

ケミカルプレストレスト部材の曲げ性状と多軸拘束の効果

細田 暁¹・岸 利治²

¹正会員 博(工) 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事部構造技術センター
(〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-2)

²正会員 博(工) 東京大学生産研究所 助教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

本研究では、ケミカルプレストレスト部材の曲げ性状と多軸拘束の効果を実験的に検討した。一軸引張試験でTension Stiffeningを、梁の曲げ試験で曲げ性状と多軸拘束の効果を検討した。十分に養生された場合は、Tension Stiffening効果が大きく、曲げ部材ではひび割れ発生近傍の剛性、引張縁でのコンクリートの挙動が普通コンクリートとは異なることが明らかとなった。また、多軸拘束の効果が曲げ性状でも見られ、特に断面が大きい場合にその効果が大きいことを示した。さらに、膨張コンクリートに特有な性状が曲げひび割れ幅を低減する効果について考察を行った。

Key Words : expansive concrete, chemical prestress, tension stiffening, curing in early ages, fracture energy, restraints in many directions, crack width

1. はじめに

膨張材をコンクリートに添加し、適切な拘束を与えることで、コンクリートのひび割れ抵抗性などの品質を向上させることが可能である。膨張材の膨張効果が有効に発現すると、曲げひび割れ発生荷重、斜めひび割れ発生荷重が増加し、ひび割れ発生以降もその幅が小さくなることから知られている¹⁾。また、膨張によってもたらされたひずみは硬化過程に徐々に導入されるので、クリープによってほとんど低減しないことも大きな特徴の一つである²⁾。

膨張コンクリート設計施工指針³⁾においては、曲げひび割れ発生荷重の増加はプレストレスによって、また曲げひび割れ幅が小さくなることは膨張により鋼材にもたらされたひずみであるプレストレンによって評価する枠組みが構築されている。

しかし、筆者らの研究^{4),5)}によって、拘束された膨張コンクリートは引張応力下で非線形挙動を示し、ひび割れ発生までの変形能力が大きくなることが示された。最大経験応力の増加とともに除荷時剛性が低下し、除荷後に大きな残留ひずみが発生することが明らかとなった。拘束条件下の硬化過程で膨張作用を受けたコンクリートは、普通コンクリートと明らかに性状が異なるのである。

膨張コンクリートのひび割れ発生以降の挙動に関する研究はほとんど皆無であり、特に、普通コンクリートと相当に性状が異なる、という視点に立った研究は全くなされていない。ケミカルプレストレスト部材は、ひび割れ抵抗性が大きくなるだけでなく、ひび割れ幅が小さくなるのが最大の特長であると認識しているが、そのメカニズムが十分明らかになっていない。

また、膨張コンクリートは拘束がない場合、性能が低下する。鉄筋を一方に配置することで、その性能は大幅に改善される³⁾。多方向に拘束を与えることは、その性能を大きく改善すると思われるが、今のところ、斜めひび割れ発生荷重がさらに増加すること¹⁾、繊維補強による拘束の効果が報告されている^{7),8),9),10)}程度で、十分明らかにされているとは言えない。

本研究は、ケミカルプレストレスト部材のひび割れ発生以降の性状、および多方向の拘束の効果を実験的に検討するものである。一軸引張試験でTension Stiffeningを検討し、梁の曲げ試験からケミカルプレストレスト部材の曲げ性状と多軸拘束の効果などを詳細に検討する。これらの実験結果と、過去の研究成果から、膨張コンクリートの性状について考察を行い、膨張材の効果を十分に引き出すための知見を得るのが目的である。

2. 実験の概要

(1) Tension Stiffening に関する実験

膨張コンクリートの Tension Stiffening を調べるために、ケミカルプレストレスト部材の一軸引張試験を行った。供試体は、**図-1** に示すように、100mm×100mm の断面の中央を異形鉄筋が貫通しており、供試体長さはコンクリートの部分が約 2900mm である。供試体は**表-1** に示すように 7 種類とした。鉄筋は、D19 にはねじ鉄筋を用いた。それ以外の D22, D13 はふしがリブに直交している普通の異形鉄筋を用いた。供試体作成に使用した鉄筋の特性を**表-1** に示した。膨張コンクリートは、レディーミクストコンクリートを使用して打設した。**表-2** に示す材料を用いて、設計基準強度が 40MPa である普通コンクリートのセメントに内割**表-2** に示す膨張材を混和した。膨張コンクリートの配合を**表-3** に示した。単位膨張材量は 70kg と、収縮補償を目的とする場合よりもかなり多い添加量とした。普通コンクリート供試体は、実験室で練ったコンクリートにより作成した。セメント、膨張材は**表-2** に示すものを使用した。骨材は異なり（細骨材の密度が 2.55, 吸水率が 1.53%, 粗骨材の密度が 2.62, 吸水率が 1.2）、打設時期も異なる。普通コンクリートの配合は、各構成材料の重量比が膨張コンクリートの配合と同じになるように、空気量を 5% として配合設計した (**表-3**)。

鉄筋の中央部にひずみゲージを貼りつけ、打設直後からの膨張ひずみを計測した。**図-2** に示すように、ひずみゲージは、コンクリートの打設方向を考慮して、ブリージングの影響を受けにくい位置に配置した。

荷重は変位制御で単調荷重とし、鉄筋が降伏して以降もしばらく荷重を続けた。これは、除荷後に十分な残留

変位を持たせ、ひび割れ本数や間隔を観察しやすいようにしたためである。Tension Stiffening をコンクリートの応力-ひずみ関係で得るためには、コンクリートの平均ひずみを計測する必要がある。そこで、十分な供試体長さを取り、多数のひび割れが含まれる場合は、**式(1)** が成り立つものと仮定して、平均ひずみの計測を行った。供試体両端部から 500mm 以上離れた位置のコンクリート表面に金属片を接着し、その間の変位を変位計により測定した。変位測定区間は約 1900mm である。端部から 500mm 以上離れた位置で測定を行ったのは、膨張コンクリートでは供試体端部から 500mm くらいまでは他の部分に比べて付着性状が劣る、という過去の報告¹⁾を参考にしたからである。供試体の両端を 500mm 以上変位計測対象から除外しても変位計測区間に十分な量のひび割れを含むように、供試体長さを約 2900mm としたのである。

実験結果から、コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を求める必要があり、以下の手順に従って算出した。

$$\overline{\varepsilon_{RC}} = \overline{\varepsilon_S} = \overline{\varepsilon_C} \quad (1)$$

(ただし、 $\overline{\varepsilon_{RC}}$: RC 部材の平均ひずみ、 $\overline{\varepsilon_S}$: 鉄筋の平均ひずみ、 $\overline{\varepsilon_C}$: コンクリートの平均ひずみ)

$$\overline{\sigma_S} = \overline{\varepsilon_S} \times E_S \quad (2)$$

$$\overline{\sigma_C} = \frac{(T - \overline{\sigma_S} \times A_S)}{A_C} \quad (3)$$

(ただし、 $\overline{\sigma_S}$: 鉄筋の平均応力、 $\overline{\sigma_C}$: コンクリートの平均応力、 E_S : 鉄筋のヤング係数、T : 部材に作用する引張荷重、 A_S : 鉄筋の断面積、 A_C : コンクリートの断面積)

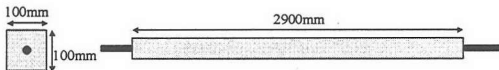


図-1 一軸引張試験の供試体

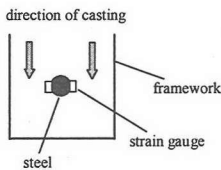


図-2 供試体の打設方向

表-3 コンクリートの配合

コンクリート種類	W/(C+E)	単位量 (kg/m ³)					高性能AE減水剤
		水(W)	セメント(C)	膨張材(E)	細骨材	粗骨材	
膨張コンクリート	0.38	175	391	70	737	940	5.07
普通コンクリート	0.38	171	450	0	719	916	4.94

表-1 一軸引張試験の供試体一覧

供試体名称	コンクリート	使用鉄筋	鉄筋の降伏強度 (MPa)	鉄筋比	養生条件
D19-①	膨張	D19(ねじ鉄筋)	357	2.87%	湿潤
D19-②	膨張	D19(ねじ鉄筋)	357	2.87%	湿潤
D22	膨張	D22異形鉄筋	366	3.87%	湿潤
D13	膨張	D13異形鉄筋	349	1.27%	湿潤
D19-Dry	膨張	D19(ねじ鉄筋)	357	2.87%	実験室内放置
N-D19	普通	D19(ねじ鉄筋)	357	2.87%	湿潤
N-D19-Dry	普通	D19(ねじ鉄筋)	357	2.87%	実験室内放置

表-2 膨張コンクリートの使用材料

セメント	S社製 普通ポルトランドセメント
膨張材	D社製 エトリンガイト系
細骨材	埼玉県秩父郡横瀬町産 比重2.68 吸水率1.48%
粗骨材	埼玉県秩父郡横瀬町産 比重2.70 吸水率0.45%
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系

まず、式(1)が成り立つと仮定して、実験結果からコンクリートおよび鉄筋の平均ひずみを得る。部材ではひび割れ位置の鉄筋がまず降伏を開始する。ひび割れ位置の鉄筋が降伏するまでは、すべての位置の鉄筋は弾性域にあるので、鉄筋のヤング係数を用いて、式(2)から鉄筋の平均応力が算出される。そして、式(3)より、コンクリートの平均応力が得られる。ひび割れ位置で鉄筋が降伏を開始すると、この実験方法では鉄筋の平均応力を算出できなくなる。従って、この実験からは、ひび割れ位置の鉄筋が降伏を開始する時点までの Tension Stiffening を調べることが可能である。

荷重中には、図-3 に示すような位置にひずみゲージを貼り付け、逐次計測を行った。ひび割れが発生するまでは、変位計による部材の平均ひずみ、鉄筋中央部に貼りつけたひずみゲージによるひずみ、部材中央部のコンクリートのひずみが一致することが望ましい。また、前述の部材端部 500mm の近辺にもコンクリート表面にひずみゲージを配置し、挙動を調べることにした。すべての供試体において、コンクリート表面の各位置および鉄筋に貼りつけたひずみゲージの挙動は、ひび割れが発生するまでほぼ同じ挙動を示した。供試体端部から 500mm 程度離れた位置では中心部と同程度の付着性状が確保できており、本実験の変位測定法では、部材端部の付着が十分でない領域の影響は排除できていると思われる。また、

荷重中および荷重準備中は水分の逸散を極力防ぐために、供試体表面にはグリースを塗布し、ポリエチレンフィルムでコーティングした。

なお、部材の平均ひずみを計測する際、変位計にとりつけたピアノ線の遊びが計測初期に影響することが判明した。遊びを無くすよう最大限の努力を行ったが、平均ひずみが約 50 μ に達するまでは、変形を計測することができなかった。そこで、変位計が有効に計測を開始し始めた以降、ひび割れ発生までにおいて、変位計による平均ひずみと、鉄筋に貼りつけたひずみゲージおよび中央部コンクリートに貼りつけたひずみゲージによるひずみが、ほぼ一致することを確認した上で、約 70 μ までは鉄筋に貼りつけたひずみゲージの値をもって、平均ひずみとした。それ以降は、変位計から求められるひずみを足し合わせる形で、ひび割れ発生以降まで平均ひずみを求めることにした。次章に示す実験結果はすべて、このような処理を行ったものである。

(2) 曲げ性状と多軸拘束の効果に関する実験

ケミカルプレストレスト部材の曲げ性状と多軸拘束の効果を検討するに際して行った曲げ実験の概要を説明する。図-4 に供試体の諸元を示す。3種類の寸法の供試体を用意した。それぞれのサイズの供試体において、スターラップを配置したものと、配置しないものを用意

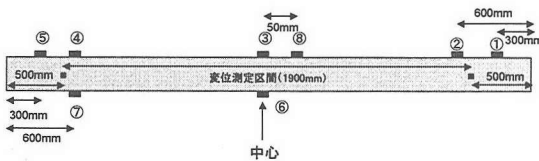


図-3 コンクリートにひずみゲージを貼り付けた位置

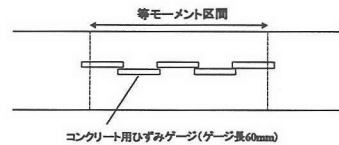


図-5 梁供試体底面に貼り付けたひずみゲージ

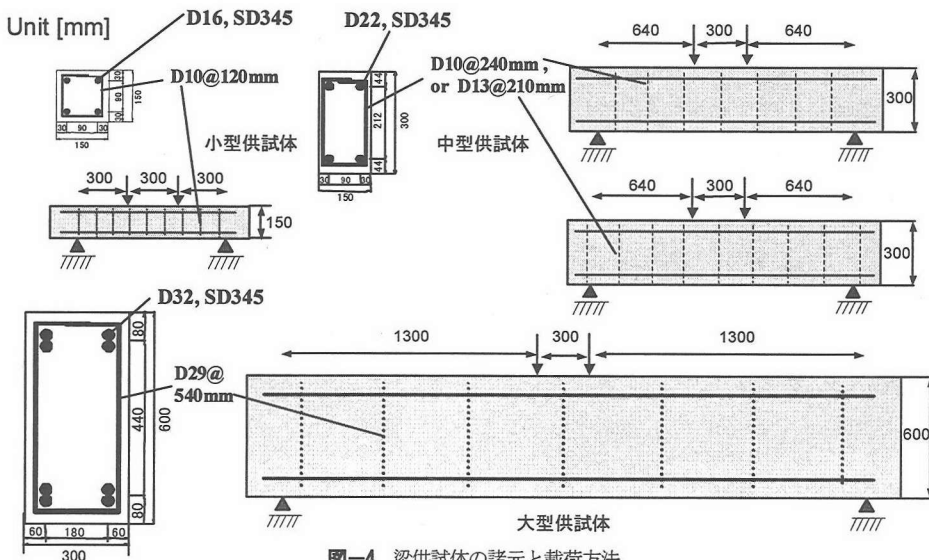


図-4 梁供試体の諸元と荷重方法

し、ひび割れ抵抗性に及ぼす多軸拘束の効果も調べた。断面内の配筋は引張鉄筋と圧縮鉄筋を対称に配置した。これは、断面内に拘束の効果を均一に導入することを目的としている。断面の寸法が大きくなると、鋼材の拘束効果が十分に及ばない領域も存在すると思われるが、これは膨張コンクリートにおける「寸法効果」であると考えている。3種類のサイズの供試体で断面内の鉄筋比は約3.5%で統一してある。また、スターラップは、引張鉄筋、圧縮鉄筋に接して外側から取り囲むように四角形のものを作成し、配置した。スターラップ間隔は、有効高さと同程度になるような配置とした。小型供試体では、D10のスターラップを120mm間隔で9本配置し、スターラップの断面に対する平均的な鉄筋比は0.8%である。中型供試体では、2種類のスターラップを用意した。一方は、D10のスターラップを240mm間隔で7本配置し、スターラップの鉄筋比は0.4%とし、もう一方は、D13のスターラップを210mm間隔で9本配置し、鉄筋比は0.8%とした。大型供試体では、D29のスターラップを間隔540mmで6本配置し、鉄筋比は0.8%とした。実験の再現性を重視して、小型供試体および中型供試体については同じ供試体を2つ作成した。各供試体は材齢2日で脱型し、材齢28日頃における載荷時まで、湿潤養生を施した。大型供試体は、スターラップのあるものとならないものを1つずつ作成し、材齢2日で脱型した後は、約40日間風の当たらない屋外に放置し、ときどき散水した。載荷は材齢約40日で行った。コンクリートの配合は表-3に示した通りで、Tension Stiffeningを検討した実験シリーズと同じ膨張コンクリートを使用した。載荷方法は、図-4に示す通りで、すべてのサイズの供試体で等モーメント区間を300mmとし、せん断スパンと有効高さの比を2.5で統一した。また、図-5に示したように、供試体底面には、ゲージ長60mmのひずみゲージがお互いに重なるように、等モーメント区間全域をカバーするように貼りつけ、ひび割れ発生までだけでなく、ひび割れが発生した後の各ひずみゲージの挙動を観察することにした。載荷時材齢における圧縮強度は40.3MPaであった(JIS A 6202)。円柱供試体は鋼製の型枠で作成し、載荷直前に脱型したのちただちに圧縮載荷を行った。

3. ケミカルプレストレスト部材における Tension Stiffening

(1) 膨張コンクリートのTension Stiffening

図-6に各供試体の打設後、載荷前までの鉄筋の膨張ひずみを示した。材齢2日において脱型を行い、湿

潤養生(実験室内、温度約20℃一定)を施した。供試体断面積が小さいため、型枠による摩擦の影響が相対的に大きくなる。摩擦によって軸方向の変形が拘束されていたが、材齢2日程度では依然として膨張材の反応は活発であるため、脱型後に膨張ひずみが顕著に発現したものと考えられる。

図-7には、岡村らが提案した普通コンクリートのTension Stiffeningのモデルを示した。ひび割れも含むコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を規定したものである。引張強度までは線形で、引張強度に達したあとは応力が一定の塑性棚を設けている。また、引張強度に達するひずみの2倍のひずみより大きい領域では、軟化曲線を規定するパラメータであるCにより、平均応力-平均ひずみが決定される。(図中の記号は、 σ_i :コンクリートの平均応力、 ε_i :コンクリートの平均ひずみ、 f_t :引張強度、 ε_{ic} :引張強度に達するときのひずみ、 ε_{tu} :ひび割れ発生ひずみ、 c :軟化曲線を決定するパラメータ(異形鉄筋と普通コンクリートの場合は0.4))

図-8には、D19-①の荷重-平均ひずみ関係を示した。合わせて、鉄筋単体の荷重-ひずみ関係を示した。部材の荷重から弾性領域にある鉄筋が負担する引張力を差し引いて、コンクリートの平均応力-平均ひずみに換算したものが、図-9である。前述のように、実験から直接コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を求めるのは、ひび割れ部の鉄筋が降伏を開始する直前までである。

図-9で示すデータも、ひび割れ部の鉄筋が降伏する直前までのものである。このように、膨張コンクリートにおいても、ひび割れ発生以降、Tension Stiffeningが存在することが実験によって確認された。

図-10~図-13には、膨張コンクリート供試体(湿潤養生)の平均応力-平均ひずみ関係と; 図-7に示した普通コンクリートのTension Stiffeningのモデル¹⁰⁾を合わせて示した。

4つの実験結果から、拘束鉄筋比が約1.3%~3.9%においては、ひび割れ発生以降の軟化性状は似通った傾向を

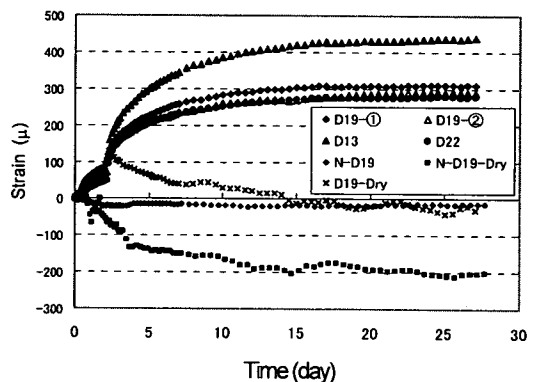


図-6 一軸引張供試体の打設直後からの鉄筋ひずみ

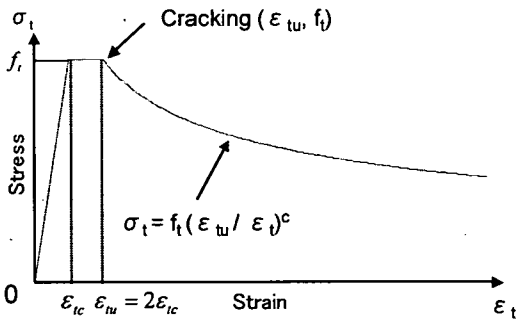


図-7 普通コンクリートの Tension Stiffening のモデル¹⁴⁾

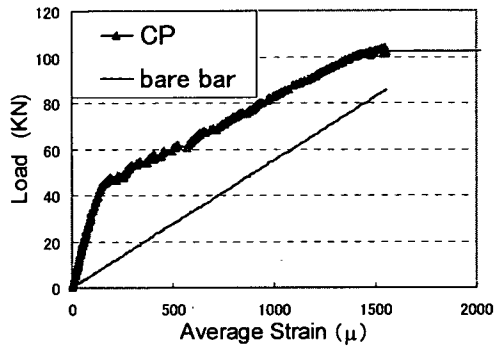


図-8 D19-①供試体の荷重-平均ひずみ関係

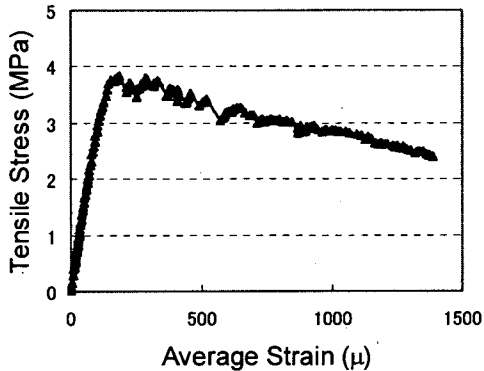


図-9 D19-①供試体におけるコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係

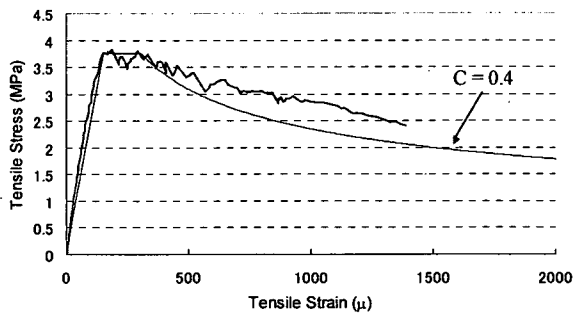


図-10 D19-①供試体のコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係

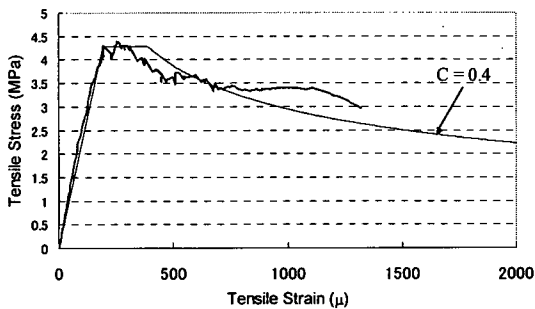


図-11 D19-②供試体のコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係

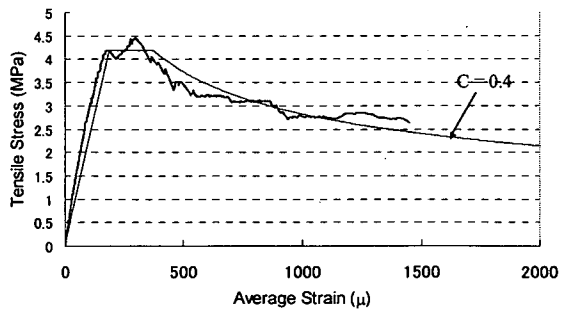


図-12 D22 供試体のコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係

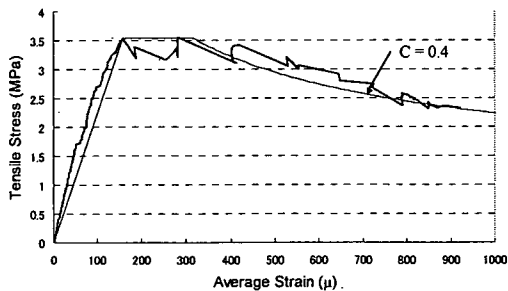


図-13 D13 供試体のコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係

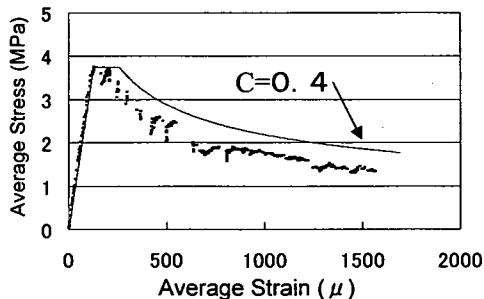


図-14 N-D19 供試体のコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係

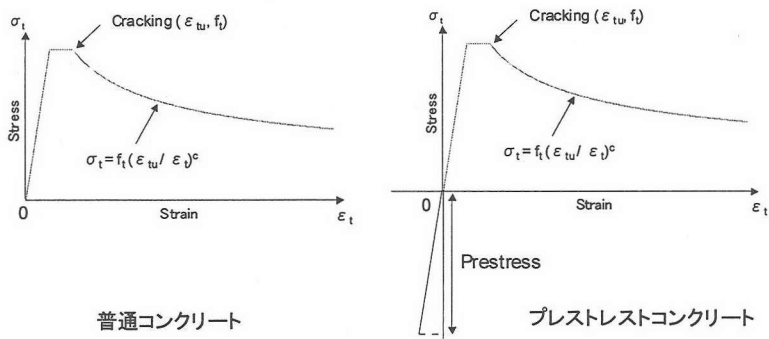


図-15 プレストレストコンクリートにおける Tension Stiffening

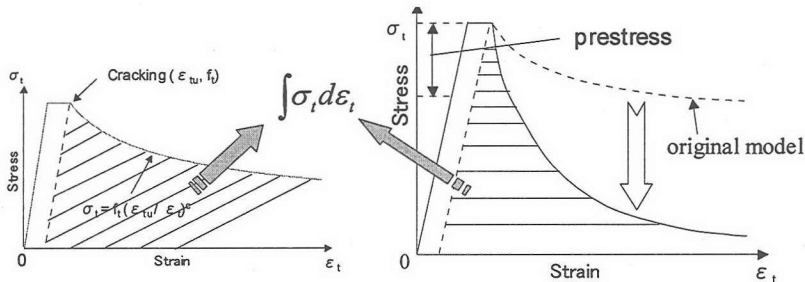


図-16 プレストレストコンクリートにおける破壊エネルギーの調整

示していることが分かる。ただし、ここでのデータは、ひび割れ部の鉄筋が降伏を開始する時点までのものに限られている。図-14には、打設時期、使用材料が異なるが、普通コンクリート（湿潤養生）の実験結果を示した。普通コンクリートと比べると、膨張コンクリートはひび割れ発生以降に急激に応力が低減することなく、塑性的な挙動を示しているように見える。図-7に示した普通コンクリートの Tension Stiffening モデルでは、引張強度に達したひずみの2倍をひび割れ発生ひずみとするように塑性棚を設けている。これは、構造解析において耐震壁のようにひび割れが分散するものや、梁などの曲率すなわちひずみ勾配が存在する部材もカバーできるように定めたものと考えられ、図-14に示すように、一軸引張試験からはこのような明確な応力保持領域を観察することはできない。しかし、膨張コンクリートにおいては、一軸引張試験においてもあたかも塑性棚を持つかのような性状を呈し、ひび割れ以降も応力の軟化が非常に緩慢であることが分かった。このような膨張コンクリートに特有な性状は、曲げ応力下において、またスターラップによって膨張が多軸に拘束される場合はさらに顕著に表れると考えられる。これについては5章で検討を行う。

次に、膨張コンクリートはプレストレスの効果によって見かけ上の引張強度が高いことの影響を考えることにする。まず、一般的なプレレストコンクリートにおける Tension Stiffening について考察を行ってみる。図-15に示したように、機械的にプレストレスを導入すると、

コンクリートには圧縮応力が導入される。しかし、コンクリートは本質的にはプレストレスを導入する前のコンクリートと同じものであるから、導入された圧縮応力が解放されれば、元のコンクリートに戻るはずである。従って、図-15のようにグラフの原点を取れば、附着の相違を無視した場合、プレレストコンクリートの Tension Stiffening は普通コンクリートの Tension Stiffening と同じであると考えることができる。一方で、コンクリートに圧縮応力が導入された状態を原点に取れば、同様のひび割れ以降の軟化現象をモデル化するためには、ひび割れ以降にコンクリートで消費されるエネルギーが等しくなるように、図-16に示すように軟化の度合いを大きくする必要がある。そのような処理を行わないと、ひび割れ発生以降にコンクリートが負担する引張応力を過大に評価すると考えられる。ただし、ここでの議論は、RC とプレレストコンクリートで附着には相違がなく同じひび割れ状態となる、という条件が必要である。

図-17には、すべての供試体の載荷終了後（鉄筋は降伏）におけるひび割れ状況を示した。膨張コンクリート、普通コンクリートともに十分な養生をせずに材齢初期から乾燥の影響を受けるとひび割れ間隔が小さくなることが分かる。乾燥の影響を排除した場合、D19の供試体と比べると、膨張コンクリートと普通コンクリートのひび割れ間隔には大きな差が見られないため、本実験結果については、鉄筋の降伏までについては図-16の議論が可能であると考えられる。

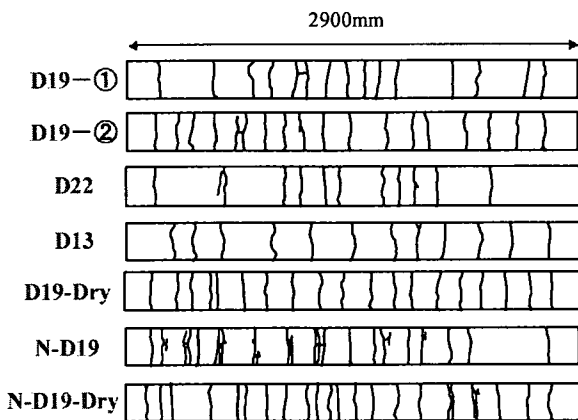


図-17 各供試体のひび割れ状況

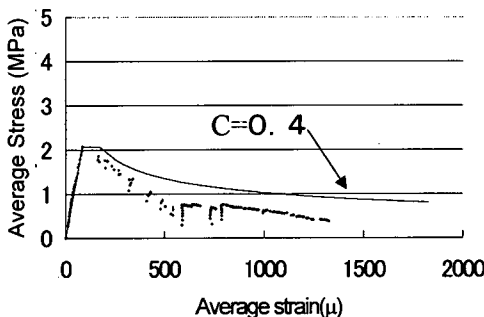


図-18 D-19-Dry 供試体のコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係

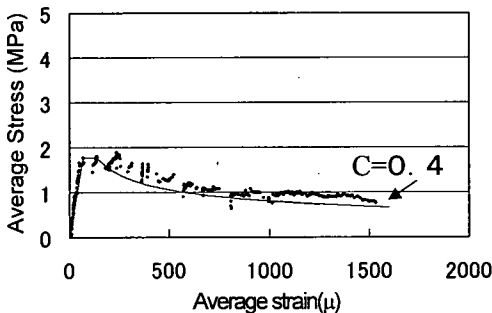


図-19 N-D19-Dry 供試体のコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係

図-10～図-13における膨張コンクリートのTension Stiffeningは、ケミカルプレストレスが導入された状態を原点に取っている。従って、このグラフ上では普通コンクリートのモデルと同程度以上のTension Stiffeningを示しているが、上記のプレストレスコンクリートについての考察に基づいて、膨張コンクリートでは見かけ上の引張強度が大きいことも考慮すると、Tension Stiffening効果

が普通コンクリートよりも大きいと考えることができる。ただし、今回の実験では、打設時期、打設方法が異なり、同じ示方配合でありながら、普通コンクリートと、プレストレスも考慮した膨張コンクリートの引張強度(図-9～図-14の平均応力-平均ひずみ関係において最初にひび割れが生じるときにコンクリートに作用している平均引張応力)にあまり差が出なかった。

(2) Tension Stiffeningに対する材齢初期の養生の影響

図-18および図-19には、材齢2日で脱型後に実験室内で乾燥条件にさらした供試体の実験結果を示した。養生が不十分な場合、引張強度は著しく低下することがわかる。ケミカルプレストレス部材のTension Stiffeningは普通コンクリートのモデルを下回っており、ひび割れ発生以降の性状にも養生の影響が大きいことが示されている。岡村らは、材齢7日程度まで養生を行い、膨張ひずみを十分に発現させると、その後に乾燥を受けても、水分が再度供給されることでひずみが回復することを示した¹⁹⁾。これらと合わせて、材齢初期に十分養生をすること、および膨張ひずみを十分に発現させることが、膨張材の効果を引き出すためには重要である、と言える。

4. ケミカルプレストレス部材の曲げ性状

(1) 荷重-中央たわみ関係

まず、ケミカルプレストレス(CP)曲げ部材の挙動を分析する。図-20に、スターラップのない中型供試体の荷重-たわみ関係を示した。ケミカルプレストレス部材では、荷重-たわみ曲線において、剛性が急変する荷重を同定することは困難であった。ひび割れ発生荷重を明確に同定することさえ難しく、小型供試体、中型供試体では曲げひび割れが発生するときの音も聞き取ることができなかった。図-21には、普通コンクリートで作成した梁の曲げ試験における荷重-たわみ関係の一例を示した。この図では、約35kNを少し超えた辺りで剛性が急変していることが見て取れる。曲げひび割れの発生近傍の荷重レベルでは、普通モルタルと膨張モルタルの間で圧縮性状には大きな違いがないことが筆者らの実験結果から得られている¹⁹⁾。図-20と図-21で見られた、ケミカルプレストレス部材と普通のRC部材の両者の挙動の違いは、主に曲げ引張応力下の挙動が異なることに起因すると考えられる。

(2) 引張線底面のコンクリートの挙動

a) 荷重と引張縁ひずみの関係

図-22には、図-20で示した膨張コンクリート供試体の荷重と引張縁におけるコンクリートひずみの関係を

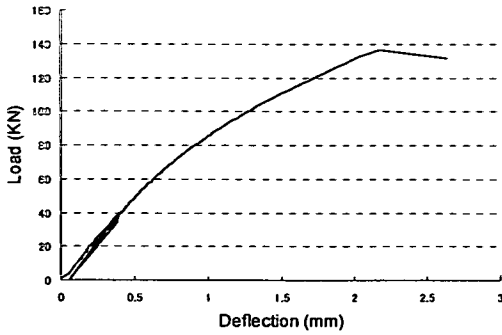


図-20 CP 中型供試体の荷重-中央たわみ関係
(スターラップなし)

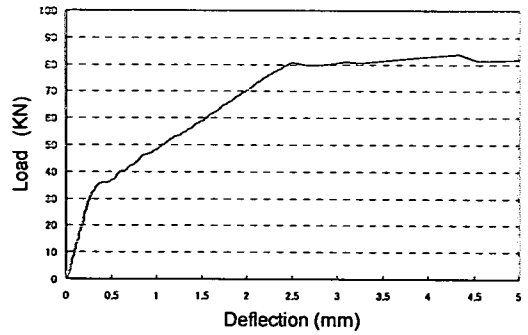


図-21 普通コンクリート供試体の
荷重-中央たわみの一例

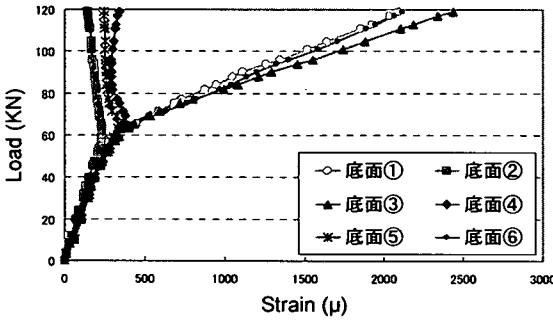


図-22 CP 中型供試体の底面におけるコンクリート
ひずみの挙動 (スターラップなし)

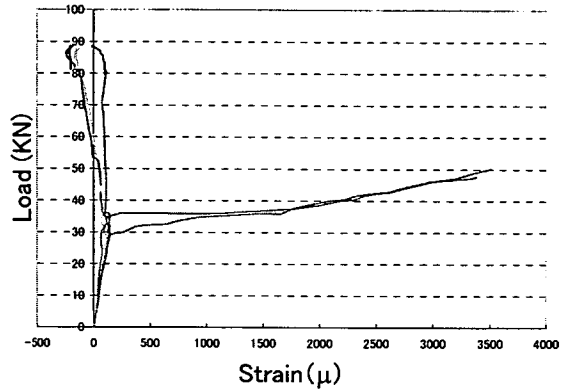


図-23 普通コンクリート供試体の底面における
コンクリートひずみの挙動

示した。同様に、図-23には、図-21の普通コンクリート供試体のものを示した。図-22および図-23の比較から、膨張コンクリートと普通コンクリートではひび割れ発生後の挙動が相当に異なることが分かる。

b) 普通コンクリート供試体の引張線ひずみの挙動

図-23に見られるように、普通コンクリートでは、約 30kN で、あるひずみゲージの位置にひび割れが発生し、その後にひずみの値が急増している。ひび割れが急激に成長したものと考えられる。約 35kN でひび割れがもう 1本発生し、このひび割れも急激に大きく開いていくことが分かる。ひずみゲージはゲージ長 60mm のものを使用したので、ひび割れ部にこの間のすべての変形が集中していると仮定すると、0.1mm のひび割れが 1667 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、わずかな荷重の増加で 0.1mm 程度の可視的なひび割れにまで成長するのである。この実験ではひずみゲージを接着剤で貼りつけたので、ひび割れ部で変形が急激に大きくなるときに接着剤がはがれたためにひずみゲージの破断に至らなかったと思われる。ひび割れ近傍以外ではゲージとコンクリートの接着は十分に保たれていると思われ、ひび割れ発生後においては、ゲージの変位

量はほぼひび割れ幅の増加と等価であると考えている。これはケミカルプレストレスト部材においても同様である。また、ひび割れが貫通しなかったゲージ部分では、ひび割れの発生後、引張応力が解放され、最終的には圧縮ひずみを示しているものも存在する。これと同様の結果を國分らも報告している¹⁹⁾が、コンクリート表面における乾燥収縮応力の解放をその原因の一つとしている。このように、普通コンクリート部材では、ひび割れ発生後に表面のひび割れ幅の増加が急激で、ひび割れ間のコンクリートは表面において引張ひずみが解放される、という傾向を示す。

c) ケミカルプレストレスト供試体の引張線ひずみの挙動

一方、図-22に示すように、ケミカルプレストレスト部材では、約 60kN あたりから変形の局所化が始まるが、その後、ひび割れが発生していると思われるゲージにおいて、普通コンクリートに比べて、荷重の増加に伴うひずみの増加が小さい。ゲージ内の変形がひび割れ部一箇所に局所化していると仮定すると、0.1mm 程度のひび割れが発生していると思われる 1600~1700 μ に達するには相当な荷重の増加が必要である。また、ひび割れが

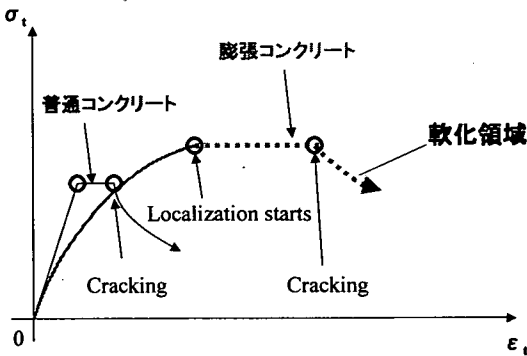


図-24 曲げ応力下における膨張コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係 (概念図)

貫通していないゲージでは、局所化が開始した以降も、普通コンクリートのようにひずみが解放されることがなく、荷重がかなり増加した後も引張ひずみを示している。これは、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の引張ひずみが保持され、また同時にひび割れ幅の増加が著しく緩やかであることを示唆している。この二つの現象はお互いに影響を及ぼし合うが、それぞれの機構について考察を加える。

まず、ひび割れ間のコンクリートの引張ひずみが保持されることについてであるが、これは膨張コンクリートに特有な性状のいくつかの影響を及ぼしていることが想定される。Tension Stiffeningの実験結果で見られたように、ひび割れ発生以降も付着応力の伝達に優れているため、付着応力による引張ひずみが大きくなる。次に、ひび割れ発生までに蓄積した引張残留ひずみが大きいことも原因の一つである。筆者らはすでに、引張荷重を受ける膨張コンクリートは除荷後に大きな残留ひずみが生じることを報告している⁴⁾。また、普通コンクリートにおける乾燥収縮応力の場合と反対に、プレストレスが解放されることによる戻り変形も存在すると考えられる。岡村らが報告したように、膨張コンクリートは拘束が解放されると膨張エネルギーが有効に作用し、再膨張が始まる場合がある¹⁶⁾。短時間の載荷中にこの影響がどの程度発現するかは分からないが、多少の影響はあるものと考えられる。これらの要因が組み合わさって、ひび割れ間のコンクリートはひび割れ後も引張ひずみを保持するものと考えられる。

(3) ひずみ勾配の影響

図-7 に示したように、ひずみ勾配の存在する曲げ部材やひび割れが分散する壁部材などにおいては、普通コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係において引張強度以降に塑性棚を設けたモデルを用いることで、部材挙動を精度良く解析できることが知られている。コンクリ

ートの曲げ強度は一般に引張強度よりも高いことが知られており^{17), 18)}、これを表現する一つの方法が塑性棚であると捉えることができる。一軸引張応力下に比べると、ひずみ勾配が存在する場合は、ひび割れが徐々に進展すると考えられる。このことは離散ひび割れモデルを用いた数値解析による解析結果としても得られている^{17), 19)}。ケミカルプレストレスト部材においては、このひずみ勾配の影響がさらに顕著に表れると考えている。

なぜなら、ケミカルプレストレスト部材の引張縁でひび割れの発生が開始した時点(変形の局所化が開始した時点)では、ペースト部分に大きな圧縮ひずみが残存していると考えられるからである^{4), 9)}。骨材の存在のみならず、ひずみ勾配とペースト部分の圧縮ひずみの存在によって、ひび割れの高さ方向への進展には大きなエネルギーを要すると考えられる。その結果、コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係で概念図を示せば、図-24 に示したように、応力保持領域が非常に大きく、その後の軟化性状もさらに緩やかになると思われる。図-24 は岡村らのモデル¹⁶⁾を参考にした概念図である。岡村らは塑性棚が終了する点において「ひび割れが発生」と定義している。本研究では、膨張コンクリートでは引張強度に達した点を「変形の局所化が開始する点」とし、「ひび割れの発生が開始する点」と同義であると扱う。これは、実験結果の解釈でひび割れが発生する点を特定するのが困難なことによる。図-24 では、普通コンクリートに比べて、セメントの一部を膨張材で置換した膨張コンクリートの方が、引張強度に達して局所化が開始するまでの剛性が小さくなっている。すでに報告したように⁴⁾、膨張コンクリートでは、引張応力を受けることで除荷時剛性が低下し、経験引張応力が大きくなるほど低下の割合が大きくなる。また、引張応力を受ける際に、短時間での時間依存変形も進行する。これらの要因によって、膨張コンクリートでは引張強度に達するまでの剛性も、普通コンクリートに比較して小さくなるのである。

この応力保持領域と軟化性状の結果として、図-20 で示した剛性の非常に nadarakan 減少、また図-22 で示したひび割れ幅の増加が緩やかであることがもたらされていると考えている。筆者らが行った薄梁の実験⁴⁾では、引張縁で非常に大きな変形能力を示したが、これは薄梁の高さが 30mm でひずみ勾配が非常に大きかったため、ひび割れの発生が開始した以降のひび割れの進展が著しく緩やかであったことの影響もあると考えている。また、ケミカルプレストレスト部材にスターラップを配置した場合は、このような膨張コンクリートに特徴的な性状がさらに顕著に表れるが、これは次章で述べることにする。

5. ケミカルプレストレスト部材における多軸拘束の効果

ここでは、スターラップを配置することによって膨張を多軸に拘束することがケミカルプレストレスト曲げ部材の性状に及ぼす効果を検討する。中型・小型供試体と、大型供試体ではスターラップの効果に違いが見られたので、二つに分けて説明を行う。

(1) 中型・小型供試体における多軸拘束の効果

a) 硬化時の膨張ひずみ

図-25 および図-26 には、小型供試体と中型供試体の引張側鉄筋と圧縮側鉄筋の膨張ひずみを示した。小型供試体ではスターラップを配置することで、軸方向鉄筋の膨張ひずみがやや小さな値となっているが、中型供試体ではスターラップの量と軸方向鉄筋の膨張ひずみの間には明確な関係は認められず、小型、中型の供試体においては、スターラップを配置することにより軸方向鉄筋の膨張ひずみの発現は大きな影響を受けることはなかったと考えられる。

b) 中型供試体の引張縁ひずみの挙動

図-27 および図-28 には、中型供試体のスターラップを配置したものに関して、底面のコンクリートひずみの挙動を示した。図-22 で示したスターラップのない供試体と、似たような傾向を示しているが、ここでは変形の局所化が始まる点について議論を行う。スターラップを配置すると、多軸にプレストレスが導入されるため、一軸方向のみに拘束されたスターラップのない場合に比べて、曲げひび割れ発生荷重が大きくなる、という可能性も考えられる。しかし、図-22、図-27、図-28 を見ると、スターラップを配置することで、等モーメント区間において変形の局所化が始まる荷重が増加はしていない。変形の局所化が開始するのは、あるひずみゲージが読み取るひずみの値が他と異なる挙動を開始する点と考えているが、ここでは、ひずみゲージの引張ひずみの値が最初に減少に反転する荷重を、局所化が始まる点と定義することにする。このように定義すると、図-22 のスターラップがない場合、局所化が始まるのは 62.4kN、図-27 のスターラップ鉄筋比 0.4% の場合は 61.3kN、図-28 のスターラップ鉄筋比 0.8% の場合は 48.5kN であった。スターラップを配置することによって局所化が開始する荷重が増えることはなく、この結果は図-26 で示した、多少の実験誤差は含んでいると思われる軸方向鉄筋の膨張ひずみの発現とよく対応している。

図-22 で示したスターラップのない供試体と、似たような傾向を示しているが、ここでは変形の局所化が始まる点について議論を行う。スターラップを配置すると、多軸にプレストレスが導入されるため、一軸方向のみに拘束されたスターラップのない場合に比べて、曲げひび割れ発生荷重が大きくなる、という可能性も考えられる。しかし、図-22、図-27、図-28 を見ると、スターラップを配置することで、等モーメント区間において変形の局所化が始まる荷重が増加はしていない。変形の局所化が開始するのは、あるひずみゲージが読み取るひずみの値が他と異なる挙動を開始する点と考えているが、ここでは、ひずみゲージの引張ひずみの値が最初に減少に反転する荷重を、局所化が始まる点と定義することにする。このように定義すると、図-22 のスターラップがない場合、局所化が始まるのは 62.4kN、図-27 のスターラップ鉄筋比 0.4% の場合は 61.3kN、図-28 のスターラップ鉄筋比 0.8% の場合は 48.5kN であった。スターラップを配置することによって局所化が開始する荷重が増えることはなく、この結果は図-26 で示した、多少の実験誤差は含んでいると思われる軸方向鉄筋の膨張ひずみの発現とよく対応している。

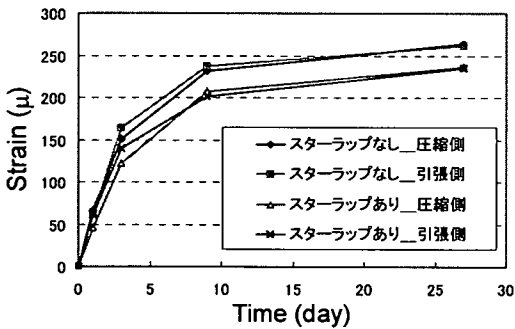


図-25 膨張ひずみの発現 (小型供試体)

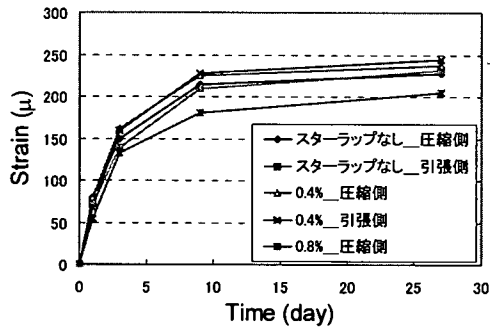


図-26 膨張ひずみの発現 (中型供試体)

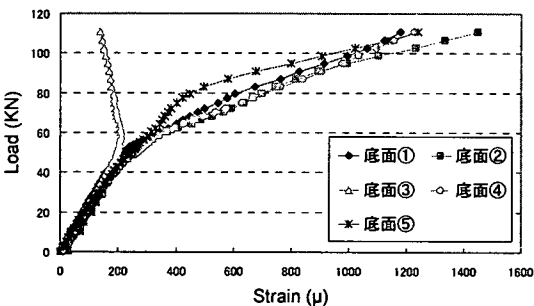


図-27 中型供試体の底面におけるコンクリートひずみの挙動 (スターラップ鉄筋比 0.4%)

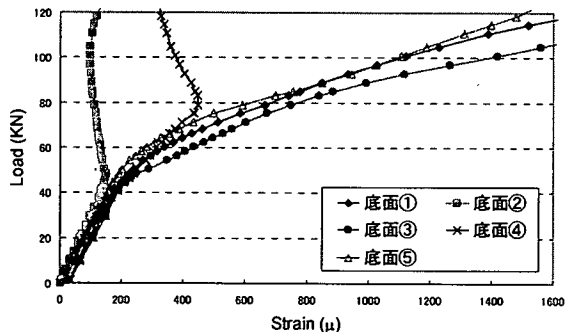


図-28 中型供試体の底面におけるコンクリートひずみの挙動 (スターラップ鉄筋比 0.8%)

中型・小型供試体においては、軸方向断面に対して、鋼材の拘束効果が十分に行き届いていると考えられる。鋼材の拘束効果は鋼材からの距離が小さいほど大きく、これらの供試体においては、大型供試体に比べて鋼材間距離が相対的に小さいからである。このような良好な拘束条件下では、辻らの実験結果²⁰⁾のように、スターラップを配置することで軸方向に膨張エネルギーが有効に発現し、膨張ひずみが増加するという事は起こらなかった。鉄筋比が高く軸方向の拘束も十分であるために、元々軸方向の膨張が困難であり、そのために局所化が開始する荷重にも明確な違いは現れなかったものと考えている。

c) 中型供試体の荷重-変位関係

スターラップによって多軸拘束をすることは、中型・小型の膨張コンクリートの曲げ部材に対して何の効果ももたらさないのであろうか。図-29には、中型供試体の荷重-中央たわみ関係を合わせて示した。この図から、スターラップを入れることによって、部材の剛性がかなり大きくなっていることが分かる。これは、同じコンクリートを用いたにも関わらず、スターラップを配置したことで膨張コンクリートの破壊エネルギーが大きくなった、と解釈することができる。普通コンクリートではこのようなことはあり得ない。実際、普通コンクリートにおいては、同程度の鉄筋比でスターラップを配置しても曲げひび割れ発生後、せん断ひび割れが発生するまでの剛性はほとんど同じであることを数値解析によって確認した。中型・小型供試体の場合は、引張縁において変形が局所化する荷重はほぼ同程度であったが、変形が局所化した後のひび割れ進展の度合いが異なる、と考えられる。この原因は、多軸拘束によって、曲げひび割れが進展する方向にもプレストレスが導入され、マトリックス部分のひずみ状態に多様なばらつきが3次元的にもたらされ、ひび割れの進展に大きなエネルギーが必要となったことである、と考えることができる。スターラ

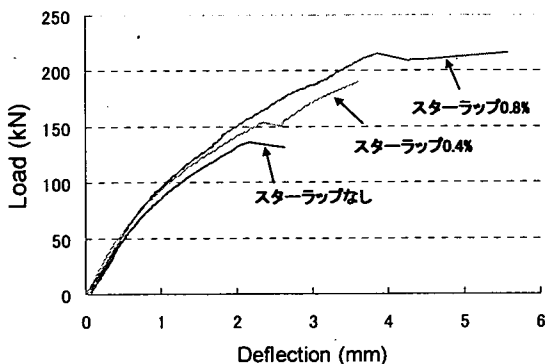


図-29 中型各供試体の荷重-中央たわみ関係の比較

ップがない場合でも、軸直交方向の膨張は自由膨張に比べると相当に抑制されていたと考えられる²⁹⁾が、スターラップによって直接プレストレスが導入されたことによって、その方向へのひび割れの進展は著しくエネルギーを要することになったのである。ひび割れが進展しにくくなることによって、表面のひび割れ幅の増加はさらに緩慢になると考えられる。

d) 小型供試体の引張縁ひずみの挙動

以上、中型供試体について考察を行ったスターラップによる多軸拘束の効果は、小型供試体においても確認

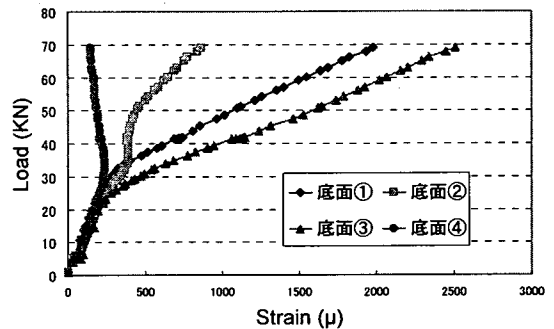


図-30 小型供試体の底面におけるコンクリートひずみの挙動 (スターラップなし①)

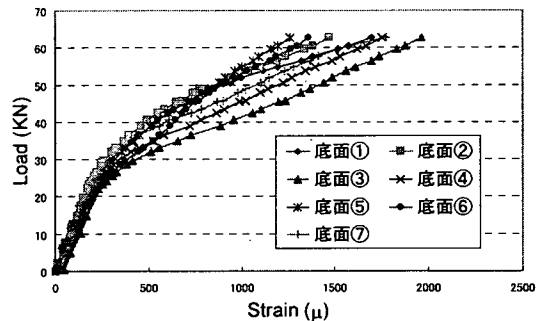


図-31 小型供試体の底面におけるコンクリートひずみの挙動 (スターラップなし②)

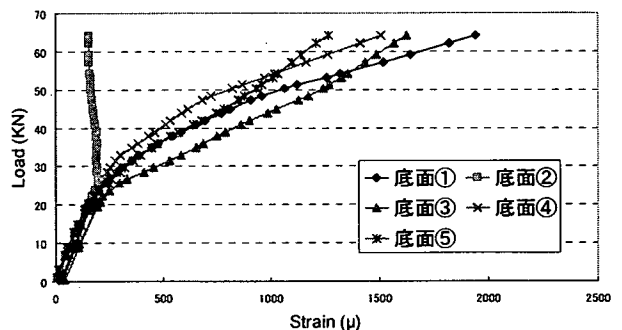


図-32 小型供試体の底面におけるコンクリートひずみの挙動 (スターラップ鉄筋比0.8%)

された。各供試体2つ同じものを作成し試験したが、**図-30**と**図-31**には、スターラップのない小型供試体の底面におけるコンクリートのひずみの挙動を示した。

図-32にはスターラップを配置したものについて、底面のひずみの挙動を示した。**図-30**のスターラップがない場合は先に定義した局所化が開始する荷重が33.0kN、**図-32**のスターラップ鉄筋比が0.8%の場合は26.6kNであった。ひずみが減少へ転じた後も、その減少の程度が非常に小さく、ここで定義する局所化の開始荷重だけで評価するのは難しいが、各ひずみゲージの値がばらつきは始めるのはスターラップの有無に関わらず30kN以下である。少なくともスターラップを配置したことで変形の局所化開始が抑制された結果にはならなかった。しかし、どちらの場合も、局所化が開始した以降に、ひび割れが貫通したと思われるひずみゲージの値は緩慢に増加し、ひび割れのない部分は、引張ひずみが急激に解放されることはなかった。**図-31**からは、さらにケミカルプレストレスト部材に特徴的な性状がうかがえる。これは、30cmの等モーメント区間に7本のひずみゲージ(ゲージ長60mm)を互いに重なるように貼りつけた場合の結果であるが、どのひずみゲージの上にもひび割れが貫通するように発生したことを示している。小型供試体においては、ひずみ勾配が大きいいため、ひび割れの進展がさらにエネルギーを必要とする。そのために変形が局所化せず、エネルギーの解放場所を求めてひび割れがより分散しやすくなると考えられる。これは、鋼繊維補強コンクリートにおいて、ひび割れ部の架橋効果によって破壊エネルギーが大きくなり、ひび割れ分散性が大きくなることと類似していると考えている。

e) 小型供試体の荷重-変位関係

図-33には、小型供試体の荷重-中央たわみ関係を比較したものを示した。中型供試体で見られたのと同様の傾向が見られ、部材の剛性としては、スターラップを配置した方がかなり大きくなっている。引張縁底面で変形の局所化が開始した以降のひび割れの進展に大きなエネルギーが必要であると考えられる。

(2) 大型供試体における多軸拘束の効果

スターラップを配置した大型供試体では、主鉄筋に貼りつけたひずみゲージによる膨張ひずみが有効に計測できず、多軸拘束の有無で軸方向膨張ひずみの違いを比較できなかった。しかし、その他のデータから、軸方向の挙動についても推察が可能である。

図-34には、スターラップのない大型供試体の主鉄筋中央部に貼りつけた2つのひずみゲージの挙動を示した。

図-35および**図-36**に、スターラップのない場合と

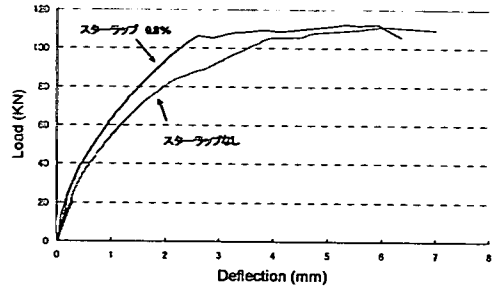


図-33 小型各種供試体の荷重-中央たわみ関係の比較

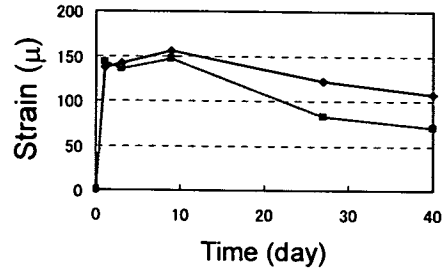


図-34 膨張ひずみの発見(大型供試体, スターラップなし)

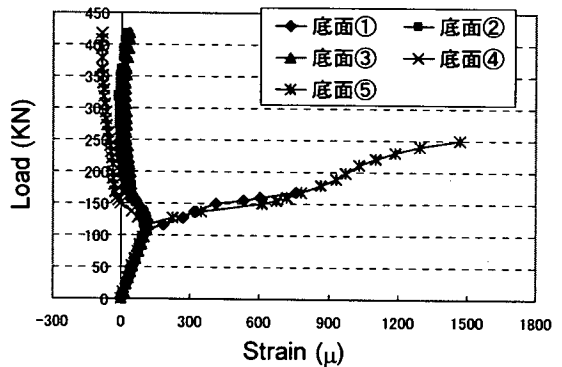


図-35 大型供試体の底面におけるコンクリートひずみの挙動(スターラップなし)

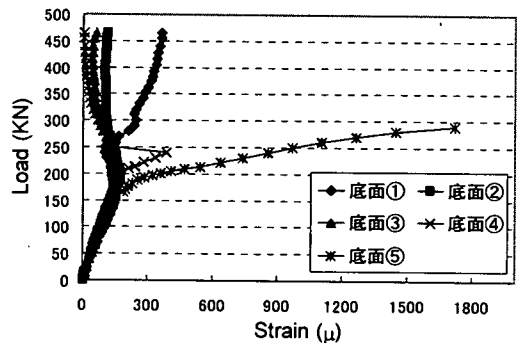


図-36 大型供試体の底面におけるコンクリートひずみの挙動(スターラップ鉄筋比0.8%)

ある場合について引張縁底面のコンクリートのひずみを示した。

中型・小型供試体とは異なり、スターラップを配置することで底面での変形の局所化が開始する荷重が大きく異なっている。スターラップを配置した供試体は局所化が開始する荷重が 162.3kN、配置しない場合は 110.3kN で荷重で 52kN 大きくなった。このように軸直交方向の拘束を与える目的で配置したスターラップによって、軸方向のひび割れ抵抗性が改善されたのである。この影響は、荷重-たわみ関係にも表れる。図-37 には、大型供試体の荷重-中央たわみ関係を比較したものを示した。150kN の手前あたりから両者の差が顕著になることが読み取れる。スターラップの有無で剛性が異なることは中型、小型の供試体でも見られたが、スターラップを配置することで局所化開始荷重が大きく改善されたことは、大型供試体に特有の現象である。

図-38 には、大型供試体におけるスターラップの効果を概念的に示した。大型供試体では、鉄筋間隔が広くなるため、断面内において軸方向鉄筋の拘束が及ぶ領域が相対的に小さくなる。また、本実験では、大型供試体のみ型枠の剛性が十分でなく、打設時に急遽型枠のはらみ防止対策を取った。このような状況では、型枠による

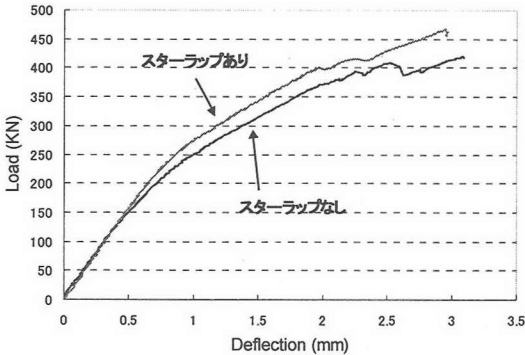


図-37 大型各種供試体の 荷重-中央たわみ関係の比較

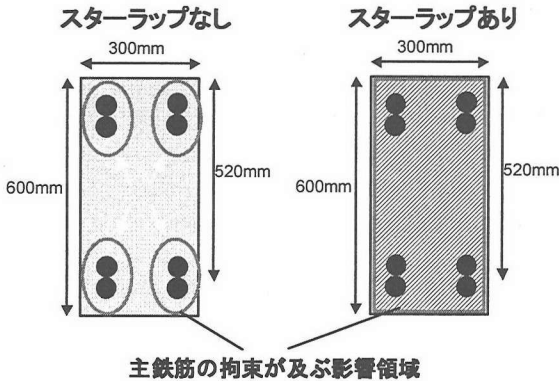


図-38 小型各種供試体の 荷重-中央たわみ関係の比較

横方向の拘束も十分でない。また、型枠による摩擦も小さく、摩擦の影響の及ぶ領域も相対的に小さくなる。従って断面の中央に近い部分では自由膨張に近い状態となりそこで発現する膨張エネルギーは、図-38 に示したように、主鉄筋で拘束された領域を外側へ押し出すように作用すると思われる。これに対して、スターラップを配置した場合は、軸直交方向の変形が著しく抑制され、また、軸方向の鉄筋の拘束が十分に作用する領域を拡大する役割も果たすと思われる。その結果、軸方向の品質も改善され、局所化開始荷重の大きな増加、という結果につながったと考えている。このようなスターラップの効果は辻によっても報告されている²⁰⁾。それによると、スターラップを配置した場合は、スターラップのない場合に比べて、部材端部付近では断面内の膨張ひずみ分布がより均一になり、軸方向鉄筋の膨張ひずみが大きくなる結果が示されている。また、部材端部から離れた領域では、もともと断面内の膨張ひずみ分布は均一に近いが、スターラップを配置することで、軸方向の膨張ひずみが大きくなる結果となっている。これも、スターラップを配置することで膨張エネルギーが軸方向に有効に発現した結果であると思われる。本実験では大型供試体の軸方向鉄筋の膨張ひずみを比較することができなかったが、スターラップを配置した方の軸方向鉄筋のひずみが大きかったものと確信している。

6. ケミカルプレストレスト部材の曲げひび割れ幅について

ここでは、膨張コンクリートの性状を踏まえた上で、ケミカルプレストレスト部材でひび割れ幅が小さくなることの機構について検討を行う。普通コンクリートのひび割れ幅については、過去多くの研究が行われているが、日本での代表的な研究として角田による研究があげられる^{20), 22)}。角田は理論的に普通コンクリートのひび割れ幅を検討しており、ここではこれを参考にして、ケミカルプレストレスト部材のひび割れ幅について考察を行う。

普通コンクリートのひび割れ幅は以下のように定式化できる²⁰⁾。

$$w = (\overline{\varepsilon_s} - \overline{\varepsilon_c}) \times l \quad (4)$$

$$\overline{\varepsilon_s} = \frac{\overline{\sigma_s}}{E_s} = \frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{\sigma_t}{E_s p_e} \quad (5)$$

$$\overline{\varepsilon_c} = (\overline{\varepsilon_{cp}} + \overline{\varepsilon_{ce}} + \overline{\varepsilon_{\phi}}) \quad (6)$$

(ただし、 w : ひび割れ幅、 $\overline{\varepsilon_s}$: ひび割れ間における鉄筋の平均ひずみ、 $\overline{\varepsilon_c}$: ひび割れ間のコンクリート表面の平均ひずみ、 l : ひび割れ間隔、 $\overline{\sigma_s}$: ひび割れ間における鉄筋の平均応力、 σ_s : ひび割れ位置の鉄筋応力度、

$\overline{\sigma}_t$: ひび割れ間の付着による鉄筋応力の減少量をコンクリート有効断面の平均応力に換算したものの、 E_s : 鉄筋のヤング係数、 ρ_e : 有効鉄筋比、 $\overline{\varepsilon}_{cp}$: ひび割れ発生前に受けた引張塑性残留ひずみ、 ε_{ce} : ひび割れ間の鉄筋から伝達される力によるコンクリート表面の弾性ひずみ、 $\overline{\varepsilon}_p$: クリープ・収縮によって生じた鉄筋とコンクリートとの間の弾性ひずみ差)

これによれば、コンクリート表面のひび割れ幅は、ひび割れ間隔と、ひび割れ間の鉄筋の平均ひずみ、コンクリート表面の平均ひずみによって支配される。鉄筋の平均ひずみはひび割れ間の付着による鉄筋応力の減少の影響を受け、コンクリート表面の平均ひずみは、引張塑性残留ひずみ、ひび割れ間の付着による弾性ひずみ、クリープ・収縮の影響を受ける。

これを参考にして、ケミカルプレストレスト部材におけるひび割れ幅の検討を行う。まず、ケミカルプレストレスト部材のひび割れ間隔について検討する。ひび割れ間隔が小さいほど、ひび割れ幅は小さくなる。プレストレスの影響でひび割れが発生しにくくなるが、一方で前章の小型供試体で見られたように、ひび割れが分散する傾向ももつ。ひずみ勾配の影響や、プレストレスの大きさの影響を受けるので、現時点では十分に解明できていない。仮にひび割れ間隔が普通コンクリートと同程度だとしても、プレストレスト部材においては曲げひび割れが小さくなる機構が存在する。

Tension Stiffeningが大きいことにより、式(5)において、鉄筋の平均ひずみが減少する。コンクリート表面における平均ひずみについて、角田は引張塑性残留ひずみと、付着による表面の弾性ひずみはほとんど無視できる程度であることを指摘している²⁾。しかし、ケミカルプレストレスト部材では、ひび割れ発生後の引張塑性残留ひずみが大きい。また、Tension Stiffeningが大きいことから、付着応力によるコンクリート表面の弾性ひずみも大きいと考えられる。これらの結果、4(2)でも検討したように、ひび割れ発生以降もコンクリート表面のひずみは大きな引張ひずみを保持するのである。ただし、この中には、普通コンクリートにおける乾燥収縮の逆で、プレストレスが解放されることによる戻り変形や、多少は拘束が解除された後の再膨張の影響も含まれていると考えられる。

既往の研究によれば、ケミカルプレストレスト部材のひび割れ幅が小さくなることの原因として、プレストレインの影響である、という説明に留まっていた^{1), 3)}が、以上のように多くの要因が影響する複雑な現象である。各要因の定量的な評価は、今後の研究が必要である。

7. まとめ

一軸引張試験と梁の曲げ試験を行い、ケミカルプレストレスト部材のTension Stiffening、曲げ性状、多軸拘束の効果、およびひび割れ幅について検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

1) ケミカルプレストレスト部材においては、Tension Stiffeningが大きいことが明らかとなった。一軸引張試験において、平均応力-平均ひずみ関係で、あたかも塑性棚を持つかのような性状を呈し、ひび割れ以降も応力の軟化が非常に緩慢であることが分かった。ただし、このような性状を引き出すためには、材齢初期に養生を十分にを行い、膨張ひずみを発現させることが重要である。

2) ケミカルプレストレスト曲げ部材の挙動は、普通コンクリート部材と異なり、また引張縁のコンクリートの挙動に違いが見られた。ケミカルプレストレスト部材では、ひび割れ発生に伴う剛性の変化が緩やかで、荷重-たわみ関係ではひび割れ発生荷重を明確に同定することが困難なほどであった。普通コンクリートに比べて、ひび割れ発生が開始した後に、ひび割れ間のコンクリートの引張ひずみが解放されにくいことが明らかとなった。また、ひび割れ発生後に急激にひび割れ幅が大きくなる普通コンクリートに比べて、ひび割れ幅の増加により大きな荷重を要することが明らかとなった。

3) ケミカルプレストレスト部材では、スターラップで膨張を多軸に拘束することによる効果が見られた。比較的部材断面が小さい場合は、ひび割れ発生が開始する荷重(変形の局所化が開始する荷重)が増加することはなかったが、荷重-たわみ関係において、ひび割れ発生荷重近傍以降の剛性に顕著な違いが見られた。これに対して、多軸に拘束を行うことでコンクリートの破壊エネルギーが大きくなったと考えることができる、という解釈を示した。また、部材断面が大きい場合は、スターラップの拘束によって部材軸方向に膨張ひずみが有効に発現し、ひび割れ発生荷重が開始する荷重の増加につながった。

4) ケミカルプレストレスト部材の曲げひび割れ幅が小さくなる機構について検討した。Tension Stiffeningが大きいこと、ひび割れ間のコンクリートの引張塑性残留ひずみが大きいこと、コンクリートの破壊エネルギーが大きいこと、ひび割れ部およびその近傍の鉄筋でプレストレインが解放されること、などがその主要因であると考えられる。普通コンクリートと比較した場合の、ひび割れ間隔については今後検討が必要である。

謝辞：本研究の実験を行うにあたっては、東京大学大学院(当時)の石村隆敏氏、東京大学(当時)の古谷明寿

氏にご協力頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 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, 土木学会論文報告集, 第225号, pp. 101-108, 1974. 5.
- 2) 岡村 甫, 池内武文: 膨張コンクリートを用いた曲げ部材におけるクリープの影響, セメント技術年報, No. 31, pp. 225-227, 1977.
- 3) 膨張コンクリート設計施工指針, 土木学会, コンクリートライブラリー75, 1993.
- 4) 細田 暁, 岸 利治: 膨張モルタルの非線形挙動とひび割れ抵抗性の機構について, 土木学会論文集, No. 683/V-52, pp. 13-29, 2001. 8.
- 5) 細田 暁, 岸 利治: 引張応力下における若材齢膨張コンクリートの非線形挙動とその機構, セメント・コンクリート論文集, No. 54, pp. 221-228, 2000.
- 6) 細田 暁, 岸 利治: 微視的機構に着目した膨張コンクリートのひび割れ抵抗性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 3, pp. 585-600, 2001.
- 7) 辻 幸和, 佐藤喜悦: 鋼繊維を用いた膨張コンクリートの膨張収縮性状および圧縮強度特性, セメント技術年報, Vol. 36, pp. 155-158, 1982.
- 8) 小林一輔, 野口哲男: 膨張コンクリートをマトリックスとした鋼繊維補強コンクリートの複合特性, 土木学会論文報告集, 第336号, pp. 169-177, 1983. 8.
- 9) 戸川一夫, 中本純次: 鋼繊維膨張コンクリート床版の力学的特性, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol. 8, pp. 433-436, 1986.
- 10) 辻幸和, 古川茂: 鋼繊維で補強した膨張コンクリート部材の膨張特性, 土木学会論文集, 第384号/V-7, pp. 111-118, 1987. 8.
- 11) 岡村 甫, 辻 幸和: ケミカルプレストレストコンクリート部材の力学的諸性状, セメント技術年報, No. 26, pp. 494-498, 1972.
- 12) 岡村 甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.
- 13) Okamura, H, Tsuji, Y., and Maruyama, K.: Application of Expansive Concrete in Structural Elements, *Journal of Engineering The University of Tokyo (B)*, vol.34, No.3, 1978.
- 14) 細田 暁, 岸 利治: 一軸方向の拘束条件を変化させた膨張コンクリートの圧縮挙動, 第54回セメント技術大会講演要旨, pp. 266-267, 2000.
- 15) 國分正胤, 後藤幸正, 岡村 甫: 異形鉄筋とコンクリートとの付着に関する研究, コンクリートライブラリー, 第2号, 1962. 12.
- 16) 岡村 甫, 丸山久一, 辻 幸和: 膨張コンクリートを用いた曲げ部材の持続載荷試験, セメント技術年報, No. 31, pp. 233-237, 1977.
- 17) 破壊力学の応用研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 1993. 10.
- 18) Neville.A.M.: コンクリートの特性, pp. 408-410, 技報堂出版株式会社, 1979.
- 19) コンクリート構造物のための破壊力学の現状, コンクリート工学, Vol. 37, No. 9, 1999. 9.
- 20) 辻 幸和: 内的小および外的一軸向束を受ける膨張コンクリートの膨張特性, 土木学会論文集, 第378号/V-6 (ノート), pp. 279-282, 1987. 2.
- 21) 角田与史雄: 鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅, コンクリート・ジャーナル, Vol. 8, No. 9, 1970. 9.
- 22) 角田与史雄: 曲げを受けるコンクリート部材のひびわれとたわみに関する研究の現状, 土木学会論文集, 第384号/V-7, 1987. 8.
- 23) 辻 幸和: コンクリート工学における膨張エネルギーの評価方法, コンクリート工学, Vol. 26, No. 10, pp. 5-13, 1988. 10.

(2002. 3. 12 受付)

CHARACTERISTICS OF CHEMICALLY PRESTRESSED MEMBERS IN FLEXURE AND EFFECTS OF RESTRAINT IN THREE DIRECTIONS

Akira HOSODA and Toshiharu KISHI

In this paper, the characteristics of chemically prestressed members in flexure and the effects of restraint in three directions are experimentally investigated. When sufficiently cured in early ages, chemically prestressed members have large tension stiffening effect, and in flexural members, the stiffness of members near cracking and the behavior of concrete at the tensile end are different from those of normal concrete. The effects of restraint in three directions are observed in flexural behaviors, and the effects are remarkable especially when section size is large. Effects of peculiar characteristics of expansive concrete on the decrease of crack width are discussed.