

性能設計に関するいくつかの考察

Design Side of Performance Based Design Method and Social Design System

杉本博之

Hiroyuki SUGIMOTO

工博 北海学園大学教授 工学部社会環境工学科 (〒064-0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目)

The design side of the performance-based design method is examined. Also the role of the third party facility in the current order-contract system is also examined. There are many kind of design method. They are performance-based design method, reliability based design method, limit state design method, seismic design method, load factor design method, and optimum design method. Former five design methods reveal only the analysis and check method, and they do not include the decision making function. Optimum design method is the only decision-making method. In performance-based design system, the role of the third party facility is large. Here, the several recent published reports on the order-contract system are studied, and it is found that in the current system the role of the third party becomes important. Finally, it is argued that what is important now is to adjust the specifications that include the whole structural analysis, check and design methods.

key words : performance-based design method, third party facility, decision making method, order-contract system

1. まえがき

性能設計の概念の国内への導入は、土木関係ではコンクリート工学分野が早く^{1) 2)}、その後、構造工学委員会、鋼構造委員会、日本鋼構造協会 (JSSC) 等々で検討され、多くの報告書、あるいは規準類が公開されている。最近では、それらを包括することを目的に「包括設計コード 第1版」³⁾ が発表された。

しかし、議論が進めば進むほど、“性能設計という概念”の実態があいまいになってきているという印象を筆者はもっている。当初の議論は、“国際的同等性”を強いインセンティブとして、信頼性理論の積極的な導入、耐震設計における性能マトリクス、あるいは種々のレベルの解析論が議論され、報告書にまとめられた。筆者はそのごく一部に関わった当事者でもあるが、これが性能設計だろうかという疑問は、陰に陽に持ち続け今日に至っている。コードに記述すればするほど、性能設計の主旨とは離れるのではないか。逆に、性能設計のためのガイドブック的なものを想定し、記述すべき内容を吟味してみると、概念的なことしか書けないのではないかという結論に達する。上記の「包括設計コード 第1版」は、包括コードという側面もあるが、実質的なページ数は20頁で、関連の報告書類の中では最も量的には少ない。

今振り返ってみると、必要だったのは性能設計のための規準類ではなく、仕様規程の拡充でなかったかという点を最後に触れる。

性能設計が話題になった当初から、筆者は性能設計は比較的自由的な設計法というイメージを持っていた。同時

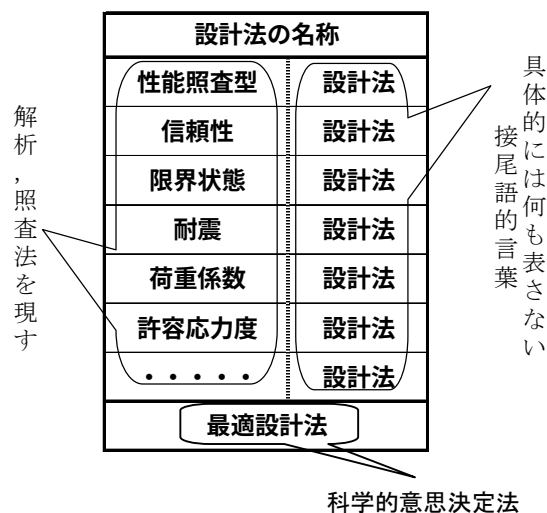
に気になったのは、規準によらない自由な設計の妥当性、安全性であった。JSSCの委員会で、たまたまその方面の役割分担になり、勉強の結果、「第三者機関」の存在を知り、結果をいくつか発表した⁴⁾。一方、設計から離れて設計、施工を含む発注・契約という内容を見ると、例えば発注者責任研究懇談会の報告書^{5) 6)}の中でも、第三者機関には言及されており、発注・契約体系はすでに性能設計型になっているのではないかと、という観点からも若干の考察を加える。

以上の前に、用語としてよく使われる「設計法」について、最適設計法の研究者として考察を加える。

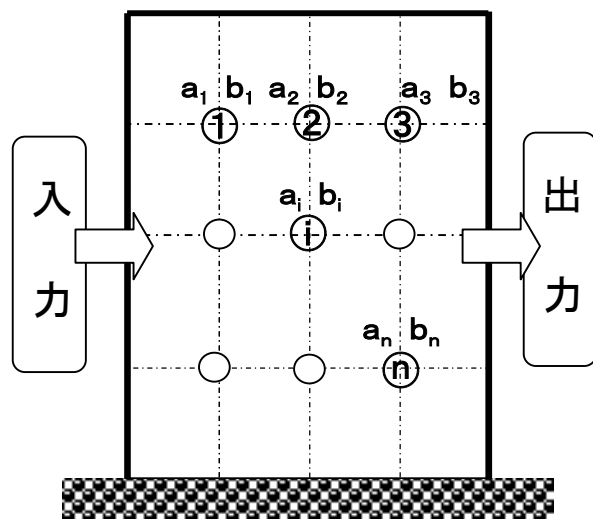
これらが、本文の主な内容である。

2. 「設計法」についての考察

工学の中で使われる用語として、「・・・設計法」というのは多数ある、土木関係でも、ここで取り上げている「性能照査型設計法」の他に、「信頼性設計法」、「限界状態設計法」、「耐震設計法」、「荷重係数設計法」、「許容応力度設計法」、「最適設計法」などがある。ここで、前6者の設計法と最後の最適設計法とがまったく異なる概念であるということは意外と正確に理解されていない。どれを用いてもそれなりの設計解が得られると考えられているのが一般のようである。しかし、これらはまったく異なる概念である。前6者の設計法は、解析、照査法を表す用語であり、これらによっては設計解は得られない。設計解を与える唯一の手法が「最適設計法」である。これらの関係を図-1に示した。



図－１ 各種設計法の分析



図－２ 少し複雑な設計問題のモデル

設計は、多くの意思決定の積み重ねであるから、そのための「設計(決定)法」と、決定のための参考データを与える「解析法」、「照査法」からなる。ところが、図に示すように、設計法に関わる従来の用語は、前２者（「解析法」と「照査法」）の区別を主な目的として用語が構成されている。従来、それで問題がなかったのは、設計法は“経験と勘によるパラメータ選択と許容設計の発見”しかなかったからである。だから、例えば信頼性設計法とは、解析手法が確率論的要素を含む構造解析法であり、照査法が破壊確率あるいはそれに関わる数値による照査を意味し、構造諸元の決定は、何らかの方法による決定としか表現できないものである。耐震設計法とは、静的あるいは動的構造解析による応答値を限界値に対して照査する方法であり、構造諸元の決定は何らかの方法による決定としか表現できないものである。上図に示したが、図に示すように「・・・設計法」とは、「・・・」に関わる部分に知識、知恵を入れ込んだ解析・照査法を表し、設計に関する部分は科学的とはいえないものという意味する。極端に言えば、解析・照査部分の精度が設計の段階で無に帰すこともありうるということである。図には最適設計法を「科学的設計法」と示してあるが、総ての工学分野で、日本の土木学会ほどこの分野の価値を軽んじている学会はないといっても過言でないであろう。

３．設計法

前節では、「・・・設計法」とは、「・・・」に関わる部分に知識、知恵を入れ込んだ解析・照査法を表すと説明した。これらの解析・照査法が我々に与えるのは、あくまでも設計空間であり、設計解ではない。設計空間には無数の設計解が含まれており、その中から一つを選択するためには、設計の価値を評価する関数(目的関数)と手法が必要である。上で説明した「・・・設計法」の設計法の部分は何を表すかという、適当に設計解を選択して解析と照査を行い、その設計解が照査条件を満足

しているかどうかを検討する。これを数回繰り返して設計者が最も良いと判断する設計解を採用する。この時、設計空間の広がり意識されないし、選択した設計解の最適性は検討されない。

これで、どこに問題がある？という質問がされることがある。上記の設計法で試みる設計は、過去の経験の積み重ねの結果きわめて妥当なものであるし、その上でいくつかの設計の比較は行い最も良いものを選択している。これで十分ではないか。

これはこれで精密に議論をすれば、用いられている手法が非科学的であることは説明できる。しかし、従来顕著な問題が生じていない設計問題に厳密な最適性の議論をする必要はあまりない。しかし、例えば以下のような問題ではどうであろうか？

少し複雑な設計問題として、図－２に示す構造システムの例を説明する。図は概念図であるが、一般的な補強あるいは耐震補強等においてはよく見られる問題をモデル化したものである。このシステムにおいては、図に示されるように、入力に対して出力があり、それは時刻歴応答解析法などにより計算される。ところが、示方書類の見直しで入力系が変わり、現状のシステムでは、新しい入力系に対して対応しきれない(耐震性能を満足しない)ので、①～⑩に装置(減衰装置など)を設置して対応することを考える。装置 i の機能は、パラメータ a_i と b_i で決定される。要求が出力値をある値以内に抑えることのみであれば、試行錯誤的な方法でも、応答を許容値以内に抑えるパラメータの設定は可能である。もちろん、これはこれ自身かなり難しい。しかし、さらに、装置は高額であり、同程度の性能が得られるのなら、設置箇所は少ない方が良く、という要求がついた場合はどうであろうか？考慮すべき組合せ数が一挙に膨大な数になる。つまり、装置の組合せの数だけでも 2^n になり、さらにそれぞれの装置のパラメータ a_i , b_i を決める必要がある。

この問題を整理して記述すれば以下ようになる。

- 目的関数：設置費，装置費を含む総コスト最小
- 制約条件：耐震性能を満足する
- 設計変数：装置を設置する箇所と各パラメータの値

この場合，いくつかの装置をはずし，試行錯誤的な方法で得られた解の妥当性は，どのように説明されか？従来の“耐震設計法”といわれる設計法の枠組みの中では，設計解を与えることができないのは明らかである．科学的な設計法によらない限り，経済性の説明は出来ないと思われる．さらに，試行錯誤的な決定法では，耐震性能さえも十分に補償されているとはいえない．つまり，解析・照査により試行錯誤的に選択した設計解が耐震性能を満足していることは示される．しかし，設計空間の中でどの程度余裕があるか，あるいは設計解に対してどの程度の感度を持っているかは知る由がない．これでどうして安全性を保証できるのか．この議論は，「・・・設計法」といわれる設計法に総て指摘されることであり，性能設計の導入以前から最適設計に関わる研究者が訴えて来たことである．⁷⁾

なお，上記と同種の問題が設定され解かれている．⁸⁾

性能設計においては，まず要求性能が示される．要求性能とは，構造物がその目的を達するために保有が必要な性能を一般的な言葉で表したものと定義される．その要求性能は適切な手法で照査が可能のように具体的に記述される．適切な手法で照査が可能とは，許容応力度のように限界値を明確に数量化することがイメージされる．しかし，最適化手法の知識があれば，総ての条件を不等号の形で表現する必要はなく，限界値はあいまいのまま定式化は可能である．つまり，要求性能は，「制約条件型」と「努力目標型」⁴⁾のどちらかの形で定式化されれば良い．例えば，“できるだけ騒音が少ない”とか，“できるだけ振動が小さい”という類の要求性能は，「努力目標型」の制約条件として以下の多目的最適化問題としての定式化の中に組み込むことができる．

- 目的関数：
$$\{F(\{X\})\} = \{f_1(\{X\}), f_2(\{X\}), \dots, f_r(\{X\})\} \rightarrow \min \quad (1)$$
- 制約条件：
$$g_j(\{X\}) \leq 0 \quad (j=1 \sim m) \quad (2)$$
- 設計変数：
$$\{X\} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\} \quad (3)$$

ここで，「努力目標型」の要求性能は，式(1)の中に，“できるだけ騒音が少ない”あるいは“できるだけ振動が小さい”という目的関数として含まれ，トレードオフにより最終的な値が決められることになる．

ライフサイクルコスト(LCC)という概念は，性能設計においても考慮すべき重要な項目である．橋梁の維持管理においても，LCC最小化は重要な課題の一つと考え

られる．しかし，LCC最小化の結果は管理者側が受け入れることができない場合があるという議論があり，この種の問題に最適化手法を応用することに疑問が投げかけられることがある．これは，最適設計法に対する理解不足による誤解であると考えられる．確かに維持管理の問題は，管理者側の財政事情により，初期の予算が十分でない場合，毎年の予算が十分でない場合，あるいは，一部の橋梁の劣化が極端に進んでいる場合など多様な局面が予想される．しかしこれらは，最適化問題の定式化の中に含めることは可能であり，それぞれに応じたより良い設計解を与えることができるものである．

4. 第三者機関

ISO方式とは，“国際的に統一された方式による民間の第三者検査体制”を意味する⁹⁾ので，性能設計のことを考えるときは，「第三者機関」は重要なキーワードになる．

まえがきにも触れたが，性能設計という概念が国内に導入されたとき，比較的自由的な設計法というイメージがあったせいもあり，筆者が最初に考えたことは，『提出された設計が，あるいは一連の施工手順が，あるいは完成された構造物が，あるいは構造物の設計供用期間中の維持管理体制が，要求性能を達成しているかどうかの「検査」，「照査」は誰が行うか？』という点であった．答えは，官でもなく，民でもなくて「第三者機関」であった．

ISOの定義によれば，第三者(third party)とは，「当該問題に関して，当事者と無関係であると認められる人または組織体．」と定義される．

ここで，当事者は，供給者(第一者，first party)および購入者(第二者，second party)である．また，この第三者検査機関が行う認証と認定の関係は以下になる⁹⁾．認定が最高の行為であり，認定された諸機関(第三者機関)とその要員によって認証が達成されて，第三者機関は適合の活動を客観的に評価し，証明書を出して認証し，認証された状態が継続されていることを監視する．

公共事業においては，国民が間接的な第一者であり，国民から権限を委託されている「官」が直接の第一者となる．第二者は，前記のように，設計，施工の当事者としての「民」が該当する．この「官」と「民」の他に，第三者検査を実施する民間の第三者機関がなければならないことになる．

性能設計に関する報告書の中で，第三者機関について言及しているものは少ない．その中で，土木学会鋼構造委員会鋼構造物の性能照査型設計法に関する調査特別小委員会は，2003年4月に報告書「鋼構造物の性能照査型設計体系の構築に向けて」¹⁰⁾を発表した．その中で，

“A編：性能照査型設計体系導入への社会機構上の問題
1.性能照査型設計体系導入への課題 1.8 性能照査型設計に適合した社会機構体系の例として”の中で図-3に引用した概念図を示し，“認定機関”という機関を提

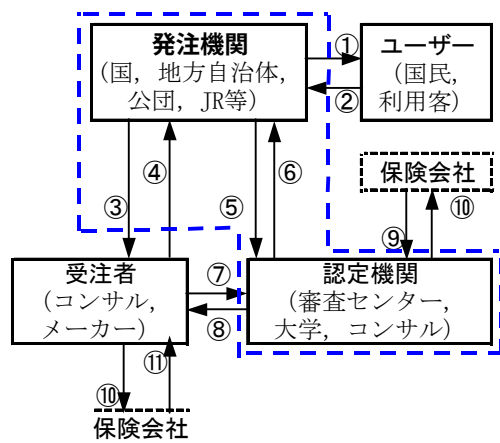


図-3 性能照査型設計に適合した社会機構体系の例 (概念) (文献10)より引用)

案している。この“認定機関”は、必ずしも第三者であることが明記されていないが、発注機関、あるいは受注機関それぞれにおいて、外部の機関に技術の認定を求めている点、およびそれぞれにおいて“保険会社”との関わりを示している点は注目される。

矢印についている数字の内容は以下である。

- ① 説明責任：事業の目的、国民の需要、要求性能、ライフサイクルコストを前提とした費用便益分析などの情報公開
- ② 費用分担、事業情報の開示要求
- ③ 目標性能の明示：VE制度、総合評価制度、機能回復措置（保険制度）
- ④ みなし仕様、または目標性能の達成技術の提案：VE提案
- ⑤ 設計審査、施工検査の代行の依頼
- ⑥ 認定技術の提示
- ⑦ 新技術の審査：要求性能の妥当性の確認
- ⑧ 新技術の認定：新技術の審査、認定
- ⑨ リスクの評価
- ⑩ リスクの分散（保険により発注機関や受注者が自らのリスクを分散させる場合もある）

次に、現在いろいろな角度から再検討されてきている入札・契約方式の中での第三者機関の役割について検討を加える。

5. 入札契約方式と性能設計

設計コードの議論とは別に、現在、発注・契約に関する議論が活発になされている。これらの中には「第三者機関」の利用について積極的な動きがある。前節で説明した性能設計の体系の中での第三者とは若干ニュアンスが違いますが、重要な点と思われるので、いくつかの具体的な事例の紹介の中で説明する。

(1) 公共工事の品質確保の促進に関する法律

平成17年3月30日、国会で「公共工事の品質確保の

促進に関する法律」が成立した。この法律の目的を第1条から引用すると以下になる。

この法律は、公共工事の品質確保が、良質な社会資本の整備を通じて、豊かな国民生活の実現およびその安全の確保、環境の保全（良好な環境の創出を含む）、自立的で個性豊かな地域社会の形成などに寄与するものであるとともに、現在および将来の世代にわたる国民の利益であることにかんがみ、公共工事の品質確保に関し、基本理念を定め、国などの責務を明らかにするとともに、公共工事の品質確保の促進に関する基本的事項を定めることにより、公共工事の品質確保の促進を図り、もって国民の福祉の向上および国民経済の健全な発展に寄与することを目的とすること。（第一条関係）

この法律のポイントとしては、①公共工事の品質確保に関する基本理念および発注者の責務の明確化、②「価格競争」から「価格と品質で総合的に優れた調達」への転換、および③発注者をサポートする仕組みの明確化、があげられる。技術提案を積極的に求め、発注者側には、発注関係事務を適正に行うことができる知識と経験を有する職員の配置を求めている。

この法律で注目されるのは、法律と同時に附帯決議がなされその中に第三者について言及している点である。附帯決議は11項目よりなるが、その第2項に、

- 二 公共工事の入札および契約の過程などに関して学識経験者などの第三者の意見を適切に反映する方策を講じるとともに、当事者の苦情に適切に対応するため、法的整備を含む検討を行うこと。

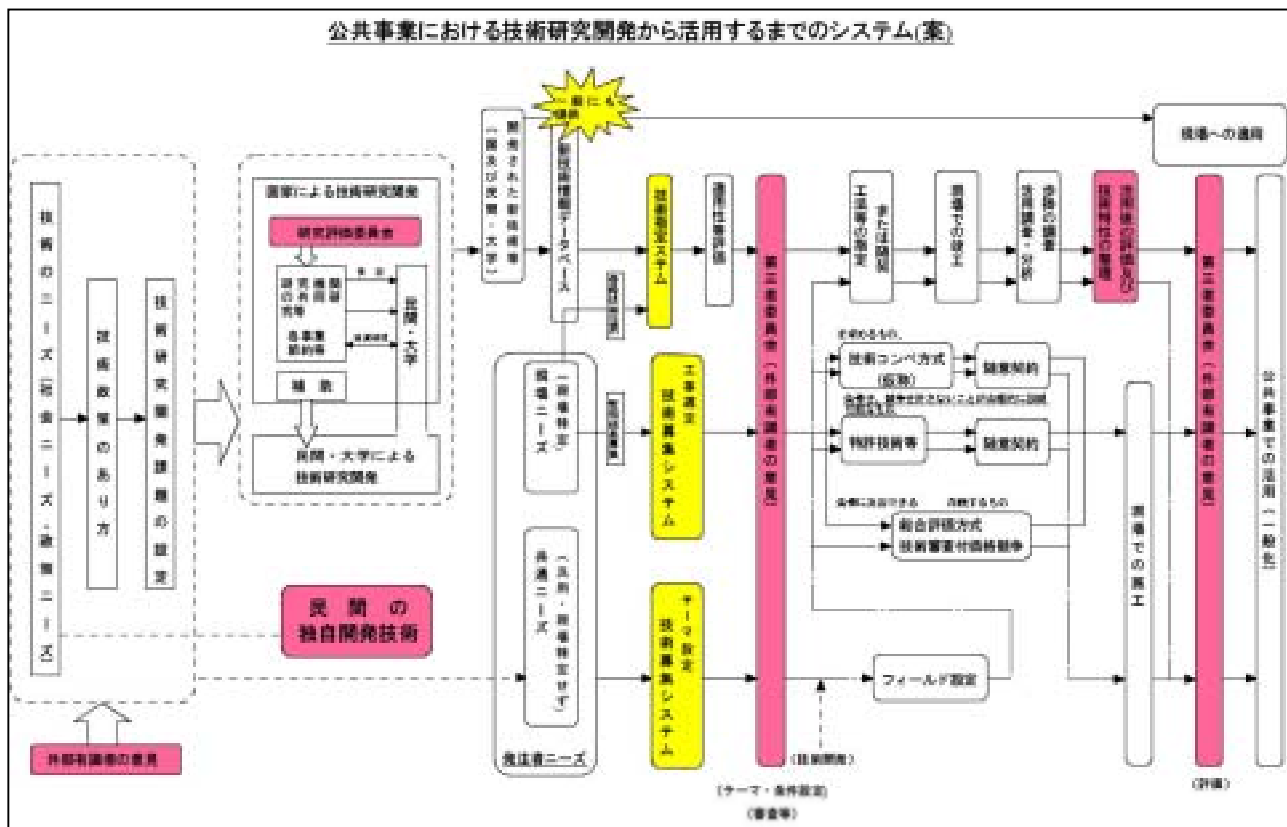
これは、上記の“発注者をサポートする仕組み”を補完する内容で、技術提案の審査などで外部の第三者機関の活用を積極的に求めているものと考えられる。

(2) 総合評価落札方式

現在（2005年10月）国土交通省のホームページを開くと、「国土交通省が進める新しい落札方式 総合評価落札方式 技術とノウハウを活かした公共工事を目指して」という形でメリットなどが説明されている。

その中に提案募集から落札までの実施手順が記述されている。ポイントとともに転記すると以下になる。

- ① 評価落札方式の適用を決定 (a)
評価項目の選定 ⇒ 評価基準の設定 (b)
- ② 評価方法の決定
技術提案募集の内容の決定 ⇒ 入札公告等の内容決定
- ③ 公告などの実施
- ④ 技術提案の事前審査
- ⑤ 入札の実施
- ⑥ 総合評価による判定
提案内容の評価と総合評価の実施
- ⑦ 落札者の決定 (c)・契約
契約内容の履行の確認 ⇒ 履行の検証とペナルティ



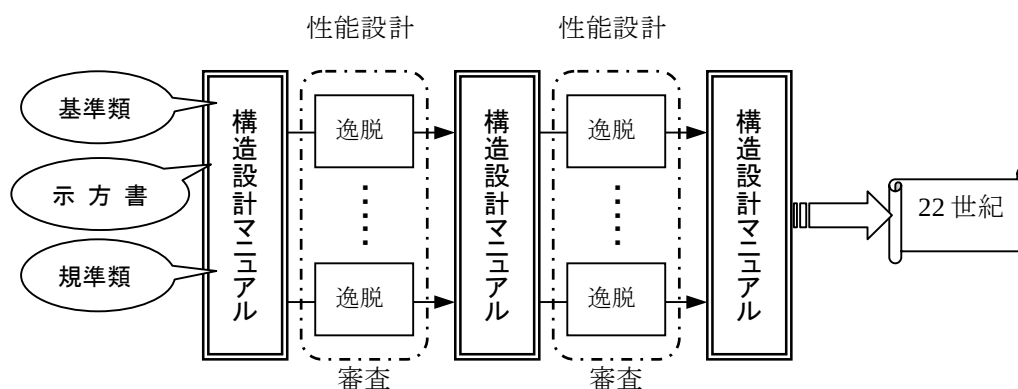


図-5 性能設計、審査体制と構造設計マニュアル

が仕様規定的なものであると、自由な発想による新技術の開発やその導入の妨げともなりかねず、より柔軟な対応が可能でさらには技術開発の促進が図られるような基準が待望された。¹¹⁾この考え方に異を唱えるものではないが、“自由な発想”を補償する技術基準は、当然構造解析、照査、設計法の詳細に言及することはできず、基本的な枠組み、システムの記述にとどまらざるを得ないのではないか。これを後世に残すことで技術の継承はできるのであろうか。

性能設計に関する多くの報告書では、照査法は従来の仕様規定型と性能設計型の2種類の選択が示される。しかし、2者択一なのだろうか。基本的に従来の設計施工法に従いながら、部分的に新しい試みを取り入れたいというのが実際は多いと思われるが、このような中間的な設計、施工法の位置づけはどうなるのだろうか。もしこれがあるとすれば、現在の技術レベルを集大成する設計マニュアル的なものこそが今必要なものであり、これこそ後世に残すべき“もの”ではないだろうか。

英国道路庁の設計認証システムが最近報告された。¹²⁾これによると、全15巻に及ぶ「道路及び橋梁にかかわる技術基準類(Design Manual for Roads and Bridges; DMRB)」があり、これから外れるものは“逸脱(Departure)”として別に審査され、取り入れられるという。

現在の構造設計、施工にかかわる技術を集大成し、それから逸脱する技術が提案されれば(性能設計)それを審査し、定期的に設計マニュアルの書き換えをする。そのようにすれば、性能設計の考え方と、第三者評価機関の機能を取り入れながら、22世紀に優れた技術の継承が可能になるとと思われる(図-5)。

7. あとがき

一般に「・・・設計法」といわれている手法の設計に関わる部分を説明した。設計法的には多く問題を含んでいると指摘したが、これは決してこれらの解析、照査法の意味を否定するものではまったくない。解析、照査法と設計法それぞれのバランスの取れた発達と科学的な融合によってしか、良い設計は生まれない、が筆者の主張

であるからである。

最近の入札契約方式の議論を検討し、すでに性能照査型になっている実態を紹介した。

最近10年の性能設計の流れを見て、22世紀への技術の継承に不安を持ち、現在の構造設計に関わる総ての技術を体系付けて残すことを提案した。この設計マニュアルにおいては、社会基盤施設に関わる、荷重論、材料論、解析法、照査法、施工法、補強法、維持管理法、設計法の総てが網羅され、これによらない場合は「逸脱」として審査を経て適用可能とし、定期的に設計マニュアルに反映させ、後世に継承する。“性能設計”が議論の中心である現在の流れには逆行する考え方かもしれないが、22世紀に何を残すか、という疑問から生まれた考えである。

今後の議論のきっかけになれば幸いである。

参考文献

- 1) 岡村甫：性能照査型基準について－耐震設計－，コンクリート工学，Vol.35，No.11，pp.6-7，1997。
- 2) 堺孝司：性能照査型設計法の行方，橋梁と基礎，97-8，pp.73-83，1997。
- 3) 日下部治：包括設計コード，包括設計コード策定基礎調査委員会，2005。6。
- 4) 宇佐美勤編著：土木鋼構造物の性能設計ガイドライン，日本鋼構造協会，(関連部分は pp.94-112)，2001.10。
- 5) 発注者責任研究懇談会：発注者責任を果たすための具体的施策のあり方 第一次取りまとめ，1999。
- 6) 発注者責任研究懇談会：発注者責任を果たすための具体的施策のあり方 第二次取りまとめ，2001。
- 7) 倉西茂 編著：鋼構造シリーズ 6 鋼構造物の終局強度と設計，土木学会鋼構造委員会終局強度研究小委員会，(関連部分は，pp. 321-329)，1994，7。
- 8) 井上幸一，杉本博之，森下邦宏，山本利弘，古川浩平：ケーブルへの質量付加による斜張橋主塔の大地震対策に関する研究，土木学会論文集 No. 703/I-59，pp. 29-38，2002。
- 9) 石谷清幹：第三者検査機構の意義と我が国の動向前編－認証の基本概念と発端－，日本船用機械学会誌，第32巻，第7号，pp. 463-466，1997。
- 10) 市川篤司 編著：鋼構造物の性能照査型設計体系の構築に向けて，土木学会鋼構造委員会，2003。
- 11) 玉越隆史：道路橋示方書の改訂について(鋼橋編)，JSSC，No. 44，2002。
- 12) 福井次郎，松井謙二，白戸真大，井上雅夫：英国道路庁における設計認証システム，橋梁と基礎，2004-9，pp.35-42，2004。