

任意形コンクリート構造物の クリープ解析法に関する一提案

前田 晴人*

報文の対象となる論文は、四半世紀前に著したものである。ここでは、当時の時代背景、当時の橋梁事情、ご指導いただいた猪股俊司博士のことおよび論文の意図するところなどについて記述する。当時はバブル景気が目立ってきた時期であり、長大橋が建設されつつある時期であった。コンクリート橋においては連続化、ラーメン化などの高次不静定化に向かう時期にあたる。対象となる論文は猪股俊司著「パーシャルプレストレストコンクリート部材断面の設計法」(土木学会論文集)を基礎としている。論文の特徴は、任意形状のコンクリート構造物を対象に、クリープおよび乾燥収縮によるひずみ変化を、PC鋼材および鉄筋が拘束する作用を考慮して求めている点にある。

キーワード：クリープ、乾燥収縮、パーシャルプレストレストコンクリート、鉄筋拘束

1. はじめに

対象となる論文は、1987(昭和62)年発行のプレストレストコンクリート第29巻2号に掲載されたものであり、それ以降、すでに25年、四半世紀の時が過ぎている。本報文では、当時の時代背景、当時の橋梁事情、論文作成のきっかけを与えていただいた猪股俊司博士のこと、論文の意図するところなどについて記述する。なお対象となる論文は、(株)日本構造橋梁研究所の上司であった小宮正久博士(当時設計第七課課長)および酒井 一氏(当時システム課課長代理)との共著である。

論文の理論面の確立、プログラムの作成および検証は国内で行ったが、実際の論文執筆は、急に決まった長期出張(1986年6月～1987年7月)先のケニア国ナイロビにおいて行ったことも思い出の一つである。

2. 四半世紀前の時代

2.1 当時の主な出来事

表-1に四半世紀前の主な出来事を示す。

1986(昭和61)年：第3次中曽根康弘内閣が発足、バブル経済が始まり、社会党の土井たか子氏が主要政党で日本初の女性党首となった。女性党首の誕生と時期を同じくして男女雇用機会均等法が施行されたのも象徴的である。また、チェルノブイリ原子力発電所事故の発生した年でもある。交通関係に目を向けると、自動車の一般道路にお

表-1 四半世紀前の主な出来事

1986年 (昭和61) 26年前	伊豆大島三原山が大噴火、全島民が避難 第3次中曽根内閣発足 社会党の土井たか子氏が日本初の女性党首に 男女雇用機会均等法の施行 チェルノブイリ原子力発電所事故発生 一般道におけるシートベルトの着用が義務化 山陰線余部鉄橋列車転落事故
1987年 (昭和62) 25年前	大韓航空機爆破事件発生 竹下登内閣発足 土地の登記が経済全体に波及(バブル経済) 日経平均株価が終値で初めて2万円を突破 損保会社がゴッホの「ひまわり」を53億円で落札 国鉄が分割民営化、JRグループが発足 東北自動車道が全線開通
1988年 (昭和63) 24年前	ソウルオリンピック開催 日経平均株価が終値で初めて3万円を突破 ファミコンソフトのドラゴンクエストⅢ発売 青函トンネル・瀬戸大橋開通 本州と北海道・四国を結ぶ鉄道路線開通
1989年 (昭和64) (平成元) 23年前	昭和天皇が崩御、元号が昭和から平成へ 消費税スタート リクルート事件で竹下内閣総辞職 日経平均株価が史上最高値38,915円を記録 横浜ベイブリッジ開通

るシートベルトの着用が原則義務化された。また、山陰線の余部鉄橋から列車が転落するという、橋を仕事とする者にとっては誠に残念な事件も発生した。

1987(昭和62)年：竹下登内閣が発足、バブル景気が目立ってきた時期であり、日経平均株価が終値で初めて2万円を突破した。損保会社がゴッホのひまわりを53億円で落札したのも象徴的な出来事であった。交通関係に目を移すと、国鉄が分割・民営化し、JRグループが発足した年にあたる。また、東北自動車道が全線開通した年でもある。

1988(昭和63)年：バブル景気が続き、日経平均株価が終値で初めて3万円を突破した。ファミコンソフトの怪物ドラゴンクエストⅢが発売され、大騒動が起こった年である。交通関係に目を向けると、青函トンネル・瀬戸大橋が開通し、本州と北海道・四国を結ぶ鉄道路線が開通した年にあたる。

1989(昭和64,平成元)年：元号が昭和から平成へ変



* Haruhito MAEDA

現職 (株)日本構造橋梁研究所
取締役 大阪支社長

当時 (株)日本構造橋梁研究所
設計第七課 主任

わり、4月に消費税（3%）がスタートした。消費税導入間もない6月にリクルート事件で竹下内閣が総辞職し、宇野宗佑内閣が発足。交通関係では、横浜ベイブリッジが開通している。

全体としてはバブルの絶頂期に向かう時期にあり、鋼橋においては前述のとおり瀬戸大橋、横浜ベイブリッジなどの現在においても著名な橋梁がこの時期に建設されている。

一方、コンクリート橋においては、不静定次数が低く比較的設計しやすい有ヒンジラーメン橋から、不静定次数が高く設計は複雑となるが走行性・耐久性が向上する連続ラーメン橋へ、ようやく移行されはじめた時期にあたる。鋼橋に比べて構造形式を自由に選択するためのコンクリート橋設計技術の遅れは明白であるが、この原因は、ひとえにコンクリート橋独特の複雑なクリープ・乾燥収縮問題にあったと著者は考える。対象となった研究および解析プログラム（CONST）の開発は、この問題を解決するために行ったものである。次に当時建設された主なコンクリート橋に着目してみよう。

2.2 当時の主なコンクリート橋

この当時のコンクリート橋に関する資料としては、やはり本誌「プレストレストコンクリート」が1番充実しており、1つ1つの記事を丁寧に読んでいた記憶がある。そのほかの資料としては雑誌「橋梁と基礎」、「コンクリート工学」などを良く読んでいた。これらの資料は、日本を代表するコンクリート橋に関しては掲載されていたものの、中小橋に関する報告はあまり掲載されていなかった。現在ではプレストレストコンクリート工学会主催で毎年行われている「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」およびその論文集によって中小橋に関するデータも網羅されるようになり、資料収集に関しては便利な時代になったものだとつくづく感じている。

さて、話を本題に戻して、当時の主なコンクリート橋であるが、(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会発行のプレストレストコンクリート年報2000年版を基に、2000年までの有ヒンジラーメン橋および連続ラーメン橋における最大支間ベスト10を年代順に並べた結果を表-2に示す。1980年代前半までのコンクリート長大橋は、片持ち架設という架設の特殊性および計算のしやすさからほとんどが有ヒンジラーメン橋であった。その代表例が浜名大橋（1976年竣工、最大支間240m）であり、江島大橋（2004年竣工、最大支間250m、やはり有ヒンジラーメン）が完成するまで、約30年間日本のコンクリート桁橋のレコードスパンを保持した橋梁である。

1980年代後半以降は、コンピュータの急速な発展に伴い構造計算能力が飛躍的に向上したこと、コンピュータを利用したクリープ・乾燥収縮に対する解析法が確立されたことにより、不静定次数の高い連続ラーメン橋が設計・建設されるようになった。写真-1は初期の連続ラーメン橋で、中央自動車道の岡谷高架橋（1986年竣工、最大支間148m）である。岡谷高架橋は当社が基本設計を実施した橋梁であり、設計と並行して論文に対応したプログラム

表-2 有ヒンジ・連続ラーメン橋支間ベスト10
(2000年までにおける結果)

1966年	○天草3号橋 (160 m, 日本道路公団)
1967年	○名護屋大橋 (176 m, 佐賀県)
1972年	○浦戸大橋 (230 m, 日本道路公団)
1975年	○彦島大橋 (236 m, 山口県道路公社)
1976年	○浜名大橋 (240 m, 日本道路公団)
1981年	○岩大橋 (185 m, 日本道路公団)
1982年	○八幡平橋 (185 m, 日本道路公団)
1985年	○阿木川ダム2号橋 (220 m, 水資源開発公団)
1986年	■岡谷高架橋 (148 m, 日本道路公団)
1987年	○宮ヶ瀬大橋 (150 m, 建設省)
1989年	○十勝河口橋 (165 m, 北海道開発庁)
1990年	■ソリ倉橋 (150.5 m, 建設省)
1991年	■立花橋 (139.5 m, 日本道路公団)
1993年	■沼田川橋 (153.3 m, 日本道路公団) ■吉井川橋北 (148 m, 日本道路公団)
1995年	■姥ヶ原橋 (140.5 m, 日本道路公団) ■宿坊大橋 (140 m, 富山県)
1996年	■見延橋 (149 m, 日本道路公団)
1997年	■水明橋 (152 m, 北海道開発庁)
1999年	■長良川高架橋 (156 m, 建設省)

○印：有ヒンジラーメン橋、■印：連続ラーメン橋
() 内は最大支間、建設当時の施工

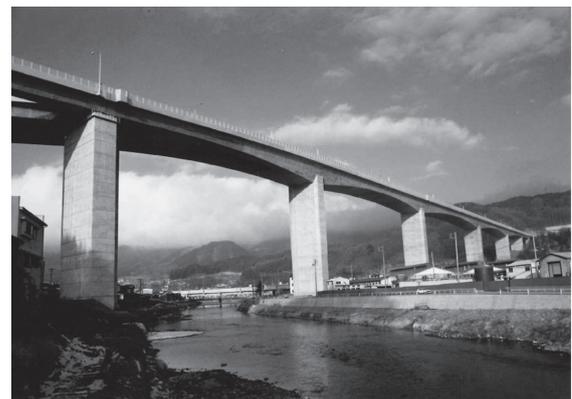


写真-1 初期の連続ラーメン橋（岡谷高架橋）

開発・照査を行った思い出深い橋梁である。また、当時としては珍しい連続ラーメン橋であったこと、途中から分岐していたこと、分岐部をきれいにさせる工夫が必要であったことなどから、名古屋に通いつめて遅くまで施工の担当者の方々と意見交換したことも良い思い出として残っている。論文は、コンピュータの急速な発展を背景として執筆したものであるが、今のパソコン、携帯電話などの発展に比べるとまだまだ人間的な発展の速度であった気がするのには、同年代の共通した感じ方ではないだろうか。

不静定次数について思い出すのは、当時、有ヒンジラーメン箱桁橋における主方向の計算書と、箱桁断面としての横方向の計算書とで、後者の方が計算書の厚さが厚かったことである。応力法による不静定力の計算がかなりの手間で枚数を要したため、不静定次数の高い後者の方が厚い計算書（1000ページ程度）となっていたのである。箱桁の横方向の計算は、今ではわずか数十ページで済んでしまっている。

論文の執筆はケニア国のナイロビで行ったことは前述し

たが、ケニア国での業務は、写真 - 2 に示すキリフィ橋の設計を行うことであった。キリフィ橋は橋長 420 m、最大支間 185 m で、2 枚壁式橋脚を有する連続ラーメン橋である。2 枚壁式橋脚は主桁の変形を拘束するために発生する不静定力を減少させる効果をもつ。地震の少ない架橋地点（モンバサ市の北約 50 km）だから実現できた構造ともいえる。設計には論文とともに開発した英国 BS コード仕様のプログラム（BCONST：BS 版 CONST）を用いて行った。ナイロビには IBM のオフィスがあり、そのオフィスのコンピュータを借りながら計算を行ったが、日本ほどコンピュータ事情がよくなく、1 回の解析で丸 1 日費やしたことを覚えている。現在耐震設計で一般的に行われている非線形動的解析などは夢のまた夢のコンピュータ事情であった。

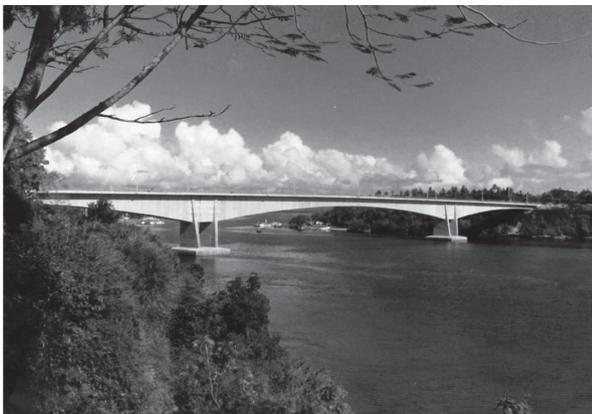


写真 - 2 キリフィ橋（ケニア国）

2.3 当時の参考図書

当時の基準と良く利用した図書とを表 - 3 に示す。

道路橋に限定すると、当時の橋梁は、1978（昭和 53）年に日本道路協会から発刊された初代の道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編を基に設計を行っていた。また、同じ年に土木学会からプレストレストコンクリート標準示方書が発刊されており、構造細目などの決定に用いていた。

示方書とはべつに実際の設計に役立つ図書としては

表 - 3 コンクリート橋に関する当時の基準と参考図書

1957 年 (昭和 32)	プレストレストコンクリートの設計および施工 (猪股俊司著、技報堂)
1964 年 (昭和 39)	鉄筋コンクリート道路橋設計示方書 (日本道路協会)
1968 年 (昭和 43)	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)
1976 年 (昭和 51)	コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮 (H. リュッシュ、D. ユングビルト著、百鳥祐信訳、鹿島出版会)
1978 年 (昭和 53)	道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編 (日本道路協会) プレストレストコンクリート標準示方書 (土木学会)
1979 年 (昭和 54) 1990 年 (平成 2)	プレストレストコンクリートの設計・施工 (猪股俊司著、技報堂) 道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編改訂 (日本道路協会)

1979（昭和 54）年に技報堂から発刊された猪股俊司博士著「プレストレストコンクリートの設計・施工」がある。この本は 1957（昭和 32）年に発刊された同じ著者によるほぼ同名の著書「プレストレストコンクリートの設計および施工」の大幅改訂版である。1957 年の初代版はプレストレストコンクリートのバイブル的な存在であり、示方書などで使用されているほとんどの式はその誘導方法から結果までが詳細に示されていた。当時、神田の古本屋で初代版に 1 万円の値が付いていたことを覚えている。

対象となる論文に関連するクリープ・乾燥収縮については、1976（昭和 51）年に鹿島出版会から発刊された H. リュッシュ、D. ユングビルト著、百鳥祐信訳「コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮」が大いに参考となった。最近ではインターネットが発達したためか、土木の学生が少なくなったためか、本屋さんの専門書コーナーが次第に縮小されていくことに寂しさを感じる。

3. 猪股俊司論文集

3.1 猪股俊司博士

猪股俊司博士は日本国有鉄道技術研究所コンクリート室長から、1962（昭和 37）年の（株）日本構造橋梁研究所設立に合せて、取締役設計部長として当社に入社された。以後、プレストレストコンクリート技術の発展のために、社内のみならず、日本国内および日本の代表として世界を視野にその研究を発信し続けた方である。1986（昭和 61）年～1987（昭和 62）年には、プレストレストコンクリート工学会の前身であるプレストレストコンクリート技術協会の会長を務めている。また、1986 年にはプレストレストコンクリート国際連盟（FIP）のフレッシュメダルを日本人で初めて受賞している。

私が（株）日本構造橋梁研究所に入社した 1979（昭和 54）年には、博士は同社の副社長を務めておられた。ご高名は学生時代から知っており、プレストレストコンクリートの講義には、博士の著書が使われていた。

私の入社数年後からか、社内の PC 技術者を中心としたメンバーが正月に猪股家に押しかけるようになった。首謀者は論文の共著者小宮正久氏（当時課長）であったと記憶している。博士の方も 1 年間に海外出張で蓄えた洋酒を惜しみなく供出してくださった。当時は現在のように洋酒の安売りなどなく貴重品であり、また、いろいろな種類の洋酒をそろえていてくださった。私も末席に加わっていたが、回を重ねるにしたがい、名前を呼ばれるようになった。社内においても声をかけていただくようになり、博士作成の論文の青焼きをしたり、和文タイプのチェックなどを引き受けるようになった。このような状況のなかで和文タイプ用に渡された手書きの原稿が「パーシャルプレストレストコンクリート部材断面の設計法」である。この論文は 1984（昭和 59）年の土木学会論文集 第 348 号 /V-1 に招待論文として掲載されている。この論文を基礎として、ラーメン橋を中心とした任意形のコンクリート構造物の解析へ応用し、プログラムを整えて実用化を図ったものが今回の対象となった論文である。

3.2 猪股俊司論文集

このように身近でご指導いただいた猪股博士であるが、病により1990（平成2）年8月19日に逝去された。

博士の論文は、未発表、既発表のものも含めて実に270編を越え、その分野も研究論文、講座、評論、報告、文献抄録および紹介など多岐にわたっている。

写真-3に示した猪股俊司論文集は、その業績をたたえるため博士の1周忌にあわせて編集し、非売品ではあるが、当時の主だったPC関係者に配布させていただいた書物である。このなかで冒頭に採録した未発表の100ページを超える論文は、博士が1冊の書物として発行する意図で病床のなかでも執筆を続けていたコンクリート構造物のクリープ解析に関する未発表の論文である。コンクリートのクリープ問題は、博士が生涯を通して研究していたとくに思い入れの深いテーマであり、完成していれば、わが国では希少価値の書物になっていたであろうことを思うと残念でならない。



写真-3 猪股俊司論文集

4. 論文の意図するところ

4.1 解析法の特徴

任意形コンクリート構造物のクリープおよび乾燥収縮による応力解析（以下、単にクリープ解析という）をプログラム化するためには、任意の構造系を容易に解析でき、また施工中の構造系変化にも対応しやすい変形法に従った解析法を開発することが便利である。

変形法によるこの種の解析法は、当時いくつか提案されていたが、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮によるひずみ変化をPC鋼材および鉄筋が拘束する作用をも同時に考慮した解析法は、まだ提案されていなかった。

そこで、対象の論文においては、コンクリートの乾燥収縮およびクリープなどによるひずみ変化を、PC鋼材および鉄筋が拘束する作用を考慮した、変形法によるクリープ解析法を提案することとした（図-1）。

4.2 PC鋼材の拘束作用

PC鋼材の拘束作用＝クリープ・乾燥収縮によるプレストレスの減少量、であることに気づくには、恥ずかしながらちょっと時間がかかった。共著者の酒井氏が組上げてくれたプログラムの結果をみると、単純桁であるにもかかわらず、クリープ・乾燥収縮により、コンクリート断面に引張力と曲げモーメントが発生していた。この引張力の

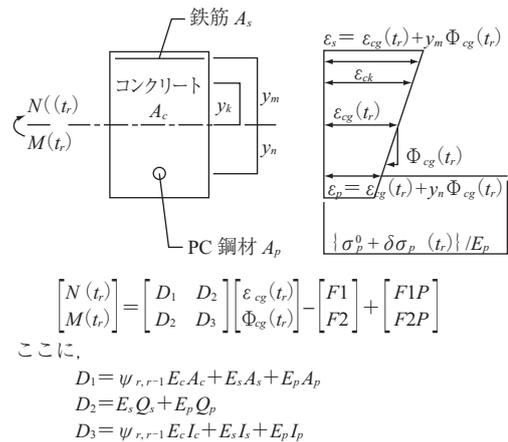


図-1 断面内のひずみ釣り合い

値を検証しているとプレストレスに対してある一定の割合をもっていることが分かり、やっとこの値がクリープ・乾燥収縮によるプレストレスの減少量を意味していることに気が付いた。この検証には、2.3で示した「プレストレスコンクリートの設計および施工」初代版が役に立った。この中には、示方書などで示されているコンクリートのクリープ・乾燥収縮によるPC鋼材引張応力度の減少量を求める式の誘導方法が懇切丁寧に示されていた。

4.3 鉄筋の拘束作用

今でこそPPC（PRC）構造としての設計においては、鉄筋の拘束作用を考慮することが一般的となったが、開発当時はだれからも目を向けられなかった。それもそのはずで、その頃の設計は、使用時にひび割れを許さないPC構造が主体であり、配置鉄筋もD13ないしはD16程度の細径が主体で、鉄筋の拘束作用が小さかったことが無視へつなっていた。それでも、ぎりぎりの応力状態にある断面では、鉄筋を考慮するとしないのでは、許容値を満足したり、満足しなかったりしたものだから、どんな場合でも考慮すべきではないかと大いに迷った時期がある。今では、設計方法全体の「良い加減さ」が分かるようになったためか、かなりの割り切りが許容できるようになった。

5. おわりに

四半世紀前からPC橋の設計法は大幅に変わったであろうか。否である。コンクリート橋の設計に残された大きな課題は、①PC-PPC（PRC）-RCの一貫した設計法の確立であり、また、②実構造物におけるクリープ・乾燥収縮の影響評価であると著者は考えている。これらに対して何もなされていないわけではなく一部の人は果敢にチャレンジしていることも承知している。しかしながら、この2つの課題は、個人のレベルで解決できる問題ではない。最適解は無理としても官学が納得する解を見出し、それを一般に普及させるまでを計画的に行う必要がある。最終的には産も加わり、官学産が一体となったプロジェクトとしてぜひこれらの問題を解決していただきたいと願う次第である。

【2012年8月23日受付】