

PCに関する試験および測定

入門講座

No.6

長年供用された橋梁の各種試験

講師：佐藤 幸一*

1 はじめに

今回は、長年供用され撤去されることになった橋梁から桁を取り出して行う各種試験について、その内容と方法を解説します。桁を取り出して行う試験であることから、対象構造はプレテンションまたはポストテンション方式によるプレキャスト桁（I桁、ホロー桁、T桁等）とします。

我が国で初めてプレストレストコンクリート（以下PCと略記）橋が建設されたのは昭和26年です。石川県七尾市に建設された、支間3.82mのプレテンション方式単純合成床版橋の長生橋（写真-1）です。この橋は、建設後45年たった今も現役としてその機能をはたしています。ポストテンション方式の桁はその翌年、日本国有鉄道（現在のJR）東京工事事務所により、東京駅の6、7番プラットフォームの新設工事に際して初めて造られました。桁高70cm、支間10000mmのI形断面桁（写真-2）です。この桁は、その後昭和49年に東京駅の改修工

事によって撤去され、その際22年間供用されたわが国初のポストテンション方式PC桁として、各種試験が実施されています。

このように、我が国でPC橋が建設されはじめてからすでに45年以上が経過しています。この間PC技術の発展はめざましく、採用は順調に増加し、建設されたPC橋は膨大な数におよんでいます。しかし、初期に建設された橋梁の中には、近年の交通量の増加や車両の大型化、また関連規準の改定等により、架替えの必要な橋梁も発生しており、その数は増加する傾向にあります。こうしたことから、今後長年供用した橋梁から桁を取り出して試験を行う機会も増加するものと思われます。

2 試験の概要

試験の目的は、長年供用されたことによるPC桁の、桁としての機能の経年変化と、コンクリート・PC鋼材等材料の経年変化を調べることにあります。桁の機能の経年変化は載荷試験を行って調査し、材料の経年変化は、

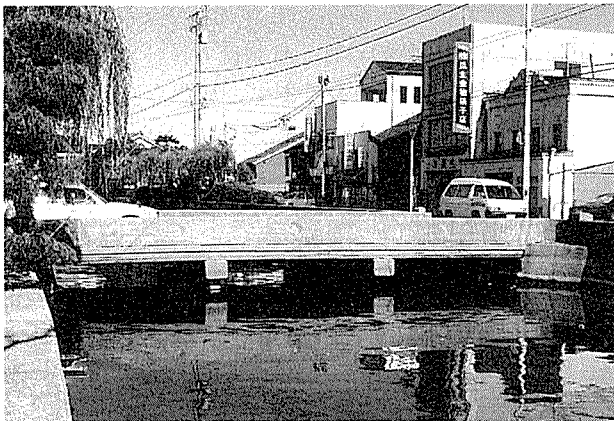


写真-1 長生橋

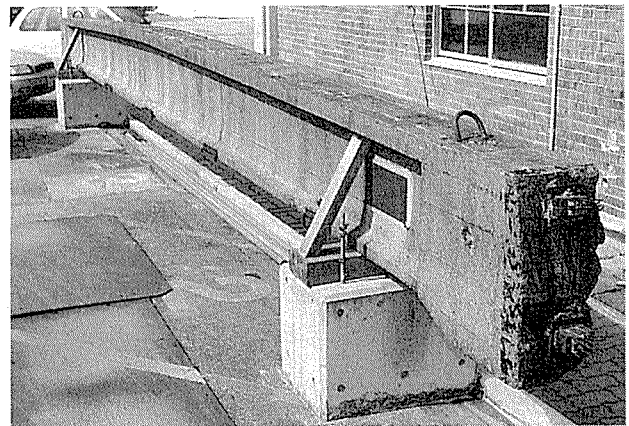


写真-2 東京駅プラットフォーム桁

* Koichi SATO : (株) ピー・エス 土木技術部 主任研究員

表-1 試験項目一覧

試験項目		試験方法	
桁の試験	曲げ載荷試験	対称2点載荷	
	せん断載荷試験	-	
	ねじり載荷試験	-	
材料試験	コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108
		引張強度	JIS A 1113
		弾性係数	JSCE-G 502
		ポアソン比	ASTM C 469 に準拠
		中性化深さ	フェノールフタレイン法
		配合推定	セメント協会コンクリート専門委員会他
		塩分含有量	日本コンクリート工学協会法他
PC鋼材	外観	目視	
	機械的性質	JIS Z 2241 等	
その他	グラウト充填状況	目視	

桁から試料を採取し、各種材料試験を行って調査します。表-1 に試験項目の一覧を示します。

全体の作業は、試験前の桁の概要調査と、実際の試験、そしてその結果の評価に分かれます。

図-1 に試験の作業手順を示します。

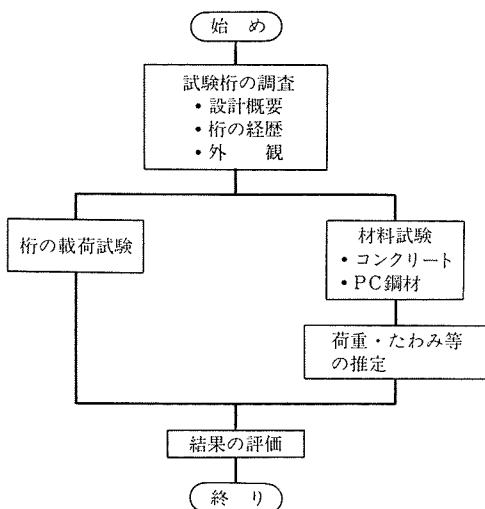


図-1 作業手順

3 試験桁の調査

試験を行う前に、試験計画の作成や試験結果を評価する基礎データを得るために、試験桁の調査を行います。調査の項目は、桁の設計に関する項目を調査する設計概要調査、桁が撤去されるまでの状況を調査する桁の経歴調査、そして桁の現在の状況を調査する外観調査です。

3.1 設計概要の調査

設計概要としては、試験桁の建設当時の設計条件、材料強度、断面力、鋼材配置等について調査します。調査

は、建設当時の設計図書、規準等により行いますが、古い橋梁では当時の設計図書が入手できない場合もあり、こうした場合は次項に示す桁の経歴調査、外観調査等より推定することとなります。

3.2 桁の経歴調査

試験桁を取り出した橋梁の、架橋位置、竣工年月、交通量の変化、環境条件、補修の有無等試験桁が取り出されるまでの経歴を調査します。

3.3 桁の外観調査

試験を行う前に、試験桁の外観を目視により調査し、ひび割れ、鋼材の腐食等の異常の有無を確認します。また、桁長および桁断面の形状寸法を測定し、設計寸法との比較を行います。試験の結果によっては、それが本当に試験によって生じたものか、それとも試験前からあったものか判断が難しい場合もあり、こうした時には試験前の調査が重要となりますので、外観調査は念入りに行う必要があります。

4 桁の曲げ載荷試験

4.1 概要

桁の載荷試験には、曲げ載荷試験、せん断載荷試験、ねじり載荷試験等がありますが、ここでは一般的な曲げ載荷試験について述べます。

曲げ載荷試験の測定項目は、支間中央でのひび割れ発生、ひび割れ再開、破壊時の各荷重、およびそれぞれの荷重までの桁のたわみ、ひずみ、ひび割れ等の変化です。これらの測定結果を、概要調査で調べた建設当時の桁の機能、あるいは次項の材料試験の結果から求められる桁の機能と比較し、経年変化に対する検討を行います。

4.2 試験装置

試験は、単純支持の対称二点載荷で行います。図-2 に載荷試験装置の例を示します。載荷点距離はJIS A 5313「道路橋プレストレストコンクリート橋げた」では、支間10 m未満では1.0 m、支間10 m以上では1.5 mとしているので、通常はこれに従います。試験装置は支点沈下等のない安定したもので、載荷点および支持点は桁に過度な応力集中やねじれを起こさず、また載荷による桁の回転や移動を拘束しない構造とします。載荷装置は油圧ジャッキを使用し、荷重の管理はロードセルで行います。写真-3 に載荷試験状況を示します。

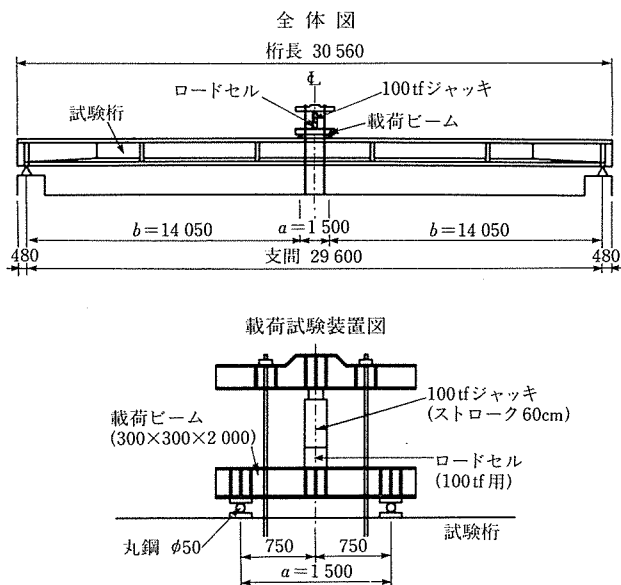


図-2 荷重試験装置

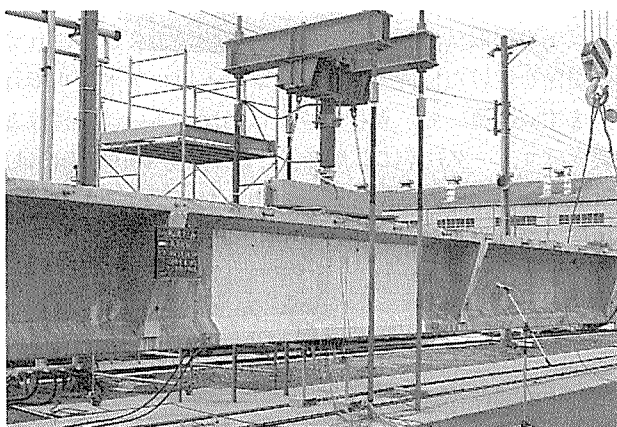


写真-3 荷重試験状況

4.3 荷重荷重

荷重ステップは、一般に設計荷重相当荷重→除荷→ひび割れ発生荷重→除荷→ひび割れ再開荷重→破壊荷重の順で行います。荷重の増加ピッチは各ステップ共に 30～50 kN 程度とし、目標荷重付近ではもう少し細かくします。

各ステップでの荷重の実測値と推定値を比較し桁の耐荷能力の検討を行います。荷重の推定は下式によって行います。この時、コンクリート、PC 鋼材の材料特性は設計条件による値、あるいは次項の材料試験の結果を用います。

$$P = \frac{4(M - M_d)}{L - a} - W \dots \dots \dots \text{(式-1)}$$

ここに、 P ：荷重荷重 (N)

M ：試験桁の支間中央における、ひび割れ発生モーメント、ひび割れ再開モーメント、破壊モーメント (Nmm)

M_d ：試験桁自重による曲げモーメント (Nmm)

L ：主桁支間 (mm)

a ：荷重点間距離 (mm)

W ：荷重装置の自重 (N)

- 1) ひび割れ発生モーメント：桁下縁の曲げ引張応力度がコンクリートの引張強度とプレストレス力による応力度を合わせた値となるモーメント
- 2) ひび割れ再開モーメント：上記のコンクリートの引張強度を 0 とした値となるモーメント
- 3) 破壊モーメント：桁上縁のコンクリートの圧縮ひずみが終局ひずみ $\epsilon_c = 0.0035$ となるモーメント

4.4 たわみ

支間中央における桁のたわみを測定し、荷重とたわみの関係より桁の変形性能について検討します。たわみは、支間中央および支持点の沈下の影響を考慮するために支持点近傍さらに必要に応じて支間の中間点で測定します。測定は変位計により行います。図-3にたわみ測定位置、図-4に荷重-たわみ曲線の例を示します。

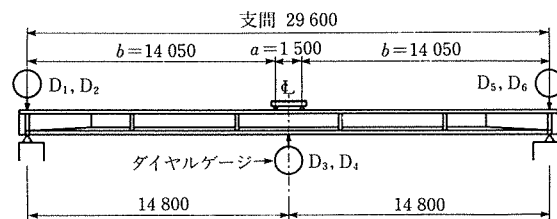


図-3 たわみ測定位置

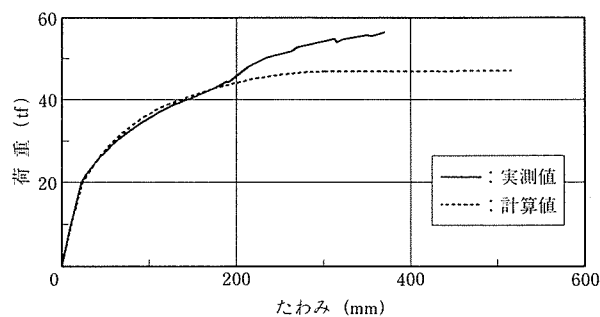


図-4 荷重-たわみ曲線

たわみの推定は、下式によって行います。このとき、コンクリートの弾性係数は次項の材料試験より求めたコンクリートの静弾性係数を用います。

$$\delta = \frac{P \cdot b \cdot (3L^2 - 4b^2)}{48E_c \cdot I_c} \dots \dots \dots \text{(式-2)}$$

ここに、 δ ：たわみ (mm)

P ：荷重荷重 (N)

b ：支持点より荷重点までの距離 (mm)

L ：主桁支間 (mm)

◇講座◇

E_c : コンクリートの弾性係数 (N/mm²)

I_c : 試験桁の断面 2 次モーメント (mm⁴)

ただし、ひび割れ発生モーメント、ひび割れ再開モーメント、に対しては全断面有効とし、破壊モーメントに対しては、ひび割れ発生による剛性低下を考慮し、下式により算出します。

$$I_c = \left(\frac{M_{crd}}{M_{dmax}} \right)^3 \cdot I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{crd}}{M_{dmax}} \right)^3 \right) \cdot I_{cr} \dots\dots (式-3)$$

ここに、 M_{crd} : ひび割れ発生モーメント (Nmm)

M_{dmax} : 破壊モーメント (Nmm)

I_g : 全断面有効とした試験桁の断面 2 次モーメント (mm⁴)

I_{cr} : 引張応力を受ける部分のコンクリートを無視した断面 2 次モーメント (mm⁴)

4.5 ひずみ

支間中央における主桁断面のひずみをストレインゲージで測定し、ひずみ分布図より桁のひずみ特性について検討します。図-5 にひずみ計配置、図-6 にひずみ分布図の例を示します。

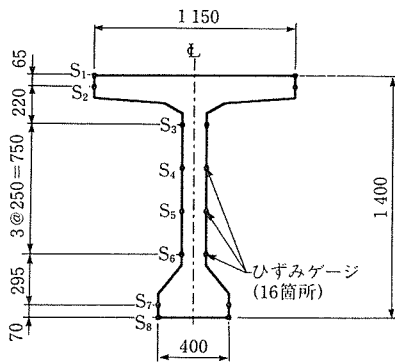


図-5 ひずみ計配置

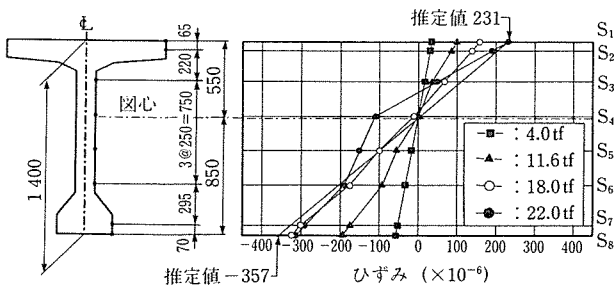


図-6 ひずみ分布図

5 コンクリートの材料試験

5.1 概要

コンクリートの材料試験は、載荷試験終了後、桁よりコア供試体を採取して行います。強度や弾性係数等の材

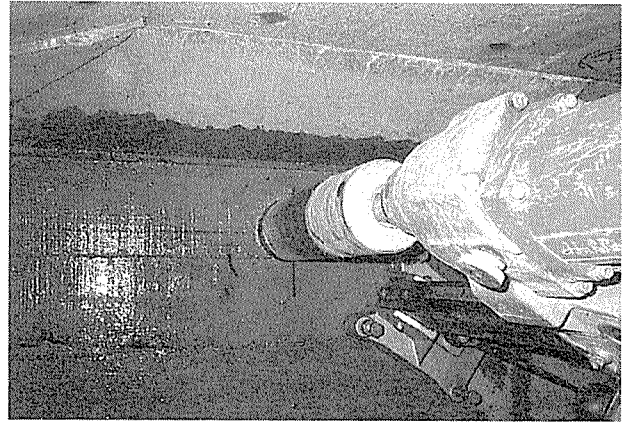


写真-4 コアドリルによる供試体採取状況

料特性や、中性化深さ等の劣化の程度を測定し、設計条件や推定値と比較し、経年変化の検討を行います。

5.2 コア供試体の採取

コアの採取は、鋼材および載荷試験によりひび割れ等の損傷を避けた位置で、コンクリート用コアドリルで行います(写真-4)。鋼材の位置は図面あるいは鋼材探査機(パコメータ)等により確認します。切り取る際には、供試体が損傷したり、粗骨材が緩んだりしないように注意深く切り取らなければなりません。

コア供試体の直径は、一般に粗骨材の最大寸法の3倍以上が必要で、コアドリルのビットの径より、φ100 mm が一般的です。

5.3 コンクリートの圧縮強度試験

コア供試体を用いてコンクリートの圧縮強度を求めます。試験方法は JIS A 1108 に従って行います。

コア供試体の両端面は平滑(平面度 0.05 mm 以内)かつ供試体の軸と 90 度でなければなりません。端面はキャッピングもしくは研磨により仕上げます。キャッピングは、硫黄と鉍物質粉末との混合物により行い、その厚さはできるだけ薄くします。

コア供試体は、一般に試験のときまで、40~48 時間水中につけておくことと載荷時の供試体の乾湿の条件を一定にすることができます。

圧縮強度は、下式により計算します。

$$\sigma_c = \frac{P}{\pi(d/2)^2} \dots\dots (式-4)$$

ここに、 σ_c : 圧縮強度 (N/mm²)

P : 供試体が破壊するまでに試験機が示した最大荷重 (N)

d : 供試体の高さの中央で、互いに直行する 2 方向の直径の平均値 (mm)

コア供試体の高さは、直径の 2 倍が原則です。供試体

表-2 圧縮強度補正係数

高さとの直径との比 h/d	補正係数
2.00	1.00
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.00	0.89

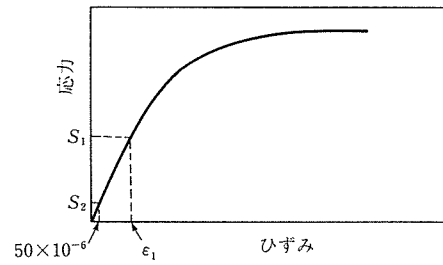


図-7 応力-ひずみ曲線

の高さがその直径の2倍より小さい場合には、試験で得られた圧縮強度に次の表-2の補正係数を乗じて直径の2倍の高さをもつ供試体の強度に換算します。

5.4 コンクリートの引張強度試験

コア供試体を用いてコンクリートの引張強度を求めます。試験方法はJIS A 1113に従って行います。

引張強度は、下式により計算します。

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dl} \dots\dots\dots (式-5)$$

- ここに、 σ_t ：引張強度 (N/mm²)
- P ：供試体が破壊するまでに試験機が示した最大荷重 (N)
- d ：供試体の高さの中央で、互いに直交する2方向の直径の平均値 (mm)
- l ：供試体の割れた面における長さを2箇所以上測定した平均値 (mm)

5.5 コンクリートの静弾性係数

コンクリートの静弾性係数試験は、現在まだJIS化されていませんが、土木学会規準に「コンクリートの静弾性係数試験方法(案)(JSCE-G502)」として規定されているのでこれに従います。

静弾性係数は、下式で計算します。

$$E_1 = \frac{S_1 - S_2}{\epsilon_1 - 50 \times 10^{-6}} \dots\dots\dots (式-6)$$

- ここに、 E_1 ：繰返し載荷(2~3回)により求めた静弾性係数 (N/mm²)
- S_1 ：繰返しの上限荷重(コンクリート強度の0.4程度)に相当する応力 (N/mm²)
- S_2 ：最終載荷時におけるひずみ 50×10^{-6} のときの応力 (N/mm²)
- ϵ_1 ：最終載荷時における応力 S_1 によって生ずるひずみ

ひずみは、コア供試体の圧縮強度試験時にコンプレッションメータまたはストレインゲージでコンクリートの縦方向のひずみを測定します。その検長は、コンクリートの平均的なひずみを測定するために、粗骨材の最大寸法の3倍以上かつ供試体の高さの1/2以下とし、供試体の中

央で測定します。

5.6 ポアソン比

ポアソン比は、コンクリートに生じた横ひずみと縦ひずみの比です。ポアソン比の試験方法の規定は我が国にはまだなく、一般にはASTM法に準じた方法が採用されています。載荷方法は前述のコンクリートの静弾性係数試験方法と同じで、異なる点は縦ひずみだけでなく試験体中央の横ひずみも測定する点です。

ポアソン比は、下式で計算します。

$$\mu = \frac{\epsilon_{t1} - \epsilon_{t2}}{\epsilon_1 - 50 \times 10^{-6}} \dots\dots\dots (式-7)$$

- ここに、 μ ：ポアソン比
- ϵ_{t1} ：最終載荷時における応力 S_1 によって生ずる横ひずみ
- ϵ_{t2} ：最終載荷時における応力 S_2 によって生ずる横ひずみ
- ϵ_1 ：最終載荷時における応力 S_1 によって生ずる縦ひずみ

横ひずみの測定は、一般に電氣的ひずみ計(ストレインゲージ)による方法、機械的ひずみ計(エクステンソメータ)による方法等が用いられています。

5.7 コンクリートの中性化試験

一般にコンクリートは高いアルカリ性(pH値12~13)を示すため、この中では鉄筋やPC鋼材は錆びません。しかし長期間自然環境にさらされると空気中の炭酸ガスがコンクリートの細孔中に侵入し、その水酸化カルシウムと反応して中性(pH値9以下)である炭酸カルシウムとなります。この層を中性化層または炭酸化層といいます。PC構造物では、コンクリートの中性化によって鋼材が腐食する条件が整うため、コンクリートの経年変化(耐久性)を考えるうえで大きな要素となります。

試験はフェノールフタレイン法により行います。フェノールフタレイン法は、新しい破断面にフェノールフタレインの1%アルコール溶液を噴霧し、pH値9~10以下では無色、それ以上では赤色を呈することにより極めて簡単に中性化層を識別することができます。ただし測

◇講座◇

定方法によっては大きな誤差が生じるため、測定面はコア供試体の割裂面を使用します。コア供試体の切断面を使用する場合にはその面をよく水洗いし、表面水を乾燥させた後試薬を噴霧します。中性化深さは表面から赤く着色した位置までの深さで数点計測しその平均値で表します。

中性化深さと期間との関係は、一般に下式に示す岸谷式により算出します。

$$t = \frac{7.2}{R^2 \cdot (4.6x - 1.76)^2} C^2 \dots\dots\dots (式-8)$$

- ここに、 t : C まで中性化する期間 (年)
- R : 中性化比率
- x : 強度上の水セメント比 ($x \leq 0.6$)
- C : 中性化深さ (cm)

5.8 その他

配合推定は、「セメント協会コンクリート専門委員会法」、塩分含有量は、「日本コンクリート工学協会法 (電位差滴定法)」等によって行います。

6 PC 鋼材の材料試験

6.1 概要

PC 鋼材の材料試験もコンクリートの材料試験同様に、載荷試験終了後、桁より供試体採取して行います。PC 鋼材の外観および機械的性質を調査し、規格値と比較し経年変化の検討を行います。

6.2 試験片の採取

試験片は載荷試験による影響のない桁端付近から採取します。ただし使用条件の最も厳しい支間中央付近から採取したい場合には、載荷試験を行わない別の桁を用意する必要があります。採取方法は、加熱や変形等試験片の材質に変化を与えるような方法は避けます。

試験片の長さは引張試験に対して、つかみ間隔 + 500 mm 程度必要で、つかみ間隔は JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」に PC 鋼線は 100 mm 以上、2 および 3 本より線は 200 mm 以上、7 および 19 本より線は 600 mm 以上と規定されています。

6.3 外観調査

PC 鋼材の表面状況を目視により観察し、錆が生じていないか、その他変状が生じていないか調査します。

6.4 機械的性質

調査項目を、表-3 に示します。これらの試験結果と、規格値との比較を行います。引張試験は、JIS Z 2241「金

表-3 PC 鋼材の機械的性質

項	目
直	径 (mm)
降	伏 強 度 (N/mm ²)
引	張 強 度 (N/mm ²)
弾	性 係 数 (N/mm ²)
伸	び (%)
リ	ラ ク セ ー シ ョ ン (%)

属材料引張試験方法」によります。

6.4.1 直 径

直径は、マイクロメータ等により、互いに直交する 2 方向の直径を測定し、その平均値とします。

6.4.2 降伏強度、引張強度、伸び

降伏強度、引張強度、伸びは、荷重-伸び曲線より下記により求めます。

- 1) 降伏強度は、0.2% 永久伸びに対する荷重を試験前の断面積で除して求めます。
- 2) 引張強度は、試験中の最大荷重を試験前の断面積で除して求めます。
- 3) 伸びは、標点間距離を鋼棒の場合直径の 8 倍、より線の場合 100 mm として、破断伸びを求めます。

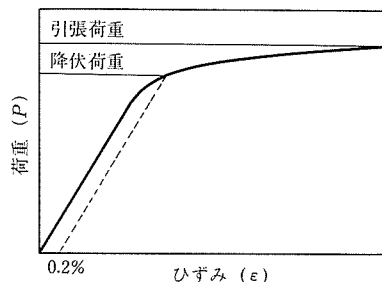


図-8 荷重-伸び曲線

6.4.3 弾性係数

荷重-伸び曲線から、下式により求めます。

$$E = \frac{4P}{\pi d^2 \epsilon}$$

- ここに、 E : 弾性係数 (N/mm²)
- P : 荷重-伸び曲線の直線部における荷重 (N)
- d : 実測した直径 (mm)
- ϵ : 荷重 P におけるひずみ

6.4.5 リラクゼーション値

リラクゼーション値は、常温で試験片を適当な間隔でつかみ、約 1 分間 0.2% 永久伸びに対する荷重 (降伏荷重) の 80% に相当する荷重をかけ、その後 10 時間つかみ間隔をそのまま保持して、荷重の減少を測定し、もとの降伏荷重に対するその減少した荷重の百分率で表します。

6.5 グラウトの充填状況

ポストテンション桁では、曲げ破壊試験終了後の桁より主ケーブルを採取し、シースの表面状況、シース内のPC鋼材の配置状況、グラウトの充填状況等について、目視により調査します。

㊦ おわりに

PC橋の建設技術は、長年にわたる試験や研究により得られたデータを基に開発・改善が行われています。ただし、こうした試験や研究はその性格上、構造や荷重あるいは環境条件等をモデル化したり、時間を短縮して行われています。これにたいして、長年供用された橋梁から桁を取り出して行う試験では、実際の荷重条件、環境条件、そして時間の経過を経たPC桁の機能や、コンク

リート・鋼材等材料に関するデータを得ることができません。今後こうした試験の機会は増加するものと思われ、こうしたデータの蓄積により、さらに合理的な設計施工法の開発が行われるものと思います。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔平成8年版〕規準編
- 2) 日本規格協会：道路橋用プレストレストコンクリート橋げたJIS A 5313, 1995
- 3) 笠井芳夫, 池田尚治：コンクリートの試験方法上・下, 技術書院
- 4) 喜多達夫：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 中性化, 技報堂出版
- 5) 高島春男：道路橋の実用診断学上・下巻, 現代理工学出版
- 6) 國分正胤：土木材料実験, 技報堂出版