる。

(5) 損傷度

微小な損傷：基本的に弾性の範囲

補修可能な損傷：機能喪失に対して最小限のリスクを伴う補修可能な損傷

重大な損傷：崩壊に対して最小限のリスクを伴い、補修には通行止めを必要とする損傷

(6) 安全照査

安全性の照査は、次の変位じん性法の概念に基づく。

$$\Delta_C > \Delta_D$$

ここに、 Δ_C =保有変位性能、 Δ_D =要求変位性能

保有変位性能は、Pushover 静解析により求める。一方、要求変位性能は変位一定則を適用して、弾性解析により求める。道示の要求耐力と保有耐力による安全照査と比較すると、変位を安全指標として扱うので設計感覚上分かりやすいという利点がある。

性能基準は表 4.1 でみたように日米で似たような内容になっているが、実際に設計した結果においてはかなり異なってくるが見うけられる⁹⁾。特に、耐震設計の基本である構造形式、地震力の評価、安全照査法等に違いがあることは、今後より合理的な耐震設計を検討する上で重要な問題である。

(6) キャパシティデザイン

Caltrans ではキャパシティデザインの設計概念を適用している。そこでは、橋梁構造系の中で損傷の生じる部材（じん性部材）を予め特定しておき、地震時にはその部材に十分な塑性挙動ができるようにしておく。そしてこれに隣接するその他の部材（保護部材）は、弾性内に収まるように設計する。通常じん性部材としては橋脚が選ばれ、補修が困難な上部工や基礎工には損傷が生じないようにする。この設計概念から、Caltrans では橋軸直角方向に強度が大きくなり過ぎる矩形橋脚や小判形橋脚は好まれず、一般にラーメン橋脚が採用される。

4.3.2 SDC (Seismic Design Criteria)⁷⁾

この設計基準は、MTD 20-1 で述べている“普通の橋”に対して、その性能を満足するために必要な最低限の耐震設計要求事項を規定するものである。SDC は Caltrans では一般的であるコンクリート橋を対象としている。

この SDC は、新しい耐震設計の基準や、以前にいろいろなところで決められた現在の設計基準を編集したものである。その最終目的は、橋梁耐震設計の最新技術を反映するために、OSD のすべての設計マニュアル類を定期的に改訂することである。種々の設計情報がこれらの設計マニュアル類に織り込まれているので、SDC は Caltrans の最新の変更事項を耐震設計の基本方針として文書化するためのフォーラムの役割を果たす。SDC の改訂の提案に対しては、OSD が MTD 20-11 Establishing Bridge Seismic Design Criteria に従って評価する。

この SDC は、“普通の標準橋”に適用する。“普通の非標準橋”は、その橋の非標準な特徴を定め

るために、そのプロジェクトの個別基準が必要である。設計者は、SDC で明示していない耐震設計基準については、設計マニュアル類を参照すること。

ここでの基準は、耐震設計に対する最小の要求を規定している。各橋は、ユニークな設計の挑戦を表現している。設計者は、ケースバイケースで、各橋を設計解析するのに必要な精度のレベルや適切な手法を決めなければならない。設計者は、これらの基準を適用するのに判断力を磨かなければならない。場合によっては、SDC で提供されていること以上に細かい注意を必要とする状況があるかもしれない。設計者は、正しい処置が取れるように他の情報源を参照し、また OSD の上級耐震スペシャリスト、OSD 地震委員会および地震技術課等に相談しなければならない。

これらの基準から外れる場合は、設計部の上級技術者あるいは上級耐震スペシャリストによる見直しと承認を得て、プロジェクトファイルに綴じておかなければならない。大きく違反する場合は、MTD 20-11 に述べられているように、形式選定委員会あるいは設計ブランチチーフに提示すること。

4.3.3 Guide Specification for Seismic Design of Steel Bridges¹⁰⁾

これは鋼橋を対象とした耐震設計基準で、コンクリート橋を対象とした SDC に相当するものである。現在 OSD 内の鋼橋委員会によって開発中であり、2001 年末には成果品として第 1 版が出された。MTD20-1 の基本方針に従い、構造システムやじん性部材、保護部材の設計について述べている。カリフォルニア州では、高速道路においても日本のように用地上の制限も少ないことから、ここでは単柱鋼製橋脚の記述はなく、ラーメン橋脚あるいは偏心ブレース付きフレーム橋脚の設計について述べられている。

4.4 Caltrans の設計基準策定の背景

Caltrans では、我が国に比べ基準の成立の過程が大きく異なる。その背景には両国の組織の違いが大きく関係しているので、以下にその概要を説明する。

4.4.1 Caltrans 組織の概要

カリフォルニア州は人口約 3,200 万人、ほぼ日本と同じ面積 (40 万 m²) をもっている米国の代表的な州である。カリフォルニア州交通局(Caltrans)は、カリフォルニア州にあるすべての国道 (インターステイツ) および州道の高速道路を建設し維持管理している州政府の機関であり、約 20,000 人が所属している。それはサクラメントにある本局と 280 の地方事務所を各地域毎に管轄する 12 の Districts からなる。本局には交通管理部門、道路維持管理部門、技術部門、予算部門、計画部門等がある。

その技術部門(Engineering Service Center, ESC)には構造設計部、請負事務部、耐震設計部、基礎構造部、建設部等があり、現在約 2,000 人が雇用されている。そして構造設計部(OSD)は橋梁設計課が主体をなし、橋梁設計の実務を担当する 14 のセクションとそれに所属しないスペシャリストからなっている。各セクションは約十数人で構成されているので、橋梁設計課には合計で約 250 人程の技術者がいることになる。Caltrans 全体の橋梁技術者は約 600 人といわれる。橋梁設計課では新橋梁の設計、橋梁の拡幅設計、耐震補強設計等の作業をプロジェクト毎に配分して行っている。一つの組織体がこれほどの橋梁技術者を有しているのは他に例がないと思われる。このように多くの橋梁技術者が州政府内にいるのは、歴史的にカリフォルニア州では橋梁設計を内部の技術者が行ってきたという

ことがある。

現在カリフォルニア州では、1971年のサンフェルナンド地震、1989年のローマプリエータ地震そして1994年のノースリッジ地震と続いた一連の地震の被害から来る耐震補強対策をほぼ終了した。その関連から浮上してきた大プロジェクトとして、Carquinez Bridge と SFOBB (San Francisco-Oakland Bay Bridge)の East Span の2橋に対する吊り橋への架け替え工事が進行している。

4.4.2 ESC について

ESC (Engineering Service Center)は、カリフォルニア全州に存在する出先事務所(District)を技術的にサポートする部門である。特に、橋梁構造物の設計関係は補強を含めてすべて ESC で扱われている。ESC 内の橋梁設計課にある14のセクションをA,B,Cの3つのブランチに分け、新橋の設計および旧橋の耐震補強設計をプロジェクト毎に行っている。新技術に対応して適宜発行されるMTD (Memo to Designers)は、これら3つのブランチチーフの承認により正式文書として内部通達されるものである。内部文書とはいえ、カリフォルニア州の幹線に架けられる橋に適用されるものであるから、その他のカウンティ(郡)や市もこれに従うことになり、それらから注文を受ける外部のコンサルタントもその内容を熟知していなければならない。そのため、Caltrans では講習会を開いて外部技術者の研修を行っている。

橋梁設計課には、ルーチンワークとしての橋梁設計を行う技術者以外にスペシャリストがおり、彼らは耐震設計、コンクリート構造、鋼構造、LRFD (Load and Resistance Factor Design)等の分野でBDS (Bridge Design Specifications)の整備を責任範囲としている。また伸縮継ぎ手や支承を専門に扱っている係もある。技術開発には、これらのスペシャリストを中心に委員会を構成して検討を行っている。

建設部には約800人が所属し、技術者は全州の現地事務所に散らばっている。その本部はサクラメントにあり、現地事務所を管轄支援している。

地震課は耐震設計を支援する技術開発的な仕事を受け持っており、大学への研究の取りまとめや特別なプロジェクトであるSFOBB (San Francisco-Oakland Bay Bridge)の耐震補強設計を行ったりしている。そこには構造技術者だけではなく、地震学を専門とするものも所属している。

4.4.3 OSD について

構造設計部(OSD, Office of Structures Design)は実際に橋を設計する部門であり、最も多くの橋梁設計技術者を抱えている。日常の設計はそれぞれの担当者が行うが、設計の基準化に伴う問題は技術委員会を構成して処理している。技術委員会には、床版委員会、コンピュータ委員会、合成桁委員会、設計詳細委員会、耐震設計委員会、伸縮装置および支承委員会、荷重委員会、プレストレストコンクリート橋委員会、コンクリート橋委員会、鋼橋委員会、下部構造委員会等がある。技術的な問題は、すべてこれらの委員会にもち込まれる。技術者は個人の興味にしたがってこれらの委員会に所属し、ここで意思決定された事項は基準に反映される。BDSの管理もこれらの委員会によって行われる。

請負業者がP.E. (Professional engineer)のサインで設計変更を提案すれば、設計変更により可能になった費用の削減分は50%を州政府に50%を業者に還元される。しかし、その設計変更の評価は難しい問題を多く含んでおり、例えば耐震設計等ではどこまで構造を簡略化することができるかの判断はなかなか困難である。Caltransの技術者と意見を異にする場合、米国では常に訴訟がつきまとう

ので Caltrans の技術者は苦勞するようである。

4.4.4 橋梁設計の実務

Caltrans が建設する橋梁の特徴は、プレストレストコンクリート製箱桁連続形式が一般的である。その箱桁も分離型ではなく、幅の広い一本桁にいくつかのウェブが配置された多室構造である。OSD の技術者はプロジェクト毎に 3～5 人のチームを組み設計に当たる。設計結果は Caltrans 内で図面化される。しかし、最終的な設計計算書は作成されない。それぞれの担当者がメモのような形で計算結果を保管している。このように最終成果は図面だけしかないので、設計計算のチェック方法は特殊である。すなわち、設計担当のチームとは別のチェック設計チームが構成されて独立に設計を行い、両者がその結果を突き合わせて比較検討することによりチェックが行われる。

計算結果が基準を満足しているかどうかの判断は、非常に柔軟である。たとえば、たくさんの柱の内一本が基準の 1.0 を少し超えていたとしても、構造全体の剛性のバランスがよければよしとする。また、逆に何本かの柱に基準からいえばかなり余裕があったとしても、全体のバランスがとれていればよしとする。このような判断は P.E. (技術士) が行い、図面にはその P.E. の証印が押される。例えば、構造全体のバランスには円柱橋脚の場合 L/D (長さ/直径) 比が重視される。SDC では $L/D < 10$ と規定されているが、 $L/D = 5 \sim 7$ 程度が適当とみなされている。この辺は技術士制度がとられている米国ならではの状況といえる。

参考文献

- 1) Load and Resistance Factor Design Specifications, 2nd Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 1998.
- 2) Load & Resistance Factor Design, Manual of Steel Construction, 2nd Edition, American Institute of Steel Construction (AISC), 1994.
- 3) Standard Specifications for Highway Bridges, 16th Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 1996.
- 4) Bridge Design Specifications, LFD Version, Department of Transportation, State of California (Caltrans), April. 2000.
- 5) Four LRFD Design Examples of Steel Highway Bridges, Vol. II, Chap. 1A Highway Structures Design Handbook, HDR Engineering, Inc., American Iron and Steel Institute, May 1996.
- 6) Memo To Designers 20-1 Seismic Design Methodology, Department of Transportation, State of California (Caltrans), Jan. 1999.
- 7) Caltrans Seismic Design Criteria, Version 1.2, Department of Transportation, State of California (Caltrans), Dec. 2001.
- 8) 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, 2001.9.
- 9) 当麻庄司, 村上健志, 志杉野仁, Mark S. Mahan : 標準的な道路橋の耐震設計例による日米の比較, 第 26 回地震工学研究発表会, 土木学会地震工学委員会, 2001 年 8 月, および土木学会北海道支部論文集, 第 58 号, 2002.1.
- 10) Guide Specification for Seismic Design of Steel Bridges, First Edition, Department of Transportation, State of California (Caltrans), Dec. 2001.