

(163) 長期間供用されたRC桁から採取したコンクリートのクリープ性状

九州大学大学院 正会員 松下博通
 同上 正会員 ○鶴田浩章
 同上 陶佳宏
 建設省九州地方建設局 藤本 聡

1. はじめに

昨今、交通量増大に対する対策や構造物の延命化等のためにコンクリート構造物の補強が盛んに行われている。中でも、維持管理やひび割れ制御に優れる外ケーブル工法の採用が増加してきている。一般に、新設構造物にプレストレスを与える工法の場合、有効プレストレスを把握するためにコンクリートのクリープを考慮することが必要になるが、既設のコンクリート構造物の補強においては、コンクリートのクリープは無視できるものとして、考慮されていない。しかし、長期にわたって応力履歴を受けたコンクリートのクリープ性状については、確認が困難であることから明確にされていない。

著者らは、その点に着目し、河川改修事業による新橋架設のため解体されることになったRC2主桁ゲルバー橋からコンクリートコアを採取する機会を得て、長期間供用されたコンクリートのクリープ試験を行った。さらに、そのコンクリート供試体が供用時にどの程度の応力履歴を受けていたかについて推定し、クリープ性状について考察したので、その結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

コンクリートコアを採取した橋梁は、昭和9年の竣工から約60年間、国道3号線が福岡県久留米市高野町~同市東櫛原町で筑後川を横過する位置に架橋されていたRC2主桁ゲルバー橋である。まず、新橋架設後に本橋で応力頻度分布測定やトラック静的載荷試験等の実橋試験を行い、その後試験桁を切り出してコンクリートコア採取を行った。図-1はコアを採取した桁の切り出し位置を、図-2は桁からのコンクリートコアの抜き出し位置を示している。切り出した桁は本橋のP9~P10径間の吊り桁部を約10mの長さで切り出したものであり、その切り出し桁の橋軸方向(X)から2本、橋軸直角方向(Y)から2本、合計4本のコンクリートコアを採取した。クリープ試験用供試体は抜き出したコアを成形して得たφ15cm高さ30cmの円柱供試体とした。

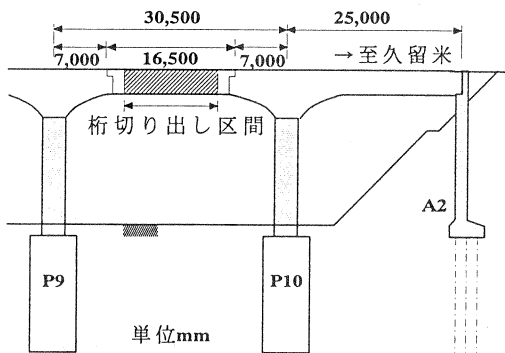


図-1 桁の切り出し位置

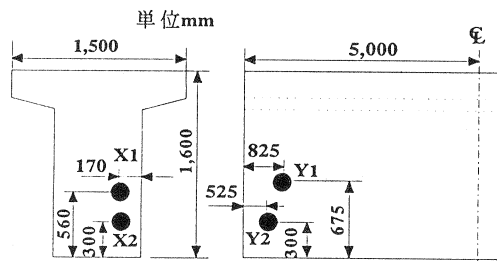


図-2 コンクリートコアの抜き出し位置

2. 2 コンクリートの配合推定

本橋についての記録は福岡県の古き橋の調査報告¹⁾に記載されており、セメントや骨材等の使用量が記載されているが、配合については明確にされていない。そこで、配合推定を行うことで、クリープの予測値を求める際の基礎データを得ることとした。

分析はセメント協会コンクリート専門委員会報告²⁾に従い配合推定を行った。結合水量は、ig-loss法によって求め、付着水による補正を行い水量(%)を算出した。単位水量はコンクリートコアから求めた硬化コンクリートの絶乾単位容積質量に水量(%)を乗じて算出した。また、単位骨材量(絶乾状態)及び単位セメント量は、硬化コンクリートの絶乾単位容積質量に付着水による補正を行った構成質量比を乗じることで算出した。なお、空気量は無視した。

2. 3 供試体の応力履歴の推定

コンクリートのクリープ性状は、コンクリートが受けた応力履歴に影響されると考えられ、今回のように長期間供用後のRC桁から得た供試体のクリープ性状について検討するためには、その応力履歴が把握できることが重要である。しかし、実際には供試体を受けた応力履歴を把握することは非常に困難である。そこで、本検討では桁を切り出す前に実橋で行った使用状態応力頻度測定及び20tトラック静的載荷試験の結果から推定を行った。

使用状態応力頻度測定は交通供用状態での鉄筋の応力状態を測定することにより、本橋が受けている荷重状態を把握することを目的に行った。主桁の下縁コンクリートの一部をはつり、図-3中の測定点A及びBの鉄筋にひずみゲージを貼付し、鉄筋ひずみを24時間×6日間測定し、ヒストグラムレコーダーを用いてデータを蓄積し、交通供用状態での荷重による鉄筋ひずみのヒストグラムを調べた。20tトラック静的載荷試験はトラック荷重(20t)を2台並列で橋梁に直接載荷し、作用するモーメントと鉄筋ひずみの関係を求めるために行った。載荷はトラックの後輪(2軸)の中央を載荷点位置(図-3中の矢印1~5)に合わせて載荷した。

3. 3 クリープ試験

試験は恒温恒湿室(室温 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60\pm 5\%$)において、図-4のように鋼板とφ32の鋼棒4本を使用しフレームを組み、2本直列に配置した供試体に油圧ジャッキとアキュムレータを使用して一定持続荷重を作用させる装置を2機使用して行った。導入応力は同じ桁から得た円柱供試体の圧縮強度試験の結果、供試体8本の平均圧縮強度が39.0MPaであったことから、圧縮強度の約1/4の9.8MPaを目標とした。

クリープひずみの測定は供試体に貼付したひずみゲージ(ゲージ長; 120mm)を使用する方法とホイットモアひずみ計で供試体に貼付した2つのチップ間の距離(約100mm)を測定する方法を組み合わせで行った。また、本橋は解体されるまで約60年経過していたが、抜き出したコンクリートには湿分が残存している可能性があった。しかし、乾燥収縮を測定するための供試体を確保することができなかったため、乾燥収縮が無視できるよう

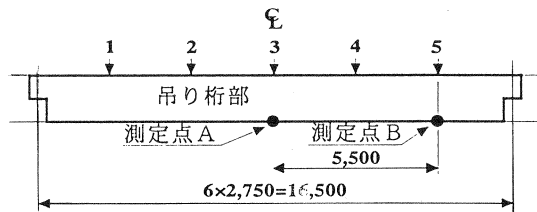


図-3 応力頻度測定位置及び静的載荷試験時の載荷位置

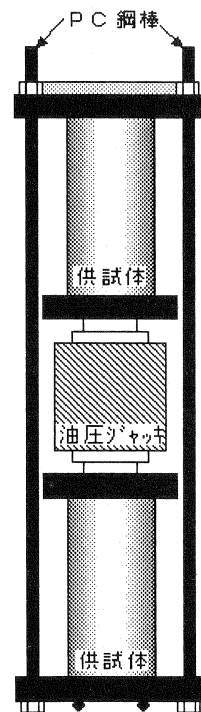


図-4 クリープ試験装置

に供試体を約8ヶ月間室温で乾燥させた後クリープ試験を開始した。

4. 実験結果及び考察

4. 1 コンクリートの配合推定結果

配合推定に用いた材料の分析値を表-1に、配合推定結果を表-2に示す。本橋は福岡県で昭和7年に竣工した豆津橋と施工法は同じであり、コンクリートの配合は同一であったと予想される。豆津橋のコンクリートの配合は容積比で、セメント：砂：砂利の比が1：2：4と定められており、単位セメント量は2樽(340kg)であった。表より本橋の単位セメント量の推定結果は342kg/m³であり、これは前述した当時のセメント量とよく一致している。そこで、本検討結果をクリープ予測に用いるのであるが、当時は骨材として玉砂利を使用していたこと、今回の配合推定では空気量を無視したことを考慮すると、本配合推定結果の単位水量は多めに出ている可能性が高いと考えられる。したがって、空気量1%程度を考慮して単位水量を補正すると、単位水量は161kg/m³程度になり、W/C=47%となるため、この値をクリープ予測に用いることにした。

表-1 配合推定に用いた材料の分析値

	CaO (%)	insol. (%)	ig-loss (%)	水分 (%)
コンクリート	9.76	78.08	6.46	0.63
セメント	63.0	-	-	
骨材	0.30	95.08	1.54	

表-2 配合推定結果

	骨材 (wt.%)	セメント (wt.%)	a/C	単位量(kg/m ³)			W/C (%)
				セメント	骨材	水	
推定結果	78.3	14.3	5.48	342	1862	171	50

a/C;骨材/セメント

4. 2 供試体の応力履歴の推定結果

使用状態応力頻度測定の結果を表-3に示す。表よりA点及びB点での鉄筋ひずみは最大で150×10⁻⁶程度であることが分かる。また、表-4にはトラック載荷試験における載荷位置が図の位置でのA点の鉄筋ひずみの最大値と平均値、さらにそれらから求められる鉄筋応力度とコンクリート応力度を示している。ここで、用いた鉄筋とコンクリートの静弾性係数は材料試験結果より得られた値の平均値を用いた。その値は、Es=209.7kN/mm²、Ec=31.1kN/mm²、n=6.7であった。これより、得られた鉄筋ひずみと使用状態応力頻度測定結果がほぼ同程度であることが分かる。また、トラック載荷試験において鉄筋ひずみが最大値を示した時の作用モーメントは約1372kNmであった。

表-3 応力頻度測定結果

	鉄筋ひずみ(×10 ⁻⁶)
測定点A	-30~150
測定点B	-90~150

表-4 20tトラック静的載荷試験の結果

	鉄筋ひずみ (×10 ⁻⁶)	鉄筋ひずみより求めた応力度	
		鉄筋(N/mm ²)	コンクリート(N/mm ²)
最大値	165	34.6	5.16
平均値	60	12.6	1.88

これらの結果は活荷重によるものである。死荷重の影響も含めて本橋を圧縮フランジの有効幅be=347.5cmとした図-5のようなT形断面として、応力度の算定を行った結果を次に示す。算定においては、As=197.54cm²、d=147.5cm、t=20cmとして、コンクリートコアを採取した位置での曲げモーメント1912kNmを作用させてコンクリートの最大応力度を求めた。また、コンクリートコア採取位置を考慮して、ひずみの適合条件式より、クリープ試験に使用した供試体の応力度を算定した。その結果を表-5に示す。

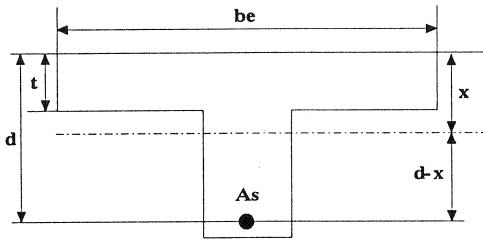


図-5 応力度算定に使用したT形断面

表-5 算定したコンクリート応力度

供試体名	算定したコンクリート応力度 (N/mm ²)
X 1	1.80
X 2	2.44
Y 1	1.51
Y 2	2.44

表-5より、特に橋軸方向より採取したX 1及びX 2は、使用状態において最大で 2.5N/mm² 程度の引張応力を受けていたことが推測される。また、吊り桁中央部の引張鉄筋位置のコンクリートは、平均 3.7N/mm² 程度の引張応力を受けていることになる。同じ桁から採取したコンクリートコアの圧縮強度試験の結果、橋軸方向(X)の供試体の平均圧縮強度は 42.7 N/mm²、橋軸直角方向(Y)の供試体の平均圧縮強度は 37.4N/mm²であり、この桁の目視調査では0.2mm以上の明確な曲げひび割れは確認されなかった。

4. 3 クリープ試験の結果

(1) 全ひずみの経時変化

クリープ試験において、油圧ジャッキを使用してコンクリート供試体に導入した応力は平均で 11.1N/mm²であった。図-6は持続応力導入後の経過日数とコンクリート供試体の全ひずみの関係を示したものである。全ひずみは持続応力導入時の弾性ひずみとクリープひずみを合計したものであり、ひずみゲージとホイットモアひずみ計で測定したデータをプロットしたものである。いずれの供試体においても経過日数 50 日程度からひずみが一定値に収束し始め、90 日を過ぎると完全に一定値に収束していることが分かる。また、橋軸方向(X)と橋軸直角方向(Y)との全ひずみの大きさや経時変化については、明確な違いは認められなかった。

ここで、各供試体に持続応力を载荷した直後に生じた弾性ひずみの一覧を表-6に示す。同じ桁から採取したコンクリートコアの圧縮試験時に測定した平均静弾性係数は、橋軸方向(X)で 30.7kN/mm²、橋軸直角方向(Y)で 31.4kN/mm²であった。

(2) クリープひずみの経時変化

前述の全ひずみから表-6に示した载荷時弾性ひずみを差し引いてクリープひずみを求め、持続応力導入後の経過日数とクリープひずみの関係を示したのが図-7である。図中に実線で示したのは、以下に示す土木学会コンクリート標準示方書のクリープひずみ予測式³⁾(以下、示方書式と呼ぶ)を用いて算定した単位クリープひずみから求めたクリープひずみの値を表している。

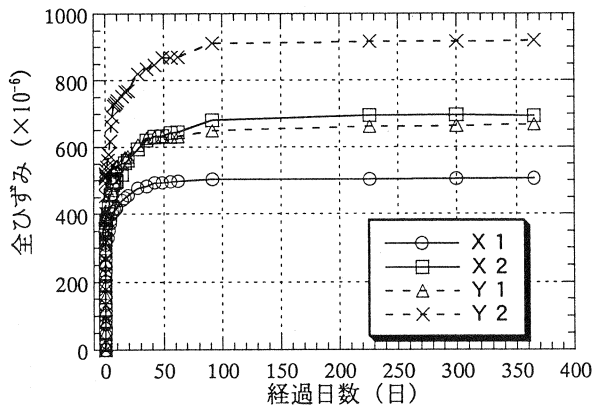


図-6 持続応力導入後の経過日数と全ひずみの関係

表-6 各供試体の载荷時弾性ひずみ

供試体名	弾性ひずみ (×10 ⁻⁶)
X 1	278
X 2	328
Y 1	452
Y 2	343

$$\dot{\epsilon}_{cc}(t, t', t_0) = \left[1 - \exp\left\{-0.09(t-t')^{0.6}\right\} \right] \cdot \dot{\epsilon}_{cr}$$

$$\dot{\epsilon}_{cr} = \dot{\epsilon}_{bc} + \dot{\epsilon}_{dc}$$

$$\dot{\epsilon}_{bc} = 15(C+W)^{2.0}(W/C)^{2.4}(\log_e t')^{-0.67}$$

$$\dot{\epsilon}_{dc} = 4500(C+W)^{1.4}(W/C)^{4.2}[\log_e(V/S)/10]^{2.2}(1-RH/100)^{0.36}t_0^{-0.30}$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_{cc}(t, t', t_0)$: 有効材齢 t' に荷重されたコンクリートの有効材齢における単位応力あたりのクリープひずみ、 $\dot{\epsilon}_{cr}$: 単位応力あたりのクリープひずみの最終値 ($\times 10^{-10}/(N/mm^2)$)、 $\dot{\epsilon}_{bc}$: 単位応力あたりの基本クリープひずみの最終値 ($\times 10^{-10}/(N/mm^2)$)、 $\dot{\epsilon}_{dc}$: 単位応力あたりの乾燥クリープひずみの最終値 ($\times 10^{-10}/(N/mm^2)$) とした。また、算定

においては、相対湿度を 60%、配合推定結果より単位セメント量 C を 342 kg/m^3 、水セメント比 W/C を 47% とした。さらに、乾燥開始時 t_0 を 7 日、荷重時 t' を 60 年として算定した。

以上のように、約 60 年間にわたって最大で 2.5 N/mm^2 程度の応力履歴を受けたと推定されるコンクリートにおいても、示方書式で算定される予測値程度、あるいはそれ以上のクリープひずみが確認できた。しかし、全ひずみと同様に、橋軸方向 (X) 及び橋軸直角方向 (Y) によるクリープひずみの差違は明確ではなかった。

図-8 はクリープひずみと表-6 に示された弾性ひずみから求めたクリープ係数と持続応力導入後の経過日数との関係を示したものである。図-7 の場合には、供試体によってばらつきが大きかったクリープひずみも、図-8 のクリープ係数で表現すると、供試体によるばらつきも小さくなり、最終的にクリープ係数が 0.8~1.1 程度に収束した。ただし、橋軸方向 (X) 及び橋軸直角方向 (Y) による違いは明確な傾向を示していない。

以上のように、桁の端部近くから採取したコンクリートはあまり大きな応力履歴を受けていないと考えられるが、本検討で扱ったコンクリートのように、 2.5 N/mm^2 程度の引張応力を受けているコンクリートにおいても、1 に近いクリープ係数が測定された。桁中央部でさらに大きな応力履歴を受けているコンクリートでは、クリープ係数がどの程度になるか本検討結果からは不明であるし、実際にそのような位置からコアを抜き出すことも簡単ではない。しかし、桁端部と桁中央部のコンクリートのクリープ性状にどの程度の違いがあるかによって、部材全体としてのクリープが変化するわけであるので、昨今注目され

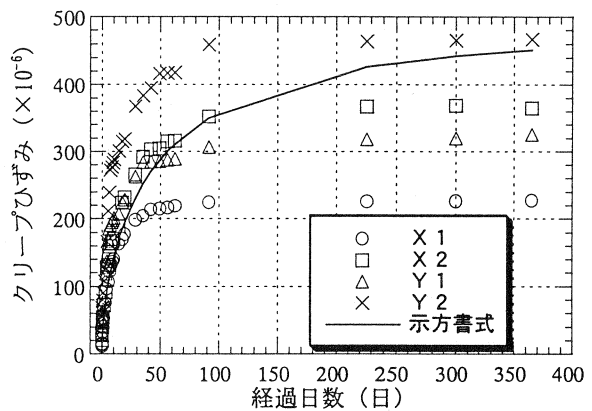


図-7 持続応力導入後からの経過日数とクリープひずみの関係

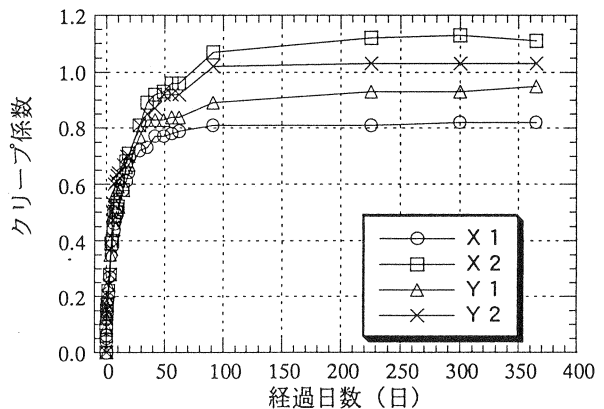


図-8 持続応力導入後の経過日数とクリープ係数の関係

てきた外ケーブル工法では、このクリープはプレストレスの損失に関わる重要な事項となる。最近では、RC構造はもちろん、PC構造も外ケーブルで補強しようという動きがあり、ますます外ケーブル補強が増えることが予想されるので、本検討結果から今後長期供用した部材のクリープというものを検討し、そのようなコンクリートのクリープ性状について明確にしておく必要があると言える。

また、引張応力履歴を受けた後の圧縮クリープや圧縮応力履歴を受けた後の圧縮クリープ、さらにはこのような検討を行う場合に実際に供用された構造物においてコンクリートが受けた応力履歴をどのように評価するかも重要な問題である。今回行った使用状態応力頻度分析は有効な手段の一つであるが、抜き出したコンクリートコアを実験室で試験することで応力履歴が把握できるようなもっと簡易な試験が望まれる。

5. おわりに

本論文は、長期間供用されたコンクリートのクリープ性状について、コンクリートコアが受けた応力履歴を推定して検討したものである。得られた成果を要約すれば以下ようになる。

- ①今回試験を行ったコンクリート供試体について、使用状態応力頻度分析や20トントラック静的載荷試験の結果より、応力履歴について調べた結果、桁端部付近から採取したコンクリートコアは最大で 2.5N/mm^2 程度の応力を受けていたと推測された。
- ②今回のクリープ試験の結果、長期間供用されたRC桁端部近くから採取したコンクリートにおいては、配合推定の結果より得たデータをもとに示方書式を使って求めた長期材齢のコンクリートのクリープひずみ予測値程度、あるいはそれ以上のクリープひずみが測定された。
- ③クリープ係数については、各供試体間のばらつきも小さく、0.8~1.1程度のクリープ係数が測定された。したがって、長期供用後のコンクリート構造物の外ケーブルによる補強の際には、部材のクリープの考慮が必要となる可能性があり、今後検討が必要であると言える。

今後の課題として、外ケーブルによるコンクリート部材の補強を考える上では、さらに大きな応力履歴を受けたコンクリートのクリープ性状や各部分の応力履歴が異なる部材の部材全体としてのクリープ性状について明確にすることが必要であると考えられる。

最後に、本検討に関連します実橋試験やコンクリートコアの採取等につきましては、九州橋梁・構造工学研究会(KABSE)『長年月供用されたコンクリート道路橋の調査手法に関する研究分科会』の委員の皆様方にご協力をいただきました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 田上為己：鉄筋コンクリート橋の歴史、福岡県の古き橋の調査報告
- 2) セメント協会・コンクリート専門委員会：硬化コンクリートの配合推定について、セメント・コンクリート No.251、pp.3-12、1968
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕、pp.30-31、1996