

(46) PRC 桁の実橋測定結果について

東日本旅客鉄道(株) 建設工事事部 構造技術センター 正会員 ○津吉 毅
 東日本旅客鉄道(株) 建設工事事部 構造技術センター 正会員 小林将志
 東日本旅客鉄道(株) 建設工事事部 構造技術センター 正会員 海原卓也

1. はじめに

PRC 桁の設計において、クリープ係数、乾燥収縮度の設計用値が設計に与える影響は非常に大きいため、合理的な設計とするためには実状に応じた設計用値を与える必要がある。JR 東日本では、プレストレスロスや鉄筋反力を計算する際の無筋コンクリートのクリープ係数および乾燥収縮ひずみの設計値として $\phi = 3.0$ 、 $\varepsilon = 400\mu$ 程度の値を定めている¹⁾。これらの設計用値は、過去のラーメン高架橋や PRC 桁での主として鉄筋ひずみの実測値をもとに、安全側となるよう定めた値であるが、実橋における測定データの蓄積はまだ十分であるとは言い難い。そこで、今回、東京駅中央線重層化アプローチ部の PRC 桁においてコンクリートひずみ等の計測を行い、材齢 1200 日程度までの測定結果について若干の考察を加えたので報告する。

2. 構造概要²⁾ および計測概要

図-1 に東京駅中央線重層化アプローチ部高架区間の概要を示す。計測は 43 番柱~44 番柱のスパン 17m の PRC 桁(以下、G17 桁という。)と、37 番柱~38 番柱のスパン 28m の PRC 桁(以下、G28 桁という。)のスパン中央断面の

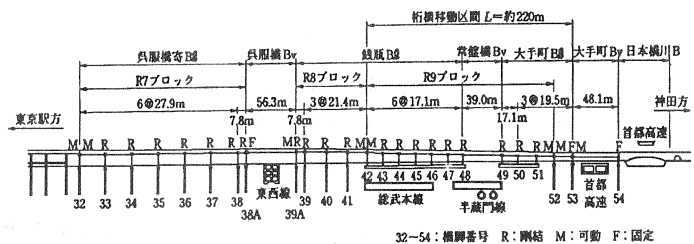


図-1 高架区間概要

2 個所で行った。図-2 に、G17 桁の断面図を示す。G17 桁は、工場にて4つの U 形桁を製作し、クレーンにて架設後、上床版を現場打設した。ケーブルは、上スラブ打設までの荷重に対して曲げひび割れが発生しないよう、U 形断面内にシングルストランド (1T19.3) を配置し、完成系で不足するプレストレスは外ケーブルを配置している。なお、G17 桁は、単純桁として約 1 年半供用した後に、桁を横移動させ、柱頭部にコンクリートを打設後、PC ケーブルで連結しラーメン化する構造である。

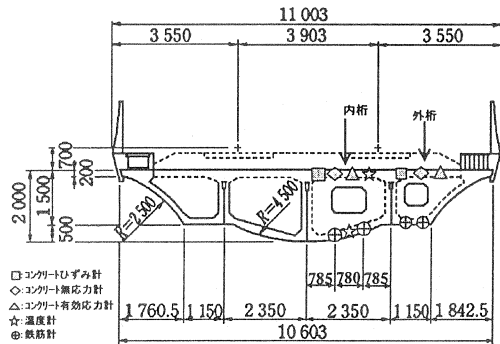


図-2 G17 桁断面図

図-3 に、G28 桁の断面図を示す。G28 桁は、断面の右側が隣接する線路の電線に近接しており型枠、支保工を全面に組み上げることが不可能であったため、断面の右端のブロックを除く 3 室 4 主桁部を場所打ち施工とし、断面の右端は、場所打ち部施工後に、プレキャストブロック工法により架設した。なお、このプレキャスト部は橋軸方向には 2 m 程度の間隔で目地を設けており、橋軸

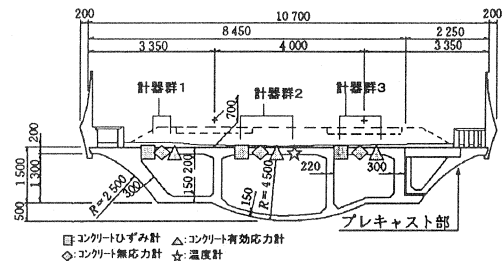


図-3 G28 桁断面図

表-1 コンクリートの配合

	W/C(%)	S/a(%)	W(kg/m ³)	C(kg/m ³)	S(kg/m ³)	G(kg/m ³)	混和剤1(kg/m ³)	混和剤2(kg/m ³)	混和剤3(kg/m ³)
G17桁下床版	38.2	54	172	450	894	789	0.225*1	11.7*2	0.75*3
G17桁上床版	38.5	41.3	162	421	718	1050	7.157*4	-	-
G28桁	41.4	40.8	166	401	709	1066	7.218*4	-	-

*1)AE剤 *2)高性能減水剤 *3)増粘剤 *4)高性能AE減水剤

方向には非構造部材としている。G28桁は当初からラーメン構造となるよう施工し、また、構造形式完成後、路盤コンクリート打設までは、隣接する呉服橋Bv(鋼箱形桁)の架設ヤード(送りだし施工)として使用した。

表-2 各施工ステップ毎のコンクリート材齢

G17施工ステップ	年月日	材齢(日) 下床版	材齢(日) 上床版	G28施工ステップ	年月日	材齢(日)
①コンクリート打設	1994年5月17日	0		(下床版-ウェブコンクリート打設)	(94年6月25日)	
②アレストス導入	1994年5月21日	4		①上床版コンクリート打設	1994年7月7日	0
③桁架設	94年9月2~5日	108~111		②内ケーブル緊張	1994年7月14日	7
④上床版打設	1994年11月5日	172	1	③工事桁等組立開始	1994年7月20日	13
⑤外ケーブル緊張	1994年11月15日	182	11	④P36外ケーブル緊張	1994年7月26日	19
⑥防音壁・ダクト	94年12月12~15日	209~212	38~41	⑤P37外ケーブル緊張	1994年7月28日	21
⑦路盤コンクリート打設	1995年1月10日	238	67	⑥P38外ケーブル緊張	1995年7月29日	22
⑧仮線供用開始	1995年7月3日	411	240	⑦アレイキャスト音コン打設	1994年8月6日	30
⑨桁振り戻し	1996年11月17日	915	744	⑧鋼桁組立開始	1994年9月5日	60
⑩連結ケーブル緊張	96年1月28~29日	987	816	⑨鋼桁組立終了	1994年11月19日	135
				⑩防音壁設置	1995年1月30日	207
				⑪供用開始	1995年7月3日	361

今回、測定結果を報告する計器の埋設位置は図-2および図-3に示した通りで、それぞれ上床版、下床版のスラブ厚の中心付近に埋設し、計測はすべて自動計測により行った。なお、表-1に主桁コンクリートの配合を、表-2には各施工ステップ毎のコンクリート材齢を、表-3には計器の型式を示す。

表-3 計器の型式

	型式	メーカー
コンクリートひずみ計	KM-100B	東京測器
無応力計容器	KMF-51	東京測器
コンクリート有効応力計	GK-100-202	東横エルメス
鉄筋ひずみ計	BF-13CT	共和電業

3. 測定結果および考察

3-1. G17桁

(1) 上床版測定結果

図-4に、上床版の各計器の測定結果の一例を示す。測定値は、1時間程度ピッチで計測されている全測定データの中から、午前3時の測定値を材齢1年程度までは1個/1日、それ以降は1個/3~5日の頻度で抽出しとりまとめた。また、水和反応による温度変化がほぼ収束した材齢4日目の値を初期値とした。なお、図中の乾燥収縮ひずみは無応力計の測定値で、弾性ひずみは有効応力計の測定値をヤング係数で除したものであり、ヤング係数は、材齢3日から180日までに5回程度実施した静弾性試験の結果を平均した値を用いた。全ひずみ(コンクリートひずみ計)および乾燥収縮ひずみ(無応力計)は、材齢200日以降一定の周期で測定値が大きく振れ

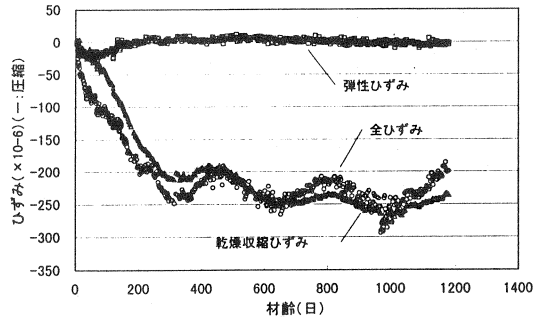


図-4 外桁測定値

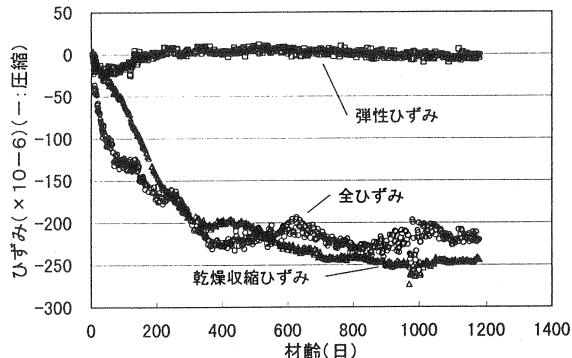


図-5(a) 外桁測定値(線膨張係数差補正)

ており、この動きはコンクリート温度の変化と相関が認められた。これは、計器の線膨張係数とコンクリートの実際の線膨張係数に差が生じ、コンクリートの温度変化による自由膨張・収縮の影響を抽出したためと考え、クリープ、乾燥収縮等の塑性ひずみ変動が微少であると考えられる短期間での温度変化とひずみ測定値の変動から線膨張係数差を逆算し、測定値を補正することとした。線膨張係数差を補正した結果を図-5に示す。線膨張係数差による見かけのひずみ変動は比較的よく除去できたと思われる。表-4は、コンクリート縁応力度の設計値を示す。上床版は、版上荷重以降の荷重のみを受け、単純桁状態での上床版中心(計器埋設位置)での圧縮応力度の設計値は 10kgf/cm^2 程度である。また、ラーメン化した後は、42番柱上が可動でありかつ柱の剛性が非常に小さいため、連結ケーブルや温度変化による不静定力はほとんど生じない。弾性ひずみの測定値は $0\sim 30\mu$ ($0\sim 10\text{kgf/cm}^2$)であり、設計値と比較するとほぼ妥当な値であるといえる。この弾性ひずみは、全ひずみに比べて小さい値であるため、全ひずみが乾燥収縮ひずみ(無応力計)とほぼ同じ値となっており、クリープひずみを抽出しクリープ係数について検討することはできなかった。なお、乾燥収縮ひずみは、内桁・外桁とも 250μ 程度でほぼ収束しているようであり、G17桁においては、

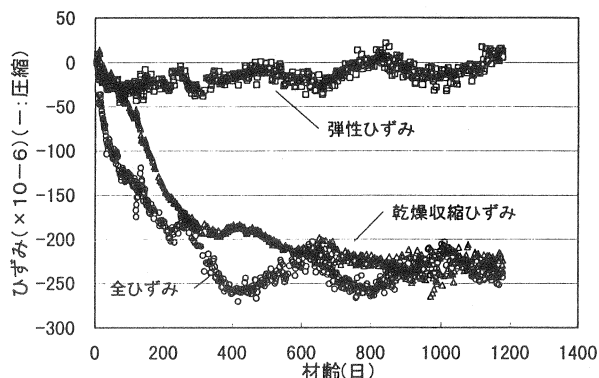


図-5(b) 内桁測定値(線膨張係数差補正)

表-4 コンクリート縁応力度(kgf/cm^2)

	U形桁材齢(日)	内桁		外桁	
		上縁	下縁	上縁	下縁
①上床版打設後	172	(74.8)	-15.0	(66.2)	-6.5
②版上荷重載荷後	238	12.4	-7.9	12.1	22.3
③永久荷重時($t=\infty$)		13.3	-19	14.2	4.8

(): U形桁の上縁

400μ という乾燥収縮ひずみの設計用値は安全側の数値であるといえる。

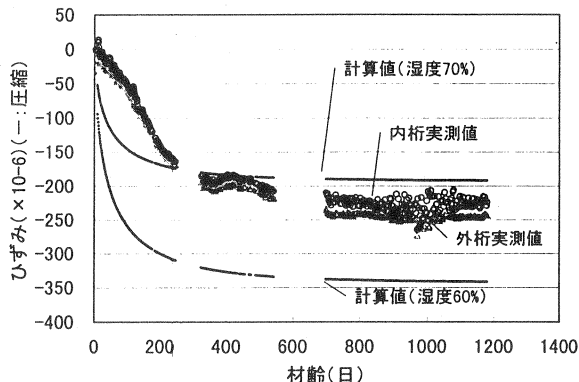


図-6 乾燥収縮ひずみの実測値計算値比較

図-6は、土木学会標準示方書³⁾による乾燥収縮ひずみの計算値と実測値を比較したものである。なお、計算値は載荷後の温度による有効材齢の補正を行っていない。実測値は湿度を60%として計算した値と70%として計算した値のほぼ中間的な値をとっている。最終値を実測値とあわせるためには、今回の場合湿度を65%程度とすればよいが、経時変化曲線は若干形がずれており、実測値のほうが緩やかに乾燥収縮が進行することを示している。これは、段階施工されるPC構造物の設計のように、荷重載荷時からの残存乾燥収縮ひずみが問題となる場合に、その値を土木学会標準示方書により計算すると、今回のような実測データに対しては危険側の評価となることを示している。したがって、そのような場合には、乾燥収縮ひずみの最終値を大き目に設定するなど、危険側の評価とならないような配慮が必要であると思われる。

(2) 下床版測定結果

下床版は、部材厚を 15cm と非常に薄くしており、有効応力計や無応力計の埋設が困難であったため、鉄筋計のみを設置し、実測値と計算値の比較を行った。計算はコンクリートの全断面を有効とし、コンクリートのクリープ・乾燥収縮により生じるプレストレスおよび鉄筋の圧縮応力は、鉄筋位置と PC 鋼材位置のひずみの適合条件から得られる式 (1)、(2) を逐次解析して求めた。計算上、外ケーブルは外力扱いとし、クリープ係数、乾燥収縮ひずみは土木学会標準示方書³⁾により、湿度を 65% として計算した。なお、その最終値は、クリープ係数が 1.7 程度、乾燥収縮ひずみが 300 μ 程度であり、いずれも設計値よりも小さめの値となった。

$$\varepsilon_s + \frac{\sigma_{cdp}}{E_c} \cdot \phi + \frac{\sigma_{cp}(t_2) + \sigma_{cp}(t_1)}{2E_c} \cdot \phi - \frac{A_p \cdot \Delta \sigma_{p(\phi+s)}}{E_c \cdot A_c} \left(1 + \frac{e_p^2}{r^2}\right) - \frac{A_s \cdot \Delta \sigma_{s(\phi+s)}}{E_c \cdot A_c} \left(1 + \frac{e_p \cdot e_s}{r^2}\right) = \frac{\Delta \sigma_{p(\phi+s)}}{E_p} \quad \dots(1)式$$

$$\varepsilon_s + \frac{\sigma_{cds}}{E_c} \cdot \phi + \frac{\sigma_{cs}(t_2) + \sigma_{cs}(t_1)}{2E_c} \cdot \phi - \frac{A_p \cdot \Delta \sigma_{p(\phi+s)}}{E_c \cdot A_c} \left(1 + \frac{e_p \cdot e_s}{r^2}\right) - \frac{A_s \cdot \Delta \sigma_{s(\phi+s)}}{E_c \cdot A_c} \left(1 + \frac{e_s^2}{r^2}\right) = \frac{\Delta \sigma_{s(\phi+s)}}{E_p} \quad \dots(2)式$$

ここに、

ε_s : 時間 t_1 から t_2 までに進行する乾燥収縮度

E_c, E_p, E_s : コンクリート、PC 鋼材、鉄筋のヤング係数

ϕ : 時間 t_1 から t_2 までに進行するクリープ係数

σ_{cdp} : 死荷重による PC 鋼材位置のコンクリート応力度

σ_{cds} : 死荷重による鉄筋位置のコンクリート応力度

$\sigma_{cp}(t)$: 時間 t のプレストレスによる PC 鋼材位置コンクリート応力度

$\sigma_{cs}(t)$: 時間 t のプレストレスによる鉄筋位置のコンクリート応力度

A_c, A_p, A_s : コンクリート、PC 鋼材、鉄筋断面積

$\Delta \sigma_{p(\phi+s)}$: 時間 t_1 から t_2 に乾燥収縮、クリープにより生じる PC 鋼材の応力度減少量

$\Delta \sigma_{s(\phi+s)}$: 時間 t_1 から t_2 に乾燥収縮、クリープにより生じる鉄筋圧縮応力度増加量

e_p, e_s : PC 鋼材および鉄筋の偏心距離 r : 断面二次半径

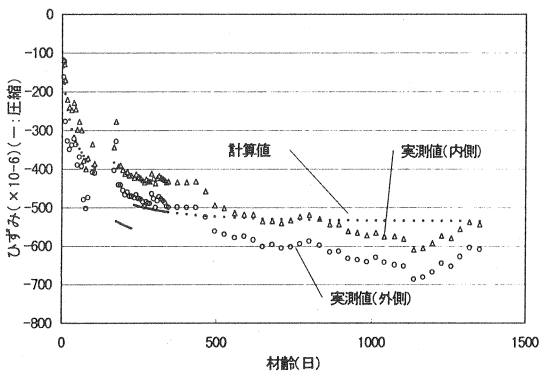


図-7(a) 外桁鉄筋ひずみ

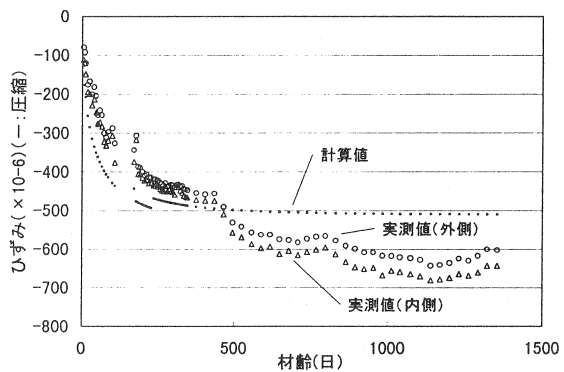


図-7(b) 内桁鉄筋ひずみ

図-7は、実測値と計算値を比較したものであり、内桁に対しては2個所の鉄筋計に対する平均偏心位置の計算値を示した。材齢450日程度までは実測値と計算値の相関は比較的よいが、それ以降は実測値のほうが大きめの値となっている。これは、計算で求めたクリ-プ、乾燥収縮の値が実際よりも過少評価となっていることが主な原因であると思われる。また、経時変化の度合いは、上床版の乾燥収縮ひずみと同様若干実測値のほうがややゆるやかな変化となっている。

3-2. G28 桁

図-8に各計器の測定結果を示す。測定値は、G17桁と同様の頻度で抽出して示し、弾性ひずみも同様の方法により求めた。また、図中のデータは、G17桁と同様にコンクリートひずみ計とコンクリートの線膨張係数差の影響を補正したものである。

乾燥収縮ひずみは、G17桁と異なる推移となっており、50 μ 程度進行したのちに、降雨や滞水等の影響のためか、膨張側に移行し、材齢1200日程度ではほとんど0に近い値となっている。また、弾性ひずみは、材齢100日程度の鋼桁の架設終了後、若干引張側に移行した後に、110~150 μ 程度で推移(37~51kgf/cm²)しており、表-5に示した設計値とほぼ合致している。

図-9は、クリ-プ係数の実測値と設計値を比較したものである。ここで、クリ-プ係数の実測値は、全ひずみから弾性ひずみと無応力ひずみを差し引いた塑性ひずみを弾性ひずみで除した値である。当初から不静定構造であるG28桁は、柱剛性が非常に小さく、温度変化や乾燥収縮等による不静力の影響は少ないものの、永久荷重時の応力度の時間の経過に伴う変化が若干認められる。したがって、図-9に示したクリ-プ係数の実測値は必ずしも正確

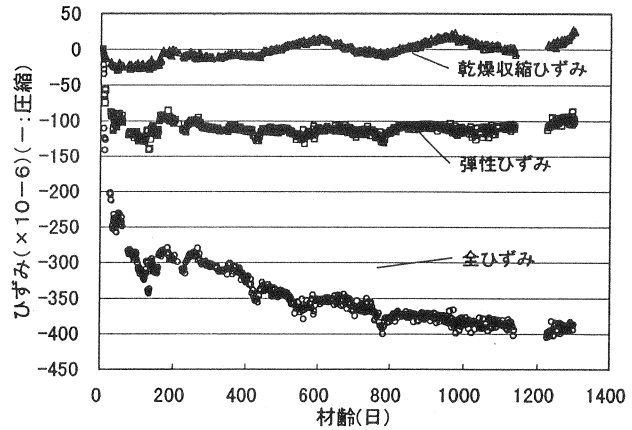


図-8(a) 計器群1の測定値

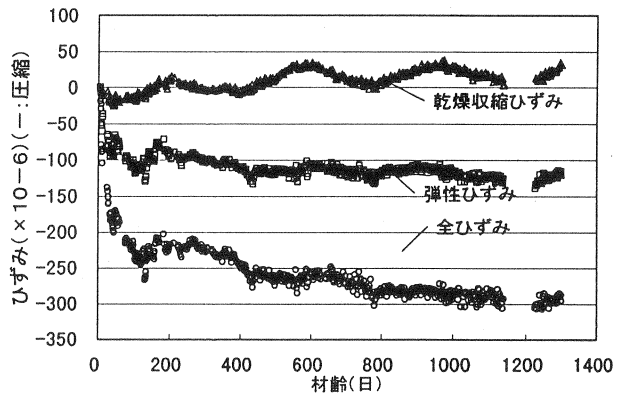


図-8(b) 計器群2の測定値

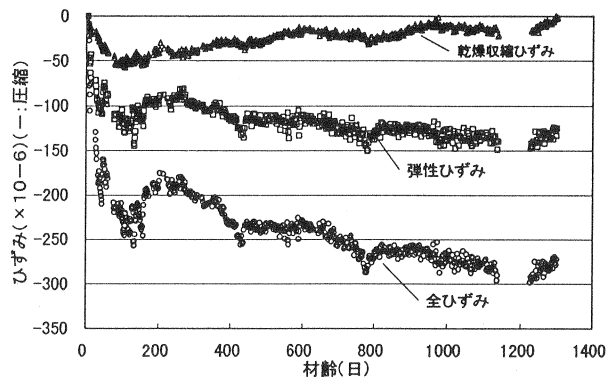


図-8(c) 計器群3の測定値

な値を評価しているとは言えないが、計算値 ($\phi_{\infty}=1.67$) に対して 1.0~3.0 と大きくばらつく結果となった。

4. まとめ

(1) G17 桁上床版の乾燥収縮ひずみは、250 μ 程度であり、湿度を 65%程度として計算すると土木学会標準示方書により最終値はほぼ妥当に計算できる。ただし、経時変化の度合いには相違があり、今回の場合、実橋のほうが乾燥収縮が緩やかに進行するようである。

(2) G17 桁下床版の鉄筋ひずみの実測値と計算値を比較してみると材齢 1200 日程度では、計算値がやや小さ目となる。これは、クリープ・乾燥収縮の計算値が実際よりも小さめに評価されていることが主な原因であると思われる。また、こ

の場合も、経時変化の度合いが実測値と計算値では、実測値のほうがやや緩やかとなっている。

(3) (1) (2) より、土木学会標準示方書によるクリープ、乾燥収縮ひずみの経時変化の度合いが、今回の測定データに対しては大きい結果となった。したがって、示方書の式で経時変化を評価すると、段階施工のように各材齢毎の荷重時以降の残存クリープ、乾燥収縮ひずみが設計上問題となる場合には、危険側の評価となる可能性があり、設計用値を大きめの値とするなどの配慮が必要であると思われる。

(4) G28 桁では、環境の影響のためか、乾燥収縮ひずみが材齢 100 日程度から膨張側に移行し、材齢 1200 日程度で 0 に近い値となった。

(5) G28 桁は不静定構造物なので厳密な評価とは言えないが、ひずみの実測値から求めたクリープ係数は、材齢 1200 日程度で 1.0~3.0 と大きくばらつく結果となった。

(6) G17 桁、G28 桁の両桁とも、設計用値クリープ係数 $\phi=3.0$ 、乾燥収縮ひずみ $\epsilon=400\mu$ は、今回の場合、材齢 1200 日程度までは、十分安全側の値であることが確認された。

表-5 コンクリート緑応力度(kgf/cm²)

	材齢(日)	上縁	下縁
①構造系完成、連結ケーブル緊張後	30	43.2	10.1
②版上荷重載荷後	207	58.4	-16
③永久荷重時(t= ∞)		45.7	-5.6
④永久荷重+温度(+10°C)		45.5	-5.2
⑤永久荷重+温度(-10°C)		45.9	-6

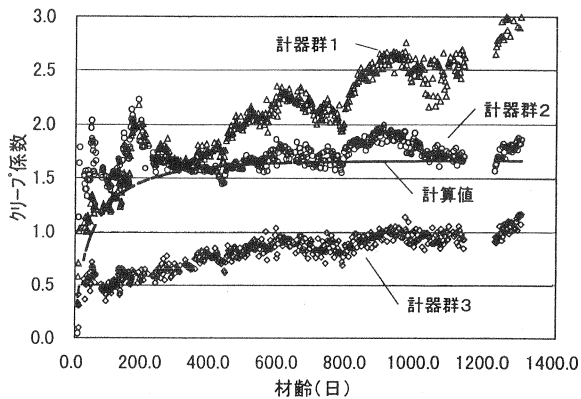


図-9 クリープ係数の計算値との比較

[参考文献]

1)鉄道構造物等設計標準の手引き(PC・PRC構造物);東日本旅客鉄道(株)、平成7年4月1日
 2)石橋忠良・津吉毅・細川泰明・古谷時春;中央線重層化-PRC高架橋の設計と施工-、プレストレストコンクリート、Vol.37、No.1、pp.21~30、1995.1
 3)[平成8年制定]コンクリート標準示方書[設計編];土木学会、平成8年3月