

論文 膨張コンクリートの曲げ部材におけるひび割れ抵抗性に対する多軸拘束の効果

古谷 明寿*1・細田 暁*2・岸 利治*3

要旨：本研究では、ひび割れ抵抗性およびひび割れ発生後の性状に着目し、ケミカルプレストレスト曲げ部材の挙動を詳細に分析した。ケミカルプレストレスト部材では、普通コンクリートに比較して、ひび割れ発生後のひび割れ幅の増加および曲げひび割れの進展が非常に緩やかであることを、実験事実に基づき説明した。また、スターラップにより膨張を多軸に拘束することで、曲げひび割れの進展はさらに緩慢になることが実験結果より示された。

キーワード：膨張コンクリート、ケミカルプレストレスト部材、ひび割れ抵抗性、多軸拘束

1. はじめに

膨張コンクリートは膨張を拘束することによりケミカルプレストレスが導入され、ひびわれ抵抗性が高くなることが知られている。過去の研究により、せん断ひび割れ耐力が増加することや曲げひび割れ幅が小さくなるなど、種々の利点が報告されている¹⁾が、その機構は十分に明らかにはされていない。ケミカルプレストレスは、コンクリートの硬化過程においてセメントの水和反応と化学反応による膨張材の体積膨張が起こり、膨張エネルギーが徐々に圧縮応力として蓄積されていくものである。これは、コンクリートが硬化したのちにプレストレスを導入する機械的プレストレスとは、根本的に導入される機構が異なるので、両者の挙動は異なって当然と考えられる。実際筆者らの一部は、膨張コンクリートは引張応力下で顕著な非線形挙動を示すことを明らかにし、非線形挙動が生じる機構についてのコンセプトを提示した²⁾。本研究では、膨張コンクリートは普通のコンクリートとは相当に異なる性質を持つという立場から、ひび割れ抵抗性および

ひび割れ発生後の性状に注目して、ケミカルプレストレスト曲げ部材の挙動を詳細に分析することを第一の目的としている。また、岡村らは、スターラップによって膨張を多軸に拘束することによって、さらに斜めせん断ひび割れ発生荷重が増加することを報告している³⁾。そこで、スターラップを用いて、膨張の多軸拘束が曲げひび割れの抵抗性に及ぼす影響についても検討することにした。

2. 実験の概要

コンクリートの配合は表-1に示したとおりである。膨張材の添加量は70kgである。

表-1 コンクリートの配合

| 単位量 (kg/m ³) | | | | | |
|--------------------------|-----|----|-----|-----|------|
| W | C | E | S | G | SP |
| 175 | 391 | 70 | 737 | 940 | 5.07 |

膨張材：CSA（エトリンサイト系）

セメント：普通セメント（住友大阪セメント製）

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部構造技術センター 博(工) (正会員)

*3 東京大学助教授 生産技術研究所 博(工) (正会員)

本実験で使用した供試体の諸元を図-1に示す。断面内に均一に拘束の効果を与えられるように、引張鉄筋と圧縮鉄筋を対称に配置した。本実験においては、斜めせん断ひび割れの挙動についても考察を行うため、断面鉄筋比を3.5%、等曲げモーメント区間を300mm、せん断スパンと有効高さの比を2.5とし、斜めせん断ひび割れの発生が部材の曲げ降伏に先行する設計とした。また、膨張作用による主鉄筋の初期膨張ひずみを調べるために、圧縮鉄筋、引張鉄筋各1本ずつの中央部に5mmのひずみゲージをそれぞれ2枚貼り付けた。本研究では、ひび割れ抵抗性に対する多軸拘束の効果を調べることも目的としたため、スターラップも配置することにより膨張を多軸に拘束したものを用意した。この際、多軸拘束を施した供試体におけるスターラップの配置は、D13鉄筋を用い21cm間隔で9本配置(スターラップ鉄筋比0.8%)にしたものと、D10鉄筋を24cm間隔で7本配置(スターラップ鉄筋比0.4%)にしたものの2種類を用意した。スターラップの量を変化させることで、多軸拘束の量の程度によって部材挙動にどのような影響が生じるかを検討することにした。

実験の再現性を考慮して、それぞれの供試体を2体ずつ計6体作成した。

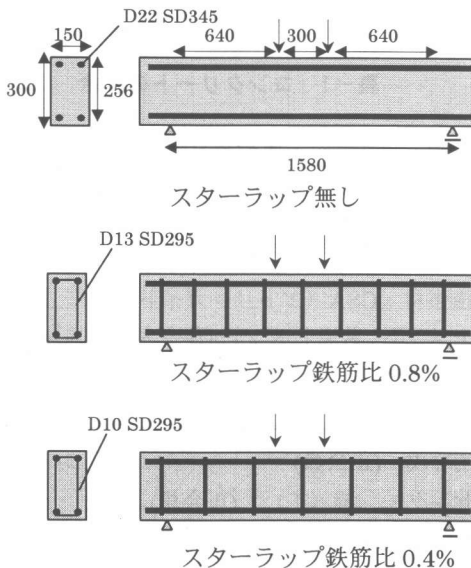


図-1 供試体の諸元と載荷方法

養生条件は各供試体とも、材齢2日で脱型したあと、載荷時まで湿潤養生を施した。載荷は、材齢28日前後に行った。材齢が28日程度になると、コンクリートの水和反応も膨張材の反応も活発な反応は終了し定常状態に至っているので、数日の載荷材齢の違いは実験結果に影響を及ぼすことはないと考えられる。

載荷時には、供試体底面の等曲げモーメント区間にひずみゲージ(ゲージ長60mm)を貼り付けた。この際、等曲げモーメント区間においてひび割れ部、及びひび割れ間のコンクリートの挙動を追跡できるように、図-2のようにこの区間全域に渡ってひずみゲージを互い違いに重なるように貼り付けた。

載荷は、図-1に示すように2点載荷で行い、ひずみの計測と合わせて、スパン中央のたわみ(支点との相対変位)も測定した。

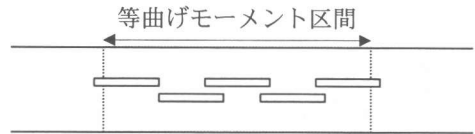


図-2 供試体底面に貼り付けたひずみゲージ

3. 実験結果と考察

3.1 ケミカルプレストレスト曲げ部材に特有な性状

3.1.1 曲げひび割れ挙動

(a) 荷重-たわみ関係

図-3はスターラップを配置していない膨張コンクリートの荷重-たわみ関係である。図-4には筆者らが別途実施したスターラップのない普通コンクリートはりの荷重-たわみ関係の一例を示した。この供試体の諸元を図-5に示す。普通コンクリートにおいては、図-4のように、曲げひび割れ発生と同時に剛性は急激に変化する。曲げひび割れの発生とともに、ひび割れ部で急激に応力が解放されるからである。しかし、膨張コンクリートにおいては、図-4のように、曲げひび割れ発生荷重を明確には同定できないほど、剛性は非線形かつ緩やかに変化した。実際、実験中にもひび割れの入る音は聞こえず、普通コンクリート部材のように荷重が低下する

こともなかった。このことだけからも、膨張コンクリートの曲げ引張応力下の性状は普通コンクリートとは相当に異なることが推察される。膨張コンクリート曲げ部材においては、曲げひび割れの進展が緩慢であり、すなわちひび割れ部におけるコンクリートの引張応力の解放が非常に緩やかであると考えられる。

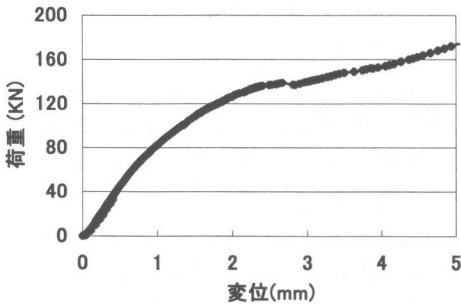


図-3 荷重-たわみ関係
(膨張コンクリート スターラップ無し)

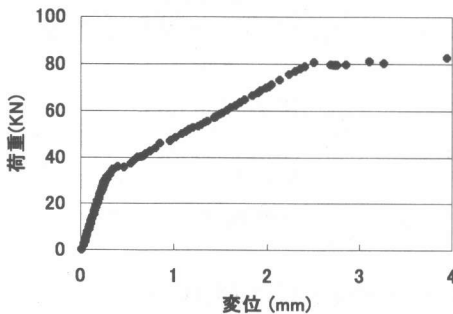
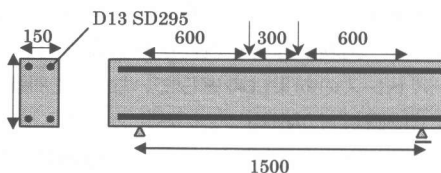


図-4 荷重-たわみ関係 (普通コンクリート)



コンクリートの圧縮強度：28.5Mpa
材齢：14日
養生条件：湿潤養生

図-5 普通コンクリートはりの諸元

筆者らの研究により、拘束された膨張コンクリートでは、ペースト部に局所的に非常に大きな圧縮ひずみが蓄積している可能性が考えられる²⁾。骨材とペーストの界面での剥離の影響が大きくなりひび割れが発生し始めても、このような局所的に点在する強い圧縮ひずみを保持したペーストによってひび割れの進展が抑制されている可能性がある。今後さらに機構の解明を進める必要があると考えている。

(b) 引張縁底面におけるコンクリートひずみの挙動

図-6は図-3で示した膨張コンクリート供試体の底面におけるひずみゲージの挙動を示したものである。図-7には、図-4で示した普通コンクリート供試体の底面におけるひずみゲージの挙動を示した。ひずみゲージの貼り方は図-2で説明した方法と同様である。

ある荷重まではすべてのひずみゲージがほぼ一致した挙動を示すが、それ以降はそれぞれが異なる挙動を示す。異なる挙動を開始する点は、変形が局所化しはじめる点であり、ひび割れが発生し始める点であると考えられる。

図-6、図-7の両者とも、曲げひび割れ発生後、荷重の増加に伴いひずみが増加するゲージが見られる。これらは、ひび割れが貫通したゲージであり、ひび割れ発生後にひび割れ幅が増加していくことを表している。一方、ひび割れ発生後に荷重の増加とともにひずみが減少するゲージは、ひび割れとひび割れの間に存在するものであり、ひび割れ後にコンクリートが応力を解放する様子を表している。普通コンクリートにおいては図-7のように、ひび割れ発生後、ひずみの増加が急激に起こるのに対し、膨張コンクリートでは図-6のように、ひび割れ発生後のひずみの増加は緩慢であることがわかる。ひずみゲージのゲージ長は60mmであるので、全変形がひび割れ部に集中したと仮定すると、0.1mm程度の可視的なひび割れは約1700 μ のひずみに相当する。普通コンクリートではひび割れ発生後にほとんど荷重の増加は必要とせず、急激に1700 μ 程度にひずみが達するのに対し、膨張コンクリートではひび割れが発生し始

めてから 1700 μ 程度のひずみに達するまでにさらに 30KN もの荷重を必要としている。膨張コンクリートにおいて曲げひび割れの伸展に多大なエネルギーを要することがここからも推察される。

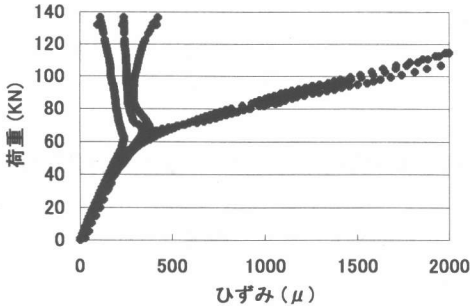


図-6 荷重-引張縁底面における
コンクリートひずみ
(膨張コンクリート スターラップ無し)

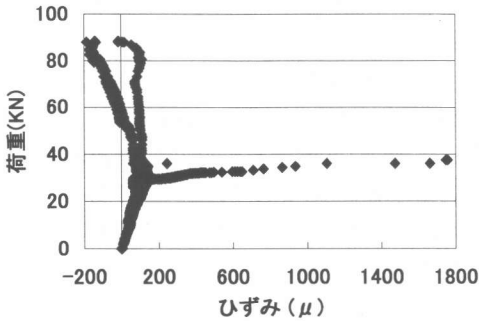


図-7 荷重-引張縁底面における
コンクリートひずみ
(普通コンクリート)

図-6、図-7 からは、曲げひび割れ発生後、荷重の増加に伴いひずみが減少するゲージについても、膨張コンクリートと普通コンクリートの違いが見られる。ひび割れ発生後、鉄筋とコンクリートの付着がなければ、ひび割れとひび割れに挟まれたコンクリートは元の無応力状態に戻ろうとし、ひずみは減少する。実際には付着の影響によってひび割れ後もコンクリートは引張応力を伝達する。図-6と図-7を比較すると、普通コンクリートではひび割れ発生後のひ

ずみの減少が大きく、原点を越えて 200 μ 近くの圧縮側のひずみを示すのに対して、膨張コンクリートにおいては全てのゲージが引張ひずみを保持したままである。膨張コンクリートでは、ひび割れ発生後もひび割れ間の底面のコンクリートが大きな引張力を負担していることがわかる。ひび割れ間の底面におけるコンクリートの戻りが小さいことによって、膨張コンクリート曲げ部材においては曲げひび割れ幅の増加も小さくなるはずである。

以上のように、ケミカルプレストレスト部材ではひび割れ抵抗性が高いだけでなく、ひび割れ幅の増加も非常に緩やかであり、これは部材の耐久性の観点からは大きなメリットとなる。

しかし、普通コンクリートと相当に異なる膨張コンクリートの性状については、その機構は未だ十分には解明されておらず、さらに研究が必要である。

表-2 斜めせん断ひび割れ発生荷重
(実測値と計算値)

| スターラップ 無し | スターラップ 有り | 計算値 |
|--------------|--------------|--------|
| 140 KN | 0.4% | 154 KN |
| | 0.8% | 155 KN |
| | | 87 KN |

コンクリートの圧縮強度：40 MPa

3.1.2 斜めせん断ひび割れ挙動

表-2 は、本実験で観測されたせん断ひび割れ発生荷重(平均値)と示方書に採用されているせん断ひび割れ発生荷重算定式³⁾による計算値を載せたものである。算定式により計算する際には、実験から得られた圧縮強度を用い、プレストレスの効果は考慮していない。これより、すでに岡村らが指摘しているように¹⁾、せん断ひび割れ発生荷重はプレストレスの効果によってかなり上昇し、多軸拘束を施すとさらに大きくなるという結果になった。

曲げひび割れが進展しにくかったのと同様に、斜めせん断ひび割れの進展も緩慢であった。図-3のように、スターラップを配置しないものでも、せん断ひび割れ発生後も荷重が増加し

つづけることが認められた。今回の実験では、部材の破壊までの荷重は行わなかったが、普通コンクリートでは、スターラップを配置しない場合は斜めせん断ひび割れの発生とともに終局状態に至ると考えられるが、膨張コンクリートの場合には、斜めひび割れの進展と幅の増加が目視で観察できるほどに緩やかであった。

3.2 曲げひび割れ抵抗性に対する多軸拘束の影響

ここでは、スターラップにより膨張を多軸に拘束することが曲げひび割れ抵抗性に及ぼす影響を検討する。軸方向鉄筋の初期膨張ひずみは図-8 のようになった。スターラップによる多軸拘束の影響は軸方向の鉄筋における初期ひずみにはほとんど影響は認められなかった。スターラップを配置した供試体における引張縁底面のコンクリートひずみの挙動を図-9(スターラップ鉄筋比0.4%)と図-10(スターラップ鉄筋比0.8%)に示した。図-9, 図-10には図-6と同じように、ひずみがばらつきはじめる地点が見られる。この点ではコンクリートの変形が局所化を開始しており、具体的には弱点部である骨材とペースト界面の剥離の影響が大きくなったことによると考えられる。多軸拘束を施したものと施さなかったものの局所化が開始する荷重を比較すると、今回の実験では共に50KNとほとんど違いは見られなかった。

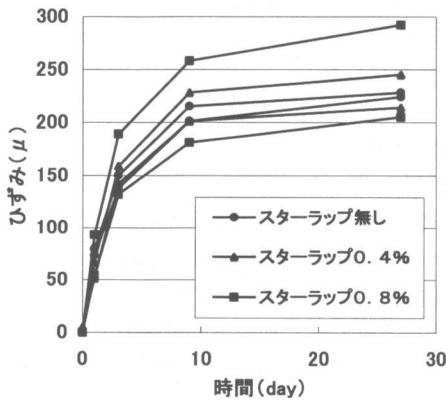


図-8 部材軸方向の鉄筋における初期ひずみ

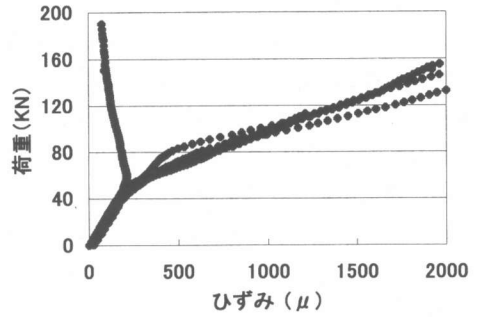


図-9 荷重-引張縁底面におけるコンクリートひずみ (膨張コンクリート スターラップ0.4%)

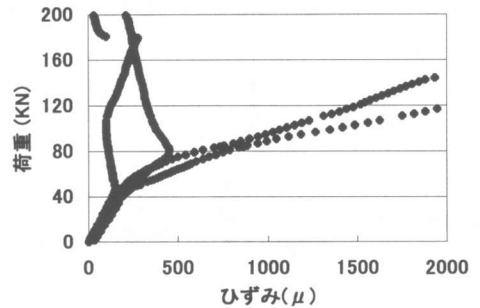


図-10 荷重-引張縁底面におけるコンクリートひずみ (膨張コンクリート スターラップ0.8%)

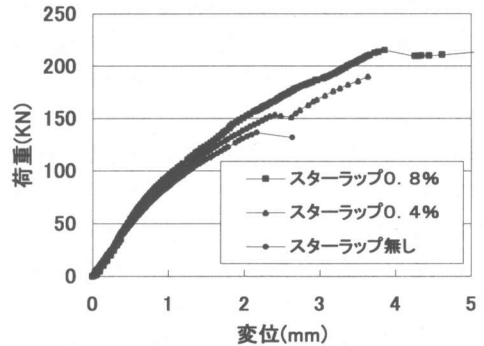


図-11 荷重-たわみ関係 (膨張コンクリート)

図-11は、スターラップの量を変えて多軸拘束の効果を変化させた3種類の供試体の荷重-中央たわみ関係を1つのグラフに重ね合わせたものである。3つの供試体の挙動を比較すると、

多軸拘束の程度を変化させることによって、底面において変形の局所化が開始した約50KN以降の剛性に違いが認められる。斜めひび割れが発生するとスターラップの有無で当然剛性は大きく異なるが、今回の実験では約140KNまでの供試体にも斜めひび割れは発生していないにも関わらず、拘束鋼材量が増えるに従って剛性が上昇することがわかる。曲げひび割れ発生後の剛性が異なるのは、コンクリートが負担する応力に違いがあるためと考えられる。一般に斜めひび割れの発生以降の性能確保を目的として配置されるスターラップによって膨張を多軸に拘束することで、斜めひび割れが発生する以前であっても、曲げひび割れの進展が抑制されていると考えられる。

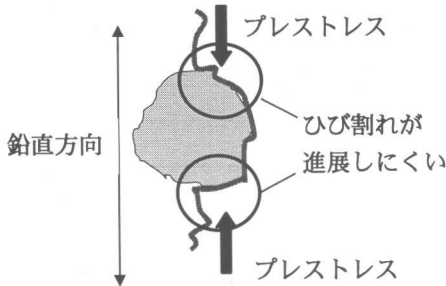


図-12 曲げひび割れ進展の模式図

この現象については以下のような考察を行った。曲げひび割れは巨視的にははりの軸直交方向（鉛直方向）に伸展するが、微視的には図-12のようにコンクリート内部の弱点部である骨材とペーストの界面を剥離させながら進展する。膨張コンクリートにおいては、スターラップを配置することにより多軸にプレストレスが導入されるため、鉛直方向に面した骨材ペーストの界面にも強い圧縮力が作用することになる。つまり、曲げひび割れが鉛直方向に面した骨材ペースト界面を進展するには、多大な引張応力が必要になると考えられる。また、スターラップがない場合には鉛直方向に逸散してしまう膨張エネルギーの一部を確実に拘束することで、軸方向に導入される膨張エネルギーを相対的に増加させることも、軸方向の品質改善に効果があると考えられる。以上の理由により、一

般にせん断に対して効果があるスターラップを配置することにより、曲げひび割れが進展しにくくなると考察した。

4. 結論

(1) ケミカルプレストレスト部材においては、曲げひび割れ発生以降の挙動が普通コンクリートとは相当に異なった。荷重-変位関係、および供試体底面のひずみの挙動から、曲げひび割れ発生後のひび割れの進展が普通コンクリートと比較して非常に緩やかであることを示した。

(2) 曲げひび割れ発生後に、普通コンクリートではひび割れ間のコンクリートの引張応力が相当に解放されるが、ケミカルプレストレスト部材では、ひび割れ間のコンクリートが引張応力のある程度保持することが明らかとなった。

(3) ひび割れ間のコンクリートひずみの戻りが小さいことは、曲げひび割れ幅の開きを抑制することになるので、部材の耐久性能確保の観点からも大きな長所となる。

(4) ケミカルプレストレスト部材では、曲げひび割れと同様に、斜めひび割れの進展も緩やかである。

(5) スターラップで膨張を多軸に拘束しても、引張縁底面で変形が局所化する荷重には違いが見られなかった。しかし、曲げひび割れが発生を開始した後の部材の剛性は、スターラップの鉄筋比に応じて大きくなった。これは、ケミカルプレストレスが多軸に導入されることで、曲げひび割れの進展がさらに緩やかになるためとの考えを示した。

参考文献

- 岡村 甫, 辻 幸和: ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の力学的特性, 土木学会論文集, 第 225 号, pp.101-108, 1974.5
- 細田 暁, 岸 利治: 若材齢時ケミカルプレストレスト部材の挙動とその考察, コンクリート工学年次論文集, 第 22 巻第 3 号, pp.787-792, 2000
- 岡村 甫: 鉄筋コンクリート工学, 市ヶ谷出版, p.62, 1987