

若材齢時にクリープを促進したプレストレストコンクリート梁の プレストレス減少と構造性能に関する研究

Investigation into prestress loss and structural performance of prestressed concrete beam with creep promotion at early ages

浅本晋吾*, 牧剛史*

Shingo ASAMOTO and Takeshi MAKI

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. The flexural behavior of the prestressed concrete beam with the creep promotion is not different from that of the beam without the creep at early ages, although the maximum flexural crack width is slightly increased due to the creep promotion. Since it is found that the shear crack propagation is more progressive when the creep is greatly advanced under severe conditions such as at elevated temperature, the appropriate application of the prestressing force to prestressed concrete beam at early ages is indispensable for maintaining the structural performance.

Keywords: Creep, Early ages, Prestressed concrete, Prestress loss, Structural response

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、構造物に与える影響が大きいため、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、任意の条件のもと正確にクリープを予

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増加につながると思われる。

クリープに関する既往の研究¹⁾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

*埼玉大学 工学部 建設工学科

Department of Civil and Environmental Engineering,
Faculty of Engineering, Saitama University, 255
Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama, Saitama, 338-8570,
Japan

(原稿受付日：平成 23 年 6 月 30 日)

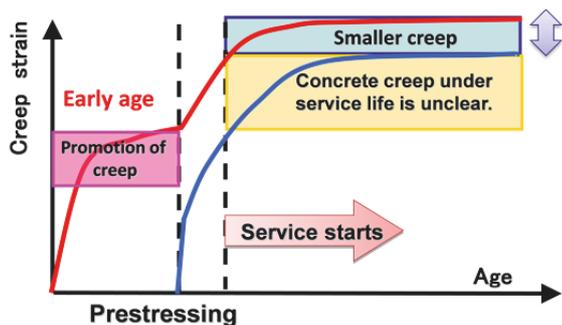


Fig.1 schematic image of creep inhibition

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。

2.実験目的

2.1 若材齢クリープ促進試験

若材齢時に持続荷重を与えると、クリープが大きく進行することが分かっている。クリープの終局値が一定値に収束すると仮定した場合、クリープの大きい若材齢時に促進することによって、その後の長期的なクリープを減じることができると推測した (Fig.1)。そこで、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することで、材齢 7 日以後のクリープおよびプレストレス減少の抑制を試みた。

2.2 材料性能評価及び構造性能評価

既往の研究によれば、コンクリートの圧縮強度に対する応力の比が 50%以下であれば、若材齢であってもクリープひずみと応力が導入された時点のコンクリートひずみには線形関係が成り立つということ³⁾、また若材齢にクリープしたコンクリートの圧縮強度、弾性

係数が増加する⁴⁾ということが示されている。しかしながら、圧縮クリープを経験したコンクリートの引張性状や若材齢にクリープを促進した部材の構造性能に関する報告は少ない。そこで、本研究では極若材齢にプレストレスを導入することで、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、終局耐力といった性能に与える影響について把握することを目的とした。

3.実験方法

3.1 試験体概要

本実験で用いたコンクリートの示方配合を Table 1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材には砂岩を使用し、細骨材には川砂を使用した。また、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。水、粗骨材、細骨材について環境温度が $20 \pm 1^\circ\text{C}$ に保たれた恒温室内で管理し、打設時期による練り上がり温度の違いを排除した。設計圧縮強度は 45MPa であり、水セメント比は 40%とした。本実験に作製した梁の諸元を Fig.2, Fig.3 に示す。クリープを促進した梁の曲げ・せん断耐力に対する影響を検討するため、破壊形式の異なる 2 種類の梁を設計した。A シリーズを曲げ破壊先行梁とし、B シリーズをせん断破壊先行梁とした。両試験体ともに梁寸法は 100 x 200 x 1500 mm である。A シリーズについてはせん断スパン内にスターラップを配筋し、曲げひび割れを観察することを目的に等曲げモーメント区間を 400 mm とした。ひび割れ幅については、等曲げモーメント区間において、スターラップ固定用の引張鉄筋である D6 の位置で、マイクロスコプを用いて、適宜曲げひび割れ幅を計測した。B シリーズについては、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。補助鉄筋は、

Table 1 Mix proportion (kg/m³)

Design compressive strength	W/C	Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	AE agent
45 (MPa)	0.4	200	500	605	873	0.05

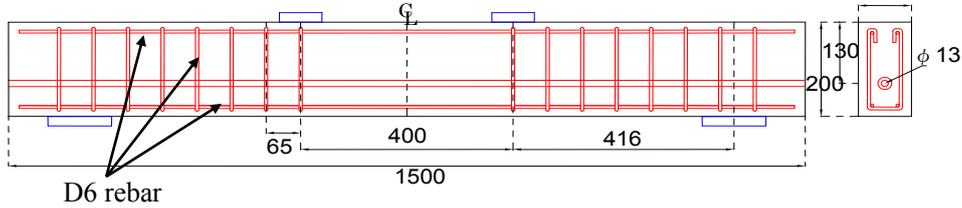


Fig.2 Beam of A series (Designed failure mode: Flexural tension failure, unit: mm)

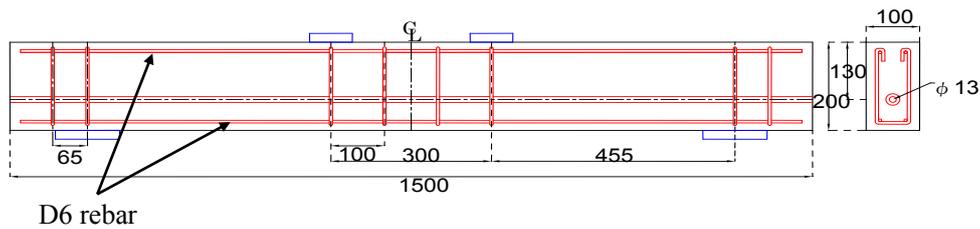


Fig.2 Beam of B series (Designed failure mode: Diagonal tension failure, unit: mm)

降伏強度 351 N/mm²，ヤング率 200 kN/mm²の D6 鉄筋を使用した。

3.2 若材齢クリープ促進試験

A シリーズでは，Table 2 に示す計 4 ケースのプレストレス導入条件で検討を行った。プレストレスを導入しないリファレンス試験体 (Case 1) に加え，打設後 1 日で脱型し，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で 0%，20%，40% になる 3 ケースで，プレストレスを導入した。その後材齢 7 日でプレストレスを再導入した。その際の導入応力はすべての試験体について材齢 7 日時点の圧縮強度に対して応力の比で 20%になるようプレストレスを導入した。

B シリーズに関しては，Table 3 に示す計 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。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で 0%，20%，30%，40%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影響の把握を目的に，

Table 2 Ages of prestressing and ratio of prestress to compressive strength of concrete (A series)

Age	1 day	7 days
Case 1	0%	0%
Case 2	0%	20%
Case 3	20%	20%
Case 4	30%	20%

Table 3 Ages of prestressing and ratio of prestress to compressive strength of concrete (B series)

Age	1 day	7 days
Case 1	0%	0%
Case 2	0%	20%
Case 3	20%	20%
Case 4	30%	20%
Case 5	40%	20%
Case 6	20% (Temperature 45°C)	20%

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°C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、いずれの梁も A シリーズと同様に材齢 7 日時点の圧縮強度に対して応力の比で 20%になるようプレストレスを導入した。

曲げ・せん断試験体ともに乾燥収縮測定にはリファレンス試験体を用いてそれぞれ計測を行った。計測期間は約 4 カ月で、20±1°C、湿度 60±20%の恒温室にて乾燥させた。なお、プレストレスの再導入があるため、この期間、いずれの梁もグラウトは注入していない。

計測項目は、コンクリートひずみ、PC 鋼材ひずみである。コンクリートひずみの測定にはすべての試験体について、せん断スパン内の圧縮縁・引張縁、曲げスパン内の曲げ・せん断スパン中央の圧縮縁・引張縁で計測を行った。

3.3 材料性能評価試験

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°C、湿度 60±20%の恒温室に暴露し、持続応力は、材齢 1、7 日に導入し、それぞれ材齢 1、7 日の圧縮強度に対する比で決定した。持続応力の履歴は 3 種類で、材齢 1 日で強度の 20%、7 日で 20%の応力を与えた供試体（以下、20%-20% specimen）、材齢 1 日で強度の 30%、7 日で 20%の応力を与えた供試体（30%-20% specimen）、さらには、弾性域を超えるほどの応力を与えた場合の検討を行うため、材齢 1 日で強度の 40%、7 日で 40%の応力を与えた供試体（40%-40% specimen）でも検討した。その後、約 3 ヶ月応力を導入し続けた後、除荷し、圧縮試験、直接引張試験を実施した。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% specimen）についても同様の強度試験を行った。した。圧縮試験は JIS A1108 に従って行い、直



Fig.3 Direct tension test

接引張試験については、Fig.3 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に、約 0.03MPa/sec の速度で载荷を行った。圧縮試験、直接引張試験ともにそれぞれについて 3 体ずつ試験を行った。

3.4 構造性能評価試験

3.2 節で示した種々のプレストレス導入履歴を与えた各梁の载荷試験を行った。いずれのシリーズも载荷前にプレストレスを一旦徐荷し、どの梁も同じプレストレス力を導入した後、グラウトを注入した。グラウト注入から 2 日後に 4 点曲げ载荷を行った。初期のひび割れ発生は目視で確認した。A シリーズ、B シリーズともに 5kN 毎に測定を行い、ひび割れの伸展を記録した。除荷後再導入したプレストレスは A シリーズで 60kN、B シリーズで 35kN である。計測項目は载荷荷重、試験体中央変位、PC 鋼材ひずみ、圧縮・引張縁コンクリートひずみである。

4. 実験結果及び考察

4.1 若材齢クリープ促進による長期クリープ抑制効果

材齢 1 日から 7 日までの A シリーズ、および B シリーズのクリープひずみ、クリープ係数の経時変化を Fig.4, Fig.5 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。

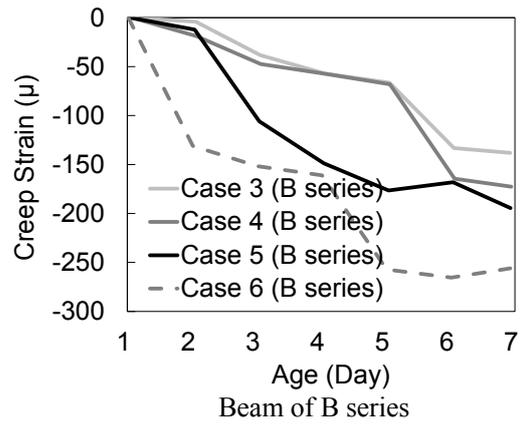
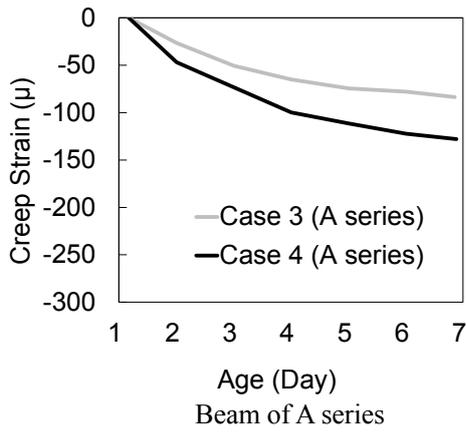


Fig.4 Variation of creep strain (From 1 to 7 days of age)

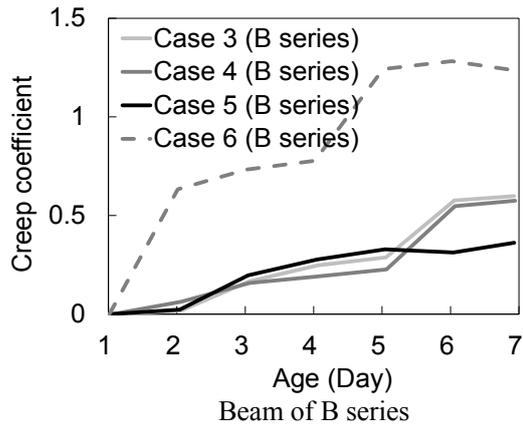
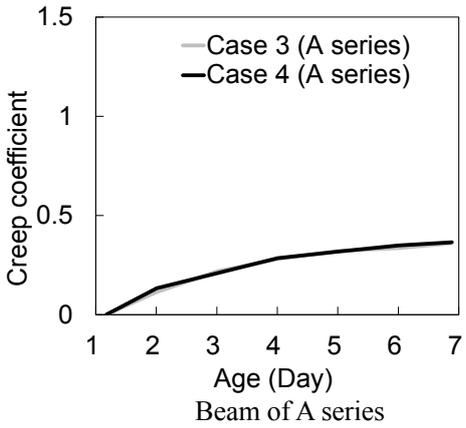


Fig.5 Variation of creep coefficient (From 1 to 7 days of age)

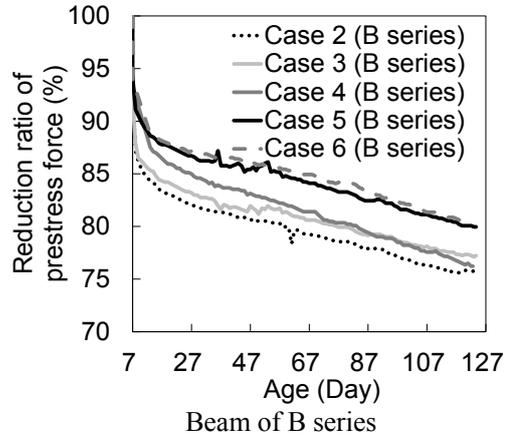
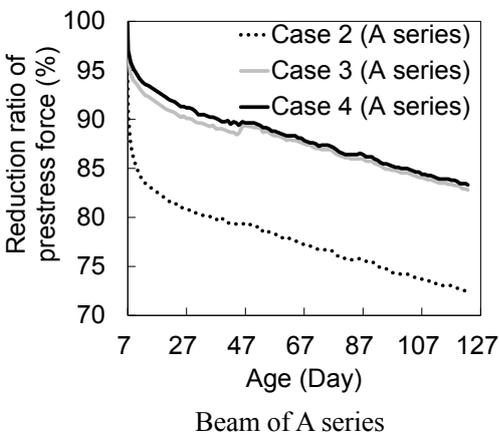


Fig.6 Variation of reduction ratio of prestressing force (After 7 days of age)

Fig.5 に示すように、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、クリープひずみが大きくなった。また、45°C の高温に暴露した梁は、Case 3, 4 より初期の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。既往の研究¹⁾で指摘されているように、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

プ係数と比較すると、既往の研究で報告されているように³⁾、材齢 1 日から 7 日において A シリーズ、B シリーズともに、高温を除けば、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。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、B シリーズの高温環境下での材齢 1 日から 7 日までの実験結果では、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は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。

Fig.6 に、材齢 7 日以降のプレストレスの減少率を示す。A, B シリーズともに、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 1) に比べ小さくなるため、プレストレスの減少率は小さい。程度の差はあるものの、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り、弾性域の範囲内でクリープを大きく促進させた方が以後のクリープ抑制効果は大きいことが示された。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、その後のクリープひずみ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。

4.2 クリープ促進後の材料性能評価

Table 4 に円柱供試体の圧縮試験における圧縮強度とヤング係数、直接引張試験における引張強度と静弾性係数を示す。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⁴⁾で示されているように、クリープの履歴が全くない 0%-0% specimen に比べ、ともに 10%程度の増加が確認

された。これ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が原因として考えられる。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% specimen, 30%-20% specimen では、0%-0% specimen との強度・剛性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% specimen は、クリープ履歴のない 0%-0% specimen に比べ、引張強度、引張ヤング率が低下しており、持続载荷中に内部の組織にマイクロクラックなどの損傷が生じたと推察される。こうした損傷はわずかなもので、圧縮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る。

4.3 A シリーズ (曲げ先行梁) 構造性能評価

Table 5 に、A シリーズの梁の曲げひび割れ発生荷重、終局耐力、破壊形式の実験結果を示す。試験前の設計では、土木学会の示方書⁵⁾に従い、曲げ引張破壊で破壊に至るように設計を行ったが、結果的にはいずれも曲げ圧縮破壊に至った。この理由としては、PC 鋼材が丸鋼であり付着が十分でなかったこと、クリープによる付着応力が緩和されたことなどにより、PC 鋼材に引張応力が十分伝達されず、等曲げ区間内にひび割れが進展し易い状態となり、このひび割れの進展により圧縮部のコンクリートの有効断面が減少し、PC 鋼材の降伏以前にコンクリートが圧壊したことなどが考えられる。

各試験体間で曲げひび割れ発生荷重、終局荷重に大きな相違はみられなかった。各ケース間にも明確な相違はなく、本実験の範囲内では、部材の曲げ性状に対してクリープが曲げひび割れ発生荷重及び終局耐力に与える影響は小さいといえる。本実験では、すべての破壊形式が曲げ圧縮破壊になったため、梁の終局耐力はコンクリートの圧縮強度に依存し、クリープがもたらす圧縮強度の変化が終局耐力に影響することとなる。4.2 節の材料実験によれば、コンクリートに圧縮クリープを施すことで、圧縮強度が増加することが示された

Table 4 Mechanical properties of concrete

Specimens	Compressive strength (MPa)	Compressive Young's modulus (GPa)
0%-0%	37.70	27.22
20%-20%	40.62	29.38
30%-20%	44.07	30.77
40%-40%	39.51	29.19

Specimens	Tensile strength (MPa)	Tensile Young's modulus (GPa)
0%-0%	3.03	25.6
20%-20%	3.01	25.01
30%-20%	3.10	26.83
40%-40%	2.57	25.42

Table 5 Experimental results (A series)

	Bending cracking load (kN)	Maximum load (kN)	Failure pattern
Case 1	38-40	94.67	Flexural compression failure
Case 2	36-38	96.34	
Case 3	36-38	91.67	
Case 4	34-36	91.84	

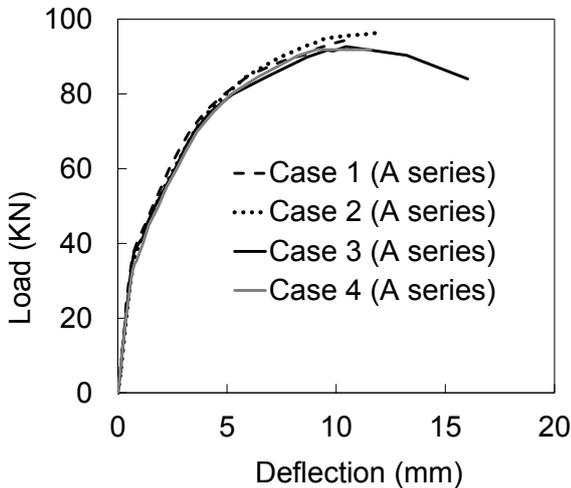


Fig.7 Load-deflection relationship (A series)

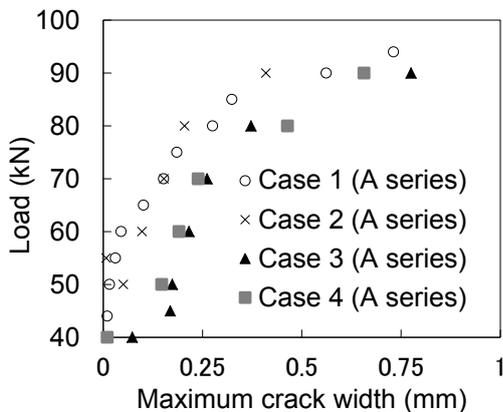


Fig.8 Relationship between load and maximum crack width

が、載荷前にクリープさせていない Case 1 の梁に比べ、Case 2 の終局耐力は増加したものの、Case 3, 4 の梁では、終局耐力は低下した。クリープによる圧縮強度の増大はさほど大きいものではなく、実験誤差も考慮に入れると、材料実験で確認されたクリープによるわずかな圧縮強度の増加程度では、曲げ圧縮破壊の終局耐力を大きく増加させるまでには至らないと推察される。一方で、設計通り曲げ引張破壊に至ったとしても、梁の終局耐力は PC 鋼材の降伏強度に依存するため、ク

リープが終局耐力に与える影響は少ないと予想される。以上のことから、クリープの有無が曲げ終局耐力に与える影響は小さいと言える。

また、Fig.7 に示すように、ひび割れ発生以前、以後に曲げ剛性に大きな相違は見られず、クリープ促進が荷重—たわみに与える影響も小さいと考えられる。しかしながら、Fig.8 に示すように、若材齢でのクリープ促進を施さなかった Case 1, 2 の梁に比べ、クリープを促進した Case 3, 4 の梁の方が等曲げモーメント区間内の最大ひび割れ幅は大きくなった。これは、クリープの進展によって、細い鉄筋ではあるが、引張鉄筋の D6 とコンクリートの付着応力が緩和したためであると推測している。より詳細に現象を把握するためにも PRC 梁などで今後検討を行う予定である。

4.4 B シリーズ (せん断破壊先行梁) 構造性能評価

Table 6 に、B シリーズの曲げひび割れ発生荷重、終局耐力、破壊形式の実験結果を示す。B シリーズでは、土木学会の示方書⁵⁾に従い、斜め引張破壊になるように設計したものの、Case 6 のみせん断圧縮破壊でそれ以外の梁はすべて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てしまい、設計とは異なる破壊形式になったと推察される。

Table 6 に示されるように、プレストレスを載荷前に導入していない Case 1 の終局荷重に対し、長期の恒常載荷を経験した Case 2~5 の梁の終局荷重は 10%程度増加する傾向にあるといえる。A シリーズとは異なり、

Table 6 Experimental results (B series)

	Bending cracking load (kN)	Maximum load (kN)	Failure pattern
Case 1	30.2	79.7	Flexural compression failure
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	Shear compression failure

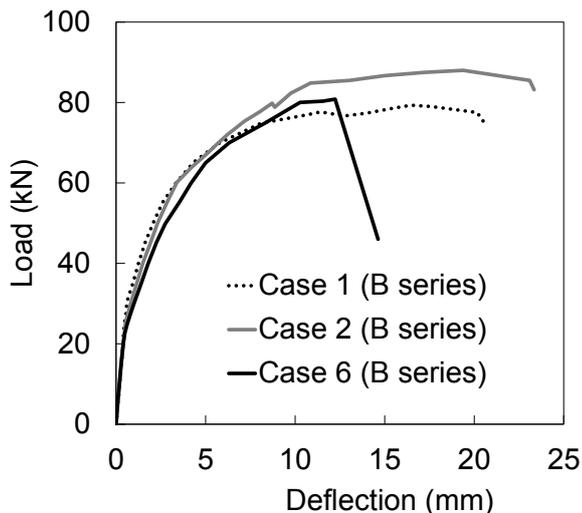


Fig.9 Load-deflection relationship (B series)

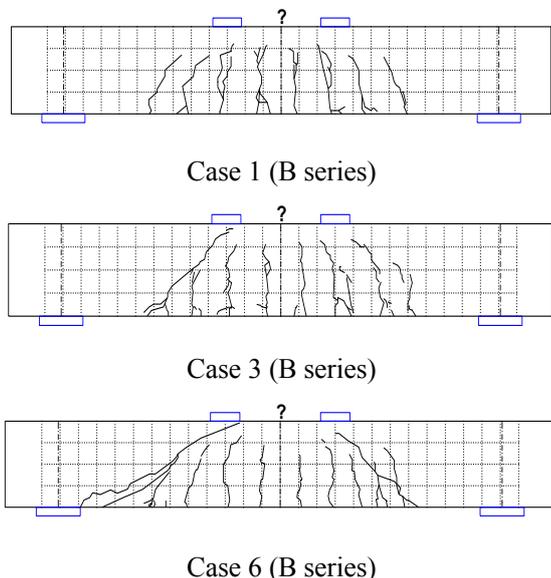


Fig.10 Crack distribution at failure

クリープによるコンクリートの圧縮強度の増大が曲げ圧縮破壊の終局耐力を増大させる傾向が現れたと言える。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、終局耐力は低下したものの、実験誤差レベルのわずかなものであり、A シリーズと同様、若材齢時のクリープ促進は曲げ終局耐力に影響しないといえる。

また Fig.9 及び、Fig.10 に、Case 1, 3, 6 の荷重-たわみ関係、ひび割れ性状図を示す。ひび割れの進展状況から、若材齢時にクリープを促進した Case 3, 6 の梁では、せん断ひび割れが発生、伸展していることが確認された (Case 4, 5 も同様であった)。若材齢にクリープを進展させると、内部にマイクロクラックの伸展などの塑性が進み、材料試験では明確に確認できなかったものの、わずかな引張強度の低下をもたらし、斜めひび割れが発生、伸展しやすくなったと考えられる。特に、材齢 7 日まで高温環境下においてクリープを極端に促進した Case 6 の梁では、他とは異なり、せん断圧縮破壊した。通常、せん断圧縮破壊ではせん断ひび割れ発生後、アーチ機構の破壊により終局に至る。クリープを促進すると、圧縮部コンクリートにはひずみが残留することになる。このひずみの残留がアーチ機構の抵抗力を低下させ、せん断ひび割れの伸展に繋がり残留ひずみの最も大きい Case 6 がせん断圧縮破壊に至ったのではないかと推察される。したがって、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言える。

5. まとめ

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材料, 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, 導入する応力が大き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 梁の曲げ発生荷重, 曲げ終局耐力, 荷重—たわみ関係は, クリープの履歴のない梁とさほど相違は見られなかった。しかしながら, クリープの促進によって等曲げモーメント区間内の最大ひび割れ幅が大きくなる傾向が確認され, この理由などについては今後詳細に検討する予定である。
- (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。また, 本学 2010 年度修了生加藤恭介君, 卒業生今野友香里さんが中心に実験, 考察を進め

てくれた。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) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 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