

論文 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

細田 暁^{*1}・岸 利治^{*2}

要旨: 膨張コンクリートは、ケミカルプレストレスの効果によって引張強度が大きいことと、ひび割れ発生までの変形能力が大きくなることによって、RC 部材としてのひび割れ抵抗性が大きくなることを示した。その機構として、ペースト部に局所的に非常に強い圧縮ひずみが蓄積されているために、骨材とペーストの界面における剥離の影響が大きくなっても直ちにマクロなひび割れ発生に至らず、剛性の低下を伴いながらひび割れ発生までに大きな変形能力を持つという考察を行った。

キーワード: ケミカルプレストレス、ひび割れ抵抗性、ひずみのばらつき、非線形性、膨張材

1. はじめに

膨張材を添加した膨張コンクリートは、硬化過程に膨張材の化学反応によって膨張することを唯一最大の特徴とする材料である。膨張を拘束しない場合はマトリックスの損傷によって強度・弾性係数の低下を生じる。しかし、鋼材や型枠などで拘束を与えることで、膨張材の化学反応による膨張エネルギーが圧縮応力(ケミカルプレストレス)としてコンクリートに蓄積され、コンクリートの性能が向上する。この圧縮応力は膨張作用によって引っ張られた鋼材が負担する引張力と釣合うように導入されるのである(図-1)。

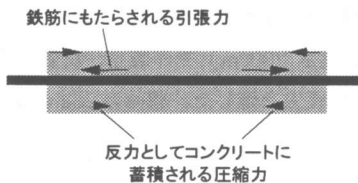


図-1 膨張を拘束した場合に導入されるプレストレス

膨張作用はセメントの凝結終了頃から有効に作用し始め、材齢 7 日程度でほぼ定常状態に達するが、材齢 91 日程度経過してもなお、鋼材による拘束を解除すればわずかながら再び膨張を始めることが知られている¹⁾。硬化過程にある膨張コンクリートは、膨張材の膨張力、コンクリートの圧縮力、鋼材の引張力が釣合いを保っている状態に

あると考えられる。セメントの水和によって徐々に硬化組織を形成しながら圧縮力が蓄積されていく膨張コンクリートは、ある程度硬化した後に機械的にプレストレスを導入する場合は部材の性状が相当に異なる可能性がある。

実際、ケミカルプレストレスは一般的な機械的プレストレスよりは一桁小さい程度でしかないが、その効果がクリープによって簡単に消失することではなく²⁾、部材の種々の性能を改善することが報告されている³⁾。また、普通コンクリートとは異なって、膨張コンクリートはひび割れ発生までの曲げ引張応力下で非線形挙動を示すことと、その機構を説明するコンセプトについて筆者らはすでに報告している⁴⁾。筆者らは、通常のプレストレスコンクリートとは相当に異なる材料であるとの認識に立ち、ひび割れ発生以降も含めた膨張コンクリートの引張性状について研究を行っている。その中で本研究は、一軸引張応力下でのケミカルプレストレス部材のひび割れ抵抗性について論じるものである。膨張モルタルおよび膨張ペーストの挙動を詳細に調べることで、微視的な機構にも着目して膨張コンクリートのひび割れ抵抗性について考察を行う。

2. 実験の概要

本研究では、セメントの一部を膨張材で置換し

*1 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事部構造技術センター 博(工)(正会員)

*2 東京大学生産技術研究所 助教授 博(工)(正会員)

て作成した膨張モルタルおよび膨張ペーストを用いて一軸引張試験を行った。供試体は図-2に示すように、100×100[mm]の断面中央をD19のねじ鉄筋（ヤング係数 1.93×10^5 MPa）が貫通しているものであり、供試体長さは、モルタルでは長さ1000mm、ペーストでは1600mmとした。

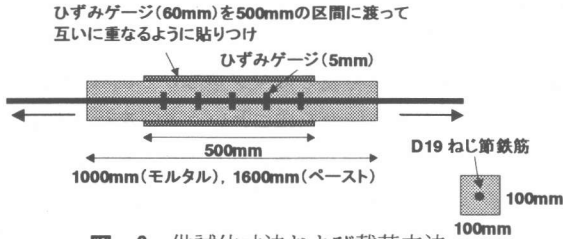


図-2 供試体寸法および荷重方法

供試体長さが異なるのは、予備実験を通して、ペーストでは骨材がないため十分な付着を確保するのが難しいことが判明したためである。そのため、供試体長さを長く取り、脱型時期をモルタルの場合より遅らせて材齢3日（モルタルは材齢1日で脱型）とすることで、引張荷重時に、鉄筋のひずみとペースト表面のひずみがほぼ一致し、付着が断面内に十分に作用していることを確認した。

供試体は脱型後、湿潤養生を施し、材齢3日および7日に荷重試験を行った。引張試験は鉄筋を直接引っ張ることで行い、荷重途中で除荷を行い、除荷過程を含む繰り返し荷重をひび割れ発生まで行った。鉄筋には100mm間隔でひずみゲージ（ゲージ長5mm）を貼りつけ、打設後の膨張ひずみと荷重時の鉄筋のひずみを計測した。荷重時には供試体表面に図-2のようにひずみゲージ（ゲージ長60mm）をそれぞれの端部が互いに重なるように500mmの区間に貼りつけた。膨張過程においてすべての鉄筋のひずみゲージの挙動はほとんど一致し、荷重時にも鉄筋と供試体表面のひずみはひび割れ発生までほとんど一致した。実験結果を整理する際には、最終的にひび割れが発生した箇所に近い鉄筋のひずみを部材の引張ひずみとし、ペースト及びモルタルのひずみは最終的にひび割れが貫通した表面のゲージの値を用いた。

モルタル供試体作製に使用した材料を表-1に、配合を表-2に示した。ペーストの場合は、モル

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) (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | |
|--------|----------------|----------------|--------------------------|-----|----|-----|
| | | | W | C | E | S |
| 普通モルタル | 40 | 0 | 356 | 891 | 0 | 891 |
| 膨張モルタル | 40 | 11 | 355 | 791 | 98 | 889 |

タルと同様に水セメント比を40%とし、膨張材はセメント重量の11%を内割で置換した。また、ペーストの場合のみ、CSA系、Ca(OH)₂系の異なる膨張材を用いて実験を行った。

前述のように、膨張コンクリートは膨張を拘束することでその性能を十分に発揮するため、基本的には拘束が十分に行き届くようにして使用すべきものである。本研究では自由膨張させた膨張モルタルに対しても繰り返し荷重を行ったが、これは非線形挙動の機構に関する知見を得ることを目的としている。鋼材による拘束がない場合は、特に一定荷重下での時間依存変形が顕在化するため、より複雑な荷重履歴を与えて挙動を観察する意味があるからである。自由膨張モルタルの供試体は、表-2の配合で剛性の小さい使い捨て型枠（直径100mm、高さ200cm）で作製し、材齢1日で脱型後に水中養生を施した。荷重方法は3.2で述べる。

3. 膨張モルタルの引張性状

3.1 拘束された膨張モルタルのひび割れ抵抗性

打設後の膨張ひずみを図-3に示した。図-4

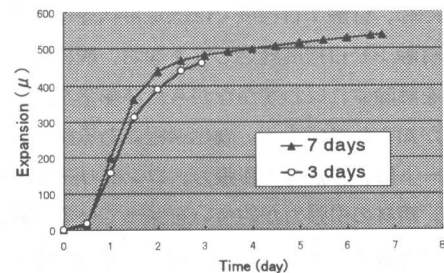


図-3 打設後の膨張ひずみ

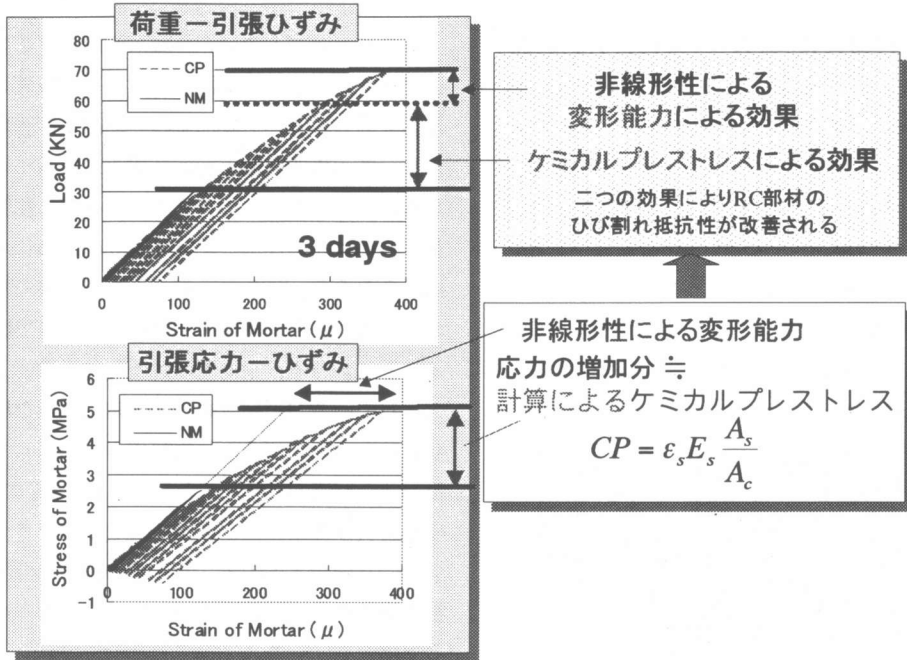


図-4 材齢3日におけるモルタルの実験結果

左上は材齢3日における荷重と引張ひずみの関係である。膨張材を添加したことによりひび割れ抵抗性は大きく改善されている。普通モルタル(NM)はひび割れ発生までほぼ線形挙動と見なせるが、膨張モルタル(CP)は非線形挙動を示している。図-4 左下には、部材に作用する荷重から鉄筋の負担する引張力を差し引いてモルタル部分の応力-ひずみ関係としたものを示した。これより、膨張モルタルは大きな非線形性を示すことが明らかである。

膨張モルタルは非線形性を示すため、一軸引張応力下でのひび割れ発生時のひずみは、引張強度を初期の剛性で除した値よりも大きくなる。これは膨張モルタルの変形能力が大きいという見方も可能である。この変形能力によって部材のひび割れ耐力がどの程度向上するのか、定量的に検討を行うことにした。

材齢3日における普通モルタルの引張強度は2.52MPaであった。式(1)によって、鉄筋が負担する引張力の反力としてコンクリートに導入された圧縮応力の断面平均値が求められる(CP:ケミ

$$CP = \varepsilon_s E_s \frac{A_s}{A_c} \dots (1)$$

カルプレストレス、 ε_s :鋼材の膨張ひずみ、 E_s :鋼材のヤング係数、 A_s :鋼材の断面積、 A_c :モルタルの断面積)。材齢3日の場合は、この計算によるケミカルプレストレスが2.67MPaであった。

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であり、普通モルタルとの引張強度の差は計算によるケミカルプレストレスとほぼ同程度である。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-4 左下)、RC部材としてのひび割れ耐力は約60KNとなる(図-4 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370μ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、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。

図-5には、モルタルの除荷時剛性の変化を、また図-6には、除荷後の残留ひずみを示した。除荷時の剛性が低下することは外力に抵抗する体

積, すなわちひずみエネルギーを保存する領域が減少していくことを意味している⁵⁾。膨張モルタルでは経験応力の増加にしたがって除荷時剛性が徐々に低下するのに対して, 普通モルタルではそのような傾向が見られない。また, 経験応力が2MPaあたりから除荷時剛性が顕著な低下を始めるが, それと呼応するかのように残留ひずみの増加が著しくなる。このような膨張モルタルの非線形挙動が生じる機構について筆者らはすでにそのコンセプトを提示している⁴⁾。

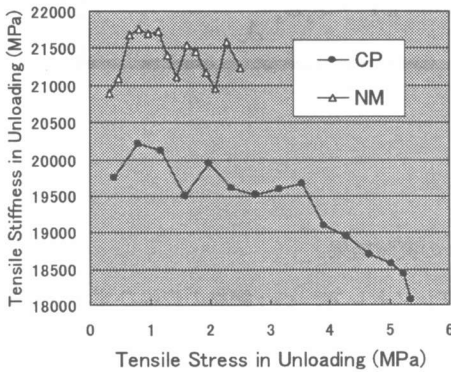


図-5 除荷時剛性の変化 (材齢3日)

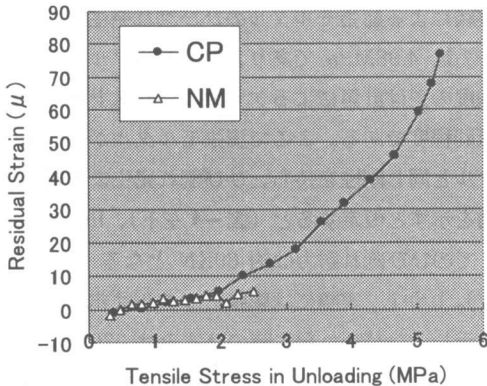


図-6 除荷後の残留ひずみ (材齢3日)

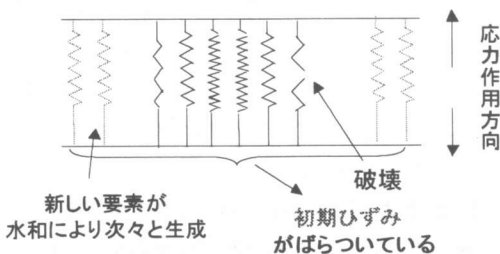


図-7 膨張コンクリートの内部ひずみのばらつき

そのコンセプトでは, 一軸引張応力下の膨張コンクリートを並列に配置された微小構成要素で表現している。そして硬化過程における膨張作用により, 微小構成要素の初期ひずみにばらつきがもたらされると考えたのである(図-7)。膨張材は基本的には膨張作用によって周囲の組織に対して損傷を与える。しかし, 拘束された膨張モルタルの場合は, 硬化過程に適切なタイミングで膨張することによって, 平均的には断面に圧縮応力が導入されているが, 局所的には非常に大きな圧縮力が蓄積している部分と, 引張応力が作用している損傷部分が混在していると考えられる。そのため, 引張応力が作用すると, 微小構成要素のうち弱いものから破断するので, 除荷時の剛性は低下し, 微小構成要素の破断に伴って残留ひずみが発生する機構を提示した。

材齢7日においても, 程度は小さくなるが, 膨張モルタルは非線形挙動を示した。ひび割れ発生時のひずみ, 応力については表-3に示した。

3.2 自由膨張モルタルの実験結果

自由膨張させたモルタル供試体に対しては, 図-8に示すような引張応力を順次荷重した。短時間で荷重を行った後に90秒間荷重を保持し, 瞬

| | | | | | |
|--------|---------|---|------|---|------|
| Step1: | 0.51MPa | → | 1.02 | → | 1.53 |
| Step2: | 1.02 | → | 1.79 | | |
| Step3: | 1.02 | → | 1.53 | → | 2.04 |
| Step4: | 1.79 | → | 1.02 | → | 2.55 |

図-8 自由膨張モルタルの荷重方法 (下線部は最大経験応力より小さい応力)

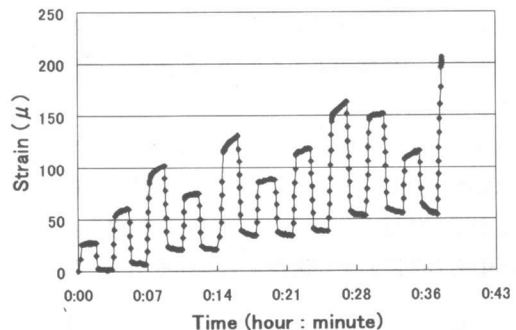


図-9 自由膨張モルタルの実験結果 (材齢3日)

間的に除荷した後も 90 秒間保持することとした。図-9 には、引張ひずみの経時変化を示した。これより、自由膨張モルタルでは、過去の最大経験応力が作用している時に、非回復な変形が進行し、除荷後の残留ひずみが増加することが分かる。最大経験応力より小さな引張応力が作用する場合は、荷重保持時の 90 秒間に若干変形が見られるが、これは除荷後の 90 秒間にほとんど回復するので残留ひずみの増加は見られない。

材齢 3 日のような若材齢時では膨張材の反応もまだ完全な定常状態には至っていない。そこで、引張荷重が作用する場合は、膨張材の膨張力に対する骨材の拘束も緩まるために、載荷中という短時間の間にも膨張ひずみが顕在化する可能性もある。しかし、図-9 の結果は、40 分弱の載荷時間においては、膨張ひずみの発現の影響が卓越することはないことを示している。自由膨張モルタルでは、拘束された場合のように大きな圧縮力が蓄積されることはないが、やはり膨張作用によって局所的なひずみはばらついていると思われる。材齢 3 日のような若材齢においても、膨張モルタルの非線形挙動の主要因は、膨張作用によって周囲のマトリックスおよび骨材の力学的性状が変化したことであると考えられる。

4. 膨張ペーストの引張性状

打設後の膨張ひずみを図-10 に示した。材齢 3 日の少し前に脱型を行った。脱型後、型枠による鋼材方向の摩擦、および鋼材直交方向の拘束がなくなり、定常状態にあった膨張ひずみが増加を開始している。また、Ca(OH)₂系の方が打設後の膨張ひずみが若干大きかった。

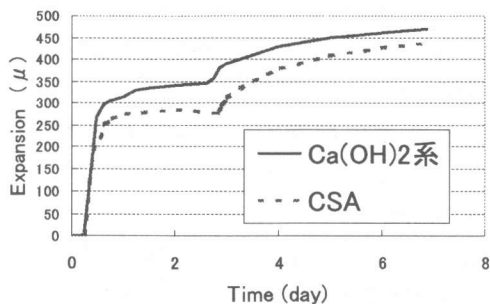


図-10 ペースト供試体の膨張ひずみ

4.1 異なる膨張材を用いた場合のペーストの引張性状

図-11 には、Ca(OH)₂系の膨張材を用いた膨張ペーストの材齢 7 日における実験結果を示した。膨張ひずみの発現は Ca(OH)₂系の方が大きかったため、ひび割れ発生荷重もやや Ca(OH)₂系の方が大きくなった。しかし、Ca(OH)₂系と CSA の挙動は除荷時も含めてほぼ一致した非線形挙動を示した。図-12 には最大経験ひずみと除荷後の残留ひずみを示した。CSA は針状の結晶であるエトリンガイトの、Ca(OH)₂系はきれいな六角形の結晶である Ca(OH)₂ が主として膨張作用を発現するが、どちらを用いた場合も引張性状は同じ傾向を示した。膨張ペーストは引張応力下で非線形挙動を示すが、この結果は膨張性生成物そのものが主要因ではなく、膨張作用によって力学的に性状が変化したマトリックス部分での機構によるものであることをはっきりと示唆していると言えるであろう。

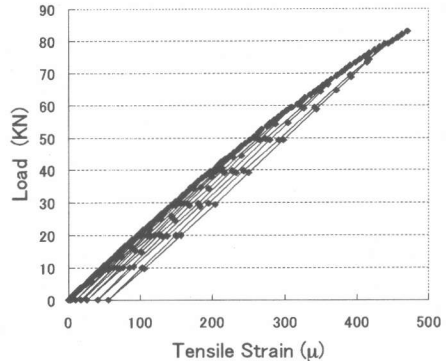


図-11 Ca(OH)₂系膨張ペーストの荷重-引張ひずみ関係 (材齢 7 日)

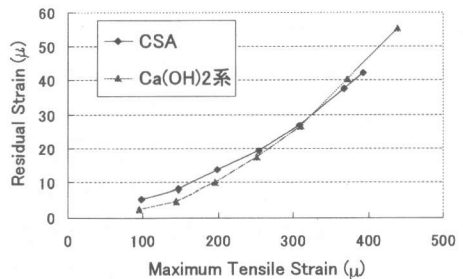


図-12 除荷後の残留ひずみ (膨張ペースト, 7 日)

4. 2 膨張ペーストの非線形挙動

表-3 には、これまでのモルタル、ペーストの一軸引張試験に対して、ひび割れ発生時の引張ひずみと引張応力を整理したものを示した。ただし、膨張ペーストは CSA 系の膨張材を用いた場合のみについて記してある。普通ペーストは普通モルタルよりもひび割れ発生時のひずみがやや大きい。これは、骨材が存在する場合は、骨材とセメントマトリックスの界面が弱点となるためであると考えられる。モルタルにおけるひび割れ発生時はこの界面の剥離の影響が卓越する時点であると考えられる。

表-3 ひび割れ発生時のひずみと応力

| | ひび割れ発生時のひずみ (μ) | | ひび割れ発生時の応力 (MPa) | |
|--------|-----------------------|------|------------------|------|
| | 材齢3日 | 材齢7日 | 材齢3日 | 材齢7日 |
| 普通ペースト | 154 | | 1.97 | |
| 普通モルタル | 128 | 119 | 2.52 | 2.65 |
| 膨張ペースト | 513 | 394 | 5.29 | 5.29 |
| 膨張モルタル | 373 | 276 | 4.98 | 5.33 |

同様に、膨張ペーストは膨張モルタルより大きなひび割れ発生ひずみを示しているが、その差はかなり大きなものとなっている。特に材齢3日においてはひび割れ発生時のひずみが500 μ 以上であり、非常に大きな変形能力を示している。膨張材を添加する場合は、骨材の有無でペースト硬化体の性状も異なる可能性があるが、すでに示したように鋼材で拘束した場合の膨張ひずみはほぼ同程度である。また、すでに図-5で示したように、膨張モルタルでは経験応力が増加すると除荷時剛性が低下するが、膨張ペーストでは除荷時の剛性の低下がわずかであった。これらをもとに、膨張モルタルでは骨材界面のうち、弱い部分から徐々に剥離が生じ、除荷時剛性の低下を招くと考えた。局所的な破壊が平均的に生じ、部材の挙動として除荷時剛性が若干低下するが、それらが急激に連結してマクロなひび割れに至ることはないのが、膨張モルタルの特徴である。この理由としては、鋼材による拘束がある場合、モルタル断面には平

均的には圧縮応力が導入されるが、骨材界面が弱点になっている一方で、ペースト部分には非常に大きな圧縮力が蓄積されており、局所的な微細ひび割れの進展および連結を妨げるためであると考えている。今後も詳細な検討を続ける予定である。

本研究では、モルタルおよびペーストで作製した供試体の一軸引張試験の結果を紹介したが、膨張コンクリート部材で一軸引張部材の場合、またひずみ勾配の存在する曲げ部材におけるひび割れ抵抗性とひび割れ発生後のひび割れ幅についても研究を行っており、今後公表する予定である。

5. まとめ

(1) 鋼材により拘束した膨張コンクリートは、ケミカルプレストレスの効果によって引張強度が大きくなることと、ひび割れ発生までの変形能力が大きくなることによって、RC部材としてのひび割れ抵抗性が大きくなる。

(2) 膨張コンクリートは除荷時剛性の低下を伴いながらもひび割れ発生までに大きな変形能力を示す。この現象をもたらし機構の一つとして、骨材界面のうち弱い部分から徐々に破壊が生じるが、ペースト部には非常に大きな圧縮ひずみが蓄積されている部分もあるために、局所的な微細ひび割れの進展および連結が抑制されるためである、との考えを示した。

参考文献

- 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荷重試験, セメント技術年報, No.31, 1977.
- 土木学会: コンクリートライブラリー75, 膨張コンクリート設計施工指針, 1993
- 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: 若材齢ケミカルプレストレス部材の挙動とその考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.787-792, 2000.
- 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.