

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

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)

本研究は、引張応力下における膨張コンクリートの非線形挙動の機構解明を目指したものである。曲げ部材、一軸引張部材に対して除荷過程を含む繰返し載荷を行い、膨張モルタルでは最大経験応力の増加とともに除荷時剛性が顕著に低下し、除荷後に大きな残留ひずみが発生すること明らかとなった。これらの実験結果をもとに、引張応力下の膨張モルタルに特有な非線形挙動を合理的に説明するコンセプトを提案した。ケミカルプレストレスト部材のひび割れ抵抗性は、プレストレスによる引張強度の増加のみならず、ひび割れ発生前の変形能力が大きいことにより著しく高くなることを示した。

Key Words : expansive concrete, nonlinear behavior, initial strain distribution, cyclic loading, residual strain, tensile stiffness during unloading

1. はじめに

膨張材は収縮や荷重によりコンクリートに発生するひび割れを低減する材料として知られており、セメントの一部に置換して用いるため、使用方法は簡単である。しかし、現状ではプレキャスト製品を除いて一般的に構造物に利用されているとは言えない。この主たる理由は、膨張コンクリートの種々の長所が十分に認識されていないことと、それらの効果の定量評価が困難であることと思われる。

膨張材に関しては過去に膨大な量の研究が行われており、ケミカルプレストレスト部材ではひび割れ発生が抑制されるのみならず、ひび割れ幅が著しく小さくなることやせん断耐力が向上すること、また機械的プレストレスに比較するとプレストレスがクリープで低減することがほとんどない、などの点でコンクリートの性能を著しく改善することが報告されている¹⁾²⁾。また、筆者らの研究でも、ケミカルプレストレスト部材は鉄筋降伏後の変形性能が普通コンクリート部材より改善されることも明らかとなっており³⁾、膨張コンクリートを用いることにより、RC部材の構造及び耐久性能を相当高めることが可能である。

しかし、膨張コンクリートが広く普及するためには、

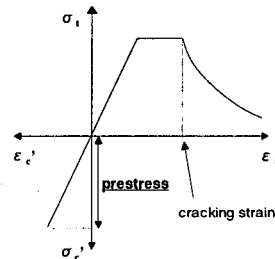


図-1 機械的プレストレスの定量評価

このような種々のメリットを事前に定量評価することが必要であり、特にケミカルプレストレスト部材にひび割れが入るか入らないかを高い精度で判定する手法の開発が必要と考えられる。膨張材の反応に伴って導入されるケミカルプレストレスは、膨張材の量、配合、環境条件等に大きく影響されるため、事前の定量評価が困難である。しかし、これは、配合・養生条件・材齢が一定であれば、「単位体積あたりの膨張コンクリートが拘束鋼材に対してなす仕事量が一定である」という考え方を示し、標準試験と組み合わせるケミカルプレストレスト部材の膨張ひずみを算定する手法を提案した⁴⁾。この考え方は自由膨張や過小鉄筋比を除けば適用可能であるが、基本的には膨張ひずみの発現が予測できれば、部材断面に平

均的に導入される圧縮応力が分かり、それによって、ケミカルプレストレスト部材のひび割れ発生荷重が計算できるとの考え方が背景にある。しかし、材齢初期に著しい体積変化を受けたケミカルプレストレスト部材が、機械的プレストレスト部材と同様に引張強度がプレストレス増加し、その引張強度までは線形な挙動をする(図-1)という根拠は存在しない。実際、膨張コンクリートは引張応力下で非線形な挙動を示し、伸び能力が大きいためにプレストレスの効果以上にひび割れ耐力が向上することを岡村らは指摘している¹⁾。ただし、このメカニズムは全く解明されておらず、膨張コンクリートの長所が十分に理解されていないのが現状である。

本研究は、依然として解明されていない引張応力下における膨張コンクリートの非線形挙動とひび割れ抵抗性向上の機構に焦点を絞ったものである。最終的には、膨張コンクリートの機構解明によりケミカルプレストレスの効果を定量的に評価する手法の開発につなげ、膨張コンクリートが有効かつ合理的に広く一般構造物に用いられることを念頭においている。

2. 膨張コンクリートの引張挙動に関する既往の研究

過去、膨張コンクリートに関する膨大な研究の中で、膨張コンクリートの非線形挙動に焦点を絞ったものはごく限られた数しか存在しない。圧縮性状に関しては、圧縮強度・弾性係数が低下すること^{5), 6)}、普通コンクリートと比較すると膨張材量の増加に対して非線形に単位圧縮クリープひずみが増大すること⁷⁾などが報告されているが、引張応力下における挙動を扱ったものはごくわずかである。

岡村らは、一軸方向に材齢 28 日まで拘束した後、拘束を解除してただちに行った曲げ試験におけるコンクリート引張縁のひずみと荷重との関係を調べた¹⁾。普通コンクリートでは最大荷重近くまで弾性的挙動を示すのに対し、膨張コンクリートでは低荷重時からひずみの増加が大きく、塑性的挙動の卓越することを指摘した。引張応力下でひび割れ発生までの変形性能が大きいことは、コンクリートに伸び能力があることを意味し、とくに鉄筋比の高い場合は、RC部材のひび割れ抵抗性に大きく影響するものである。しかし、岡村らは非線形挙動の機構については考察していない。また、載荷前に拘束を解除しているために、鋼材により拘束を受けたケミカルプレストレスト部材については別途確認する必要がある。

丸山らは、若材齢の膨張コンクリートに対して一軸の引張試験を行った^{8), 9)}。これは、材齢 7 日以下におい

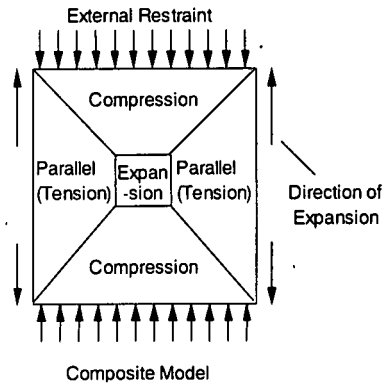


図-2 膨張コンクリートの複合モデル

て、引張試験直前まで拘束膨張をさせた膨張コンクリートを、拘束を解除した後に直接引張試験を施したものである。拘束を解除した膨張コンクリートは、強度の低下やひび割れ発生時の引張ひずみが増大すること、などの特徴がわかり、それに対する材齢、膨張材添加量、養生条件、養生温度などの影響を調べている。しかし、引張応力下における膨張コンクリートの非線形挙動の機構を明らかにするには至っていない。また、載荷前に拘束を解除しており、本来、最も必要な情報である拘束されたままの膨張コンクリートの挙動については検討対象となっていない。

以上が膨張コンクリートの引張性状を扱った過去の研究である。実験事実として、膨張コンクリートの引張応力下における非線形挙動が示されたが、そのメカニズムは解明されていない。しかも、拘束された状態のケミカルプレストレスト部材については引張応力下における実験結果も存在しない。

また、引張荷重が作用した場合の挙動を取り扱ったものではないが、膨張コンクリートの挙動をモデル化して解析的なアプローチを行ったものとして、岡村らが提案した「複合モデル¹⁰⁾」がある。本研究を行う上で多くの示唆を得たため、ここでその概要に触れておくことにする。

「複合モデル」は、拘束鋼材がない自由膨張の場合も含めて任意の拘束鋼材比の膨張コンクリートの膨張ひずみを予測するためのものである。膨張コンクリート内で実際に起こっていると想定される現象に立脚してモデル化したものであり、図-2 に示すように圧縮、引張、膨張の3種類の要素からなる。

図-2 は、一軸方向の拘束を想定し(拘束がない場合は自由膨張)、拘束方向の膨張をモデル化したものである。膨張コンクリートを膨張要素、圧縮要素、引張要素の3つの要素に分け、各要素に対して弾性係数、クリープ特性を与える。圧縮要素は膨張要素と直列に配置され、膨張要素の膨張に伴って圧縮力が作用する。一方、引張

要素は膨張要素と並列に配置され引張力が作用する。拘束鋼材の影響は外的拘束という形で考慮される。以上の要素の組み合わせに対して、膨張材を表す膨張要素に時間軸で発現する膨張ひずみ（潜在膨張ひずみ）を仮定する。微小時間に発現する膨張ひずみに対して、各要素に作用する力の釣り合い・ひずみの適合条件を考慮することにより、膨張コンクリート全体に発現する膨張ひずみ（顕在膨張ひずみ）を算定する。この研究により、自由膨張も含めた任意の拘束条件に対して膨張挙動を表現するためには、膨張コンクリート内では常に圧縮・引張を受けている部分が混在しており、力の釣り合いが取れていると考えることが妥当であることが示されたと言える。しかし、各材料特性は状況に応じて時間の関数として設定する必要があり、配合や拘束条件等に依存する膨張コンクリートのひび割れ抵抗性の程度を一般化するには至っていない。

3. 薄梁を用いた膨張コンクリートの非線形挙動の分析

(1) 実験の目的

2章で述べたように、過去には、膨張コンクリートの非線形挙動そのものを実験結果として示した研究はほとんどなく、普通コンクリートとは著しく異なる非線形挙動のメカニズムも明らかにされていない。そこで、本章では、薄梁の曲げ試験を行い、普通モルタル部材、拘束のない自由膨張部材、鋼材で内的に拘束を行ったケミカルプレストレスト部材の挙動を比較検討することで、膨張モルタルの非線形挙動を実験結果として示し、その機構の考察を行うことにする。過去の研究でも膨張コンクリート梁の曲げ試験は数多く行われているが、ここでは除荷・再載荷を含む繰り返し載荷をひび割れ発生まで行ったのが最大の特徴であり、また複数の材齢について行った実験結果の比較検討から、膨張モルタルの非線形挙動の分析が可能になったのである。

(2) 実験方法

本節では、厚さの薄い梁供試体に対して除荷・再載荷を含む繰り返し曲げ載荷を行った。使用材料は表-1に示した。表-2に示す配合の普通モルタルと、セメント重量の11%を膨張材で置換した膨張モルタルを用いて供試体を作成した。すべての供試体で水粉体比は50%である。供試体は普通モルタル部材(NM)、膨張モルタルで作成し鋼材による拘束を行わない自由膨張部材(FE)、鋼材で内的拘束をしたケミカルプレストレスト部材(CP)の3種類とした（以降、実験結果の図においても、NM, FE,

表-1 使用した材料

セメント	普通ポルトランドセメント 比重:3.15
細骨材	比重:2.47 吸水率:1.60
膨張材	CSA系膨張材(構造用) 比重:2.90

表-2 モルタルの配合

	W/(C+E) (%)	E/(E+C) (%)	単位置 (kgf/m ³)			
			W	C	E	S
普通モルタル	50	0	409	818	0	818
膨張モルタル	50	11	408	726	90	816

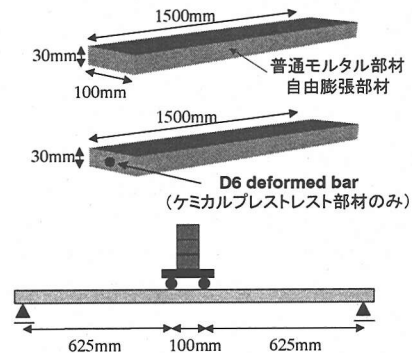


図-3 部材の諸元と載荷方法

(CPの表記を用いる)。ケミカルプレストレスを導入した部材は膨張モルタル製梁の断面中央（中立軸位置）にD6異形鉄筋を一本配置した。断面内の鉄筋比は1.05%である。梁断面は幅100mm、厚さ30mmで部材長さは1500mmである（図-3）。部材長さを1500mmとしたのは、辻らの研究により、RC部材端面より約500mm以上離れた断面内においては膨張ひずみ分布がほぼ一様と見なせることが示されており¹¹⁾、これを考慮したためである。また、比較的軽い重りで行った除荷・再載荷を含む複雑な載荷履歴を短時間で与えられるように上記のような部材寸法とし、小さな部材であるために材料にはモルタルを使用した。水粉体比50%のモルタルではブリーディングも問題となる可能性があるが、供試体厚さは30mmと薄く、実際にブリーディングはほとんど観察されなかった。セメントの11%を膨張材で置換する配合は、単位セメント量が300kg程度のコンクリートでは、ケミカルプレストレス導入を目的とする場合よりも膨張材量が少なく、収縮補償程度に用いられる配合と考えるとよい。ただし、本章の実験では、モルタルを用いたために単位膨張材量は大きく、発現する膨張ひずみは大きくなる。

供試体は約20°Cの実験室内で打設し、材齢1日で脱型後、載荷材齢まで約20°Cの水槽内で養生を行った。脱型

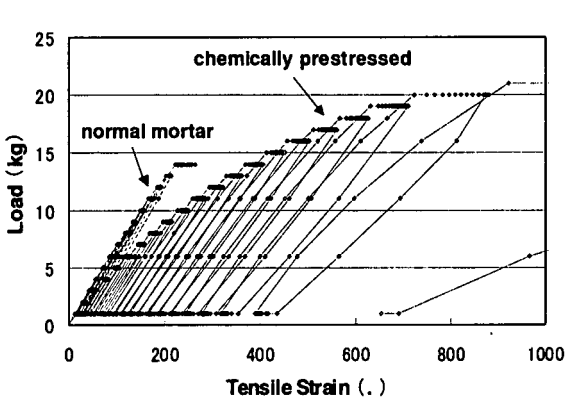


図-4 荷重と引張縁ひずみ関係(材齢3日)

までの間は、供試体の全面が型枠に接している状態であり、水分の出入りはほとんど生じていない状態である。載荷材齢は1, 3, 7, 21日の4つで、載荷時は供試体表面をすべてエポキシ系樹脂で薄くコーティングし、水分の出入りを極力制限した。供試体作成時から、養生期間および載荷中に至るまで乾燥による影響を極力排除したのは、収縮の影響をできるだけ取り除いた状況で膨張モルタル部材の挙動を把握することを目的としたからである。

載荷は2点載荷で、支点間距離が1350mm、等モーメント区間が100mmである(図-3)。等モーメント区間の上面と下面(部材幅中央位置)のモルタル表面に直接ひずみゲージ(ゲージ長60mm)を貼りつけ、梁の圧縮縁と引張縁のひずみを計測した。重りを用いて瞬間的に載荷・除荷を繰り返した。また、載荷後および除荷後にその状態を1分間保持することで、一定荷重下における時間依存変形も計測した。材齢1日を起点として測定した部材中央部モルタル表面の膨張ひずみは、ケミカルプレストレスト部材で、1000 μ (3日)、1150 μ (7日)、1200 μ (21日)、自由膨張部材で、3100 μ (3日)、3300 μ (7日)、3500 μ (21日)であった。

(3) 弾塑性破壊モデル¹²⁾を参考にした非線形挙動の分析

材齢3日における普通モルタル部材とケミカルプレストレスト部材の実験結果を図-4に示した。これは、荷重と引張縁ひずみ(ゲージ長60mmで測定)の関係である。ひび割れ発生まではほぼ線形挙動を示す普通モルタルに対して、ケミカルプレストレスト部材は著しい非線形性を示しており、3つの特徴的な事項が明らかとなった。

まず、ケミカルプレストレスト部材では経験荷重の増加に伴い除荷時剛性が低下した。除荷過程はほぼ弾塑性的な挙動をするため、除荷時の剛性が低下することは外力に抵抗できる体積が徐々に減少していることを意味する¹²⁾。図-5で定量的に見ると、普通モルタルでは除荷時の単位荷重あたりの変形がほぼ一定であるが、ケ

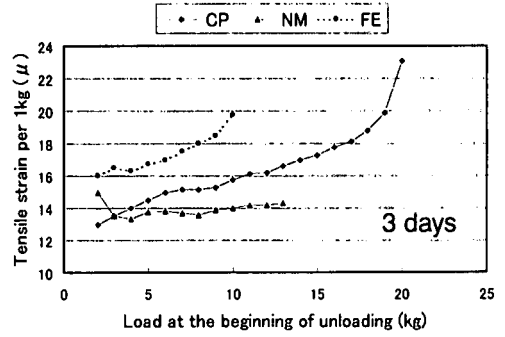


図-5 除荷時の単位荷重あたりの変形(引張縁, 材齢3日)

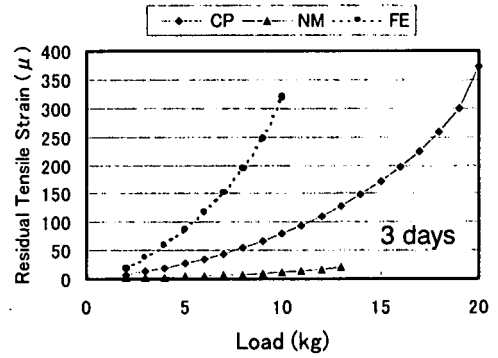


図-6 除荷後の残留ひずみ(引張縁, 材齢3日)

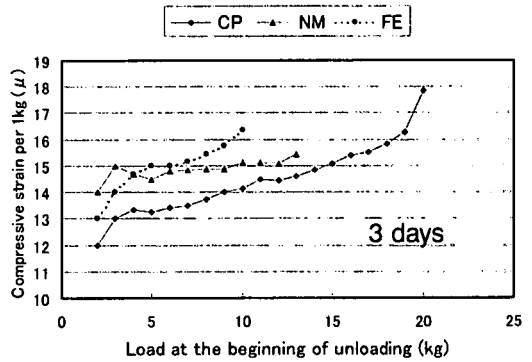


図-7 除荷時の単位荷重あたりの変形(圧縮縁, 材齢3日)

ミカルプレストレスト部材および自由膨張部材では単位荷重あたりの変形が徐々に増加しており、剛性が低下しているのが明瞭である。

次に特徴的な事項は、除荷後に顕著な残留ひずみが発生することである。材齢3日においては、ひび割れ発生直前には全変形の半分程度が残留ひずみとなっている。図-6には、経験荷重と除荷後(60秒経過後)の引張縁における残留ひずみを示した。残留ひずみがほとんど見られない普通モルタル部材に対し、ケミカルプレスト

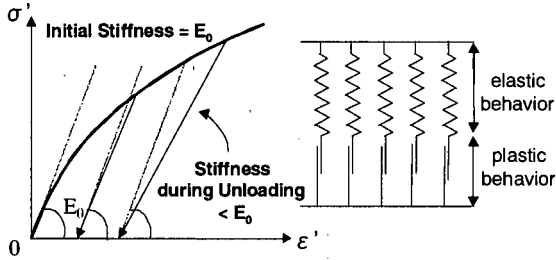


図-8 弾塑性破壊モデル¹²⁾

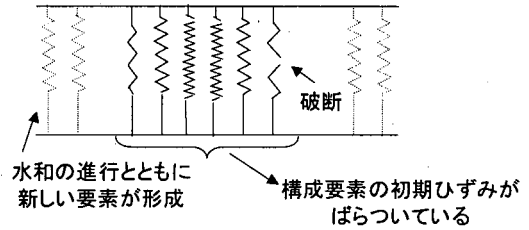


図-9 微小構成要素と初期ひずみのばらつき

スト部材では著しい残留ひずみが発生している。

最後に、荷重を保持している間に著しい変形が進行することも膨張コンクリート部材にのみ観察される大きな特徴であり、材齢3日のケミカルプレストレスト部材では、ひび割れ発生に近い荷重では、1分間に160 μ もの変形が見られた。ただし、後述するが、このような著しい変形は、ケミカルプレストレスト部材に配置した鉄筋の位置が中立軸に近い薄梁だからこそ確認できる現象であり、引張縁近傍に鉄筋が配置された一般的なケミカルプレストレスト部材ではこれほど著しい変形は起こらないと考えている。

ケミカルプレストレスト部材の引張縁で見られた挙動は、圧縮縁でも観察された。図-7には、圧縮縁における除荷時の単位荷重あたりの変形を示した。圧縮縁でも膨張コンクリート部材の剛性の変化が見られる。しかし、筆者らの研究により、曲げ部材におけるひび割れ発生程度の圧縮応力レベルでは、膨張モルタルの挙動は普通モルタルと大きな違いはないことが明らかとなっている¹³⁾。そのため、ケミカルプレストレスト部材で観察された特徴的な挙動は、引張側に起因するものであり、結果として圧縮縁の挙動に影響が出たものと考えた。膨張コンクリートが純粋な引張応力下で非線形性を示すことは、後に4章で詳細に論じる。

このように、経験応力の増加に伴って除荷時剛性が低下し、残留ひずみが発生するという機構は、圧縮応力下での普通コンクリートでも見られるものである。そこで、圧縮応力下における普通コンクリートの非線形挙動をモデル化した弾塑性破壊モデルを参考にして、引張応力下における膨張コンクリートの非線形挙動を分析することにした。

弾塑性破壊モデルでは、コンクリートの非線形挙動を「塑性」と「破壊」の二つの要因で捉えている。「塑性」はいわゆる非回復な変形を伴う特性であり、「破壊」は外力に抵抗する体積が減少する非可逆な損傷である。圧縮応力下における弾塑性破壊モデルによる「塑性」とは、気泡の圧壊やセメント硬化体と骨材との境界でのすべり等に起因するエネルギー吸収を、また、「破壊」はコンクリート内のひび割れの進展や局所的な座屈

によって弾性エネルギー保存領域が消失して行く過程をモデル化したものとしている。ここで「塑性」と「破壊」は、それぞれ意味する物理現象が必ずしも相互依存しないものであるが、両者ともに最大経験応力下で生じる現象である。処女載荷時には、塑性および破壊が進行するためコンクリートは非線形な挙動を示す。しかし、除荷および再載荷時は線形挙動に近く、塑性変形は残留ひずみとして、また破壊は除荷時剛性の低下として表れる(図-8)。弾塑性破壊モデルでは、一軸応力方向に対してコンクリートを並列な微小構成要素の集合と考え、微小構成要素の強度分布がばらつきを持つとしている。すなわち、個々の微小構成要素がそれぞれ固有の強度で破壊するために、過去の最大ひずみに応じて除荷剛性が徐々に低下すると考えているのである。ただし、前川らによると、この仮説は実際にはコンクリートを構成している骨材やセメント硬化体の形状や硬さなどの多様性によって局所的に作用する応力がばらつくことの影響も含んでおり、むしろその影響が大きいとしている。

以上に概説した圧縮応力下の構成則である弾塑性破壊モデルを参考にして、一軸引張応力下の膨張コンクリートを並列に配置した微小構成要素の集合体として捉えることにした。そして、これらの微小構成要素の初期ひずみがばらついているというコンセプトを導くに至ったのである。

(4) 引張応力下において膨張コンクリートが示す非線形挙動を説明するコンセプト

膨張コンクリートにおいて、引張応力の増加とともに除荷時剛性が低下するという現象を説明するためには、それぞれの微小構成要素が異なる特性を持つ必要がある。弾塑性破壊モデルでは、微小構成要素の強度分布がばらつくとしたが、膨張コンクリートに対しては、各微小構成要素の特性は同じであるが、引張応力が作用する直前において、微小構成要素がそれぞれ異なる初期ひずみを持つ、と考えた。微小構成要素はセメントの水和の進行とともに形成されるものとし、微小構成要素の集合によって握りこぶし程度のコンクリートを表現することとした。そして、それぞれの初期ひずみがばらついているこ

とによって、骨材界面の脆弱部や後述する膨張材粒子周辺の損傷と、ペーストマトリックスに導入される大きな圧縮ひずみなどを表現しようとしたのである(図-9)。

膨張材の水和反応は固相反応とされており、膨張材の周囲に生成する膨張性生成物が周囲のセメントマトリックスおよび骨材を押し広げる¹⁴⁾。前述のように、岡村らの複合モデルでは、膨張材を表す膨張要素が膨張ひずみを発現すると、周囲のコンクリートの一部には圧縮応力が作用し、残りの部分には引張応力が作用すると仮定した。そして、このように考えることで、拘束鋼材のない自由膨張の場合でも、内的な力の釣合を無理なく表現することが可能であった。

また、自由膨張の場合、光学顕微鏡によって膨張材粒子の周囲に微細ひび割れが観察されることが報告されている¹⁵⁾。すなわち、微視的には引張応力が作用する箇所があり、場合によっては微細ひび割れも生じ得るのである。外的拘束のない自由膨張の場合は、膨張材によりもたらされた圧縮力に釣り合う引張力が内部組織に作用し、コンクリート内部で釣合いが取れている。一方、拘束膨張の場合は、鋼材が引張力のほとんどを受け持つために、それに見合う圧縮力がコンクリートに蓄積されている。拘束膨張の場合、コンクリートには平均すると圧縮力が作用しているが、微視的には内部の応力状態はばらついていると考えられる。実際、筆者らの行った観察によれば、拘束を受けた膨張モルタルにおいても、拘束方向と直交方向にもわずかながら微細なひび割れが認められた。これは、拘束膨張においても局所的には引張応力が作用していることを示すものである。このように、膨張コンクリート内部の微視的な応力状態は圧縮を受ける箇所もあれば、引張を受ける箇所もあるものと考えられる。これらの考察に基づき、膨張コンクリートにおいては、微小構成要素の初期ひずみがばらつきを持っているというコンセプトを構築するに至ったのである。

さて、引張応力下の膨張コンクリートを、応力方向に並列に配置した微小構成要素で表現し、いくつかの仮説を置くことで、非線形挙動を定性的に説明することが可能となる。ここでは、引張応力下では応力の流れに乱れが生じにくいことを考慮して、引張外力が作用した場合は各微小構成要素に均一な引張ひずみが作用する、という仮説を立てた。また、もう一つの仮説として、微小構成要素には引張外力が作用したときに一定の破壊基準があり、これは材齢によらないとした。図-10には、膨張材の膨張作用によって初期ひずみがばらついた微小構成要素群を模式的に示した。図-10の横軸は微小構成要素に導入される初期ひずみを、縦軸はそれぞれの初期ひずみをもつ微小構成要素の数を表している。また、横軸の原点は初期ひずみがゼロである点である。例えば自由膨

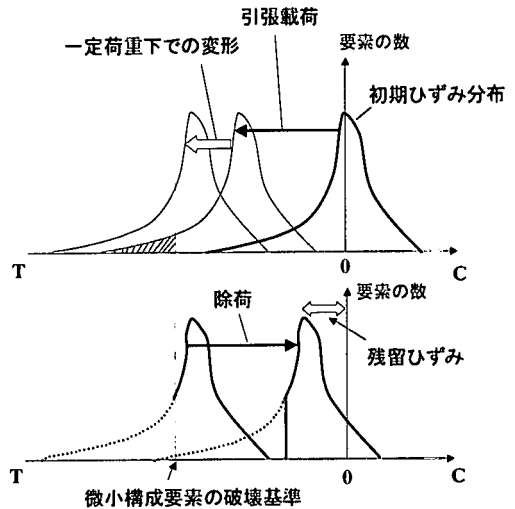


図-10 膨張コンクリートの非線形挙動の機構

張コンクリートについて考えれば、釣り合い位置を基準として、それぞれの微小構成要素は圧縮や引張の初期ひずみを持ち、各微小構成要素に働く力の合力はゼロとなり、釣り合いが取れているのである。

図-10において、一軸の引張力が作用した場合、それぞれの微小構成要素には均一な引張ひずみが作用し、図-10上においては、ひずみ分布が一様に引張側にシフトすることで表現される。その際に微小構成要素の引張破断ひずみを越えたものは、次々と破断する。引張力の作用によって、微小構成要素の破断が生じると、外力に抵抗できる体積が減少するため、除荷時の剛性は低下することになる。また、一部の微小構成要素が破断しているため、除荷過程では、元の初期位置に戻る前に部材内で釣り合いが取れることになる。この除荷後の釣り合い位置と初期位置の差が残留ひずみとなるのである。また、撤荷後に荷重を保持しているわずかな間に生じる変形に対しても、膨張コンクリートの場合は、破断基準の近傍にある微小構成要素が破断する。本来引張力を受け持つべき要素が破断するので、部材内の力の釣り合いが取れるまでさらに変形が進行する。このように、初期ひずみのばらつきという概念によって、膨張コンクリートに特有な現象を定性的に説明することが可能である。

微小構成要素にもたらされる初期ひずみのばらつきは、拘束条件、材齢、配合、環境条件などに大きく依存するが、ここでは膨張材の本質的な役割を論じるという意味で、初期ひずみのばらつきに及ぼす拘束条件と材齢の影響について筆者らのコンセプトを説明する。

普通コンクリートの場合、膨張材の作用がないため、初期ひずみをほとんど持たない微小構成要素が形成される。材齢が経過すると微小構成要素の数が増えるだけで、材齢によって初期ひずみ分布の形態が特に変わる

ことはなく、釣合い位置を中心に鋭く上がった分布になるものと思われる。

次に自由膨張の場合は、膨張材の反応が著しく活発な時期は、微小構成要素に導入される初期ひずみのばらつきも大きく、破壊基準を越える引張りひずみを与えられたものは破断に至る。ただし、コンクリート内部で釣合いが取ればよいので、大きな圧縮ひずみが蓄積されることはない。材齢が経過すると膨張材の反応速度が低減し、釣合い位置に近いところに多量の微小構成要素が生成され、最終的には普通コンクリートに近い、釣合い位置近傍に大きな山を持つ分布状態になると考えられる。

最後に拘束された膨張コンクリートの場合であるが、膨張材の反応が活発な時期は、鋼材も大きな伸びを示し大きな引張力を負担するため、これに見合う大きな圧縮ひずみが蓄積される。この過程においても、コンクリート全体の変形は膨張であるため、局所的には引張応力が作用しており、引張りひずみをもつ微小構成要素も存在し、初期ひずみの分布は圧縮から引張まで広範囲に渡っていると考えられる。材齢が経過し、膨張材の反応の停滞とともに、新たに生成する微小構成要素に導入される初期ひずみはばらつきが小さくなるが、それ以前に蓄積された圧縮ひずみが依然として保持されるため、全体の分布はばらつきが保たれると考えられる。

次節では、このコンセプトに基づき、薄梁の実験結果の詳細な分析を行う。

(5) 実験結果と考察

a) 除荷時剛性の低下

図-5に示した除荷時剛性の変化は、初期ひずみがばらついているために、引張縁において引張応力の増加に伴い、徐々に微小構成要素の破断が生じ、除荷時剛性の低下につながったものと考えられる。図-11~図-13には、材齢1, 7, 21日における引張縁の除荷時剛性の変化を示した。いずれの材齢においても、普通モルタルの場合は、初期ひずみのばらつきがほとんどないため、荷重の増加に伴う剛性の変化がほとんど認められない。それに対して、ケミカルプレストレスト部材では、材齢が小さいほど初期ひずみのばらつきが大きく、そのため荷重が増加した場合の除荷時剛性の変化が著しい。材齢が経過すると、剛性の変化の度合いは小さくなるが、鋼材の拘束により導入された圧縮ひずみが保持されるため、特にひび割れ発生近傍において剛性の低下が認められる。すなわち、材齢21日においても、初期ひずみがばらついていることの影響が実験結果に表れているのである。また、自由膨張部材では、材齢3日程度では、初期ひずみにばらつきがあるため、除荷時剛性が変化している。しかし、材齢7, 21日になると、初期ひずみのばら

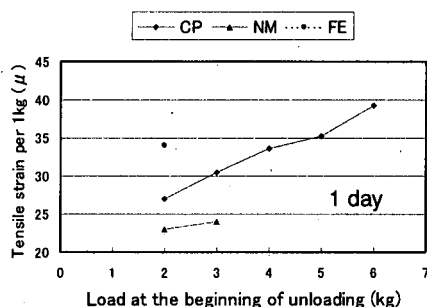


図-11 除荷時の単位荷重あたりの変形 (引張縁, 材齢1日)

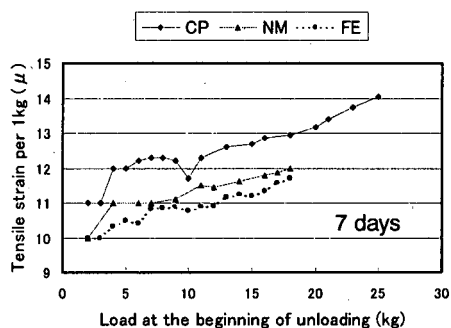


図-12 除荷時の単位荷重あたりの変形 (引張縁, 材齢7日)

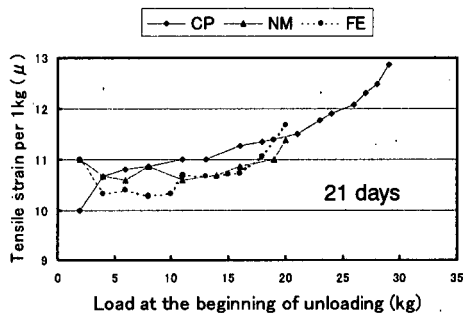


図-13 除荷時の単位荷重あたりの変形 (引張縁, 材齢21日)

つきが小さい微小構成要素の影響が卓越し、ほぼ普通モルタルの挙動に近くなるため、除荷時剛性がほとんど変化しなくなると解釈できるのである。

b) 膨張モルタルに特有な塑性変形と時間依存変形

図-4に示したように、ケミカルプレストレスト部材では、一定荷重下で著しく変形が進行し、また大きな残留ひずみが発生している。特に、ひび割れ発生直前では一定荷重を保持した状態で引張縁では1分間に150μ以上もの変形を示している。自由膨張部材もケミカルプレストレスト部材には及ばないものの、大きな非線形挙動を

示す。図-14には、材齢3日において、载荷した荷重とその荷重を1分間保持した場合の引張縁での変形量を示した。この図は、各荷重を载荷したそれぞれの1分間における変形量を示しており、例えばケミカルプレストレスト部材では、15kg载荷した後の1分間に40 μ の変形が生じたことになる。普通モルタル部材においては、荷重と1分間の変形量がほぼ線形関係にあるが、ケミカルプレストレスト部材、自由膨張部材では変形量が非線形的に増加しており、特にひび割れ発生付近における変形量は著しく大きくなっている。ひび割れ発生に近い引張応力を受けると、ひずみ分布において引張破断基準を越える微小構成要素の数が急激に多くなるために、著しい変形が進行すると考えられる。実際、ケミカルプレストレスト部材は21kgの荷重を加えたときにひび割れが発生したが、20kgを载荷した後の1分間で150 μ 以上の変形を示し、部材内での力の釣合いが保てない様子が観察された。

図-4に示したように、20kg载荷時には引張縁では800 μ 程度の引張ひずみを示しており、かなりの量の微小構成要素が引張側で破断に至ったために急激に力の釣合いを失ったものと考えられることができる。

図-15は、材齢3日におけるケミカルプレストレスト部材の、一定荷重を1分間保持した際に発生した引張縁ひずみと、その荷重を除荷した後の1分間に戻った変形量を合わせて示したものである。図-16には材齢3日の普通モルタルについて同様のものを示した。

図-15より、ケミカルプレストレスト部材においては、小さい荷重においても一定荷重下で発生した変形のうち、非回復な成分があることが明らかである。特にひび割れ発生近傍では、回復成分に比較して非回復な成分が著しく大きくなる。ここで示した時間依存変形はそれぞれの荷重を载荷した後の1分間での変形であり、それぞれの荷重における非回復な変形を足し合わせたものが引張縁における残留ひずみの大部分を占めることになる。一方、図-16より、普通モルタル部材においても、载荷後の1分間にわずかながら変形が生じるが、これらは除荷後の1分間にほとんど回復するため、残留ひずみはほとんど生じないのである。

c) 各材齢における塑性変形と時間依存変形

材齢が経過すると、微小構成要素の初期ひずみ分布の状態が変化するため、その影響が時間依存変形や塑性変形にも表れる。図-17~図-19には、材齢3, 7, 21日におけるケミカルプレストレスト部材の、引張縁と圧縮縁両側の一定荷重下での1分間に発生した変形と除荷後の1分間での戻りを示した。図-20~図-22には、同様に材齢3, 7, 21日における普通モルタル部材について示し、図-23および図-24には、自由膨張部材の材齢3, 21日について示した。

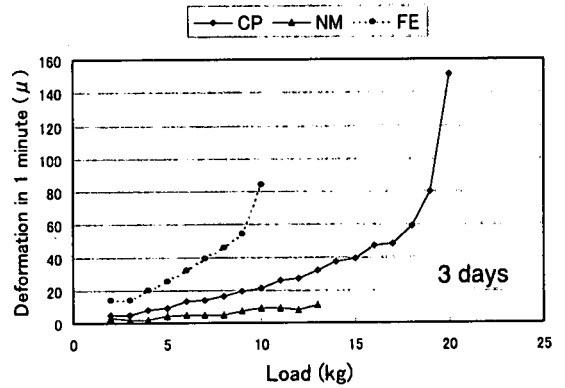


図-14 荷重保持時の変形 (引張縁, 材齢3日)

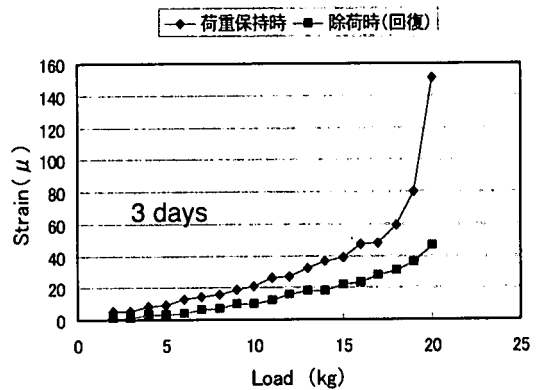


図-15 荷重保持時の変形と除荷後の回復 (CP, 引張縁, 材齢3日)

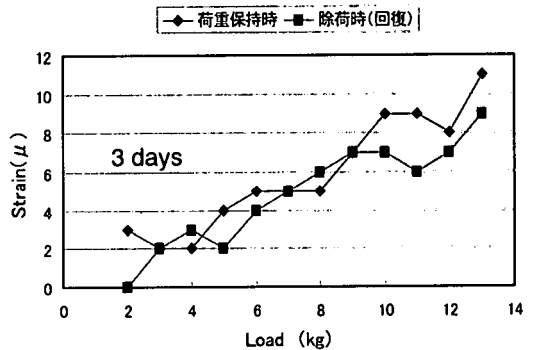


図-16 荷重保持時の変形と除荷後の回復 (NM, 引張縁, 材齢3日)

図-17を見ると、材齢3日のケミカルプレストレスト部材では、引張縁・圧縮縁ともに、非回復な変形が生じている。荷重が小さい間から非回復な変形が存在するが、ひび割れ発生近傍では1分間で著しい変形が見られる。小さな荷重で非回復な変形が生じているということは、

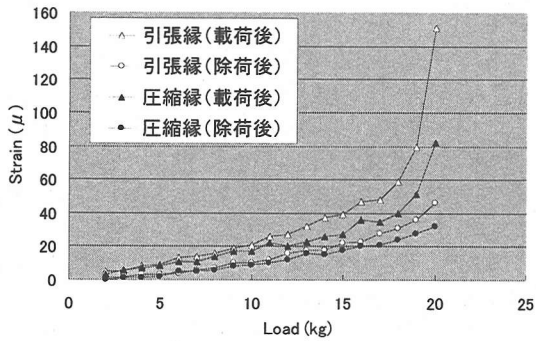


図-17 荷重保持時の変形と除荷後の回復 (CP, 3日)

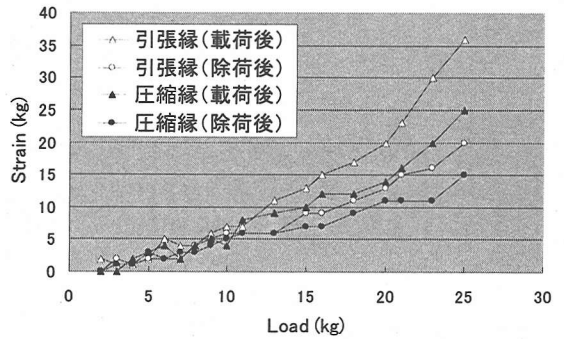


図-18 荷重保持時の変形と除荷後の回復 (CP, 7日)

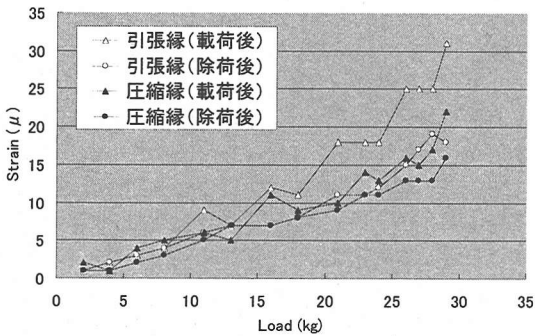


図-19 荷重保持時の変形と除荷後の回復 (CP, 21日)

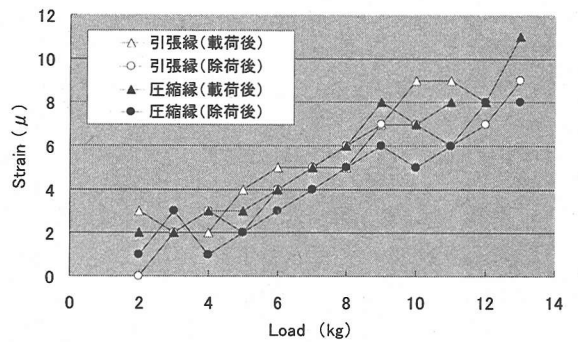


図-20 荷重保持時の変形と除荷後の回復 (NM, 3日)

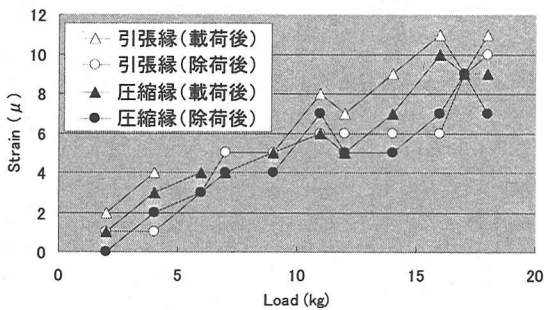


図-21 荷重保持時の変形と除荷後の回復 (NM, 7日)

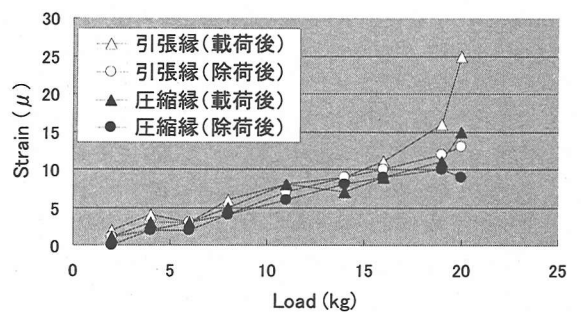


図-22 荷重保持時の変形と除荷後の回復 (NM, 21日)

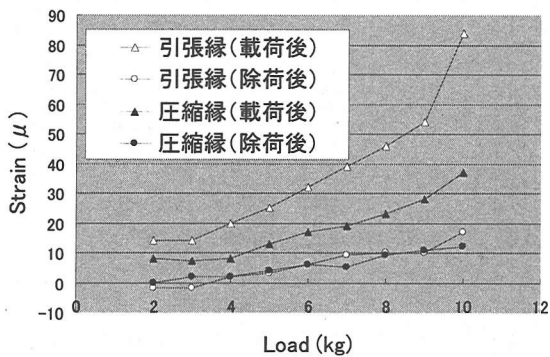


図-23 荷重保持時の変形と除荷後の回復 (FE, 3日)

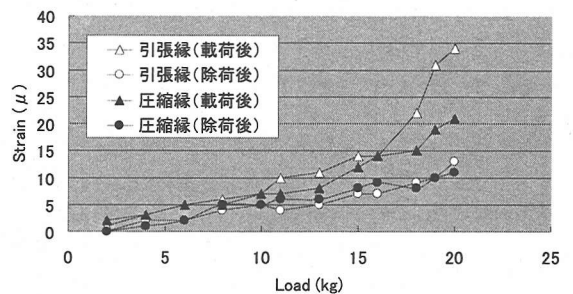


図-24 荷重保持時の変形と除荷後の回復 (FE, 21日)

引張縁に小さな引張ひずみが与えられた場合でも微小構成要素がかなり破断していることを意味する。すなわち、荷重を受ける前から、すでに引張力を受けて破断寸前であった微小構成要素の割合が比較的多かったと考えられる。ひび割れ発生荷重に近くなると、1分間に発生する変形が大きくなり、そのうち非回復成分が占める割合も大きくなる。これは、全微小構成要素に対してかなりの割合が破断するために、急激に力のバランスが崩れ、大きな変形が生じたと考えられることができる。

材齢が経過すると、図-18、図-19のように、荷重が小さいところでは非回復成分がほとんど見られない。これは、材齢が経過し、初期ひずみ分布状態が変化したことによると考えることができる。すなわち、膨張材の反応が低減し、その後に活発化したセメントの反応により、初期ひずみのばらつきが小さい微小構成要素の占める割合が大きくなるのである。この状態では、小さな荷重が作用しても、破断する微小構成要素の全体に占める割合は微々たるものであり、断面内の釣合いを崩すほどの影響を及ぼさない。しかし、作用する荷重が大きくなると、破断する微小構成要素の割合が大きくなり、徐々に1分間の変形量が増大し、非回復成分の割合も増加している。このような非線形挙動が見られるということは、大きな荷重を受けた場合には、かなりの量の微小構成要素が破断したことを意味し、材齢が経過した場合でも初期ひずみのばらつきが保持されていたことを意味する。これは、拘束膨張の場合、膨張材の反応が活発な若材齢時において、微小構成要素の初期ひずみは大きくばらつくが、特に、大きな圧縮ひずみを持った微小構成要素がたくさん蓄積され、それが材齢が経過した場合でも鋼材によってしっかりと保持されていることによると解釈できる。

一方、図-20～図-22に示すように、普通モルタル部材では、材齢によらず同様な挙動を示している。引張縁・圧縮縁ともに、1分間に発生するひずみは同程度であり、それらのほとんどが除荷後の1分間に回復している。これも、普通モルタルでは、初期ひずみのばらつきがほとんどなく、微小構成要素の破断がひび割れ発生荷重近辺までほとんど起こらないことで説明が可能である。

次に、図-23および図-24の自由膨張部材の結果を検討する。材齢3日では、小さい荷重の間から非回復な変形が大きく、ひび割れ発生近辺では相当な変形量が見られ、材齢3日のケミカルプレストレスト部材と似通った挙動である。自由膨張の場合は、膨張材の反応により微小構成要素の初期ひずみはばらつきを持つが、鋼材による拘束がないためにコンクリート内部での釣合いが取ればよい。すなわちケミカルプレストレスト部材のように、平均すると圧縮側になるように初期ひずみが広く分布するという状態ではないのである。しかし、材齢3日

程度では、膨張材の反応が活発であるために、微小構成要素の初期ひずみは比較的大きくばらつき、ケミカルプレストレスト部材に似た挙動を示したと考えることができる。材齢が経過して21日程度になると、もはや膨張材の反応はわずかであり、初期ひずみをほとんど持たない微小構成要素の割合が支配的になり、かなり普通モルタル部材に近い挙動になると考えられる。しかし、ひび割れ発生近傍ではわずかにばらついたひずみの影響が出て非回復成分が認められる。材齢3日程度では、自由膨張部材のひび割れ発生荷重は普通モルタル部材よりもかなり小さいが、材齢21日程度になるとほとんど等しい値を示している。これも、材齢が経過すると初期ひずみの分布において自由膨張部材は普通モルタル部材に近くなるということで解釈可能である。

以上のように、本章では、薄梁の曲げ試験から得られたケミカルプレストレスト部材、自由膨張部材の特徴的な挙動をすべて説明することを試みた。弾塑性破壊モデルを参考に、応力方向に並列に配置した微小構成要素で膨張コンクリートをモデル化した。膨張材の反応に伴う膨張圧の発現によって、周囲のコンクリートを表現した微小構成要素群に初期ひずみのばらつきがもたらさると考えた。実験から得られた非線形挙動は、微小構成要素の初期ひずみがばらついているというコンセプトで説明が可能である。

4. 一軸引張試験（鉄筋により拘束した膨張モルタル）

(1) 実験の目的

3章では、薄梁の曲げ実験結果に基づいて、膨張コンクリートの引張応力下での非線形挙動の機構を考察した。しかし、筆者らのコンセプトをもって曲げ実験の結果を解釈したに過ぎず、引張応力下での膨張コンクリートが実際にそのような機構で非線形挙動を示すという確証はない。そこで、本章では、より直接的な証拠として、一軸引張試験を行うことにした。過去に行われた膨張コンクリートの引張試験はほとんどすべてが、拘束のない自由膨張もしくは、載荷時に拘束を解除した状態で行われたものである。膨張コンクリートは鋼材等で拘束された状態でその効果を発揮するので、拘束された膨張コンクリートの引張特性が真に必要な情報である。ここでは、鉄筋により内的に拘束された膨張モルタル部材に対して、鉄筋を引張る一軸引張試験を行い、膨張モルタルの引張性状を明らかにするデータを取得することを目的とする。3章で行った実験と同様に除荷過程を含む繰り返し載荷をひび割れ発生まで行う。

表-3 モルタルの配合

	W/(C+E)	E/(E+C)	Unit Content (kg/m ³)			
			Water	Cement	Expansive Agent	Sand
Normal Mortar	0.4	0	356	891	0	891
Expansive Mortar	0.4	0.11	355	791	98	889

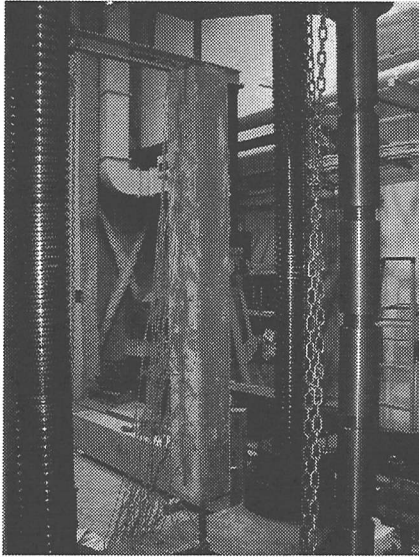


写真-1 一軸引張試験

(2) 実験方法

実験に用いた材料は表-1に示したものを、配合を表-3に示した。3章の薄梁の実験で用いた配合と水粉体比が異なる。これは、本章での実験の供試体の方が寸法が大きく、ブリーディングの影響を押さえるために水粉体比を小さく設定したことによる。供試体の断面は100mm×100mmであり、断面中央をD19ねじふし鉄筋が貫通しており、附着により膨張を拘束した(写真-1)。鉄筋のヤング係数は 1.93×10^5 MPaである。モルタル部分の長さは1mとした。供試体は打設後1日で脱型し、荷重まで水中養生を施した。これは、乾燥の影響を極力排除して膨張モルタルの力学的特性を調べることを目的としたためである。引張荷重は鉄筋を直接引張って行なったが、供試体長さを十分に確保することで、引張荷重時の偏心はほとんど排除されていることが実験中に計測したひずみにより確認された。また、鉄筋で内的に拘束する場合は特に部材端部において附着性状が劣り、部材軸方向の膨張ひずみが不均一となることが知られている¹¹⁾。実験結果とともに後述するが、この点に関しても本実験で設定した供試体長さは十分であって、部材中央位置から幅約500mmに渡って、鉄筋の伸びひずみ(膨張ひずみ)はほぼ均一な値を示した。また、最終的にひび割れも部材のほぼ中央位置で発生した。従って、本実験方法

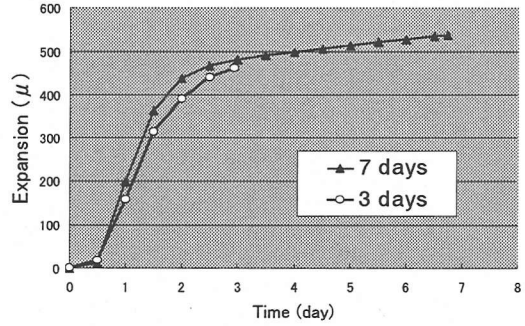


図-25 供試体の膨張ひずみ

によって、鋼材により十分に拘束された膨張モルタルの引張性状を調べることができたものと判断した。

材齢3日と7日に一軸引張試験を行った。ひずみゲージを、鉄筋には100mm間隔で貼り付け(ゲージ長5mm)、供試体表面には軸方向中央部分500mmの全領域をカバーするように貼り付けた(同60mm)。実験では、ひび割れ発生まで荷重を行ってひび割れ発生位置を目視で確認し、その位置に対応するひずみゲージのひずみを鉄筋のひずみ及びモルタルのひずみとして採用した。繰り返し荷重の過程では、最大荷重を一定荷重更新することに短時間で除荷を行い、除荷時剛性と残留ひずみを計測した。

荷重速度は、ほぼ0.1MPa/分を保った。ただし、各荷重からの除荷は瞬間的にを行い、再荷重も過去の最大経験応力の直前までは0.1MPa/分程度で荷重した。

(3) 実験結果と考察

図-25に膨張モルタル供試体の膨張ひずみの経時変化を示した。これらの膨張ひずみは鉄筋に貼りつけたひずみゲージにより計測したものであり、打設直後から計測を開始した。ひずみゲージは部材中央付近に100mm間隔で400mmに渡って貼りつけたほか、部材端部等にも貼りつけた。部材端部では附着性状が劣るために、中央部分と比較すると膨張ひずみがかなり小さくなったが、中央部分の400mm区間においては、膨張ひずみがほぼ均一な値を示した。図-25に示したものは部材中央位置における鉄筋の膨張ひずみである。打設直後から荷重前までの膨張ひずみの発現を示した。材齢3日では膨張ひずみの発現がピークに至っていないが、7日では膨張材の反応が低減し、すでに定常状態に至っている。

実験結果を整理する際は、ひび割れ発生後に目視でひび割れ位置を確認し、ひび割れが貫通したひずみゲージの値をモルタルのひずみとし、ひび割れ位置に最も近い鉄筋のひずみゲージの値を鉄筋のひずみとした。以下に示す実験結果はこれらの値を用いて荷重開始時からひび割れ発生時までの挙動を整理したものである。予め測

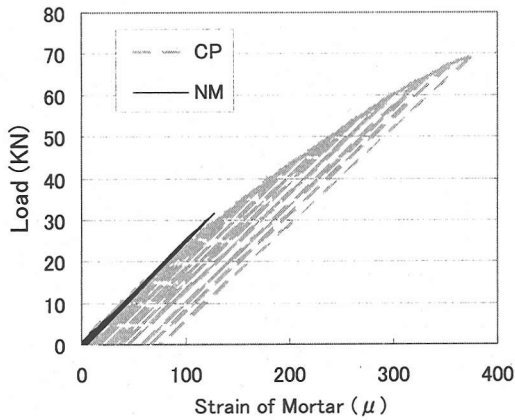


図-26 荷重-引張ひずみ関係 (材齢3日)

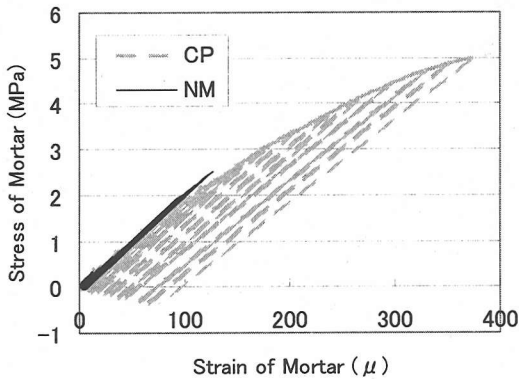


図-27 モルタルの応力-ひずみ関係 (材齢3日)

定した鉄筋のヤング係数から鉄筋の負担する引張力を計算し、外荷重から差し引いてモルタルに作用する引張力を算定し、モルタル断面積で除したものをモルタルの応力とした。

載荷時には、モルタル部分の端部（モルタル端から50mm）の鉄筋ひずみは付着が劣るために大きな値を示したが、モルタル中央部400mmに渡って貼りつけた鉄筋のひずみゲージはすべてほぼ同様な値を示した。また、鉄筋のひずみとモルタル表面のひずみも載荷開始時からひび割れ発生までほぼ同じ値を示したため、モルタルには付着により十分に引張応力が伝達されており、軸方向と直交な断面内における引張ひずみ分布もほぼ均一と見せると思われる。

図-26には、材齢3日におけるケミカルプレストレスト部材と普通モルタル部材の実験結果を示した。モルタル表面のひずみと荷重の関係ひび割れ発生までの繰り返し載荷履歴に対して示したものである。ここでの荷重は、鉄筋が負担する引張力と付着によりモルタルが負担

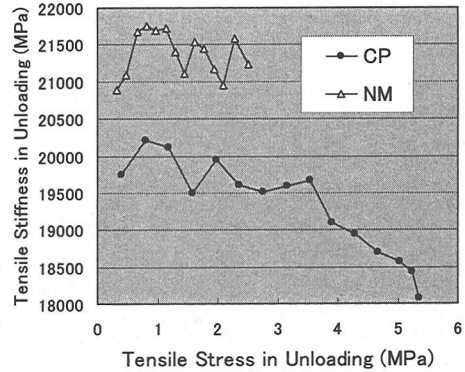


図-28 除荷時剛性の変化 (材齢3日)

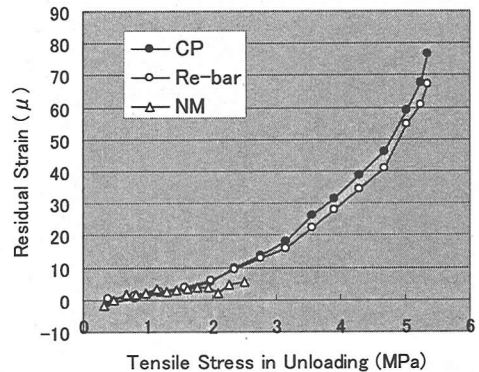


図-29 除荷後の残留ひずみ (材齢3日)

する引張力の合計である。普通モルタル供試体ではひび割れ発生までほとんど非線形性が認められないが、膨張材を混入することにより、ひび割れ発生荷重が著しく増大し、またRC部材として大きな非線形挙動を示すことが明らかである。

図-27は、図-26の実験結果に対して、載荷によりモルタルに作用した応力とモルタル表面のひずみを示したものである。この図より、ケミカルプレストレスト部材では、モルタル部分の挙動もひび割れ発生前に非線形性を示し、後に示すが最大経験応力の増加とともに除荷時剛性が低下し、残留ひずみが生じることが明らかとなった。このような傾向は普通モルタル部材ではほとんど見られない。この実験結果により、3章で示した薄梁の実験結果に対する解釈が裏付けられたといえる。

図-27では、引張載荷をしたにも関わらず、ケミカルプレストレスト部材で除荷後の応力が圧縮になっている。これは、除荷後に残留ひずみを有する鉄筋が依然として引張力を受け持っているために、釣合いを取るために載荷前の状態に比べるとモルタルの平均応力が圧縮になったのである。

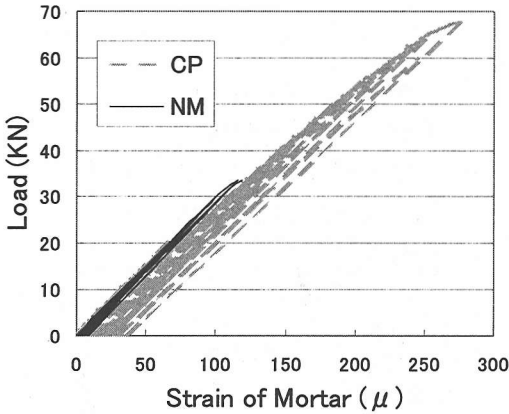


図-30 荷重-引張ひずみ関係 (材齢7日)

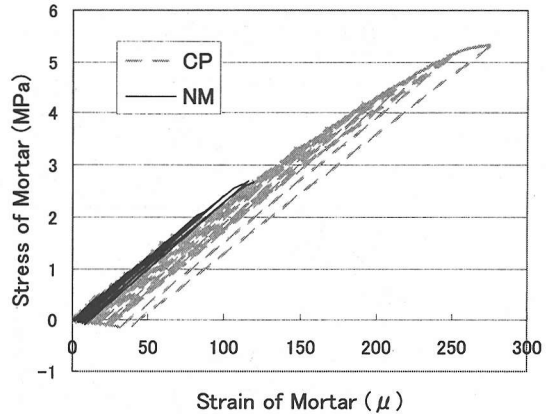


図-31 モルタルの応力-ひずみ関係 (材齢7日)

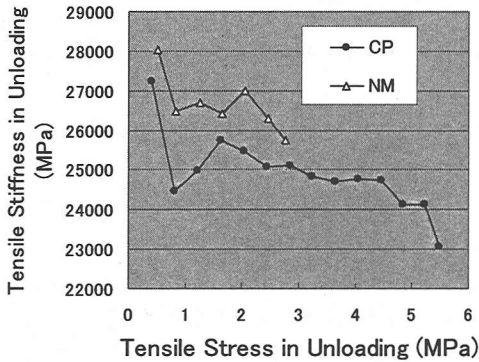


図-32 除荷時剛性の変化 (材齢7日)

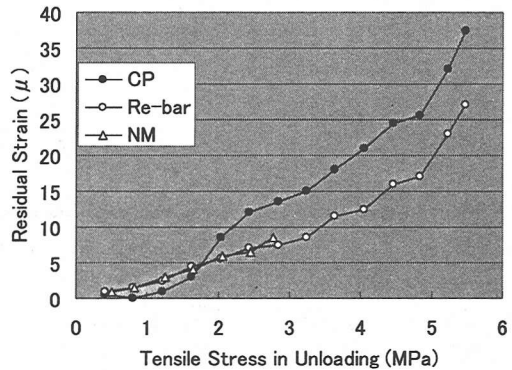


図-33 除荷後の残留ひずみ (材齢7日)

ほぼ弾性的な挙動を示す除荷時に、モルタルが負担した応力をモルタルの変形量で除した除荷時剛性を図-28に示した。横軸は除荷時にモルタルが負担した応力である。普通モルタル部材に比較すると、ケミカルプレストレスト部材では最初から剛性がやや小さいが、作用する引張応力の増加とともに明らかに剛性が低下する傾向が確認された。ただし、モルタルに作用する応力が0.5MPa以下程度では、測定されるひずみの値が小さいために精度が悪く、計算される剛性に影響を及ぼす可能性はある。3章で示したコンセプトに基づけば、ケミカルプレストレスト部材の剛性が最初からやや低いのは、すでにいくつかの微小構成要素が破断しているからである。また除荷剛性が低下するのは、大きな引張ひずみに達した微小構成要素から順に耐荷力を失っていくからである。

図-29には、除荷後の残留ひずみを示した。横軸は、図-28と同様にそれぞれの除荷時にモルタルが負担した応力である。普通モルタルでは、ひび割れ発生に近い引張応力が作用しても、除荷後の残留ひずみはごくわずかである。一方でケミカルプレストレスト部材では、2MPa程度の引張応力以上では非線形的に残留ひずみが増加し

ている。ここではモルタルと鉄筋両方の残留ひずみを示した。

除荷剛性が大きく低下を始めた3.5MPa程度から除荷後の残留ひずみが著しく増大していることが認められる。つまり、3章で考察を行ったように、引張力が作用しいくつかの微小構成要素が破断したことによって、除荷後に元の位置まで戻ってしまうと逆に釣合いが取れず、釣合いが取れる位置で変形が留まり残留ひずみとして表れたと考えられるのである。

しかし、ここでの非線形性は、水セメント比がやや異なるが、3章で示した薄梁の実験における材齢3日の供試体の非線形挙動に比べると相当に小さい。これは、本章での一軸引張試験では鉄筋比が約2.9%と相当に高いことと、载荷が一軸方向であることに主要因がある。薄梁の実験では、特にひび割れ発生近辺では荷重を保持したほんの1分間の間に100μ以上もの変形が見られた(材齢3日)。これに対し、一軸引張試験では荷重を保持している間に大きく変形が進むことはほとんどなかった。引張力が作用して微小構成要素が破断した場合に、確かに釣合いが取れなくなり、釣合いを取るために変形がさら

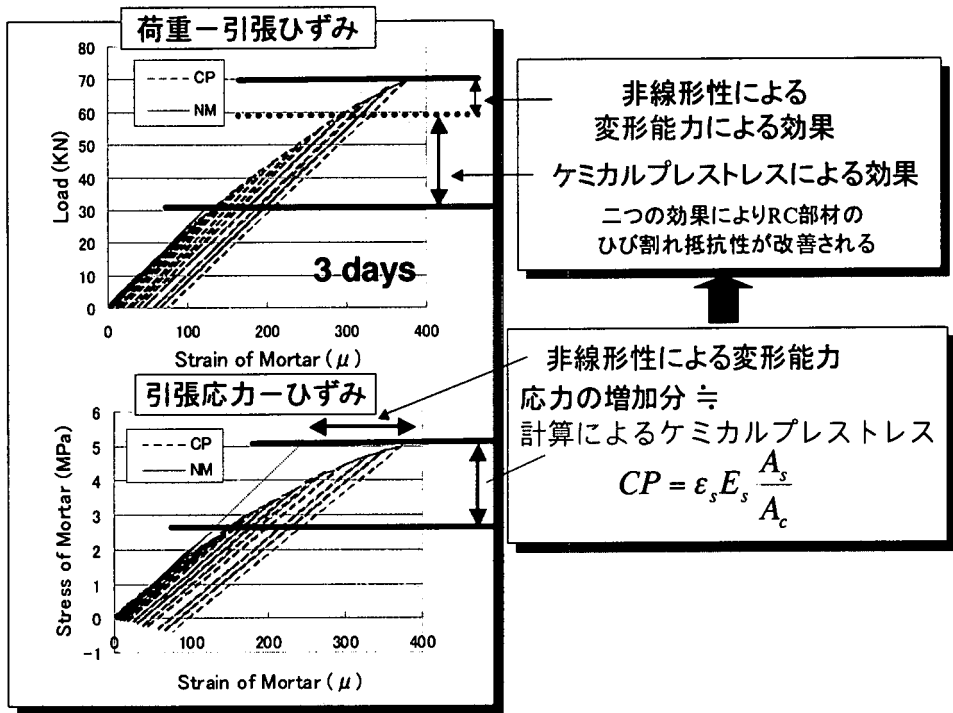


図-34 非線形挙動による膨張モルタルの伸び能力 (一軸引張, 材齢3日)

に進行する。しかし、鉄筋比が非常に大きいため、わずかな変形で鉄筋に大きな引張力がもたらされ、すぐに釣合いが取れてしまうのである。したがってこの実験は、微小構成要素が破断することにより、全体の釣合いが取れるための変形が大きく生じにくい実験であったと考えられる。このように、鉄筋が引張力を負担するRC部材であれば、微小構成要素の破断に伴う時間依存変形で著しく変形が進行することはない。そして、コンクリートの初期ひずみがばらついているために、マクロなひび割れが生じにくく、コンクリートが変形すると同時に鉄筋も伸びて引張力を負担し、RC部材としてのひび割れ耐力が著しく向上するのである。

図-30～図-33には、材齢7日における実験結果を示した。材齢3日に比べるとケミカルプレストレスト部材の非線形性がやや小さくなっているが、特にひび割れ近辺での非線形性が明瞭である。除荷時剛性を見ても、ケミカルプレストレスト部材は徐々に低下しており、特にひび割れ発生近くでの低下が著しい。この辺りでかなりの微小構成要素が破断したため、マクロなひび割れが発生したものと考えられる。普通モルタルにおいてもひび割れ発生直前に若干の低下が見られる。普通モルタルにおいても、微小構成要素の初期ひずみが完全に均一ではないため、特にひび割れ発生近傍では若干の非線形性が表れることは十分考えられることである。

(4) 初期ひずみのばらつきとひび割れ抵抗性

ここでは、初期ひずみがばらついていることが、ひび割れ抵抗性にどのような影響を及ぼすかを考察することにする。材齢3日の供試体を取り上げて考えてみる。載荷開始前の膨張ひずみ、鉄筋比が分かっているため、モルタル断面に作用するケミカルプレストレスを算定することが可能である。材齢3日においては、プレストレスが2.67MPaとなった。図-27を見ても、ケミカルプレストレスト部材のひび割れ発生応力と、普通モルタルのひび割れ発生応力はほぼプレストレスの分の差である。このように、膨張材の効果は、応力で評価する限りプレストレスによる見かけの引張強度の増加だけのように考えられる。しかし、実際には膨張材はそれ以上にひび割れ抵抗性に寄与する。なぜなら、RCとしての変形性能が大きくなるからである。RC部材の中での膨張モルタルは、微小構成要素の破壊によって剛性は徐々に低下するが、ひび割れ発生までの最終的な変形性能は大きくなる。このため、モルタルと一緒に変形する鉄筋が追加的に大きな引張力を負担し、RC部材としてのひび割れ耐力は大きくなるのである。膨張材の効果は単に応力のみで評価したのではその真価がとらえられない。

再び材齢3日の実験結果を例にとり、膨張モルタルが弾性挙動を示すとあえて仮定して計算を行い、初期ひずみがばらついていることにより表れる伸び能力を見ることにする(図-34)。実験による膨張モルタルのひび割

れ発生時の引張応力は4.98MPaであった。ここで膨張モルタルが普通モルタルと同じ剛性を持ち、ひび割れ発生まで線形挙動を示すと仮定すると(図-34左下), RC部材としてのひび割れ耐力は約60KNとなる(図-34左上)。しかし, 実際には膨張モルタルは非線形挙動を示し, ひび割れ発生時のひずみは370 μ 以上に達するので, モルタルと一緒に変形する鉄筋が追加的に受け持つ引張力によって部材のひび割れ耐力は70KN近くにまで達するのである。このように, ケミカルプレストレスト部材では, 一軸引張においても, プレストレスの効果と変形能力が大きいことで鉄筋を有効に利用することで, ひび割れ抵抗性が大きくなることが分かった。

5. 薄梁と一軸引張供試体における非線形性の違いに関する考察

3章で薄梁の曲げ実験を行い, 4章では一軸引張試験を行った。薄梁の非線形挙動は, 梁の引張側で生じる微小構成要素の破壊およびそれに起因する塑性変形によって生じたものである, との考えを示した。そして, 一軸引張試験によって, 拘束された膨張モルタルが除荷時剛性の低下と塑性変形を伴う非線形挙動を示すことを明らかにした。しかし, 一軸引張試験で見られた非線形性は薄梁のものほど著しいものではなかった。ここでは, 両者の非線形性の程度の違いについて考察を行うことにする。

薄梁の実験と, 一軸引張で非線形性の程度が大きく異なった主たる原因は, 両者における鉄筋の役割の違いであると考えられる。すでに述べたように, 4章で行った一軸引張試験は鉄筋比が2.0%とかなり高く, 引張载荷により微小構成要素が破断し断面内の力の釣合いが取れなくなった場合でも, わずかな変形ですぐに均衡すると考えられる。わずかな変形で鉄筋が十分な引張力を負担し, 断面に作用する力の釣合いが取れるからである。一方で, 薄梁の曲げ試験では, 拘束用に配置した鉄筋が中立軸付近にあるため, 鉄筋のひずみは引張縁に比べると相当に小さいはずである。梁の引張側で生じた微小構成要素の破断により, 梁はさらに変形を起こすが, わずかな変形では鉄筋が受け持つ引張力も小さく, 断面内の力の釣合いが取れるためには相当に大きな変形を必要としたものと考えられる。鉄筋が引張縁に近い位置に配置された場合は, 3章の実験ほどに大きな非線形挙動は見られなかったものと思われる。

もう一つの理由として, 曲げと一軸引張における部材断面内のひずみ分布の違いに起因した, ひび割れ発生基準の相違が考えられる。従来, コンクリートの曲げ強度

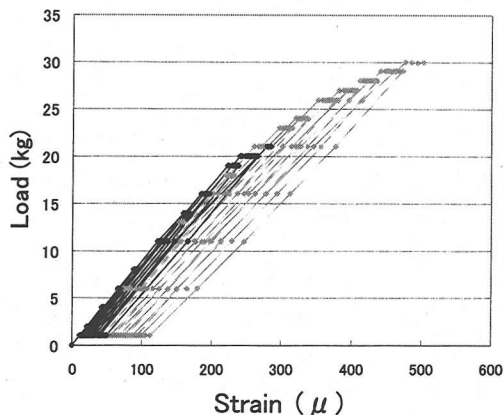


図-35 薄梁の荷重-引張ひずみ関係
(引張縁, 材齢21日)

は引張強度よりも大きいことは良く知られている。この理由としては, 一軸引張試験では供試体のどの部分にも最大応力が生じ, 弱い部分にあたる確率が高いが, 曲げ試験では引張縁から中立軸に近づくとき応力が小さくなるためひび割れの発達が妨げられることなどが指摘されている^{16), 17)}。本研究で用いた薄梁は, 厚さが3cmであるために断面内のひずみ勾配が著しく大きく, そのためマクロな曲げひび割れの発生が生じにくかったということが推察される。すなわち, 一軸引張状態では断面内の再弱点部に変形が容易に局所化するのに対して, 曲げの場合には, ひずみ勾配の影響によって引張縁での局所化が進行せずに, 結果としてより大きな変形性が発揮できるものと考えられる。普通モルタルでも一軸引張に比較すると, ひび割れ発生時の引張縁のひずみは大きかったが, ケミカルプレストレスト部材では, 圧縮ひずみを持つ微小構成要素がかなりの割合を占めており, さらに初期ひずみは大きくばらついているために, 曲げひび割れの発生までに相当な変形が許容されたと考えられる。

以上をまとめると, 薄梁の実験では, 断面内のひずみ勾配が急激であることと, 鉄筋が大きな引張力を負担する位置に配置してなかったことにより, 初期ひずみのばらつきによる影響が著しく見られる実験であったと考えることができる。そのため, 一軸引張試験では材齢7日でもはや, ひび割れ発生までに見られる非線形性は小さくなったが, 薄梁の実験においては, 材齢21においてもケミカルプレストレスト部材は, 強い非線形挙動と, 大きな変形能力を示したのである(図-35)。膨張コンクリートは, 初期ひずみのばらつきによる変形性能を享受できる, という意味で, 適切に鉄筋の配置された曲げ部材でより大きなひび割れ抵抗性を発揮できるものと考えられる。

6. まとめ

引張応力下での膨張コンクリートの非線形挙動の機構を明らかにするために、除荷過程を含む繰り返し曲げ載荷を薄い梁に対して行った。ケミカルプレストレスト部材に特有な曲げひび割れ発生前の非線形挙動を実験結果として示した。除荷後の残留ひずみと除荷時剛性から非線形挙動を定量的に分析した。圧縮応力下での普通コンクリートの非線形挙動をモデル化した弾塑性破壊モデルを参考に、引張応力下での膨張コンクリートの非線形挙動を説明するコンセプトを提案した。このコンセプトにより、薄梁の実験における種々の材齢のケミカルプレストレスト部材、自由膨張モルタル部材に特有な非線形挙動を説明することができた。さらに、一軸引張応力下でケミカルプレストレスト部材の繰り返し引張載荷を行い、引張応力下におけるケミカルプレストレスト部材の非線形挙動を実験結果として示した。非線形挙動の機構は、すでに示したコンセプトで説明が可能であった。

本研究で得られた主な成果を以下にまとめる。

1)ケミカルプレストレスト部材は、引張応力下でひび割れ発生までに非線形挙動を示す。除荷過程を含む繰り返し載荷を行うことで、除荷後に残留ひずみが発生し、最大経験応力の増加につれて除荷時剛性が低下することが明らかとなった。

2)ひび割れ発生までの引張応力下におけるケミカルプレストレスト部材の非線形性は、材齢が小さいほど顕著である。ただし、材齢が21日程度においても、特にひび割れ発生近辺においては著しい非線形性が認められた。

3)鉄筋による拘束のない自由膨張をさせた膨張モルタル部材は、材齢が3日程度では、ケミカルプレストレスト部材に似た非線形挙動を示すが、材齢が経過して21日程度になると、ほぼ普通モルタル部材と同じ挙動を示した。

4)一軸引張応力下での膨張コンクリートの挙動をモデル化した。膨張コンクリートは、応力方向に並列に配置した微小構成要素からなるものとした。微小構成要素はセメントの水和とともに生成され、膨張材の水和反応に伴い、微小構成要素には強制的に初期ひずみのばらつきがもたらされるものと考えた。ある引張ひずみが作用したときに微小構成要素は破断し、以後引張応力を負担できないものとした。これらのモデル化により、ケミカルプレストレスト部材、自由膨張部材の各種材齢における非線形挙動を合理的に説明することができた。

5)膨張コンクリートにおける膨張材の役割は、水和反応に伴い、周囲のマトリックスおよび骨材にマイクロレベルで強制的に品質のばらつきをもたらすことであると考

えられる。膨張が拘束される場合は、局所的にはマイクロクラックなどの欠陥を受けている部分と、大きな圧縮ひずみが蓄積されている部分とが混在しており、部材全体ではマクロなひび割れ抵抗性が向上すると考えられる。

6)ケミカルプレストレスト部材は、引張応力下においてひび割れ発生前に著しい非線形挙動を示し、ひび割れ発生までの変形能力が非常に大きい。プレストレスにより引張強度が大きくなることに加えて、変形能力が大きくなることで、ひび割れ抵抗性が著しく向上する。

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) Kishi, T., Hosoda, A., Gurung, B. and Kittiwuttichusinp, S: Effect of drying/autogenous shrinkage on ductility/fracture mode of beam and self-repairing function of expansive agent, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.3, pp. 511-516, 2000.
- 4) 辻 幸和: コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究, 土木学会論文報告集, 第235号, pp.111-124, 1975.3.
- 5) 國分正胤, 小林正几, 長滝重義, 岡村 甫, 町田篤彦: 膨張性セメント混和材を用いたコンクリートの標準試験方法に関する研究, 土木学会論文報告集, 第225号, pp.93-99, 1974.5.
- 6) 岡村甫, 辻幸和, 後藤克己: 一軸拘束を受ける膨張コンクリートの強度, コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.85-88, 1979.
- 7) 長滝重義, 後藤祐司: 膨張セメントコンクリートのクリープ特性に関する基礎研究, 土木学会論文報告集, 第207号, pp.93-105, 1972.11.
- 8) 笹谷紳勝, 丸山久一, 先村律雄, 辻 幸和: 初期材齢時における膨張コンクリートの引張性状に関する研究, コンクリート工学年次講演会論文集, No.7, pp.261-264, 1985.
- 9) 先村律雄, 丸山久一, 辻 幸和: 若材齢時における膨張コンクリートの引張特性に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.40, pp.63-64, 1985.
- 10) 岡村 甫, 村上晃生, 樋口芳朗: 膨張コンクリートの複合モデル化, 複合材料シンポジウム論文集, pp.115-124, 1976.3.
- 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) 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. 株式会社, 1979.
- 14) 山崎之典: 膨張性混和材を用いたコンクリートの膨張機構,
セメント・コンクリート, No.352, pp.10-18, 1976.6. (2000. 6. 29 受付)
- 15) 中村孝則, 深谷泰文: 膨張材によるセメント硬化体の膨張変形,
セメント技術年報, No.26, 1972.
- 16) A.M. Neville: コンクリートの特性, pp.408-410, 技報堂出版
- 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.

NONLINEAR BEHAVIOR AND CRACK RESISTANT MECHANISM OF EXPANSIVE MORTAR

Akira HOSODA and Toshiharu KISHI

This paper explains the mechanism of nonlinear behavior of expansive mortar under tensile stress. Through flexural and uni-axial cyclic loading including unloading process, it is proved that tensile stiffness of expansive mortar during unloading gradually decreases when maximum tensile stress applied increases, and that expansive mortar shows residual tensile strain after unloading. Based on these experimental facts, a new concept is proposed to rationally explain the nonlinear behaviors peculiar to expansive mortar in tension. It is shown that not only increment of tensile strength due to prestress but also large deformability before cracking greatly contributes to the cracking resistance of chemically prestressed members.