

性能照査型設計の現状と課題

丸山 久一*

1. はじめに

19世紀中頃に鉄筋コンクリートが開発されて140年が経過している。初期の100年ほどの歴史を参考文献1)をもとに表-1にまとめてみた。当初、鉄筋とコンクリートとの力の伝達メカニズムは必ずしも明らかではなかったが、種々の構造物に適用されはじめた。アーチのような構造として用いられているときはあまり問題とならなかったが、梁構造については、当初からコンクリートのひび割れやたわみは問題になっていた。1880年代後半において、すでに、鉄筋をあらかじめ引張して用いる手法が開発されていたが、鉄筋では引張強度が十分でなく、コンクリートのクリープや乾燥収縮によりその効果がすぐなくなる結果となった。本格的なプレストレストコンクリートの開発は、1920年代後半の高張力鋼の開発・利用を待たねばならなかった¹⁾。

鉄筋コンクリート構造として、耐力に関して理論的な説明が進んだのは、19世紀末から20世紀初頭にかけてである。曲げ耐力のみならず、スターラップの役割をトラスモデルで表現する手法も開発されている。種々の実験を基に理論的な検討を加え、設計手法として確立するのが欧米では1910年代から1920年代にかけてである。当時でも、日本は欧米の技術導入に積極的で、数年の遅れもなく鉄筋コンクリートの設計施工手法を取り入れている。ただし、欧米では多額の費用をかけて実験を行い、その成果を基に示方書等を定めていたのに対し、日本では、すでに開発されている欧米の示方書類を比較検討し、日本の状況に合うような基準としていたようである。

驚くべきことは、20世紀初頭に制定された鉄筋コンクリート構造物の設計法の基本的骨格が、その後70～80年にわたって変わらなかったことである。100年前に、すでに鉄筋コンクリートの基本は解明されていたともいえる。設計法に急激な変化が生じたのは、図-1に示すように、ここ20年である。その背景には、種々の技術の蓄積がある段階を超えたことと、数値解析技術の大幅な進歩がある。

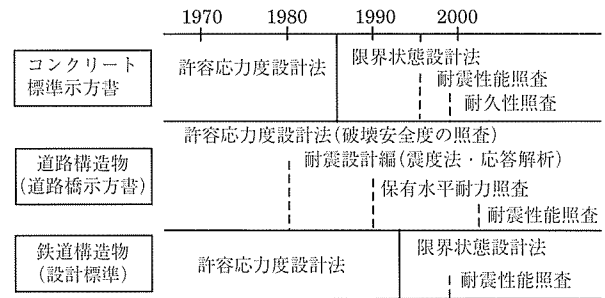


図-1 設計基準の変遷

2. 設計と性能照査

性能照査型設計の内容を解説するのが本論のテーマであるが、設計と性能照査という用語について、筆者が考えている内容を図-2に示す。一般に、構造物を建造するには、計画、設計、施工というプロセスを踏む。設計は、計画と施工の間の行為すべてを示すと考える。たとえば、河川を渡る橋梁の建設を計画し、種々の検討からPCの形式に決まるとする。そこで、どのような形態のPC構造にするのか(外ケーブル、プレキャスト、スパン割り等)、断面形状・寸法(I形やT形断面、あるいは箱断面)や配筋をどうするか、さらには、どのような材料を用いて、どのような施工方法で行うのか等を決めてゆかねばならない。これらの決め方については、一意的なものではなく、具体的な事項は設計者の独自性に任される。ただし、決められたものが所定の要求(性能)を満たしていることが条件で、条件が満たされていることを確認する行為を、ここではとくに性能照査とよぶ。性能照査は、勿論、設計の中に含まれる。所定の性能がすべて満たされていると確認できると、施工に移る。

こう説明すると、今まで行ってきた許容応力度設計法も同じプロセスではないか、どこが違うのかといわれるかも

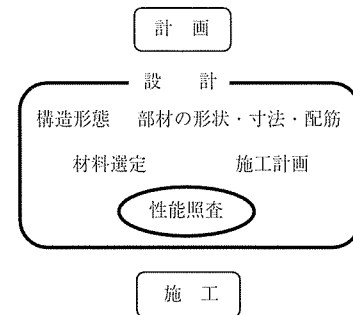


図-2 設計と照査



* Kyuichi MARUYAMA
長岡技術科学大学 副学長

知れない。許容応力度設計法においては、応力を照査しているのではないかと。さらに、表 - 1 でも分かるように、許容応力度設計法には 80 ~ 90 年に渡る歴史があり、当時の設計法で建造された構造物で、今日でも供用しているものもある。どこに問題があるのかと。

そこで、改めて設計とは何か、構造物はどう建造するか(してきたか)を振り返ってみる。表 - 1 に見るように、鉄筋コンクリートが開発された頃、あるいはそれを用いて構造物を建造し始めた頃は、とくに設計法もなく、試行錯誤で、あるいは実験を行いながら新しい構造物を建造していた。実験で確認できた範囲については、性能を照査していたことになるし、実構造物が初期の目的どおりに供用されているのであれば、結果として性能が確認されている。ただ、初期には鉄筋コンクリート構造はなかなか普及しなかったようである。それは、建造できるのがごく一部の人のみに限られること、また、つねに必要な性能を満たしていたわけでもなかったこと等が原因であった。そこで、鉄筋コンクリート構造の挙動を把握する科学的、理論的な研究が進められた。

そもそも、物を造るという工学においては、造る技術が先で、理論はその後から確立されるものである。構造物を設計し建造することは、技術的な問題がすべて解明された後に実施されてきたわけではない。未知な部分を多く残しながらも、ある程度の安全性を確保しながら、当時の特殊専門技術者の技術によって新しい構造物が具現化していた。これを概念的に示すと図 - 3 のようになる。数多くの経験と、科学的に整理された既知情報(色の濃い部分)に基づき、確かな部分ではより絞った安全係数を、また、不確かな部分ではより大きな安全係数を用いて、設計・建造を行ってきている。経験の集大成は構造細目にまとめられる。技術の進歩という観点からは、既知の情報を増やすとともに、科学的に処理できる部分を増やし、全体として合理的な設計を目指すべきである。

この、合理的な設計を目指すものとして、性能照査型設計法が位置付けられる。許容応力度設計法等の従来の設計法とどこが違うかを明らかにするために、性能照査の原則を表 - 2 に示す。性能照査を行うには、4 つの段階を踏む必要がある。第一段階は、何が要求される性能であることを明示することである。要求性能は、通常、構造物に対するも

表 - 1 コンクリート構造に関する歴史年表¹⁾

1842年	(仏) Joseph Aspdin	ポルトランドセメントの特許取得
1850年	(仏) J.L. Lambot	厚さ 36 mm の鉄網入り小船を建造、1855 年パリ博覧会に出品
1867年	(仏) Joseph Monier	鉄網を芯とした薄いセメントモルタルで植木鉢を製造
1875年	(米) W.E. Ward,	RC 建築物の設計
1884年頃	(独) G.A. Wayss,	破壊実験により、RC 構造の優秀性を確認 E.M. Koenen, 実験結果に基づく RC の耐力算定式の提案
1886年	(米) P.H. Jackson,	1888 年: (独) Doring がひび割れ防止のため、鋼材を緊張してスラブやはりに適用、特許
1887年	(独) J. Bauschinger,	モニエ版を水中に設置し、1892 年に取り出して、鉄筋が錆びていないことを確認。RC 版の耐久性を確認 この頃から、RC 部材の強度試験および解析が盛んに実施される。
1892年	(仏) Hennebique,	スターラップ筋および主筋の折り曲げによるせん断補強筋の開発
1892年	(オーストリア) Melan,	メラン式 RC 橋梁の発明。メラン式アーチ橋(スパン 51 m)
1893年	(独) Möller,	ミューレル式橋梁 スパン 22.5 ~ 25.8 m
1893年	(米) Ransom,	角鉄棒を挿した鉄筋の開発、特許 米国では、メラン式 RC 橋梁が普及
1898年	(仏) Considere,	鉄筋コンクリートの理論的、実験的研究の発表
1901年	(独) Ritter-Morsch,	せん断補強鋼材に関するトラス理論の開発
1903年	(スイス)	鉄筋コンクリート示方書制定
1904年	(独) ベルリン官庁では、	RC の一般計算法を制定
1915年	(独) 鉄筋コンクリート示方書制定。	1925 年から DIN を制定
1924年	(米) コンクリートおよび鉄筋コンクリート標準示方書制定	
1928年	(仏) E. Freyssinet,	高強度鋼材による有効プレストレスを検討 実用化への道
1934年	(独) F. Dischinger,	付着のない PC 構造の開発。断面の外側に PC 鋼材を配置
(日本)		
1903年(明治 36 年)	広井 勇,	鉄筋混凝土橋梁の論説・曲げ理論
1909年(明治 42 年)	大河戸宗治(鉄道院),	鉄筋コンクリート設計施工示方書案作成
1914年(大正 3 年)	鉄道省,	鉄筋混凝土橋梁設計心得・・・許容応力度設計法
1931年(昭和 6 年)	土木学会,	鉄筋コンクリート標準示方書制定
1939年(昭和 14 年)	吉田宏彦,	鋼弦コンクリートの紹介
1941年(昭和 16 年)	鉄道省,	鋼弦コンクリート委員会の設置。仁杉巖らによる研究開始
1949年(昭和 24 年)	猪俣俊司らによる	PC まくら木の製造研究
1952年(昭和 27 年)		日本最初の PC 道路橋、長生橋(スパン 3.4 m)
1953年(昭和 28 年)		日本最初の PC 鉄道橋、大阪駅構内(スパン 5 m)
1955年(昭和 30 年)	土木学会,	プレストレストコンクリート設計施工指針制定

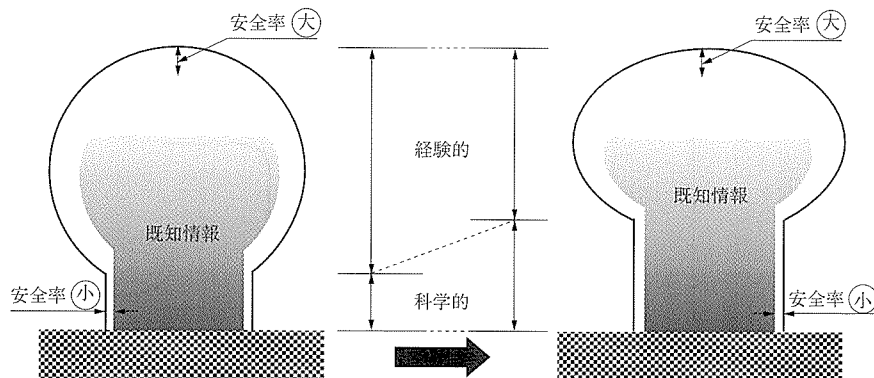


図 - 3 設計手法の進歩

表-2 性能照査の原則

1. 要求性能	・ ・ ・ ・ ・ 構造物, 一般的表現
2. 照査指標	・ ・ ・ ・ ・ 要求性能の工学的表現
3. 限界状態の設定	
4. 照査手法の選択	・ ・ ・ ・ 科学的, 工学的, 経験的

のであって、一般的な表現となる。たとえば

100年間、快適に使用でき、かつ、突発的な事象が生じても短時間で再使用が可能で、地域のモニュメントとなるPC道路橋

このままでは、具体的な照査ができないので、この要求と等価となる定量的な指標を設定するのが第二段階である。そこで、この表現を技術的な性能と対応させてみると以下のように考えられる。

年100年間 ・ ・ ・ ・ ・ 耐久性性能
 快適に使用 ・ ・ ・ ・ ・ 使用性能
 短時間で再使用 ・ ・ ・ 安全性能, 耐震性能
 モニュメント ・ ・ ・ ・ 景観
 その他 ・ ・ ・ ・ ・ 施工性能

さらに、それらに対応するより具体的な指標を定める。

耐久性性能 ・ ・ ・ ・ ・ 塩害, 中性化, 凍害, アルカリ骨材反応, 化学的腐食等
 使用性能 ・ ・ ・ ・ ・ ひび割れ, 変位・変形, 振動, 騒音等
 安全性能 ・ ・ ・ ・ ・ 転倒, 滑動, 沈下, 曲げ耐力, せん断耐力, ねじり耐力, 疲労等
 景 観 ・ ・ ・ ・ ・
 施工性能 ・ ・ ・ ・ ・ 工期, 安全性, 作業性, 運搬時間, ポンプ圧送性, その他

上記の指標の中でも、とくに耐久性性能や景観においては、まだ定量的に定められない項目も数多くある。それらについては、等価な代替指標を導入する。たとえば、塩害についていうなら、鉄筋の発錆（あるいは鉄筋位置での塩化物イオンの濃度）を指標としてよい。

第三段階として必要なことは、指標で示される定量的な値をどこまで許容するかである。一般には、種々の限界状態に対応する値が選ばれる。たとえば、PC橋梁について考えると、使用時の荷重に対しては引張応力を発生させない（デコンプレッションの限界状態）とか、レベル1地震動においては部材降伏をさせず（部材降伏の限界状態）、レベル2地震動においては最大変位および残留変位を所定の値以内に収める（最大変位および残留変位の限界状態）。塩害環境下での建設が予定されているならば、100年後での鋼材位置の浸透塩化物イオン量を 1.2 kg/m^3 （限界塩化物イオン量）とする等である。

第四の段階は、どの照査方法を選ぶかであるが、これは第二段階で設定する照査指標と大きく関係する。科学的で信頼性の高い照査方法が開発されると、要求性能を確保するための照査指標もより確度の高いものを選ぶことが可能となる。構造物の弾性域での挙動を照査する目的では、応力を照査指標とすることも可能であるが、レベル2地震動を受けた場合の挙動の照査では、変位・変形（およびその

履歴）を照査する以外にない。逆にいえば、変位・変形を的確に評価できる手法がなければ、その照査はできないことになる。

照査方法について付言すると、実物を実際の環境下で確認するのがもっとも信頼性の高い照査方法である。ただし、力学的な性能を確認するためには、非常に大きな载荷試験装置が必要となり、耐久性能を確認するには、数十年～100年の時間が必要となり、現実性が非常に低い。さらに、それらのデータは当該地点の構造物にしか適用できないことが多く、そのままでは必ずしも普遍性があるとはいえない。その意味では、実物でのデータを生かしながら、普遍性のある科学的手法を開発してゆく必要がある。

この項の締めくくりとして、許容応力度設計法は性能照査になっているかについて筆者の考えを述べる。許容応力度設計法で用いている照査技術は弾性解析である。したがって、弾性域での挙動に関する照査は、応力を指標として行っているとみなせる。それ以外の部分については、経験的知見に基づいて処理している。過大な安全性を付与している箇所もあるし、考慮不足の箇所もある。図-3でいえば、左側の状態で、現在の技術レベルでは、右側の状態となっている。

3. コンクリート標準示方書

土木学会コンクリート標準示方書は、1931年（昭和6年）に制定されて以来、50年以上に渡って許容応力度設計法を採用してきた。その間、十数年の準備期間を経て、1986年（昭和61年）に限界状態設計法を採用した³⁾。その後もほぼ5年毎に改訂を行って現在に至っている。改訂においては、5年間の技術の進歩を、主として照査技術に反映させている。

限界状態設計法は、種々の荷重状態に対応して、限界状態を設定し、構造物の挙動を検討するものである。要求性能をどう設定するかさえ決めれば、そのまま性能照査型設計法となる。したがって、2002年制定版からは「設計編」の名称を「構造性能照査編」とした⁷⁾。内容に関しては、従来の力学的性能の評価手法をさらに充実させたものとなっている。たとえば、耐久性と関連する事項で、ひび割れ幅の算定式をより適用範囲を広げ、精度を高めている。また、隅角部の設計手法として、新たにストラットタイモデルを取り上げた。

耐震設計に関しては、平成8年版（1996年）において、従来の設計編から「耐震設計編」として独立させ、内容を一新して、耐震性能を照査するものとした^{4) 5)}。2002年制定版では、具体的な照査技術をより詳細に記述するとともに、編の名称も「耐震性能照査編」とした⁸⁾。耐震性能において特徴的なのは、部材の力学的特性（復元力特性）が応答にも関係することである。そのために、構造物のモデル化が特に重要である。2002年版では、従来の骨組みモデルに加えて、有限要素モデルについても詳しく記述してある（図-4）。

図-5に耐震性能照査の基本的流れを示す。ここで、耐震性能を構造性能とし、入力地震動を単に入力あるいは荷

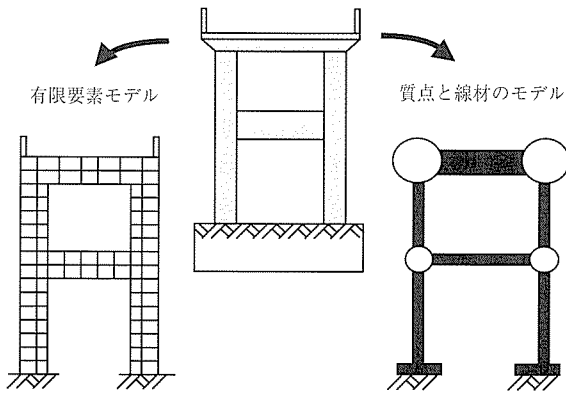


図 - 4 構造物のモデル化

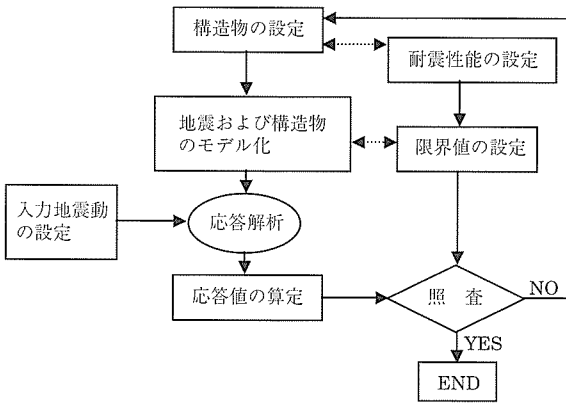


図 - 5 耐震性能照査の基本的流れ

重とすれば、構造性能照査になっている。

耐久性に関しては、従来、[施工編]の中でどちらかという仕様規定的に担保されてきた。たとえば、単位水量の上限を規定するとか、水セメント比(W/C)の上限を規定するとかである。しかし、それで耐久性が十分確保されてきたかという点、塩害環境下でのコンクリート構造物の劣化等を見ると、必ずしも十分とはいえなかった。そこで、これまでの研究成果を踏まえて、平成11年版において、より直接的に耐久性を照査する手法を導入することとした⁶⁾。具体的な項目は、前項でも述べたように、塩害、中性化、凍害、アルカリ骨材反応、化学的腐食等である。

耐久性に関していえば、本来ならば、図-6に概念的に示すように、耐荷性能をはじめとする構造物の諸性能の経時劣化を直接評価できる手法が必要である。しかし、現時点での技術レベルではそこまで到達していない。そこで、たとえば塩害を例にとると、図-7のような因果関係が分かっているため、鉄筋位置での塩化物イオン量を照査指標としている。すなわち、耐荷性能の低下は鉄筋の腐食および腐食膨張によるかぶりコンクリートのひび割れによるものであり、鉄筋の腐食は塩化物イオンによるものなので、塩化物イオン量に限界値を設定している。ただ、鉄筋が腐食をし始めたとしても、直に腐食膨張ひび割れが発生するわけでもなく、構造物の耐荷性能が低下するわけでもない。しかし、現状の技術レベルでは、その経時変化を追跡できていない。そこで、安全側の限界として、鉄筋の発錆開始

塩化物イオン量を 1.2 kg/m^3 と定めている。

塩化物イオン量を照査指標としているのは、図-8に示すような状況で、かぶりコンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散に関する予測がFickの拡散方程式でおおよそ可能であるという知見に基づいている。中性化についても、かぶりコンクリートの進行度合いは予測可能な状況で、照査式が提案されている。しかし、耐久性能の他の項目については、材料レベルの照査に留まっている。

耐久性能の照査技術レベルについて、筆者の独断で概念的に示すと図-9のようになる。疲労を別とすれば、まだまだ定量的な解析で照査できるレベルには達していない。ちなみに、構造性能の評価技術について示すと図-10のようである。構造部材の力学的性能は実験で調べることが可能であるが、実物の縮小モデルを用いている場合には、寸法効果を別途評価する必要がある。構造物の性能照査は適

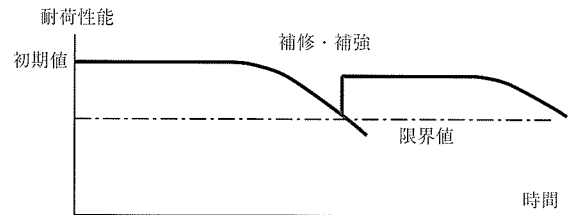


図 - 6 耐荷性能の経時劣化

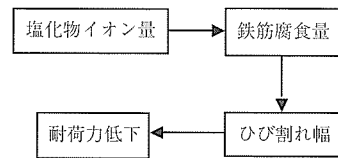


図 - 7 塩害による耐荷性能への影響

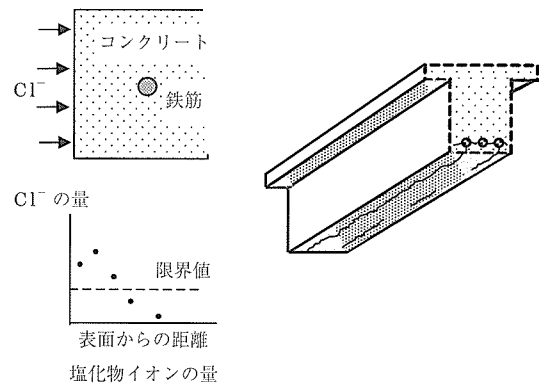


図 - 8 塩害に対する照査

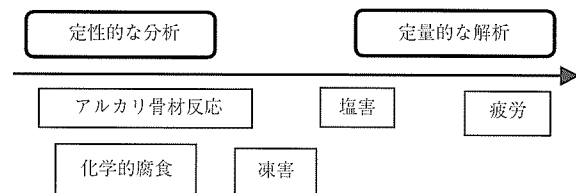


図 - 9 耐久性に関する予測技術の現状

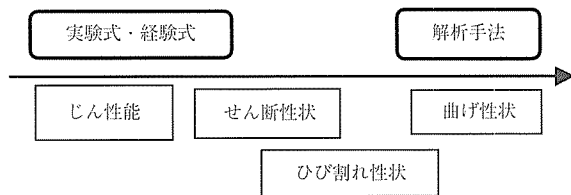


図 - 10 耐力性能に関する予測技術の現状

切なモデルを用いて行う必要があるが、曲げ性状については、高い精度で予測可能となっている。

4. プレストレストコンクリートの課題

プレストレストコンクリートの性能照査においても、基本的には、鉄筋コンクリートと同様である。ただ、力学的性能において異なるところもあり、その評価技術およびそのレベルが問題となる。とくに、耐震性能（復元力特性）においては、プレストレスの影響により、鉄筋コンクリート部材とは異なった性状を示す。また、プレストレスの導入方法によっても復元力特性が異なってくるので、PC鋼材の配置方法等の開発とともに、より一般的な復元力モデルを開発する必要もある。

復元力モデルにおいて重要な点は、まず、図 - 11 に示すように、包絡線上の変位と部材の損傷の関係を把握することである。鉄筋コンクリート部材でも重要性は同じであるが、プレストレスの影響、付着の影響を適切に評価する必要がある。2つ目の点は、残留変位に関するモデルである。この点についても、プレストレスおよび付着の影響が大きく現れてくる。

耐久性能に関しては、塩害が問題になっている。PC鋼材の腐食・破断は、鉄筋のそれよりも部材の力学的性能に与

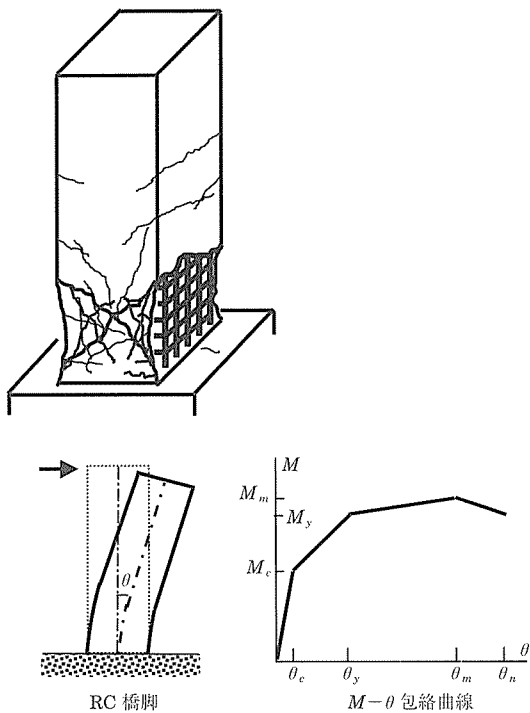


図 - 11 棒部材のモーメント部材角関係

える影響が大きい。図 - 12 に示すような経時劣化についての知見を増やし、それに対処できる技術開発を行う必要がある。さらに、維持管理および補修・補強技術の開発、発展を図るとともに、その効果に関する評価技術、照査技術の開発も必須である。

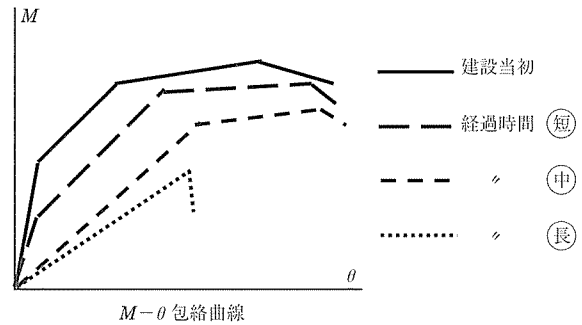


図 - 12 モーメント部材角関係の経時変化

5. 将来展望

性能照査型設計法というのは、設計における目的性能を明確にし、さらに、その照査技術のレベルも明らかにして、全体としての透明度、説明責任を求めているという点に、従来の設計法との違いがあると考えられる。したがって、技術レベルの向上を直接反映しやすくなるとともに、どのような技術開発が求められているかも見えてくる。設計者にとっては、新しい挑戦の機会が増える可能性が大きくなるが、その反面、常に技術レベルの向上と説明責任が求められることになる。

本論中で、性能の例として景観を上げているが、その内容については何も記述していない。これは、筆者のレベルでは何も記述できないということであって、その道の専門家に依頼するしかない。このことは、性能照査型設計のある方向を示している。すなわち、誰でもが性能照査を行うのではなく、照査技術を有している技術者（あるいは技術者集団）が行えばよい。

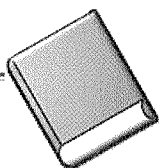
蛇足かもしれないが、高度な数値計算を行うことだけが性能照査ではない。実物で実証されているものは、条件が同じであれば、既に性能照査が済んでいるとしてもよい。要は、どのような性能をどう照査したか、またその信頼度はどの程度かが重要なのである。

参考文献

- 1) 田村浩一, 近藤時夫: コンクリートの歴史, 山海堂, 1984
- 2) 丸山久一: 「耐震基準の変遷: 土木コンクリート構造物」, コンクリート工学, 41 (2003) 5, pp.4-10.
- 3) 土木学会: 昭和 61 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 1986
- 4) 土木学会: 平成 8 年制定 コンクリート標準示方書 [耐震設計編], 1996
- 5) 土木学会: コンクリートライブラリー 87, 平成 8 年制定コンクリート標準示方書 (耐震設計編) 改訂資料, 1996

- 6) 土木学会：平成 11 年制定 コンクリート標準示方書〔施工編 ― 耐久性照査型 ―〕, 1999
- 7) 土木学会：2002 年制定 コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕, 2002
- 8) 土木学会：2002 年制定 コンクリート標準示方書〔耐震性能照査編〕, 2002
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 ― V 耐震設計編 ―, 昭和 55 年版 (1980), 平成 2 年版 (1990), 平成 8 年版 (1996), 平成 14 年版 (2002)
- 10) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 ― コンクリート構造物 ―, 丸善, 1992
- 11) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 ― 耐震設計 ―, 丸善, 1999
- 12) 丸山久一：土木構造物における耐震技術の変遷と将来展望, プレストレストコンクリート, Vol. 44, No. 6, pp. 10-14, 2002
- 13) 丸山久一, 島 弘：「2002 制定・コンクリート標準示方書〔耐震性能照査編〕の概要」, コンクリート工学, 41 (2003) 7, pp. 3-8

【2003 年 8 月 25 日受付】



● 刊行物案内

- PC斜張橋・エクストラードズド橋設計施工規準(案)
- PC吊床版橋設計施工規準(案)
- PC橋の耐久性向上マニュアル

(平成12年11月)

頒布価格：3点セット 会員特価 6 000 円 (非会員価格 7 200 円) (送料はいつでも 600 円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会