

論文 若材齢ケミカルプレストレスト部材の挙動とその考察

細田 暁^{*1}・岸 利治^{*2}

要旨: 膨張コンクリートに特有な非線形挙動を定量的に把握するための一環として、若材齢のモルタル梁に対して除荷過程を含む繰り返し載荷を行った。普通モルタル部材と相当に異なる膨張モルタルの挙動を実験結果として示した。膨張モルタルの非線形挙動を引き起こす原因の一つとして、引張応力下で破壊が徐々に進行していることを実験結果から示し、膨張モルタル部材の特徴的な挙動の考察を行った。

キーワード: ケミカルプレストレス、非線形性、破壊、塑性、ひずみのばらつき、膨張材

1. はじめに

膨張材はコンクリートの収縮ひび割れを低減する材料として知られているが、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、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の向上、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過去の研究で報告されている⁽¹⁾。

機械的プレストレスは、断面内に平均的に圧縮応力が導入されていると考えることで、その効果を定量的に評価することができる(図1)。同様にケミカルプレストレスも断面内に平均的に導入されている圧縮応力である、と過去の研究では捉えてきた。したがって、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

方もある。

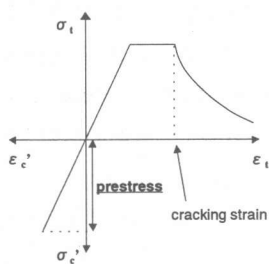


図1. 機械的プレストレスの定量評価

過去、膨張コンクリートに発現する膨張ひずみを予測する手法として、辻の提案した「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」という考え方に基づくもの⁽²⁾があり、自由膨張や過小鉄筋比を除けば適用可能である。また、岡村らの提案した「複合モデル⁽³⁾」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ひずみを予測できるものである。しかし、これらの手法は膨張コンクリート部材の挙動を全て説明するには未だ十分とは言えない。

膨張コンクリートに特徴的な挙動として、ひび割れ発生ひずみが著しく大きいこと⁽¹⁾、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大きくなり⁽⁴⁾、圧縮強度・弾性係数が低下すること⁽⁵⁾などが報告されているが、これらはすべてケミカルプレスト

*1 東京大学大学院工学系研究科

工修(学生会員)

*2 東京大学大学院工学系研究科 助教授 工博(正会員)

レスを平均的圧縮応力と考えている限り説明が困難な現象である。

本研究では、このような膨張コンクリートの非線形挙動を定量的に把握するための一環として、梁の曲げ試験を行った。

2. 実験の概要

本研究では、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。使用材料は普通モルタルと、セメントの一部を膨張材で置換した膨張モルタルである。供試体は、普通モルタル部材、自由膨張部材、ケミカルプレストレスト部材の3種類とした。ケミカルプレストレスト部材にのみに膨張モルタル製梁の断面中央（中立軸位置）に D6 異形鉄筋 (SD295, $E_s=2.0 \times 10^5 \text{MPa}$) を一本配置し、鉄筋の付着によりプレストレスを導入した。梁断面は幅 100mm、厚さ 30mm で部材長さは 1500mm である (図 2)。比較的軽い重りで簡単に除荷再載荷を含む複雑な載荷履歴を与えられるよう、小さな部材寸法とし、

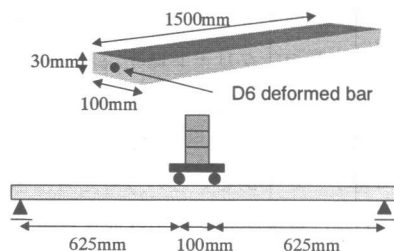


図-2. 供試体形状と載荷方法

モルタルで供試体を作成した。また、供試体長さは、過去の研究により、部材端より 500mm 以上離れた断面内ではプレストレスの分布がほぼ一樣になることが示されている⁽⁶⁾のを参考にして設定した。

膨張材は CSA 系を使用し、セメントは住友大阪セメント社製の普通ポルトランドセメントを使用した。普通モルタルの配合は、水・セメント・砂の重量比が 1:2:2 であり、混和剤は使用していない。膨張モルタルは普通モルタルの配合のセメントの 11% (重量比) を膨張材で置換した。セメントの 11% を膨張材で置換した場合、コンクリー

トでは通常使用される範囲内であるが、本実験はモルタルを用いて行ったために膨張材の効果が大きくでるものと考えられる。供試体は約 20℃の実験室内で打設し、材齢 1 日で脱型した。本研究では、乾燥収縮による影響を極力排除するために、載荷材齢まで約 20℃の水槽内で養生を行った。載荷材齢は 1、3、7、21 日の 4 種類で、載荷時は供試体表面をすべてエポキシ樹脂でコーティングし、水分の出入りを極力制限した。

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 2)。等モーメント区間の上面と下面のモルタル表面にひずみゲージ (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. 弾塑性破壊モデルに基づいた非線形挙動の解釈

まず、図 3 に実験結果の一例を示す。これは材齢 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荷重と引張ひずみの関係である。図から明らかなように、ケミカルプレストレス部材は著しい非線形性を示している。ここで、前

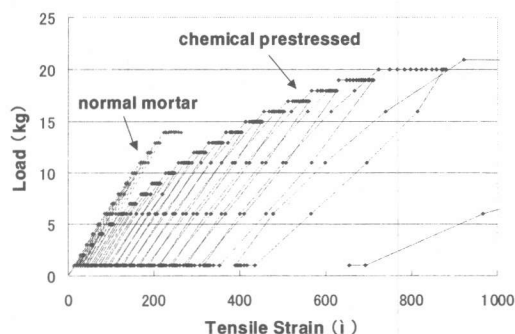


図-3. 荷重-引張縁ひずみ関係 (3 日)

川らによる弾塑性破壊モデル⁽⁷⁾を参考に、本実験における種々の載荷過程とそれぞれの過程で計測されるデータの意味について考察する。

弾塑性破壊モデルは、圧縮応力下における普通コンクリートの複雑な非線形挙動をモデル化したものであり、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起こす特性であり、「破壊」はコンクリート内の微小なひび割れの進展によって、外力に抵抗する体積が減少する非可逆な損傷としている。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、また破壊は除荷剛性の低下として表れる（図4）。弾塑性破壊モデルでは、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は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に達したときに破壊するために、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。

これに対して、引張応力下の普通コンクリートは、ひび割れ発生まで線形な挙動を示すと扱って問題ないことが知られている⁽⁷⁾。図3においても普通モルタル部材の挙動は非線形性が小さいのに対し、ケミカルプレストレスト部材では著しい非線形性が認められる。

まず、図3から判断できることは、ケミカルプレストレスト部材では、残留ひずみが著しく大きいことである。これは、載荷時および載荷後に荷重を保持している間に、塑性変形が進行しているためと考えられる。また、除荷時の剛性が徐々に低下していくことは、破壊が徐々に進行していることを意味すると考えられる。

図5に、瞬間的な除荷時に生じる引張縁の変形を除荷荷重で除して単位荷重あたりの変形に換算したものを示した。単位荷重あたりのひずみは、剛性の逆数に類する指標で、大きいほど剛性が小さいことを意味する。図中のCPはケミカルプレストレスト部材、NMは普通モルタル部材、FE

は自由膨張部材を示すものである。以降の実験結果についても同様とする。普通モルタル部材の場合、引張側でも圧縮側でもひび割れ発生直前まで

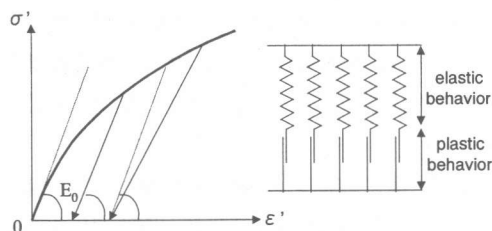


図-4. 弾塑性破壊モデル⁽⁷⁾

は破壊現象が生じないので、荷重レベルが増加しても単位荷重あたりのひずみにほとんど変化が認められない。一方、ケミカルプレストレスト部材では、単位荷重あたりのひずみは除荷時荷重の増加に伴って明らかに増加している。曲げひび割れ発生程度の荷重では、破壊が大きく進むような応力が圧縮側に作用しているとは考えにくい。図5の結果は、引張側で徐々に破壊が進行しているために生じたものと考えられる。

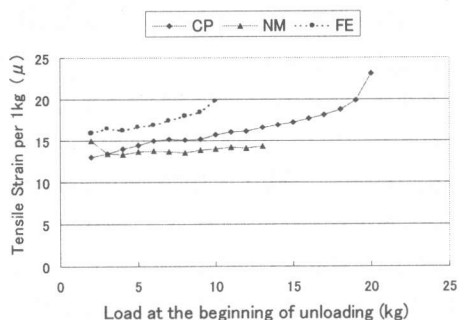


図-5. 除荷時における単位荷重あたりのひずみの変化（引張縁、3日）

弾塑性破壊モデルの考え方を拡張し、引張応力下での挙動に対して、並列に配置された微小構成要素の集まりを考える。普通モルタルにおいて、ひび割れ発生までに破壊がほとんど進行しないのは、普通モルタル内での微小構成要素の初期ひずみの状態が均一に近く、変形があるレベルに達したときに各構成要素の破壊がほぼ同時に生じ、ひび割れの発生に至るためと解釈できる。一方、膨張モルタルで剛性が徐々に変化するのは、各構成

要素の初期ひずみがばらついており、変形が進むにつれて微小構成要素の破壊が順次進行するためと考えることができる。すなわち、筆者らは、膨張コンクリートの示す顕著な非線形性は、ケミカルプレストレスト部材の内部ひずみが多様なばらつきを有していることに起因すると推測したのである。

次節では、上記のコンセプトに基づいて、膨張コンクリートの瞬時的な変形および時間依存変形について考察することにする。

4. 実験結果とその考察

4. 1 材齢・拘束条件が初期ひずみのばらつきに及ぼす影響

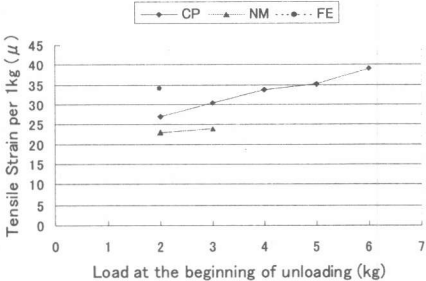
前節でケミカルプレストレスト部材においては、コンクリート内部で初期ひずみがばらついていると考えられることを示した。膨張コンクリートでは、膨張材が水和反応に伴って周囲のセメントマトリックスおよび骨材を押し広げる。自由膨張の場合、光学顕微鏡によって膨張材粒子の周囲に微細ひび割れが観察されることが報告されている⁽⁸⁾。すなわち、微視的レベルでは引張応力が作用する箇所があり、応力レベルの大きい箇所では微細ひび割れが生じているのである。外的拘束のない自由膨張の場合は、膨張圧縮力に釣合う引張力が内部組織に作用している。すなわち、膨張コンクリート内の微小構成要素には、引張から圧縮まで分布する初期ひずみが存在すると考えることができる。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のでそれに釣合うべくコンクリートの初期ひずみの分布は自由膨張に比べると圧縮側に偏っているはずである。つまり、巨視的な膨張が拘束されるために、膨張エネルギーの多くが内部圧縮力として蓄積されると考えられる。

また、膨張エネルギーの発現と微小構成要素の増加は膨張材およびセメントの反応に依存するため、材齢によって初期ひずみの分布は異なると考えられる。膨張材の反応は反応初期において著しく活発であり、材齢1日頃においては、その前後に構成されたセメントマトリックスに対して大き

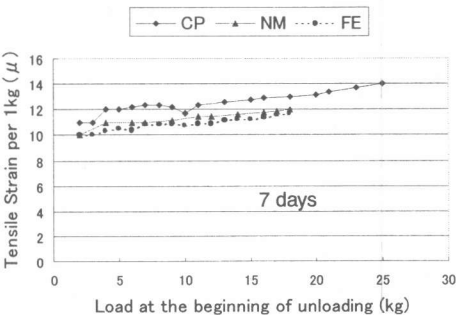
な初期ひずみのばらつきを導入する。その後、膨張エネルギーの発現が漸減するのと入れ違いにセメントの反応が活発化してくると、ひずみのばらつきが小さい微小要素が新たに形成されるのである。

4. 2 除荷時に生じる弾性変形

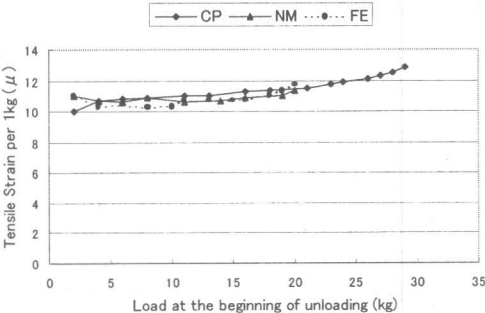
図6～図8に、材齢1、7、21日における除荷時の引張縁での単位荷重あたりのひずみの変化を示す。これらは図5と同様の図で材齢による違いを示したものである。



図一六. 除荷時における単位荷重あたりのひずみ変化 (引張縁、1日)



図一七. 除荷時における単位荷重あたりのひずみ変化 (引張縁、7日)



図一八. 除荷時における単位荷重あたりのひずみ変化 (引張縁、21日)

材齢 1 日の場合は単位荷重あたりのひずみの変化が著しく、材齢 7 日、21 日と材齢が経過するにつれて除荷時荷重に対する変化の度合いが鈍くなる。これは、初期ひずみのばらつきの程度に起因するものと考えられる。すなわち、著しい膨張が進行している初期材齢では、ひずみのばらつきが非常に大きいために引張破壊基準近傍に既に至った微小構成要素も多く存在し、荷重を受けると引張側において次々と微小要素の破壊が生じて剛性が低下する。一方、材齢が経過するに従って膨張の進行が安定すると、新たに生成される水和物は、その時点の変形を保持するように生成するので、それらに導入されるひずみのばらつきは小さくなる。当然、ごく初期に形成されたマトリックスは大きくばらついたひずみを持っているが、マトリックス全体で見るとその影響が相対的に小さくなるのである。従って、もともと圧縮応力がほとんど蓄積されていない自由膨張部材の場合は、材齢が経過するに従って普通モルタルに近い挙動を示すようになると考えられる。ただし、拘束鋼材がある場合は、自由な膨張が拘束されるために、大きな内部ひずみ分布がコンクリート内に存在するので、材齢 21 日においても破壊が徐々に進展する様子が観察される。

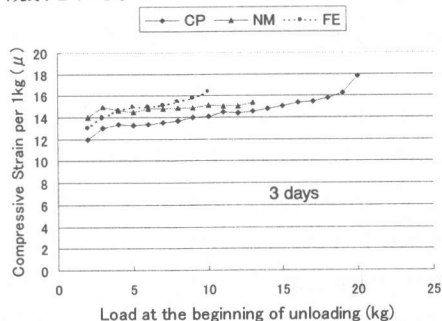


図-9. 除荷時における単位荷重あたりのひずみの変化 (圧縮縁、3 日)

図 9 には除荷時の圧縮縁での単位荷重あたりのひずみ変化 (材齢 3 日) を示した。梁の圧縮側では圧縮強度に比べるとかなり小さな圧縮応力しか作用しないため、圧縮によって破壊が生じるということは考えにくい。図 9 のように単位荷重あた

りの圧縮ひずみが徐々に変化しているのは、引張側での破壊と塑性に起因すると考えられる。すなわち、引張側で破壊とそれに伴う塑性が進行するために梁の変形が増加することによって、圧縮ひずみに影響が出ているといえる。

4. 3 一定荷重下で進行する時間依存変形

図 10 は、材齢 3 日における一定荷重下の引張縁の変形を整理したものである。横軸は 1 分間保持したときの荷重である。荷重が小さい時点から自由膨張部材、およびケミカルプレストレスト部材は明らかに普通モルタル部材よりも大きな変形を示す。さらに特徴的なのは、膨張コンクリートの場合はひび割れ発生荷重に近くなると変形が非線形的に増加することである。ケミカルプレストレスト部材の場合、ひび割れ発生直前では 1 分間の変形が 100μ を超えるほどである。

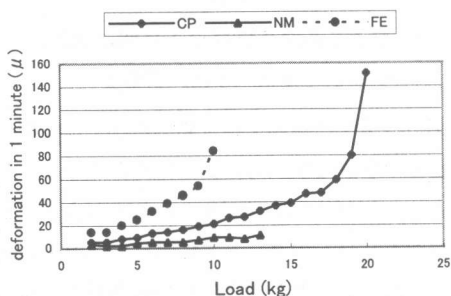


図-10. 一定荷重下での引張縁の変形 (3 日)

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一定荷重下の変形を除荷後の変形とともに、さらに詳しく見たのが図 11、12 である。これらは、引張縁でのそれぞれの荷重下での 1 分間の変形量と、それを除荷した後の 1 分間に戻った変形量である。

普通モルタル部材では、1 分間に生じた変形は除荷後の 1 分間で回復していると考えてよい。一方、ケミカルプレストレスト部材では、普通モルタル部材と比べて変形量が大きだけでなく、小さい荷重においても回復しない変形が認められる。ひび割れ発生近傍では、変形が著しく大きくなり、そのうち非回復性の変形が占める割合が大きくな

っている。

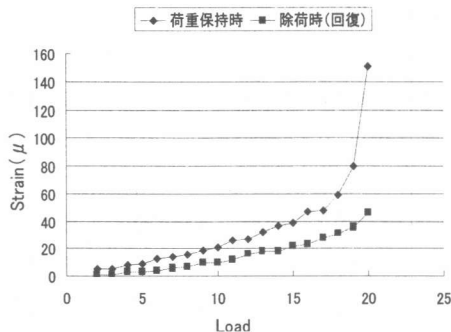


図-11. CP部材の1分間における
時間依存変形（3日、引張側）

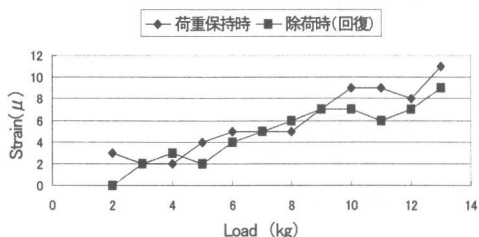


図-12. 普通モルタル部材の1分間における
時間依存変形（3日、引張側）

図13は、梁の圧縮側と引張側でのひずみのばらつきとその挙動を模式的に表したものである。載荷によって強制的に変形が与えられる場合、もしくはコンクリートのクリープにより変形が生じたときに、図のようにひずみ分布の移動が生じる。梁の圧縮側ではひずみ分布がより圧縮側へ移動し、引張側ではより引張側へ移動する。この際、引張ひずみが破壊基準を越えた微小要素は破壊するものと考えられる。図13に示すような内部ひずみ分布を持つケミカルプレストレスト部材の場合には、引張力の作用、および1分間の持続荷重下でのクリープ変形によって破壊基準を越える要素が存在する。本来、引張力を受け持つべき微小要素が新たに破壊することによって、部材断面力の釣合いが保たれなくなるために、さらなる変形が引き起こされ、この変形が非回復な塑性変形をもたらしていると考えられる。

一方、ひび割れ発生直前まで破壊基準近傍のひずみが存在しない普通モルタルでは、1分間にクリープ変形が多少進行しても、破壊に起因する

塑性が進行しないために、非回復の成分はほとんど存在しないものと考えられる。

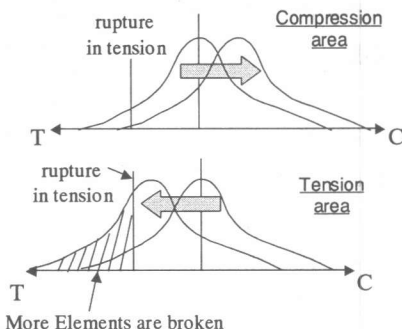


図-13. CP部材の時間依存変形のメカニズム

5. まとめ

膨張コンクリートに特有な非線形挙動を把握する一環として、除荷過程を含む梁の繰返し曲げ載荷試験を行った。非線形挙動の原因として、微視的レベルにおいて、膨張コンクリート内でのひずみが圧縮から引張まで広範囲にわたって分布しており、そのひずみ分布は材齢、拘束条件等によって変化する、という概念を示した。

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.
- 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, 土木学会論文集, 第235号, pp.111-124, 1975. 3.
- 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, 1976. 3.
- 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, 土木学会論文集, 第207号, pp.93-105, 1972. 11.
- 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, 1979.
- 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, 1972.
- 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.
- 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.