

鉄筋コンクリートの設計法

2019年 3月 岡村 甫 記

はじめに

大学院修士時代に、長滝重義・池田尚治両先輩と共に、箱根で行われた「PC 指針」制定委員会(委員長國分正胤)の最終検討に、参加させていただいた。國分正胤委員長が私たちを連れて行く名目は、野口功幹事の手伝いであった。実際は、野口さんの好采配で、指針の2日間の逐条審議は順調に進み、私たちはただ拝聴するだけであった。そして、夜は酒を飲みながらの議論である。その席上で、猪股俊司先輩や野口功先輩から、東大でも、構造関係を研究する必要があることを、諭された。私が國分研究室の伝統である「材料・施工」を離れて、「構造」関係の研究を始めたのは、この時からである。

卒業論文はコンクリートの「凍結融解」に関連するテーマであり、大学院に進学してからはコンクリートの「クリープ」に関する実験をしていた。ところが、修士論文のタイトルは「鉄筋の許容引張り応力度に関する基礎的研究」である<1>。この会に出席させて頂いたことが私の将来を大きく変えたのではないかと今では思う。國分先生の手の上で踊らされたのではないかと。

記憶に残る設計法について以下に私見を述べる。

1964年制定鉄筋コンクリート道路橋示方書(39年道示)

「鉄筋コンクリート道路橋示方書」が初めて制定されたのは1964年、私が博士課程在学中のことである<2>。この原案作成小委員会(委員長猪股俊司博士)に、幹事として、審議に参加した。高強度異形鉄筋の生産が始まり、1964年に開通した東海道新幹線に異形鉄筋が使用された。それまで、我が国では、異形鉄筋は使われておらず、この小委員会における中心議案は高強度異形鉄筋であった。その使用方法についての研究を始めていた私にとっては貴重な体験であった。しかし、橋梁設計の実務はもとより知識もなく、原案作成に対して、意見を言えるような立場になかったのは残念である。

道路橋床版に用いる鉄筋は、それまで、最も高強度のものでSR24(降伏点が 24 kgf/mm^2)であり、 $1,400 \text{ kgf/cm}^2$ がその許容応力度であった。SD30の使用を認め、異形鉄筋の普及を図るべく、その許容応力度を $1,800 \text{ kgf/cm}^2$ に規定した。床版の

設計法そのものは従来と変えずに、鉄筋の許容応力度を従来よりも30%大きい値まで認めたのである。

その結果、予期しない現象、床版に次々と被害が発生した。この原因に関する研究が精力的に行われ、7年後の1971年(昭和46年)にRC設計要領(46年要領と略す)〈3〉が告示された。鉄筋の許容応力度の最大値を $1,400 \text{ kgf/cm}^2$ に戻し、床版の厚さを20cm以上としたのが、主な変更点である。表面には表れていないが、輪荷重による曲げ応力度が床版コンクリートの曲げ強度以下となるようにしたようである。39年道示に基づいて首都高速道路公団が建設した床版厚は、46年要領で禁止された20cm未満のものが60%以上含まれている(図1)。

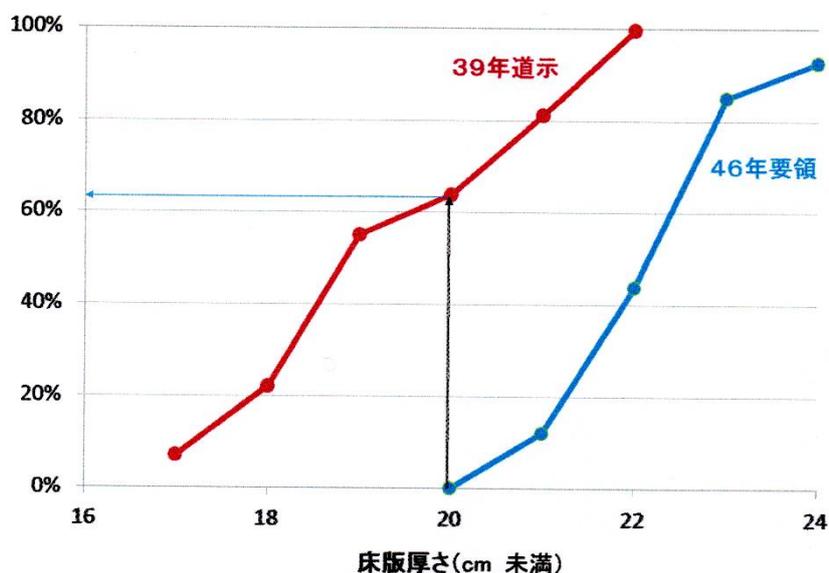


図1: 床版厚さの比率(首都高速道路公団)

図2は、首都高速道路公団が建設した床版の補修・補強を行った割合を示すものである。39年道示に基づく床版は、完成後数年で補強され始め、20年で40%、30年で80%が補強されている。それに対して、46年要領による床版は、建設後30年を経過した時点ではほとんど補強されていない。その相違はあまりにも大きく、衝撃的なデータである。問題なのは、39年道示に従って設計された床版の数が多いことである。

補強は、縦桁の配置、それに横桁を加えたもの、鋼板および樹脂注入など各種の方法で行われが、どれも効果は限定的であり、補修・補強を行った床版を再度行った例も多い。

その年までに補修・補強された床版箇所率

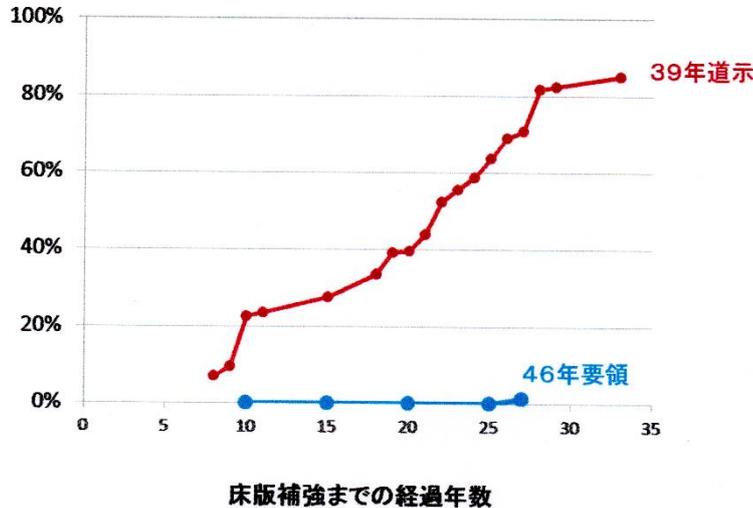


図2: 補修・補強までの経過年数(首都高速道路公団)

道路橋の床版は、大型車両の輪荷重を直接受けるので、この当時の床版の損傷は過積載の影響をも受けている。過積載は時間の経過と共に減ってきており、その効果が46年要領の良好な結果に影響している可能性はあるが、設計基準に新しい材料を採り入れる場合には、安全側の規定から始める必要があることを強く認識させられた39年道示であった。

1967年制定コンクリート標準示方書

1967年、11年ぶりの示方書改訂が行われた<4>。降伏強度が 24kgf/mm^2 を越える鉄筋の規定はこの時が最初である。鉄筋の許容引張応力度は、降伏強度の55-60%を限度とし、耐久性から許しうるひびわれ幅の限度を考慮して、丸鋼に対して $1,600\text{ kgf/cm}^2$ 以下、異形鉄筋に対して $2,100\text{ kgf/cm}^2$ 以下と規定された。なお、疲労強度より定まる許容引張応力度は $1,800\text{ kgf/cm}^2$ 以下と規定された。

これらの規定は、尼崎製鐵が開発の先鞭をつけた高張力異形鉄筋に関する我が国の研究成果に基づいて定められたのである<5、6>。それまでの規定は、主として外国の規定を参考にしたものであった。その後、我が国における主鉄筋は丸鋼から異形鉄筋に移行し、降伏強度 35kgf/mm^2 以上の鉄筋の使用が一般的になった。1974年の改訂および1977年の小改訂では、構造関係の規定に大きな変更はない。

1980年改訂 コンクリート標準示方書

1980年の示方書改定が國分正胤委員長最後の改訂となった<7>。この小改訂では、コンクリートのせん断許容応力度の条項に関して、以下の二点について重要な修正が行われた。

一つ目は、1967年以来用いられていたコンクリートの許容せん断応力度の値を半分近くに減じたことである。

当時すでにせん断強度に及ぼす寸法効果は明らかになっており、土木学会終局強度設計小委員会は、1977年9月発刊の「コンクリート構造設計指針(第二次素案)」<8>にせん断補強鉄筋をもたない鉄筋コンクリートばりのせん断強度 τ を(1)式で表すことを提案していた。

$$\tau/f_t = \beta_1 (1 + \beta_2 + \beta_3) \quad (1)$$

ここに、

$$\tau = V/(b_w d)$$

V : せん断力、 b_w : はり腹部の幅、 d : はりの有効高さ

f_t : コンクリートの引張強度

$$\beta_1: 0.24$$

$$\beta_2: (150/d)^{0.25} - 1 > 0$$

$$\beta_3: (100\rho_w)^{0.5} - 1 < 0.5$$

ρ_w : 鉄筋比 = $A_s/(b_w d)$ 、 A_s : 引張鉄筋断面積

私は、せん断強度に及ぼす各種要因を含む式(1)のような形を採り入れるべきであると考えていたが、当時の示方書にはなじまなかった。一方、池田尚治幹事は、現実的な対処として、せん断許容応力度の値を従来の約半分に下げることが提案し、それが採択されたのである。

二つ目は、必要なせん断補強鉄筋量の非連続性をなくす改訂を行ったことである。

せん断応力度が許容値以下であれば、直径6mmの鉄筋を、有効高さ以下の間隔で配置すればよいとされてきており、許容値を越えると全せん断力をいわゆるトラス機構で受け持つ方式をとっていた。必要せん断補強鉄筋量に大きな不連続性があったのである。この規定はせん断補強鉄筋を用いない部材を奨励することになる。断面を多少大きくしてもせん断応力を許容値以下とする設計が、経済的となるからである。

この非連続性をなくす方法に改めたのである(図3)。すなわち、せん断許容応力度を越えると、トラス機構に許容応力度の二分の一に相当するせん断力を加えたもので、全せん断力を受けることに変更した。なお、この考えは以後の基準に受け継がれている。

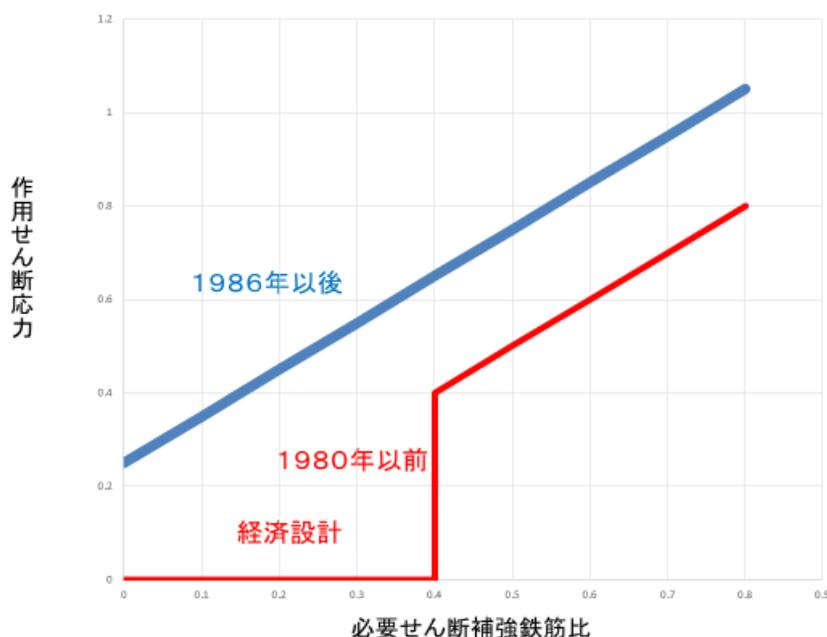


図3 必要せん断補強鉄筋の模式図

この変更を強く認識した技術者たちがいた。LNGの地下タンクの設計に従事していた鹿島建設の若い技術者たちである。この寸法効果の影響が正しかった場合には厚さ5mを越す底版のせん断に対する安全性に問題が生ずる。はりの寸法効果がスラブにも適用できるかどうかを確かめる必要があると、野尻陽一研究所長に直訴したのである。野尻所長は、共同研究を井畔瑞人清水建設研究所長に図り、はりとスラブの大型実験を両者の共同研究として実施した<9>。土木技術者の自己が建設する構造物に対する責任感とそれを大事にする上司たちの度量に感服したことであった。

鹿島建設は、スラブを担当し、厚さ1m、直径10mまでの実験を、清水建設ははりを担当し、高さ3m、スパン36mまでの実験を行った。その結果、はりとはりに関する寸法効果が従来の3倍の高さまで確認されたのである。この実験以後に建設されたLNG地下タンクの設計には、この成果が採り入れられた。なお、この実験を見学する際に気付いたことは、大きな供試体での実験の精度は極めて高いことである。

阪神・淡路大震災におけるピルツ橋脚の崩壊は、他の短柱式橋脚と同様に、コンクリートのせん断強度不足によるものであった。崩壊した橋脚は、断面が大きいだけでなく、鉄筋比が小さく、著しくせん断強度が低いものであるが、建設当時はせん断補強鉄筋が不要となる橋脚であった<10>。



図4 ピルツ橋脚の崩壊



図5 単柱式橋脚の崩壊



図6 せん断ひびわれ

1983年制定 コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)

土木学会コンクリート委員会は、昭和43年(1968年)に「終局強度設計小委員会(國分正胤委員長)」を設け、その成果を「鉄筋コンクリート終局強度理論の参考」として、1972年、コンクリート・ライブラリーに公表した<11>。鉄筋コンクリート部材の諸性状について、執筆したのは以下に示すように、当時の若手たちであった。

- (1) 角田 与史雄 : 曲げおよび曲げ圧縮
- (2) 田辺 忠顕 : 短柱
- (3) 岡村 甫 : 長柱
- (4) 檜貝 勇 : せん断一般
- (5) 檜貝 勇 : アメリカにおけるせん断の研究
- (6) 青柳 征夫 : 西ドイツおよびソ連におけるせん断の研究
- (7) 宮崎 修輔 : ねじり
- (8) 角田 与史雄 : ひびわれ
- (9) 田辺 忠顕 : 回転限界

1970年には、CEB と FIP とが協力して、限界状態設計法<12>を公表し、将来の欧州の共同 Code に発展しようという意欲的な取り組みが行われていた。土木学会コンクリート委員会は、若手を中心として、将来の示方書に採り入れるべき設計法の研究を精力的に進め、その成果を、次々とコンクリート・ライブラリーに公表した<13、14>。そして、将来の示方書原案となる「コンクリート構造の限界設計法(案)」を、1983年にまとめたのである<15>。

設計では、構造物または部材がその機能を果たさなくなり、設計目的を満足しなくなるすべての限界状態について検討しなければならないとし、限界状態として、終局・使用・疲労の3区分を明記したのである。

(1) 部分安全係数

ヨーロッパコンクリート委員会の提案による限界状態設計法には、荷重係数と材料係数の二つの安全係数が使用されている。これを、拡張し、5個の安全係数を用いることにした。すなわち、各限界状態に用いるべき安全係数を、材料・荷重のほかに、

構造解析・部材および構造物の3係数を加えたのが、諸外国の基準とは異なる大きな特徴である。従来の設計基準においてもこれらの安全係数が陰の形で採り入れられていたことを、陽の形にすることを心掛けたのである。その結果、ある部分の進歩がそのまま示方書に反映することができるようになった。すなわち、計算式や施工精度の向上に伴って、いくつかの安全係数の変更が行われた。

これらの安全係数の標準値は石橋忠良と岡村 甫の提案に基づいて設定された。道路橋床版の曲げモーメントの計算式には、構造解析係数が隠れている。せん断破壊と曲げ破壊に対しては、計算式の精度が異なることが配慮された設計式となっている。また、施工の影響を受けるコンクリートは、一般にその影響が小さい鋼よりも大きい安全係数(材料係数)を持っているのである。

設計に用いるすべての理論式と実験式とを、一律に扱うために、実験式はすべて平均を表す式とし、式の不正確さを安全係数(部材係数)で処理する形にしたのである。これによって、研究の進歩を設計に反映せせるのが容易になるのである。

(2) 曲げひびわれ幅の算定式とその許容値

諸外国では、ひびわれ幅の制限値をかぶり量に関係なく、定めている場合が多い。しかし、コンクリート表面のひびわれ幅は、コンクリートのかぶり大きいほど大きくなるが、鋼材腐食の危険度は、かぶりが大きければ緩和される。そこで、耐久性から定まるひびわれ幅の制限値をかぶりの関数とする「我が国独自の方法」をとることとした。これによって、永久荷重作用時における鉄筋応力度を制限することとほぼ等価となる。

(3) 棒部材のせん断耐力

補強鉄筋を用いない棒部材のせん断耐力算定式は、(1)式と同様に、コンクリート強度のほかに、はりの高さや鉄筋比の関数とした。

1986年制定 コンクリート標準示方書 設計編

1968年以来営々と積み重ねた努力が結実した示方書設計編である。基本的には、1983年制定「コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)」と同じであるが、実務経験豊富な御子柴光春小委員長の眼を通して、実務に適用するに相応しいものとなった。

示方書(設計編)の改訂は、その後、1991年および1996年に行われたが、その体系および内容にはほとんど変化はない。この間、この分野の研究の進展がなかったのであろうか。ただし、1996年の改定時に、耐震設計編が別冊となった。この編は、前年に発生した兵庫県南部地震による被災の教訓を踏まえた土木学会耐震基準等検討委員会の提言を採り入れた大改訂である。

1988年制定 コンクリート構造物の耐久設計指針(試案)

土木学会では、1986年10月に、限界状態設計法に基づく「コンクリート標準示方書 設計編」を発売し、これに従えば、耐久的なコンクリート構造物ができるとしている。しかし、耐久性に関して体系的な規定となっていないといってよく、材料・設計・施工に関して耐久性を明確に考慮したものは、以下の規定のみと考えられた。

(1) 材料について

- i) 気象作用に対応して、コンクリートの水セメント比の最大値を制限
- ii) コンクリート中の塩化物含有量を制限

(2) 設計について

- i) 環境条件の区分に対応して、かぶりの関数として許容ひびわれ幅を規定
- ii) 環境条件の区分および部材の種類に対応して、かぶりの最小値を規定
- iii) 用心鉄筋、面取り、排水・防水装置、部材表面の保護などに関する規定

(3) 施工について

- i) 沈下ひびわれに対する処置
- ii) 特別な場合、たとえば、マスコンクリート、寒中コンクリート、暑中コンクリート、水中コンクリートなどについては、通常の方法、設計、施工では十分な強度・耐久性が得られないことを考慮して、コンクリートの打ち込み速度、養生方法などに関して厳しく規定している。

このように、この示方書は、安全性については強く意識しているが、耐久性に関しては、最小限必要な事項を規定してはいるが、規定相互の関連はなく、良いものを良いとし、悪いものを悪いとする体系とはなっていない。

安全性については、外力と耐力とを定量的に求める方法を提示して、照査する方法が提示されている。しかし、耐久性については、外因と耐久性を評価する方法は提示されていない。

そこで、1988年1月、コンクリート委員会内に「耐久性設計小委員会」を設け、以上の問題を検討し、示方書に採り入れるための原案を作成することとなった。この委員会が1988年8月に公表したのがこの指針(試案)である<16>。

この指針(試案)の特徴は、曲がりなりに、コンクリートの品質・施工方法ならびに設計詳細が耐久性に及ぼす影響を総合的かつ定量的に評価できるシステムを作成できたことである。

耐久設計を定量的に行う最大の難関は、耐久性に及ぼす影響が極めて大きい施工に関する要因をどのように定量化するかである。施工の影響は、人的要因が大きいため、定量化が難しいのである。

耐久性設計を行う方法はいくつか考えられるが、その時点で定性的に得られている情報を集約し、耐久性に及ぼす個々の影響度を定量化した評価式をまず作成することが大事である。そこで、それぞれがなじみの深い構造物について試案を作成し、幹事(岡村 甫、辻幸和、池田博之、魚本健人、大即信明、國島正彦、小林茂敏、坂手道明、二羽淳一郎、畠山 昭、渡辺泰光)内で議論をしながらたたき台を作成した。このたたき台を基に委員会において評価式を造り上げたのである。

得られた評価式は、その当時の我が国土木技術者のレベルを表すものと考えられるものである。実際の現象を、科学的にとらえるだけでなく、実務の経験を自己の技量に高めて初めて得られるものである。

ここでいう耐久性評価はあくまでも設計時点における評価であって、既存の構造物を評価するものではない。

この指針(試案)の概要を以下に述べる。

- (1) 部材各部において、耐久指数 T_p が環境指数 S_p 以上であれば、所要の耐久性を満足するものとする。
- (2) 環境指数は、環境外因、すなわち、構造物が置かれる環境条件(塩分、凍結融解作用)と要求耐用期間によって、定量化される数値である。
- (3) 耐久指数は、コンクリート材料、コンクリートの品質、設計ひびわれ、鉄筋詳細・形状・図面、コンクリート工、鉄筋工・型枠・支保工などから、定量化される数値である。

1995年に、「コンクリート建造物の耐久設計指針(案)」<17>が公表されたが、耐久設計の概念、耐久性に関する検討の方法および環境指数と耐久指数の概念とそれらに包含される要因については、指針(試案)とほとんど同じであり、指針(試案)の修正版といえるものである。

1990年 PCLNG 地上式貯槽指針素案

1988年に通商産業省から委託され、財団法人天然ガス促進センターが設置した「PLCLN 貯槽技術開発委員会(柴田碧委員長)」に委員として参加し、プレストレストコンクリートに関する部分を担当した。安全性は、柴田委員長が総括し、鋼構造は秋山 弘先生が担当して、1990年に表記指針素案を作成した。技術開発から実現に至るまで、多くの技術者と共に議論ができた思い出深い仕事であった。

地上に設置される LNG タンクは、液化天然ガスが漏洩した場合に外部に流出するのを防ぐための防潮堤が設けられている。PCLNG 地上式貯槽は、金属二重殻構造の貯蔵タンクに PC 製の防潮堤を限りなく近づけ、両者を一体化するというコンセプトによって、従来と同様の安全性を確保しながら、敷地面積の低減化を図ろうとして考案されたものである。

PC 防潮堤の貯液性能確保に関する規定を定めるにあたって、コンクリートのひびわれを通じての漏洩性状を明らかにすることが私の任務であった。

大阪ガスは大林組と共同で、PC はり部材の上面に液体窒素(−196℃)を貯留して、引張載荷試験を行い、コンクリートのひびわれを通過する液体窒素の流出量は、きわめて小さいことを明らかにしていた<18>。しかし、その理由は必ずしも明らかにされていなかった。

前川宏一さんに相談すると、直ちに、液体が気化する現象に伴う温度、圧力等を考慮した流出モデルを作成してくれた。そのモデルが実験によって検証され、液化天然ガスがコンクリートのひびわれを通過する現象が極めて明瞭な物理現象であり、シミュレーションが可能となったのである<19、20>。

指針では簡単かつ容易に達成できる貯液性能として、コンクリートに作用する応力が圧縮となる範囲を10cmとすることとした。

参考文献

1. 岡村 甫:鉄筋の許容引張り応力度に関する基礎的研究、セメントコンクリート・No.200, 1963.10, pp.2-6
2. 日本道路協会:鉄筋コンクリート道路橋示方書、1964
3. 建設省通達:RC 設計要領、1971
4. 土木学会コンクリート委員会:コンクリート標準示方書、1967
5. 富田勝信、渡辺信一:異形丸鋼の疲労強度、鉄と鋼、第10号、1961
6. 國分正胤、岡村 甫:高強度異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリートばりの疲労に関する基礎研究、土木学会論文集122号、pp.29-41, 1965.10
7. 土木学会コンクリート委員会:コンクリート標準示方書、1980
8. 土木学会コンクリート委員会:コンクリート構造設計指針(第二次素案)、1977.9
9. 井畔瑞人、塩屋俊幸、野尻陽一、秋山ひかる:Experimental studies on shear strength of large reinforced concrete beams under uniformly distributed load :土木学会論文集,No.345/V-1, 1984.8
10. 岡村 甫、前川宏一、小沢一雅、大内正博:コンクリート橋脚の被害の特徴、土木学会誌、pp.21-29
11. 土木学会・コンクリート委員会:鉄筋コンクリート終局強度理論の参考、コンクリート・ライブラリー34号、1972.81
12. CEB-FIP:International Recommendation for the Design and Construction of Concrete Structures, 1970
13. 土木学会・コンクリート委員会:鉄筋コンクリート設計法の最近の動向、コンクリート・ライブラリー41号、1975.11
14. 土木学会・コンクリート委員会:構造の限界状態設計法試案、コンクリート・ライブラリー48号、1981.4
15. 土木学会・コンクリート委員会:構造の限界状態設計法(案)、コンクリート・ライブラリー52号、1983.11
16. 土木学会・コンクリート委員会:コンクリート構造物の耐久設計指針(試案)、コンクリート・ライブラリー65号、1988.8

17. 土木学会・コンクリート委員会:コンクリート構造物の耐久設計指針(案)、コンクリート・ライブラリー82号、1995.3
18. 浅井邦茂、中島一夫、小島克朗、野村敏雄:冷熱衝撃と引張荷重を受けるPC部材の挙動、土木学会年次学術講演会、1986.11
19. 岡村 甫、前川宏一、北村八郎、芳賀孝成、黒坂敏正:低温液化ガス用コンクリート部材の貯液性能に関する研究—その1、土木学会年次学術講演会、1990.9
20. 前川宏一、岡村 甫、浅井邦茂、長谷川 宏、鎌田文男:低温液化ガス用コンクリート部材の貯液性能に関する研究—その2、土木学会年次学術講演会、1990.9