

コンクリートの圧縮クリープに及ぼす載荷材齢の影響について

Influence of Age at Applied Stress on Creep of Concrete under Compression

北海道大学工学部土木工学科 学生員 ○森田 賢亮 (Kensuke Morita)
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 大沼 博志 (Hiroshi Ohnuma)
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 名和 豊春 (Toyoharu Nawa)
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 出雲 健司 (Kenji Izumo)

1. はじめに

コンクリートのクリープは応力が作用するときのコンクリートの材齢に依存することが良く知られている。すなわち、クリープは載荷材齢によって異なり、セメントの水和反応が進んだ古いコンクリートほどクリープが小さくなる。

コンクリートのクリープは温度応力や乾燥収縮応力など変形が拘束されることによって発生する応力をリラクゼーション(緩和)させるので、これらの応力を算定する際にはクリープを考慮することが重要である。有効弾性係数法の考え方に基くと、クリープに伴ってコンクリートは見掛けの剛性が減少するため、温度応力や乾燥収縮応力の緩和が起こると考えることができる。

現在、シールドトンネル覆工コンクリートに関して、コンクリートの水和熱による温度応力と乾燥収縮による応力によってひび割れが発生するか否かを解析的に検討している。本研究は、この解析に必要なコンクリートのクリープ特性に関する一連の研究のうち、とくにクリープに及ぼす載荷材齢の影響に焦点を当てて検討を加えたものである。

2. コンクリートの圧縮クリープに及ぼす載荷材齢の影響に関する既往の研究

2.1 ダムコンクリートで得られたクリープの載荷材齢依存性¹⁾

(1) クリープ試験の概要

13 地点のダムに用いたコンクリートに対してクリープ試験を行い、クリープに及ぼす載荷材齢の影響に関する実験式を求めている。ダムコンクリートは粗骨材の最大寸法が非常に大きいために、40mm フルイによってウェットスクリーニングしたコンクリートを使用した。クリープ試験用供試体の寸法はφ15cm×60cmの円柱であり、乾燥収縮の影響を排除するために、厚さ2mmのネオプレンゴムで被覆した。ひずみの測定には長さ25cmのカールソン型ひずみ計を用いた。荷重は油ジャッキによって与えた。温度条件は20℃である。

(2) クリープに及ぼす載荷材齢の影響

クリープ試験の応力強度比は45%以下であるのでクリープは線形範囲にあり、したがってクリープひずみは載荷応力に比例するとして単位クリープ曲線を用いることができる。この研究では、単位クリープ曲線式として以下の対数式を用い、実験結果のあてはめを行っている。

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_i} + F(\tau) \cdot \ln(t+1) \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon(t)$ は単位応力度当たりの弾性ひずみとクリープひずみの和、 E_i はコンクリートのヤング係数、 τ は載荷時のコンクリートの材齢、 $F(\tau)$ はクリープ係数、 t は

載荷後の経過日数である。(1)式のクリープ係数から、コンクリートのクリープに及ぼす載荷材齢の影響を求めることができる。

28 日を基準とした各載荷材齢におけるクリープ係数比の実験結果を図-1に示す。ダムコンクリートを対象としているとはいえ、骨材の種類、コンクリートの配合が異なるために、ばらつきは比較的大きいが、載荷材齢が7日以降のクリープ係数比(載荷材齢依存性)は以下の二次曲線によって表されことを明らかにした。

$$\varphi(\tau) = \frac{F(\tau)}{F(28)} = A + B \cdot \log(\tau) + C \cdot \{\log(\tau)\}^2 \quad (2)$$

ここで、 $A = 2.855, B = -1.688, C = 0.279$

ただし、 $7 \leq \tau \leq 730$ (日) である。

2.1 CEB-FIP 国際指針²⁾

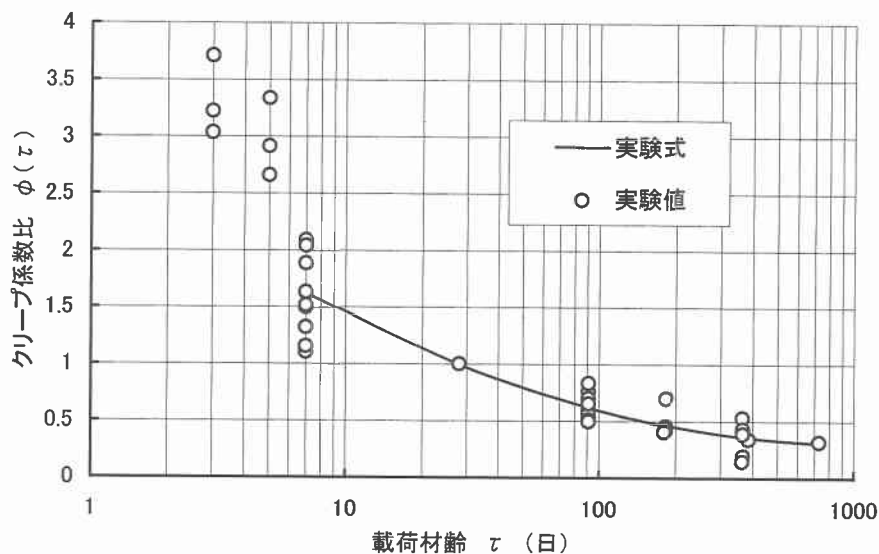
CEB-FIP の国際指針には、コンクリートのクリープに及ぼす載荷材齢の影響が数値で与えられている。それらを他の算定式とともに図-2に示す。

2.2 BAZANT の実用算定式³⁾

Bazant は世界で行われたクリープ試験の結果を基に、最適化法を用いて実用算定式を提案した。ある時間 t の単位クリープ曲線は次式によって表すことができる。

$$J(t, t') = \frac{1}{E_i} + \frac{\varphi_1}{E_i} \cdot (t'^{-m} + \alpha) \cdot (t - t')^n \quad (3)$$

ここで E_i 、 φ_1 、 α 、 m 、 n はコンクリートの配合によって定まる材料パラメータであり、指数 m と n はそれぞれ1/3と1/8である。また、 t はコンクリートの材齢、 t' は載荷材齢である。したがって、載荷材齢依存性は(3)式の t'^{-m} から求めることができる。Bazant の実用算定式を図-2に示す。



図－１ ダムコンクリートのクリープに及ぼす荷重材齢の影響

表－１ 使用したコンクリートの配合

配合	スランプ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 W/(C+E) (%)	細骨材率 S/a (%)	単位質量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	膨張材 E
A	17±2.5	5.5±1	63.0	46.5	188	299	795	925	0
B			61.8	46.5	185	269	796	927	30
C			44.0	44.0	187	370	707	910	55

３．コンクリートの圧縮クリープ試験

3.1 コンクリートに使用した材料

圧縮クリープ試験に使用したコンクリートの諸材料は現地のシールドトンネル覆工コンクリートと同一である。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は細砂（天然砂）と粗砂（砕砂）を 4：6 の割合で混合したものであり、その粗粒率、比重および吸水率はそれぞれ 2.63、2.58 および 1.80％であった。粗骨材は最大寸法 20mm の砕石であり、その比重、吸水率および実積率はそれぞれ 2.61、1.02％および 59.9％であった。混和材として CSA 系の膨張材を使用した。すなわち、B 配合には CSA100R を、また C 配合には CSA #20 を混和した。混和剤には減水剤と AE 剤を使用した。

コンクリートの配合を表－１に示す。B 配合は収縮補償を、また C 配合はケミカルプレストレスの導入を目的とした膨張コンクリートである。

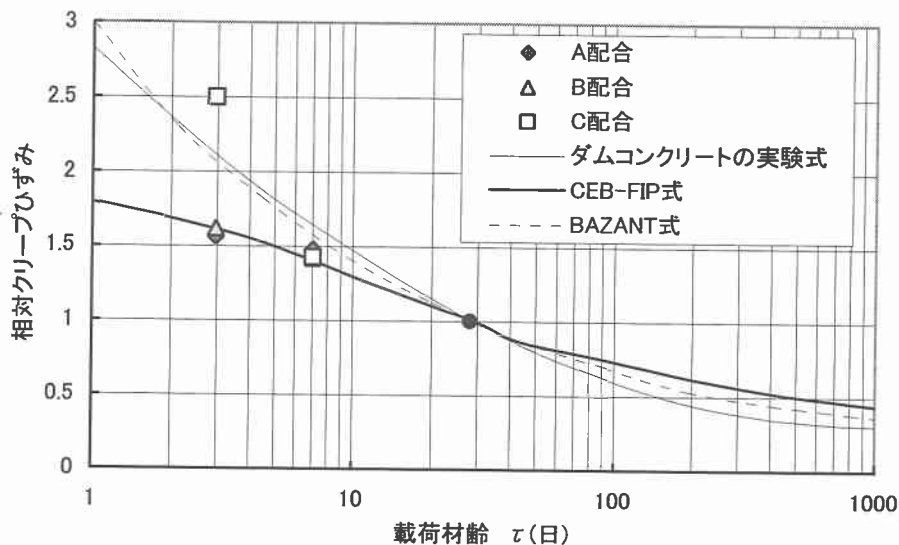
コンクリートの圧縮強度は、φ10cm×20cm の円柱供試体を用い、JIA A1108 に準拠した試験から測定した。供試体は 21℃±1℃ の水中で養生した後、クリープ試験の応力荷重時（材齢 3 日、7 日、28 日）および除荷時（180 日）において試験した。ヤング係数とポアソン比は圧縮強度試験で得られた応力－ひずみ曲線の強度の 1/3 応力の値とした。各材齢におけるコンクリートの力学的な性質を表－２に示す。

表－２ コンクリートの力学的性質

配合	荷重材齢 (day)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン 比
A	3	9.3	17.4	0.15
	7	15.0	21.0	0.15
	28	24.6	25.1	0.19
	180	31.0	29.4	0.19
B	3	11.1	18.5	0.17
	7	17.2	21.2	0.16
	28	24.8	26.1	0.17
	180	32.3	29.2	0.19
C	3	18.2	17.6	0.16
	7	24.1	24.9	0.19
	28	33.7	28.3	0.17
	180	42.1	28.8	0.18

3.2 圧縮クリープ試験の方法

供試体は、コンクリート中からの水分逸散が生じないように厚さ 0.2mm の銅板製円筒で被覆した密封供試体とした。また、この銅板製円筒はコンクリートを打設する際、型枠として使用した。密封供試体はコンクリート打設 1 日後には、銅板製キャップを被せてその周囲をハンダ付けし、密封条件とした。ひずみの測定にはカール



図－2 クリープに及ぼす荷重材齢の影響（既往の算定式と実験結果）

ソン型ひずみ計（ゲージ長さ 10cm）を用いた。

圧縮クリープ試験装置は、定荷重装置、油圧ジャックおよび 4 本のロッドで支持された載荷枠から構成されており、油圧を一定に保つことによって長期間に亘って一定の持続応力（応力の変動幅は $\pm 0.1\text{N/mm}^2$ ）を賦与することができる。この圧縮クリープ試験では、載荷材齢 3 日、7 日および 28 日に対してそれぞれ 2.45N/mm^2 、 5.39N/mm^2 および 7.55N/mm^2 の載荷応力とした。この試験装置は 20°C の恒温室に設置されており、供試体の温度を $20\pm 1^\circ\text{C}$ に制御することができた。

圧縮クリープ試験の条件をまとめて表－3 に示す。コンクリートの配合は 3 種類、載荷時のコンクリート材齢は 3 種類（したがって、載荷応力は 3 種類）、温度は 20°C 一定である。また、全て密封条件であり、一つの条件に対して 3 本の供試体を用いた。

表－3 圧縮クリープの実験条件

配合	載荷材齢 (day)	載荷応力 (N/mm^2)	載荷応力 強度比	備考
A	3	2.45	0.26	密封条件 温度： 20°C
	7	5.39	0.36	
	28	7.55	0.31	
B	3	2.45	0.22	
	7	5.39	0.31	
	28	7.55	0.30	
C	3	2.45	0.16	
	7	5.39	0.29	
	28	7.55	0.29	

それ以前にはクリープ速度が大きく曲線となるので、この部分に対して対数式の補正が必要である。

- ② 従来から言われているように、載荷時のコンクリート材齢が若いほどクリープひずみは大きくなることが分かった。

載荷後の経過日数が 1 日以前の範囲に対して対数式 (1) の補正を試みた。いくつかの数式について検討した結果、次の双曲線による修正式は実験結果とのあてはまりが最も良いことがわかった。

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_i} + \frac{\alpha\beta t}{1+\alpha t} + F(\tau) \cdot \ln(t+1) \quad (4)$$

ここで、 α と β は実験定数である。

最小二乗法を用いて (4) 式にあてはめを行った。図－3 の実線は (4) 式によるあてはめ結果を図示したものである。

3.4 クリープに及ぼす荷重材齢の影響

コンクリートのクリープは、載荷材齢が進むほど小さくなることが知られている。密封条件のコンクリートについて、載荷材齢 28 日の 180 日間のクリープひずみを基準として、圧縮クリープに及ぼす載荷材齢の影響を既

3.3 単位クリープ曲線

CSA 系膨張材を使用した膨張コンクリートは水和反応によってエトリンガイトが生成されるために、コンクリートには膨張ひずみが生じる。さらに、供試体が密封状態であって乾燥収縮が生じないとしても、自己収縮や硬化収縮によってコンクリートには収縮ひずみが発生することが考えられる。載荷応力を与えていないコントロール供試体で測定したひずみ履歴から、B 配合と C 配合の膨張コンクリートの場合には、若材齢においてそれぞれ 160×10^{-6} および 900×10^{-6} の膨張ひずみが得られた。また、A 配合のコンクリートには最終的に 60×10^{-6} の収縮ひずみが測定された。

B 配合の密封供試体から得られた単位クリープ曲線を図－3 に示す。この実験の場合には、載荷応力が強度の 40% 以下であるので線形クリープの範囲にある。すなわち、クリープひずみは応力に比例するものとして、単位応力度当たりのクリープ曲線で表すこととする。これらの単位クリープ曲線の特徴は；

- ① 載荷後の経過日数が 1 日以降においてクリープひずみは経過時間の対数に関してほぼ直線的に増加する。

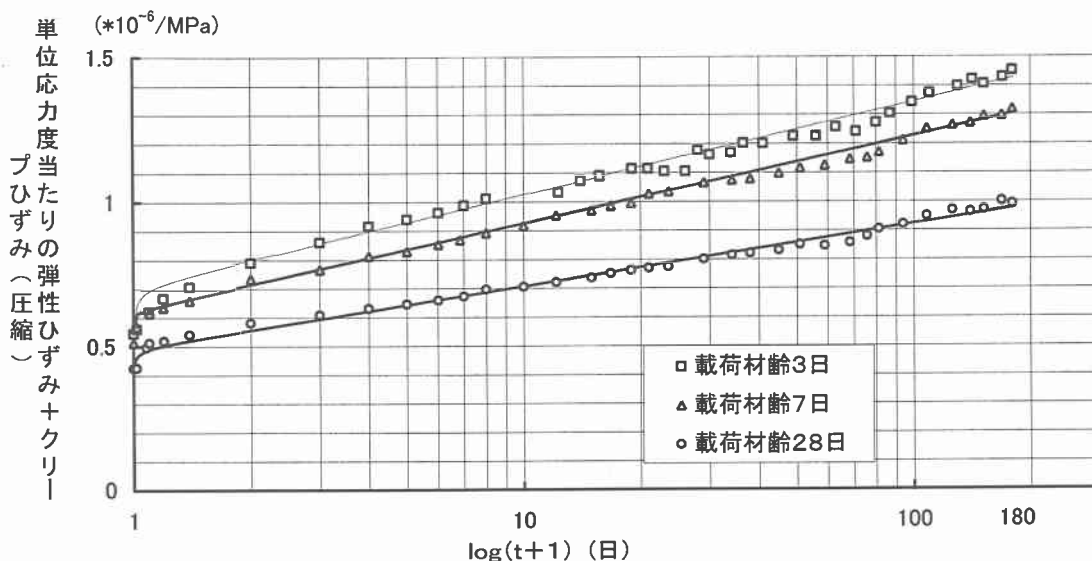


図-3 B配合コンクリートの単位クリープ曲線

往の算定式の値とともに図-2に示す。その特徴は；

- ① 明らかに、若材齢のコンクリートほどクリープはおおきことが示された。A配合、B配合およびC配合の載荷材齢3日における相対クリープひずみ（載荷材齢28日のクリープひずみとの比）はそれぞれ1.55、1.62および2.48であった。また、載荷材齢7日における各配合の相対クリープひずみはそれぞれ1.48、1.44および1.44であった。
- ② 膨張材を混和したC配合のコンクリートのうち、載荷材齢3日の相対クリープひずみは他の配合に比較して著しく大きい。これは、エトリンガイトの生成に伴う大きな膨張によってコンクリートがポーラスになったことによるものと推定される。
- ③ 載荷材齢が7日の場合には、配合の違いに左右されずにほぼ一定であり、この時のクリープひずみは載荷材齢28日のおよそ1.45倍であった。したがって、単位膨張材量が多いC配合であっても、水和反応が進んでコンクリートがある程度硬化した後は膨張したことによる影響は少なくなると考えられる。
- ④ 3種の算定式とこれらの実験結果を比較すると、C配合の載荷材齢3日を除いて、実験結果はCEB-FIP国際指針の値に最も近いことが明らかにされた。また、載荷材齢が若い場合、ダムコンクリートの実験式を延長した曲線とBazantの実用算定式はともに大きな値を与えることが示された。
- ⑤ 以上の結果から、A配合およびB配合に対するクリープの載荷材齢依存性はCEB-FIP国際指針の値を用いるのが適切であると考えられる。また、C配合の場合には、載荷材齢3日の値が著しく大きいので、載荷材齢7日までではCEB-FIP国際指針を、それ以前に対しては実験結果を直線で結んだ値を用いることとした。

4. まとめ

a) 圧縮クリープ試験の結果

実験に供した3種のコンクリートは載荷材齢が若いほどクリープが大きかった。水和熱抑制型膨張材を $30\text{kg}/\text{m}^3$ 混和したB配合のコンクリートのクリープは普通コンクリートと同程度であった。膨張材を $55\text{kg}/\text{m}^3$ 混和したC配合コンクリートのうち、載荷材齢3日の相対クリープひずみは他の配合と比較して大きかった。これは、膨張材の生成物によってコンクリートがポーラスになったことによるものと推定される。載荷材齢が7日の場合には、相対クリープひずみは配合の違いに左右されずほぼ一定であり、およそ1.45であった。

b) クリープの載荷材齢依存性に関する既往の算定式と試験結果との比較

クリープの載荷材齢依存性に関するダムコンクリートの実験式、CEB-FIP国際指針およびBazantの実用算定式と実験結果を比較した。その結果から、C配合の載荷材齢3日を除いて、クリープの載荷材齢依存性に関する実験結果はCEB-FIP国際指針の値にほぼ一致することが示された。

参考文献

- 1) 大沼博志；ダムコンクリートのクリープ・クリープに及ぼす載荷材齢の影響－、電中研業務資料、1977
- 2) CEB-FIP；コンクリート構造物設計施工国際指針、鹿島出版会
- 3) Z.P.Bazant, L.Panula：Practical Prediction of Time-dependent Deformation of concrete, Material and Construction, Vol.11, No.65 and 66, 1978；Vol.12, No.69, 1979