

# これからの設計技術

前田 晴人\*

## 1. はじめに

わが国初の鉄筋コンクリート橋は、1903（明治36）年に架けられた神戸市の若狭橋であるが、現存するのは、同年に架けられた京都の琵琶湖疎水日岡山運河橋（1903年）である。初のプレストレストコンクリート橋は石川県七尾市の長生橋（1951（昭和26）年）であり、スパン3.6mのプレテンション単純合成床版橋3連であったが、2001年の河川改修によりその本来の役目を終え、一部が七尾市希望の丘公園に移設・保存されている。鉄筋コンクリート橋の歴史は100年余、プレストレストコンクリート橋の歴史は高だか60年にすぎない。

一方、鉄筋コンクリートに関する規準は、最初の鉄筋コンクリート橋が架けられてから約30年後の1931（昭和6）年に制定（土木学会）された。また、プレストレストコンクリートに関する規準は、最初のプレストレストコンクリート橋が架けられてから4年後の1955（昭和30）年に制定（土木学会）された。鉄筋コンクリートに関する規準の歴史は80年弱、プレストレストコンクリートに関する規準の歴史は50年を過ぎたばかりである。

規準類は制定後、新知見を取り入れながら緩やかな改訂を続けたが、土木学会のコンクリート標準示方書において1986（昭和61）年に行われた限界状態設計法の導入および1996（平成8）年に行われた性能照査型設計法の導入により、大きな転換期がおとずれている。

ここでは、コンクリート橋を対象とした設計技術に関して、まずこれまでの設計規準・設計法の変遷および今後の動向を示す。次に、性能照査型設計法について、導入の背景およびその内容について解説する。最後に（株）プレストレストコンクリート技術協会のPC技術規準委員会において現在検討している性能創造型設計法について述べる。

## 2. 規準類の変遷

表-1にわが国における鉄筋コンクリート橋・プレスト

レストコンクリート橋の規準の変遷を示す。

道路橋については、日本道路協会により1978（昭和53）年に、これまでの鉄筋コンクリート橋とプレストレストコンクリート橋の示方書を改訂・統合した「道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編」が制定された。この示方書は、設計荷重作用時ならびに終局荷重作用時に対する照査を行うこととなっているが、ひび割れを許容するPPCについては規定されていない。さらに、2002（平成14）年の改訂により書式が性能照査型設計法に改められた。今後の改訂では、内

表-1 わが国における鉄筋コンクリート橋・プレストレストコンクリート橋の規準の変遷

1926（大正15）年	道路構造に関する細則案、内務省 一等橋、二等橋、三等橋とそれらに対する活荷重を制定
1931（昭和06）年	鉄筋コンクリート標準示方書、土木学会、1936年・1940年改訂
1939（昭和14）年	鋼道路橋設計示方書案、内務省、1956年改定 一等橋、二等橋、改訂版でTL-20、TL-14を制定
1943（昭和18）年	無筋コンクリート標準示方書、土木学会
1949（昭和24）年	コンクリート標準示方書、土木学会、1956年改訂
1955（昭和30）年	プレストレストコンクリート設計施工指針、土木学会、1961年改訂 諸外国の基準類主にDIN 4227、国内の研究や経験をもとに作成
1964（昭和39）年	鉄筋コンクリート道路橋設計示方書、日本道路協会
1965（昭和40）年	プレストレストコンクリート鉄道橋設計施工基準（案）、日本国有鉄道
1968（昭和43）年	プレストレストコンクリート道路橋示方書、日本道路協会
1970（昭和45）年	建造物設計標準プレストレストコンクリート鉄道橋、日本国有鉄道1974年同解説、1983年改訂
1978（昭和53）年	プレストレストコンクリート標準示方書、土木学会 CEB・FIPモデルコードの概念を参照、PCをI～III種に分類
1978（昭和53）年	道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編、日本道路協会 RCとPC構造を統合、1990（平成02）、1994（平成06）、1996（平成08）年に改訂。1994年の改訂でB活荷重、A活荷重を制定
1986（昭和61）年	コンクリート標準示方書設計編、土木学会
1987（昭和62）年	PRC設計指針（案）、日本国有鉄道
1991（平成03）年	コンクリート標準示方書設計編改訂、土木学会 限界状態設計法の導入
1992（平成04）年	鉄道構造物等設計標準・同解説、運輸省鉄道局監修 土木学会標準示方書にない限界状態設計法の導入、PC、PRCに分類
1996（平成08）年	コンクリート標準示方書設計編改訂、土木学会 鉄道設計標準にないPC構造・PRC構造に分類
2002（平成14）年	コンクリート標準示方書構造性能照査編、土木学会 編の名称を変更し構造性能を照査する基準であることを明確化
2002（平成14）年	道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編改訂、日本道路協会 性能規定型の技術基準を目指して「要求する事項」を記述
2004（平成16）年	鉄道構造物等設計標準・同解説改訂、国土交通省 鉄道局監修 土木学会標準示方書にない性能照査手法を大幅に採用
2007（平成19）年	コンクリート標準示方書設計編、土木学会 構造性能照査編と耐震性能照査編を一つにまとめて再度設計編へ



\* Haruhito MAEDA

(株)日本構造橋梁研究所

容的にもより一層性能照査型設計法へ移行するものと思われる。

鉄道橋については、日本国有鉄道により1970（昭和45）年に「建造物設計標準、プレストレストコンクリート鉄道橋」が制定された。設計標準とはべつに1987（昭和62）年に「PRC設計指針（案）」が制定され、以来、短支間の鉄道橋についてはひび割れを許容するPRC（PPC）橋が多く採用されている。日本国有鉄道の民営化に伴い、わが国の鉄道コンクリート建造物共通の設計規準として鉄道局監修により1992（平成04）年に「鉄道建造物等設計標準・同解説」が制定された。この設計標準は限界状態設計法に基づいており、プレストレストコンクリート構造に関しては、使用限界状態においてひび割れの発生を許さない「PC構造」と、ひび割れの発生を許容する「PRC構造」とに分類し、それぞれに対して具体的な設計法を与えている。さらに、この設計標準は2004（平成16）年に改訂され、性能照査型設計法が大幅に取り入れられている。鉄道建造物等設計標準は、土木学会の標準示方書と相互に影響を与える形で改訂が行われている。

### 3. 設計法の変遷<sup>1)</sup>

設計法としては、許容応力度法が長い間使用されてきた。しかし、材料や構造の非線形性を取り入れ、さまざまな限界状態に対する安全係数を定めることで、それぞれの状態の安全度のばらつきを少なくすることができる限界状態設計法が近年導入されるようになってきた。さらに設計手法としては、まず建造物の要求性能を規定して設計を行う性能照査型設計法へ移行しようとしているのが現状である。

#### 3.1 許容応力度設計法

わが国におけるコンクリート建造物の設計手法は、これまで長い間許容応力度設計法が用いられてきた。たとえば鉄筋コンクリートに対する許容応力度設計法では、鉄筋は弾性体、コンクリートは引張に対する抵抗力を無視した弾性体と仮定している。

設計手順は、まず、作用荷重に対して部材の断面力を求め、その断面力により部材の各材料（コンクリート、鉄筋）に発生する応力度 $\sigma$ を求める。一方、使用される材料と同じ品質の材料の試験結果からコンクリートの圧縮強度、鉄筋の降伏強度 $f$ が得られ、これらの強度を十分な安全性を見込んだ安全率 $\gamma$ で除することにより許容応力度 $\sigma_a$ が得られる。そして、式（1）に示すように発生応力度が許容応力度を超えないことを確認する。

$$\sigma \leq \sigma_a = f / \gamma \quad (1)$$

許容応力度設計法は弾性解析であるため比較的簡便であり、だれにでもわかりやすい設計法として長い間用いられてきた。しかし、この設計法は設計技術・解析技術が進歩するに従い次の欠点を指摘されるようになってきた。

- ・発生応力度が必ずしも作用断面力に比例しないため、部材崩壊に対する安全度を合理的に表現できない。
- ・荷重に対する安全性も含めてすべての安全係数を材料の安全率 $\gamma$ のみによって扱っているが、荷重の変動、材料のばらつき、構造解析上の不確実性等は、本来一

様に取り扱えない。

このような欠点に対処するため、限界状態設計法が提唱されるに至った。

#### 3.2 限界状態設計法

限界状態設計法は、建造物がある状態に達すると破壊したり、供用できなくなる限界の状態を設定し、その状態に対する安全性を照査するものである。荷重に対する安全係数と材料に対する安全係数を分離して考え、基本的には断面力のレベルで対比を行う。

設計手順は、まず、対象建造物に対して、各種の荷重の特性値を組み合わせて設計荷重を設定する。この荷重が作用したときの断面力 $S$ を構造解析によって算出する。さらに安全側に割り増したものが設計断面力 $S_d$ となる。一方、耐荷力としては、材料強度 $f_k$ から、ばらつきを考慮して割り引いた値が材料の設計強度 $f_d$ であり、これを用いて計算した断面耐力 $R(f_d)$ を部材係数 $\gamma_s$ で除したものが設計断面耐力 $R_d$ となる。そして、設計断面力 $S_d$ に対する設計断面耐力 $R_d$ の比をとり、式（2）を満足することを確認する。

$$\gamma_i \cdot S_d / R_d \leq 1.0 \quad (2)$$

ここで、 $\gamma_i$ は構造物係数と呼ばれ、その構造物の重要度・社会的影響度を考慮して設定される。

この設計法の導入にあたっては、これまでの許容応力度設計法と大きく異なる構造物ができないように、信頼性理論に基づいて安全性指標を決めるというキャリブレーションの手法をとる場合が多い。

#### 3.3 性能照査型設計法

建造物の建設に際しては、その建設目的と建設地点の環境によって、発注者または使用者の立場から建造物に要求する性能がある。一方、建造物は、その構造形状、使用材料の仕様、施工具合によって、特有の構造性能が付与される。ただし、ここでいう性能は、これまでの設計法で算定された耐荷力や変形性能のみでなく、安全性、供用性、耐久性、修復性、美観等、建造物に期待される本来の性能を表すものとする。

性能照査型設計法は、これらの要求性能と構造性能とを対比して照査するものである。したがって、性能照査型設計法ではこれまでの材料、または規準に規定された仕様で制約されず、要求する性能を直接追及することができる。このため、新材料・新工法の採用、高度な解析や設計手法の導入を促すものとなり、所要の性能を満足するためのもっとも経済的な設計が期待できる。

ただし、要求性能に対する照査が、それぞれの性能に対応して設定された限界状態に対して検討される場合が多いため、性能照査型設計法は、限界状態設計法の延長線上にあるということもできる。

## 4. 性能照査型設計法

### 4.1 導入の背景<sup>2)</sup>

#### (1) 技術的側面

建造物が保有する性能は、次の理由により明確にされていない場合が多い。

- ・従来の設計では決められた手順をたどる設計を行えば

よく、設計者自身が設計した構造物の性能を必ずしも把握する必要のなかったこと

- ・既存の構造物の大半は際立った支障が生ずることなく供用に耐えてきており、ある程度の安全性が現行の設計規準で確保されていると考えられること
- ・コストと構造物の保有する性能とのバランスが必ずしも認識されておらず、構造物の性能を明確に評価するための技術が体系的に確立されてこなかったこと

要求性能を満たすことを確認するという行為に対して、こうした技術的側面からみた設計規準の欠点を克服するための一つの方法として、性能照査型設計法の導入が検討されるに至った。

(2) 社会的・経済的側面

1990年代に入り、経済活動の国際化の傾向が強まり、1995(平成7)年には「貿易の技術的障害に関する協定」(WTO/TBT)の締結がなされ、1996(平成8)年2月には日米包括経済協定において建築分野への規制緩和要求が米側からなされた。また、国際標準化機構(ISO)による国際規格等の性能規定化が促進されてきた。このような社会的・経済的情勢のなか、新技術開発など設計者の創意工夫の活用、工期短縮、建設コスト縮減、性能明示による国際化対応を目指す性能照査型設計法の導入が、景気の低迷に伴う建設投資額の縮減という経済的な動向を見据えながら積極的に検討されるに至った。

4.2 海外の規準における要求性能と限界状態<sup>3)</sup>

海外においては限界状態設計法が先行しており、要求性能の明確化が今後の課題となっている。

(1) AASHTO(米国高速道路規準)LRFD

AASHTO LRFD(SI Units Second Edition 1998)において定義されている要求性能とおのおのに対応する限界状態の概要を表-2に示す。AASHTO LRFDでは、要求性能的表現を行っていないが、規定文章から判断して表-2のようにまとめた。

(2) DIN 1045(ドイツコンクリート構造物設計規準)

DIN 1045-1(Ausgabe 2001)において定義されている要求性能とおのおのに対応する限界状態の概要を表-3に示す。DIN 1045-1(Ausgabe 2001)は、性能照査型設計法ではないが、「2.4 安全性の基本方針」において、要求事項の形で3つの要求性能を記述している。

(3) BS 5400(イギリス橋梁構造物設計規準)

BS 5400(British Standard)において定義されている要求性能とおのおのに対応する限界状態の概要を表-4に示す。疲労についても定義されているが、終局限界状態の中での記述であるため、対応する要求性能を安全性とした。BS 5400は、性能照査型設計法ではないが、規定文章から判断して表-4のようにまとめた。

(4) ISO 19338(コンクリート構造物の性能と評価)

ISO 19338において定義されている要求性能とその照査項目、指標の概要を表-5に示す。ISO 19338は全体的な枠組の規定であり照査方法については言及されていない。

4.3 わが国の規準における要求性能と限界状態<sup>3)</sup>

道路橋関係は現在改訂中であり、ここではその改訂の基

本となるであろう「土木建築にかかる設計の基本」について紹介する。鉄道橋関係はすでに施行されている。

(1) 土木建築にかかる設計の基本(国土交通省)

土木・建築にかかる設計の基本(2002(平成14)年10月制定)において定義されている要求性能とおのおのに対応

表-2 AASHTO LRFDの要求性能と限界状態

要求性能	限界状態	
安全性	終局限界状態 Strength limit state	橋梁が設計寿命中に破ることを予想した統計的に有意な規定荷重の組合せに対して、局所ならびに全体系双方での強度および安定性が抵抗できること。甚大な被害や構造的損傷が生じる可能性を認めるが、全体的な構造一体性は保たなければならない。 特定作用限界状態 偶発限界状態(Extreme event limit state) 再発期間が橋梁の設計寿命よりはるかに長いようなきわめてまれな出来事を想定し、そのような状況下において、橋梁が構造的に残存しなければならない。
供用性	供用限界状態 Service limit state	正規の供用状況における応力、変形、ひび割れ幅の制限を満足しなければならない。 *正規の供用とは、特別許可車両や90km/h超の風や、極端な出来事を除き、洗濯を考慮した状況のことである。
耐久性	疲労限界状態 Fatigue and Fracture limit state	予想される応力範囲の振幅数を発生する単一設計荷重の結果から、応力範囲の制限を満足する。

表-3 DIN 1045の要求性能と限界状態

要求性能	限界状態	
耐荷性	耐荷性限界状態 Grenzzustande der Tragfähigkeit	本限界状態を超えれば、耐荷構造物の十分な安全性が保証されない限界状態。この場合、その機能喪失は構造物全体または、いくつかの部材が短期強度(Kurzzeitfestigkeit)または疲労強度(Ermüdung)を上回るか、体位安定性(Lagesicherheit)が失われることによって起こりうる。
供用適合性	供用適合性限界状態 Grenzzustande der Gebrauchstauglichkeit	本限界状態を超えれば、耐荷構造物が所定の使用に供されることができなくなる状態であり、取り決めた使用条件と使用適合性をひび割れ発生と、部材の変形量などを考慮して確保しなければならない。
耐久性	-	耐荷構造物は、引き起こされる物理的および化学的作用に対して耐久性を示し、全使用期間を通じて耐荷性および使用適合性が確実に保証されなければならない。耐荷構造物の十分な耐久性は、所定の設計規準を遵守することにより、また、耐荷性および使用適合性の限界状態における計算を規定に適合するよう行うことによって保証されると見なしてよい。水密性または部材の力学的抵抗力などについては耐久性に対する要求レベルを高める場合は、設計条件を厳しくするよう、また必要に応じて照査計算を追加補強して実施するものとする。

表-4 BS 5400の要求性能と限界状態

要求性能	限界状態	
安全性	終局限界状態 Ultimate limit state	構造物が剛体と見なされる際に、釣り合いが成立しなくなる。 構造物が遅れ弾性あるいは、後座屈挙動により終局強度に達する。 疲労による機能低下で、破壊に至る。 上記状態に至らないことを、証明しなければならない。
供用性	供用限界状態 Serviceability limit state	機能性や公共性を喪失し、補修・補強等の処置を必要とする。 上記状態に至らないことを、証明しなければならない。

表 - 5 ISO 19338 の要求性能と照査項目

要求性能	照査項目	指標	備考
(一般的要求事項) 1.安全性・構造の健全性 2.供用性 3.維持管理性、耐久性 4.施工性、工費など 5.環境に与える影響や美観 6.耐用期間中の性能保証	(信頼性設計法) 強度 じん性 ひび割れ 振動 耐久性 耐火性 疲労 供用期間中の維持管理性	限界値の設定	設計標準では対象構造物の要求品質を示すこと。  設計標準では施工で要求されるものも示すこと。 ・コンクリート打設と養生 ・品質管理 ・支保工、施工手順 ・許容温度条件

応する限界状態の概要を表 - 6 に示す。土木・建築にかかる設計の基本では、構造設計において考慮される安全性、使用性、修復性に限定して記述している。疲労限界状態については、終局限界状態、使用限界状態と並列に扱わず、「限界状態が発生する作用（荷重）の違い」として、終局限界状態、使用限界状態の中で取り扱うこととしている。

(2) 鉄道構造物等設計標準（鉄道総合技術研究所）

鉄道構造物等設計標準（コンクリート構造物）（2004（平成 16）年 4 月制定，国土交通省鉄道局監修）において定義されている要求性能，おのおのの要求性能にかかる性能項目，具体的な照査指標の概要を表 - 7 に示す。おのおのの要求性能に対して限界状態を設定し，構造物あるいは部材が限界状態に達していないことを確認することで性能を照

査する。限界状態に応じた適切な限界値を設定し，算定した応答値がこれを超えないことを照査する。

耐久性は，独立した要求性能としてではなく，材料劣化を考慮した性能を算定する行為においてつねに考慮すべきものであると考え，すべての要求性能に対して，耐久性を考慮して照査することを基本としている。ただし，現状では材料劣化を考慮した性能照査を行うことが難しいため設計耐用期間を経過しても材料劣化を生じないように，耐久性の検討を行うこととしている。

4.4 プレストレストコンクリート技術協会の試み<sup>3)</sup>

(社) プレストレストコンクリート技術協会では PC 構造物の性能照査法研究委員会（委員長：上田多門北海道大学大学院教授）において，次のような「性能照査を導入するに当たっての考え方」を示している。協会内においては今後，この考え方を基本に，検討が進められるものと思われる。

(1) 全 体

構造物の設計は，安全性，供用性，修復性といった構造物に要求される基本的な性質のほか，景観，自然環境に与える影響，経済性等にも配慮した総合的なものであるが，本指針では，「構造設計」において考慮される基本的な要求性能として，安全性，供用性，修復性について取り扱うこととした。また，耐久性については，安全性や供用性に時間軸の概念を取り入れて環境作用を考慮することにより，

表 - 6 「土木建築にかかる設計の基本」における要求性能と限界の状態

要求性能	限界状態
安全性 想定した作用に対して，構造物内外の人命の安全を確保する	終局限界状態 想定される作用により生ずることが予測される破壊や大変形等に対して，構造物の安全性が損なわれず，その内外の人命に対する安全性等を確保しうる限界の状態
	特定作用限界状態 疲労限界状態（変動作用が繰り返して作用することに伴う疲労損傷が発生） 耐久限界状態（環境作用の影響に伴う損傷が発生） 耐火限界状態（火災に伴う損傷が発生）
	使用限界状態 想定される作用に対する応答に対して，構造物の設置目的を達成するための機能が確保される限界の状態
使用性 想定した作用に対して，構造物の機能を適切に確保する	特定作用限界状態 疲労限界状態（変動作用が繰り返して作用することに伴う疲労損傷が発生） 耐久限界状態（環境作用の影響に伴う損傷が発生） 耐火限界状態（火災に伴う損傷が発生）
	修復限界状態 必要な場合には，想定した作用に対して適用可能な技術で，かつ妥当な経費および期間で修復を行うことで継続的な使用が可能とする

表 - 7 鉄道構造物等設計標準の要求性能と照査項目

要求性能	性能項目	照査指標の例
安全性 構造物が，使用者や周辺の人々の生命を脅かさないための性能	破壊 設計耐用期間中に生じるすべての作用に対して，構造物が耐荷能力を保持することができる性能	力，変位・変形
	疲労破壊 設計耐用期間中に生じるすべての作用（変動作用の繰返し）に対して，構造物が耐荷能力を保持することができる性能	応力度，力
	走行安全性 列車が安全に走行できる性能	変位・変形
	公衆安全性 かぶりコンクリートのはく落等，構造物に起因した第三者への公衆災害を防止するための性能	中性化深さ，塩化物イオン濃度
使用性 構造物の使用が快適に構造物を使用するための性能 および構造物に要求される諸機能に関する性能	乗り心地 鉄道利用者に快適な乗り心地を提供するための性能	変位・変形
	外観 コンクリートのひび割れ，表面の汚れなどが，不安感や不快感を与えず，構造物の使用を妨げないようするための性能	ひび割れ幅，応力度
	水密性 水密機能を要するコンクリート構造物が，透水，透湿により機能を損なわないための性能	ひび割れ幅，応力度
	騒音・振動 構造物から生じる騒音や振動が，周辺環境に悪影響を及ぼさず，構造物の使用を妨げないようするための性能	騒音レベル，振動レベル
復旧性 構造物が損傷を受けない，または損傷を受けた場合に性能回復が容易に行えるための性能	損傷	変位・変形，力，応力度

耐久性をこれらの中に包含する考えがあるものの、現時点では経時的な影響を考慮してこれらの性能を照査することが難しいことから、本指針においては耐久性を要求性能と同等に取り扱うこととした。

## (2) 安全性

安全性は、供用期間中に想定されるすべての作用（現行の荷重に相当）のもとで、構造物が使用者や周辺の人々の生命を脅かさないために保有すべき性能である。安全性には、構造物の構造体としての安全性と機能上の安全性がある。

構造体としての安全性の一つとして、破壊に対する安全性があげられる。破壊に関する安全性は、供用期間中に生じるすべての設計作用に対して、構造物が耐荷能力を保持することができる性能を指す。破壊に関する構造物全体系としての性能は、構造物を構成する各部材の状態と密接な関係にある。構造物の破壊に関する安全性は、構造物が複数の部材により構成されている場合、一部の部材が破壊しても構造物全体系として破壊しないことを照査すればよい。

ただし、このような状況を考慮できる解析モデルを用いて照査する必要があり、高度な解析モデルが必要となる。したがって、構造物の破壊を安全側に照査するために、部材のいずれか一つが破壊に至る状態を照査するのが一般的と考えられる。

また、機能上の安全性には、たとえば、列車や自動車の走行安全性や、公衆安全性等があげられる。走行安全性は、文字どおり列車や自動車等が安全に走行するための性能であり、公衆安全性は、かぶりコンクリートのはく落等、構造物に起因した第三者への公衆災害を防止するための性能である。機能上の安全性は、構造物の求められている機能や、構造物周囲の使用状況により必要に応じて性能項目として設定することとなる。

## (3) 供用性

供用性は、供用期間中に想定される設計作用のもとで、構造物の使用者や周辺の人が快適に構造物を使用するための性能である。

具体的な性能項目としては、列車や自動車の乗り心地が良好であること、コンクリートのひび割れや表面の汚れなどが周辺の人に不安感や不快感を与えず、構造物の使用を妨げないこと、騒音・振動が周辺環境に悪影響を与えないことがあげられる。

なお、ひび割れについては耐久性においても検討することとなるが、これとは別途、周辺の人に不安感や不快感を与えないような、供用性を満足する適切な限界値を定めることとなる。

## (4) 修復性

修復性は、構造物が損傷を受けない、または受けた場合に性能回復が容易に行えるための性能である。

修復性の照査指標としては、構造物の損傷状態により、修復性の性能レベルを定める方法がある。たとえば、鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）では以下のように性能レベルを定めている。

- ・性能レベル1：機能は健全で補修をしないで使用可能な（損傷）状態

- ・性能レベル2：機能は短時間で回復できるが、補修が必要な（損傷）状態

修復性の照査指標は、補修などの復旧費用や復旧までの損失費用などを指標とすることが望ましい。したがって、部材の損傷状態や構造物の残留変位等を照査指標とする場合は、あらかじめ復旧に要する復旧費用および損失費用と、部材の損傷や構造物の残留変位に相関があることが前提となる。その前提条件が成り立てば、損傷状態や残留変位等の物理的現象を照査指標とすることができるの考えに基づいて、鉄道標準では、部材の損傷状態や残留変位等の物理的指標によって復旧性を照査してよいこととしている。

一方、環境の影響に起因した材料劣化に伴う損傷に対する修復性については、構造物の供用期間内において、その材料劣化が一定以内に抑えられるということを前提に照査を省略してよいと考えられる。

## (5) 耐久性の位置づけ

耐久性については、たとえば「DIN」等のように一つの要求事項として耐荷性や使用性と並列にとらえる考え方や、「土木建築にかかる設計の基本」のように安全性や使用性に時間軸の概念を取り入れるとともに環境作用を考慮することにより、耐久性をこれらの中に包含する考え方がある。

本来であれば、構造物に要求される安全性や供用性については、構造物に予定されている設計供用期間内を通じて満足されると考えるのが自然であり、この時点で安全性や供用性について時間軸の概念を含まざるを得ないものであり、すなわち耐久性は織込み済みであると考えられる。したがって、耐久性を独立した一つの性能にとらえるよりも、安全性や供用性に含めて考える方が、性能照査の考えは自然なものとなる。

近年、耐久性に関するさまざまな研究の成果により、構造物の劣化過程が明らかにされつつある。たとえば、鋼材の腐食が生じ始める中性化残りや塩化物イオン濃度はある程度解明されているといえる。しかし、劣化の進行に伴うコンクリート構造物の性能の経時変化は必ずしも十分に把握されていない。

そのため、現状の技術レベルにおける現実的な方法の一つとして、想定する構造物の供用期間内において材料劣化を一定レベル以内に抑えることにより、構造物の性能の経時変化を考慮しないで照査する方法があげられる。

かぶりの増加や水セメント比の低減など、劣化を防止するための対策は建設時点で比較的容易に講ずることができるのに対し、補修・補強は技術的にも経済的にも困難である場合が少なくない。そのため、想定する構造物の供用期間内において材料劣化を一定レベル以内に抑えることにより構造物の性能低下を考慮しないで照査する方法は、ライフサイクルコストの観点や経時変化に対する情報が乏しい現状からも一つの工学的な判断としてありえるものと考えられる。

## 5. 性能創造型設計法 4)

### 5.1 性能創造型設計のコンセプト

われわれが建設する構造物は人間社会において基本的な



人工環境を形成するものであり、この建設に際しては機能性、供用性、安全性、景観性、耐久性、維持管理性、経済性など多くの性能が妥当に確保されなければならない。建設行為はまさに創造的なものである。新たに提案する性能創造型設計は、このように「設計が構造物の性能を創造する」という視点に立って設計概念を論理構成することをコンセプトとしている。性能照査型設計との違いは、創造性に対するかかわりの度合である。

(社)プレストレストコンクリート技術協会のPC技術規準委員会では、現在、性能創造型設計法についての検討を行っている。提唱した性能創造型設計法は以下に示す三つのレベルを規定している。

- 1) 性能創造レベル1：規準の範囲内あるいは少し超えた範囲での性能を創造する（仕様規定レベル）。
- 2) 性能創造レベル2：規準を超える材料を用いたり、環境負荷低減のための架設方法など規準に明確に規定されていない性能、建設時の性能などを創造する（性能照査型設計レベル）。
- 3) 性能創造レベル3：非常に高いレベルの創造的技術の適用で、規準を超える新技術のため設計者が限界状態を設定する。構造物のライフサイクルや維持管理を考える。材料的に、あるいは想定される限界状態などが現行の規準の範ちゅうを大きく超える設計の場合には、実験などによる検証が必要となる（性能創造型設計レベル）。

性能創造レベル1は仕様規定レベル、レベル2は性能照査型設計レベル、レベル3は性能創造型設計レベルに置き換えることができる。今後の委員会活動としては性能創造レベル3の論理構成が課題となる。

## 5.2 性能創造型設計（性能創造レベル3）の事例

### (1) 揖斐川橋、木曾川橋

支間長270 mを超える揖斐川、木曾川河口にかかるこの橋（写真-1）は、杭長が40 mに達するために上部工重量を低減する必要性があった。そのため、径間中央部100 mを鋼桁にして、コンクリート部を斜材で吊るエクストラロード橋が採用された。主桁には圧縮強度が60 MPaのコンクリートを使用し、最大重量400 tfのプレキャストセグメント工法とすることで、河川条件に左右されることなく最短工期で建設を完了した。また、斜材にはプレファブ型を使用しているが、疲労設計をすることで斜材の許容値に0.6 fpuを採用した。この橋は軽量化、工期短縮、斜材の疲労設計などの結果により、規準を超えた範囲での性能を創造した例であるといえる。

### (2) 波形ウェブ橋

波形鋼板を主桁のウェブに初めて使用することは日本において「ripple web」として研究された。その後フランスにおいて複合橋として波形ウェブ橋が開発されるが、前者はスティフナーの省略を、後者はプレストレス力が鋼鈹に移行するのを防ぎ主桁重量の軽量化を実現する、という違った目的をもって開発された（写真-2）。波形鋼板はそれまでいろいろなところに使用されていて開発経緯は違うものの、これを橋梁のウェブに使用するという発想は橋梁の可能性を大いに拡大したという点で、性能創造の典型的な事

例であるといえる。

### (3) 超高強度繊維補強コンクリートを用いた橋梁

超高強度繊維補強コンクリートは圧縮強度が200 MPaの新しい材料で、引張強度も8 MPaあり無筋のコンクリートである。トラス橋やアーチ橋、桁橋（写真-3）に採用されており、羽田空港の滑走路拡張工事では大だいのこの新しいコンクリートが用いられている。鋼構造のように軽量化が可能で、しかもその緻密な材料構造から高い耐久性が得られる。この新しい材料は大いなる性能創造の可能性を秘めているといえる。



写真-1 揖斐川橋・木曾川橋

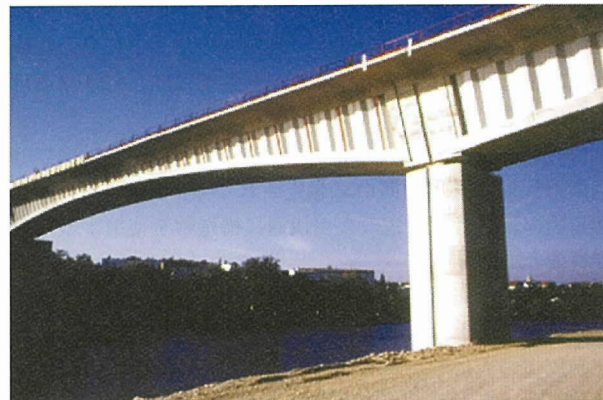


写真-2 ドール橋



写真-3 酒田みらい橋

## 6. おわりに

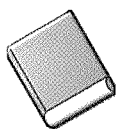
ローマ時代の水道橋のように、設計者たちは世の中に規準などが存在しない時代から、魅力的かつ耐久性のある構造物を数多く造ってきた。これらは彼らの創造性の賜である。現代の設計者であるわれわれも材料や施工法の進歩と規準のトレースだけでは昔の設計者を越えられないことを自覚する必要がある。設計法の高度化は時代の流れである。しかし、創造性はいつの時代にも設計者が根底にもつべき精神であろう。性能を照査するという消極的な設計体系を確立するのみでなく、設計自体が本来もつべき積極性をもたせた性能創造型設計法を、設計技術の核として、また、

設計技術者の精神のよりどころとして確立することが重要である。

### 参考文献

- 1) 吉川弘道：第2版鉄筋コンクリートの解析と設計，丸善株式会社，2004
- 2) 杉山俊幸：性能照査型設計法に基づく橋梁設計の基礎知識と応用，civil-eye.com web セミナー，2007
- 3) PC 構造物の性能照査法研究委員会報告書（上田多門委員長），（社）プレストレストコンクリート技術協会，2007
- 4) 前田晴人，春日昭夫，池田尚治：構造コンクリートにおける性能照査型設計法の提案，第17回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，2008

【2009年1月15日受付】



刊行物案内

## 第 17 回 プレストレストコンクリートの 発展に関するシンポジウム 論 文 集

（平成20年11月）

本書は、平成20年11月に高松市（サンポート高松）で開催された標記シンポジウムの講演論文集です。

CD 版論文集：定価：12,000 円，会員特価 10,000 円／送料 300 円  
 体 裁：プラスチックCDケース入り  
 書籍版論文集：定価：31,500 円，会員特価 25,200 円／送料 500 円  
 体 裁：B5判，箱入り