

特集

レラクセーション

# PC鋼材のレラクセーションがプレストレス 損失量におよぼす影響に関する検討

PC鋼材委員会  
レラクセーション分科会

## PC鋼材委員会構成

委員長	岡田 清 (京都大学)	委員	山家 馨 (ピー・エス・コンクリート(株))
副委員長	六車 熙 (京都大学)	〃	福本 善一(オリエンタルコンクリート(株))
委員	小柳 洽 (岐阜大学)	〃	大西 輝哉 (住友建設 (株))
〃	鈴木 計夫 (大阪大学)	〃	山下 幸弘 (富士ピー・エス・コンクリート(株))
〃	加藤 茂美 (芝浦工業大学)	〃	山崎 隆雄 (高周波熱錬 (株))
〃	小林 和夫 (京都大学)	〃	和光 賢二 (鈴木金属工業 (株))
〃	(故)国広 哲男 (土木研究所)	〃	田中 義人 (神鋼鋼線工業 (株))
〃	岡本 伸 (建築研究所)	〃	坂村 果 (住友電気工業 (株))
〃	青戸 章 (鉄道技術研究所)		

## 目 次

1. 緒 言
2. PC鋼材の純レラクセーションに関する検討
  - 2.1 定義および基本的特性
  - 2.2 測定方法
  - 2.3 諸外国のPC鋼材規格に規定されているレラクセーション値
  - 2.4 各種実用PC鋼材のレラクセーション曲線
  - 2.5 初期荷重とレラクセーションの関係
  - 2.6 レラクセーション値に及ぼす温度の影響
  - 2.7 ひずみ変動のある場合のレラクセーション挙動
3. 純レラクセーション曲線の関数表現と長期レラクセーション値の推定
  - 3.1 PC鋼材の純レラクセーション曲線の関数式
  - 3.2 PC鋼材のレラクセーションおよびコンクリートのクリープの多項 $e$ 関数表示
  - 3.3 純レラクセーション曲線の多項 $e$ 関数表示の例
  - 3.4 長期純レラクセーション値の推定
4. PC鋼材レラクセーションとコンクリートのクリープ、乾燥収縮の相互作用を考慮したプレストレス減退量の解析
  - 4.1 概 説
  - 4.2 コンクリートのクリープ、乾燥収縮とPC鋼材レラクセーションの相互作用によるプレストレス力減退解析方法
  - 4.3 本項のまとめ
5. 各国設計基準におけるレラクセーション値の取扱いについて
  - 5.1 フランスPC設計指針におけるプレストレス減退計算式
  - 5.2 CEB-FIP 国際指針の計算法
  - 5.3 プレストレス減退の PCI 計算指針
6. 実用構造物におけるプレストレス減退量測定例
7. あとがき

## 1. 緒 言

プレストレストコンクリートの導入プレストレスは、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮、PC鋼材のリラクゼーションによって時間の経過とともに減少することは周知のとおりである。このうちPC鋼材のリラクゼーションによる影響については、従来、導入プレストレス力からリラクゼーションによるPC鋼材の引張力の減退を単純に差引くことによって考慮されている。一方、PC鋼材のリラクゼーション現象についての長時間測定試験や、その進行過程についての調査、研究が各所で行われるにつれ、リラクゼーションに関する現行の各種の規定や設計値あるいはその取扱い方法について再検討すべきであるとの論議が盛んに行われるに至った。このような情勢を背景として、PC鋼材のリラクゼーション現象についての再検討を行い、これとコンクリートのクリープおよび乾燥収縮を考慮したプレストレス力減退の推定に関して、必要あらば設計上の新提案をも行うことを目的として、当協会の技術委員会の下に昭和50年6月にリラクゼーション委員会が設立され、研究者、PC鋼材メーカー、施工技術者の側をふくめ、各方面から検討を加えることとした。その後同委員会は昭和51年1月より、PC鋼材委員会のリラクゼーション分科会として従来の活動をそのまま継承し、現在までに18回にわたり討議を行ってきた。本報告はこの分科会におけるこれまでの成果をとりまとめたもので、検討された主な項目はつぎのようなものである。

- (1) 各種PC鋼材の純リラクゼーションの基本的性状
- (2) 見かけのリラクゼーションによるプレストレス減退量の解析方法に関する検討
- (3) 実際構造物におけるプレストレス減退量
- (4) リラクゼーション曲線の関数表現方法についての検討

すなわち、PC鋼材の各種リラクゼーション測定資料の再検討と再整備を行うとともに、コンクリート部材中のPC鋼材がコンクリートのクリープ、乾燥収縮の影響の下に示すリラクゼーション挙動の合理的解析法、またそのために必要な長期リラクゼーション値推定のための関数表現法について検討したものである。必要資料をなるべく豊富に提示し、研究上および実際設計上参考となるよう努めた。(委員長 岡田 清)

## 2. PC鋼材の純リラクゼーションに関する検討

### 2.1 定義および基本的特性

プレストレストコンクリートの緊張材として用いられるPC鋼材は、その鋼材の引張強さの60~70%または降伏点の70~80%といった高い引張応力に常時緊張されているので、常温の範囲内においてもリラクゼーション現象が発生しプレストレス減少の原因となる。

このリラクゼーションとは応力緩和(ストレス・リラクゼーション)ともいわれるもので、全ひずみ一定の条件下で負荷された部材の応力が時間の経過とともに減少していく現象のことである。PC鋼材の場合、リラクゼーションといえば当然引張リラクゼーションのことであり、その大きさを表わすものとしてリラクゼーション値、すなわち一定温度下で初期荷重を載荷し、そのときのひずみを一定に保持する条件の下でえられた荷重の減少量の初期荷重に対する百分率で表わされる値がもっぱら用いられている。また用語に関しては、リラクゼーションとか応力緩和といった表現がとられる場合もあるが、土木学会および日本建築学会においてはリラクゼーションとすることで統一されている。

PC鋼材のリラクゼーションは、一般に載荷直後の短時間の間は急速に現われ、時間の経過とともに次第に一定時間当りに増進する量が小さくなる傾向を示し、両対数目盛でリラクゼーション値と経過時間との関係を表わした場合、載荷後ほぼ100時間を経過した以降は直線または折線で近似しうる推移を示す。またリラクゼーションの大きさは、PC鋼材の種類や製法によって異なるだけでなく、初期荷重の大きさ、初期荷重の載荷速度、温度、プレストレッチングの有無などによっても影響される。

PC鋼材をリラクゼーションの大きさの面から分類すると、リラクゼーションの大きい順に次のように大別される。

#### PC硬鋼線

PC鋼線およびPC鋼より線(ブルーイング材)

細径PC鋼棒あるいはバイナイトクエンチPC鋼材

太径PC鋼棒

低リラクゼーションPC鋼材(ホット・ストレッチング材)

PC鋼線やPC鋼より線は、ストレイン・テンパリングともホット・ストレッチングともいわれる低リラクゼーション化処理、すなわち通常のブルーイング(stress-relieving)の代りに、一定の張力あるいは一定の塑性引張ひずみを加えた状態での低温熱処理を施すことによってリラクゼーション特性を改善することができる。

初期荷重が大きければ当然リラクゼーションは大きく現われ、それがPC鋼材の弾性限をこえる場合には、リラクゼーションは急激に増大する。また一般に広く使用

されているPC鋼線、PC鋼より線およびPC鋼棒においては、初期荷重が引張荷重の50%以下であると、レラクセーションは極めて小さく、プレストレストコンクリート構造物の設計計算においてその影響を無視しても実用上差支えない程度のもとなる。温度もレラクセーションに大きな影響を及ぼす要因であり、PC鋼材が曝されている温度が高ければ高いほど大きなレラクセーションが現われる。初期荷重の載荷が緩慢であると、載荷中にもレラクセーションが現われるが、これは引続く載荷によって打消され、初期荷重載荷後に現われるレラクセーションは載荷速度の早い場合に比して小さくなる傾向が認められる。またプレストレッチングした場合には一般にレラクセーションは小さくなる傾向にある。

さらにPC鋼材がプレストレストコンクリートの緊張材として使用されている実態においては、プレストレストコンクリート部材がコンクリートのクリープおよび乾燥収縮によって経時的に変化するため、ひずみ一定の条件ではなく、ひずみが経時的に変化する条件下での変則レラクセーションの挙動が問題となる。

これらレラクセーションの基本的特性については、以下の各項において詳しく説明する。なおPC硬鋼線は特殊な用途に限られたものであり、以下の各項において報告される各種測定試験結果は主としてブルーイング処理またはホット・ストレッチング処理されたPC鋼線に関するものである。

## 2.2 測定方法

レラクセーションの測定方法に関しては、JIS Z 2276「金属材料の引張りレラクセーション試験方法」<sup>1)</sup>においてPC鋼材も含めた金属材料全般に対する引張りレラクセーション試験方法が規定されているほか、PC鋼材に関するJIS G 3536「PC鋼線およびPC鋼より線」<sup>2)</sup>、JIS G 3109「PC鋼棒」<sup>3)</sup>およびJIS G 3538「PC硬鋼線」<sup>4)</sup>においても測定方法に関する規定が設けられている。

しかし、これらPC鋼材に関するJISにおいて規定されているものは、製品の品質検査を目的とした10時間レラクセーション値を測定するためのものであり、レラクセーションの特性を把握するための長時間レラクセーション試験に対しては不十分である。また、JIS Z 2276「金属材料の引張りレラクセーション試験方法」は鉄鋼材料のみでなく非鉄金属材料も含めた金属材料全般を対象とし、常温から1000°Cまでの高温領域に至る幅広い試験温度下での試験方法について定めたものであり、PC鋼材を対象とした場合にも十分規準にしようものであるが、対象が広範囲であるがためにPC鋼材のレラクセーションの試験に当てて定めておくことが好ましい負

荷速度などの特殊な条件に関しては規定されていない。

一方、レラクセーション試験方法を世界各国共通のものにするという趣旨のもとに、RILEM-FIP-CEBが試験方法の標準化について検討を行い、1970年に合同のspecificationを作成し、1973年に若干の改訂を行っている。また、1977年にはISOが規格化の動きをみせている。PC鋼材のレラクセーション試験についても基本的にはJIS Z 2276に従うものであるが、前述のようなPC鋼材独自の特性を考慮した試験条件をも規定するため、上記のRILEM-FIP-CEBのJoint Committeeによるspecificationを参考にし、土木学会と日本建築学会の間で「PC鋼材の長時間レラクセーション試験方法(案)」<sup>5)</sup>が審議され、それぞれの学会の規準として承認されている。

PC鋼材のレラクセーションは、前項にも述べられているように、初期荷重、試験温度、初期荷重の載荷速度あるいはプレストレッチングなどによって影響を受ける。また、測定される荷重減少も常温下においては一般に初期荷重に対してかなり小さいものであるから、試験機の精度、荷重の検出精度、ひずみの変動幅などについても厳しい条件を設ける必要がある。これら試験条件に関し「PC鋼材の長時間レラクセーション試験方法(案)」では概要以下のように定めている。

初期荷重：規格引張荷重の70%

試験機：

つかみ装置：試験片を確実に把握し、試験片に軸方向荷重のみを伝え、ねじりや曲げの力を与えない構造のもの。

初期荷重精度：載荷能力100t未満  
……………設定荷重±1%  
載荷能力100t以上  
……………設定荷重±2%

荷重検出精度：初期荷重の0.1%以下  
載荷速度：初期荷重を1分間に $20 \pm 5 \text{ kg/mm}^2$ の割合で載荷する能力をもつもの。  
ひずみ変動： $25 \times 10^{-6}$ 以上のひずみ変動を与えないもの。

試験片：原則として切削などの加工を施さないもの。

標点距離 { PC鋼線、鋼棒…直径の40倍以上  
PC鋼より線……よりピッチの2倍以上  
ただし、この値が400mmをこえる場合は400mmとしてよい。また、試験機のつかみ装置から標点距離の一端までの距離は50mmとする。

試験時温度： $20 \pm 2^\circ\text{C}$ を標準とする。

初期荷重の載荷：初期荷重は連続的に、または段階的

に1分間に $20 \pm 5 \text{ kg/mm}^2$ の割合で  
 載荷し、その荷重を $120 \pm 2$ 秒間保  
 持した後測定を開始する。

試験期間：120時間または1000時間測定を原則  
 とする。

レラクセーション試験機としては、テコ式と油圧式の  
 ものがあるが、大半のものは自動記録装置を備えた送  
 錘型テコ式レラクセーション試験機で、油圧式のものは一  
 般に大荷重載荷用に限られている。また、簡便試験装置  
 としては振動測定方式のもの、あるいはロードセル測定  
 方式のものもある。写真-2.1にテコ式レラクセーシ  
 ョン試験機を示す。

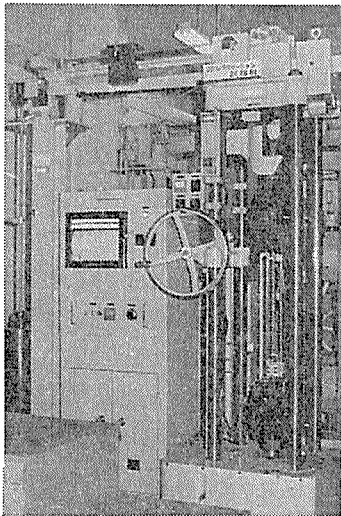


写真-2.1 テコ式レラクセーション試験機

初期荷重に関しては、PC鋼材のJISでは規格降伏  
 点の80%に相当する荷重となっているが、「PC鋼材  
 の長時間レラクセーション試験方法(案)」ではRILEM-  
 FIP-CEBの規準に合わせ、かつ土木学会制定のPC標  
 準示方書ならびに日本建築学会制定のPC設計施工規準  
 に規定されているPC鋼材の定着時許容引張荷重にも合  
 わせ、PC鋼材の規格引張荷重の70%としたものであ  
 る。

PC鋼材のレラクセーション規格値は、前記のPC鋼  
 材のJISにそれぞれ定められているが、いずれも品質  
 検査のための10時間レラクセーション値であって、長  
 時間、例えば1000時間でのレラクセーション値といっ  
 たものは規定されていない。当該のJISによる10時間  
 レラクセーション値の規格は、初荷重を規格降伏点の  
 80%に相当する荷重とした場合、下記のように定められ  
 ている。

PC硬鋼線	{	A種…………… 5.5%以下
		B種…………… 5.0%以下
		C種…………… 4.5%以下

PC鋼線・PC鋼より線… 3.0%以下

PC鋼棒…………… 1.5%以下

また、これらJISにおいては低レラクセーション材  
 の定義ならびに規定もなされるには至っていない。しか  
 し、これらPC鋼材に関するJISにおいても、10時間  
 レラクセーション値がレラクセーション特性を的確に示  
 すものでないことは認識されており、その解説において  
 10時間レラクセーション値の測定を省略し、代わりに100  
 時間~1000時間レラクセーション値を測定すべきである  
 との方向を示唆している。このような点からも土木、建  
 築学会合同で定められた「PC鋼材の長時間レラクセー  
 ション試験方法(案)」に基づいた1000時間レラクセー  
 ション試験を定期的実施していくことが望まれる。

### 2.3 諸外国のPC鋼材規格に規定されているレラク セーション値

諸外国のPC鋼材規格に規定されているレラクセーシ  
 ョン値をまとめて表-2.1に示す。なお西ドイツにはP  
 C鋼材のDINがなく、鋼材メーカーがPC鋼材の品質  
 認定を州政府から得るための試験過程で長時間のレラク  
 セーション試験が要求され通常 $0.7 \sigma_{pu}$  ( $\sigma_{pu}$ は鋼材の  
 引張強さ)、 $20^\circ\text{C}$ 、1000hrのレラクセーション値がそれ  
 ぞれのPC鋼材毎に保証されるようになっている。そう  
 した値の例も参考までに表-2.1の末尾に加えた。

これらの数値からわかるように、PC鋼材のレラクセ  
 ーション値は少なくとも1000hr値ぐらいが必要であ  
 ると考えられている。PC鋼材を使用する立場からい  
 えばさらに長期間の測定データが望まれるが、試験設備の  
 制約もあって、こうしたデータは極めて少ないのが実情  
 であるので、本邦でもさらに多くの長時間レラクセーシ  
 ョンの測定が望まれる。

### 2.4 各種実用PC鋼材のレラクセーション曲線

PC鋼材のレラクセーション測定を前記のような統一  
 試験方法により、また精度の高い自動記録装置付きの送  
 錘型テコ式試験機を用いて行っても、初期荷重の実引張  
 荷重あるいは実降伏点に対する比が一定でないことなど  
 により、えられる結果には若干のばらつきがでてくる。  
 しかし、2.1項で記述したように、PC鋼材の種類によ  
 ってレラクセーション値の範囲は類別することができる。  
 前記の「PC鋼材の長時間レラクセーション試験方  
 法(案)」により測定した各種PC鋼材のレラクセーシ  
 ョン測定値を図-2.1に示す。1000時間レラクセーシ  
 ョン値は一般に表-2.2のような範囲にある。なお参考  
 までに、これらPC鋼材の引張強さの範囲もあわせ添記  
 しておく。

表-2.1 諸外国のPC鋼材のレラクセーション規格値

規格名・番号	種 別	1 000 hr レラクセーション値		3 000 hr レラクセーション値		備 考
		初 期 応 力		初 期 応 力		
		70% $\sigma_{pu}$	80% $\sigma_{pu}$	70% $\sigma_{pu}$	80% $\sigma_{pu}$	
ASTM A421 ('74) PC鋼線	normal low relaxation*	—(%) 2.5	—(%) 3.5	—(%) —	—(%) —	アメリカ
ASTM A416 ('74) 7本よりPC鋼より線	normal low relaxation*	— 2.5	— 3.5	— —	— —	アメリカ
BS 2691 ('69) PC鋼線	normal low relaxation	5 2	8.5 3	— —	— —	イギリス**
BS 3617 ('71) 7本よりPC鋼より線	normal low relaxation	7 2.5	12 3.5	— —	— —	イギリス**
BS 4757 ('71) 19本より PC鋼より線	Treated {normal low relax. As Spun***	7 2.5 9	12 3.5 14	— — —	— — —	イギリス**
AS 1316 ('74) PC鋼線	normal low relaxation	6.5 2	8.5 3	— —	— —	オーストラリア
AS 1311 ('74) 7本より PC鋼より線	normal low relaxation compact****	7 2.5 2.5	12 3.5 3.5	— — —	— — —	オーストラリア
AS 1312 ('74) 19本より PC鋼より線	As strand*** normal low relaxation	9 7 2.5	14 12 3.5	— — —	— — —	オーストラリア
AS 1313 ('74) PC鋼棒		4	—	—	—	オーストラリア
SIS Norm	normal	5 (ただし 65% $\sigma_{pu}$ )		—	—	スイス
NF PC鋼線 丸, 平滑線	RN† BR†† TBR†††	8 4 2	— — —	— 5 2.5	— — —	フランス
NF PC鋼線, 異形, 非平滑 線及び3本より鋼より線	RN† BR†† TBR†††	9 5 2.5	— — —	— 6 3	— — —	フランス

注 \* 低レラクセーションPC鋼材を定義するのに、サブメントの項でこれらの値を与えている。  
 \*\* BSのみ初期応力の基準は特性引張強さ (Specified characteristic tensile strength) である。  
 \*\*\* より線のみまでブルーイングしていないもの  
 \*\*\*\* ダイフォームのごとき処理をなされたもの  
 † Relaxation normal 普通級レラクセーション  
 †† Basse relaxation 低レラクセーション  
 ††† Tres basse relaxation 極低レラクセーション

表-2.2 1 000 時間レラクセーション値の範囲

鋼 種	レラクセーション値の範囲 (1 000 hr %)	引張強さの範囲 (kg/mm <sup>2</sup> )
一 般 PC鋼線・鋼より線 細径PC鋼棒 太径PC鋼棒	4~6 2~4 1~3	160~190 140~160 100~130
低レラクセーション PC鋼線・鋼より線	0.5~1.5	160~190

また、図-2.2 は図-2.1 のレラクセーション曲線を片対数目盛りで、図-2.3 は両対数目盛りで示したものである。

西ドイツのPC鋼材のレラクセーション保証値の例

製 造 法	強度規格, 寸法	レラクセーション値 70% $\sigma_{pu}$ 1 000 hr 20°C (%)
熱間圧延, 冷間ストレッチ, ブルーイング	85/105~110/125 14~36 $\phi$	3.3
焼入れ焼もどし	135/150~145/160 5~16 $\phi$ 他	1.8
冷間引抜ブルーイング	140/160~160/180 5~12.2 $\phi$	7.5
7本よりPC鋼より線	160/180 9.3~15.3 $\phi$	7.5, 3.5, 2.

注) 強度規格の数値は降伏点強度および引張強さを示す。

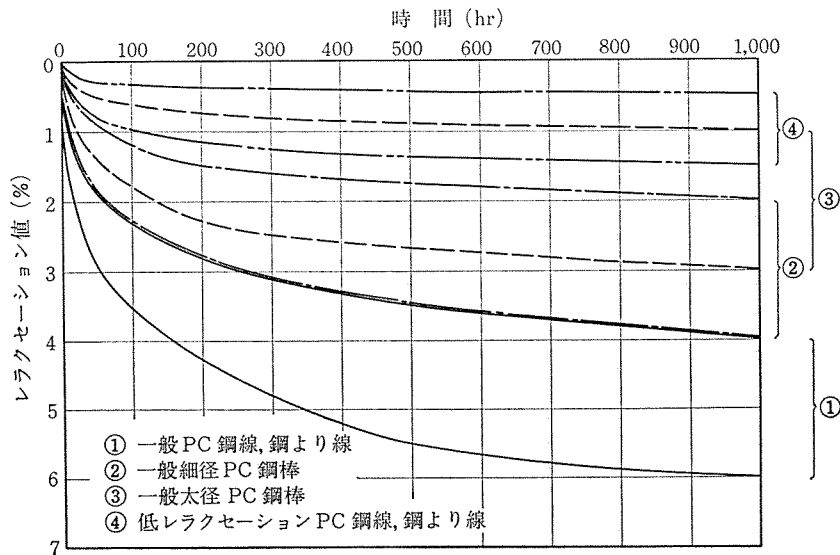


図-2.1 各種実用PC鋼材のレラクセーション曲線範囲 (普通目盛)

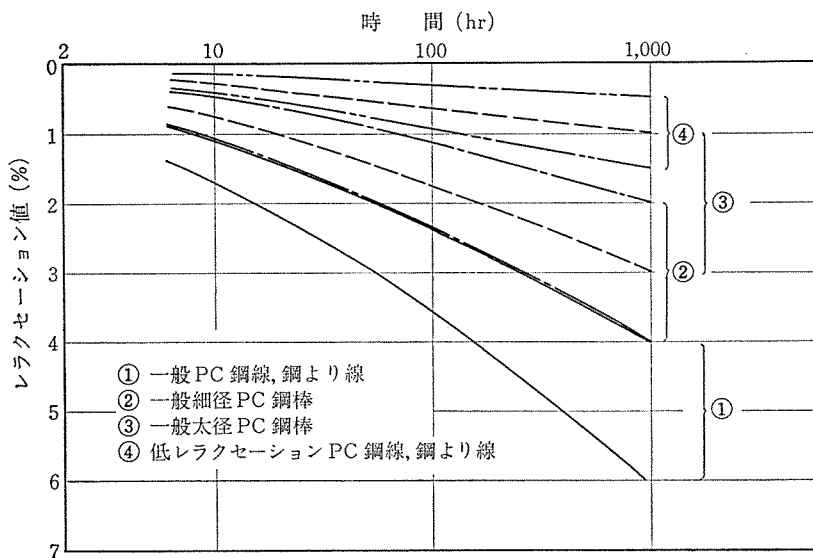


図-2.2 各種実用PC鋼材のレラクセーション曲線範囲 (片対数目盛)

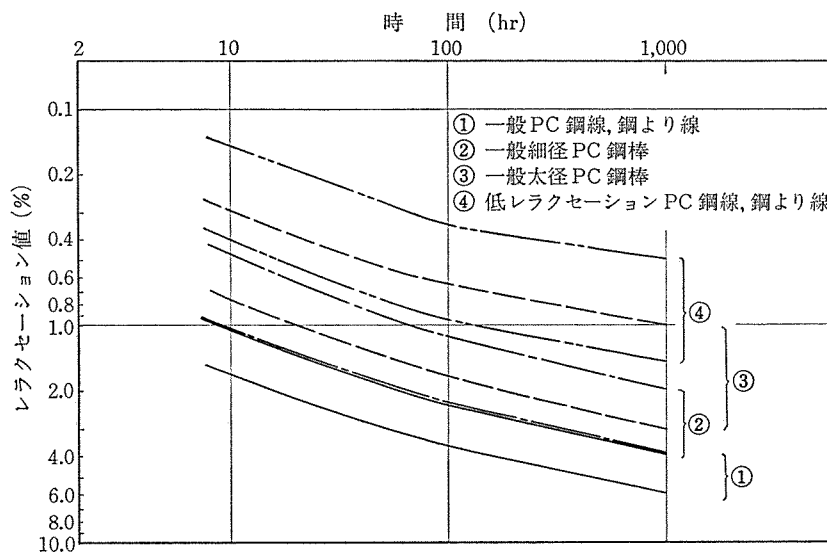


図-2.3 各種実用PC鋼材のレラクセーション曲線範囲 (両対数目盛)

2.5 初期荷重とレラクセーションの関係

2.5.1 初期荷重の変化によるレラクセーション曲線の挙動

PC鋼材に規定された応力を負荷しその歪を一定に保持したとき、時間の経過とともに生ずる応力の減少、いわゆるレラクセーション現象は、PC鋼材の材質、製造方法および機械的性質によりその挙動を異にするが、さらに外的な要因として測定の際の初期荷重の荷重速度、初期荷重の引張強さに対する割合、試験温度があり、特に初期荷重の割合と試験温度のレラクセーション値に及ぼす影響は大きいことが知られている。本項では初期荷重の及ぼす影響としてPC鋼材の持つ引張強さに対する初期荷重の割合とレラクセーション値の関連をとりあげる。

PC構造物の設計上必要とされるレラクセーション値は構造物に導入される終局の応力を決定する要素であるため、初期荷重の及ぼす影響を調べる場合もでき得る限り長時間の測定値を基礎とすることが望ましいが、多くの鋼種について統一した条件のもとに測定した試験資料がとぼしいので、PC鋼材の実測引張強さ( $\sigma_{pu}$ )に対する初荷重比を  $0.5\sigma_{pu}$  ないし  $0.8\sigma_{pu}$  の範囲に選び「長時間レラクセーション試験法(案)」<sup>5)</sup> に準じて 120 時間という限られた試験時間でレラクセーション試験を行った。したがってより長時間の試験を実施した場合には、多少異なる傾向が生じ得ることは予想される。

レラクセーション現象は初期荷重直後に著しい応力減少を生じ、時間の経過とともにこの減少率が低下する傾向を示すが、初期荷重の実測引張強さに対する比率が大きくなると生ずるレラクセーションロス急激に増加することが知られている。例えば 12.4 mm PC鋼より線について、実測引張強さに対する初荷重比を 0.5 ないし  $0.8\sigma_{pu}$  と変えて測定を行った結果に基づくレラクセーション曲線の変化を、普通目盛のグラフで示したのが図-2.4 である。これらの曲線の変化は初期荷重比の

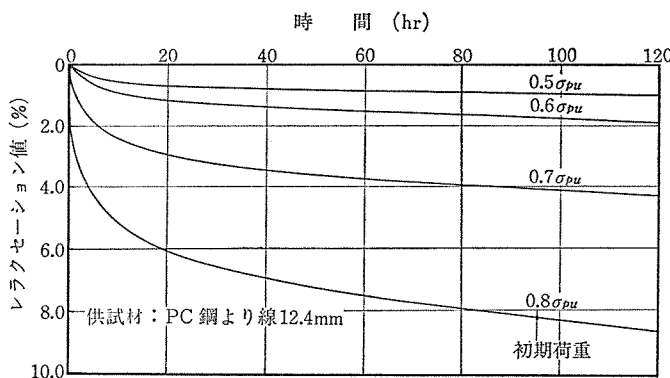


図-2.4 異なる初期荷重に対するレラクセーション曲線 (普通目盛)

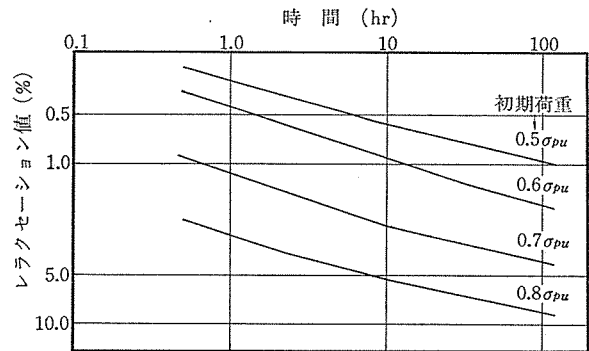


図-2.5 異なる初期荷重に対するレラクセーション曲線 (両対数目盛)

レラクセーションに与える影響の大きさを概念的に示すものであり、またこの傾向はその他のPC鋼線、PC鋼より線および各種のPC鋼棒についても共通していえる。

図-2.5 は図-2.4 のレラクセーション曲線を両対数目盛で示したもので、ごく初期段階を除けば長時間ではほぼ直線と仮定して差支えない。この仮定に基づき長時間レラクセーション値を推定する技法が「コンクリート構造物設計施工国際指針」<sup>6)</sup> に掲げられており詳細は 3.1 項に述べる。

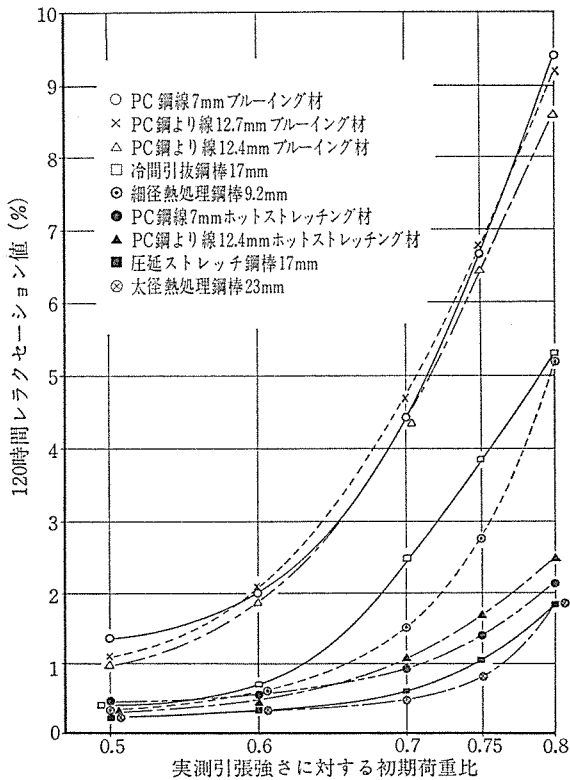
2.5.2 初期荷重比とレラクセーション値の関係

前項で述べたとおり、レラクセーション特性はPC鋼材の材質、製造工程および機械的性質の影響を受けるため現在規格化され市販されている代表的な種類のPC鋼材を選び、実際に初期荷重比を変化させてレラクセーション値を測定した。

PC鋼材の実測引張強さに対する初期荷重比と、対応する 120 時間のレラクセーション値の関係を、対象とした鋼材のそれぞれについてまとめた結果を図-2.6 に示す。これらの曲線の挙動ならびに各初期荷重比におけるレラクセーション値から、次のグループに集約されることがわかる。

- i) 伸線・ブルーイング材は鋼線、鋼より線など構成、寸法および強度に関係なく類似した曲線を示し 1 つのグループを構成する。
- ii) 冷間引抜鋼棒 (SBPR 80/95 17 mm) と細径熱処理鋼棒 (SBPD 130/145 9.2 mm) が伸線・ブルーイング材よりも低いレラクセーションの位置でグループを構成する。
- iii) 圧延ストレッチ鋼棒 (SBPR 80/105, 17 mm) と太径熱処理鋼棒 (SBPR 110/125 23 mm) は i) および ii) グループよりさらに低い位置でグループを構成する。
- iv) 低レラクセーション鋼線および鋼より線はともに同等のレラクセーション値を示して 1 グループ





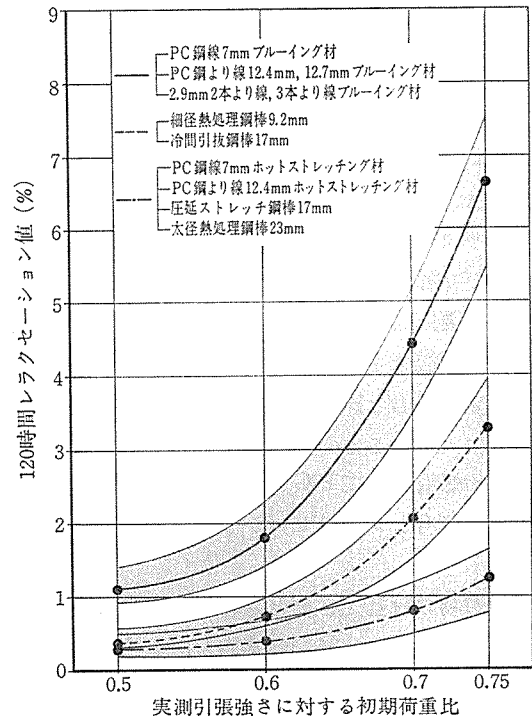
図—2.6 初期荷重比と 120 時間リラクゼーション値

プを構成し、ii) および iii) グループの中間に位置する。

低リラクゼーション鋼線、鋼より線の場合、材質製造方法とも PC 鋼棒とは異なるが、リラクゼーション特性は圧延ストレッチ鋼棒・太径熱処理鋼棒と類似していることから同一グループと見做すのが適当である。したがってこの結果から実測引張強さに対する初期荷重比と、対応するリラクゼーション値の関係を鋼種で集約すれば、次のグループに分けることが可能である。

- I. 伸線、ブルーイング処理の鋼線、鋼より線
- II. 冷間引抜鋼棒、細径熱処理鋼棒
- III. 低リラクゼーション鋼線、鋼より線、圧延ストレッチ鋼棒、太径熱処理鋼棒

上記の各グループごとのリラクゼーション値を平均し、またバラツキの範囲を考慮して表わした曲線を図—2.7 に示す。この図の示すところによると各グループとも実測引張強さに対する初期荷重比に比例してリラクゼーション値は二次曲線的に増加し、また伸線ブルーイング材は初期荷重比の低い段階ですでにその他のグループよりもリラクゼーションロスが大きいことがわかる。鋼棒の場合鋼種に関係なく初期荷重比 0.6  $\sigma_{pu}$  以下の低い応力レベルではほぼ同一のリラクゼーション値を示しており、初期荷重が 0.7 ないし 0.75  $\sigma_{pu}$  になると冷間引抜鋼棒、細径熱処理鋼材のリラクゼーション値は増加し



図—2.7 グループ別に平均した初期荷重-リラクゼーション関係図

て伸線ブルーイング材と圧延ストレッチ鋼棒・太径熱処理鋼棒および低リラクゼーション材との中間に位置するに至る。

「コンクリート構造物設計施工国際指針」<sup>9)</sup>によるとリラクゼーション試験の結果がわずかしかない場合、初期荷重比が 0.5  $\sigma_{pu}$  の値で水平初線のある放物線に従ってリラクゼーション値が変化すると仮定すれば、0.8  $\sigma_{pu}$  のときの値からリラクゼーションの法則を近似的に求めることができるとしている。一方リラクゼーションが生じはじめる最小の初期荷重は 0.5  $\sigma_{pu}$  よりもさらに低く、しかもリラクゼーションロス初期荷重に対して直線的に変化するとの考え方もある。

上記リラクゼーションの実測値をそれぞれの初期荷重比に関して各グループごとに平均した結果に基づき 0.5  $\sigma_{pu}$  を水平接線すなわち頂点とし、かつ 0.75  $\sigma_{pu}$  のリラクゼーション値を満足する放物線として求めた曲線を図—2.8 に示す。「コンクリート構造物設計施工国際指針」の主張する 0.8  $\sigma_{pu}$  を規準として同様に作図すると、実測値よりも上位に曲線が位置して近似曲線と見なすことができず 0.75  $\sigma_{pu}$  におけるリラクゼーション値を規準とすることにはきわめて妥当性があり、また図—2.7 に示す実態ともよく合致することがわかる。また、このことはリラクゼーションの生じはじめる最小の初期荷重は 0.5  $\sigma_{pu}$  と仮定しても差支えないことを示している。

土木学会のプレストレストコンクリート設計施工示方

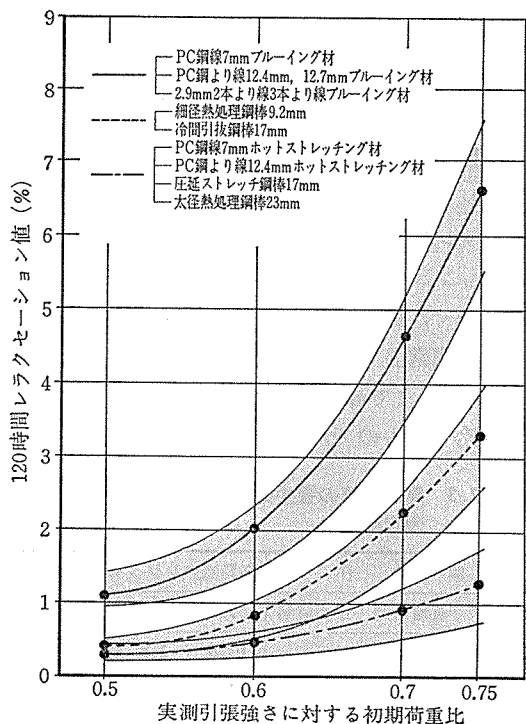


図-2.8 2次曲線化した初期荷重比-レラクセーション関係図

書(案)では  $0.5\sigma_{pu}$  を頂点とし、かつ  $0.75\sigma_{pu}$  を結ぶ近似放物線よりレラクセーションの中間値を推定することとしているが、120 時間レラクセーション値のみを根拠とした結果からもこの放物線則は実態に則していることが裏付けられる。

2.6 レラクセーション値に及ぼす温度の影響

PC鋼材のレラクセーションは一般に常温で測定され、それに基づく値が設計などに用いられる。2.3 で示した各国のPC鋼材のレラクセーション規定値もすべて常温における値が規定されている。しかしながら、PC鋼材のレラクセーションは、先に述べた初期応力の影響と同様、温度によってもその値は大きく変化するものである。最近原子炉压力容器や低温液化ガスの貯蔵タンクがプレストレストコンクリートで製作されるようになり、それらに用いられるPC鋼材についてはそれぞれの用途に応じて高温や低温でのレラクセーション特性を知ることが必要な場合がある。またプレテンション工法などで蒸気養生が行われる場合はPC鋼材が一時的に高温にさらされるため常温のレラクセーションと異なった傾向を示すことになる。ここでは以上のことを考慮して、PC鋼材の高温および低温におけるレラクセーション試験結果と一般的な蒸気養生条件を想定したレラクセーション試験結果を紹介し、PC鋼材のレラクセーション値の温度による影響についてまとめる。

(1) 高温・低温におけるレラクセーション値測定結果例

図-2.9 は、PC鋼線 7mm のブルーイング材とホットストレッチング材(低レラクセーション材)について、20~200°C の間のいくつかの温度で測定したレラクセーション曲線の例である。また 図-2.10 は、細径の熱処理PC鋼棒 9.2mm で同様の測定を行った結果の例である。いずれの場合も初期荷重は、PC鋼材のJIS規格に準じて、それぞれの鋼材の規格降伏荷重の80%、試験温度は、所定の温度に対して、 $\pm 2.5^\circ\text{C}$  以内に制御された条件で測定されたものである。図-2.11 は、PC鋼線 7mm とPC鋼より線 12.4mm および熱処理PC鋼棒 9.2mm について、試験温度と10 時間レラクセーション値の関係を  $-40^\circ\text{C}$  までの低温側を含めて示した

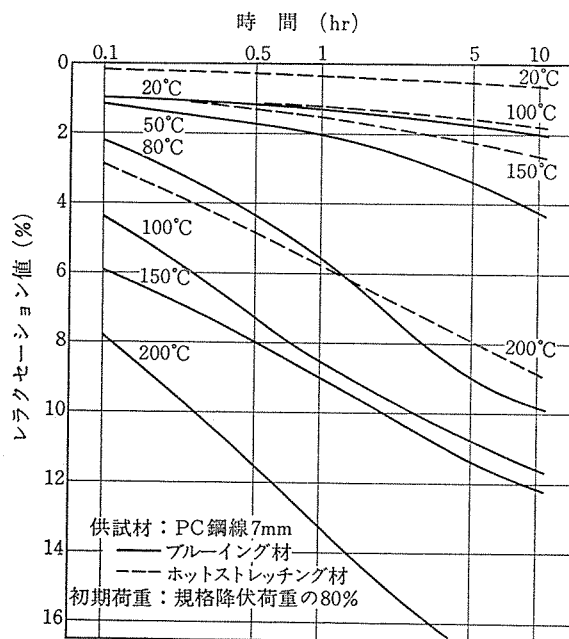


図-2.9 PC鋼線の高温レラクセーション曲線

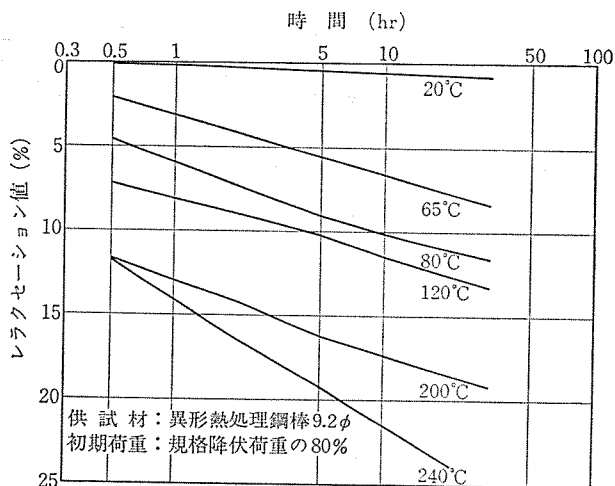


図-2.10 熱処理PC鋼棒の高温レラクセーション曲線

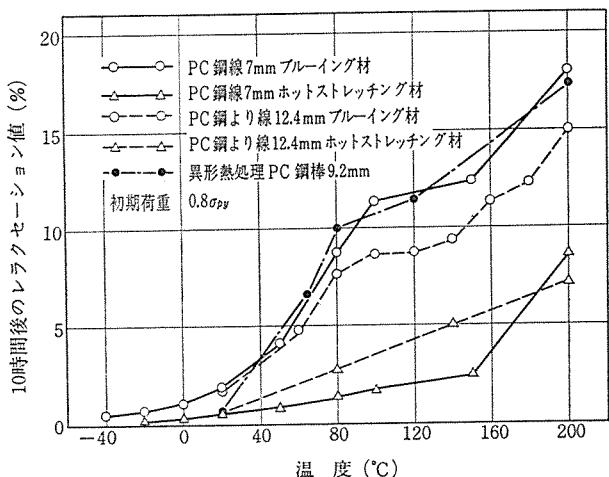


図-2.11 温度と 10 時間後のレラクセーション値の関係

ものである。PC 鋼線では時間軸を対数目盛で表わした図-2.9 において、ブルーイング材のレラクセーション曲線は常温では、上に凸の曲線であるのが、試験温度が高くなるにつれて、S 字状または、下に凸の形状の曲線になる傾向が見られ、低レラクセーション材であるホットストレッチング材では、高温でも上に凸の曲線であり、材料および温度によってレラクセーションの進行速度が異なることを示している。温度とレラクセーション値の関係では、いずれの材料とも温度の上昇とともにレラクセーション値は増加するが、PC 鋼線、PC 鋼より線のブルーイング材や熱処理 PC 鋼棒では温度上昇に伴うレラクセーション値の増加の割合が比較的大きいのに対して、ホットストレッチング材はその程度が小さく、高温においても他の鋼材の 1/4~1/3 のレラクセーション値である。常温以下の低温側では、レラクセーション

値は減少し、比較的レラクセーション値の大きい PC 鋼線ブルーイング材でも  $-40^{\circ}\text{C}$  以下では、ほとんど無視できる程度まで小さくなる。

(2) 蒸気養生条件下でのレラクセーション値測定結果

図-2.12 は、PC 鋼線 7mm のブルーイング材、ホットストレッチング材について蒸気養生条件下でのレラクセーション測定を行った結果である。試験条件は、プレテンションコンクリート枕木の製造時の条件に準じて定めたもので、供試材の引張強さの 70% の初期荷重付与後 24 時間常温でレラクセーションを測定した後、 $20^{\circ}\text{C}/\text{時}$  で  $60^{\circ}\text{C}$  まで昇温、その後 7 時間  $60^{\circ}\text{C}$  に保持したあと、炉冷したものである。

表-2.3 異形鋼棒の養生条件下のレラクセーション測定結果

試験条件			各時点のレラクセーション値(%)			
加熱温度	昇温時間	保持時間	A	B	C	D
$60^{\circ}\text{C}$	3 時間	5 時間	0.29	1.9	3.9	3.1
$70^{\circ}\text{C}$			0.29	2.6	5.4	4.1
$80^{\circ}\text{C}$			0.32	4.0	7.2	5.5
$70^{\circ}\text{C}$	2 時間 3 時間	5 時間	0.48	1.46	5.66	4.96
			0.48	1.74	5.76	5.10
$80^{\circ}\text{C}$	3 時間	3 時間	0.31	2.89	5.88	4.49
		5 時間	0.25	2.78	6.39	5.00
		10 時間	0.30	2.75	7.26	5.84

(備考)

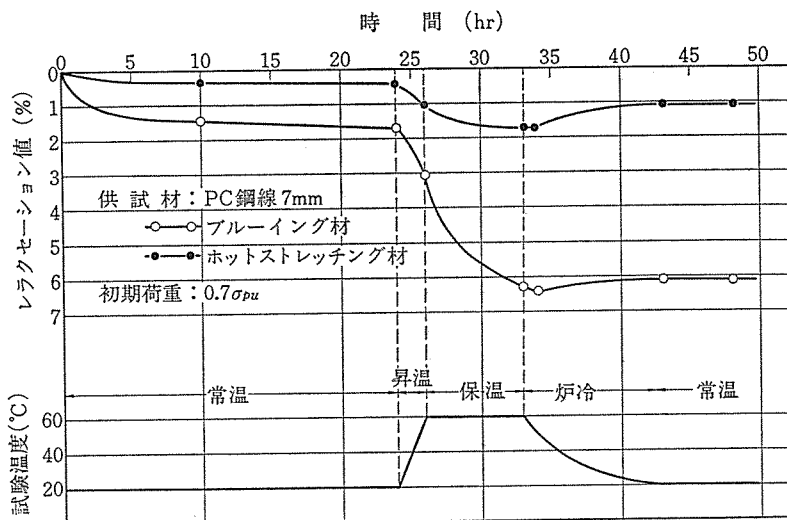
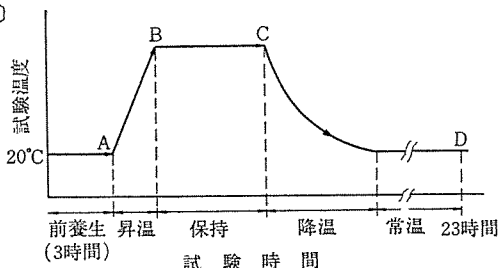


図-2.12 PC 鋼線の蒸気養生条件下でのレラクセーション曲線

表-2.3 は、プレストレストコンクリート技術協会のPCくい委員会においてコンクリートPCくいの製造時の養生条件を想定してリラクゼーション試験を行った測定結果である。この試験では加熱温度、昇温速度、保持時間について、それぞれ条件を変えて測定が行われた。供試鋼材は、異形PC鋼棒 9.2mm D種で、初期荷重は降伏点荷重の80%に相当する荷重である。

これらの結果から明らかなように、蒸気養生のような一時的なものでも昇温時、保温時の温度影響によるリラクゼーション値の増加は相当大きくなる。前項の一定温度下の測定結果と同様低リラクゼーション材であるホットストレッチング材は、他の材料にくらべて温度による影響は小さく、蒸気養生中のリラクゼーションによる応力減少は少ないと考えられる。図-2.12 で保温終了後、冷却時のリラクゼーション曲線がいずれもわずかながら、リラクゼーション値減少の方向に変化しており表-2.3の結果でも保温終了時、Cの値よりも、冷却完了時、Dの値の方が小さな値になっているが、これはリラクゼーション測定時の変位検出用ロッドと供試材の熱膨脹係数のわずかな差による影響と考えられており、リラクゼーション現象に可逆的な現象が含まれていることを示すものではない。したがって 図-2.12 の冷却時のリラクゼーション曲線のもどりの部分を除いて考えれば、保温終了後のリラクゼーションの進行速度は、非常に小さくとも言える。また表-2.3の結果でわかるように蒸気養生時の加熱温度や保持時間は当然のことながらリラクゼーション値に大きく影響を及ぼすが、昇温時間の多少の違いはあまり大きな影響を及ぼさないようである。

## 2.7 ひずみ変動のある場合のリラクゼーション挙動

### 2.7.1 見かけのリラクゼーション

前項までに述べたPC鋼材のリラクゼーション挙動は、PC鋼材に初期荷重を負荷した後、鋼材のひずみを一定に保ってその後の荷重低下を測定したもので、一般には温度条件一定のもとに実験室的に測定される純粹のリラクゼーションに関するものである。一方、PC鋼材が実際のプレストレストコンクリート中で緊張材として使用される場合は、各種要因の影響により鋼材のひずみ一定の条件は保たれないのが実情である。すなわち、コンクリートは乾燥およびクリープによって時間の経過とともに収縮するので、コンクリートと一体となっているPC鋼材もそれとともに収縮し、初期に緊張することによって与えられたひずみが減少することになる。その結果鋼材の応力もリラクゼーションのみによるよりも大きく減少すると考えられる。前述したとおり鋼材のレ

ラクゼーションは初期荷重の影響を受けるが、このことはある時点で鋼材に作用している応力の大小によってそれ以降のリラクゼーション挙動が異なることを意味する。このようにコンクリート中でのPC鋼材のリラクゼーション挙動は純粹のリラクゼーションとは異なるものになるのを、これを見かけのリラクゼーションと称している。

これらの関係を模式的に示すと 図-2.13 のようになる。

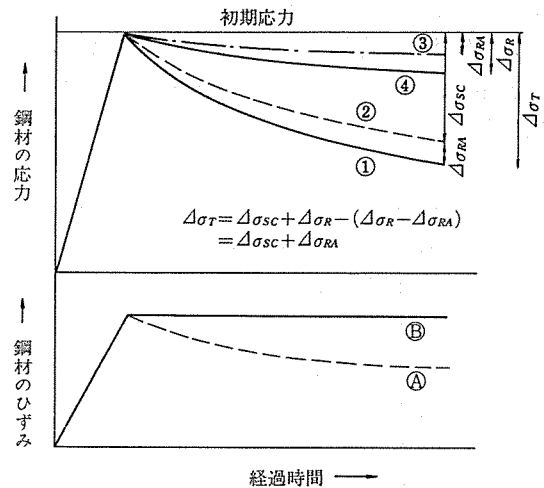


図-2.13 コンクリート中でのPC鋼材の応力変化

- 曲線①：コンクリート中のPC鋼材の全応力変化
- 曲線②：コンクリートのクリープ、乾燥収縮によるひずみ変化(曲線A)に対応する応力変化
- 曲線③：全応力変化の内見かけのリラクゼーション分の応力変化
- 曲線④：ひずみ一定の場合(曲線B)の純リラクゼーションによる応力減少
- $\Delta\sigma_T$ ：全応力減少量
- $\Delta\sigma_{SC}$ ：クリープ、乾燥収縮に対応する減少量
- $\Delta\sigma_{RA}$ ：見かけのリラクゼーション分の応力減少量
- $\Delta\sigma_R$ ：純リラクゼーションの場合の応力減少量

プレストレストコンクリート部材においてプレストレスが時間の経過とともにどの程度減少するかという、より実用的な検討を行う場合には、このようなPC鋼材の見かけのリラクゼーション挙動を知ることが一つの重要な要素となる。現在まで見かけのリラクゼーションについて理論的検討はいくつか行われているが<sup>7)8)9)</sup>、実験的にその挙動を確かめたデータは少なく、十分に明らかにされているとは言い難いのが現状である。ここでは当分科会で検討が行われた資料に基づき若干の実験結果を紹介する。

### 2.7.2 見かけのリラクゼーションについての実験結果例

#### (1) 段階的にひずみ変化を与えたリラクゼーション試験

##### a) 鋼線を用いた実験

本実験は予め定めたひずみ変化に対応する応力を段階

的に減少させながらPC鋼線のレラクセーションを測定し、ひずみ一定条件の純レラクセーション曲線との比較を行ったものである。

供試材料は直径 7 mm, 引張強さ 171 kg/mm<sup>2</sup>, 降伏点応力 152.7 kg/mm<sup>2</sup> の PC 鋼線である。コンクリートの乾燥収縮, クリープによるひずみ変化量の設定は CEB/FIP のコンクリート 構造物設計施工国際指針案 (1969) に基づいて計算により定めた。すなわち, つぎに示す (2.1) 式, (2.2) 式を用いて相対湿度, 寸法効果, プレストレス力などの条件を種々変えて計算した結果のうち, ひずみ変化が最大になる場合と最小になる場合の 2 水準を採用した。ひずみ変化は 1 000 時間の試験期間中に 4 段階に分けて与えられ, その時期および量は 表 2.4 に示すとおりである。

$$\epsilon_r = \psi \cdot \alpha_r \cdot \beta_r (1 - 0.10w_0)(\rho_{tu} - \rho_{ti}) \dots\dots (2.1)$$

$$\epsilon_f = \epsilon_e \cdot \varphi_N \cdot \varphi \cdot \rho \dots\dots (2.2)$$

- ここで  $\epsilon_r$ : 乾燥収縮ひずみ  
 $\psi$ : 相対湿度の影響  
 $\alpha_r$ : 乾燥収縮に対する寸法効果  
 $\beta_r$ : コンクリートの配合効果  
 $w_0$ : 鉄筋比  
 $\rho$ : 乾燥収縮進行度  
 $\epsilon_f$ : クリープひずみ  
 $\epsilon_e$ : 弾性ひずみ  
 $\varphi_N$ : クリープ係数  $\varphi_N = \varphi_0 \cdot \alpha_f \cdot \beta_f$   
 $\alpha_f$ : クリープに対する寸法効果  
 $\beta_f$ : コンクリート配合効果

$\varphi_0$ : 応力作用時のコンクリート 材令に関する補正係数

表 2.4 コンクリートの収縮ひずみ変化量と対応する応力減少量

経過時間	ひずみ変化最大の場合		ひずみ変化量小の場合	
	ひずみ変化量	応力減少量	ひずみ変化量	応力減少量
24時間 (1日)	$1.62 \times 10^{-4}$	kg/mm <sup>2</sup> 3.24	$0.51 \times 10^{-4}$	kg/mm <sup>2</sup> 1.02
168時間 (7日)	$3.25 \times 10^{-4}$	6.50	$1.02 \times 10^{-4}$	2.04
336時間 (14日)	$4.55 \times 10^{-4}$	9.10	$1.43 \times 10^{-4}$	2.86
672時間 (28日)	$6.49 \times 10^{-4}$	12.98	$2.04 \times 10^{-4}$	4.08
$\infty$ (参考)	$16.24 \times 10^{-4}$	32.48	$5.11 \times 10^{-4}$	10.22

注) 応力減少量はPC鋼線の弾性係数を  $2 \times 10^4$  kg/mm<sup>2</sup> として計算した値

試験時の初期荷重は供試材の引張強さの 65.3% で, ひずみ変化はレラクセーション試験機の負荷用重錘を表 2.4 に対応させて除去することによって与えた。図 2.14 は測定結果を示すもので, たて軸は初期応力に対する応力減少の割合 (%) を示し, よこ軸は試験時間である。図中たて軸に平行な点線で示した部分がひずみ変化に相当する応力を低下させたことを示す。また見かけのレラクセーション曲線として示したものは, 各段階ごとのレラクセーション曲線をつなぎ合した曲線である。これらの試験結果をまとめるとつぎのようなことが言える。

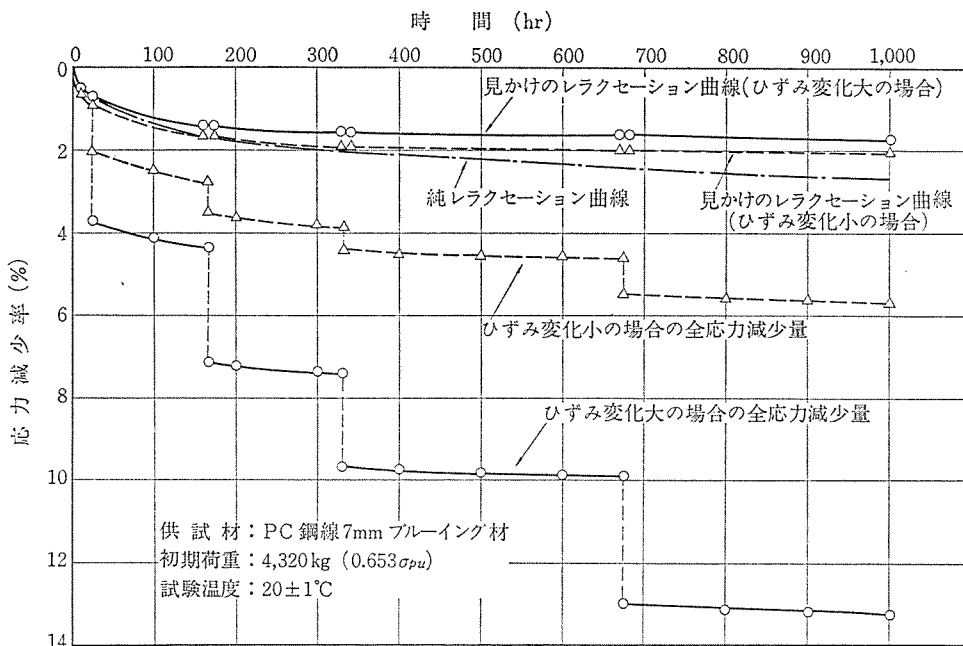


図 2.14 ひずみを段階的に変化させた時のレラクセーション曲線

- i) 見かけのレラクセーション値は純レラクセーション値に対して、ひずみ変化が最大の場合で約65%、ひずみ変化が最小の場合で約75%となる(いずれも1000時間後の値で比較)。
- ii) 見かけのレラクセーション曲線は1000時間後にはほぼ一定値に近づく傾向が見られる。
- iii) コンクリートのひずみ変化および鋼材の見かけのレラクセーションの両者を含めた総応力減少量のうち、見かけのレラクセーションによる減少分は1000時間後で10~35%程度である。

b) 異形PC鋼棒による実験例

本実験は異形PC鋼棒 9.2mmφ SBPD 130/145 を用いてコンクリートのクリープ、乾燥収縮によるPC鋼材の応力低下を加味したレラクセーション測定を行ったものである。クリープ係数の時間的変化を(2.3)式で与え、乾燥収縮量は  $\epsilon_0 = 20 \times 10^{-5}$  一定として応力減少量を(2.4)式で求めた。具体的な計算は直径600mmのプレストレストコンクリートくいを想定してそれぞれの設計値を代入して(2.5)式として求めた。

$$\varphi = \frac{0.5t}{1.5 + 0.25t} \dots\dots\dots(2.3)$$

$\varphi$ : クリープ係数,  $t$ : 時間(週)

$$\sigma_{p\varphi} = \frac{n\varphi\sigma_{ce} + E_p\epsilon_0}{1 + n \frac{\sigma_{ce}}{\sigma_{pe}} \left(1 + \frac{1}{2}\varphi\right)} \dots\dots\dots(2.4)$$

$\sigma_{p\varphi}$ : コンクリートの縮みによる応力減少量 (kg/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{ce}$ : 有効プレストレス (95 kg/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_{pe}$ : PC鋼材の有効引張力 (7500 kg/cm<sup>2</sup>).  
 $E_p$ : 鋼材の弾性係数 (2000000 kg/cm<sup>2</sup>)  
 $n$ : 弾性係数比 ( $n=5$ )

$$\sigma_{p\varphi} = \frac{6(12 + 6.75t)}{19.14 + 3.82t} \times 100 \dots\dots\dots(2.5)$$

試験は初期荷重6640kg(PC鋼棒の規格引張強さの71.6%)で15時間純レラクセーション試験を行った後(2.5)式で計算される応力分と、応力導入時の弾性短縮を想定した応力を除荷し、その後100時間間隔でひずみ変化分の応力を除荷しながら400時間まで測定を行った。結果は図-2.15に示す通りで、400時間後の見かけのレラクセーションは純レラクセーションの57%程度となった。

(2) 連続的にひずみ変化を与えた場合のレラクセーション測定例

本実験は自動追尾式レラクセーション試験機を用いて、予め定めたひずみ変化量を移動重錘の位置を連続的に変化させ供試材の応力を低下させることによって与えながらレラクセーション値の測定を行ったものである。供試材は7mmのPC鋼線と通常のブルーイング材と低レラクセーション材であるホットストレッチング材の両者を使用した。

レラクセーション試験中に与えるひずみ変化量については、断面積4160mm<sup>2</sup>の角柱の中心位置に鋼材を配置した部材を想定し、第7回FIP国際会議に発表されたR. Atallahらの論文<sup>3)</sup>の式を適用して次式により求めた。

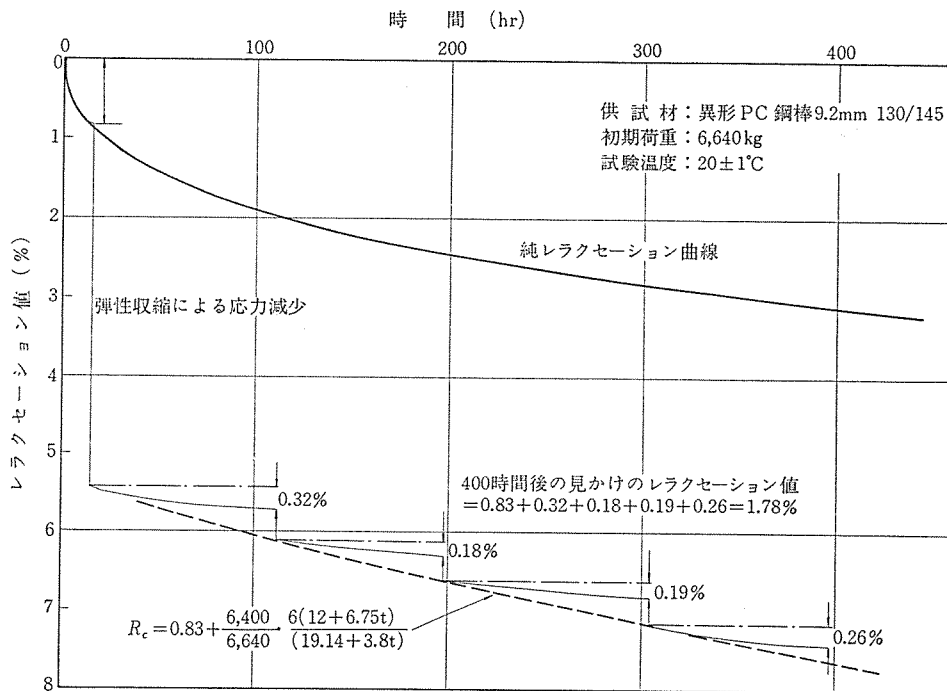


図-2.15 PC鋼棒による見かけのレラクセーション実測結果

$$\Delta \varepsilon_b = \frac{1}{E_b} \left[ \frac{\Delta \sigma_F + \Delta \sigma_r}{6.0} - 9.25 \times 10^{-3} \{1 + \phi(t)\} \right] \Delta \sigma_a \quad (2.6)$$

$$\Delta \sigma_a = \frac{\Delta \sigma_F + \Delta \sigma_r + \Delta \sigma_R - 2/\sigma_{a(\infty)} \cdot \Delta \sigma_R (\Delta \sigma_F + \Delta \sigma_r)}{1 + \{0.0555 + \Delta \sigma_F / \sigma_{a(\infty)}\} \{1 - 2/\sigma_{a(\infty)} \cdot \Delta \sigma_R\}}$$

$$\Delta \sigma_F = \frac{\sigma_{a0} \cdot S_a}{S_b} \cdot \frac{E_a}{E_b} \cdot \phi(t)$$

$$\Delta \sigma_r = \frac{\phi(t)}{\phi(\infty)} \cdot S_n \cdot E_a$$

ここで  $\Delta \varepsilon_b(t)$ : コンクリートの縮み変化量

$E_a, E_b$ : PC鋼材およびコンクリートの弾性係数 (本実験の場合  $E_a = 2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$   $E_b = 3.5 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$ )

$\sigma_{a(\infty)}$ : PC鋼材の初期緊張応力

$\Delta \sigma_F$ : 任意の時間  $t$  におけるクリープひずみによる応力変化

$\Delta \sigma_r$ : 任意の時間  $t$  における乾燥収縮ひずみによる応力変化

$S_a, S_b$ : PC鋼材およびコンクリートの断面積 (本実験の場合  $S_a = 38.48 \text{ mm}^2$   $S_b = 4160 \text{ mm}^2$ )

$S_n$ : 乾燥収縮ひずみ最終値 (本実験の場合  $S_n = 3.75 \times 10^{-4}$ )

$\Delta \sigma_R$ : 初期応力  $\sigma_{a(\infty)}$  の場合のPC鋼材の純レラクセーションによる応力減少値 (実測により求める)

$\phi(t)$ : コンクリートのクリープ係数

(本実験の場合  $\phi(t) = \frac{0.75 t}{1.5 + 0.25 t}$   
 $t$ : 週)

$\Delta \sigma_a$ : 総応力損失量

初期荷重として供試材の実際破断荷重の60%, 70%, 80%の3水準をとり、試験時間は、いずれも1000時間である。図-2.16は初期荷重70%の場合の測定結果で、図-2.17は初期荷重と1000時間後のレラクセーション

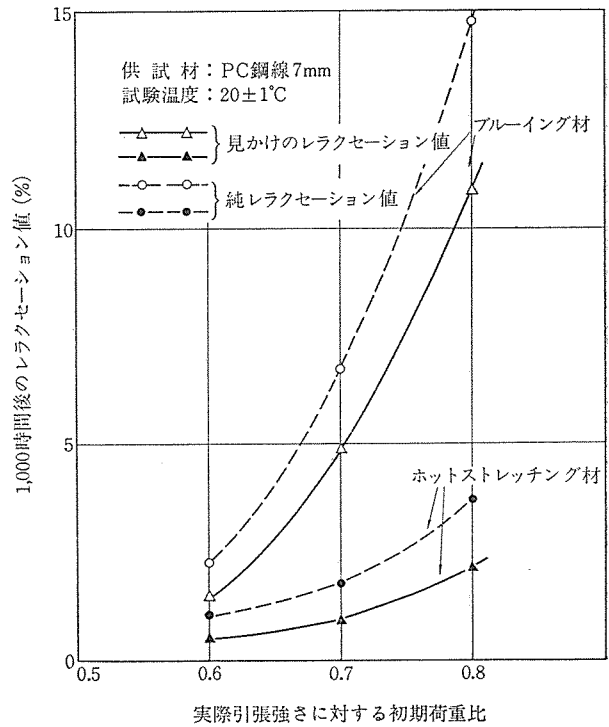


図-2.17 初期荷重と見かけのレラクセーションの関係

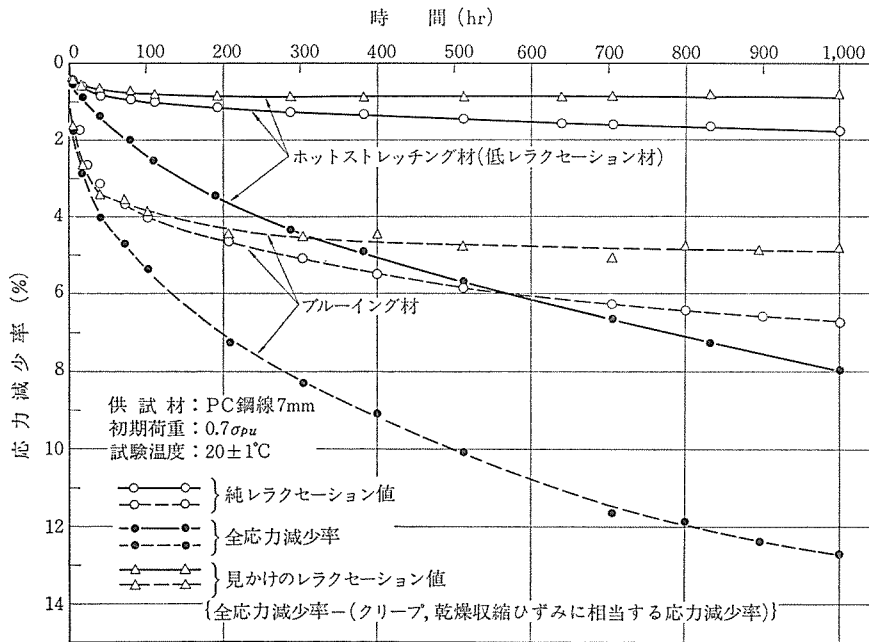


図-2.16 見かけのレラクセーション測定結果 (連続的にひずみを変化させた場合)

ション値の関係を示す結果である。図-2.16において、●印で示した曲線はひずみ変動による応力減少とリラクセーションによる応力減少の総和を示し、△印はその総応力減少量からひずみ変動による応力減少を差し引いた見かけのリラクセーション値を示す。また○印は同じ初期荷重における純リラクセーション値を示す。これらの結果からつぎのようなことが言える。

- i) 1000 時間後の見かけのリラクセーション値は純リラクセーション値の 50~70% 程度である。
- ii) 短時間側 (100 時間程度まで) では見かけのリラクセーション値と純リラクセーション値との差は殆どない。また純リラクセーションが 1000 時間後でもさらに進行する傾向にあるのに対して、見かけのリラクセーションは 1000 時間後には殆ど停滞する傾向が見られる。
- iii) ブルーイング材と低リラクセーション材であるホットストレッチング材を比較すると、純リラクセーション値で 1/4 程度、見かけのリラクセーション値で 1/5 程度とホットストレッチング材の方が小さい値を示している。
- iv) 総応力減少量の内、見かけのリラクセーションによる減少量は約 13%~約 56% で初期荷重が大きいほどその割合は大きい。

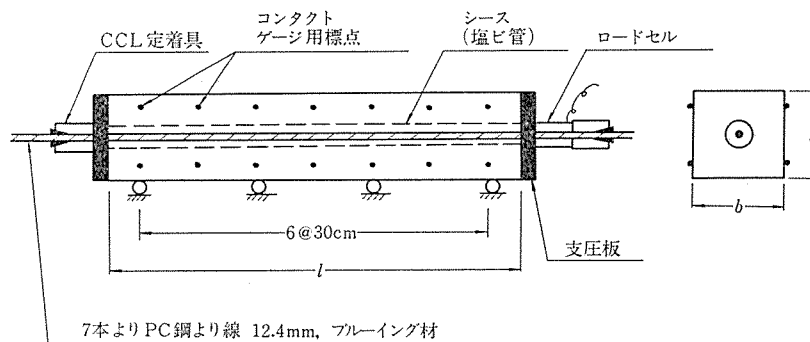
(3) PC 部材中の見かけのリラクセーション値実測例

本実験はプレストレストコンクリート梁を製作し、実際のコンクリート中での見かけのリラクセーションを実測したものである。PC 鋼材の経時的な応力変化をロードセルによって測定すると同時に、コンクリートの縮み

(乾燥収縮+クリープ) 量をコンタクトゲージで測定し、ロードセルによって測定した PC 鋼材の全応力減少量からコンクリートの縮みに相当する応力減少量を差し引いて見かけのリラクセーション値を求めた。供試体諸元は図-2.18 に示すとおりで、正方形断面の梁の長さを一定とし、断面寸法 3 種類について PC 鋼材の初期荷重はほぼ一定でコンクリートに導入されるプレストレスが 3 水準になるようにした。

図-2.19 が各供試体の見かけのリラクセーション値測定結果と、別途ロードセル法で測定した PC 鋼材自体の純リラクセーション測定結果である。この結果によればいずれの場合も短時間側では見かけのリラクセーション値が純リラクセーション値より大きくなっており、特に初期のコンクリート圧縮力が大きい条件の場合にその傾向が著しい。これは他の実験結果とは異なる結果であるが、後で述べるレオロジーモデルによる理論的検討結果でも、条件によってはこのような現象が生じ得ると考えられる。すなわち初期に PC 鋼材のリラクセーション進行速度が速い場合には、鋼材のリラクセーションによる応力減少に伴ってコンクリートの圧縮ひずみが解放され、その結果 PC 鋼材応力の回復が生じその後のリラクセーションが加速されることが考えられるものであるが、これについてはさらにデータの集積を行い、詳しく検討する必要がある。

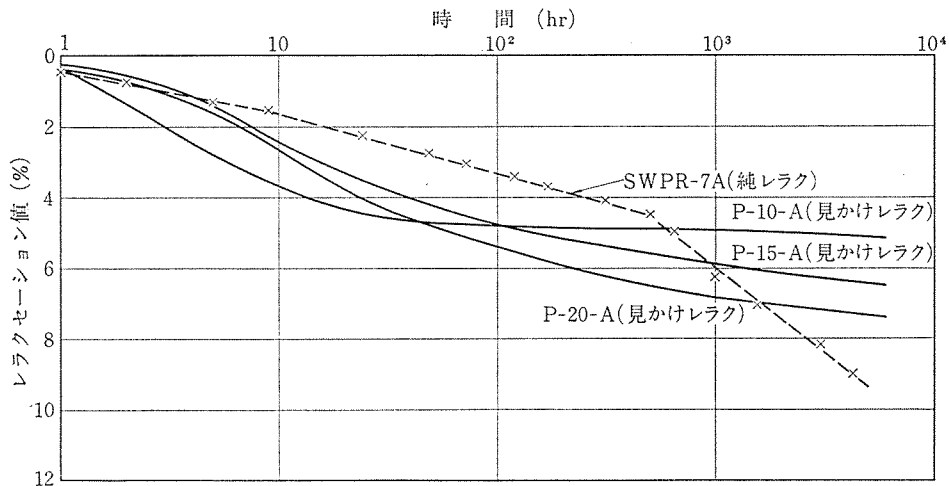
一方、いずれの場合もほぼ 1000 時間程度を境にして長時間側では見かけのリラクセーション値が純リラクセーション値より小さくなっており、初期のプレストレスが大きいほど見かけのリラクセーションは小さくなる傾



記号	P-10-A	P-15-A	P-20-A
諸元			
$l$ (cm)	190	190	190
$b \times h$ (cm)	10×10	15×15	20×20
$P_t$ (kg)	11,620	11,550	11,450
$P_t/P_u$	0.66	0.66	0.65
$\sigma_{c0}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	125	53	29

図-2.18 供試体の諸元





供 試 体		$P_t$ (kg)	$P_t/P_u$	$\sigma_{c0}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	測 定
記 号	辺(または径) (mm)				
P-20-A	200	11,450	0.65	29	見かけ レラク
P-15-A	150	11,560	0.66	53	〃
P-10-A	100	11,620	0.66	125	〃
SWPR-7A	[12.4]	11,580	0.66	—	純レラク

図—2.19 見かけのレラクセッション測定結果

向にある。また初期のプレストレスが最も大きい条件では、数百時間以後の見かけのレラクセッションの進行速度は非常に小さくなっている。これらの結果は初期のプレストレスの大小と、それに伴うクリープの進行速度とに関連があるものと考えられる。

(執筆担当：坂村 晃，和光賢二，山崎隆雄，田中 義人)

参 考 文 献

- 1) JIS Z2276-1975,「金属材料の引張リラクセッション試験方法」および解説
- 2) JIS G3536-1977,「PC鋼線およびPC鋼より線」および解説
- 3) JIS G3109-1977,「PC鋼棒」および解説
- 4) JIS G3538-1977,「PC硬鋼線」および解説
- 5) プレストレストコンクリート 設計施工規準・同解説, 日本建築学会, pp 483~486
- 6) コンクリート構造物設計施工国際指針, CEB/FIP 1970, 鹿島出版会, pp 46~48
- 7) 猪股俊司：プレレストコンクリート部材中でのPC鋼材のレラクセッション, プレストレストコンクリート, Vol. 14 No. 3, pp 28~34, June 1972
- 8) R. Atallah, M. Brachet et G. Daraps : Contribution à l'estimation des pertes de precontrainte et des deformation differées des structures en beton precontraint, Contributions techniques francaises, 7° Congress de FIP, New York 1974
- 9) G. Dreux : Interférence de causes á effects dans le calcul des pertes de precontrainte, Contributions techniques francaises, 7° Congress de FIP, New York 1974

3. 純レラクセッション曲線の関数表現と長期レラクセッション値の推定

プレレストコンクリート部材の応力導入後の挙動——プレストレス力の損失量、部材の遅れ変形など——の解析においてコンクリートのクリープ・乾燥収縮のみでなく、PC鋼材のレラクセッションの影響も同時に考慮する必要性が認識されてきており、本特集号も全編この趣旨に沿った内容となっている。従来の応力導入後の部材の挙動解析においては、PC鋼材のレラクセッションの影響は通常無視し、またコンクリートのクリープ・乾燥収縮特性も  $e$  関数の1項による表現 ( $\varphi_t, S_t \propto 1 - e^{-at}$ ) あるいは双曲線式 ( $\varphi_t, S_t \propto t/(A+Bt)$ ) など簡単な関数表現が用いられていた。しかし、コンクリートのクリープ・乾燥収縮およびPC鋼材のレラクセッションの相互作用を考慮する解析においては、両者の微妙な相互干渉の性状を明確に把握するためにも、また、実験値との対比を行うためにも、上記のような材料特性に対する簡単な関数表現では不十分であることは論ずるまでもなく、コンクリートに対しては材令による特性の変化も考慮することはもちろんであるが、コンクリートのクリープ・乾燥収縮曲線、PC鋼材の純レラクセッション曲線を実測値に対して正確に、しかも解析に便利な関数として表現することが、必要不可欠である。

本章では、上記目的にかない、また電算機による解析

にも便利なように、PC 鋼材およびコンクリートの上記基本的特性を多項  $e$  関数を用いて表現する方法を示したもので、PC 鋼材の純レラクセーション曲線の表現の算定例や、最終値の予測の方法とその算定結果などについても述べる。

3.1 PC 鋼材の純レラクセーション曲線の関数式

レラクセーションを表現するための関数に望まれることは、種々の実測値をより正確に表現出来、レラクセーション値の計算が簡単で外挿も容易であり、解析式中での展開も無理なく行え、またレオロジーモデルとの対応も可能なことなどであろう。一つの関数式でこれら多くの要求をすべて満たすことは、なかなか困難であるが、ここではまず従来用いられ、あるいは提案されている式などを示す。ただし、 $R$  は鋼材の純レラクセーション (%)、 $v_R$  は同レラクセーション速度、 $t$  は時間、添字  $n$  は最終値を意味し、その他の記号は定数とする。

$$R=Ct^a \dots\dots\dots(3.1)$$

$$R=a_0+a_1\log t+a_2\log^2 t+\dots\dots\dots(3.2)$$

$$\log R=a_0+a_1\log t+a_2\log^2 t+\dots\dots\dots(3.3)$$

$$\log v_R=a_0+a_1\log t \dots\dots\dots(3.4)$$

$$R=R_n\{1-e^{-c_1 a_1 t^b}\} \dots\dots\dots(3.5)$$

$$R=R_n\{1-e^{-c_2 f(t)+a_2}\} \dots\dots\dots(3.6)$$

ただし、 $f(t)=t^b$  ( $0 < b < 1$ ) $\dots\dots\dots(3.7)$

$$f(t)=\log(t) \text{ など} \dots\dots\dots(3.8)$$

(3.1) 式は両対数グラフにおいて直線を表わす式で、(3.3) 式の 2 項までを採った場合に対応する。本特集号に示された実測例からも明らかなごとく (3.1) 式では長時間までの測定値を正確に表現し得ない。(3.2)、(3.3) 式は項数を多くすることによって測定範囲内での近似をよりよいものにすることができ、いくつかの報告にも用いられているが、(3.1)~(3.3) 式の共通の欠点として、有限な最終値を表現することができない。(3.4) 式はレラクセーション速度と時間との関係を (3.1) 式の形に表現したもので、両対数グラフでは、この関係は直線になることを報告している文献がいくつかあるが、しかし、この式によって  $t=10000$  時間をこえて外挿した場合、測定値を大幅に上回ることが知られている。なお、レラクセーション値はこの  $v_R$  を積分して得られる。

(3.5)、(3.6) 式の表現はレオロジー特性に対応し、また  $t \rightarrow \infty$  で有限な最終値も得られる。 $R_n$  はその最終値を与え、 $b$  は減速効果に、また、 $c$  は遅延効果に関係する。

鋼材のレラクセーション特性の研究においては、上記諸式のうち、(3.2)、(3.3) 式および (3.6)、(3.7) 式の組合せの表現が多く用いられているようであるが、CEB/

FIP 指針—1970<sup>1)</sup> では次の (3.9) 式を提示している。

$$\log R=k_1+k_2\log t \dots\dots\dots(3.9)$$

$$(R=\Delta\sigma_R/\sigma_0, k_1, k_2: \text{定数})$$

なお、コンクリートのクリープ・乾燥収縮および PC 鋼材のレラクセーションを同時に考慮したプレストレス力損失量の解析的研究においては、鋼材の純レラクセーション測定曲線をそのまま用いたり、次の (3.10) 式の表現を用いた例も報告されている<sup>2)</sup>。

$$\frac{R}{R_n}=\sqrt[3]{\frac{(2.21+m)m}{1+(3.6+m)m}} \dots\dots\dots(3.10)$$

( $m$ : 月数, 30日)

3.2 PC 鋼材のレラクセーションおよびコンクリートのクリープの多項  $e$  関数表示

以下前記 (3.1)~(3.10) 式のうち、(3.6)、(3.7) 式の組合せの表現に近い次の (3.11) 式で示される多項  $e$  関数表示による近似の方法を主として純レラクセーションの測定値を対象として説明する。

$$\sigma_R(t)=\sigma_{Rn}-\sum_{i=1}^n a_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \dots\dots\dots(3.11)$$

ここに  $\sigma_R(t)$ : 時刻  $t$  におけるレラクセーション (応力減少量)

$\sigma_{R1n}$ : レラクセーション最終値 (応力)  $=\sigma_0-b$

(図—3.1 (a) 参照)

$$\sum_{i=1}^n a_i=\sigma_{R1n}$$

なお、レラクセーションを初期載荷応力  $\sigma_0$  の百分率で示す場合は

$$R(t)=R_n-\sum_{i=1}^n A_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \dots\dots\dots(3.12)$$

となる。ここに

$$R(t)=\frac{\sigma_R(t)}{\sigma_0} \times 100, \quad R_n=\frac{\sigma_{R1n}}{\sigma_0} \times 100,$$

$$A_i=\frac{a_i}{\sigma_0} \times 100$$

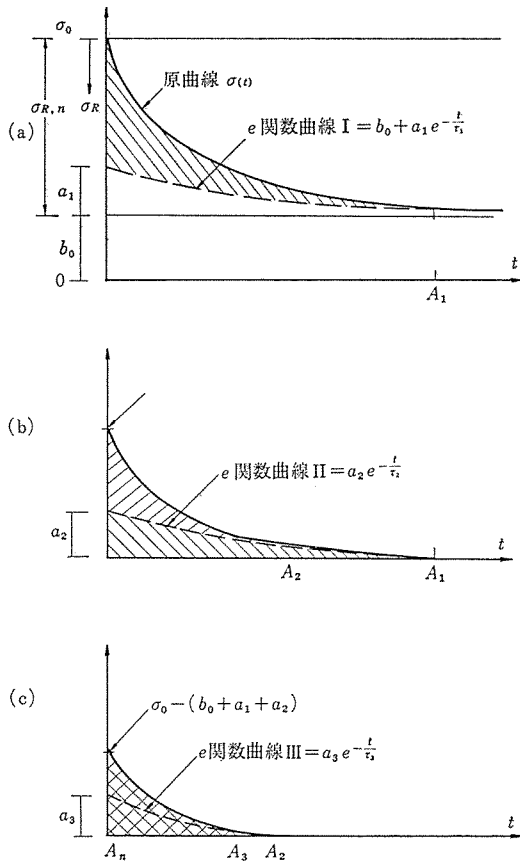
以下主として純レラクセーション測定値の近似法について説明する。

3.2.1 方法の概要

純レラクセーションの測定曲線  $\sigma(t)$  を 図—3.1 (a) の実線とすると、 $t \geq A_1$  の部分の原曲線を  $e$  関数曲線 I で近似する。次に [原曲線]—[曲線 I] の値を 図—3.1 (b) の実線のようにプロットし、 $A_2 \leq t \leq A_1$  の部分を曲線 II で近似的に表現する。以下同様の手順を  $t=0$  となるまでくり返す。これによって  $\sigma(t)$  は

$$\sigma(t)=b_0+\sum_{i=1}^n a_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \dots\dots\dots(3.13)$$

$$(b_0+\sum a_i=\sigma_0)$$



図—3.1

で与えられ、したがって純レラクセーション  $\sigma_R(t)$  は

$$\sigma_R(t) = (\sigma_0 - b_0) - \sum_{i=1}^n a_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \dots\dots\dots (3.14)$$

となる。また、その最終値  $\sigma_{R1n}$  は

$$\sigma_{R1n} = \sigma_R(t)|_{t=\infty} = \sigma_0 - b_0 \dots\dots\dots (3.15)$$

で与えられる。なお、この場合 図—3.1 の点  $A_1, A_2 \dots$  の選定および  $e$  関数の項数  $n$  の値は、近似の誤差を考慮しながら任意に定めればよい。次に各曲線の具体的な定め方を示す。

3.2.2 曲線 I の求め方

図—3.1 (a) の破線で示される曲線 I を

$$y = b_0 + a_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \dots\dots\dots (3.16)$$

とすると、未知係数は  $b_0, a_1$  および  $\tau_1$  の 3 個である。したがって式 (3.16) に曲線 I の 3 組の値  $(y_j, t_j, j=1, 2, 3)$  を代入した式

$$y_j - b_0 = a_1 e^{-\frac{t_j}{\tau_1}} \quad (j=1, 2, 3) \dots\dots\dots (3.17)$$

より次式が得られる。

$$\frac{y_1 - b_0}{y_2 - b_0} = e^{-\frac{1}{\tau_1}(t_1 - t_2)}, \quad \frac{y_2 - b_0}{y_3 - b_0} = e^{-\frac{1}{\tau_1}(t_2 - t_3)} \dots\dots\dots (3.18)$$

これらの式の常用対数を取り、 $e^{-\frac{1}{\tau_1}}$  すなわち  $-\frac{1}{\tau_1} \log e$  を消去して変形すれば

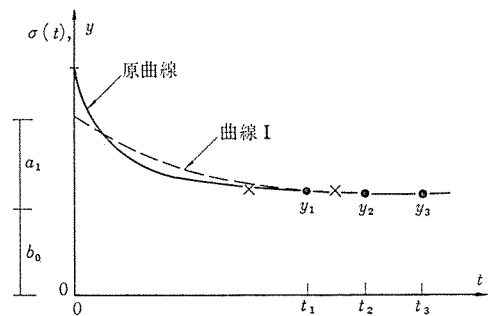
$$\frac{y_1 - b_0}{y_2 - b_0} = \left( \frac{y_2 - b_0}{y_3 - b_0} \right)^{\frac{t_1 - t_2}{t_2 - t_3}} \dots\dots\dots (3.19)$$

が得られるが、今、 $t_3 = 2t_2 - t_1$  となる  $t$  を選べば、

$$\frac{t_1 - t_2}{t_2 - t_3} = 1 \text{ となり}$$

$$\therefore b_0 = \frac{y_1 y_3 - y_2^2}{y_1 - 2y_2 + y_3} \dots\dots\dots (3.20)$$

から  $b_0$  を定めることができる。この  $b_0$  を用いて (3.17) 式から、 $a_1, \tau_1$  を定める。



図—3.2

(注)  $t_1, t_2, t_3$  の値は、(3.20) 式が利用できるように  $t_1 \sim t_2$  および  $t_2 \sim t_3$  が等間隔となるように定めることになるが、これによって求まった (3.16) 式が 図—3.2 に示すように原曲線の上側に来る部分を持つ場合がある。これは鋼材のレラクセーションのように初期の変化量が大きいほど現われ易いと考えられるが、このままでは近似の精度を極めて悪いものにするので次のような方法を採用するのがよい。すなわち、例えば 図—3.2 の  $\times$  印の点のように  $t_1, t_2$  の値の採り方を変えるか、あるいは  $y_1 - y_2$  などの値を原曲線の値より若干小さくしてやればよい。後者の方法は 図—3.1 (a) の  $A_1$  点を右方に移動させていることになり、 $t_1, t_2$  時の原曲線との差は、同図 (b) に示す操作によって曲線 II に吸収されるので近似の精度を損なうことにはならない。

また、レラクセーション最終値に関連する (3.16) 式  $b_0$  の値は、 $t_1, t_2, t_3$  の値の組合せによって変化するので注意する必要がある。 $b_0$  の値をより正しく算定するには、 $t_3$  を測定した  $t$  の最大値とし、 $t_1, t_2$  は 図—3.2 のように曲線 I > 原曲線とならない範囲でできるだけ大きな値とするのがよい (3.2.4. 外挿による真の値の  $b_0$  推定も参照)。

3.2.3 曲線 II, III... の定め方

曲線 II の定数  $a_2$  および  $\tau_2$  は図解法によって次のように定めることができる。

- ① まず第 2 原曲線 (図—3.1 (b) 実線) の値を 図—3.3 のように適当な時間間隔で片対数方眼紙にプロットする。
- ② 第 2 原曲線の右端部の適当な範囲に対して破線の直線 (= 曲線 II) を引く。
- ③ この直線 (破線) と縦座標軸との交点の値が  $a_2$  を与える。
- ④  $a_2 e^{-t}$  の値と破線との交点の  $t$  の値を 図—3.3 の点線のごとく読みとって

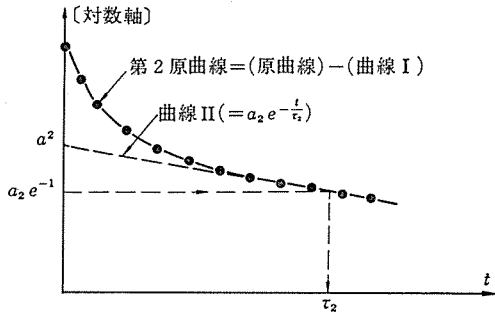


図-3.3

$\tau_2$  が求まる。以上で 図-3.1(b) の曲線 II ( $=a_2e^{-\frac{t}{\tau_2}}$ ) が求められる。

(注) この場合、第2原曲線に対して、近似の範囲とその精度を図上で目視により、任意に調整しながら作業を行うことができる。

曲線 III, IV, …… は上と全く同じ操作で定められる。

### 3.2.4 外挿による真の $b_0$ 値の推定

測定原曲線を 図-3.4 のごとく任意の区間に分け、それぞれの区間内で (3.16) 式の形に近似して  $b_0(i)$  の値

を求め、これを図にプロットして適当な曲線 (例えば (3.14) 式の形あるいは、 $\sigma_0 - b_0(i)$  として双曲線を利用する) に近似して、その最終値を推定する。

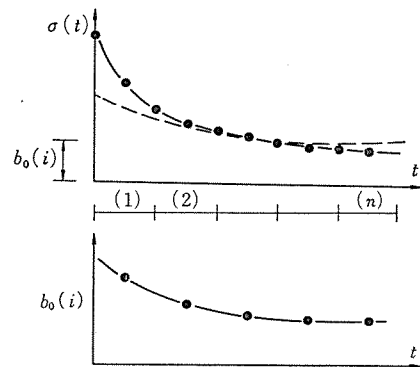


図-3.4

### 3.2.5 曲線 II の算定例

上記の方法を、CEB/FIP 指針に示されたコンクリートのクリープ特性曲線のうち仮想厚 20 cm の場合の  $f(t)$  曲線 (同指針では  $kt$  曲線) に適用した結果を 図-3.5 に示す<sup>3)</sup>。この作業手順は次のようになる。

t: days	7	10	15	30	50	100	200	500	1,000	1,500	2,000	3,000
$c_0$ ●	.920	.900	.860	.780	.700	.570	.420	.230	.120	.070	.040	.020
$c_1$ ○	.751	.731	.692	.614	.536	.412	.273	.111	.037	.017	.0007	
$c_2$ □	.416	.395	.363	.296	.232	.140	.055	.001				
$c_3$ ×	.089	.079	.058	.031	.0117							

$$f(t)_{20} = 1 - (0.14e^{-\frac{t}{x_4}} + 0.35e^{-\frac{t}{x_3}} + 0.34e^{-\frac{t}{x_2}} + 0.17e^{-\frac{t}{x_1}})$$

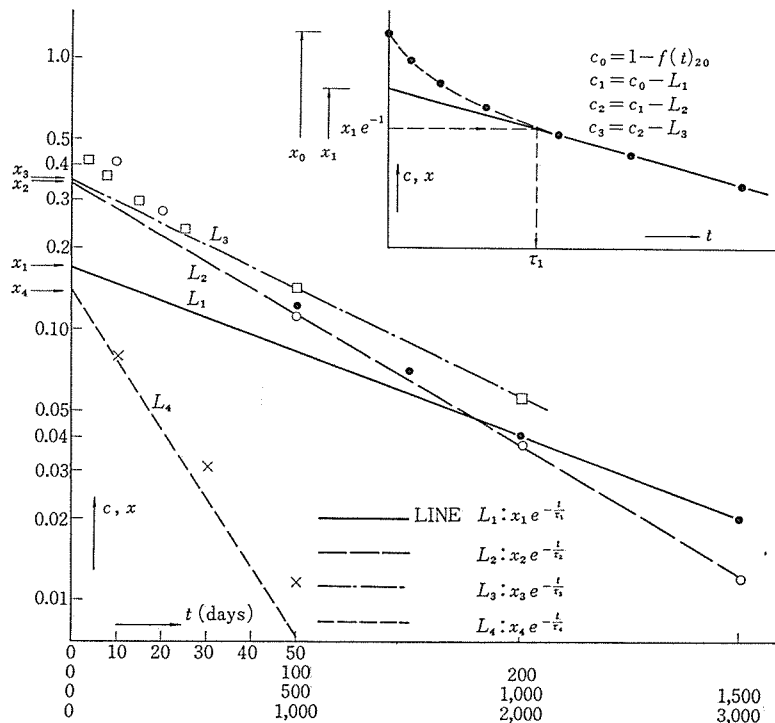


図-3.5 曲線 II の算定例 (CEB/FIP 指針によるコンクリートのクリープ特性曲線)

(i)  $1-f(t)$  の値を同図上側の表の時間 (days) に対して求め ( $c_0$  曲線) 片対数方眼紙に・印としてプロットする。この場合の時間軸の最大値は 3000 days となっている。

(ii) 右端部の 2 個の・印点を通る直線  $L_1$  を引く。これによって 図-3.3 の要領で  $x_1$  と  $\tau_1$  が求められる (ie.  $x_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}}$  の算定)。

(iii)  $c_0 - L_1 = c_1$  として 図-3.5 上側の表のごとく各時点の値を求める。これを◎印として片対数方眼紙上にプロットする。この場合の時間軸の最大値は 1500 days である。

(iv) 右側 3 個の◎印点を通る直線  $L_2$  を引く。これによって 図-3.3 の要領で  $x_2$  と  $\tau_2$  が求められる (ie.  $x_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}$  の算定)。

以下同様の手順により、 $L_3$  および  $L_4$  が求められる。なお、 $L_4$  は×印点のうち左側の 2 個に対して引かれたものであるが、右側の 2 点に対して大きな差があるように見えても、その差は 0.005 以下となっている。結局本算例の場合は 4 個の  $e$  関数で近似されている。

3.2.6 CEB/FIP-1970, 1973 指針のクリープ特性多項  $e$  関数表示

同指針に与えられているクリープ特性曲線を多項  $e$  関数によって表現した結果を示す。ただし、係数  $k_a$  (載荷時の硬化の度合) を  $k(t)$ , 係数  $kt$  (時間の関数としての変化) を  $f(t)$  として表現した。なお、 $0 \leq k(t), f(t) \leq 1$  である。

$$k(t)_O = 0.3109 e^{-\frac{t}{5}} + 0.2953 e^{-\frac{t}{40}} + 0.3938 e^{-\frac{t}{860}} \dots \dots \dots (3.21)$$

$$k(t)_E = 0.5508 e^{-\frac{t}{5.5}} + 0.2139 e^{-\frac{t}{60}} + 0.2353 e^{-\frac{t}{960}} \dots \dots \dots (3.22)$$

$$f(t)_5 = 1 - (0.07 e^{-\frac{t}{0.3}} + 0.18 e^{-\frac{t}{5.2}} + 0.30 e^{-\frac{t}{22}} + 0.29 e^{-\frac{t}{98}} + 0.16 e^{-\frac{t}{420}}) \dots \dots \dots (3.23)$$

$$f(t)_{10} = 1 - (0.04 e^{-\frac{t}{16}} + 0.26 e^{-\frac{t}{160}} + 0.20 e^{-\frac{t}{60}} + 0.30 e^{-\frac{t}{160}} + 0.20 e^{-\frac{t}{730}}) \dots \dots (3.24)$$

$$f(t)_{20} = 1 - (0.14 e^{-\frac{t}{17}} + 0.35 e^{-\frac{t}{108}} + 0.34 e^{-\frac{t}{450}} + 0.17 e^{-\frac{t}{1400}}) \dots \dots \dots (3.25)$$

$$f(t)_{40} = 1 - (0.02 e^{-\frac{t}{3}} + 0.20 e^{-\frac{t}{120}} + 0.52 e^{-\frac{t}{570}} + 0.25 e^{-\frac{t}{2500}}) \dots \dots \dots (3.26)$$

ここに添字  $O$ : 普通セメント,  $E$ : 早強セメント, 数字: 仮想厚  $e_m$  (cm) を表わす。これらの式による値を 図-3.6 に図示した。なお、同図 (b) には CEB/FIP 指針-1973 の式および曲線も示してある。

3.3 純リラクセーション曲線の多項  $e$  関数表示の例

3.2 節で述べた方法にしたがって PC 鋼材の純リラクセーション曲線の測定値を多項  $e$  関数で表わした例を PC 鋼線および PC 鋼棒の場合について二、三示す。なお、本節でのリラクセーション量は (3.12) 式の % 表示としてある。

$k(t)_O$ : 普通セメント  
 $k(t)_E$ : 早強セメント  
 ●: CEBの  $k(t)$  の値, ただし  $t=28$ 日で一致させた場合 (ie.  $k(t)_{O,CEB} \times \frac{1}{1.89}$  および  $k(t)_{E,CEB} \times \frac{1}{1.91}$  とした)

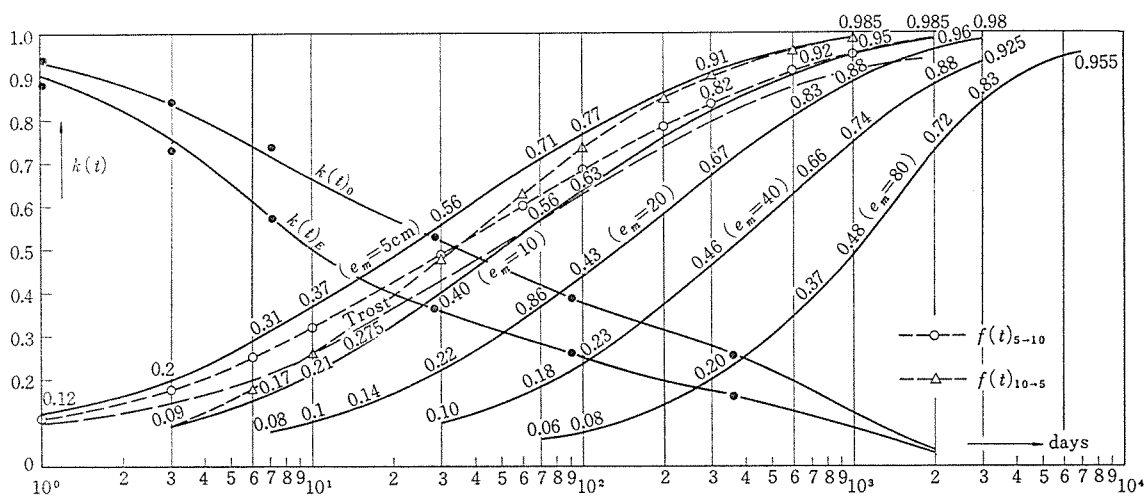


図-3.6 (a) CEB/FIP-1970 指針

$$f(t) = 1 - \sum_{i=1}^5 X_i e^{-t/\tau_i}$$

$e_m$	$X_1$	$\tau_1$	$X_2$	$\tau_2$	$X_3$	$\tau_3$	$X_4$	$\tau_4$	$X_5$	$\tau_5$
5	0.07	1	0.30	14	0.30	80	0.24	390	0.09	2,000
10	0.09	2	0.24	14	0.29	80	0.24	400	0.14	2,150
20	0.10	2	0.20	14	0.27	80	0.24	420	0.19	2,400
40	0.11	2	0.17	14	0.25	100	0.24	640	0.23	2,300
80	0.14	2	0.14	17	0.16	130	0.24	680	0.32	3,400
160	0.15	3	0.09	17	0.10	140	0.24	710	0.42	3,800

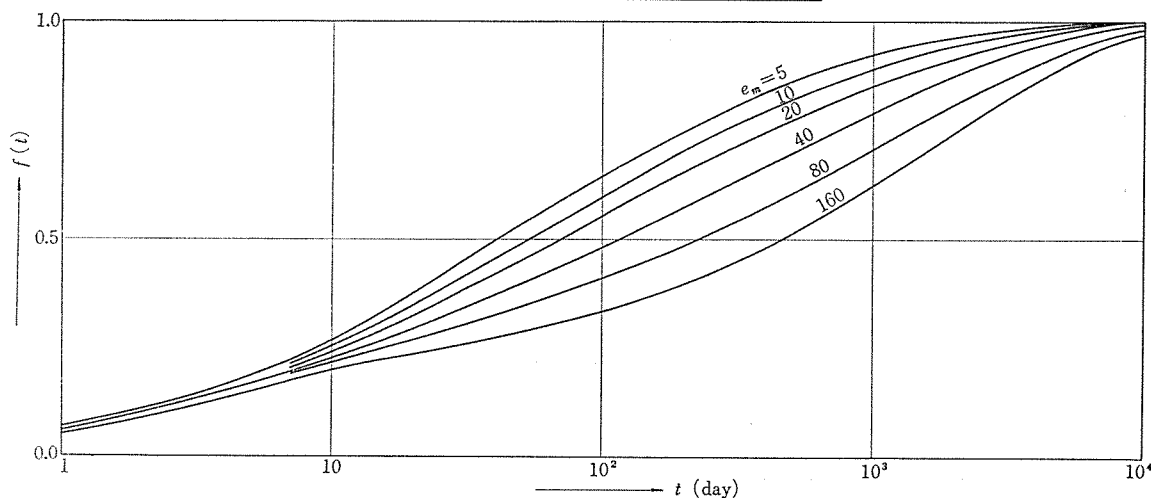


図-3.6 (b) CEB/FIP-1973 指針

### 3.3.1 PC 鋼線の場合

7mm の鋼線による 50 000 時間までの測定データから求めた結果を示す。

#### (1) 関数表現に用いたデータ

##### i) 供試材

- ホットストレッチング PC 鋼線 7.0mm  
初期荷重 4860 kg (0.75×引張荷重)
- ブルーイング PC 鋼線 7.0 mm  
初期荷重 4320 kg (0.65×引張荷重)

##### ii) レラクセーション試験方法

- 振動法による応力測定  
緊張用アタッチメントで線を緊張し、その振動数を測定することにより荷重を知る方法

- 載荷所要時間 60 sec
- 試験温度 20±1°C
- 試験時間 50 000 hours

##### iii) レラクセーションデータ

図-3.7 にホットストレッチング材およびブルーイング材のレラクセーションの測定結果を示す。

#### (2) $R_n$ 値の測定

図-3.4 に示す方法によって各時間区分の  $b_0(i)$  を求め、これより  $\sigma_{R,n(i)}$  したがって (3.12) 式の  $R_{n(i)} (= \sigma_{R,n(i)} / \sigma_0)$  を求めた結果を表-3.1 に示す。

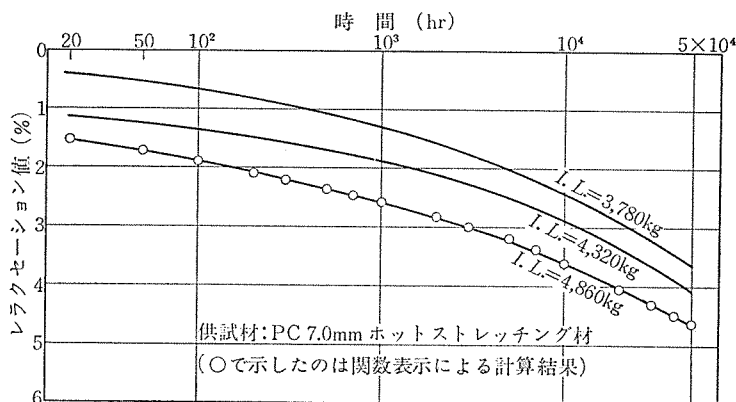


図-3.7 (a) 長期レラクセーションの測定結果と多項  $e$  関数表示の計算結果 (ホットストレッチング材)

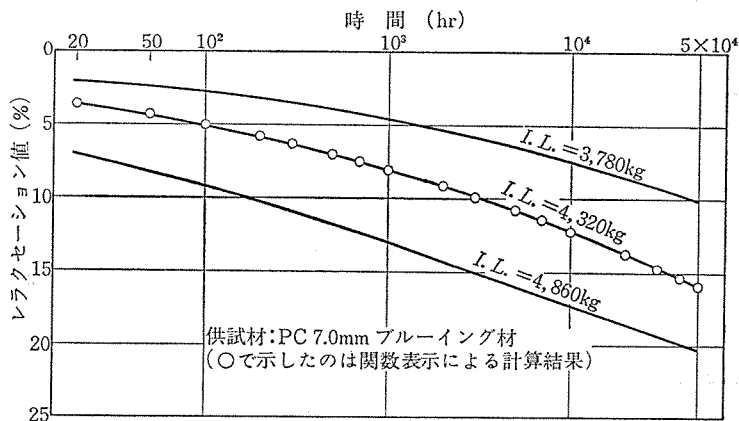


図-3.7 (b) 長期レラクセーションの測定結果と多項  $e$  関数表示の計算結果 (ブルーイング材)

表—3.1 時間区分と  $R_n$  の値

時間区分 $t_i$ (hours)	$R_n$ ホットストレッチング材	ブルーイング材
$t_1=50\ 000$ $t_2=30\ 000$	$R_n(1)$ 4.92	18.38
$t_2=30\ 000$ $t_3=20\ 000$	$R_n(2)$ 4.77	17.84
$t_3=20\ 000$ $t_4=10\ 000$	$R_n(3)$ 4.56	15.79
$t_4=10\ 000$ $t_5=5\ 000$	$R_n(4)$ 4.05	14.43
$t_5=5\ 000$ $t_6=2\ 000$	$R_n(5)$ 3.53	12.60
$t_6=2\ 000$ $t_7=1\ 000$	$R_n(6)$ 3.04	—

(\* 3つの時刻点のうち1点は  $t = \frac{t_n + t_{n+1}}{2}$  の値をとった)

表—3.2 ホットストレッチング材のリラクセーション関数表示結果

時間 (hour)	関数
50 000~30 000	$f_1(t) = 1.747 e^{-\frac{t}{21\ 281.23}} - 4.767$
30 000~20 000	$f_2(t) = 0.018 e^{-\frac{t}{53\ 631.74}}$
20 000~5 000	$f_3(t) = 0.102 e^{-\frac{t}{13\ 057.66}}$
3 000~2 000	$f_4(t) = 0.494 e^{-\frac{t}{3\ 347.93}}$
1 000~700	$f_5(t) = 0.559 e^{-\frac{t}{306.94}}$
700~300	$f_6(t) = 0.037 e^{-\frac{t}{1\ 653.48}}$
300~200	$f_7(t) = 0.016 e^{-\frac{t}{212.50}}$
200~70	$f_8(t) = 0.333 e^{-\frac{t}{73.15}}$
50~30	$f_9(t) = 0.048 e^{-\frac{t}{68.02}}$
20~10	$f_{10}(t) = 0.228 e^{-\frac{t}{11.84}}$

この表より、リラクセーション最終値  $R_n$  の算定には、選定する3つの時刻点はできるだけ長時間側、すなわち測定時間の最終側に選ぶのがよいことが推測される。

(3) 多項  $e$  関数による関数表現算定結果

各項は長時間側から定められるが、その時間帯と  $e$  関数とを関係づけてホットストレッチング材の場合を表—3.2 に示す。

故にリラクセーション  $R(t)$  は次の (3.27) 式で与えられる。

$$R(t) = f_1(t) + f_2(t) + \dots + f_s(t) \dots \dots \dots (3.27)$$

次にブルーイング材について結果を示すと次のようになる。

$$f_1(t) = 5.689 e^{-\frac{t}{34\ 760.81}} - 17.200$$

$$f_2(t) = 3.243 e^{-\frac{t}{6\ 123.32}};$$

$$f_3(t) = 0.794 e^{-\frac{t}{1\ 764.033}}$$

$$f_4(t) = 2.664 e^{-\frac{t}{460.89}}; f_5(t) = 0.010 e^{-\frac{t}{605.15}}$$

$$f_6(t) = 0.064 e^{-\frac{t}{22\ 713.57}}; f_7(t) = 1.340 e^{-\frac{t}{69.95}}$$

$$f_8(t) = 0.300 e^{-\frac{t}{51.06}}; f_9(t) = 1.739 e^{-\frac{t}{6.04}}$$

故にリラクセーション  $R(t)$  は次の (3.28) 式で表わされる。

$$R(t) = f_1(t) + f_2(t) + \dots + f_s(t) \dots \dots \dots (3.28)$$

測定曲線と (3.27), (3.28) 式の算定結果とを図—3.7 に示す。両者は非常によく一致していることが分る。

3.3.2 PC 鋼棒の場合

$\phi 9.1$  mm および  $\phi 9.4$  mm の round smooth 材について約 37 000 時間および約 23 000 時間のリラクセーション試験を行い、そのデータについて検討した。

(1) 関数表現に用いたデータ

i) 供試材

(a) 130/145 9.1  $\phi$  round smooth 材

$$\sigma_B : 1\ 460\ \text{N/mm}^2\ (148.9\ \text{kg/mm}^2)$$

$$\sigma_y : 1\ 366\ \text{N/mm}^2\ (139.4\ \text{kg/mm}^2)$$

$$\delta_{sd} : 7.1\%$$

(b) 145/160 9.4  $\phi$  round smooth 材

$$\sigma_B : 1\ 623\ \text{N/mm}^2\ (165.6\ \text{kg/mm}^2)$$

$$\sigma_y : 1\ 542\ \text{N/mm}^2\ (157.3\ \text{kg/mm}^2)$$

$$\delta_{sd} : 9.9\%$$

ii) 試験方法

応力の測定 振動式測定法による

試験温度  $20 \pm 1^\circ\text{C}$

初期荷重 供試材 (a) 6 640 kg

( $0.8 \times P_y$ , spec.)

” (b) 9 020 kg

( $0.8 \times P_B$ , spec.)

iii) レラクセーション測定データ

測定データを 図—3.8 の実線に示す。

(2)  $R_n$  値の推定

得られた測定データを基に、図—3.2 に示す  $t_1, t_2, t_3$  の各種の組合せに対して次式の各係数を求めた結果を表—3.3 にまとめた。

$$y = R_n + Ae^{-\frac{t}{\tau}} \dots \dots \dots (3.29)$$

表—3.3 より、PC 鋼線の場合と同様、時間  $t_i$  の組

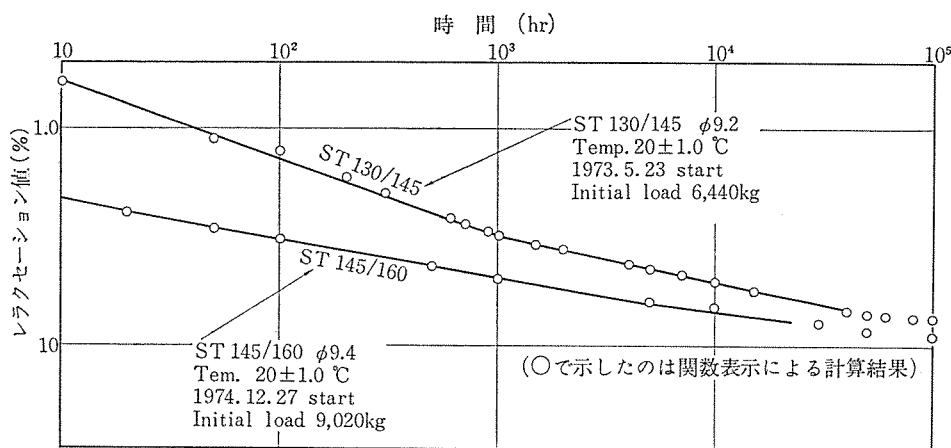


図-3.8 長期レラクセーション測定結果と多項 e 関数表示の計算結果 (PC 鋼棒)

表-3.3 各  $t_i$  に対する  $R_n, A, \tau$  の計算値

$t_i$ (hours)	$R_n$	$A$	$\tau$	$t_i$ (hours)	$R_n$	$A$	$\tau$
100, 200, 300	2.69	-1.85	291.66	13000, 14000, 15000	5.69	-10.23	4042.89
800, 900, 1000	3.23	-5.97	276.27	18000, 19000, 20000	5.89	-2461.54	1957.62
1000, 2000, 3000	4.52	-2.10	2693.14	22000, 23000, 24000	6.08	-1347.71	2466.30
3000, 4000, 5000	4.87	-2.56	3325.90	10000, 15000, 20000	7.42	-3.62	24916.46
8000, 9000, 10000	5.50	-3.10	5484.82	3000, 6000, 9000	5.67	-2.84	6887.61

合せによって各係数は大幅に変わることが分る。 $R_n$  については  $t_i$  を大きくする方が大きな数値となること、また3個の  $t_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) の同じ最大値でもその時間間隔のとり方によっても異なることなどに注意する必要がある。ただし、この  $R_n$  値は近似した式の中ではそのままレラクセーション最終値を与えるので、最終値のより正確な算定には別の方法によることも必要になるが、測定値に対する近似値の算定においては、これら係数の多少の相違は他の  $e$  関数の項によって吸収されるので、あまり影響ない。

(3) 多項  $e$  関数による関数表現算定結果

算定結果を (3.30), (3.31) 式および図-3.8 に示す。また実測値と近似式による計算値とを対比して 表-3.4 および 3.5 に示した。この PC 鋼棒の場合  $e$  関数の項数が少ないにもかかわらず、非常によい近似の結果を与えている。

表-3.4 実測値と近似計算値との比較 (%)

時間 (hours)	実測	計算	時間 (hours)	実測	計算	時間 (hours)	実測	計算
10	0.62	0.61	2000	3.56	3.55	20000	5.80	5.85
50	1.09	1.11	3000	3.88	3.87	30000	6.22	6.40
100	1.39	1.28	4000	4.11	4.12	40000	—	6.76
200	1.65	1.68	5000	4.32	4.32	50000	—	6.99
400	2.22	2.21	7000	4.66	4.62	60000	—	7.14
600	2.58	2.57	8000	4.78	4.76	80000	—	7.30
800	2.83	2.82	10000	5.02	4.99	100000	—	7.37
1000	3.08	3.01	15000	5.45	5.47	150000	—	7.41

表-3.5 実測値と近似計算値との比較 (%)

時間 (hours)	実測	計算	時間 (hours)	実測	計算	時間 (hours)	実測	計算
10	2.10	2.15	500	4.25	4.25	30000	—	7.89
20	2.39	2.40	1000	4.80	4.80	50000	—	8.49
50	2.80	2.83	5000	6.25	6.25	100000	—	9.04
100	3.20	3.17	10000	6.75	6.75	150000	—	9.15
200	3.60	3.62	20000	7.40	7.41	200000	—	9.17

i) 試験片 (a)

時間 (hours)      近似式

$$5000 \sim y_1 = 3.73 e^{-\frac{t}{23111.14}} - 7.42$$

$$2000 \sim 5000 y_2 = 1.19 e^{-\frac{t}{2000}}$$

$$50 \sim 2000 y_3 = 1.63 e^{-\frac{t}{380}}$$

$$0 \sim 50 y_4 = 0.68 e^{-\frac{t}{12.5}}$$

$$R = 7.42 - (3.73 e^{-\frac{t}{23111.14}} + 1.19 e^{-\frac{t}{2000}} + 1.63 e^{-\frac{t}{380}} + 0.68 e^{-\frac{t}{12.5}}) \dots \dots \dots (3.30)$$

ii) 試験片 (b)

時間 (hours)      近似式

$$10000 \sim y_1 = 3.34 e^{-\frac{t}{31579.7}}$$

-9.18



$$\begin{aligned}
 800 \sim 10\,000 & \quad y_2 = 2.23 e^{-\frac{t}{1500}} \\
 100 \sim 800 & \quad y_3 = 1.10 e^{-\frac{t}{150}} \\
 0 \sim 100 & \quad y_4 = 0.68 e^{-\frac{t}{22.6}} \\
 R = 9.18 - (3.34 e^{-\frac{t}{31579.7}} + 2.23 e^{-\frac{t}{1500}} \\
 & + 1.10 e^{-\frac{t}{150}} + 0.68 e^{-\frac{t}{22.6}}) \dots\dots\dots (3.31)
 \end{aligned}$$

3.4 長期純レラクセーション値の推定

3.4.1 従来の各種推定方法

従来から行われている長期純レラクセーション値の推定方法には次のようなものがある。

- 1) 時間とレラクセーション値を両対数グラフにプロットして  $\log R \sim \log t$  関係を表わし、これを直線近似して 30 年後のレラクセーション値を求める方法<sup>4)</sup>
- 2) 純レラクセーションの終局値は 1000 時間レラクセーション値 ( $R_{1000}$ ) の 3 倍であるとする方法<sup>5)</sup>
- 3) 純レラクセーション曲線は  $R(t) = A \ln^2 t + B \ln t + C$  ( $A, B, C$  は定数) の関数で表示されるということから、この式を利用して 30 年後のレラクセーション外挿値として求める方法<sup>6)</sup>
- 4) 高温レラクセーションテストより定めたマスター曲線を利用する Larson-Miller 法<sup>7),8)</sup>

3.4.2 多項  $e$  関数表示を利用した推定方法

上記の各種推定方法では、いずれも最終値推定への明確な意味づけが不十分である。ここでは、多項  $e$  関数表示を利用した終局値の推定方法を示す。

I-1: 曲線 I (図-3.1(a) 参照) の  $b_0$  より  $R_n = \sigma_0 - b_0$  とする方法

これは 表-3.1, 3.3 に示すように、測定値を多項  $e$  関数表示する計算過程において  $f_i(t)$  式 (表-3.2 参照) における定数項 ( $R_n$ ) を測定時間の組合せ  $t_i$  の大きな方の値によって定める方法である。

I-2: 各種測定時間の組合せ  $t_i$  に対して定まる最終値  $R_n(i)$  を曲線表示して最終値を推定する法 (図-3.4 参照)

これは 表-3.1 および 3.3 に示される  $R_n(i)$  の値を終局値を持つ関数で近似表示して最終値を見出すもので、本稿では双曲線関数を用いた。

II: レラクセーションの速度を利用する方法

図-3.9 に示すレラクセーション曲線のある点の接線は、その点における速度を与えるが、この接線が縦軸を切る点 ( $B_n$ ) は、レラクセーション

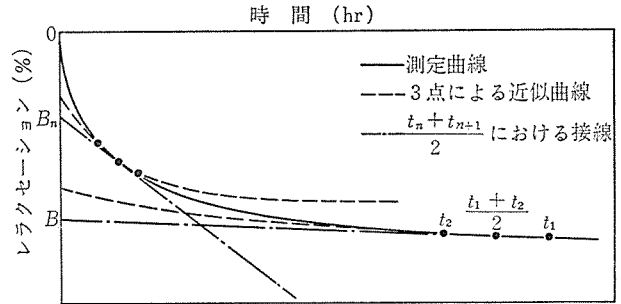


図-3.9 レラクセーション速度 (接線) を利用する方法

速度 ( $v_R$ ) の減少とともに大きくなり、最終的にはレラクセーション速度が零になるときに定まる  $B$  の値がレラクセーションの最終値を与える、という性質を利用する方法である。この場合速度  $v_R$  と  $B$  の値は測定値そのものから定めるのと、近似表示された多項  $e$  関数から定めるのとが考えられる。

方法 I の例:

I-1 については 表-3.1 および 3.3 などに示されるので、ここでは I-2 の例について示す。双曲線の (3.32) 式は (3.33) 式

$$y = \frac{x}{a+bx} \quad (a, b \text{ は定数}) \dots\dots\dots (3.32)$$

$$\therefore \frac{x}{y} = a+bx \dots\dots\dots (3.33)$$

のように表現できるので、 $\frac{x}{y}$  と  $x$  との関係が直線で近似できれば (3.33) 式、したがって (3.32) より最終値  $1/b$  が定まる。

(1) PC 鋼線の場合——表-3.1 のデータを利用

この図よりホットストレッチング材に対し  $y$  を  $R_n(i)$ ,  $x$  を  $t_{i, \max.}$  とし  $x$  と  $\frac{x}{y}$  の関係を図示すると 図-3.10 のように極めてよい直線関係が得られた。

この図よりホットストレッチング材に対し

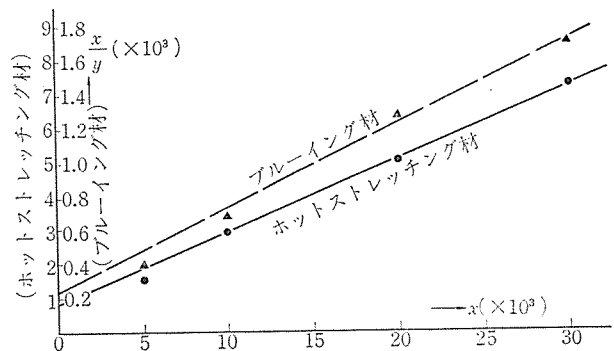


図-3.10 方法 I-2 による最終値の推定 (PC 鋼線)

て、 $b=(5.1-0.85)/20$ 、 $\therefore R_n=1/b=4.70\%$  が得られ、ブルーイング材に対しては  $b=(1.22-0.24)/20$ 、 $\therefore R_n=20.4\%$  が得られる。

(2) PC 鋼棒の場合——表-3.3 のデータを利用

上記と同様にして 図-3.11 が得られるが、 $x$  と  $\frac{x}{y}$  の関係は極めてよい直線性を示している。

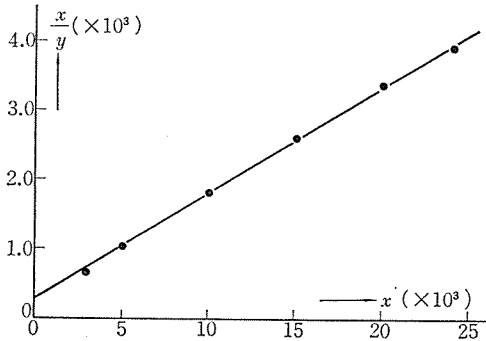


図-3.11 方法 I-2 による最終値の推定 (PC 鋼棒)

これより最終値を推定すると、 $b=(3.38-0.28)/20$ 、 $\therefore R_n=1/b=6.45\%$  となる。

方法 II の例：

PC 鋼線に対する応用例を示す。本方法の場合、速度  $v_R$  と切片  $B$  の値との関係は一般に曲線で与えられるが、両対数グラフを利用することのほかに  $v_R$  および  $B$  に 1 を加えた  $\log(v_R+1)$  と  $\log(B+1)$  の値を用いることによって、( $v_R$ ,  $B$  が零のとき、 $\log(v_R+1)$ ,  $\log(B+1)$  の値が零となるようにしたもの) 極めて良好な直線関係が得られることが明らかになった。求めた結果を表-3.6 (a), (b) および 図-3.12 (a), (b) に示す。

表-3.6 (a) 方法 II による最終値の推定 (ブルーイング材)

初荷重	データ数*1	推 定 式	最終値*2
3 780 kg	3	$(B+1)=13.884 (v_R+1)^{-0.228}$	12.88
	6	$(B+1)=14.723 (v_R+1)^{-0.259}$	13.72
	8	$(B+1)=15.087 (v_R+1)^{-0.269}$	14.07
4 320 kg	3	$(B+1)=19.971 (v_R+1)^{-0.169}$	18.97
	6	$(B+1)=20.611 (v_R+1)^{-0.184}$	19.61
	9	$(B+1)=21.385 (v_R+1)^{-0.199}$	20.39
4 860 kg	4	$(B+1)=22.060 (v_R+1)^{-0.094}$	21.06
	6	$(B+1)=22.279 (v_R+1)^{-0.099}$	21.28
	8	$(B+1)=22.751 (v_R+1)^{-0.109}$	21.75

表-3.6 (b) 方法 II による最終値の推定 (ホットストレッチング材)

初荷重	データ数*1	推 定 式	最終値*2
3 780 kg	3	$(B+1)=4.636 (v_R+1)^{-0.273}$	3.64
	6	$(B+1)=4.580 (v_R+1)^{-0.267}$	3.58
4 320 kg	3	$(B+1)=4.456 (v_R+1)^{-0.174}$	3.46
	6	$(B+1)=4.796 (v_R+1)^{-0.242}$	3.80
4 860 kg	3	$(B+1)=4.800 (v_R+1)^{-0.144}$	3.80
	6	$(B+1)=4.713 (v_R+1)^{-0.127}$	3.71

\*1) データはレラクセーション速度の小さいものから順に用いた。  
\*2) 最終値は  $v_R \rightarrow 0$  とした時の  $B$  の値から求めた。

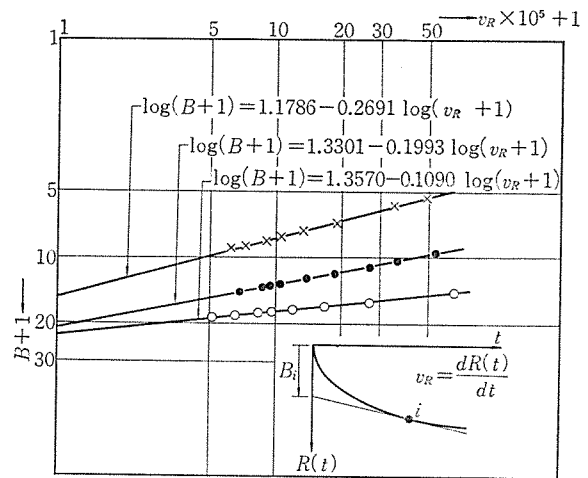


図-3.12 (a) 方法 II による最終値の推定 (ブルーイング材)

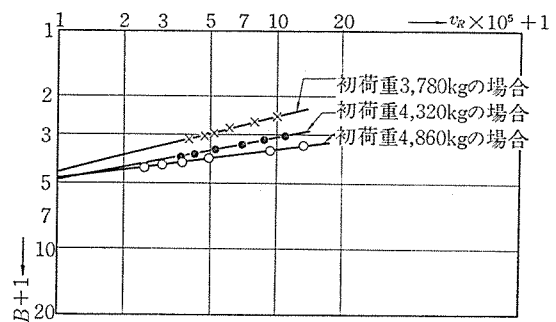


図-3.12 (b) 方法 II による最終値の推定 (ホットストレッチング材)

### 3.4.3 推定結果と各種方法の比較

PC 鋼線に関して行った各種方法による推定結果を表-3.7 に一括して示す。

本報において提案している方法による推定値は、ほぼ妥当な純レラクセーション最終値を与えているものと考えられる。

(執筆担当：鈴木計夫)

表-3.7 5万時間測定値からの長期レラクセーション値の推定 (PC 鋼線 7mm)

推定法	サンプル 初荷重	ホットストレッチング材			ブルーイング材		
		3 780 gk (0.58 $\sigma_B$ )	4 320 kg (0.66 $\sigma_B$ )	4 860 kg (0.75 $\sigma_B$ )	3 780 kg (0.57 $\sigma_B$ )	4 320 kg (0.65 $\sigma_B$ )	4 860 kg (0.74 $\sigma_B$ )
多項 $e$ 関数からの外挿値	I-1	3.62%	(5.66%)* <sup>1)</sup>	4.77%	11.39	17.20%	21.42%
	I-2	—	—	4.70%	—	—	20.4%
レラクセーション速度=0 からの推定値		3.58%	(4.06%)	3.71%	14.09%	20.39%	21.75%
FIP/CEB 指針 両対数直線近似 ( $\log R_e - \log t$ )		4.03%	—* <sup>2)</sup>	4.51%	—	22.68%	26.53%
1 000 hrs. Relax. 値の3倍 $3 \times R_e, 1 000 \text{ h.}$		3.9%	5.4%	8.7%	12.6%	24.3%	38.7%
Glodowski $R_e = A \ln^2 t + \ln t + C$		3.45%	—	4.50%	—	20.24%	24.91%
Krchov $R_e = B \log t + C$		3.13%	3.07%	4.39%	13.35%	17.48%	23.01%
Larson - Miller 法		—	1.5%	—	—	10.95%	—

\*<sup>1)</sup> 実験が充分正しく行われなかったためと考えられる。

\*<sup>2)</sup> 実測データが推定曲線に fit しなかったため、外挿できなかったもの。

参 考 文 献

- 1) CEB-FIP : コンクリート構造物設計施工国際指針, 鹿島出版会
- 2) 猪股俊司 : プレストレストコンクリート部材中での PC 鋼材のレラクセーション, プレストレストコンクリート Vol. 14, No 3, June 1972
- 3) 鈴木計夫 : 学位論文 pp. 90
- 4) CEB-FIP : International Recommendations for the Design and Construction of Concrete Structures, June 1970
- 5) FIP : "Report on Prestressing Steel. 1. Types and Properties", Aug. 1976
- 6) R. J. Glodowski and J. J. Lorenzetti : "A Method for Predicting Prestress Loss in a Prestressed Concrete Structure", J. of PCI, March-April 1972, pp. 17~31
- 7) Larson, F.R & Miller, J.A : "A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses", Transactions of ASME, July 1952. 765~775
- 8) T. Cahill and G.D. Branch : "Long Term Relaxation Behavior of Stabilized Prestressing Wires and Strand", GKN Group D, Paper 19, Somerset Wire Company Ltd., 1967

4. PC 鋼材レラクセーションとコンクリートのクリープ, 乾燥収縮の相互作用を考慮したプレストレス減退量の解析

4.1 概 説

実際の PC 部材では, 導入プレストレス力はコンクリートのクリープおよび乾燥収縮, PC 鋼材のレラクセーションによって, 導入後の材令の進行とともに減少することは周知である。従来, PC 鋼材のレラクセーション

は, コンクリートのクリープおよび乾燥収縮にくらべて極めて短時日にその大部分がおり, PC 鋼材レラクセーションによるプレストレス力減退量を導入プレストレス力から単純に差引くことによって, 便宜上その影響を考慮していた。しかし, 2. および 3. に述べたように, PC 鋼材レラクセーションもコンクリートのクリープおよび乾燥収縮と同様に長年月にわたって進行し, かつ, 通常の許容引張応力度のもとでは, レラクセーション最終値は 15~20% にも達するであろうことが推定され, その結果, PC 部材の導入プレストレス力減退量の解析は, PC 鋼材のレラクセーションとコンクリートのクリープおよび乾燥収縮の両者の相互干渉を考慮して行うことが必要であることが指摘される。

このような研究の必要性は 1968 年に Madrid で開催された PC 鋼材に関する FIP シンポジウムにおいて論じられたのが最初である<sup>1)</sup>。すなわち, PC 部材の設計に用いる PC 鋼材レラクセーションをいかにして推定するかという観点から, コンクリートのクリープおよび乾燥収縮による縮みを考えたレラクセーションに関する二, 三の研究結果が論議され, PC 鋼材伸びひずみを一定に保ったいわゆる純レラクセーション量とくらべて, コンクリートのクリープ, 乾燥収縮による縮みをあてた場合のレラクセーション量 (みかけのレラクセーション量) はかなり小さくなること, 200~300 時間以後のみかけのレラクセーションの進行は極めておそくなることなどが指摘された。図-4.1 はその一例を示すものであり, 同様な実験結果が 2.7.2 にも示されている。もちろん, コンクリートのクリープ, 乾燥収縮を考慮したレラクセーション量の定量化のためには解析的研究が必要であることも強調され, 今日, ようやくコンクリートの

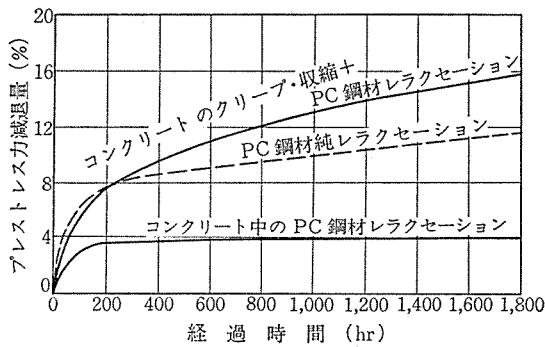


図-4.1 コンクリートのクリープ、乾燥収縮および PC 鋼材レラクセーションによるプレストレス力減退の一例 (Dumas の実験)

クリープ、乾燥収縮および PC 鋼材レラクセーションを考慮したプレストレス力減退量の解析的研究が 2~3 の研究者によって発表されるに至っている。ここではこれらの解析法の概要を説明し、コンクリート中にある PC 鋼材レラクセーションがプレストレス力減退にどのように影響するかを知るための参考に供する。

#### 4.2 コンクリートのクリープ、乾燥収縮と PC 鋼材レラクセーションの相互作用によるプレストレス力減退解析方法

##### 4.2.1 猪股の方法 (逐次計算法)<sup>2)</sup>

猪股はコンクリートのクリープ、乾燥収縮、PC 鋼材引張応力度の減退にともなうコンクリートの弾性回復ひずみを加算したいわゆるコンクリートのひずみ変化がおこる場合の PC 鋼材レラクセーションを、コンクリートのひずみ変化に相当する PC 鋼材引張応力度の弾性減少量を初引張応力度から差引いた応力度を初引張応力度とする場合のレラクセーション速度と同じ速度でレラクセーションが進行するとして、コンクリートのクリープ、乾燥収縮、PC 鋼材レラクセーションによるプレストレス力減退の逐次数値計算法を発表した。すなわち、PC 鋼材を初引張応力度  $\sigma_p$  で標準時間  $t_0$  からひずみ一定保持とし、時間  $t_1$  において瞬間弾性ひずみ減少  $d\varepsilon_p(t_1)$  をあたえたときの  $t_1$  以後の任意の時間  $t$  までにおこるレラクセーションは、 $t_1$  における  $d\varepsilon_p(t_1)$  をあたえた直後までの PC 鋼材引張応力度減少を  $d\sigma_p(t_1)$ 、 $d\varepsilon_p(t_1)$  をあたえる直前までの初引張応力度  $\sigma_p$  によるレラクセーション量を  $d\bar{\sigma}_{pr}(t_1)$  とするとき、

$$\sigma_0 = \sigma_p - [d\sigma_p(t_1) - d\bar{\sigma}_{pr}(t_1)] \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

を初引張応力度とする場合のレラクセーション進行速度と同じ速度で進行するとしている。いま、初引張応力度  $\sigma_p$  に対する純レラクセーション量を

$$d\bar{\sigma}_{pr}(t) = d\bar{\sigma}_{pr}(\infty) \cdot g(t-t_0) \quad \dots\dots\dots(4.2)$$

$d\bar{\sigma}_{pr}(\infty)$  : 初引張応力度  $\sigma_p$  のもとでの純レラクセ

ーション最終値

$g(t-t_0)$  : ひずみ持続時間  $(t-t_0)$  に対するレラクセーションの進行を表わす関数で、  
 $g(0)=0, g(\infty)=1$

で表わすことにし、かつ、(4.1) 式の  $\sigma_0$  を初引張応力度とするとときの純レラクセーション量  $d\bar{\sigma}_{or}(t)$  は、PC 鋼材初引張応力度が  $0.5\sigma_{pu}$  ( $\sigma_{pu}$  は PC 鋼材破断強度) 以下ではおこらず、かつ、 $(\sigma_0 - 0.5\sigma_{pu})^2$  に正比例しておくと仮定して、

$$\begin{aligned} d\bar{\sigma}_{or}(t) &= d\bar{\sigma}_{pr}(t) \left( \frac{\sigma_0 - 0.5\sigma_{pu}}{\sigma_p - 0.5\sigma_{pu}} \right)^2 \\ &= d\bar{\sigma}_{pr}(\infty) g(t-t_0) \left( 1 - \frac{\sigma_0 - 0.5\sigma_{pu}}{\sigma_p - 0.5\sigma_{pu}} \right)^2 \\ &\dots\dots\dots(4.3) \end{aligned}$$

で表わしている。いま、任意時間  $\tau$  での PC 鋼材のひずみ変化があると、これによる  $\tau \sim \tau + d\tau$  間におこるレラクセーション  $d\sigma_{pr}(\tau)$  の変化は、(4.3) 式を用いて

$$\begin{aligned} \frac{d d\sigma_{pr}(\tau)}{d\tau} d\tau &= d\bar{\sigma}_{pr}(\infty) \frac{dg(\tau-t_0)}{d\tau} \\ &\times \left( 1 - \frac{d\sigma_p(\tau) - d\bar{\sigma}_{pr}(\tau)}{\sigma_p - 0.5\sigma_{pu}} \right)^2 d\tau \dots\dots(4.4) \end{aligned}$$

したがって、時間  $t_n$  におけるみかけのレラクセーション  $d\sigma_{pr}(t_n)$  は次のようになる。

$$\begin{aligned} d\sigma_{pr}(t_n) &= \int_{t_0}^{t_n} d\bar{\sigma}_{pr}(\infty) \frac{dg(\tau-t_0)}{d\tau} \\ &\quad \left( 1 - \frac{d\sigma_p(\tau) - d\bar{\sigma}_{pr}(\tau)}{\sigma_p - 0.5\sigma_{pu}} \right)^2 d\tau \\ &= \sum_{i=1}^n \left\{ (d\bar{\sigma}_{pr}(t_i) - d\bar{\sigma}_{pr}(t_{i-1})) \right. \\ &\quad \times \left. \left[ 1 - \frac{1}{2} \frac{d\sigma_p(t_i) - d\bar{\sigma}_{pr}(t_i) + d\sigma_p(t_{i-1}) - d\bar{\sigma}_{pr}(t_{i-1})}{\sigma_p - 0.5\sigma_{pu}} \right] \right\} \\ &\dots\dots\dots(4.5) \end{aligned}$$

$d\bar{\sigma}_{pr}(t_i)$  : 初引張応力度  $\sigma_p$  に対する時間  $t_i$  までの純レラクセーション

$d\sigma_p(t_i)$  : 時間  $t_i$  までの PC 鋼材引張応力度減退量したがって、各時間  $t_i$  における PC 鋼材引張応力度減退量  $d\sigma_p(t_i)$  が既知であれば、(4.5) 式から任意時間  $t_n$  におけるみかけのレラクセーション量  $d\sigma_{pr}(t_n)$  を計算できる。すなわち、 $t_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) とするとき、最初の時間  $t_1$  までのみかけのレラクセーション  $d\sigma_{pr}(t_1)$  は、載荷開始時  $t_0$  において  $d\sigma_p(t_0)=0, d\bar{\sigma}_{pr}(t_0)=0$  であることを考慮して、

$$d\sigma_{pr}(t_1) = d\bar{\sigma}_{pr}(t_1) \left[ 1 - \frac{1}{2} \frac{d\sigma_p(t_1) - d\bar{\sigma}_{pr}(t_1)}{\sigma_p - 0.5\sigma_{pu}} \right] \quad \dots\dots\dots(4.6.1)$$

さらに時間  $t_2$  において

$$d\sigma_{pr}(t_2) = d\sigma_{pr}(t_1) + [d\bar{\sigma}_{pr}(t_2) - d\bar{\sigma}_{pr}(t_1)]$$

$$\times \left[ 1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta\sigma_p(t_2) - \Delta\bar{\sigma}_{pr}(t_2) + \Delta\sigma_p(t_1) - \Delta\bar{\sigma}_{pr}(t_1)}{\sigma_p - 0.5\sigma_{pu}} \right] \dots\dots\dots(4.6.2)$$

以下同様にして時間  $t_i (\leq t_n)$  においては,

$$\Delta\sigma_{pr}(t_i) = \sum_{i=1}^{i-1} \Delta\sigma_{pr}(t_i) + [\Delta\bar{\sigma}_{pr}(t_i) - \Delta\bar{\sigma}_{pr}(t_{i-1})] \\ \times \left[ 1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta\sigma_p(t_i) - \Delta\bar{\sigma}_{pr}(t_i) + \Delta\sigma_p(t_{i-1}) - \Delta\bar{\sigma}_{pr}(t_{i-1})}{\sigma_p - 0.5\sigma_{pu}} \right] \dots\dots\dots(4.6.3)$$

となり、逐次計算ができる。

一方、 $t=t_0$  において一定持続応力を載荷したときのコンクリートのクリープおよび乾燥収縮ひずみの和は、FIP-CEB コンクリート構造物設計施工指針による表示を用いると、次のようになる。

$$\epsilon_{c,t} = \epsilon_{c0}k(t_0)\varphi_n f(t-t_0) + \epsilon_{s\infty}f(t-t_0) \dots(4.7)$$

$\epsilon_{c0}$ : 持続応力載荷時のコンクリート弾性ひずみ

$\epsilon_{s\infty}$ : コンクリートの乾燥収縮ひずみ最終値の標準値

$\varphi_n$ : コンクリートのクリープ係数最終値の標準値

$k(t_0)$ : 載荷開始材令  $t_0$  に対するクリープ係数の修正係数

$f(t-t_0)$ : クリープの進行を表わす関数で、 $f(0)=0$  かつ  $f(\infty)=1$  である。

いま、任意時間  $\tau$  における PC 鋼材引張応力度減少量を  $\Delta\sigma_p(\tau)$ 、プレストレス導入時の PC 鋼材引張応力度を  $\sigma_p$ 、コンクリート断面積を  $A_c$ 、重心軸に対する断面 2 次モーメントを  $I_c$ 、PC 鋼材断面積を  $A_p$ 、偏心距離を  $e_p$  とするとき、任意時間  $t_n$  までにおこるコンクリートのひずみ変化量  $\epsilon_c(t_n)$  は次のようになる。

$$\epsilon_c(t_n) = \frac{p}{E_c} \sigma_p \left( 1 + \frac{e_p^2}{r_c^2} \right) k(t_0)\varphi_n f(t_n-t_0) \\ + \epsilon_{s\infty}f(t_n-t_0) - \frac{p}{E_c} \left( 1 + \frac{e_p^2}{r_c^2} \right) \\ \int_{t_0}^{t_n} [1+k(\tau)\varphi_n f(t_n-\tau)] \frac{d\Delta\sigma_p(\tau)}{d\tau} d\tau \dots\dots\dots(4.8.1)$$

$E_c$ : コンクリートのヤング係数 (一定とする)

$p$ : PC 鋼材鉄筋比 ( $=A_p/A_c$ )

$r_c$ : 断面回転半径 ( $=\sqrt{I_c/A_c}$ )

一方、PC 鋼材のひずみ変化量  $\epsilon_p(t_n)$  は、 $t_n$  までのみかけのリラクセーション量  $\Delta\sigma_{pr}(t_n)$  を考慮して

$$\epsilon_p(t_n) = \frac{\Delta\sigma_p(t_n) - \Delta\sigma_{pr}(t_n)}{E_p} \dots\dots\dots(4.8.2)$$

$E_p$ : PC 鋼材のヤング係数

したがって、(4.8.1) および (4.8.2) のひずみが等しいことから、

$$\Delta\sigma_p(t_n) - \Delta\sigma_{pr}(t_n) = np\sigma_p \left( 1 + \frac{e_p^2}{r_c^2} \right)$$

$$k(t_0)\varphi_n f(t_n-t_0) + nE_c\epsilon_{s\infty}f(t_n-t_0) \\ - np \left( 1 + \frac{e_p^2}{r_c^2} \right) \int_{t_0}^{t_n} [1+k(\tau)\varphi_n f(t_n-\tau)] \\ \frac{d\Delta\sigma_p(\tau)}{d\tau} d\tau \dots\dots\dots(4.9)$$

$n$ : ヤング係数比 ( $=E_p/E_c$ )

いま、

$$\int_{t_0}^{t_n} [1+k(\tau)\varphi_n f(t_n-\tau)] \frac{d\Delta\sigma_p(\tau)}{d\tau} d\tau \\ \doteq \sum_{i=1}^n \left[ 1+k \left( \frac{t_{i-1}+t_i}{2} \right) \varphi_n f \left( t_n - \frac{t_{i-1}+t_i}{2} \right) \right] \\ (\Delta\sigma_p(t_i) - \Delta\sigma_p(t_{i-1})) \\ = \sum_{i=1}^n a_{i,n} (\Delta\sigma_p(t_i) - \Delta\sigma_p(t_{i-1})) \\ = a_{1,n} \Delta\sigma_p(t_1) + a_{2,n} (\Delta\sigma_p(t_2) - \Delta\sigma_p(t_1)) \\ + a_{3,n} (\Delta\sigma_p(t_3) - \Delta\sigma_p(t_2)) \\ + \dots\dots + a_{n,n} (\Delta\sigma_p(t_n) - \Delta\sigma_p(t_{n-1})) \\ = (a_{1,n} - a_{2,n}) \Delta\sigma_p(t_1) + (a_{2,n} - a_{3,n}) \Delta\sigma_p(t_2) \\ + \dots\dots + (a_{n-1,n} - a_{n,n}) \Delta\sigma_p(t_{n-1}) + a_{n,n} \Delta\sigma_p(t_n) \\ = \sum_{i=1}^{n-1} [(a_{i,n} - a_{i+1,n}) \Delta\sigma_p(t_i)] + a_{n,n} \Delta\sigma_p(t_n) \\ \dots\dots\dots(4.10)$$

$$a_{i,n} = 1+k \left( \frac{t_{i-1}+t_i}{2} \right) \varphi_n f \left( t_n - \frac{t_{i-1}+t_i}{2} \right) \dots\dots\dots(4.11)$$

と近似し、(4.9) 式に代入して整理すると、

$$\Delta\sigma_p(t_n)(1+\alpha a_{n,n}) = \Delta\sigma_{pr}(t_n) \\ + \alpha\sigma_p k(t_0)\varphi_n f(t_n-t_0) + nE_c\epsilon_{s\infty}f(t_n-t_0) \\ - \alpha \sum_{i=1}^{n-1} (a_{i,n} - a_{i+1,n}) \Delta\sigma_p(t_i) \dots\dots\dots(4.12)$$

$$\alpha = np \left( 1 + \frac{e_p^2}{r_c^2} \right) \dots\dots\dots(4.13)$$

すなわち、(4.12) 式は  $t_n$  以前の減退量  $\Delta\sigma_p(t_i) (i=1, 2, 3, \dots, n-1)$  が既知で、かつ、みかけのリラクセーション  $\Delta\sigma_{pr}(t_n)$  が既知の場合の  $\Delta\sigma_p(t_n)$  を求める式となっている。 $t_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$  に対してこれを記述しなおすと

$$t=t_1 \text{ のとき } (n=1) \\ (1+\alpha a_{1,1}) \Delta\sigma_p(t_1) = \Delta\sigma_{pr}(t_1) \\ + \alpha\sigma_p k(t_0)\varphi_n f(t_1-t_0) + nE_c\epsilon_{s\infty}f(t_1-t_0) \\ \dots\dots\dots(4.14.1)$$

$$t=t_2 \text{ のとき } (n=2) \\ (1+\alpha a_{2,2}) \Delta\sigma_p(t_2) = \Delta\sigma_{pr}(t_2) \\ + \alpha\sigma_p k(t_0)\varphi_n f(t_2-t_0) + nE_c\epsilon_{s\infty}f(t_2-t_0) \\ - \alpha(a_{1,2} - a_{2,2}) \Delta\sigma_p(t_1) \dots\dots\dots(4.14.2)$$

$$t=t_3 \text{ のとき } (n=3) \\ (1+\alpha a_{3,3}) \Delta\sigma_p(t_3) = \Delta\sigma_{pr}(t_3)$$

$$\begin{aligned}
 & +\alpha\sigma_p k(t_0)\varphi_n f(t_3-t_0) + nE_c \varepsilon_{s\infty} f(t_3-t_0) \\
 & -\alpha[(a_{1.3}-a_{2.3})\Delta\sigma_p(t_1) + (a_{2.3}-a_{3.3})\Delta\sigma_p(t_2)] \\
 & \dots\dots\dots(4.14.3)
 \end{aligned}$$

以下同様にして  $\Delta\sigma_p(t_i)$  を計算できる。

以上の計算にあたって、 $\Delta\sigma_{pr}(t_i)$  の計算には (4.6.3) 式を用いるが、この場合 (4.6.3) 式は  $\Delta\sigma_p(t_i)$  の関数であり、当初は未知数として残る。したがって、みかけのレラクセーション量を表わす (4.5) 式と PC 鋼材引張応力度減退量を表わす (4.12) 式とを用いて、時間きざみ  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  に対して順次  $\Delta\sigma_{pr}(t_i), \Delta\sigma_p(t_i)$  を計算するには、次の手順による。

(1) 最初の時間きざみ  $t_1$  までの PC 鋼材引張応力度減退量を (4.14.1) 式から計算する際、みかけのレラクセーション量  $\Delta\sigma_{pr}(t_1)$  のかわりに (4.2) 式で表わされる初引張応力度  $\sigma_p$  に対する時間  $t_1$  までの純レラクセーション量

$$\Delta\bar{\sigma}_{pr}(t_1) = \Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty) \cdot g(t_1-t_0) \dots\dots\dots(4.15)$$

を用い、(4.14.1) 式から  $\Delta\sigma_p(t_1)$  の第 1 近似値を求める。すなわち、

$$\begin{aligned}
 & \Delta\sigma_{p1}(t_1) \\
 & = \frac{\Delta\bar{\sigma}_{pr}(t_1) + \alpha\sigma_p k(t_0)\varphi_n f(t_1-t_0) + nE_c \varepsilon_{s\infty} f(t_1-t_0)}{1 + \alpha a_{1.1}} \\
 & \dots\dots\dots(4.16)
 \end{aligned}$$

(2) この第 1 近似値を用いて (4.6.1) 式からみかけのレラクセーション量  $\Delta\sigma_{pr}(t_1)$  の第 2 近似値を求める。すなわち、

$$\begin{aligned}
 & \Delta\sigma_{pr2}(t_1) \\
 & = \Delta\bar{\sigma}_{pr}(t_1) \left[ 1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta\sigma_{p1}(t_1) - \Delta\bar{\sigma}_{pr}(t_1)}{\sigma_p - 0.5\sigma_{pu}} \right] \\
 & \dots\dots\dots(4.17)
 \end{aligned}$$

(3) これを再び (4.14.1) 式の  $\Delta\sigma_{pr}(t_1)$  として  $\Delta\sigma_p(t_1)$  の第 2 近似値を求め、以下 (4.14.1) 式と (4.6.1) 式とが同時に満足されるまで反復計算する。

(4) 以下、時間  $t_2, t_3, \dots$  に対して上記と同様の手法によって、(4.14.2), (4.14.3) および (4.6.2), (4.6.3) 式を用いて  $\Delta\sigma_p(t_i), \Delta\sigma_{pr}(t_i)$  を計算する。

以上が猪股の逐次計算法の手法であるが、実際の計算には  $g(t-t_0), k(t_0), f(t-t_0)$  などの時間に関する関数をあたえなければならない。猪股はこれらを CEB-FIP コンクリート構造物設計施工国際指針に示されている表示曲線になるべく近い形の曲線となるように時間関数で表示している。これらをまとめて示すと次のようになる。

$$\begin{aligned}
 & \bullet k(t_0) \text{ の値} \\
 & \left. \begin{array}{l} \text{普通ポルトランドセメント} \\ k(t_0) = 9.69 / (4.4 + \sqrt{t_0}) \end{array} \right\}
 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{早強ポルトランドセメント} \\ k(t_0) = 4.05 / (1.4 + \sqrt{t_0}) \end{array} \right\} (4.18)$$

$\bullet f(t-t_0)$  の値 ( $t-t_0 = \tau$  とする)

$$\left. \begin{array}{l} \text{断面仮想厚 } e=5 \text{ cm } f(\tau) = \frac{(2.21+\tau)\tau}{1+(3.6+\tau)\tau} \\ e=10 \text{ cm } f(\tau) = \frac{(1.14+\tau)\tau}{1+(3.36+\tau)\tau} \\ e=20 \text{ cm } f(\tau) = \frac{(0.84+\tau)\tau}{1+(6.04+\tau)\tau} \\ e=40 \text{ cm } f(\tau) = \frac{(0.75+\tau)\tau}{1+(1.39+\tau)\tau} \end{array} \right\} (4.19)$$

$\bullet g(t-t_0)$  の値 ( $t-t_0 = \tau$  とする)

$$g(\tau) = \sqrt[3]{\frac{(2.21+\tau)\tau}{1+(3.6+\tau)\tau}} \dots\dots\dots(4.20)$$

ただし、これら各式の時間  $t, t_0, \tau$  はいずれも 30 日を 1 月として表わした月単位の時間である。

算例として直径 10 cm の円柱供試体の中心に  $\phi 10.8$  mm PC 鋼より線を配置し、 $t_0=7$  日で  $\sigma_p=130$  kg/mm<sup>2</sup> の初引張応力度を導入した場合の計算結果を図—4.2 に示す。計算では、 $\Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty)/\sigma_p=10.5\%$ 、 $\varphi_n=2.76$ 、 $\varepsilon_{s\infty}=3.3 \times 10^{-4}$ 、 $n=6$ 、 $\sigma_{pu}=175$  kg/mm<sup>2</sup>、仮想厚  $e=5$  cm としてある。図—4.2 によると、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮によって、PC 鋼材のみかけのレラクセーションは純レラクセーションと比較して約 25% 小さくなっており、またコンクリートのクリープ、乾燥収縮だけによる影響と同時に PC 鋼材レラクセーションの影響もかなり大きいことがわかる。

4.2.2 G. Dreux の近似解<sup>3),4)</sup>

作用応力度が変化する場合のコンクリートのクリープ (みかけのクリープ) および引張ひずみを変化させた場合の PC 鋼材のレラクセーション (みかけのレラクセーション) を、一定持続応力度のもとでのコンクリートのクリープ (純クリープ) および一定ひずみのもとでの PC 鋼材のレラクセーション (純レラクセーション) から簡単な近似のもとに数式表現し、これを用いてプレストレス減退計算式を導いたものである。

図—4.3 (a) はコンクリートのみかけのクリープの仮定を示したもので、実際のひずみ変化は AB' で表わされる。いま、

- $\sigma_c$  : コンクリートの初圧縮応力度
- $\sigma_c(t)$  : 任意時間  $t$  におけるコンクリート圧縮応力度
- $E_c$  : コンクリートのヤング係数
- $\varphi_t$  : コンクリートのクリープ係数
- $\Delta\bar{\varepsilon}_c(t)$  : 一定持続応力  $\sigma_c$  のもとでのコンクリートのクリープひずみ (純クリープひずみ)
- $\Delta\varepsilon_c(t)$  : みかけのクリープひずみ

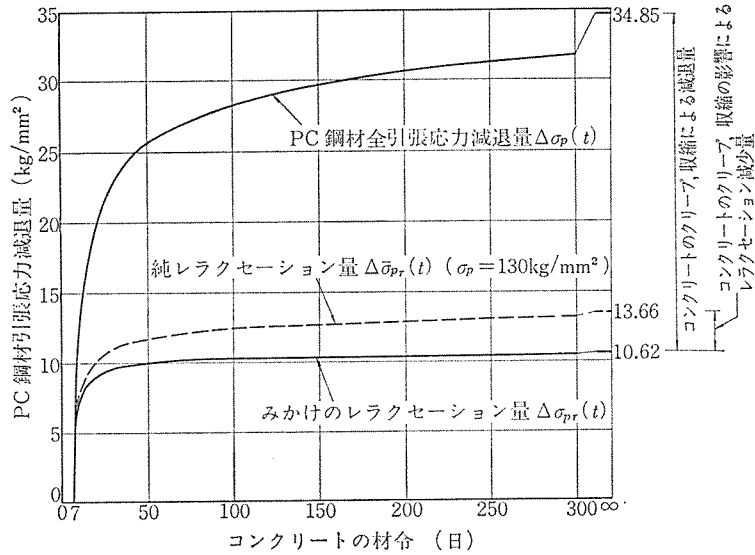


図-4.2 PC 鋼材全引張応力減退量  $\Delta\sigma_p(t)$ 、みかけのレラクセーション量  $\Delta\sigma_{pr}(t)$  および純レラクセーション量  $\Delta\sigma_{pr}(t)$  の計算例による比較 (猪股による)

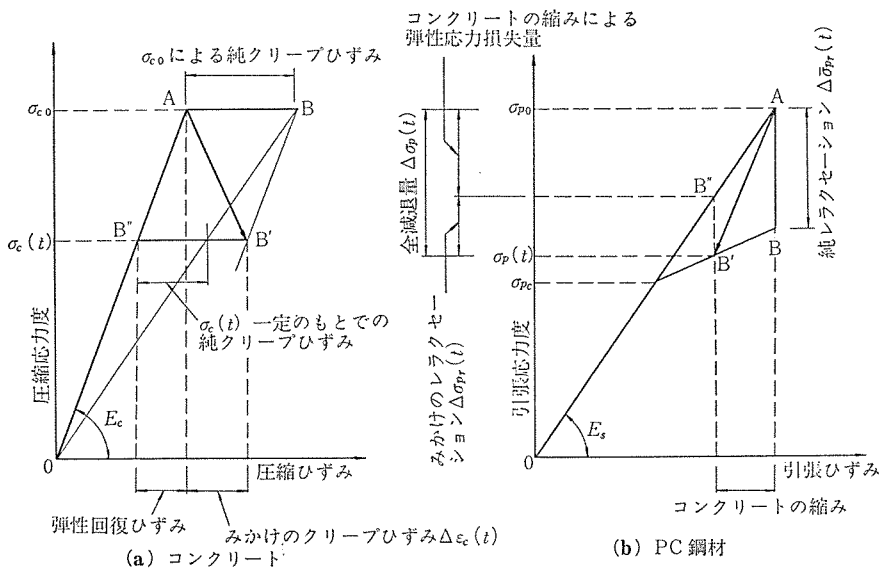


図-4.3 コンクリートのみかけのクリープおよび PC 鋼材のみかけのレラクセーションの仮定

とするとき、実際のひずみ変化  $\Delta\epsilon_c(t)$  は、一定持続応力  $\sigma_c(t)$  のもとでの純クリープひずみから、応力変化量  $\Delta\sigma_c(t) = \sigma_c - \sigma_c(t)$  に対する弾性ひずみを差引いたものと仮定することになる。すなわち、

$$\Delta\epsilon_c(t) = \frac{\sigma(t)}{E_c} \varphi_t - \frac{\Delta\sigma_c(t)}{E_c} = \frac{\sigma_c}{E_c} \varphi_t - \frac{\Delta\sigma_c(t)}{E_c} (1 + \varphi_t) \quad \dots\dots(4.21)$$

一方、初引張応力度  $\sigma_c$  一定のもとでの純クリープは、

$$\Delta\bar{\epsilon}_c(t) = \frac{\sigma_c}{E_c} \varphi_t \quad \dots\dots(4.22)$$

であるから、両者の比

$$k_c(t) = \frac{\Delta\epsilon_c(t)}{\Delta\bar{\epsilon}_c(t)} = 1 - \frac{\Delta\sigma_c(t)}{\sigma_c} \left(1 + \frac{1}{\varphi_t}\right) \quad \dots\dots(4.23)$$

を初圧縮応力度  $\sigma_c$  一定のもとでの純クリープひずみに対するみかけのクリープひずみのひずみ減少率と定義し、純クリープひずみに上記ひずみ減少率をかけてみかけのクリープひずみを表わす。すなわち、

$$\Delta\epsilon_c(t) = k_c(t) \Delta\bar{\epsilon}_c(t) \quad \dots\dots(4.24)$$

みかけのレラクセーションについては 図-4.3(b) のように仮定する。図において

- $\sigma_p$ : PC 鋼材の初引張応力度
- $\sigma_p(t)$ : 任意時間における PC 鋼材の引張応力度
- $E_s$ : PC 鋼材のヤング係数
- $\Delta\sigma_p(t)$ : 任意時間までの引張応力度全損失量
- $\Delta\bar{\sigma}_{pr}(t)$ : 初引張応力度  $\sigma_p$  に対する純レラクセーション
- $\Delta\sigma_{pr}(t)$ : みかけのレラクセーション
- $\sigma_{pc}$ : レラクセーションが全くおこらない限界応力度
- $R_t$ : レラクセーション係数

とするとき、実際の応力減少  $\Delta\sigma_p(t)$  は図中の AB', みかけのレラクセーションは B'B'' で表わされる。すなわち、みかけのレラクセーション  $\Delta\sigma_{pr}(t)$  は初引張応力度  $\sigma_p$  からコンクリートの乾燥収縮およびみかけのクリープによる縮み  $\Delta\varepsilon_s(t) + \Delta\varepsilon_c(t)$  ( $\Delta\varepsilon_s(t)$  はコンクリートの乾燥収縮ひずみ) に相当する弾性応力度を差引いた引張応力度に対するレラクセーションであって、

$$\Delta\sigma_{pr}(t) = [\sigma_p - \sigma_{pc} - E_s(\Delta\varepsilon_s(t) + \Delta\varepsilon_c(t))]R_t \quad \dots\dots\dots(4.25)$$

で表わされる。一方、初引張応力度  $\sigma_p$  に対する純レラクセーションは、

$$\Delta\bar{\sigma}_{pr}(t) = (\sigma_p - \sigma_{pc})R_t \quad \dots\dots\dots(4.26)$$

であり、両者の比

$$k_r(t) = \frac{\Delta\sigma_{pr}(t)}{\Delta\bar{\sigma}_{pr}(t)} = 1 - E_s \frac{\Delta\varepsilon_s(t) + \Delta\varepsilon_c(t)}{\sigma_p - \sigma_{pc}} \quad \dots\dots\dots(4.27)$$

を初引張応力度  $\sigma_p$  のもとでの純レラクセーションに対するみかけのレラクセーションのレラクセーション減少率と定義する。したがって、みかけのレラクセーションは上記減少率を用いて

$$\Delta\sigma_{pr}(t) = k_r(t)\Delta\bar{\sigma}_{pr}(t) \quad \dots\dots\dots(4.28)$$

で表わす。

以上の仮定にしたがうみかけのクリープおよびみかけのレラクセーションを用いて PC 鋼材引張応力度全減退量  $\Delta\sigma_p(t)$  を表わすと、

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_p(t) &= \Delta\sigma_{pr}(t) + E_s[\Delta\varepsilon_s(t) + \Delta\varepsilon_c(t)] \\ &= k_r(t)\Delta\bar{\sigma}_{pr}(t) + E_s[\Delta\varepsilon_s(t) + k_c(t)\Delta\varepsilon_c(t)] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(4.29)$$

となる。一方、PC 鋼材引張応力度  $\sigma_p$ , 同全減退量  $\Delta\sigma_p(t)$  と、PC 鋼材位置でのコンクリート圧縮応力度  $\sigma_c$ , 同変化量  $\Delta\sigma_c(t)$  の間には次式が成立つ。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_c &= p\sigma_p \left(1 + \frac{e_p^2}{r_c^2}\right) = w\sigma_p \\ \Delta\sigma_c(t) &= p\Delta\sigma_p(t) \left(1 + \frac{e_p^2}{r_c^2}\right) = w\Delta\sigma_p(t) \end{aligned} \right\} \quad (4.30)$$

$$w = p \left(1 + \frac{e_p^2}{r_c^2}\right) \quad \dots\dots\dots(4.31)$$

$p$ : PC 鋼材鉄筋比,  $e_p$ : 偏心距離

$r_c$ : 断面回転半径 (=  $\sqrt{I_c/A_c}$ )

したがって、(4.29) 式に (4.23) および (4.27) 式を代入し、かつ、(4.30) 式を用いてすべてを PC 鋼材応力度で表現すると、

$$\Delta\sigma_p(t) = \frac{\Delta\bar{\sigma}_{pr}(t) + E_s[\Delta\varepsilon_s(t) + \Delta\varepsilon_c(t)] \left(1 - \frac{\Delta\bar{\sigma}_{pr}(t)}{\sigma_p - \sigma_{pc}}\right)}{1 + \frac{E_s \Delta\varepsilon_c(t)}{\sigma_p} \left(1 + \frac{1}{\varphi_t}\right) \left(1 - \frac{\Delta\bar{\sigma}_{pr}(t)}{\sigma_p - \sigma_{pc}}\right)} \quad \dots\dots\dots(4.32)$$

となる。 $\Delta\bar{\sigma}_{pr}(t)$ ,  $\Delta\varepsilon_c(t)$  および  $\Delta\varepsilon_s(t)$  の値はそれぞれ実測結果を用いることができる。(4.32) 式の特徴は計算が簡単であることにある。この式を用いたプレストレス減退量計算値と実測値とは良い一致を示すことを実証しているが、ここではその記述を省略する。

#### 4.2.3 R. Atallah, M. Brachet, G. Daraps の解析法<sup>3),5)</sup>

コンクリートのクリープおよび PC 鋼材のレラクセーションの表示にレオロジー方程式を用い、かつ、クリープまたはレラクセーションは作用応力と正比例関係にあるとして解析したものである。

コンクリートのレオロジー方程式としては

$$\varepsilon_c(t) = \phi(0)\sigma_c(t) - \int_0^t \sigma_c(\tau) \frac{d}{d\tau} \phi(t-\tau) d\tau + \Delta\varepsilon_s(t) \quad \dots\dots\dots(4.33)$$

$\varepsilon_c(t)$ : 任意時間における PC 鋼材位置でのコンクリートの全ひずみ (弾性ひずみ + クリープひずみ + 乾燥収縮ひずみ)

$\sigma_c(t)$ : 任意時間における PC 鋼材位置でのコンクリートの残留圧縮応力度

$\phi(t)$ : コンクリートのクリープの影響を表わす関数で、単位応力度に対する弾性ひずみとクリープひずみとの和

$\Delta\varepsilon_s(t)$ : 任意時間までにおこるコンクリートの乾燥収縮ひずみ

また、PC 鋼材のレオロジー方程式としては

$$\begin{aligned} \sigma_p(t) - \sigma_{pa} &= \psi(0)(\varepsilon_p(t) - \varepsilon_{pa}) \\ &- \int_0^t (\varepsilon_p(\tau) - \varepsilon_{pa}) \frac{\partial}{\partial \tau} \psi(t-\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots(4.34) \end{aligned}$$

$$\psi(t) = \frac{\sigma_p(t) - \sigma_{pc}}{\varepsilon_{p0} - \varepsilon_{pc}} = E_s \frac{\sigma_p(t) - \sigma_{pc}}{\sigma_{p0} - \sigma_{pc}} \quad \dots\dots\dots(4.35)$$

$\sigma_p(t)$ : 任意時間  $t$  における PC 鋼材の残存引張応力度

$\sigma_{pa}$ : PC 鋼材のレラクセーションがおこらない限界の引張応力度

$\psi(t)$ : PC 鋼材のレラクセーションを表わす関数で (4.35) 式の定義による

$\sigma_{p0}$ : PC 鋼材初引張応力度

$\varepsilon_{p0} = \sigma_{p0}/E_s$ ,  $\varepsilon_{pa} = \sigma_{pa}/E_s$



$E_s$ : PC 鋼材ヤング係数

$\varepsilon_p(t)$ : 任意時間における PC 鋼材残存引張ひずみ  
一方, 断面応力の釣合および平面保持の仮定から

$$\sigma_c(t) = w\sigma_p(t) \dots\dots\dots(4.36)$$

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_s(t) \dots\dots\dots(4.37)$$

が成立する。したがって, (4.33), (4.34), (4.36) および (4.37) 式から  $\sigma_p(t)$  または  $\sigma_c(t)$ , および,  $\varepsilon_c(t)$  または  $\varepsilon_s(t)$  が計算される。計算は Laplace 変換を用いて行えるが, 詳細は省略して結果だけを示すと次のようになる。

$$\sigma_p(\infty) = \frac{\sigma_{p0} - \sigma_{pc} + \frac{w}{E_c} \frac{\Delta\varepsilon_s(\infty)}{\sigma_{p0}} + \frac{\sigma_{pa}}{\sigma_{p0}\psi(\infty)}}{1/\psi(\infty) + w\phi(\infty)} \sigma_{p0} \dots\dots\dots(4.38)$$

$$\varepsilon_c(\infty) = w\sigma_p(\infty)\phi(\infty) + \Delta\varepsilon_s(\infty) \dots\dots\dots(4.39)$$

$\sigma_p(\infty)$ : PC 鋼材最終残存引張応力度

$\varepsilon_c(\infty)$ : コンクリートの最終ひずみ

$\Delta\varepsilon_s(\infty)$ : コンクリートの乾燥収縮ひずみ最終値

$$\phi(\infty) = \phi(t \rightarrow \infty), \psi(\infty) = \psi(t \rightarrow \infty)$$

さらに, Atallah らは実用的見地から

$$\phi(\infty) = \frac{1}{E_c}(1 + \varphi_n) \dots\dots\dots(4.40)$$

$$\psi(\infty) = E_s \left( 1 - \frac{\Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty)}{\sigma_{p0} - \sigma_{pc}} \right) \dots\dots\dots(4.41)$$

$\varphi_n$ : コンクリートのクリープ係数最終値

$\Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty)$ : 初引張応力度  $\sigma_{p0}$  のときの PC 鋼材純レラクセーション最終値

と仮定している。(4.40) および (4.41) 式を (4.38) 式に代入して, PC 鋼材引張応力度減退量最終値を計算すると,

$$\Delta\sigma_p(\infty) = \sigma_{p0} - \sigma_p(\infty) = \frac{\frac{\sigma_{p0} - \sigma_{pc}}{\sigma_{p0}} \cdot \frac{\Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty)}{\sigma_{p0} - \sigma_{pc} - \Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty)} + n_w\varphi_n}{\frac{\sigma_{p0} - \sigma_{pc}}{\sigma_{p0} - \sigma_{pc} - \Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty)} + \frac{E_s \Delta\varepsilon_s(\infty)}{\sigma_{p0}} + n_w(1 + \varphi_n)} \sigma_{p0} \dots\dots\dots(4.42)$$

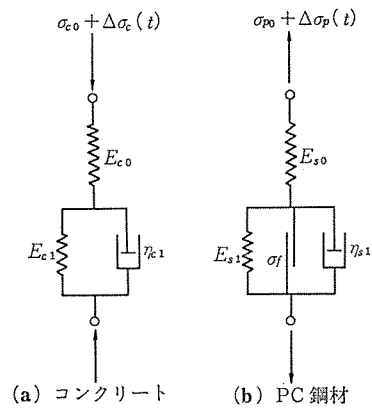
となる。なお, (4.42) 式は  $\Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty)$ ,  $\Delta\varepsilon_s(\infty)$ ,  $\varphi_n$  のかわりに任意時間  $t$  におけるそれぞれの値  $\Delta\bar{\sigma}_{pr}(t)$ ,  $\Delta\varepsilon_s(t)$ ,  $\varphi_t$  を用いることにより, 任意時間  $t$  までの減退量  $\Delta\sigma_p(t)$  の計算式としてよい。

以上に述べた Atallah らの計算式の特徴も, 前項の場合と同様にコンクリートのクリープおよび乾燥収縮ひずみおよび PC 鋼材レラクセーションの実測値を用いて計算が簡単に行えることにある。計算値と実測値は良い一致を示すようであるが, ここでは算例の記述を省略す

る。

#### 4.2.4 簡単なレオロジーモデルによる解析 (六車の解析)<sup>6),7)</sup>

PC 鋼材のレラクセーション速度とコンクリートのクリープ速度との相対的關係によって, 両者の相互作用によるプレストレス減退の時間的経過およびその大きさが変化することは, 上述の種々の解析例から容易に推論できる。六車はこれを簡明に説明する目的で簡単なレオロジーモデルを用いて両者の相互關係を論じている。以下にその概要を述べる。



図—4.4 力学モデル

図—4.4 (a) はコンクリートのクリープを表わす力学モデルで, 初載荷応力度を  $\sigma_{c0}$ , その後の変化応力および変化ひずみをそれぞれ  $\Delta\sigma_c(t)$ ,  $\Delta\varepsilon_c(t)$  (いずれも圧縮を正) とするとき, レオロジー方程式は

$$\Delta\dot{\sigma}_c(t) + k_c(1 + n_c)\Delta\sigma_c(t) + k_c\sigma_{c0} = E_{c0}(\Delta\dot{\varepsilon}_c(t) + k_c n_c \Delta\varepsilon_c(t)) \dots\dots\dots(4.43)$$

$$n_c = E_{c1}/E_{c0}, k_c = E_{c0}/\eta_{c1}$$

(記号  $E_{c0}$ ,  $E_{c1}$ ,  $\eta_{c1}$  は図—4.4(a) を参照のこと) 一定持続応力度  $\sigma_{c0}$  を受ける場合には, クリープひずみ  $\Delta\varepsilon_c(t)$  およびクリープ係数  $\varphi_t = \Delta\varepsilon_c(t)/\varepsilon_{c0}$  ( $\varepsilon_{c0}$  は載荷時弾性ひずみ) は次のようになる。

$$\Delta\varepsilon_c(t) = \frac{\sigma_{c0}}{E_{c1}}(1 - e^{-k_c n_c t}) \dots\dots\dots(4.44)$$

$$\varphi_t = \frac{E_{c0}}{E_{c1}}(1 - e^{-k_c n_c t}) \dots\dots\dots(4.45)$$

図—4.4 (b) は PC 鋼材レラクセーションを表わすモデルで, 大きさ  $\sigma_{pc}$  以下の引張応力度ではレラクセーションはほとんどおこらないという実験的事実にもとづいてスライダーを挿入してある。初引張応力度を  $\sigma_{p0}$ , その後の変化応力および変化ひずみをそれぞれ  $\Delta\sigma_p(t)$ ,  $\Delta\varepsilon_p(t)$  (いずれも引張を正) とするとき, レオロジー方程式は

$$\Delta\dot{\sigma}_p(t) + k_s(1 + n_s)\Delta\sigma_p(t) + k_s(\sigma_{p0} - \sigma_{pc})$$

$$= E_{s0}(\Delta \dot{\epsilon}_p(t) + k_s n_s \Delta \epsilon_p(t)) \dots \dots \dots (4.46)$$

$$n_s = E_{s1}/E_{s0}, k_s = E_{s0}/\eta_{s1}$$

(記号  $E_{s0}$ ,  $E_{s1}$ ,  $\eta_{s1}$  は 図-4.4(b) を参照のこと)  
一定ひずみ ( $\Delta \epsilon_p(t)=0$ ) の場合には, いわゆる PC 鋼材の純レラクセーションとして次式が得られる。

$$\Delta \bar{\sigma}_p(t) = -\frac{\sigma_{p0} - \sigma_{pc}}{1+n_s}(1 - e^{-k_s(1+n_s)t}) \dots (4.47)$$

次に実際の PC 部材断面においては, PC 鋼材初引張応力度  $\sigma_{p0}$  または任意時間までの減退応力度  $\Delta \sigma_p(t)$  と, PC 鋼材位置でのコンクリートの初圧縮応力度  $\sigma_{c0}$ , その後の減退応力度  $\Delta \sigma_c(t)$  との間には

$$\sigma_{c0} = w\sigma_{p0}, \Delta \sigma_c(t) = w\Delta \sigma_p(t) \dots \dots \dots (4.48)$$

の関係がある。一方, PC 鋼材配置位置での PC 鋼材およびコンクリートのひずみ変化量  $\Delta \epsilon(t)$  (圧縮ひずみを正) は, コンクリートのクリープひずみ  $\Delta \epsilon_c(t)$  (弾性回復ひずみも含む) と収縮ひずみ  $S_t$  との和であることを考慮し, かつ, 収縮ひずみの進行は純クリープひずみの進行と相似であると仮定すれば, PC 鋼材位置でのコンクリートおよび PC 鋼材のレオロジー方程式は (4.43) および (4.46) 式から次のようになる。

$$-\Delta \dot{\sigma}_c(t) - k_c(1+n_c)\Delta \sigma_c(t) + k_c\sigma_{c0} = E_{c0}(\Delta \dot{\epsilon}_c(t) + k_s n_c \Delta \epsilon_c(t)) \dots \dots \dots (4.49)$$

$$-\Delta \dot{\sigma}_p(t) - k_c(1+n_s)\Delta \sigma_p(t) + k_s(\sigma_{p0} - \sigma_{pc}) = -E_{s0}(\Delta \dot{\epsilon}_p(t) + k_s n_s \Delta \epsilon_p(t)) \dots \dots \dots (4.50)$$

$$\Delta \epsilon(t) = \Delta \epsilon_c(t) + S_t = \Delta \epsilon_c(t) + S_n(1 - e^{-k_c n_c t}) \dots \dots \dots (4.51)$$

$S_n$ : 収縮ひずみ最終値

(4.48) および (4.51) 式を考慮して初期条件  $t=0$  で  $\Delta \sigma_p(t)=0, \Delta \epsilon(t)=0$  のもとに (4.49) および (4.50) 式をとけば,

$$r(t) = \frac{\Delta \sigma_p(t)}{\sigma_{p0}} = -\frac{E + \lambda_2 C/B}{\lambda_1 - \lambda_2}(1 - e^{\lambda_1 t}) + \frac{E + \lambda_1 C/B}{\lambda_1 - \lambda_2}(1 - e^{\lambda_2 t}) \dots \dots \dots (4.52)$$

$$\Delta \epsilon(t) = \frac{E + \lambda_2 C/B}{\lambda_1 - \lambda_2}(D + \lambda_1)(1 - e^{\lambda_1 t}) - \frac{E + \lambda_1 C/B}{\lambda_1 - \lambda_2}(D + \lambda_2)(1 - e^{\lambda_2 t}) \dots \dots (4.53)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= -(A - \sqrt{A^2 - B}) \\ \lambda_2 &= -(A + \sqrt{A^2 - B}) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4.54)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{k_s + \alpha k_c + (1 + \alpha)(k_c n_c + k_s n_s)}{1 + \alpha} \\ B &= \frac{k_c k_s [n_c(1 + n_s) + \alpha n_s(1 + n_c)]}{1 + \alpha} \\ C &= \frac{k_c k_s [n_c(1 - \sigma_{pc}/\sigma_{p0}) + \alpha n_s + E_{s0} S_n n_c n_s / \sigma_{p0}]}{1 + \alpha} \\ D &= \frac{k_s(1 + n_s) + \alpha k_c(1 + n_c)}{1 + \alpha} \\ E &= \frac{k_s(1 - \sigma_{pc}/\sigma_{p0}) + \alpha k_c + E_{s0} S_n k_c n_c / \sigma_{p0}}{1 + \alpha} \end{aligned} \right\} (4.55)$$

(4.52) および (4.53) 式を用いて数値計算例により PC 鋼材レラクセーションとコンクリートのクリープ, 収縮とのプレストレス減退におよぼす影響を調べた結果を 図-4.5~図-4.7 に示す。力学モデルの諸常数は  
コンクリート:  $E_{c0}=4 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ,  $E_{c1}=2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\eta_{c1}=0.2016 \times 10^9 \text{ hr. kg/cm}^2$   
P C 鋼材:  $E_{s0}=2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ,  $E_{s1}=0.87898 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\eta_{s1}=0.50075 \times 10^9 \text{ hr. kg/cm}^2$  (Case A) および  $\eta_{s1}=5.0075 \times 10^9 \text{ hr. kg/cm}^2$  (Case B)

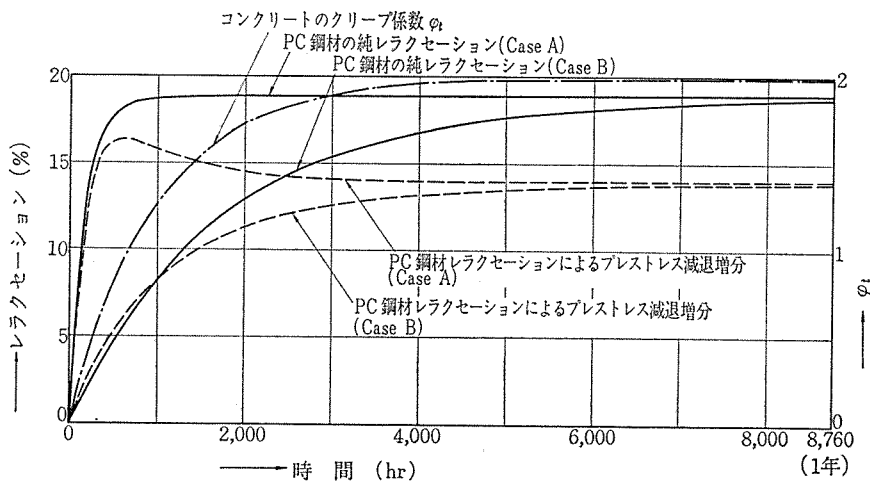
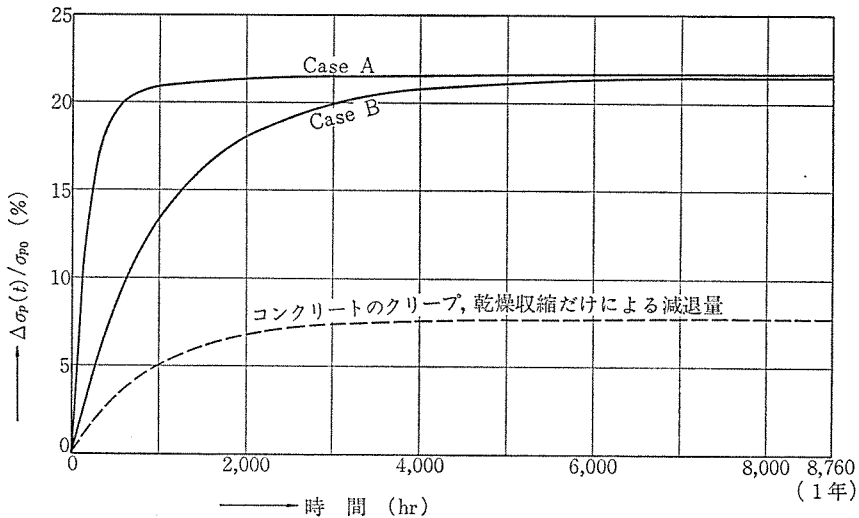
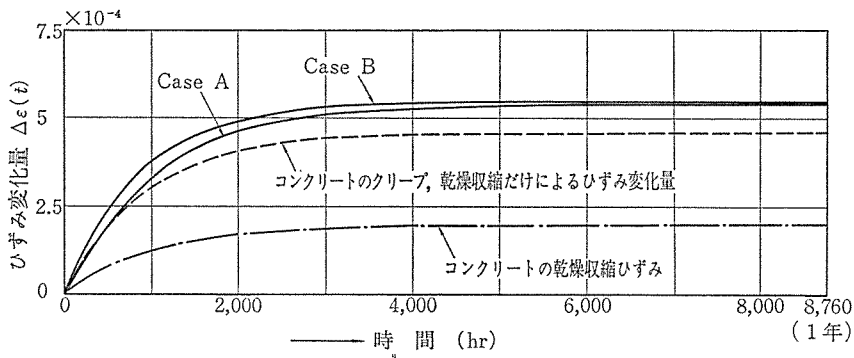


図-4.5 計算に用いた PC 鋼材純レラクセーション曲線およびコンクリートのクリープ係数仮定値



図—4.6 プレストレス減退量計算結果



図—4.7 ひずみ変化量計算結果

その他の諸常数： $\sigma_{p0}=120 \text{ kg/mm}^2$ ， $\sigma_{pc}=90 \text{ kg/mm}^2$ ， $p=0.625\%$ ， $w/p=4/3$ （長方形断面で偏心距離が核半径のとき）， $S_n=2 \times 10^4$

とした。上記の PC 鋼材諸常数で Case A はコンクリートのクリープ初速度にくらべて PC 鋼材純レラクセーション初速度が速い場合、Case B はおそい場合である。図—4.5 には (4.45) 式によるコンクリートのクリープ係数  $\phi_t$  と (4.47) 式による初引張応力度  $\sigma_{p0}=120 \text{ kg/mm}^2$  に対する PC 鋼材純レラクセーション曲線が示してある。図—4.6 は (4.52) 式による PC 部材のプレストレス減退量計算結果を実線で示したもので、PC 鋼材レラクセーション速度の影響が初期材令においておこるが、終局減退量はほぼ同じとなることわかる。同図点線はコンクリートのクリープおよび乾燥収縮だけによる減退量の計算結果で、実線と点線との差が PC 鋼材レラクセーションによる減退量増分となる。この増分は比較のために 図—4.5 に点線で示してある。すなわち、図—4.5 から明らかのように、Case A ではコンクリ

ートのクリープにくらべて PC 鋼材初期レラクセーション速度が著しく早いので、図—4.5 点線で示される PC 鋼材レラクセーションによるプレストレス減退が、コンクリートのクリープの影響をほとんど受けることなく早期におこり、やがてレラクセーション速度がおそくなるとコンクリートのクリープに左右され、みかけ上減退プレストレスの回復現象がおこっている。この点がレラクセーション速度のおそい Case B とは対照的である。なお、図—4.7 には (4.53) 式から計算したひずみの時間的变化を実線で示してある。PC 鋼材レラクセーション速度の影響はほとんどないことがわかる。また、同図にはコンクリートのクリープおよび乾燥収縮だけによるひずみの時間的变化を点線で示してあるが、実線との差はわずかであり、PC 鋼材レラクセーションのひずみ変化にあたる影響はわずかであることがわかる。これは、PC 鋼材レラクセーションによって鋼材引張応力度が減退すると、コンクリートには減退応力度に相当する弾性回復ひずみがおこり、クリープおよび乾燥収縮による縮みを緩和する方向に作用することをあわせ考えれば理解

できる現象である。

### 4.3 本項のまとめ

以上にのべた解析法からわかるように、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮によるコンクリートの縮み変形が同時におこる場合の PC 鋼材のみかけのレラクセーションは、一定ひずみのもとでの純レラクセーションと比較してかなり小さくなり、PC 鋼材レラクセーションおよびコンクリートのクリープ、乾燥収縮を同時に考慮して、プレストレス減退量を計算しないと、かなりの誤差が生ずるのであることが容易に推論できる。しかし、実際の計算にあたっては、種々の条件のもとでの PC 鋼材レラクセーション曲線の数式表示に困難がともない、多くの解析方法では実測曲線をそのまま用いて逐次近似計算を行うといった、数式表示の複雑さが目立つ。さらに簡便で実用的な計算方法の研究が必要である。

(執筆担当：六車 照)

### 参 考 文 献

- 1) M.F. Dumas : Pertes de tension par relaxation d'aciers en service (sous longueurs décrois SAN-TES), Contribution Francaise, Symposium international sur les aciers de précontrainte, F.I.P Madrid, Juin 1968
- 2) 猪股俊司 : プレストレストコンクリート部材中での PC 鋼材のレラクセーション, プレストレストコンクリート, Vol. 14 No. 3, pp. 28~34, June 1972
- 3) 猪股俊司 : PC 部材における PC 鋼材レラクセーションによるプレストレス損失量の計算方法について, プレストレストコンクリート, Vol. 16 No. 6, pp. 54~63, Dec. 1974
- 4) G. Dreux : Interférence de causes á effects dans le calcul des pertes de précontrainte, Contributions techniques francaises, 7<sup>e</sup> Congress de FIP, New York 1974
- 5) R. Atallah, M. Brachet et G. Daraps : Contribution á l'estimation des pertes de précontrainte et des déformations différées des structures en béton précontraint, Contributions techniques francaises, 7<sup>e</sup> Congress de FIP, New York 1974
- 6) 六車 照 : プレストレストコンクリート部材のプレストレス減退に対する PC 鋼材レラクセーションの影響, 日本建築学会近畿支部昭和 51 年度研究報告集 (構造系), pp. 41~44, 昭 51. 6
- 7) 六車 照 : PC 鋼材レラクセーションのプレストレス減退におよぼす影響, 日本建築学会昭和 51 年度大会学術講演梗概集 (構造系) pp. 1249~1250, 昭 51. 10

### 5. 各国設計規準におけるレラクセーション値の取扱いについて

PC 部材における導入プレストレスは、コンクリートのクリープ、乾燥収縮および PC 鋼材のレラクセーションの相互作用によって、導入後の時間の経過とともに減

退することは、すでに前項で詳述したとおりである。各国の PC 構造設計規準にはプレストレス減退量の計算方法が示されているのが普通であるが、計算の複雑さを避けるために、PC 鋼材のレラクセーションの影響とコンクリートのクリープ、乾燥収縮の影響とを個別に取扱うものがほとんどである。ここでは、両者の相互作用を考慮した算定方法が示されている PCI 指針、フランス PC 設計指針、CFB-FIP コンクリート構造物設計施工国際指針の方法を、PC 鋼材のレラクセーション値の取扱い方に重点をおいて概説し、参考にする。

#### 5.1 フランス PC 設計指針におけるプレストレス減退計算式<sup>1)</sup>

フランス PC 設計指針では、コンクリートのクリープ、乾燥収縮によるプレストレス減退量と、PC 鋼材レラクセーションによるそれとを加算する計算式が示されているが、いずれも両者の相互作用を考慮したものとなっている。すなわち、PC 鋼材の引張応力減退量最終値  $\Delta\sigma_p(\infty)$  は次式から計算される。

$$\Delta\sigma_p(\infty) = \Delta\sigma_{sh}(\infty) + \Delta\sigma_{cr}(\infty) + \Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty) \frac{\Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty)(\Delta\sigma_{sh}(\infty) + \Delta\sigma_{cr}(\infty))}{\sigma_p - 0.55\sigma_{su}} \dots\dots\dots(5.1)$$

$\Delta\sigma_{sh}(\infty)$  : コンクリートの乾燥収縮だけによる PC 鋼材引張応力度減退量最終値

$\Delta\sigma_{cr}(\infty)$  : コンクリートのクリープだけによる PC 鋼材引張応力度減退量最終値で、計算上はすべての減退が生じた後の PC 鋼材位置のコンクリートに働く圧縮応力度が一定持続載荷するとしたときのクリープひずみに対応する PC 鋼材引張応力度減退量に等しいと仮定する。

$\Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty)$  : PC 鋼材初引張応力度  $\sigma_p$  に対する純レラクセーション量

$\Delta\sigma_p$  : PC 鋼材初引張応力度 (定着完了時の有効初引張応力度)

$\sigma_{su}$  : PC 鋼材の規格引張強度

(5.1) 式において PC 鋼材のレラクセーションは、PC 鋼材引張応力度が  $0.55\sigma_{su}$  以下ではおこらないことを前提としている。したがって、(5.1) 式は

$$\Delta\sigma_p(\infty) \leq \sigma_p - 0.55\sigma_{su} \dots\dots\dots(5.2)$$

の範囲で適用される。したがって、 $\Delta\sigma_p(\infty) \geq \sigma_p - 0.55\sigma_{su}$  の場合には、(5.1) 式のかわりに

$$\Delta\sigma_p(\infty) = \Delta\sigma_{sh}(\infty) + \Delta\sigma_{cr}(\infty) \dots\dots\dots(5.3)$$

を用いる。

なお、(5.1) 式において、PC 鋼材の純レラクセーション

ヨシ  $\Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty)$  は、初引張応力度を  $0.8\sigma_{su}$  または  $0.7\sigma_{su}'$  ( $\sigma_{su}'$  は実際の PC 鋼材の引張強度) としたときの 1000 時間レラクセーション  $\Delta\bar{\sigma}_{pr}(1000)$  または 3000 時間レラクセーション  $\Delta\bar{\sigma}_{pr}(3000)$  を用いて、次式のどちらか大きい方の値とする。

$$\Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty) = 3 \frac{\Delta\bar{\sigma}_{pr}(1000)}{\sigma_{su}} \cdot \frac{\sigma_p - 0.55\sigma_{su}}{0.25\sigma_{su}} \sigma_p \dots\dots\dots (5.4)$$

$$\Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty) = \frac{\Delta\bar{\sigma}_{pr}(3000) + 0.02\sigma_{su}}{0.8\sigma_{su}} \cdot \frac{\sigma_p - 0.55\sigma_{su}}{0.25\sigma_{su}} \sigma_p \dots\dots\dots (5.5)$$

ただし、 $\Delta\bar{\sigma}_{pr}(3000)$  が実測されてないときには、(5.5) 式のかわりに次式を用いる。

$$\Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty) = 0.1 \frac{\sigma_p - 0.55\sigma_{su}}{0.25\sigma_{su}} \sigma_p \dots\dots\dots (5.6)$$

(5.4) および (5.5) 式において、初引張応力度  $0.8\sigma_{su}$  または  $0.7\sigma_{su}'$  とは異なる初引張応力度  $\sigma_p$  に対する 1000 時間、または 3000 時間レラクセーション値  $\Delta\bar{\sigma}_{pr}'(1000)$ ,  $\Delta\bar{\sigma}_{pr}'(3000)$  が実測されている場合に、これを初引張応力度  $0.8\sigma_{su}$  または  $0.7\sigma_{su}'$  に対するレラクセーション  $\Delta\bar{\sigma}_{pr}(1000)$ ,  $\Delta\bar{\sigma}_{pr}(3000)$  に換算するには次式を用いる。

$$\left. \begin{array}{l} \Delta\bar{\sigma}_{pr}(1000) \\ \Delta\bar{\sigma}_{pr}(3000) \end{array} \right\} = \frac{(0.8\sigma_{su} \text{ or } 0.7\sigma_{su}') - 0.55\sigma_{su}}{\sigma_p - 0.55\sigma_{su}} \times \left\{ \begin{array}{l} \Delta\bar{\sigma}_{pr}'(1000) \\ \Delta\bar{\sigma}_{pr}'(3000) \end{array} \right. \dots\dots\dots (5.7)$$

参考として、フランス設計指針では 100000 時間レラクセーションを最終値と考えているが、任意時間  $t$  までにおこるレラクセーション値  $\Delta\bar{\sigma}_{pr}(t)$  は次式から推定してよいことになっている。

$$\Delta\bar{\sigma}_{pr}(t) = \Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty) \left( \frac{t}{100000} \right)^r \dots\dots\dots (5.8)$$

ここに、 $r$  は実験結果からきまる常数で、実験データのないときには

$$r = 0.19 \dots\dots\dots (5.9)$$

を用いる。ただし、(5.7) 式は  $t \leq 100$  時間の範囲の推定には適用できない。

コンクリートのクリープおよび収縮による PC 鋼材引張応力度減退量の計算については、ここで説明を割愛する。

### 5.2 CEB-FIP 国際指針の計算法<sup>3)</sup>

CEB-FIP コンクリート構造物設計施工国際指針での、コンクリートのクリープ、乾燥収縮および PC 鋼材レラクセーションの相互作用によるプレストレス減退量の取扱いは、前項のフランス設計指針とほぼ同様である。すなわち、

$$\Delta\sigma_p(\infty) = \Delta\sigma_{sh}(\infty) + \Delta\sigma_{cr}(\infty) + \Delta\sigma_{pr}(\infty) \dots\dots\dots (5.10)$$

$\Delta\sigma_{pr}(\infty)$  : コンクリートのクリープおよび乾燥収縮の影響を考慮したみかけのレラクセーション

から計算される。 $\Delta\sigma_{pr}(\infty)$  は次式から計算することになっている。

$$\Delta\sigma_{pr}(\infty) = \Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty) \left( 1 - 3 \frac{\Delta\sigma_{sh}(\infty) + \Delta\sigma_{cr}(\infty)}{\sigma_p} \right) \dots\dots\dots (5.11)$$

したがって、(5.10) 式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_p(\infty) &= \Delta\sigma_{sh}(\infty) + \Delta\sigma_{cr}(\infty) \\ &+ \Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty) \left( 1 - 3 \frac{\Delta\sigma_{sh}(\infty) + \Delta\sigma_{cr}(\infty)}{\sigma_p} \right) \\ &= (\Delta\sigma_{sh}(\infty) + \Delta\sigma_{cr}(\infty)) \left( 1 - 3 \frac{\Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty)}{\sigma_p} \right) \\ &+ \Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty) \dots\dots\dots (5.12) \end{aligned}$$

初引張応力度  $\sigma_p$  のもとの純レラクセーション最終値  $\Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty)$  は 1000 時間レラクセーション  $\Delta\bar{\sigma}_{pr}(1000)$  の 2 倍とみなしてよいことになっている。すなわち

$$\Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty) = 2 \Delta\bar{\sigma}_{pr}(1000) \dots\dots\dots (5.13)$$

試験結果が不十分なときには  $\sigma_p = 0.8\sigma_{su}$  の初引張応力度に対する純レラクセーション最終値を

ベイナイトクエンチした熱処理鋼材  $\Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty)/0.8\sigma_{su} = 12\%$

オイルクエンチした熱処理鋼材 " = 16%  
引抜鋼材 " = 16%  
スタビライズした鋼材 " = 6%

と仮定し、かつ、レラクセーションのおこらない限界初引張応力度を  $0.5\sigma_{su}$  とし、 $0.5\sigma_{su} \sim 0.8\sigma_{su}$  の間の任意の初引張応力度に対しては、 $0.5\sigma_{su}$  で  $\Delta\bar{\sigma}_{pr}(\infty) = 0$ ,  $0.8\sigma_{su}$  で上記の値となり、かつ、 $0.5\sigma_{su}$  で水平接線を持つ 2 次放物線と仮定して推定することになっている。

### 5.3 プレストレス減退の PCI 計算指針<sup>3)</sup>

PCI のプレストレス減退に関する検討委員会では、コンクリートのクリープ、乾燥収縮および鋼材のレラクセーションに関する従来からの多くのデータのとりまとめをもととして、問題は種々含まれるとしながらも、両者の相互作用を考慮に入れてしかも比較的単純なプレストレス減退量の計算指針の提案を行っている。委員会の提案は、大別すればプレストレス減退に関する一般事項減退量計算の一般的方法、およびその簡略計算法から成っており、さらに文献にはこの方法の解説と設計例とが記されている。ここでは相互作用の影響のとり入れ方の概略を述べる。

(a) プレストレス減退量の算定方針

PCI 指針では、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮、ならびに鋼材のリラクセーションによるプレストレスの減退の相互作用の影響を考慮する方法として、コンクリートの材令経過に従って時間区分をとるステップ・バイ・ステップ法が推奨されている。すなわちコンクリートのクリープおよび鋼材のリラクセーションが作用応力の関数であるため、応力  $f_i$  の下である時間区分  $(t_1 \sim t)_i$  内に生ずるプレストレスの減退  $\Delta f_i$  を算定し、次の時間区分  $(t_1 \sim t)_{i+1}$  内で生ずる減退量の算定に対しては先の時間区分で生じた  $\Delta f_i$  を考慮して作用応力を減少させるという方法である。時間の区分に対しては、PCI 指針では少なくとも表-5.1 に示されるような最小4つの時間区分を採るように述べている。なお大きな荷重変化を生ずることが予想される場合には、この推奨値以外の時間区分をとらなければならないことはもちろんである。

表-5.1 時間区分

ステップ	時間区分の始点 $t_1$ (日)	時間区分の終了点 $t$ (日)
1	プレテンション方式: PC鋼材定着時 ポストテンション方式: コンクリートの養生終了時	コンクリートへのプレストレスの導入時
2	ステップ1の終了時	材令30日, または部材が自重以外の荷重を負荷された時
3	ステップ2の終了時	材令1年
4	ステップ3の終了時	供用期間の終了

(b) クリープと乾燥収縮によるプレストレスの減退

各時間区分  $(t_1 \sim t)_i$  の間に生ずるコンクリートのクリープによるプレストレスの減退量  $(CR)_i$  は PCI 指針では次式で与えられるとしている。

$$(CR)_i = (UCR)(SCF) \cdot (MCF)(PCR)_i f_{ci} \dots \dots \dots (5.13)$$

すなわち、クリープによるプレストレスの減退は、時間  $t_1$  における鋼材重心位置でのコンクリート応力  $f_c$  とコンクリートの単位重量および圧縮強度の関数である終局クリープ  $(UCR)$ 、部材の形状寸法の影響  $(SCF)$ 、プレストレス導入時材令と養生方法の関数  $(MCF)$  および時間区分と対応する各材令におけるクリープの終局クリープに対する比率  $(PCR)$  で求められる。

各時間区分  $(t_1 \sim t)_i$  の間に生ずる乾燥収縮によるプレストレスの減退量  $(SH)_i$  は同様に次式で与えられている。

$$(SH)_i = (USH)(SSF)(PSH)_i \dots \dots \dots (5.14)$$

すなわち、乾燥収縮によるプレストレスの減退は、コン

クリートの単位重量および圧縮強度の関数である終局乾燥収縮量  $(USH)$ 、部材の形状寸法の影響  $(SSF)$  および各時間区分の材令における収縮の終局乾燥収縮に対する比率  $(PSH)$  から求められる。なお、これらの係数は PCI 指針に表示されている。

(c) リラクセーションによるプレストレス減退量の算定

PCI 指針では、時間  $t_1$  (日) から  $t$  (日) の間における鋼材のリラクセーションによるプレストレス力の減退量  $RET$  を算定する方法として次式を提案している。

$$RET = f_{st} \{(\log 24t - \log 24t_1)/k\} (f_{st}/f_{py} - 0.55) \dots \dots \dots (5.15)$$

- $f_{st}$ : 時間  $t_1$  での PC 鋼材の応力
- $f_{py}$ : PC 鋼材の 1% 伸びに対する応力
  - NR 材 (一般の鋼材)  $f_{py} = 0.85 f_{pu}$
  - LR 材 (低レラクの鋼材)  $f_{py} = 0.90 f_{pu}$
- $f_{pu}$ : PC 鋼材の規格引張り強さ
- $k$ : 鋼材の種類によって定まる係数
  - NR 材  $k = 10$
  - LR 材  $k = 45$

ここで、数学的な厳密性の上から、PC 鋼材を緊張した時点の時間  $t_1$  の値を日単位の 1/24 区切りでとり、この時の  $\log t_1$  が 0 になるような補正となっている。ここで、式 (5.15) の分母の  $k$  の値すなわち NR 材で  $k = 10$ 、LR 材で  $k = 45$  と一義的に定められている数値の妥当性が問題となる。本リラクセーション分科会に提出された鋼材メーカーからの資料によれば、PCI で採用されている  $k$  の値はなお検討を要するものと考えられる。

以上 PCI 指針のリラクセーションにもとづくプレストレスの減退の取扱いについて概略を述べた。時間ステップの区切り方、(1) 式の  $k$  値の取扱い等は、クリープや乾燥収縮に対する形状や材令の係数等を含めてなお検討されなければならないものであろう。しかしながら、時間依存性のプレストレスの減退の算定において、不十分とはいえその要因の相互作用を加味したという点においては十分評価できよう。

(執筆担当: 六車 熙, 小柳 治)

参 考 文 献

- 1) République Française: Conception et Calcul du Béton Précontraint, Instruction provisoire 1973
- 2) CEB-FIP Recommendations internationales pour le calcul et l'exécution des ouvrages en béton, 1970
- 3) PCI Committee on Prestress Losses, Recommendations for Estimating Prestress Losses, J. of PCI, Vol. 20 No. 4, July-Aug. 1975. pp. 43~75

## 6. 実用構造物におけるプレストレス減退量測定例

実際の PC 構造物におけるプレストレス減退量を長期にわたって実測した例は極めて少ない。かつて、U. Finsterwalder はドイツにおける PC 設計指針 D 4227 (旧指針) に規定されていたコンクリートのクリープ係数および乾燥収縮ひずみ仮定値の妥当性を調べる目的で、Dywidag 工法 (PC 鋼棒使用) による実際の橋梁 11 橋、建築物 2 棟の部材全長にわたる変形を 1~7 年間にわたって実測し、当時の設計指針による計算結果と比較しているが<sup>1)</sup>、PC 鋼材のレラクセーションの影響については論じておらず、実測結果はコンクリートのクリープ、乾燥収縮、PC 鋼材レラクセーションのすべてを包括した結果として、いわゆるみかけのクリープ係数および乾燥収縮ひずみを算出している。すなわち、コンクリートのクリープ係数最終値  $\varphi_n$  および乾燥収縮ひずみ最終値  $S_n$  の値として、

$$\varphi_n = 2.0 k, \quad S_n = 1.5 k \times 10^{-4}$$

$k$  : プレストレス導入材令の影響を表わす係数

を提案している。当時はこれらのみかけのクリープ係数および乾燥収縮ひずみを用いて PC 部材の PC 鋼材配置位置における流動ひずみを計算し、これに PC 鋼材のヤング率を乗じた値をプレストレス減退量とするが、これには明らかに PC 鋼材レラクセーションによる影響は間接的にしかはいておらず、減退量計算値は一般に過少評価となる。したがって、実際構造物においてどの程度のプレストレス減退がおこるかを知るためには、直接 PC 鋼材残存引張応力度を実測する以外にない。ここでは、長期間にわたって実際使用された PC 部材の PC 鋼材残存引張応力度を直接または間接に実測した二、三の例を以下に抄録し、参考に供する。

### (1) 未使用のまま 15 年経過したプレテンション PC 桁 (英国)<sup>2)</sup>

1940年に第2次世界大戦の勃発にともなって、英国運輸省では非常用架橋材料として長さ 16.46 m、I 型断面のプレテンション PC 桁を多数製作した。そのうちのほとんどの桁は使用されたが、2本だけ未使用のまま15年放置されていたので、15年間のプレストレス減退量、コンクリートの引張強度、桁の終局荷重やたわみを測定するために曲げ試験が実施された。

PC 桁は 287 m のロングラインベンチで製作されたもので、英国の PC 桁としては最初のもの部類に属する。桁は上、下幅 37.3 cm、高さ 83.7 cm の I 型断面で、直径 5.08 mm の高張力ワイヤを 30 本使用してい

る。プレストレス導入時のコンクリートの立方体圧縮強度は 221 kg/cm<sup>2</sup> 以上と規定されていたが、記録によれば 439 kg/cm<sup>2</sup> も得られていたという。

高張力ワイヤの当時の製品規格ははっきりしないが、桁の端部から採取したワイヤの試験によれば、初弾性係数は 17 900 kg/mm<sup>2</sup>、終局荷重は 3.24 t (引張強度 159.9 kg/mm<sup>2</sup>)、標点距離 25.4 cm ゲージでの破断時伸びは 0.38 cm (1.5%) であった。

桁 1 本あたりのワイヤの総断面積は 6.09 cm<sup>2</sup>、初緊張力は 67.16 t (初緊張応力 110.2 kg/mm<sup>2</sup>)、下縁の初期プレストレスは 122.6 kg/cm<sup>2</sup>、桁自重による下縁応力は 46.7 kg/cm<sup>2</sup> で、その合成応力は 75.9 kg/cm<sup>2</sup> である。

PC 桁の曲げ試験は、運輸省のコンクリートデポで Cement and Concrete Association の手で実施されたが、スパン 16.15 m で 4.88 m 間隔の 2 点荷重で、ひびわれ発生荷重やひびわれ再開荷重を荷重-たわみ曲線、目視および Demec ストレインゲージで測定した。プレテンション PC 桁のプレストレス減退量は、とくに試験をしない場合には 20% とすることが多くの技術者に採用されているが、これの妥当性を確認するためである。

桁の曲げ試験においては、Demec ストレインゲージが小さな局部的ひびわれに反応したり、本来の曲げひびわれがストレインゲージの外に発生することがあったので、ストレインゲージの読みはラフなチェックのみに使用し、ひびわれ発生荷重やひびわれ再開荷重は荷重-たわみ曲線と目視によって判定した。桁下縁のひびわれ発生応力は 2 本の平均で 97.2 kg/cm<sup>2</sup>、ひびわれ再開応力は 54.7 kg/cm<sup>2</sup>、したがって曲げ引張強度は 97.2-54.7=42.5 kg/cm<sup>2</sup>、プレストレス減退量は 75.9-54.7=21.2 kg/cm<sup>2</sup>、減退率は 21.2/122.6=17.3% であった。また荷重 2 t までの曲げ弾性係数は 375 000 kg/cm<sup>2</sup> であった。

これに対して、Draft of the Code of Practice for Prestress Concrete にしたがって、コンクリートの立方体強度を当時の工事仕様書と実測値にもとづいて表-6.1、の 2 種類に仮定して、プレストレス減退量の理論計算を行い、それぞれに対してプレストレスの減退率を 0.312 および 0.206 と計算している。

この試験におけるひびわれ発生荷重とひびわれ再開荷重は、荷重-たわみ曲線と目視によって判定しているので、かなり精度の高いものと考えられるが、プレストレスの損失率 0.173 という値は、表-6.1 の理論計算値と照合しても、また当時の高張力ワイヤの品質 (冷間引抜きしたままで、残留ひずみ除去のためのブルーイングを施していないものか、あるいは焼入れ-焼もどしで強度

表-6.1 プレストレス減退量の理論計算

(kg/cm <sup>2</sup> )		Case 1	Case 2
計 算 上 の 仮 定	コンクリート下縁の初期応力	75.9 kg/cm <sup>2</sup>	
	ワイヤの位置での初期応力	68.9 kg/cm <sup>2</sup>	
	ワイヤの初期緊張応力	11 020 kg/cm <sup>2</sup>	
	ワイヤの弾性係数	1 969 000 kg/cm <sup>2</sup>	
	プレストレス導入時のコンクリート立方体強度	225 kg/cm <sup>2</sup>	443 kg/cm <sup>2</sup>
	コンクリートの弾性係数	225 000 kg/cm <sup>2</sup>	362 000 kg/cm <sup>2</sup>
	コンクリートの終局収縮	300 × 10 <sup>-6</sup>	
	ワイヤのレラクセーションによる減退量	1 055	703
プ レ ス ト レ ス の 損 失 計 算	コンクリートの弾性変形による減退量	$\frac{1\,969\,000 \times 68.9}{225\,000} = 603 \text{ kg/cm}^2$	$\frac{1\,969\,000 \times 68.9}{362\,000} = 375 \text{ kg/cm}^2$
	コンクリートの収縮による減退量	300 × 10 <sup>-6</sup> × 1 969 000 = 591 kg/cm <sup>2</sup>	
	コンクリートのクリープによる減退量*	$0.33 \times 10^{-6} \times \frac{6\,000}{225} \times 68.9 \times 1\,969\,000 = 1\,194 \text{ kg/cm}^2$	$0.33 \times 10^{-6} \times \frac{6\,000}{443} \times 68.9 \times 1\,969\,000 = 606 \text{ kg/cm}^2$
	プレストレスの全減退量	3 443 kg/cm <sup>2</sup>	2 275 kg/cm <sup>2</sup>
	プレストレスの全減退率	$\frac{3\,443 \times 100}{11\,020} = 31.2\%$	$\frac{2\,275 \times 100}{11\,020} = 20.6\%$

\* 0.33 × 10<sup>-6</sup> および 6000 は定数である。

をあげたものと考えられる) から類推しても、プレテンション桁の損失量としてはやや小さ目の値と考えられるが、コンクリートの強度が規定値より大幅に上回っていたこと、桁製作から 15 年間に桁自重以外の荷重がまったく載荷されなかったこと、桁製作時のコンクリートの立方体圧縮強度の実測値 439 kg/cm<sup>2</sup> と照合しても 15 年後の曲げ引張強度の推定値 42.5 kg/cm<sup>2</sup> はやや小さ目の推定値となっていること、などによるものと考えられる。

(2) 20 年使用した国鉄東京駅 7 番ホームの PC 桁<sup>3)</sup>

国鉄東京駅 7 番ホームは 1953 年に完成して東海道線のホームとして使用してきたが、新幹線のホームに改造することになり、20 年間使用した PC 桁を撤去するにあたって曲げ試験その他の調査を実施した。

PC 桁は、マニエル式のポストテンション方式で現場近くで製作したもので、スパン 10 m、全長 10.4 m、上フランジ幅 34 cm、下フランジ幅 30 cm、スパン中央部高さ 70 cm の I 型断面で、これを線路直角方向に 2.25 m 間隔に単純支持し、その上にプレキャスト PC 版を並べてホームとした。したがって、気象作用の影響はほとんど受けておらず、設計上の群集荷重が 100% かかることも非常にまれであって、桁の環境・使用条件としては非常に良好な方である。

コンクリートは、早強セメントを使用し、粗骨材最大寸法 20 mm、スランプ 3 cm 以下、水セメント比 34%、細骨材率 39%、設計基準強度 500 kg/cm<sup>2</sup> で、プレストレス導入時の強度は 350 kg/cm<sup>2</sup> と規定されていた。桁

製作時の実測強度は φ15 × 30 cm 円柱供試体で、σ<sub>t</sub> = 380 kg/cm<sup>2</sup> (48 個の平均)、σ<sub>28</sub> = 580 kg/cm<sup>2</sup> (77 個の平均) であった。

PC 鋼材としては住友電線(株)製の直径 5 mm のピアノ線を使用しており、当時の製品規格ははっきりしないが、冷間引き抜きしたままで、残留ひずみ除去のためのブルーイングは施していないと考えられる。ピアノ線製造時の試験値は、引張荷重 3 110 ~ 3 370 kg (引張強度 158 ~ 172 kg/mm<sup>2</sup>)、0.2% 永久伸びの降伏点荷重 2 060 ~ 2 200 kg (降伏点応力度 101 ~ 109 kg/mm<sup>2</sup>)、降伏比は 66 ~ 70% で、応力ひずみ曲線はかなり始めから曲っている。

桁 1 本あたりのピアノ線の総断面積は 6.28 cm<sup>2</sup>、初緊張力は 62.0 t (初引張応力度 98.7 kg/mm<sup>2</sup>、σ<sub>pi</sub>/σ<sub>pu</sub> は最大 0.64、σ<sub>pi</sub>/σ<sub>py</sub> は最大 0.97 程度)、桁下縁の導入プレストレスは 160 kg/cm<sup>2</sup>、有効率を 85% と考えて有効プレストレスを 136 kg/cm<sup>2</sup> としている。

これに対し 20 年後の状態は、桁から採取した φ10 × 20 cm コンクリートコアの圧縮強度は 680 kg/cm<sup>2</sup> (6 個の平均)、圧縮弾性係数は 350 000 kg/cm<sup>2</sup>、割裂引張強度は 55 kg/cm<sup>2</sup> (良好なもの 2 個の平均) であった。一方ピアノ線は、グラウト注入状況は非常に良好であるが、表面はほぼ全面にて錆が発生していた(この錆はグラウト注入前に発生したものか注入後に発生したものかはっきりしない)が、機械的性質に影響する程のものではなく、引張荷重 3 260 ~ 3 360 kg (引張強度 166 ~ 171 kg/mm<sup>2</sup>)、降伏点荷重 2 600 ~ 2 680 kg (降伏点応力度



132~136 kg/mm<sup>2</sup>), 降伏比 80% 程度, 伸び 3.0~5.0 %, 絞り 45~50%, くり返し曲げ 17~18 回, 弾性係数 20 100~20 200 kg/mm<sup>2</sup> であった。降伏比が著しく向上しているが, これはピアノ線が PC 桁の中で 20 年間ストレッチングされた結果と考えられる。またピアノ線のリラクセーション試験を実施しており, 当時の規格値が不明のために, 初期載荷荷重を 1 800, 2 000, 2 108, 2 280 kg の 4 種類として各 2 本ずつ試験し, 10 時間後のリラクセーション値としてそれぞれ平均 1.0, 1.6, 4.1, 4.7% を得ている。これを現在の JIS G 3536 PC 鋼線 SWPR 1-5 mm の初期載荷荷重 2 280 kg に対するリラクセーション値の規格値 3.0% に比較するとかなり大きな数値であるが, JIS G 3538 の PC 硬鋼線 SWCR C-5 mm の初期載荷荷重 1 960 kg に対する規格値 4.5% よりは相当小さい数値であり, これも前記と同様のストレッチング効果によるものと考えられる。

3 本の PC 桁の載荷試験を実施したが, 8 点等分布載荷における桁のたわみは荷重 11 t までは製作時とほぼ同様であり, 桁としての曲げ弾性係数は 390 000~432 000 kg/cm<sup>2</sup> で製作時の 407 000 kg/cm<sup>2</sup> とほぼ同様である。また目視によるひびわれ発生荷重とひびわれ再開荷重から有効プレストレスと曲げ引張強度を推定しているが, 表-6.2 の上段(原報告)に示したように, 有効プレストレス 129 kg/cm<sup>2</sup>, 曲げ引張強度 44 kg/cm<sup>2</sup>, プレストレス有効率 80.6% となっている。しかし目視ではひびわれ再開時のひびわれ発見がおくれがちになるので, 有効プレストレスは大き目に, 曲げ引張強度は小さ目に推定される傾向がある。ちなみに, 曲げ引張強度の推定値 44 kg/cm<sup>2</sup> が桁製作時の 64 kg/cm<sup>2</sup> (この値は若干過大と考えられる) よりかなり小さいのは妥当性を欠くものと考えられる。

したがって, 別の方法で有効プレストレスを推定すると表-6.2 の中段(検討1)および下段(検討2)のようになる。まず, ひびわれ発生時にはひびわれの発見は

表-6.2 プレストレス減退量の推定 (単位 kg/cm<sup>2</sup>)

	製作時試験	20 年後試験					20 年後プレストレス	
		No. 1	No. 2	No. 3	平均	有効率 (%)	減退率 (%)	
原報告	ひびわれ発生応力	178	168	173	177	173	—	—
	ひびわれ再開応力 (有効プレストレス)	114	120	136	131	129	80.6	19.4
	曲げ引張強度 $\sigma_b$	64	48	37	46	44	—	—
検討1	曲げ引張強度 $\sigma_b = \sigma_t \times 1.55$	85					—	—
	有効プレストレス	—	83	88	92	88	55.0	45.0
検討2	曲げ引張強度 $\sigma_b = \sigma_c / 9.4$	72					—	—
	有効プレストレス	—	96	101	105	101	63.1	36.9

比較的容易なので, 表-6.2 の上段のひびわれ発生応力の数値は正しいものとする。検討1では曲げ引張強度  $\sigma_b$  を割裂引張強度  $\sigma_t$  の実測値 55 kg/cm<sup>2</sup> から推定すると 85 kg/cm<sup>2</sup> となり, 有効プレストレスは 88 kg/cm<sup>2</sup>, 有効率は 55.0% となるが,  $\sigma_t$  の実測値は良好なコア供試体 2 個の平均値であるため大き目になっている可能性があり, このためプレストレスの有効率が若干小さ目に推定されているおそれがある。したがって, 検討2では  $\sigma_b$  を圧縮強度  $\sigma_c$  の実測値 680 kg/cm<sup>2</sup> から推定するのが最も妥当かと考えられるが, これによると  $\sigma_b$  は 72 kg/cm<sup>2</sup> となり, 有効プレストレスは 101 kg/cm<sup>2</sup>, 有効率 63.1%, 減退率 36.9% となった。しかし, この場合にも, 長期材令における  $\sigma_b / \sigma_c$  の比は短期材令における値より小さくなるといわれているので, 上記の  $\sigma_b$  の推定値 72 kg/cm<sup>2</sup> はやや大き目の推定値となっているおそれがある。したがって, 桁製作時の試験における曲げ引張強度の推定値 64 kg/cm<sup>2</sup> も勘案すると, 20 年後の曲げ引張強度としては 68~70 kg/cm<sup>2</sup> 程度が妥当な数値と考えられるが, これを用いると有効プレストレスは 105~103 kg/cm<sup>2</sup>, 有効率は 65.6~64.4%, 損失率は 34.4~35.6% となる。

ポストテンション PC 桁の 20 年間のプレストレスの損失率の 34~35% という数値は, 一般の PC 桁の実測例と比較するとやや大き目の推定値とも考えられるが, プルーイングを施していないピアノ線を使用し, しかも  $\sigma_{pi} / \sigma_{py}$  が 0.97 程度の高い応力レベルの初緊張応力を与えているので, ピアノ線のリラクセーションが予測より過大となったことによるものかと考えられる。

(3) 12年使用した道路橋(男橋)のプレテン PC 桁<sup>4)</sup>

首都高速道路 6 号線と 9 号線の分岐点にあたる箱崎インターチェンジの路下に成田国際空港ターミナルビルを建てることになり, 箱崎川をまたぐ男橋を撤去するにあたって, 12年間使用した PC 桁の性状を調べるため桁の破壊試験を実施した。

PC 桁は, 1959年に製作されたプレテンション T 桁で, 桁長(スパン)は 9.4 m (9.1 m) と 11.0 m (10.6 m) の 2 種類で, 上フランジ幅 40 cm, 下フランジ幅 26 cm, 高さ 55 cm の T 型断面である。12 年間区道として使用されてきたが, 交通量は少なく, 通行車輛は主として乗用車と小型トラックで, 大気は東京一般部と同じで特に悪くはない。高欄と地覆を除いてコンクリート表面の風化も見られず, ひびわれも発生していなかった。

コンクリートは, 設計基準強度 500 kg/cm<sup>2</sup> で, プレストレス導入時の強度は 400 kg/cm<sup>2</sup> である。PC 鋼材は 2.9 mm 2 本より線であるが, JIS G 3536 制定前で, 1955年土木学会制定「プレストレスコンクリート設計

施工指針」の規定によるもので、 $\sigma_{pu}=195 \text{ kg/mm}^2$ 、 $\sigma_{py}=165 \text{ kg/mm}^2$ 、伸び 3% を満足するもので、 $\sigma_{py}$  と伸びが若干小さいほかは、ほぼ現行の JIS 並みの製品である。最終工程で残留ひずみ除去のためのブルーイングが施されている。許容引張応力度は、引張作業時  $\sigma_{pat}=132 \text{ kg/mm}^2$ 、 $(0.8 \sigma_{py})$ 、設計荷重作用時  $\sigma_{pa}=119 \text{ kg/mm}^2$   $(0.6 \sigma_{pu})$  である。この PC 鋼より線を 9.4 m 桁は 63 本、11.0 m 桁は 67 本使用している。

PC 桁の試験は 9.4 m のもの 3 本、11.0 m のもの 3 本、計 6 本について実施したが、曲げ試験終了後に桁端部から 3 個ずつ採取した  $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$  コアの圧縮強度の平均値は最小  $642 \text{ kg/cm}^2$ 、最大  $810 \text{ kg/cm}^2$  でばらつきが大きく、静弾性係数は  $3.25 \sim 4.20 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、動弾性係数は  $4.30 \sim 4.83 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  であった。また桁端部から 50 cm 以上はなれた箇所から 3 本ずつ採取した PC 鋼より線の引張強度は  $198 \sim 205 \text{ kg/mm}^2$ 、降伏点は  $175 \sim 181 \text{ kg/mm}^2$ 、降伏比は  $87.7 \sim 88.7\%$  である。桁から 1 本ずつ採取した PC 鋼より線のレラクセーション値（初荷重  $=0.8 \times \text{JIS 規格降伏荷重} = 1840 \text{ kg}$  で、当時の規格値に対しては  $0.84 \sigma_{py}$  となっている）は 10 時間で  $0.78 \sim 1.33\%$ 、20 時間で  $0.88 \sim 1.46\%$ （以上 6 本）、100 時間で  $1.34\%$ （1 本）とかなり低い値となっており、PC 桁の中で 12 年間ストレッチングされた結果と考えられる。

PC 桁の曲げ試験は、スパン 9.1 m (10.6 m) の 1.0 m (1.5 m) 間隔の 2 点載荷で行い、ひびわれ発生荷重、ひびわれ再開荷重、破壊荷重、たわみなどを測定し、プレストレスの有効率を 76%、曲げ引張強度を  $40 \text{ kg/cm}^2$ 、圧縮強度を  $700 \text{ kg/cm}^2$  として計算した理論荷重とほぼ同程度ないしは数%上回っていたと報告している。

報告されている曲げ試験その他の諸測定値や断面の諸数値を用い、桁自重による応力を考慮して、有効プレストレスの推定を試みた。結果は表-6.3 にまとめて

示す。

表-6.3 の上段（検討 1）は、ひびわれ発生応力とひびわれ再開応力の測定値から推定したものであるが、それぞれ桁 3 本の平均で曲げ引張強度は  $36 \text{ kg/cm}^2$ 、有効プレストレスは  $167 \text{ kg/cm}^2$  と  $168 \text{ kg/cm}^2$ 、プレストレス有効率は 89% と 85% となった。この曲げ試験ではひびわれ発生荷重とひびわれ再開荷重の読取りは、桁中央の 2 m の間に 100 mm ピッチで設置したコンタクトゲージの測定値から予測しながら目視で行なっているが、ひびわれ再開荷重の読取りはおくれがちとなり、その結果として有効プレストレスは大き目に、曲げ引張強度は小さ目に推定される傾向がある。

したがって、別の角度から検討してみたのが表-6.3 の下段（検討 2）である。ひびわれ発生時のひびわれ発生は比較的容易なので、表-6.3 の上段のひびわれ発生応力の数値は正しいものとする。曲げ引張強度  $\sigma_b$  をコアの圧縮強度の実測値  $\sigma_c$  から推定すると表-6.3 の下段のように  $73 \text{ kg/cm}^2$  と  $78 \text{ kg/cm}^2$  となり、これらから有効プレストレスを計算すると  $130 \text{ kg/cm}^2$  と  $126 \text{ kg/cm}^2$ 、有効率は 69% と 64%、減退率は 31% と 36% となった。

11.0 m 桁の方がプレストレスの減退率が大きくなっているが、9.4 m 桁と同じ断面で初期プレストレスが大きいこと、No. 4 桁のコア圧縮強度が  $810 \text{ kg/cm}^2$  と大きいことなどが影響しているものと考えられる。

ブルーイングを施した PC 鋼より線を使用したプレテンション PC 桁の 12 年間のプレストレスの損失率の 31% と 36% という数値は、一般の PC 桁の実測値と比較するとやや大き目の推定値と考えられている。長期材令における  $\sigma_b/\sigma_c$  の比が短期材令における値より小さくなる<sup>9)</sup>といわれているので、曲げ引張強度は  $68 \sim 70 \text{ kg/cm}^2$  程度と考えた方がよさそうで、この数値を用いると有効プレストレスはそれぞれ  $135 \sim 137 \text{ kg/cm}^2$  と  $136 \sim$

表-6.3 プレストレス減退量の推定

		9.4 m 桁					11.0 m 桁							
		応力 (kg/cm <sup>2</sup> )				プレストレス (%)	応力 (kg/cm <sup>2</sup> )				プレストレス (%)			
		No. 1	No. 2	No. 3	平均		No. 4	No. 5	No. 6	平均				
検討 1	桁自重による曲げ引張応力	22					—	—	30				—	—
	ひびわれ発生応力	213	198	198	203	—	—	195	210	207	204	—	—	
	ひびわれ再開応力 (有効プレストレス)	169	169	165	167	89.0	11.0	170	172	162	168	85.0	15.0	
	曲げ引張強度 $\sigma_b$	44	29	34	36	—	—	25	38	45	35	—	—	
検討 2	コアの圧縮強度 $\sigma_c$	694	700	655	683	—	—	810	642	734	729	—	—	
	曲げ引張強度 $\sigma_b = \sigma_c/9.4$	74	74	70	73	—	—	86	68	78	78	—	—	
	有効プレストレス	139	124	129	130	69.3	30.7	109	142	129	126	63.9	36.1	

報 告

138 kg/cm<sup>2</sup> となり、有効率は 72~73% と 69~70% 程度、損失率は 28~27% と 31~30% となり、この辺の数値がほぼ妥当な線かと考えられる。

(4) 5 年から 20 年経過したポストテンション PC 道路橋 (スイス)<sup>9)</sup>

スイスの BBRV 社は長期間にわたる緊張力の減退を同社が施工した 5 橋について測定している。長期間にわたって緊張材に残存している引張力を信頼度高く、かつ正確に測定するために可測荷重 250 t の特別の引張ダイナモメーターを開発し、これをカップラーで緊張材に取付けている。ダイナモメーターは緊張時にその移動が阻害されないように配慮された収納箱中に納められ、測定メーターが常に外部から見えるように桁のウェブ内側に沿った位置の緊張材に取付けられている。また、緊張力の変化が攪乱されることなくダイナモメーターに伝達されるようにするため、緊張材はダイナモメーター装着の前後約 4.5 m の区間瀝青材に浸され、テープを捲付けて付着を切った状態にしてある。なお、このダイナモメーターは ±1% の測定精度が継続して保証される構造のものになっている。

長期間測定を実施した 5 橋は下記のとおりである。

Weinland 橋

4 径間連続箱桁橋、径間=66+88+76+57 m。

BBRV 緊張材: 42 φ 6 mm,  $P_i=125$  t の緊張材にダイ

ナモメーター 1 個装着。

竣工: 1958年 5 月。

Monbijou 橋

4 径間連続箱桁橋、径間=82+86+86+82 m。

BBRV 緊張材: 55 φ 7 mm,  $P_i=235$  t。

橋梁全長にわたって貫通する緊張材にダイナモメーター 4 個装着。

竣工: 1962年 9 月。

Versoix 橋

6 径間連続箱桁橋、径間=37+4@57.5+37 m。

BBRV 緊張材: 55 φ 7 mm,  $P_i=239$  t の緊張材にダイナモメーター 2 個装着。

竣工: 1962年 8 月。

Aabachtal 橋

9 径間連続箱桁橋。

径間=33+36+4@48+33+29 m。

BBRV 緊張材: 55 φ 7 mm,  $P_i=241$  t の緊張材にダイナモメーター 3 個装着。

竣工: 1965年秋。

Sihl 高架橋

8 径間連続箱桁橋、径間=32.3 + 43 + 50 + 50 + 52 + 54.5 + 42.4 + 42.4 m。

BBRV 緊張材: 55 φ 7 mm,  $P_i=250$  t の緊張材にダイナモメーター 2 個装着。

表-6.4 測定結果の総括

			時間 t において測定された鋼線応力度 ( $\sigma_{ST}=P_t/F_{ST}^{1)}$ ) (kg/mm <sup>2</sup> )					
			t=0	t=1 年	t=5 年	t=10年	t=15年	t=20年
<b>Weinland 橋</b>	緊張材: 42 φ 6 mm	緊張端	105.0					
	鋼線断面 $F_{ST}$ : 1188 mm <sup>2</sup>	ダイナモメーター部	70.4	69.5	67.0	66.0	65.8	65.7
	鋼種 $\sigma_{0.2}/\sigma_{pu}$ : 140/160 kg/mm <sup>2</sup>							
<b>Monbijou 橋</b>	緊張材: 55 φ 7 mm	緊張端	111.0					
	鋼線断面 $F_{ST}$ : 2117 mm <sup>2</sup>	ダイナモメーター部 (1)	105.8	98.0	93.9	92.1	91.2	
	鋼種 $\sigma_{0.2}/\sigma_{pu}$ : 145/165 kg/mm <sup>2</sup>	" (2)	99.2	93.2	89.9	88.1	86.7	
		" (3)	88.3	84.3	81.5	80.4	79.6	
		" (4)	82.2	79.5	76.8	75.7	74.4	
<b>Versoix 橋</b>	緊張材: 55 φ 7 mm	緊張端	113.0					
	鋼線断面 $F_{ST}$ : 2117 mm <sup>2</sup>	ダイナモメーター部	104.4	95.3	92.5	91.0	90.0	
	鋼種 $\sigma_{0.2}/\sigma_{pu}$ : 145/165 kg/mm <sup>2</sup>							
<b>Aabachtal 橋</b>	緊張材: 55 φ 7 mm	緊張端	113.8					
	鋼線断面 $F_{ST}$ : 2117 mm <sup>2</sup>	ダイナモメーター部 (1)	104.9	93.7	90.0			
	鋼種 $\sigma_{0.2}/\sigma_{pu}$ : 145/165 kg/mm <sup>2</sup>	" (2)	97.3	89.2	87.4	86.9		
		" (3)	107.1	96.1	94.3	93.5		
<b>Sihl 高架橋</b>	緊張材: 55 φ 7 mm	緊張端	118.0					
	鋼線断面 $F_{ST}$ : 2117 mm <sup>2</sup>	ダイナモメーター部 (1)	85.9	82.0	80.0			
	鋼種 $\sigma_{0.2}/\sigma_{pu}$ : 150/170 kg/mm <sup>2</sup>	" (2)	97.3	92.0	89.1			

1) 時間 t=0 は PC 緊張材が緊張された直後の時点。



図-6.1 ダイナモメーター位置における緊張時および 15 年後の鋼線応力度 (Monbijou 橋)

これら5橋についての測定結果は総括して表-6.4に示す。測定結果は1年, 5年, 10年, 15年および20年後にPC鋼線に残存する引張応力度で示されている。これらの期間に生じたコンクリートのクリープ, 収縮および鋼線のレラクセーションに基づく応力損失量は, 当然のことながらそれぞれの初応力の大きさによって異なってくる。橋梁が異なっても初応力の大きさが等しければ非常に類似した応力損失が現われており, 15年後の値についてみると初応力が引張強さの65%前後の場合14%程度の応力損失, 55%前後の場合には10%程度の応力損失, 45%前後の場合には6~7%の応力損失となっている。

この緊張力の経年変化の状況はMonbijou橋での測定結果についてさらに詳しく報告されている。このMonbijou橋においては図-6.1に示されているように, 橋梁全長にわたって連続している緊張材に4個のダイナモメーターが装着されている。図-6.1には緊張時に測定された緊張端および4個のダイナモメーターの位置における引張力および鋼線の応力度が示してある。これらの測定値をつないだ線は摩擦により拘束を受けた導入プレストレス力の変化の状況を示している。プレストレス導入当初は比較的短い間隔で測定が行われたが, それ以後は2年毎に晩秋のコンクリート温度が同一になる時期を選んで行われた。図-6.1には15年後に測定された残存緊張力および鋼線応力度も示されている。ダイナモメーター

ター(1)の位置においては15年間で13.8%(初応力=0.64 $\sigma_{pu}$ ), (4)の位置においては9.5%(初応力=0.50 $\sigma_{pu}$ )の応力損失が現われている。図-6.2はそれぞれのダイナモメーター位置でのPC鋼線応力の経年変化の状況を示したものである。プレストレス導入より3年経過した以降の緊張力減退の進行は緩やかなものになるが, 15年経過してもなお終局には達していない。

Monbijou橋の測定結果については, 下記の理論式により計算された応力損失値との比較も行っている。

$$\Delta\sigma_{ST,S+K+R} = \frac{\varepsilon_{bs}(t, t_0)E_{ST} + \Delta\sigma_{ST,R}}{1 - n \cdot \frac{\sigma_{bv,0}}{\sigma_{ST,0}} + n \cdot \varphi(t, t_0)[\sigma_{bg,0} + \sigma_{bv,0}]} [1 + 0.5 \cdot \varphi(t, t_0)]$$

ここで,

$E_b, E_{ST}$  = コンクリートおよび鋼線の弾性係数

$n = E_{ST}/E_b$

$\varphi(t, t_0)$  = 時間  $t_0$  から  $t$  に至る期間のクリープ係数

$\varepsilon_{bs}(t, t_0)$  = 時間  $t_0$  から  $t$  に至る期間の収縮量

$\sigma_{bg,0}, \sigma_{bv,0}$  = 固定荷重  $g$  ならびにプレストレス  $V_0$  のみによる時間  $t_0$  におけるPC鋼材の位置でのコンクリート応力度

$\sigma_{ST,0}$  = 時間  $t_0$  におけるPC鋼線の応力度

$\Delta\sigma_{ST,R}$  = PC鋼線のレラクセーション

これらの数値については1976年版のCEBのcodeに

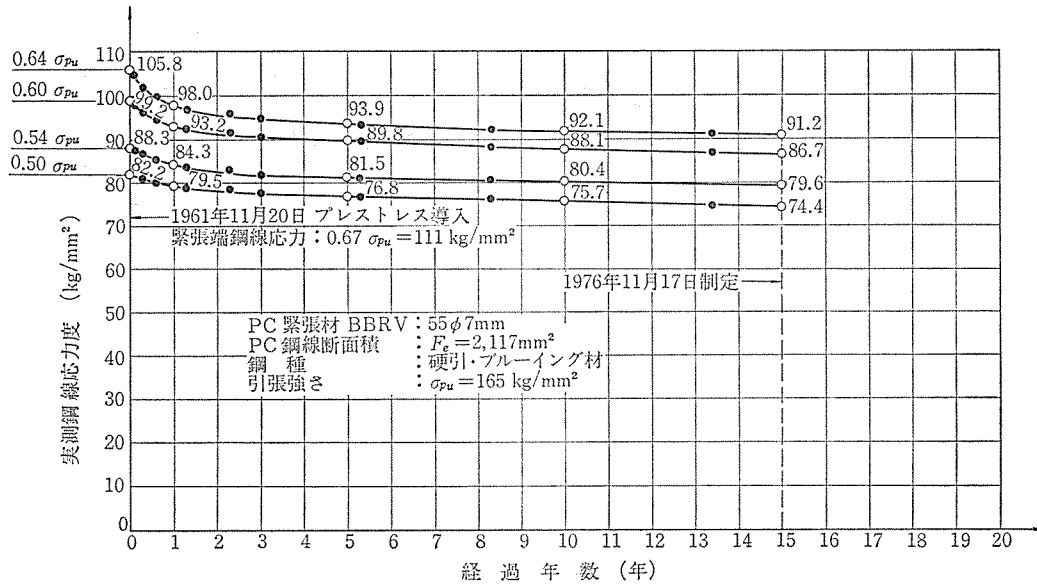


図-6.2 ダイナモメーター位置における鋼線応力度の経年変化 (Monbijou 橋)

表-6.5 PC 鋼線の応力損失に関する計算値と実測値の比較

断 面	初 応 力 (実 測 値) $\sigma_{ST,0}$ 1) kg/mm <sup>2</sup>	レラクセーション ロス $\Delta\sigma_{ST,R}$ 2) kg/mm <sup>2</sup>	鋼 線 位 置 のプレストレス $\sigma_{bv,0}$ 3) kg/mm <sup>2</sup>	鋼 線 位 置 コンクリート応力 $\sigma_{bv,0} + \sigma_{bg,0}$ 4) kg/mm <sup>2</sup>	計算式による 応力損失 $\Delta\sigma_{ST,S+K+R}$ 5) kg/mm <sup>2</sup>	計算式による 残存応力 $\sigma_{ST,t}$ 6) kg/mm <sup>2</sup>	残 存 応 力 (実 測 値) $\sigma_{ST,t}$ 7) kg/mm <sup>2</sup>
ダイナモメーター (1)	105.8	-6.2	-130.4	-96.5	-16.6	89.2	91.2
ダイナモメーター (2)	99.2	-5.2	-102.7	-91.2	-15.6	83.6	86.7
ダイナモメーター (3)	88.3	-3.5	-79.6	-77.9	-13.0	75.3	79.6
ダイナモメーター (4)	82.2	-2.5	-80.2	-72.6	-11.6	70.6	74.4

- 1) 実測した鋼線の初応力 (表-6.4 参照)
- 2) 仮定した値
- 3) 実測したプレストレス力  $V_0 = \sigma_{ST,0} \cdot F_{ST}$  を用いての鋼線位置におけるコンクリートのプレストレス
- 4) 鋼線位置における固定荷重  $g$  によるコンクリート応力  $\sigma_{bg,0}$  は計算書による
- 5) 計算式による
- 6) 1)~5) の値
- 7) 実測した鋼線の残存応力 (表-6.4 参照)

基づいて以下のように計算している。またレラクセーションに関しては初応力  $= 0.65 \sigma_{pu}$  の場合に 6.5%, 初応力  $= 0.4 \sigma_{pu}$  の場合に 0 と仮定し、この間の初応力に対しては直線的な内挿によって求めている。

$$t_0 = 60 \text{ 日}$$

$$t = 5500 \text{ 日 (約 15 年)}$$

$$\varphi(t, t_0) = 1.7$$

$$\varepsilon_{bs}(t, t_0) = 0.15 \times 10^{-3}$$

$$E_b = 350000 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_{ST} = 2050000 \text{ kg/cm}^2$$

$$n = 5.86$$

比較の結果は表-6.5 に示す。15 年後において PC 鋼線に残存する応力を比較すると、実測値が計算値より 2.2% から 5.4% 大きくなっている。 $\varphi(t, t_0)$ ,  $\varepsilon_{bs}(t, t_0)$  および  $\Delta\sigma_{ST,R}$  の値としてはむしろ小さい目の値を用いて計算したに拘らず実測値とよく対応し、かつ安全

側の値を与えている。この計算値と実測値の比較から、ブルーイングされた硬引 PC 鋼線のレラクセーションによる応力損失は比較的小さいものとみてよいのではないかと結論づけている。

(執筆担当: 六車 照, 青戸 章, 坂村 果)

参 考 文 献

- 1) U. Finsterwalder: Ergebnisse von Kriech- und Schwindmessungen an Spannbetonbauwerken, Beton u. Stahlbetonbau, 50 Jg. Ht 1, Jan. 1955 und 53 Jg. Ht 5, Mai 1958
- 2) G.D. Base, H.E. Lewis: "Tests on 15-year-old, 54-ft-long, Pre-tensioned Beam," J. of PCI. vol. 4, No. 1, June 1959, pp. 64~71
- 3) 久保村圭助, 谷内田昌熙, 宮本征夫: 20 年を経た東京駅ホーム PC 桁の試験, 土木学会誌, vol. 62, No. 3, 1977 年 3 月, pp. 59~65
- 4) 鈴木貫太郎, 佐藤重尚: 供用後のプレキャスト桁破壊試験, プレキャストコンクリート, vol. 14, No. 3, 1972

年 6 月, pp. 50~54

- 5) M. Birkenmaier, H. Nil, H.R. Siegwart : Langzeitmessungen an Spannbetonbrücken, Schweizerische Bauzeitung, 14.96 Jahrgang, 6 April, 1978

## 7. あとがき

本報告書の冒頭において述べたように、昭和50年6月に PC 技術協会内にレラクセーション委員会が設立されて以来、PC 構造物の有効プレストレスの減少に関連する鋼材のレラクセーション現象について調査研究し、現行各種規定類にみられる設計計算値の取扱いについて基本的な検討を加えることを目的として活動を続けてきた。その活動状況についての経過は PC 鋼材委員会活動報告として簡単に中間報告された(本誌 Vol. 18, No. 6, 1976 年 12 月)。現今までに集められた調査研究を整理し、また考察検討を加え、さらに実験的検照をふくめた委員会の成果は、早急に会員全部に還元すべく、本誌の 2~3 号分に分割して登載することも企画されたが、今回、編集委員会の好意により全編をまとめた特集号とし

て報告することができたことは委員会として喜びに耐えない。

報告の内容は各種 PC 鋼材の純レラクセーション曲線の検討、見かけのレラクセーションの数値解析方法に関する調査、レラクセーション曲線の関数表現方法についての検討、レラクセーションとクリープ、乾燥収縮の相互作用のレオロジーモデルによる解析、実用構造物におけるプレストレス損失量の測定例、各国の設計値についての考察などに大別され、現在における PC 鋼材のレラクセーションについての情報を集大成したものである。これら成果をもとに、今後なお PC 鋼材そのものについてのレラクセーションの資料集収につとめるとともに、実際構造物におけるプレストレス損失への影響、またその推定について一段の研究を必要とするとはいうまでもない。

最後に本報告をするにあたり、終始一貫熱心に活動いただいた委員各位、とくに本報告執筆の労をとられた各委員に厚く感謝の意を表します。

(委員長 岡田 清)

## ◀ 刊行物案内 ▶

### 穴あき PC 板設計施工指針・同解説

穴あき PC 板は、各種建物の床板・壁板の他各種工作物にも広く利用されるようになりましたが、製造に関しては JIS A 6511-1976 “空洞プレレストコンクリートパネル”として制定されたものの、設計および現場施工に関しては統一的な規準・指針がないため利用者側から不便との声がありましたので、当協会では昭和50年5月本岡順二郎氏を委員長とし、建設省・建研および国鉄・技研その他関係者による委員会を設置して設計・施工指針の制定を企画し実験結果も考えつつ、昭和52年10月指針案として公表しました。

その後関係各位のご意見を賜わり、今回付録を添付し公表するにいたったものであります。

内容は、1. 総則 2. 材料および許容応力度 3. 部材の設計 4. 構造設計 5. 接合部の設計 6. 施工(含取付・補修等)、なお付録には、床・壁それぞれの設計例・取付け例および各種の試験例、さらに耐火構造についても述べてあります。

特に最近高層建築に多く採用されるようになった“コンクリートカーテンウォール”の取付作業にも大変参考になりますので大いにご利用願います。

体 裁 : B5判 128 頁 ビニール製の表紙で現場持ち歩きに便利

頒布価格 : 1,800 円 (会員特価 : 1,600 円) 〒400 円

申 込 先 : 〒102 東京都千代田区麴町1丁目10番15号(紀の国やビル)

社 団 法人 プレストレストコンクリート技術協会

TEL 03 (261) 9 1 5 1

振替 東京 7-6 2 7 7 4

## ◀次 号 予 告▶

1978年4月30日～5月5日にかけて行われた第8回 FIP 大会（ロンドン）は、参加者 2,000 名を越え（日本からは約 40 名）、盛況のうちに無事終了いたしました。

次号では、その報告を掲載いたします。

内容は以下のとおりです。

- 大会概要
- 橋梁設計
- 橋梁施工
- 耐震設計
- 海洋構造物
- 建築構造
- コンクリート圧力容器および貯蔵容器
- PC 鋼材関係
- 特殊コンクリート