

# 米国における設計法の動向

九州工業大学  
山口栄輝

## 1. はじめに

古くから用いられてきた構造物の設計法に許容応力度設計法 (Allowable Stress Design) がある。すでに 1860 年代の静定トラス橋の設計に適用されており<sup>1)</sup>、その簡便さ故に世界中で採用されてきた。しかしながら、この設計法を近代橋梁の設計にそのまま適用するには種々の問題がある。そのため、わが国ではこれまで基本的には一貫して許容応力度法による設計が行われてきているものの、この間に多くの改善が加えられてきた。その一方で、新しい設計法を導入するための試みも数多く行われており<sup>2)</sup>、道路橋示方書も、現在進行中の改訂により大きく変わりつつある<sup>3)</sup>。これに対し、海外には、許容応力度設計法に代わる設計概念に基づいた設計基準類をすでに作成しているところも多い。本稿では、米国の設計法の動向として、鋼構造委員会の活動と関連の深い AISC (American Institute of Steel Construction), ASSHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), Caltrans (California Department of Transportation) の設計示法書を概観し、ついで限界状態設計法に基づいた AASHTO の橋梁設計示方書 (AASHTO LRFD Bridge Design Specifications; 以下では AASHTO-LRFD と呼ぶ)<sup>4)</sup> の基本的な枠組を記す。

## 2. 米国の設計示法書

### 2.1 AISC

AISCは、許容応力度設計法に替えて限界状態設計法 (Load and Resistance Factor Design) を採用した示方書 (以下では AISC-LRFD と呼ぶ)<sup>5)</sup> を 1986年に刊行している。これは、AASHTO-LRFD の第1版<sup>6)</sup> の刊行より 8年ほど早い。また、この新しい示方書の導入に先立って、1983年9月1日から1年間、レビューと試用のために示方書案 (Proposed LRFD Specification for Structural Steel Buildings) が公開された。(当時、Purdue大学の大学院生であった筆者も講義で資料として使用するため入手したが、無料もしくは非常に低廉な価格で配布されたと記憶している。) AISC-LRFDは、その後、1993年に第2版、さらに今年になって新たな版が作成され、現在公開中 (available for public review) である。また1986年にはマニュアル<sup>7)</sup> が作成されており、その第2版も1994年に刊行されている。現在、マニュアル第2版の概要 (Essentials of LRFD) が AISC のウェブサイト (<http://www.aisc.org/engineering/techdocs.htm>) で公開されている。これは PDF ファイルとしてウェブ上に置かれており、ダウンロード可能である。なお、AISC-LRFD が刊行されても、従来からの許容応力度設計法に基づいた示方書<sup>8)</sup> が失効した訳ではなく、現在でも 2 種類の示方書が存在している。このような状況については批判があり、1995年に AISC の理事会 (Board of Directors) が AISC-LRFD の使用が好ましいと決議するに至っている。

### 2.2 AASHTO

橋梁関連分野の設計標準として最初に広く認識されたのは、1931年に AASHO (American Association of State Highway Officials) から出された示方書である<sup>9)</sup>。その後、AASHO は AASHTO に変わり、示方書名も変わったが、研究・技術の進歩を取り込みつつほぼ 4 年ごとに改訂され続け、1996年に第16版が刊行されている<sup>10)</sup>。AASHTO の道路橋標準示方書 (Standard Specifications for Highway Bridges; 以下では AASHTO-SSHB と呼ぶ) は、1970年代初めまでは許容応力度設計法のみに基づいていたが、現在では荷重係数設計法 (Load Factor Design) も採用されている。

1986年、AASHTO 内で米国の橋梁設計示方書および諸外国の設計示法書を調査することが要請

された。これは、NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) のもとで実施され、1987年に終了した。その結果、長年に渡って部分改訂を繰り返し、体系だった整備をしてこなかったAASHTO-SSHBは整合性に欠け、矛盾点さえ含んでいることが明らかになった。また、カナダやヨーロッパなどで普及し始めていた限界状態設計法の概念が取り込まれていない点も指摘された。そのため、NCHRPプロジェクトとして橋梁設計標準の開発が進められ1994年にAASHTO-LRFD<sup>6)</sup>が刊行された。1998年にはその第2版が作成されている<sup>4)</sup>。また、限界状態設計法による橋梁施工示方書 (AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications)<sup>11)</sup>も刊行されている。

新たな示方書が刊行されたことで、道路橋の設計に、AASHTO-SSHBとAASHTO-LRFDの2つの選択肢が生まれた。しかしながら、AASHTOは、2000年以降、AASHTO-SSHBの改訂作業は行わず、AASHTO-LRFDのみを改訂していくとの方針を取っている。また、FHWA (Federal Highway Administration) などで性能照査型設計についての検討が始められており、次の版には耐震設計関係などで部分的に導入される可能性もある。

### 2.3 CALTRANS

Caltransはカリフォルニア州内の州間道路 (Interstate Highway) や州道の建設・維持管理を行う州政府の機関である。他州の交通局 (Department of Transportation) やFHWA に比べると非常に大きな組織であり、橋梁関係の技術者を数百人も有している。

Caltransで現在使用されている橋梁設計示方書 (Bridge Design Specifications; 以下ではCaltrans-BDSと呼ぶ) は、1983年以降に出た第13~15版のAASHTO-SSHBをもとに作成されている。その目次には修正された年月が記載されており、適宜改訂されていることが理解される。現在、1996年刊行のAASHTO-SSHB第16版をもとに行われてきた改訂作業がほぼ終わり、近々新たなCaltrans-BDSが刊行される予定である。

Caltrans-BDSにも許容応力度設計法と荷重係数設計法が採用されているが、限界状態設計法に基づいた示方書はまだ作成されていない。Caltransでは、AASHTO-LRFDをカリフォルニア州の事情に合わせて修正することで限界状態設計法を導入する考えのようであるが、そのための目標年次が定まっているわけではない。ただし、プレストレストコンクリート構造物については、限界状態設計法に基づいた設計用プログラムを開発するためのチームが結成されたとのことである。

Caltransには、Caltrans-BDSを補足するために、設計者へのメモ (Memo to Designers; 以下ではMTDと記す) と呼ばれる内部資料がある。本年1月にはMTD 20-1<sup>12)</sup>が出された。これはCaltransの耐震設計法の基本方針を記したもので、キャパシティデザインを取り込んだ変位ベースの設計法となっている。表-1にその目次を示す。

MTD 20-1では、橋を重要な橋 (Important Bridge) と普通の橋 (Ordinary Bridge) に分類している。その上で、機能評価用地震動 (Functional-Evaluation Ground Motion) と安全性評価用地震動 (Safety-Evaluation Ground Motion) の2種類の地震動を想定し、これらの地震動に対する重要な橋と普通の橋の耐震性能を規定している。普通の橋は、さらに標準的な橋 (Ordinary Standard Bridge) と非標準的な橋 (Ordinary Non-standard Bridge) に分けられる。重要な橋と(普通の)非標準的な橋についてはプロジェクトごとに設計基準が設定されるが、(普通の)標準的な橋に対しては耐震設計基準 (Seismic Design Criteria; 以下ではSDCと呼ぶ)<sup>13)</sup>が作成されている。この設計基準の目次を表-2に記しているが、要求性能 (Demands) と保有性能 (Capacities) の評価法を示した上で、要求性能と保有性能を比較するというすっきりした形でまとめられている。これまでに、重要な橋と認定され個別に対処された橋にはBenicia-Martinez Bridge<sup>14)</sup>、San Francisco-Oakland Bay Bridge<sup>15)</sup>などがある。なお、MTD 20-1の概要は文献16)で紹介されている。

MTD 20-1は、ATC (Applied Technology Council) の報告書ATC-32<sup>17)</sup>をもとにしながら、Caltransのエンジニアが作成したものである。ATC-32はCaltransが委託した研究であり、その概要は文献18)で紹介されている。また、FHWAが委託した研究の報告書にATC-18<sup>19)</sup>がある。その成果は、将来、AASHTOの示方書に反映されると考えられる。過去においても、1973年のCaltrans-BDSがAASHTOの暫定示方書 (Interim Specifications) として採用され、1983年にはAASHTOがATC-6<sup>20)</sup>

表-1 MTD 20-1<sup>1,2)</sup>の目次

Overview
Bridge Category
Bridge Classification
Seismic Performance Criteria
Seismic Design Philosophy
Seismic Design Approach
Seismic Demands on Structural Components
Seismic Capacity of Structural Components
Seismic Design Practice

表-2 SDC<sup>1,3)</sup>の目次

1. Introduction
2. Demands on Structure Components
3. Capacities of Structure Components
4. Demand vs. Capacity
5. Analysis
6. Seismicity and Foundation Performance
7. Design
8. Seismic Detailing

をガイド示方書 (Guide Specifications), 1991年に標準示方書 (Standard Specifications) に取り入れている<sup>2,1)</sup>。米国の耐震設計は、このように、複数の機関が関連しながら発達してきた側面がある。

### 3. AASHTO-LRFD<sup>4)</sup>

#### 3.1 照査基準

AASHTO-LRFDでは、すべての限界状態に対して次式を満たすことが基本となる。

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n \quad (1)$$

ここに、 $\eta_i$ は荷重修正係数 (Load Modifier)、 $\gamma_i$ は荷重係数 (Load Factor)、 $Q_i$ は荷重効果 (Force Effect)、 $\phi$ は耐力係数 (Resistance Factor)、 $R_n$ は公称耐力 (Nominal Resistance)である。荷重係数ならびに耐力係数は統計処理に基づいて求められている。荷重係数 $\gamma_i$ は、各限界状態、各荷重ごとに値が定められている。死荷重などの永久荷重に対しては、荷重係数 $\gamma_i$ の最大値と最小値が与えられている場合がある。その際には、設計上きびしくなる方の値を採用する必要がある。耐力係数 $\phi$ は各限界状態ごとに値が定められているが、強度限界以外では一部の例外を除き $\phi=1.0$ である。荷重修正係数 $\eta_i$ については、3.3で説明を加える。

#### 3.2 限界状態

##### (1) 使用限界状態 (Service Limit State)

正常な使用ができなくなる状態であり、応力、たわみ、クラック幅についての検討を必要とする。この限界状態に対しては、3種類の荷重組み合わせ (Service-I, II, III) が定められている。Service-IIは鋼構造の塑性変形および継手部のすべり、Service-IIIはプレストレストコンクリート構造のクラックを検討対象とした場合の荷重組み合わせである。耐力係数 $\phi$ は1.0、ほぼすべての荷重係数は1.0である。使用限界状態の規定は、必ずしもすべてが強度や統計処理から導かれるものではなく、経験的に決められたものもある。

##### (2) 疲労・破壊限界状態 (Fatigue and Fracture Limit State)

疲労損傷により機能を失う状態であり、設計トラック荷重によって生じる応力範囲を検討する。応力範囲を制限すれば、繰り返し荷重によるクラック進展を阻止し、設計供用期間内に部材が破壊するのを防ぐことができる。数多くの繰り返し荷重を作用させるのは自動車であるため、荷重係数 $\gamma_i$ がゼロでない荷重効果は自動車に関連したもののみであり、荷重係数 $\gamma_i$ として0.75が規定されている。1.0より小さな値が採用されているのは、設計用トラックよりも若干軽いトラックの方が多くの繰り返し応力サイクルを引き起こしているという統計データによる。なお、疲労・

破壊限界状態の照査に用いられる設計トラック荷重は、他の場合と異なり、一定の車軸距離を有したトラック1台による荷重となっている。耐力係数 $\phi$ は1.0である。

### (3) 強度限界状態 (Strength Limit State)

設計供用期間内に生じ得る大きな荷重作用下で、強度や安定性を検討する。一般に耐力係数 $\phi$ は1.0より小さく、その値は設計対象とする材料や強度限界状態ごとに異なる。クリープや乾燥収縮などの荷重効果の荷重係数 $\gamma_i$ には2つの値が与えられており、変位を計算する際には1.20、それ以外の場合には0.50を用いるよう定められている。これは、構造物の非線形挙動によりこれらの荷重効果の減少が期待される一方で、継手部等の過小設計を避けるための処置である。種々の状況に対応するべく、5種類の組み合わせ荷重が用意されている。

### (4) 極限限界状態 (Extreme Event Limit State)

大地震、洪水、あるいは船や車、流水の衝突が起こった状態であり、その際にも橋梁が崩壊しないことを確認する。こうした事象の再現期間は、橋梁の設計供用期間に比べると非常に長い。そのため、複数の事象が同時に生じる確率は極めて低い。そのため、これらの荷重効果は別々に考慮してよい。また、極限限界状態ではかなりの非弾性変形が生じると考えられるため、クリープや乾燥収縮などによる荷重効果は無視できる。耐力係数 $\phi$ は1.0（但し、ボルト継手は別途規定している）であり、この限界状態に対しては2種類の組み合わせ荷重が定められている。

## 3.3 荷重修正係数 $\eta_i$

橋梁のじん性 (Ductility)、不静定度 (Redundancy)、重要度 (Operational Importance) も設計時に考慮すべき重要事項である。最初の2つは直接橋梁の安全性に関わり、3番めの事項は橋梁が供用されない場合の社会的な損失度に関係する。AASHTO-LRFDでは、これらをひとまとめにし、荷重修正係数 $\eta_i$ として考慮する。具体的には、次のように荷重修正係数 $\eta_i$ を定義している。

$$\begin{aligned} \eta_i &= \eta_D \eta_R \eta_I \geq 0.95 \\ \eta_i &= \frac{1}{\eta_D \eta_R \eta_I} \leq 1.0 \end{aligned} \quad (2a, b)$$

式(2a)は永久荷重の荷重係数 $\gamma_i$ が最大値を取る場合、式(2b)は永久荷重の荷重係数 $\gamma_i$ が最小値を取る場合に適用される。なお、 $\eta_D$ はじん性係数、 $\eta_R$ は不静定度係数、 $\eta_I$ は重要度係数であり、強度限界状態以外の検討においては、 $\eta_D = \eta_R = 1.0$ である。

### (1) じん性係数 $\eta_D$

弾性限界を超えた箇所が脆性的であると、その部分の耐力が急激に低下し、ひいては構造物の崩壊に直結する。逆に、その箇所が十分なじん性を有していれば、応力の再配分により構造物の耐力は上昇し、最大耐力に至るまでに大きな変形が生じて崩壊の危険性を警告することにもなる。さらにまた、地震荷重のような繰り返し載荷のもとでは、非線形挙動によるエネルギー吸収が期待でき、構造物の損傷を緩和し得る。これらのことから、強度限界状態に対する検討では、じん性係数が次のように定められている。

$$\eta_D \begin{cases} \geq 1.05 \\ = 1.00 \\ \geq 0.95 \end{cases} \quad (3a-c)$$

式(3a)はじん性が不十分な場合、式(3b)は本示方書による通常のもの、式(3c)はじん性に富んでいる場合に適用される。

## (2) 不静定度係数 $\eta_R$

静定構造物は荷重伝達経路がひとつであり、一部の崩壊がすぐに構造全体の完全な崩壊につながる。1967年に起こったオハイオ州のSilver Bridgeの落橋、1983年のコネチカット州のMianus 川に架かる橋の落橋などがその例である<sup>1)</sup>。すなわち、不静定度は橋梁の安全性を高める因子であり、複数の荷重伝達経路を有した構造物を設計すべきである。そのため、強度限界状態に対する検討では、不静定度係数が次のように定められている。

$$\eta_R \begin{cases} \geq 1.05 \\ = 1.00 \\ \geq 0.95 \end{cases} \quad (4a-c)$$

式(4a)は不静定度が不十分な場合、式(4b)は従来の橋梁が有する程度の不静定度を持つ場合、式(4c)は例外的に大きな不静定度を有している場合に適用される。

## (3) 重要度係数 $\eta_I$

この係数は強度限界状態ならびに極限限界状態に対する検討でのみ考慮され、他の場合には $\eta_I = 1.0$ である。

$$\eta_I \begin{cases} \geq 1.05 \\ = 1.00 \\ \geq 0.95 \end{cases} \quad (5a-c)$$

式(5a)は重要な橋梁、式(5b)は通常の橋梁、式(5c)はそれほど重要でない橋梁に適用される。重要度の判定は発注者が行ってよいと規定されている。判定に際しては、社会的影響や安全保障の側面などを考慮する必要がある。

## 4. おわりに

他国に比べると、米国での限界状態設計法の採用は特に早くはなかった<sup>2,2)</sup>が、それでもAISCでは1986年、AASHTOでは1994年に限界状態設計法による示方書が作成されている。本稿では触れなかったが、コンクリートや木材などでも限界状態設計法が採用されている。しかし、これら新しい示方書は、許容応力度設計法による従来の示方書に取って替わるものではなく、異なる設計法による示方書が共存している。その結果、AISC-LRFDが作成されて10年以上が経過しているにもかかわらず、建築物の設計において、いまだにAISC-LRFDを用いたがらないエンジニアは多いと聞く。また橋梁設計においても、AASHTO-LRFDを実際に使用している州はまだほとんどないようである。こうした現実は、現在実務で中心的な役割を果たしているエンジニアが学生時代から許容応力度設計法に慣れ親しんでいることに起因している。米国のことわざに“Old habits die hard”がある。米国民は進取の気象に富んでいるように見えることも多いが、使用している単位系からも理解されるように、非常に保守的な面も持ち合わせている。そのため、AISCがウェブ上でLRFDマニュアルの概要を公開するなどの啓蒙活動を行ってはいるものの、新しい設計法が十分普及するには、エンジニアの世代交代を待たねばならないのが現実のようである。

## 謝辞

本稿を執筆するに当たっては資料収集や問い合わせを行う必要があり、Dr. Lian Duan (Caltrans), Professor Eric M. Lui (Syracuse University), 小野潔研究員 (建設省土木研究所), Dr. Wen-huei Yen (FHWA), Mr. Junyi Meng (FHWA) の諸氏にたいへんお世話になった。特に、LianとEricの二人に

は、学生時代からの友人という気安さもありe-mailで数多くの問い合わせをしたが、常に迅速かつ的確な回答をいただいた。ご協力いただいた皆様に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Baker, R.M., Puckette, J.A.: Design of Highway Bridges, John Wiley & Sons, New York, 1997.
- 2) 例えば、西野文雄編：鋼構造物設計指針 Part A 一般構造物，鋼構造シリーズ 3 A，土木学会，1987.
- 3) 西川和廣：道路橋示方書の性能規定化とこれからの橋，第2回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，土木学会，pp.39-48，1999.
- 4) American Association of State Highway and Transportation Officials: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 2nd ed., 1998.
- 5) American Institute of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings, 1986.
- 6) American Association of State Highway and Transportation Officials: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 1994.
- 7) American Institute of Steel Construction: LRFD Manual of Steel Construction, 1986.
- 8) American Institute of Steel Construction: Specification for Structural Steel Buildings — Allowable Stress Design, Plastic Design, 1989.
- 9) American Association of State Highway Officials: Standard Specifications for Highway Bridges and Incidental Structures, 1931.
- 10) American Association of State Highway and Transportation Officials: Standard Specifications for Highway Bridges, 16th ed., 1996.
- 11) American Association of State Highway and Transportation Officials: AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications, 1998.
- 12) California Department of Transportation: Memo to Designers 20-1 Seismic Design Methodology, 1999.
- 13) California Department of Transportation: Seismic Design Criteria, ver.1.1, 1999.
- 14) Imbsen and Association, Inc.: Benicia-Martinez Bridge Seismic Retrofit - Main Truss Spans Final Retrofit Strategy Report, Sacramento, California, 1995.
- 15) California Department of Transportation: San Francisco-Oakland Bay Bridge West Spans Seismic Retrofit Design Criteria, Edited by Duan, L., 1997.
- 16) 本田明成・当麻庄司・Lian Duan・倉真也：CALTRANS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，pp.93-98，1998.
- 17) Applied Technology Council: Improved Seismic Design Criteria for California Bridges Provisional Recommendations, Report No. ATC-32, 1996.
- 18) 大塚久哲・石塚宏之・五瀬伸吾：米国における橋梁耐震設計の考え方の概要と地震時断面力の算出例，橋梁と基礎，98-3，pp.45-50，1998.
- 19) Rojahn, C., Mayes, R., Anderson, D.G., Clark, J., Hom, J.H., Nutt, R.V., and O'Rourke, M.J.: Seismic design Criteria for Bridges and Other Highway Structures, Report No. NCEER-97-0002 (State University of New York at Buffalo) and ATC-18 (Applied Technology Council), 1997.
- 20) Applied Technology Council: Seismic Design Guidelines for Highway Bridges, Report No. ATC-6, 1981.
- 21) Duan, L.: Seismic Design Philosophies and Performance-Based Design Criteria, Chapter 37 of Bridge Engineering handbook, CRC Press, 1999.
- 22) 例えば，隣国カナダでは限界状態設計法に基づく道路橋設計基準が1979年に刊行されている：Ministry of Transportation and Communications: Ontario Highway Bridge design Code, Ontario, Canada, 1979.