

若材齢にクリープを促進した PC 梁のプレストレス変化と構造性能に関する研究

埼玉大学大学院 博士 (工学) ○浅本 晋吾
埼玉大学大学院 正会員 博士 (工学) 牧 剛史
首都高速道路(株) 修士 (工学) 加藤 恭介
今野 由香里

Abstract : The authors study the effect of creep promotion by prestressing a prestressed concrete beam at early ages on the inhibition of long-term prestress loss and evaluate the structural performance after the creep promotion. The consistent experimental programs suggest that more progress creep induced by larger prestressing force or elevated temperature at early ages is likely to make the long-term prestress loss smaller. The compressive strength and Young's modulus of concrete after the creep promotion are larger than those of concrete without creep, while the tensile strength and Young's modulus are almost the same or decreased when large sustained stress exceeding elastic range is applied. Since it is found that the shear crack propagation is more progressive when the creep is greatly accelerated at early ages under severe conditions such as at elevated temperature, the appropriate application of the promoted prestressing force to prestressed concrete beam at early ages is indispensable for maintaining the structural performance.

Key words : Creep promotion, Early ages, Prestressed concrete, Prestress loss

1. はじめに

コンクリートのクリープは、金属などの他の工業材料に比べ著しく大きく持続的に発生し、構造物に与える影響が大きいために、数多くの研究がこれまでに報告されている。しかしながら、影響を及ぼす要因が多岐に渡りそれらが複雑に関連するため、任意の条件のもと精度よく長期クリープ挙動を予測できる工学的な手法の開発までには現状至っていない。クリープの正確な予測が工学的に求められている一方で、供用中に大きく発生するクリープ自体を抑制すれば、PC構造物のプレストレス減少の軽減など耐久性の向上につながると考えられる。

クリープに関する既往の知見によれば、プレストレス導入材齢・導入応力の影響を強く受け、温度が高ければ大きくなることが分かっている。これらの知見をもとに、筆者らはクリープの大きい若材齢時にプレストレスを導入し、高温環境下などでクリープをあらかじめ促進することにより、その後の長期クリープを抑制できる可能性を示した²⁾。また、その後の部材の載荷実験では、若材齢時にクリープを促進しても構造応答に与える影響は小さいことが示唆されたが、この点に関してはさらなる詳細な検討が課題とされた。

そこで、本研究では、若材齢にコンクリートに導入される応力の違いがその後のプレストレス減少の抑制に与える効果、さらには、部材の構造性能に与える影響を、クリープ発生後のコンクリートの強度、剛性などの材料特性とともに総合的に検討することを目的とした。また将来的には、若材齢でのクリープ促進はポストテンションのプレキャスト部材など適用部材について検討する必要があるものの、技術発展の可能性の検討、大きなクリープ進行が与える材料特性、構造応答の変化について学術的な検討を行うことも目的にある。

2. 実験概要

2. 1 実験目的

本研究では、PC梁の長期のプレストレス減少抑制に効果的な若材齢でのクリープ促進の検討を目的に、脱型直後の材齢1日の極若材齢時に様々な応力レベル、環境条件でプレストレスをPC梁に導入しクリープを促進させた後、材齢7日で再度プレストレスを導入し、その後のプレストレス減少を比較した。また、こうした極若材齢のクリープ促進が、コンクリート自体の強度、剛性といった材料特性、さらには、構造部材の変形能力、ひび割れ発生荷重、ひび割れ進展、終局耐力といった構造性能に与える影響について把握することを目的とした。

2. 2 梁試験体概要

本実験で用いたコンクリートの示方配合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材には砂岩碎石を使用し、細骨材には川砂を使用した。限られた試験期間でクリープ促進の影響をより明確に検討することを目的に、単位水量を通常よりも高く設定しクリープの大きいペースト部分を増やした。設計圧縮強度は45MPaであり、水セメント比は40%とした。本実験で作製した梁の諸元を図-1に示す。クリープを促進したPC梁のせん断耐力に対する影響を検討するため、土木学会のコンクリート標準示方書³⁾に従い、曲げ耐力がせん断耐力の2.5倍程度で斜め引張破壊先行の梁を設計した。梁寸法は100 x 200 x 1500 mmであり、両側のせん断スパン内のスターラップを排除し、等曲げモーメント区間は300 mmで、a/dは3.5である。PC鋼棒は、降伏強度1220 N/mm²、ヤング率200 kN/mm²、直径13mmのものを用いた。圧縮、引張の補助鉄筋は、降伏強度351 N/mm²、ヤング率200 kN/mm²のD6鉄筋を使用した。

2. 3 クリープ促進方法

若材齢のクリープ促進については、表-2に示すように、計6ケースのプレストレス導入条件について検討を行った。載荷までプレストレスを導入しないリファレンス試験体 (Case 1) と、コンクリート全断面に導入される応力が、材齢1日の圧縮強度に対する応力の比 (以下、応力強度比) で0%、20%、30%、40%と弾性域を大きく超えない範囲でプレストレスを導入した4ケースでプレストレス導入応力の影響を検討した。さらには、Case 6では、クリープを著しく促進させたときの構造性能に与える影響把握を目的に、材齢1日に応力強度比20%でプレストレスを導入した後、電気カーペットを巻き、周辺温度約45℃の高温に保ち、材齢7日までクリープを促進した。材齢7日以降については、Case 1以外のいずれの梁も材齢7日時点の応力強度比20%になるようプレストレスを導入した。また、Case 1のリファレンス試験体を用いて梁の乾燥収縮の計測も行った。クリープ、乾燥収縮の計測期間は約4カ月で、いずれの梁も20±1℃、湿度60±20%の恒温室内で計測を行った。計測間隔は1日毎である。なお、載荷前にプレストレスの再導入があるため、グラウトは注入していない。

2. 4 圧縮および引張強度試験

若材齢でのクリープの促進がコンクリートの材料特性に与える影響を検討するため、φ100 mm x 200 mmの円柱供試体に持続応力を与え、クリープさせた後の圧縮・引張強度について検討を行った。梁試験体と同様に、打設後1日で脱型し、20±1℃、湿度60±20%の恒温室内に暴露し、持続応力は、材齢1、7

表-1 コンクリート配合 (kg/m³)

水	セメント	細骨材	粗骨材	AE剤
200	500	605	873	0.05

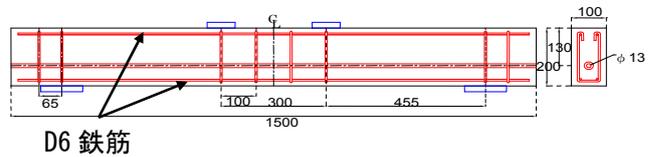


図-1 PC 梁諸元 (単位 : mm)

表-2 各梁のプレストレス導入材齢と導入したプレストレスの応力強度比

	材齢 1 日	材齢 7 日
Case 1	0%	0%
Case 2	0%	20%
Case 3	20%	20%
Case 4	30%	20%
Case 5	40%	20%
Case 6	20% (45°C 環境)	20%

日に導入し、それぞれ材齢1, 7日の応力強度比で決定した。持続応力の履歴は3種類で、材齢1日の応力強度比20%, 7日で20%の応力を与えた供試体 (以下, 20%-20%供試体), 材齢1日で応力強度比30%, 7日で20%の応力を与えた供試体 (30%-20%供試体), さらには、弾性域をわずかに超える応力を与えた場合の検討を行うため、材齢1日で応力強度比40%, 7日で40%の応力を与えた供試体 (40%-40%供試体) でも検討した。約3ヶ月持続応力を導入し続けた後、除荷し、圧縮強度試験, 直接引張強度試験を実施した。比較のため、持続応力を導入せず、材齢1日より同様の期間乾燥環境に暴露した供試体 (0%-0%供試体) についても同様の強度試験を行った。圧縮強度試験はJIS A1108に従って行い、直接引張強度試験については、図-2に示すような偏心を除去するための治具を用い、コンクリートにアクリル系接着剤を用いて取り付け十分に強度が発現した後 (約1日) に、約0.03MPa/secの速度で載荷を行った。圧縮強度試験, 直接引張強度試験ともにそれぞれについて3体ずつ試験を行った。

2. 5 PC梁載荷試験

若材齢でのクリープの促進がPC梁の構造性能に与える影響を検討するため、2.3で示した異なるプレストレス導入履歴を与えた各梁の載荷試験を行った。載荷前にプレストレスを一旦徐荷し、同じプレストレス力をすべての梁 (Case1~Case6) に導入した後、グラウトを注入した。グラウト注入から2日後に4点曲げ載荷を行った。初期のひび割れ発生については目視で確認した。除荷後再導入したプレストレスは、いずれも35kNである。載荷時の材齢はいずれの梁も約4か月である。

3. 実験結果および考察

3. 1 若材齢クリープ促進によるプレストレス減少抑制効果

材齢1日から7日までのPC梁のクリープひずみ, クリープ係数の経時変化を図-3, 図-4に示す。クリープひずみは、引張縁のひずみの経時変化より弾性ひずみと、プレストレスを



図-2 直接引張強度試験

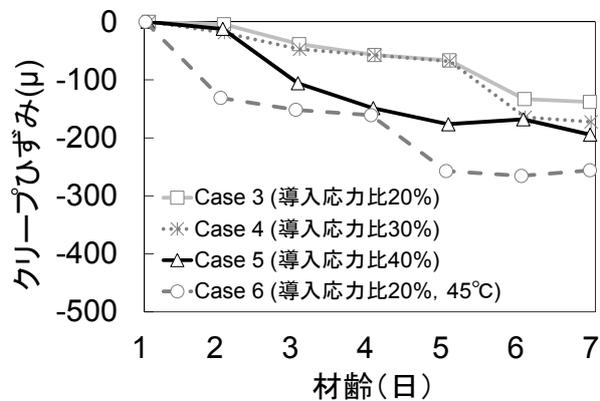


図-3 材齢7日までのクリープひずみの経時変化

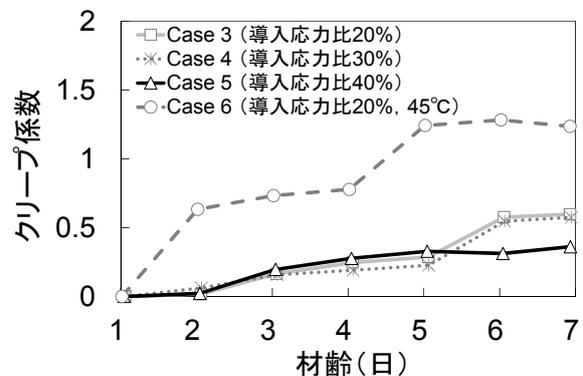


図-4 材齢7日までのクリープ係数の経時変化

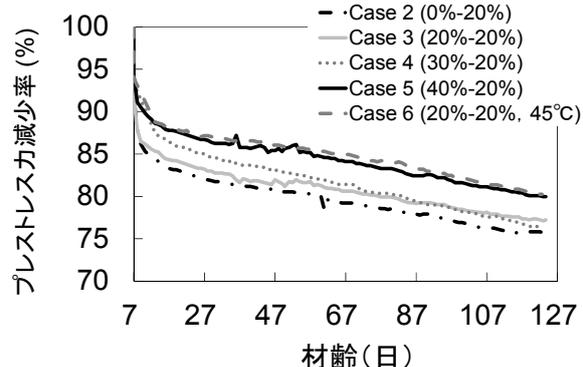


図-5 材齢7日後のプレストレス力減少率

導入しない梁から得られた収縮ひずみを差し引くことで求めた。クリープ係数は、プレストレス導入時の弾性ひずみでクリープひずみを除したものである。

図-3に示されるように、いずれのシリーズも、材齢1日で導入した応力が大きいほど、クリープひずみは大きくなった。また、45℃の高温に暴露した梁は、Case 4, 5より初期の導入応力が小さいにもかかわらず、クリープひずみが大きくなった。既往の知見¹⁾にあるように、導入した応力が大きいほど、温度が高いほど、初期にクリープが促進された。

応力レベルの違いを弾性ひずみで正規化するクリープ係数で比較すると、既往の研究で報告されているように⁴⁾、材齢1日から7日において高温環境でクリープを促進させた梁を除けば、導入応力レベルでクリープ係数に変化はさほど見られない(図-4)。本実験では、導入応力が小さいため、曲げが作用する梁部材においても、コンクリートの弾性ひずみとクリープひずみの間に概ね線形性が成り立っており、クリープに非線形をもたらす大きなひび割れは発生していないと考えられる。また、高温環境下での材齢1日から7日までクリープを促進した場合のクリープ係数は他のものと比較しても非常に大きな値を示している。高温環境下におけるクリープの進行が著しいことは既往の研究からも周知の事実であり、本検討においても同様の傾向が得られた。

図-5に、材齢7日以降のプレストレスの減少率を示す。各線の違いを分かりやすくするため、図-5ではマーカーを付記していないが、上記のように計測は1日毎である。若材齢時にクリープを促進させた梁は、その後のクリープが材齢7日で初めてプレストレスを導入した梁(Case 2)に比べ小さくなるため、プレストレスの減少率は小さい。Case 6については、クリープ促進中の乾燥条件が他の梁と異なり、材齢7日で異なる水分状態を持ち以後の乾燥クリープにも影響すると考えられるため単純比較はできないが、若材齢時に、大きなプレストレス、もしくは高温でプレストレスを導入し、クリープひずみを促進させた梁の方がプレストレスの減少率は小さくなる傾向にある。以上のことから、若材齢でクリープを促進すればするほど、その後のクリープの進展を減じることができ、PC梁のプレストレス減少を抑制する効果があることが分かった。

3. 2 クリープ促進後の材料性能評価

表-3、表-4に円柱供試体の圧縮強度試験における圧縮強度とヤング係数、直接引張強度試験における引張強度とヤング率を示す。圧縮強度、ヤング率については、初期の導入応力によって違いはあるものの、既往の研究⁵⁾で示されているように、クリープの履歴が全くない0%-0%供試体に比べ、ともに10%程度の増加が確認された。この理由としては、クリープの進行によって微細空隙中の水分が滲出し、その分空隙が緻密化したことなどが可能性として挙げられる。今後、水銀圧入法などによる空隙構造の計測により検証する必要があると言える。

引張強度に関しては、導入した応力が弾性域内である20%-20%供試体、30%-20%供試体では、0%-0%供試体との強度・ヤング率の相違は微量であり、クリープの促進が引張強度・剛性へ与える影響は明確には確認できなかった。一方で、若材齢時に40%という弾性域を超え得る応力を持続的に加えた40%-40%供試体は、クリープ履歴のない0%-0%供試体に比べ、引張強度が低下した。応力の高い極端なクリープ促進は引張強度を低下させる可能性があり、この理由としては、持続载荷中に内部の組織にマイクロクラックといった損傷を生じさせたことが可能性として挙げられる。こうした損傷はわずかなもの

表-3 圧縮強度試験結果

供試体名	圧縮強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)
0%-0%供試体	37.70	27.22
20%-20%供試体	40.62	29.38
30%-20%供試体	44.07	30.77
40%-40%供試体	39.51	29.19

表-4 直接引張強度試験結果

供試体名	引張強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)
0%-0%供試体	3.03	25.6
20%-20%供試体	3.01	25.01
30%-20%供試体	3.10	26.83
40%-40%供試体	2.57	25.42

表-5 PC梁の載荷実験結果

	曲げひび割れ発生荷重 (kN)	終局荷重 (kN)	破壊形式
Case 1	30.2	79.7	曲げ圧縮破壊
Case 2	25	89.0	
Case 3	25.3	88.0	
Case 4	20	86.5	
Case 5	22	86.0	
Case 6	20-22	80.8	せん断圧縮破壊

で、圧縮強度試験ではその影響は見られなかったものの、引張試験ではその影響が顕著に現れたと考えられ、他の要因も含め、応力レベルが高いときのクリープ促進がもたらす影響について今後詳細に検討する必要があると認識している。

3. 3 梁の載荷試験結果

表-5に、PC梁載荷試験における曲げひび割れ発生荷重、終局荷重、破壊形式の実験結果を示す。本研究におけるPC梁は、示方書をもとに、曲げ耐力はせん断耐力の2.5倍程度となるように設計したものの、実際のせん断耐力が設計値よりも著しく上昇したため、Case 6のみせん断圧縮破壊をし、それ以外の梁はすべて載荷板間のコンクリートが圧壊する曲げ圧縮破壊で破壊に至った。設計とは異なる破壊形式になった理由としては、既往の研究⁶⁾でも指摘されているように、プレストレスの導入がせん断ひび割れ発生荷重を増加させる傾向にあるためだと考えられる。プレストレスによる軸方向の圧縮力がせん断耐力を増加させ、曲げ圧縮破壊が先行し、設計とは異なる破壊形式になったと推察される。

図-6に各梁の荷重—たわみ関係を示す。荷重とたわみについては、若材齢でクリープを促進していないCase 2の梁が若干ひび割れ後の剛性、最大荷重が大きいものの、各梁でさほどの相違はみられない。終局荷重については、表-5に示したように、載荷前にプレストレスを導入せず全くクリープをさせていないCase 1に対し、長期の持続荷重を経験したCase 2~5の梁は10%程度増加する傾向にあるといえる。

曲げ圧縮破壊の終局曲げ荷重はコンクリートの圧縮強度に比例するため、クリープによる圧縮強度の増大によって終局荷重が増加したと考えられる。また、若材齢時にクリープを促進したCase 3~5と、クリープを若材齢で促進せず材齢7日でプレストレスを導入したCase 2と比較すると、若材齢にクリープを促進した梁はその際の導入応力の増加に伴い、終局荷重は低下したものの、実験誤差レベルのわずかなものであり、若材齢時のクリープ促進は曲げ耐力に影響しないといえる。

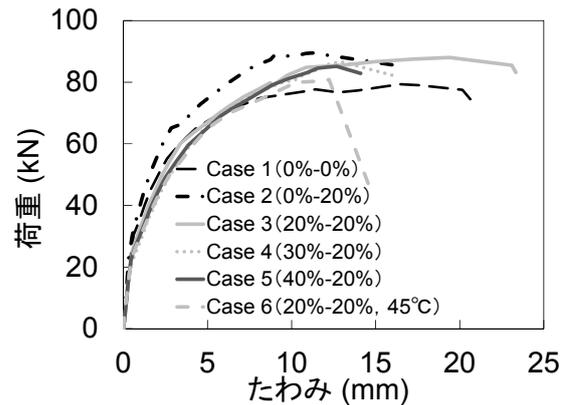


図-6 載荷試験における荷重—たわみ関係

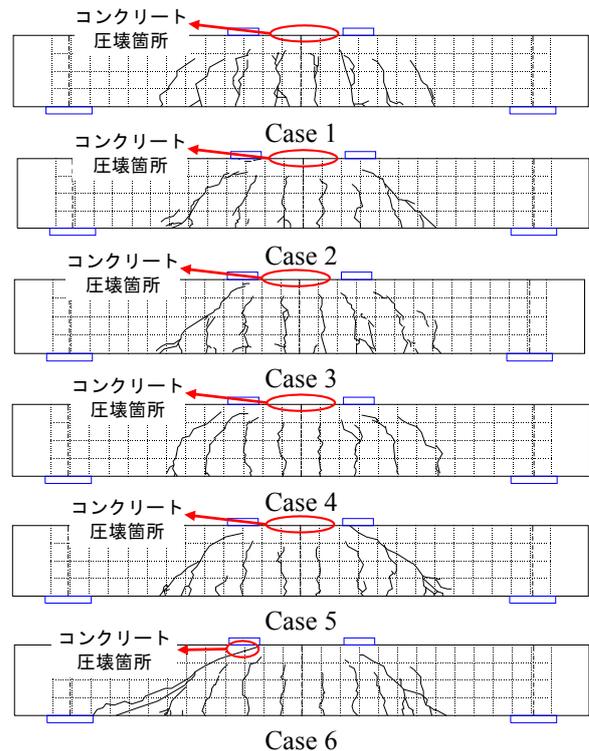


図-7 終局時のひび割れ状況

図-7に、Case 1～6の各梁の終局時のひび割れ発生状況、コンクリートの圧壊箇所を示す。若材齢時にクリープの促進のないCase 1, 2の梁に比べ、若材齢時にクリープを促進した梁は、同一荷重下においてせん断スパン内に発生した曲げせん断ひび割れの進展が早く、終局時にもわずかな相違ではあるが、梁上部までせん断ひび割れが伸展していることが確認された。高温環境下で大きくクリープを促進したCase 6では、このせん断ひび割れが伸展し、載荷板下でコンクリートが圧壊して破壊に至り、圧壊と同時に支点と載荷板を結ぶひび割れが入ったため、せん断圧縮破壊と判断した。引張強度が低下したCase 5でも、図-7に示すように、せん断ひび割れが載荷板のすぐ下まで伸展している。したがって、若材齢における過度なクリープの促進はひび割れ性状を変化させ、せん断耐力を低下させる可能性があり、適切な促進が必要と言える。

4. 結論

本研究では、PC 梁の若材齢にプレストレスを導入し、圧縮クリープを促進することで、その後のプレストレス減少の抑制効果、またクリープ促進がコンクリートの材料特性、梁の構造性能に対する影響について検討した。以下、本研究で得られた知見について列挙する。

- (1) 若材齢に PC 梁に導入するプレストレス力レベルをコンクリートの応力強度比 0%～40%の間で変化させ、その後のプレストレス減少の抑制について検討した結果、導入する応力が高いほど若材齢時のクリープが促進され、その後のプレストレス減少も小さいことが分かった。一方で、促進したクリープひずみとプレストレスの減少抑制量の定量的な関係は明確に示されていないため、今後効果的なクリープ促進応力の検討が必要と言える。
- (2) 若材齢時に圧縮クリープを促進したコンクリートは、クリープの履歴のないコンクリートに比べ、圧縮強度、圧縮ヤング率が増加することが分かった。一方で、引張強度、引張ヤング率では、クリープ促進が与える影響は、明確に確認できなかった。
- (3) 若材齢時にクリープを促進した PC 梁の曲げひび割れ発生荷重、終局荷重、荷重－たわみ関係は、クリープ促進履歴のない梁とさほど相違は見られなかった。
- (4) 高温環境下で若材齢クリープを大きく促進した梁では、曲げ圧縮破壊に至った他の梁とは異なり、せん断圧縮破壊で破壊した。若材齢における極端なクリープの促進はせん断耐力を低下させる可能性があり、適切な促進が必要ということが分かった。

謝辞

本研究は財団法人前田記念工学振興財団の平成20年度研究助成、および埼玉大学平成21年度総合研究機構プロジェクト研究費経費（若手展開研究（B））の助成を受けて行った。ここに記して、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) A.M.Neville: Creep of Concrete, Amsterdam: North-Holland Publishing Co., 1970
- 2) 加藤恭介, 浅本晋吾, 牧剛史, 加藤智貴: 若材齢にクリープを促進させた PC 梁のプレストレス減少抑制と構造性能評価, 土木学会第 64 回年次講演概要集 V, p449-p450, 2009
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書（構造性能照査編）p34-p36, 2002
- 4) 入矢桂史郎, 平本昌生, 服部達也, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートの圧縮クリープに関する研究, 土木学会論文集, No.599, V-40, pp.1-14, 1998
- 5) 松浦恒久, 角一行: 高強度鉄筋コンクリートのクリープおよび乾燥収縮特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.609-614, 1994
- 6) 三方康弘, 井上晋, 小林和夫, 仁枝保: PCはり部材のせん断耐力に及ぼすプレストレスの効果, 土木学会論文集, No.669, V-50, pp.149-159, 2001