

論文 コンクリートの長期クリープ及び乾燥収縮試験

尾崎 詔^{*1}・菅田 紀之^{*2}

要旨：12年前に大型のバネ式クリープ試験装置を試作し、2種類のコンクリートについて実施してきた長期クリープ試験について発表する。プレストレストコンクリートを念頭に、普通ポルトランドセメントを用いた圧縮強度40 MPa程度のコンクリートと、粉末度8000 cm²/gの高炉スラグ微粉末で早強ポルトランドセメントの半分を置き換え、細骨材の一部に高炉スラグ砂を用いた圧縮強度70 MPaの高強度コンクリートを試験の対象にした。試験の結果は、土木学会標準示方書に採用された予測式の適用範囲外のコンクリートのせいか、クリープでは予測式とかなり違った様子を示したが、乾燥収縮では合致した。

キーワード：クリープ、乾燥収縮、高強度コンクリート、高炉スラグ微粉末、長期試験

1. はじめに

コンクリートのクリープ及び乾燥収縮は時間依存変形の影響をコンクリート構造物の設計に反映させる上で極めて重要なコンクリートの特性である。この値を正確に見積もるためには、適用可能な資料を得るための長期にわたる測定を必要とし、そのようなデータに基づいた精度の高い予測値が望まれている。

土木学会の旧コンクリート標準示方書では外国(CEB)の予測式を解説に示し¹⁾、これを用いてきたが、平成8年度に改定された新しいコンクリート標準示方書では国内の研究結果による新しい予測式を採用している²⁾。

著者等は、1985年に高強度コンクリートのクリープ測定にも適用可能な150 kNバネ式クリープ試験装置を製作し、2種類のコンクリートについてクリープおよび乾燥収縮試験を実施してきた。その後12年が経過した現在、この長期測定結果を発表し、新しく改定された土木学会コンクリート標準示方書に採用されている予測値等と比較してみる。

2. クリープ試験装置

一般に用いられている圧縮クリープ試験機に

はコイルスプリング式、油圧式、てこ式等がある。コイルスプリング式は偏心荷重が作用しがちで大きな荷重には不向きであるが、広いスペースを必要としないので最も一般的な方式である。これに対し油圧式は荷重範囲が広く、荷重の安定性も良いが高価であり、てこ式は荷重の安定性が良く、調整も簡単であるが広いスペースを必要とし大きな荷重には不向きである。

当実験室ではコンパクトで廉価なことを考慮し、コイルスプリング方式を採用したが、高強度コンクリートのクリープ試験を念頭に置き大容量の大型コイルスプリングを採用する傍ら、引張反力をとる3本の鋼棒にコンタクトボールを埋め込み、電気抵抗線ひずみ計も設置して3本の鋼棒のひずみから荷重をチェックし、偏心荷重が架からぬよう配慮した。なお、コイルスプリング方式の装置に要求される性能は、載荷後の応力減退をできるだけ小さくするために、載荷時のコイルスプリングの圧縮変形量を予想されるクリープ及び乾燥収縮による変形量に比べて十分大きくすることである。この装置では応力の減退を1%程度にとどめるようにした。

試作したクリープ試験装置を図-1に示す。通常のコイルスプリング方式に比べてかなり大

*1 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科, 工博(正会員)

*2 室蘭工業大学講師 工学部建設システム工学科, 工博(正会員)

型のコイルスプリングを使用しているが、その諸元を表-1に示す。

装置について説明すると、引張によって荷重を支える長さ 1312 mm の鋼棒は M24 の S45C とし、コイルスプリングの内側に設置すべく、厚さ 30 mm の加圧鋼板の半径 166 mm の位置に直径 25 mm の穴を開けて鋼棒を通し、六角ナットで組み立てている。4 枚の鋼板は、コイルスプリング、供試体、油圧ジャッキを押えるための厚さと大きさを必要とするが、最上部の鋼板は載荷後、ジャッキを取り外してしまえば必要ない。

供試体の長さは 400 mm、または 200 mm のものを 2 本直列に圧縮載荷できるように、42 mm 厚さの 2 枚の加圧版の間に 2 mm の隙間を保持して直径 25.4 mm の球を挟んだ球面座を設置している。

このクリープ試験装置を設置した恒温恒湿室は、12 年以上にわたって、温度は 20 °C、湿度は 60 % に保ってきた。ただし、除湿能力がないため、湿度の高い時期には 60 % を越えることがあり、時々ポータブル除湿機を使用した。

3. 試験に用いたコンクリート供試体

クリープおよび乾燥収縮の試験に用いたコンクリートは次に記すような 2 種類であるが、それらの供試体は何れも直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱で、試験直前まで 20 °C の水中で養生された。試験は材齢 28 日で開始した。

3.1 普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート

使用材料としては、セメントは比重 3.16 の普通ポルトランドセメント、細骨材は比重 2.68 の海砂、粗骨材は比重 2.67 の碎石で、このほか混和剤として AE 剤と減水剤を用いた。配合はプレストレストコンクリートを想定して設計基準強度 40 MPa 以上を目標に、表-2 のような配合とした。材齢 28 日の試験時における圧縮強度は 45.4 MPa、弾性係数は 31.2 GPa であった。

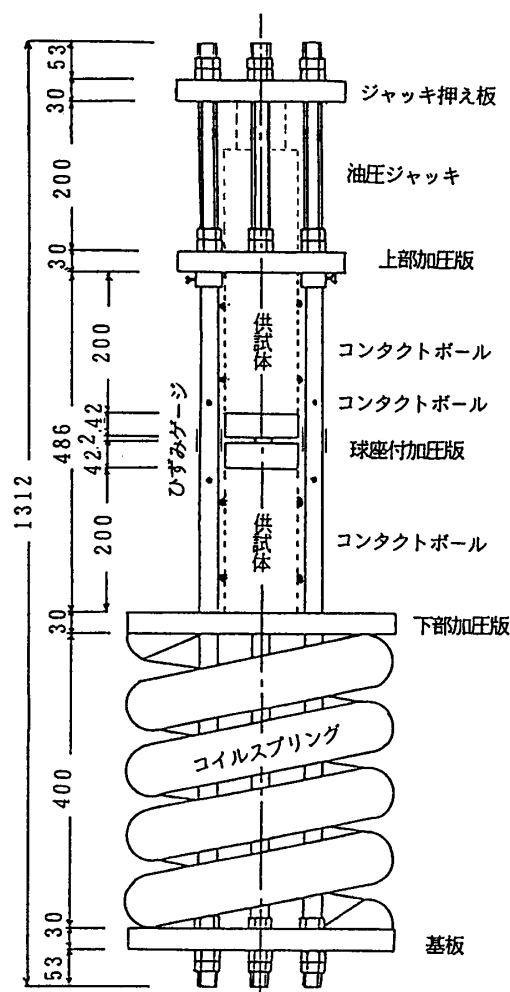


図-1 クリープ試験装置

表-1 コイルスプリングの諸元

材 質	SUP10
材料直径	70 mm
コイル内径	230 mm
コイル外径	370 mm
巻き数	4.6
自由高さ	400 mm
密着高さ	322 mm
設計荷重	150 kN
たわみ	53 mm
ばね定数	2.8 kN/mm

3.2 高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリート

使用材料としては、比重 3.12 の早強ポルトランドセメントに、比重 2.90 で比表面積 8000 cm^2/g の高炉スラグ微粉末を 50 %ブレンドした比重 2.96 の結合材を用い、細骨材としては比重 2.92 の高炉スラグ細骨材と比重 2.76 の海砂、粗骨材は比重 2.65 の砕石を用いた。

配合は、設計基準強度 70 MPa の高強度コンクリートを想定して、表-3 のような配合とした。材齢 28 日の試験時における圧縮強度は 69.4 MPa であった。弾性係数は試験せず、クリープ試験の際の弾性歪から逆算した。

4. クリープの測定と試験結果

クリープ試験には、28 日間水中で養生した直径 10 cm、高さ 20 cm の供試体を用いた。歪の測定のために、コンタクトゲージ用のプラグを 2 対設置した供試体を 2 本重ねてセットし、2 種類の何れのコンクリート供試体に対しても圧縮強度の 30 %の応力でジャッキによって載荷した。普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは、載荷時の荷重は 107 kN、コンクリートの応力度は 13.6 MPa、弾性歪は 449

$\times 10^{-6}$ であった。この場合、弾性係数を逆算すると 30.3 GPa となる。一方、高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートでは、載荷時の荷重は 163 kN、コンクリートの応力度は 20.8 MPa、弾性歪は 635×10^{-6} である。この場合、弾性係数を逆算すると 32.7 GPa となった。

載荷時には、何れの場合も載荷応力の 1/2 の時点で、各測定点における歪の差が 10 %未満になるように偏心載荷を修正して載荷した。載荷重は油圧ジャッキの圧力計による他、3 本の鋼棒に 2 枚ずつ貼った電気抵抗線歪計の歪測定結果に鋼棒の弾性係数と断面積を乗じて求まる引張力から確認した。ただし、長期の力は 3 本の鋼棒に 2 対ずつ埋め込んだコンタクトボールの標点間距離の変化による歪の測定結果から求まる引張力で確認している。

クリープ試験装置にセットされたコンクリート供試体の歪は、温度 20 °C、湿度 60 %の一定環境下において測定を続けて来たが、この側に、コンタクトボールを埋め込んだクリープ測定用供試体と同じ直径 10 cm、高さ 20 cm の乾燥収縮測定用供試体を置き、それぞれの歪をコンタクトゲージによって同時に測定して来た。

これらの試験結果について記すと、普通ポル

表-2 普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの配合

最大 寸法 (mm)	スラ ンプ (cm)	空気量 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量 (kg/m^3)					
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 剤	減水剤
20	8.0	4.0	40	41	142	355	770	1104	95 cc	1755 cc

表-3 高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの配合

最大 寸法 (mm)	スラ ンプ (cm)	空気量 (%)	水結合 材 比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量 (kg/m^3)						
					水	セメ ント	スラ グ微	スラ グ細	細骨材	粗骨材	高性能 減水剤
15	8.0	2.0	41	44	171	209	209	278	541	996	1.67

トランドセメントを用いたコンクリートの測定は1985年12月に開始し、1997年12月までの12年間のデータを得た。この結果を図-2にまとめて示す。また、高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの測定は1988年9月に開始し、

1997年12月までの9年3ヵ月間のデータを得た。この試験結果を図-3にまとめて示す。

図中の測定歪はクリープ試験装置に供試体をセットし、載荷開始直前の歪をゼロとした荷重およびコンクリートの乾燥収縮と環境の変化に

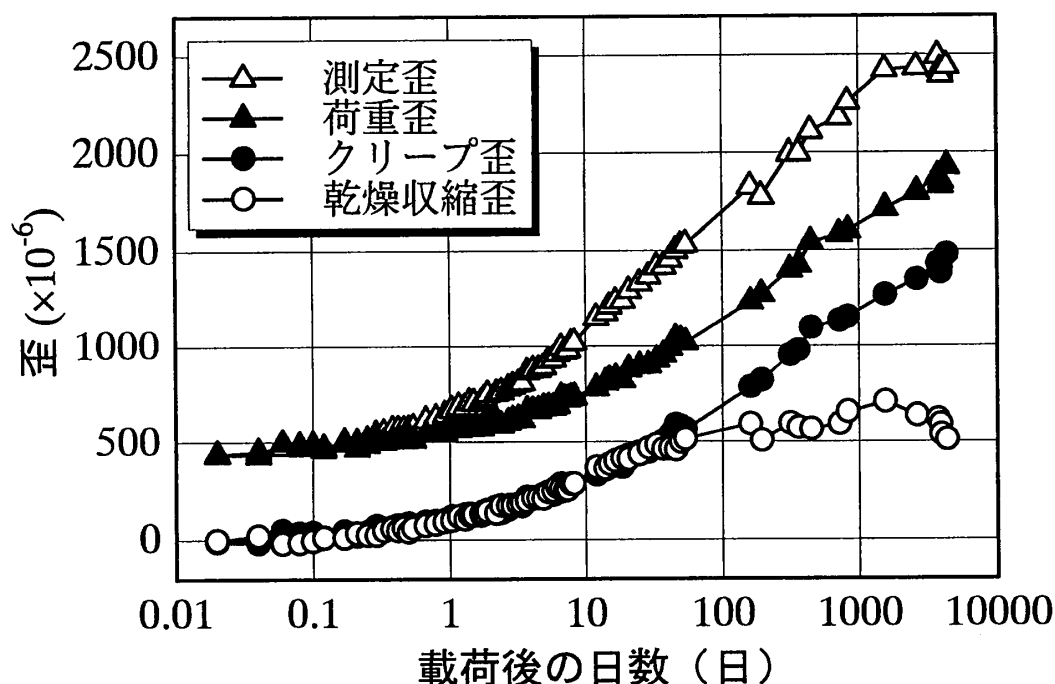


図-2 普通セメントを用いたコンクリートのクリープ及び乾燥収縮歪の試験結果

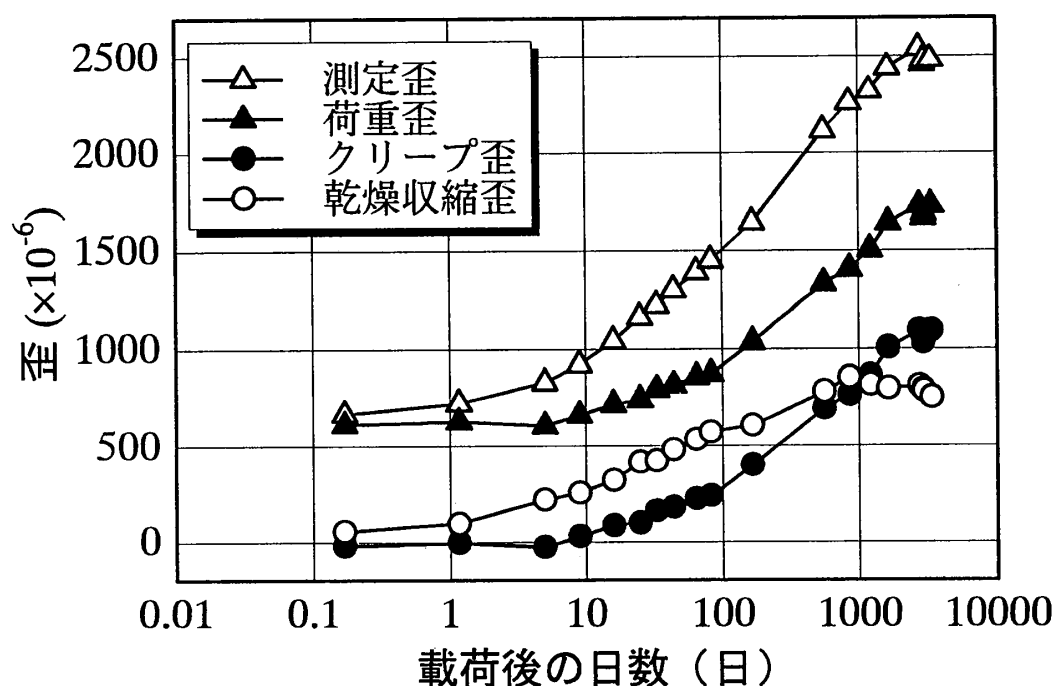


図-3 高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートのクリープ及び乾燥収縮歪の試験結果

よる全歪である。乾燥収縮歪はクリープ試験装置の脇に置いて同時に測定した乾燥収縮測定供試体の歪で、クリープ測定供試体と同じ環境の変化による歪も含んでいる。なお、環境の変化は温度と湿度を調節しているので一定としているが、図を見て気づく程度の変動は避けられなかった。荷重歪は測定歪から乾燥収縮歪を引いたものであり、クリープ歪は荷重歪から弾性歪を引いたものである。

5. 測定結果と予測値との比較

平成8年制定の土木学会コンクリート標準示方書に解説として示されている単位応力当たりのクリープ歪の予測値と比較すべく、クリープ試験の結果を図示すると、図-4および図-5のようになる。

図-4には普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの約4400日までの結果をプロットしているが、未だ収れんする様子を見せず、図中の実線のように一定値への収れんを示している予測式の結果とは異なっている。また、最終測定時の値(108×10^{-6})は予測値(37×10^{-6})を大きく上回っている。参考までに旧土木学会コンクリート標準示方書に解説として示されていたクリープ係数の予測式と比較してみると、約4400日におけるクリープ係数が3.29となり、旧示方書による予測値の2.80に比べて少し大きくなっている。試験結果の方がやや大きいとはいえ、載荷後3年間位は旧予測値と良く合っているので、示方書の新予測式では過少に見積もる結果になるように思われる。

また、図-5の高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの場合も約3400日までの結果が予測値に比べかなり小さな値で推移している。これは普通のコンクリートに比べ細孔径分布の小さい密実なコンクリートに起因するクリープの遅れ現象のように思われる。約3400日での試験値(52×10^{-6})と予測値(53×10^{-6})の値は載荷後数年まではかなり相違しているが、10年位経つと似たような値になっている。ただし、

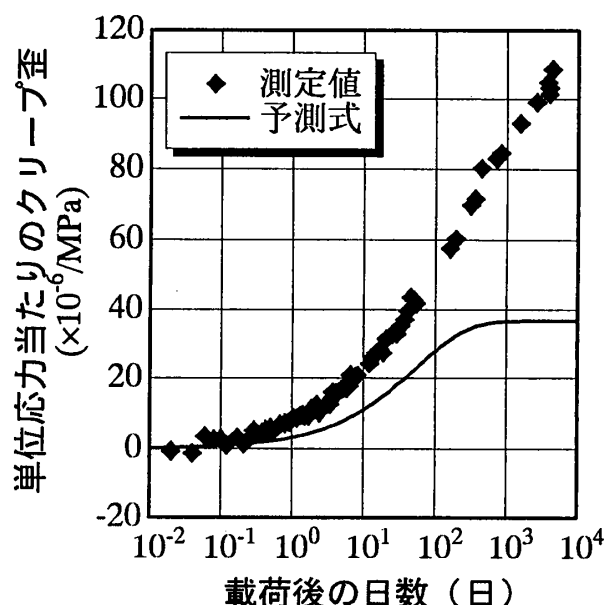


図-4 普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの単位応力当りクリープ歪

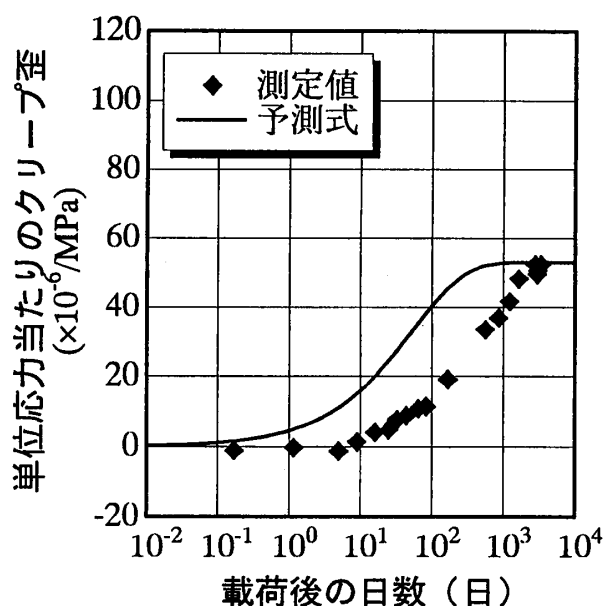


図-5 高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの単位応力当りのクリープ歪

これらの予測式は普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを対象としたもので、体積表面積比が $100\text{mm} \leq V/S \leq 300\text{mm}$ の範囲内に限定されており、本実験のように小さな供試体には直接適用できないが、この場合は $V/S = 25\text{mm}$ として計算した結果である。この場合も参考までに旧土木学会コンクリート標準示方書に解説として示されていたクリープ係数の予測式

と比較してみると、約 3400 日におけるクリープ係数が 1.43 となり、旧示方書による予測値の 2.30 に比べるとかなり小さくなっている。

一方、乾燥収縮歪については、試験結果をそれぞれ図-6 及び図-7 にプロットし、示方書の予測式を実線で示し比較した。湿度の安定を欠いた時期の測定値にばらつきがあるが、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの試験値(513×10^{-6})と予測値(700×10^{-6})も、高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの試験値(755×10^{-6})と予測値(771×10^{-6})も大体合致している。参考までに旧示方書の予測式によりこれらの値を求めてみると、それぞれ 162×10^{-6} と 162×10^{-6} となり、旧示方書ではかなり小さく見積もられていたことがわかる。

6. ま と め

クリープ試験を開始した1985年に示されていた JIS 原案³⁾は未だ実現していないが、これも参照して装置を試作し、温度20℃、湿度60 % の環境（除湿に不備のある恒温恒湿室）で実施した長期の試験結果から次のことが分かった。

(1) 普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートのクリープ試験結果は、土木学会旧コンクリート標準示方書に記されていたクリープ係数予測式とほぼ一致して、新示方書クリープ歪予測値の2倍以上大きな値を示し、12年を経過しても収れんせずに未だ増加傾向にある。

(2) 高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートのクリープは小さく、とりわけ短期における増加が極めて小さい特徴を示した。従って、試験結果は新旧両示方書の予測式とは合致しないが、収れんせずに増加した長期のクリープ歪は示方書の予測値と同等の値に達した。

(3) 乾燥収縮については、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートあるいは高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートのいずれの試験結果も、旧示方書の予測式を大きく上回る値を示し、新示方書の予測式とほぼ一致した値を示した。

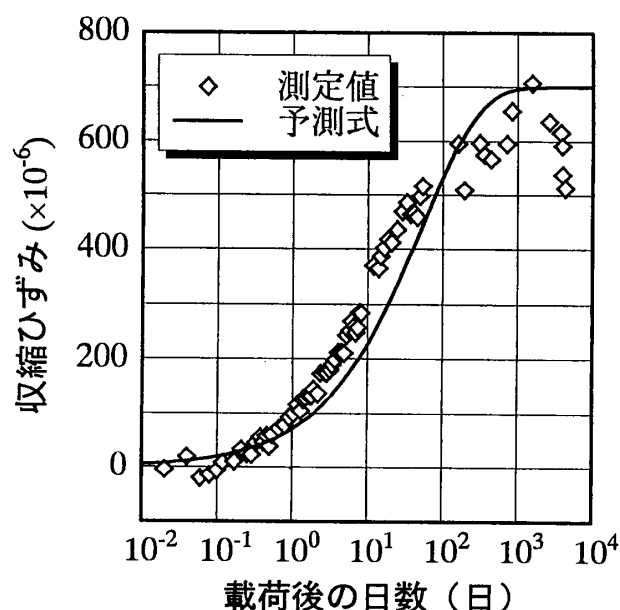


図-6 普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮歪

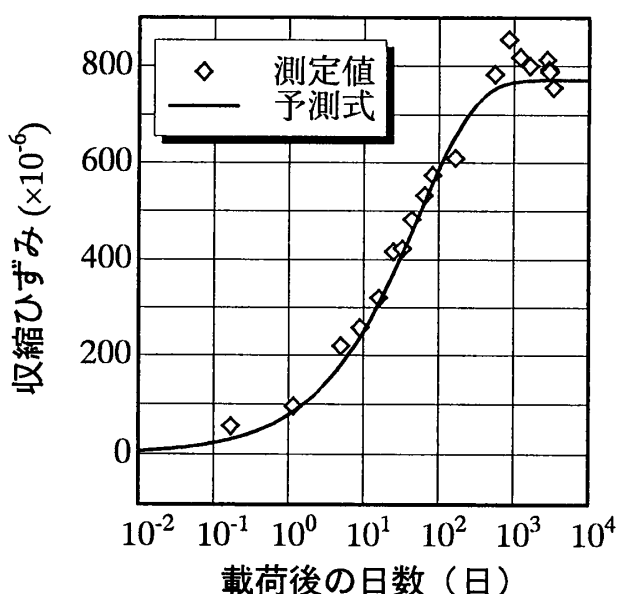


図-7 高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの乾燥収縮歪

参 考 文 献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（平成3年版）設計編，土木学会，pp.24~29，1991.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書（平成8年版）設計編，土木学会，pp.26~33，1996.
- 3) JIS 原案：コンクリートの圧縮クリープ試験方法(案)，コンクリート工学，Vol.23，No.3，pp.55~56，1985.