

構造コンクリートにおける性能創造型設計法の提案

(株) 日本構造橋梁研究所 正会員 工博 ○前田 晴人
三井住友建設(株) 正会員 工博 春日 昭夫
横浜国立大学 名誉教授 正会員 工博 池田 尚治

1. はじめに

我々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。この建設行為はまさに創造的なものであり、将来の人間社会に大きな役割を果たすことを強く認識することが必要である。このためには、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が強く求められる。ここではこのような観点から、高性能、高強度コンクリートの活用を念頭に置いて、性能創造型設計法のコンセプトについての著者らの考えを述べるものである。

2. 設計法の変遷

設計法は、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、様々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。この設計法の導入に当たっては、それまでの許容応力度法と大きく違う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がとられた。そして設計手法は、構造物の要求性能をまず規定して設計をおこな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。この設計法では、設計者が構造物の状態における性能を選択し照査することで、より合理的な構造を実現することが可能となる。

このような設計法の変遷は、材料や構造のもつ強度や荷重のばらつきを材料強度の安全率のみでまとめたわかりやすい許容応力度法が、安全係数を荷重側と耐力側に細かく分け、設計者がその意味を理解しなければならないという、より高度な設計法へ移行していったことを意味する。そして「より合理的な設計」は、構造の限界状態をより適格に把握することではじめて可能になると考えられている。

Einstein は” Theory should be as simple as possible, but not simpler” と物理の法則の哲学を説いた。限界状態設計法を単に単純化するのは妥当でないと考えるべきであろう。また、Breen は1999年の fib Symposium で、” Small minds and small rules stifle creativity” と、規準の在り方に警鐘を鳴らした。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存在しない時代から、魅力的かつ耐久性のある構造物をたくさん造ってきた。これは彼らの創造性の賜であり、現在の設計者たち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べきである。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。

ここでは、性能を照査するという消極的な設計体系から、設計自体が本来もつべき積極性を持たせた性能創造型設計法を提唱する。この設計法のコンセプトは、特に規準では包含しきれない性能や荷重、限界状態での構造物の設計をおこなうときに有効になる。そして、そのような状況ではまさに性能を創造しなければならず、創造性なしでは設計することができないのである。

3. 性能創造型設計のコンセプト

設計とは、設定された課題(subject)に関して、必要な諸条件を受感的(subjective)に把握し、目的物(object)としての構造物を合理性を持ってその形を具現化する行為である。性能創造型設計法はこの場合に、構造物の性能またはその構築の過程が創造的なものとなるように設計する方法である。構造物の性能には

種々のものが要求されるから、その全てに対し創造的な視点で性能を構築するのである。検討の結果が従来のもものと全く同じであっても、それが最良と判断されればそれでよい。しかしながら、個々の構造物を設計する場合の条件は千差万別であるから、多くの場合新しい発想が出てくるものと思われる。構造物は将来の人工環境を構成することとなるので、その構造物が建設されたあと、例えば10年後の状況を思い描き設計することが肝要である。

それでは「性能」とは何であろうか。それは、耐久性であったり、あるいは環境負荷最小、持続性、強度、コスト、LCC、軽量化、施工スピードなどもそうである。そして構造がどのようにして崩壊を免れるかということも性能として議論されることもあるであろう。つまり性能は材料、構造、環境、経済性などの各方面から規定される。

以上、提唱した性能創造は以下に示す三つのレベルを規定する。

- 1) 性能創造レベル1：規準の範囲内あるいは少し越えた範囲での性能を創造する。
- 2) 性能創造レベル2：規準を越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。
- 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、規準を越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、建設後のフォローアップ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疇を大きく越える設計の場合には、実験などによる検証が必要である。

4. ハイパフォーマンス構造コンクリート

構造コンクリートは1991年のIABSE (Stuttgart)でSchlaich, Breenらによって提唱された。その定義は次のようになっている。¹⁾

- 鉄筋コンクリートとプレストレストコンクリートを構造コンクリートという共通のアプローチで統合する。
- 技術者の目を構造的な挙動と力の流れに向け直す。
- 構造細目を改善するためにわかりやすく合理的なモデルを導入する。
- 鉄筋コンクリートとプレストレストコンクリートの規準や標準を首尾一貫したアプローチの規準に一本化することを促進する。

構造コンクリートは、厳格な品質管理と入念な施工技術が要求される。そして、その結果構築される構造物は高い耐久性をもつ。また、近年の様々な性能を持つ新しいコンクリート材料が開発される一方で、古典的な鉄筋コンクリート理論とプレストレストコンクリート理論は、クリープの取り扱い方やコンクリートの制限値など、設計的なアプローチに差がある。構造コンクリートの概念の中で鉄筋コンクリートとプレストレストコンクリートを統一したアプローチで設計するというものは、性能創造型設計法にとって非常に重要な基本概念になる。

近年利用が拡大している新しい材料に超高強度コンクリートがある。この材料は今までのセメント+砂+砂利というコンクリートの概念を大きく変えた。しかしこのハイパフォーマンスな材料は、はたして今までの規準の延長で設計していいのであろうか。材料を限界まで使うとき、非線形性を設計に活用することになる。しかし、このときもデータの信頼性や汎用性に十分気を付けなければならない。そして、高強度材料は従来のものに比べて脆性的になるが、プレストレスを導入し、鋼繊維で補強された構造の限界状態をどのように活用するのか、など高強度材料に対して性能照査の概念のみで対応するのは好ましくないと考えられる。超高強度コンクリートの出現は、まさに性能創造というコンセプトを必要とするのである。

近年超高強度コンクリートの構成則に関する研究が盛んである。²⁾このような新しい材料は従来のような規準のように画一的に規定するのではなく、限界状態の定義や試験方法など最低のものだけを規準化し、後

は設計者の創造性にゆだねるべきであろう。

図-1 に構造コンクリートの P- δ 曲線を示すが、今までのコンクリートには、線形で挙動するひび割れ発生までの状態、鋼材の降伏という状態、そしてコンクリートの圧壊という三つの大きなイベントがある。供用状態の最終状態が供用限界状態、それ以降は終局状態となり、その最終状態が終局限界状態になる。そして、新しい材料である超高強度コンクリート(UFC)は、外ケーブルとしてプレストレスを導入する場合もあるが、引張に抵抗するのは鉄筋ではなく鋼繊維である。したがってひび割れ発生後は明確な降伏点がないまま破壊にいたるので、それぞれの限界状態の定義が従来のコンクリートのように一義的に決まらない。したがって構造コンクリートとして統一された設計体系が必要になってくるのである。

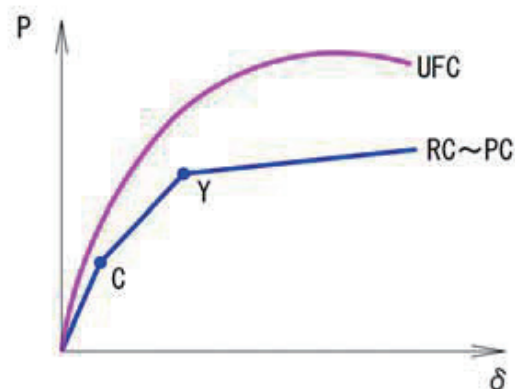


図-1 コンクリートのP- δ

近年、高強度化はコンクリートだけでなく PC 鋼材も従来のものより 30%程度強度の高い高強度な材料が紹介されている。³⁾ このようなトレンドはますます増え、これからは今までのように材料ありきで性能を決めるのではなく、材料や部材の好ましい性能を要求として提示し、それを満足するような材料を求めて構造物を造っていくことになるであろう。今以上に鋼とコンクリートの境がなくなり、「ハイブリッド」という概念が当然なものになっていくと思われる。高強度な材料は、今までの構造の部材を薄くしたり、鋼であったものをこれに置き換えるといったレベルではその価値を活かし切れているとは言い難く、発想を大きく転換させた創造性があるこそ初めて価値を発揮するものである。

5. 施工時における創造性

ここで橋梁施工時の設計の考え方について触れておく。技術が進歩したと言われる現在でも、架設中の事故はなくなる。今までの設計では、架設時は再現期間が短いと言うことで、安全率は低く設定されてきた。しかし、これから高強度な材料を使用するにしたがってこの思想は改められなければならない。つまり、架設荷重などをより正確に把握し、安全度を適切に決める必要がある。高強度になればなるほど、非理想状態に対する力学がセンシティブになるので、これについてはある程度のレッスンが必要であるが、耐力側の精度よいシミュレーションと境界条件（端部が固定かピンかなど）や荷重条件（等分布か不均等かなど）の変化に対するロバストネスと適切な安全率とを設定することが重要である。したがってすべての架設時の安全率を低くするという今までの思想は根本的に変わることになる。図-2 に示されるようにコスト最小はリスクが大きいのである。

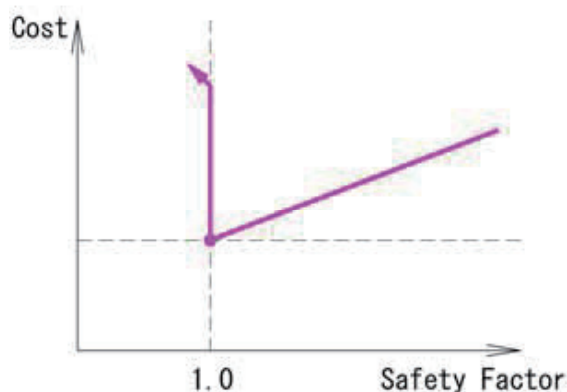


図-2 施工時安全度とコストの関係

6. 性能創造設計の事例

以上、性能創造型設計法の概念と超高強度コンクリートの必要性を述べた。ここでは、性能創造型設計といえる事例をいくつかあげる。

(1) 揖斐川橋，木曾川橋⁴⁾

支間長 270m を越える揖斐川（写真-1），木曾川河口にかかるこの橋は，杭長が 40m に達するために上部工重量を低減する必要性があった。そして，径間中央部 100m を鋼桁にして，コンクリート部を斜材で吊るエクストラード橋が採用された。主桁には圧縮強度が 60MPa のコンクリートを使用し，最大重量 400tf 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 0.6fpu 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，規準を越えた範囲での性能を創造した例であるといえる。



写真-1 揖斐川橋

(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島田によって”ripple web”として研究された。⁵⁾ その後フランスで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鈑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持って開発された。（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。



写真-2 ドール橋

(3) 桂島高架橋⁶⁾

桂島高架橋（写真-3）は，押出し時の反力を低減するためにコンクリート橋から波形鋼板ウェブ橋に変更された。そしてさらなる軽量化のために張出し床版を後施工とし，コア断面のみを押し出すことで，コンクリート橋に比べ押し出し時で 50%，完成時で 75%の軽量化を実現した。張出し床版はストラットで支持されており，床版の施工は PC 板を用いて省力化を図っている。また，押し出し時の反力に起因する波形鋼板のせん断変形によって下床版コンクリートに大きな応力が発生するため，精度の良い反力管理技術を用いて施工時の品質を確保している。そして，押し出し時の PC ケーブルの完成系への転用方法は全く新しい発想であった。設計，施工とも要求を満足するための解決策は，十分に性能創造的と言える。



写真-3 桂島高架橋

(4) 古川高架橋⁷⁾

制限重量 30t という日本の公道の制約条件下で，いかにセグメント個数を減らすかという施工上の要求を満たす解決策が，古川高架橋（写真-4）の U 型セグメントである。このセグメントには床版補剛のためのリブがついているというユニークな形状をしている。U 型断面で一度橋桁を自立させ，その後 PC 板を用いて床版を施工する。しかし，床版コンクリート打設時は，ねじり剛性の低い U 型断面にねじりモーメントが作

用する。FEM 解析により設計をおこなったが、それを検証するために実物大1径間モデルを用いて安全性を確認した。事例がないことは詳細な検討と実験によって確認するという、性能創造の基本がここにある。

(5) 青雲橋⁸⁾

青雲橋(写真-5)は深い谷にかかる支間長約100mの橋梁である。国立公園内の橋梁であることから施工中も含めて橋脚や支保工を設置することができず、また、従来のようにアーチ橋を架設する作業スペースも非常に狭い。この要求に対する解決は、吊構造を利用した架設をおこない、他碇式から完成後は自碇式に構造系を変換させることで、環境への負荷を最小にすることを実現した性能創造であって、2006年のfib優秀賞を受賞した。

(6) 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200MPaの新しい材料で、引張強度も8MPa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-6)に採用されており、羽田空港の滑走路拡張工事では大々的に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。

(7) Confederation Bridge

全長13kmのこの橋は、冬場は流氷に覆われるという特殊な環境下に建設された。重量7000tの桁を一括架設したという施工方法もさることながら、流氷による圧力が橋脚に作用するという設計条件も他には例を見ないのである。橋脚形状に流氷の圧力を逃がす工夫がなされているものの、一径間の崩落が橋全体の崩壊につながるような構造上の工夫がなされている。そして、完成後の維持管理は設計条件の確認も含めて入念におこなわれており¹⁰⁾、非常に高いレベルの設計、施工、維持管理を実現した性能創造の典型的な事例である。

7. まとめ

性能創造型設計法は、設計が本来もっている創造性を積極的に取り入れることを基本としている。そして、設計、施工の段階で完結するのではなく、維持管理を含めて耐久性の高い構造を提供することを意図した設計法である。この設計法は、近年の高強度な材料の出現を受けてますます重要になってくるとともに、構造コンクリートの考え方を取り入れることで統一された思想をもつことが可能になる。これからは、橋の供用時間を見据えた性能を創造する材料、構造、施工法が、既成の規準の枠に縛られることなく進化していく時代である。我々が二千年もつ橋を造るべきかどうかは別にして、橋の「エレガンス」とは、構造的なもの、機能的なもの、高耐久性が組合わさって初めて性能創造的であるといえる。



写真-4 古川高架橋



写真-5 青雲橋



写真-6 酒田みらい橋⁹⁾

日本の新幹線システムは、1995年の兵庫県南部地震での被害はあったが、開業以来約40年間無事故である。現在では5分に一回300km/時近い速度の車両が行き交うという、世界でも類を見ない過酷な条件下に構造物はさらされている。このシステムの安全性は、維持管理に膨大なエネルギーを費やしているからこそ保たれているといえるが、それでも十分な営業的利益が得られている。また、東名高速道路なども同じである。これらこそプロジェクトとしての性能創造型設計法の成果に該当するといえる。今回提唱する性能創造型設計法はまだコンセプトである。しかし、これからの規準のあるべき姿のひとつとして、(社)プレストレストコンクリート技術協会において規準化を進めているところである。

参考文献

- 1) Jorg Schlaich and John E. Breen, IABSE Colloquium Stuttgart 1991.
- 2) Constitutive modeling of high strength / high performance concrete, fib bulletin 42, 2008.
- 3) Maekawa, Ichiki and Niki, "Development of Ultra-high Strength Prestressing Strands, the 2nd fib Congress 2006.
- 4) Hirano, Ikeda, Kasuga and Komatsu, "Composite Extradosed Bridge", fib Symposium 1999, pp. 661-666.
- 5) Shimada, "Shear Test for Steel Ripple Web Girder", Journal of JSCE vol124, 1965, pp. 1-10. (Japanese).
- 6) Aoki, Nakamura, Morohashi and Kasuga, "Corrugated Steel Web Bridge with Ribs and Struts - Design and Construction of the Katsurajima Viaduct", the 2nd fib Congress 2006.
- 7) Ikeda, Ikeda, Mizuguchi, Muroda and Taira, "Design and Construction of Furukawa Viaduct", the 1st fib Congress 2002, Session 2, pp. 21-28.
- 8) Kasuga, Noritsune, Yamazaki and Kuwano, "Design and Construction of Composite Truss Bridge Using Suspension Structure", fib Symposium 2005, pp. 168-173.
- 9) Ikeda, Tanaka, Shimoyama and Kobayashi, "Innovative Design and Construction of a 50m Span Footbridge Using Reactive Powder Concrete", George C. Hoff Symposium on High Performance Concrete and Concrete for Marine Environment, May 2004, pp. 93-107.
- 10) J. Combault, "Concrete Bridges: New Demands and Solutions", fib Symposium 2008.