

論文 早強型膨張材の諸特性とコンクリート製品への適用性

佐久間隆司*1・鈴木脩*2・佐竹紳也*1・渡邊斉*1

要旨：コンクリート構造物の性能を照査する上で、コンクリートに発生するひび割れは耐久性を左右する重要な要因となりつつある。このような耐久性の観点からコンクリート用膨張材を配合することはコンクリート打設の初期から発生する温度ひび割れ、乾燥収縮ひび割れ、高強度コンクリートにおける自己収縮ひび割れを抑制するうえで有効である。ここでは、新型膨張材としてコンクリート強度を早期に発現させる早強型膨張材の諸特性とコンクリート製品への適用事例とその効果について報告するものである。

キーワード：早強性、膨張材、膨張コンクリート、ケミカルプレストレス

1. はじめに

コンクリートは硬化初期段階から自己収縮、水和熱による温度応力、乾燥による収縮が発生する。この収縮に対して鉄筋や外部からの拘束されることにより、ひび割れが発生する過程をたどる。ひび割れは必ずしも耐久性を低下させるものではないが、鉄筋位置まで達するひび割れは水分、酸素の短絡経路を作るという意味で長期的な耐久性能低下につながるおそれがある。

これらの自己収縮や乾燥収縮によるひび割れの発生やひび割れ幅を抑制することが方策の一つとして膨張材の使用が挙げられる。膨張材は上市されてから30年以上の歴史をもつが、最近では低添加型の膨張材¹⁾も開発されてコストパフォーマンスが向上し、耐久性の議論の中でその効果が見直されつつある。また、膨張材の用途として、コンクリート製品向けにケミカルプレストレスを導入して外圧強度を向上させる性

能がある。ここでは新しく開発された早強型膨張材を使用したコンクリートの諸性能と蒸気養生エネルギーを低減する目的でコンクリート製品へ適用した事例とその効果について報告する。

2. 実験内容

2.1 早強型膨張材の特性

早強型膨張材は、従来の石灰系膨張材に比較して石灰量・比面積が大きく、水和反応性が高い。これによりセメントの初期水和を促進し、適量混和することによりコンクリート強度を早期に発現させることができる。従って、コンクリート製品製造では簡単な蒸気養生または蒸気養生をしないで早期脱型、収縮ひびわれの抑制、ケミカルプレストレス導入が可能になる。一般に早強型膨張材は早強性を重視する場合、強度面で有利なためにセメント量の外割で配合する。従来の膨張材と同様にケミカルプレストレスを

表－1. 早強型膨張材の化学組成と物理的性質

銘柄	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	化学成分 (%)						
			Ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
早強型膨張材	3.19	4520	0.3	7.4	1.7	1.0	80.0	0.8	8.5
市販品 A	2.91	2500	0.8	4.0	10.0	1.0	51.2	0.6	31.9
市販品 B	3.14	3500	0.4	9.6	2.5	1.3	67.3	0.4	18.0

*1 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 (正会員)

*2 秩父コンクリート工業(株) (正会員)

導入する場合はセメント量の内割りで配合することとしている。表－1 に化学成分と物理的性質を従来の代表的な膨張材と比較して示す。

2.2 使用材料

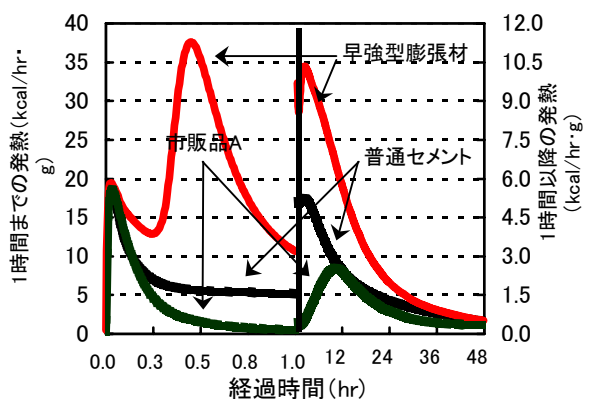
本試験では普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材には小笠産陸砂（F.M.=2.78，表乾密度 2.59g/cm³），粗骨材には岩瀬産碎石（G-max=20mm，F.M. = 6.45，表乾密度 2.65g/cm³）を用いた。膨張材としては早強型膨張材を使用して初期水和反応性試験については市販品 A の水準も追加した。尚，コンクリート製品に広く使用されているナフタリンスルホン酸系高性能減水剤を用いた。

2.3 コンクリート配合

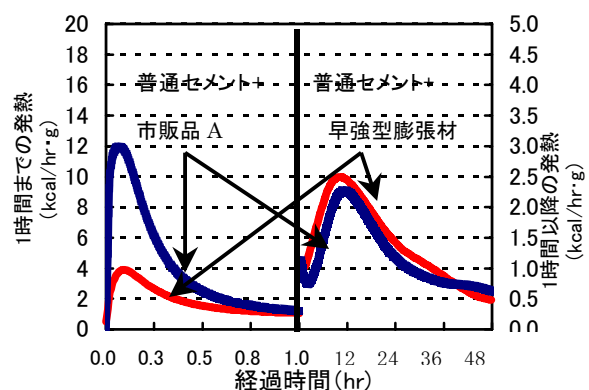
表－2 に示すコンクリート配合を用いた。尚，早強型膨張材の配合量は 0, 20, 30, 40kg/m³ として，単位セメント量 400kg/m³ と一定として外割にて早強型膨張材を配合した。

2.4 試験項目と試験方法

試験項目と試験方法については表－3 に示す。尚，微小熱量計による水和反応性については普通セメントに各種膨張材を内割りで 10% 配合し



図－1. 初期水和反応性試験結果
(膨張材単独)



図－2. 初期水和反応性結果
(セメントと混合)

表－2. コンクリート配合

配合	目標スランプ (cm)	目標空気量 (cm)	W/C (%)	単位量 (kg/m³)		SP (C+E) × %
				C	早強型膨張材	
早強型膨張材 0	12 ± 2.5	4.5 ± 1.5	40.0	400	0	1.30
早強型膨張材 20					20	1.30
早強型膨張材 30					30	1.30
早強型膨張材 40					40	1.30

表－3. 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
初期水和反応性	微小熱量計により水比 100% で初期水和性状を確認した。尚，膨張材単独とセメントとの混合の水準について実施した。
スランプ試験	JIS A 1101 コンクリートのスランプ試験方法に準じて，20℃において 60 分までの経時変化を測定した。
凝結試験	JIS A 1147 コンクリート凝結時間試験方法に準じて測定した。
圧縮強度試験	JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法に準じて，材齢 4, 5, 6 時間，1, 7, 14 日の簡易蒸気養生を実施した水準について実施した。また，屋外暴露 1 年間したものについて行った。
一軸拘束膨張試験	JIS A 6202 コンクリート用膨張材拘束膨張 B 法に準じて実施した。尚，蒸気養生をしないものと簡易蒸気養生を実施した水準について実施した。
凍結融解試験	JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法に準じた。尚，A 法拘束試験体を用いて成形後 14 日間水中養生後 300 サイクルまで実施した。

て水セメント比 100%にて試験を実施した。他の試験については全て表－2に示すコンクリートを用いて行った。

3. 試験結果

3.1 初期水和反応性試験結果

膨張材の微小熱量計測定結果を図－1に示す。早強型膨張材については従来の膨張材に比較して極初期の水和反応が早く、発熱量も大きい。ただし、図－2に示すようにセメントとの組み合わせではほぼ同様な水和反応性を示すことがわかる。初期水和反応性や水和発熱が大きいことについては早強型膨張材に使用しているクリンカーの粉末度を上げ、水和活性を高めているためと考える。

3.2 スランプおよびスランプの経時変化

スランプの経時変化については図－3に示す。早強型膨張材配合量を増加させていってもスランプの経時変化にはほとんど影響を及ぼさないことがわかった。

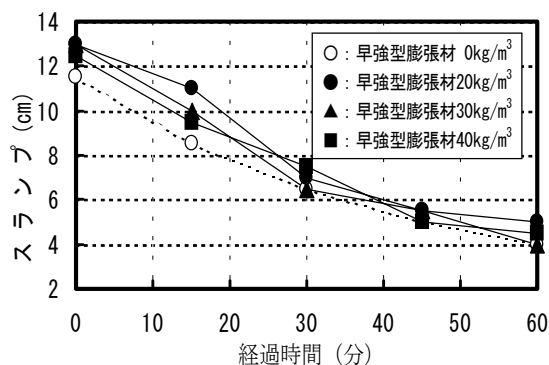
3.3 凝結試験結果

凝結試験結果を図－4に示す。早強型膨張材の配合量が増加するに従って硬化促進とともに凝結時間が早くなる傾向にある。

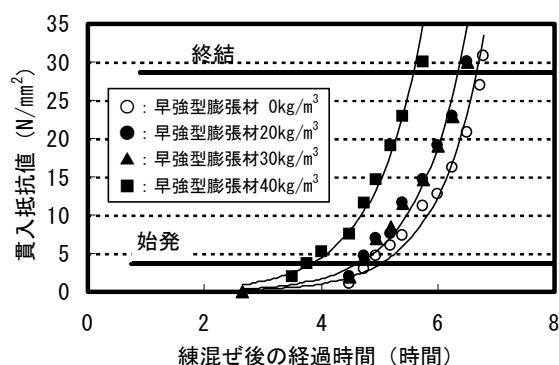
3.4 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果については図－5～図－7に示す。試験体は20℃で成形した後、蒸気養生までの時間を30分とした。蒸気養生は1時間で60℃まで昇温して、1時間60℃を保持した後、自然放冷する簡易蒸気養生とした。尚、試験体は材齢1日で脱型した後、7日まで20℃水中養生として7日以降は20℃80%の気中養生とした。図－5に材齢4時間、5時間、6時間と1日までの初期材齢、図－6に材齢28日までの試験結果を示す。さらに図－7に1年までの圧縮強度結果を示す。

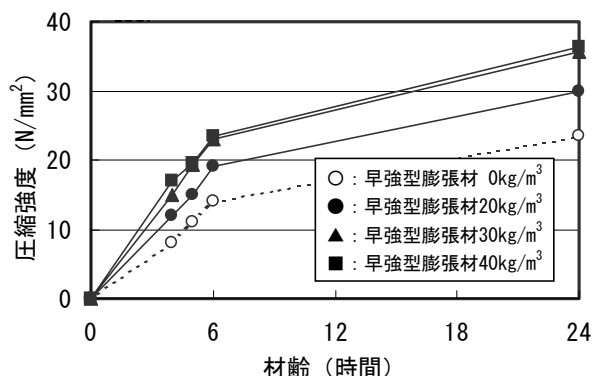
早強型膨張材配合量を増加するにつれて、初期から14日材齢までの圧縮強度が大きくなる。長期的な圧縮強度については材齢1年で、蒸気養生を実施せず、7日まで標準養生を行った水



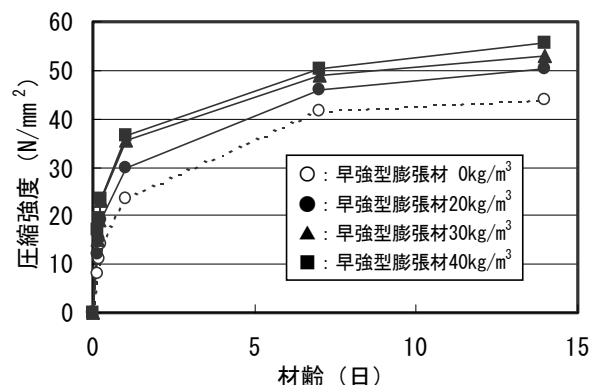
図－3. 早強型膨張材使用
コンクリートのスランプの経時変化



図－4. 早強型膨張材使用
コンクリート凝結試験結果



図－5. 短期強度試験結果
(簡易蒸気養生)



図－6. 圧縮強度試験結果
(簡易蒸気養生)

準が若干大きいですが、圧縮強度の低下はない。

3.5 拘束膨張試験結果

早強型膨張材の配合量を変化させて、材齢 7 日まで 20℃水中養生を実施し、その後 20℃60% R. H. で気中養生した場合の拘束膨張試験結果を図－8 に示す。また、圧縮強度試験と同様に簡易蒸気養生を行った場合の拘束膨張試験結果を図－9 に示す。

早強型膨張材の配合量が増加するに従って、拘束膨張率は大きくなった。しかし、蒸気養生を行った場合には行わない場合に比較して拘束膨張率が小さくなる傾向にある。これは前置きが 30 分と短いために、蒸気養生を行うことにより普通セメントに比較して早強型膨張材の水和反応が早くなり、コンクリート硬化体組織ができ強度が発現するまでに早強型膨張材の反応が消費されるためであると推察する。

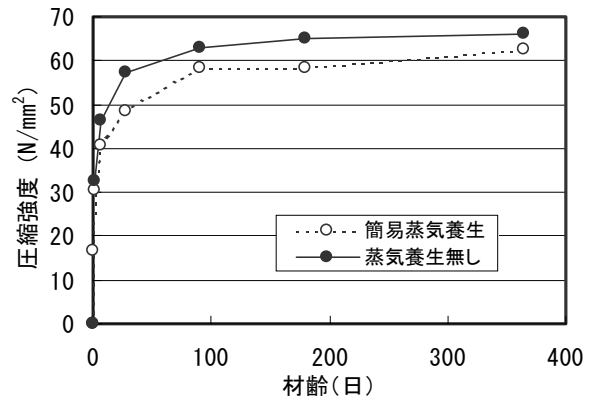
ここで、膨張材によってコンクリートに導入されるケミカルプレストレス (σ_{cp}) は式 (1) から計算される。

$$\sigma_{cp} = p \cdot E_s \cdot \varepsilon_s \quad (1)$$

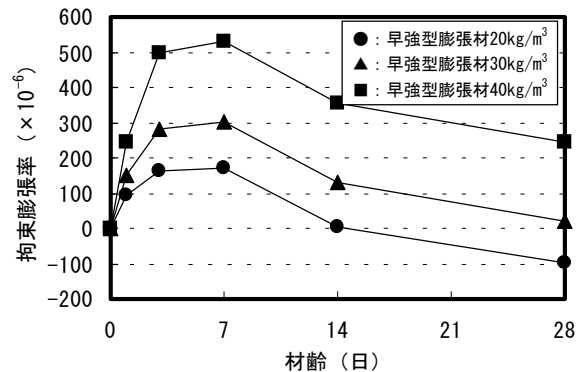
ここで、 p : 拘束鋼材比 (鉄筋比), E_s : 鋼材の静弾性係数, ε_s : 拘束鋼材のひずみである。図－9 より簡易蒸気養生とその後の水中養生によって $138 \sim 310 \times 10^{-6}$ の膨張ひずみが得られ、式(1)から $0.28 \sim 0.62 \text{ N/mm}^2$ のケミカルプレストレスが導入可能である。この値から辻²⁾による膨張コンクリートがなす仕事量一定則により対象とするコンクリート製品の拘束鋼材比でのケミカルプレストレスを求めることができる。ケミカルプレストレスはボックスカルバートやヒューム管の外圧強度を向上させるために使用されており、早強型膨張材についてもこれらの外圧強度向上に使用できることが確認できた。

3.6 凍結融解試験結果

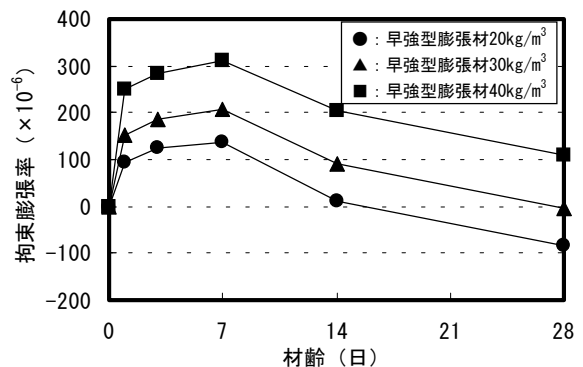
凍結融解試験結果を図-10 に示す。標準養生および簡易蒸気養生を行った水準ともに 300 サイクル後の相対動弾性係数はほとんど低下しておらず、良好な耐久性を有していた。



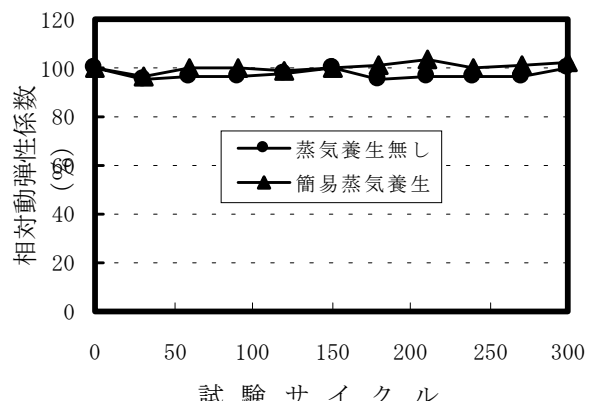
図－7. 長期暴露した圧縮強度試験結果



図－8. 早強型膨張材使用コンクリート拘束膨張率の関係 (蒸気養生無し)



図－9. 早強型膨張材使用コンクリート拘束膨張率の関係 (簡易蒸気養生)



図－10. 凍結融解試験結果

※コンクリートのフレッシュ時空気量 4.2%)

4. コンクリート製品への適用事例

4.1 使用目的

ヒューム管の中で2種管は膨張コンクリートを用いてケミカルプレストレスを導入して外圧ひびわれ強度（初期ひびわれ発生強度）を確保するものである。過去には、ケミカルプレストレスを導入するための研究が多く散見される。³⁾ここでは、JISのひび割れ強度の規格値を満足するための曲げ引張り強さが大きく、有効プレストレスも大きいために製造上最も厳しいとされているφ600mmの2種管について蒸気養生エネルギー低減を目的として適用検討を行った。

4.2 コンクリート配合

コンクリート配合を表ー4に示す。使用セメントは早強ポルトランドセメントであり、ナフタリンスルホン酸系高性能減水剤を使用した。目標スランプは5±1.5cmであり、膨張材は外割り配合として、製造時期を変えて実管を製造した。尚、膨張材は従来品である市販品Aの蒸気養生における最高温度を60、70℃とし、早強型膨張材については最高温度を50、60、70℃の水準とした。

4.3 蒸気養生条件

蒸気養生は前置き8～11時間として、昇温速度を20℃/時間として、最高温度に達した後3.5～4.5時間保持し、その後自然放冷とした。型枠脱型後材齢7日まで水中養生とした。

4.4 各種物性試験

φ600mm2種管製造と同時に打設したコンクリートについて、JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法に準じて強度試験を実施した。また、JIS A 6202 コンクリート用膨張材付属書2に準じてB法拘束膨張試験も行った。尚、養生条件は実管と同様な条件で実施した。

4.5 試験結果

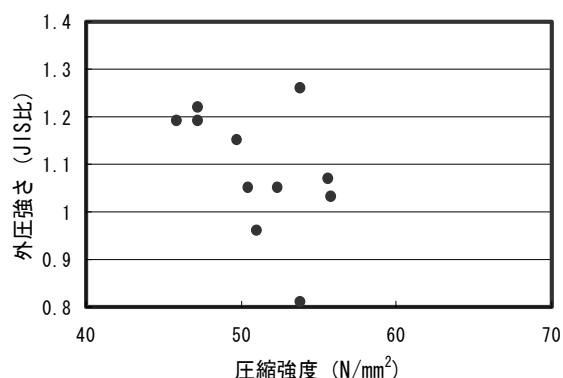
実管における外圧強さ・圧縮強度試験・拘束膨張試験を表ー5に示す。外圧強さについては、JIS A 5372に規定されるφ600mm²種管のひび割れ規格荷重に対する比で表した。外圧強さを材齢14日の圧縮強度の関係で表したものを図ー

表ー4. コンクリート配合と水準

配合	蒸気養生最高温度(℃)	膨張材種類	単位量 (kg/m ³)		
			W	C	E x
1	60	早強型	171	460	35
2	70	早強型	171	460	35
3	50	早強型	173	460	40
4	60	早強型	173	460	40
5	70	早強型	173	460	40
6	50	早強型	174	460	45
7	70	早強型	174	460	45
8	50	早強型	175	460	50
9	70	早強型	175	460	50
10	60	市販品A	180	460	70
11	70	市販品A	180	460	70

表ー5. 外圧強さと各種物性試験結果

配合	製品外圧強さ JIS 比	圧縮強度 (N/mm ²)		拘束膨張率 (×10 ⁻⁶)	
		1日	14日	1日	7日
1	0.96	33.7	51.0	495	517
2	1.05	37.9	50.5	503	539
3	0.81	30.0	53.8	380	455
4	0.78	35.8	60.4	383	448
5-1	1.03	37.9	55.8	578	656
5-2	1.15	36.3	49.8	734	774
6	1.05	27.9	52.4	503	584
7	1.22	34.0	47.2	1007	1035
8	1.19	26.1	47.2	744	809
9	1.19	31.8	45.9	1378	1416
10	1.07	36.5	55.6	377	542
11	1.26	39.3	53.8	486	668



図ー11. 圧縮強度と外圧強さの関係

1 1, 材齢 7 日時点での一軸拘束膨張試験結果で整理したものを図-12 に示す。

圧縮強度に対する外圧強さについては明確な関係が見出せなかった (2 次式相関係数 $R^2=0.46$) が一軸拘束膨張率と外圧強さについては相関が認められた。(2 次式相関係数 $R^2=0.77$) 一軸拘束膨張率で 1000×10^{-6} を超えると外圧強さは大きくなりならず, ケミカルプレストレスが大きくなって外圧強さが頭打ちとなるしきい値が存在することが確認された。また, 早強型膨張材型 (配合 No. 5, 6, 8) は従来型膨張材 (配合 No. 10) と比較すると配合量が少なく, 蒸気養生最高温度を低くしても外圧強さを得られることがわかる。すなわち, 蒸気養生エネルギー低減の効果が認められた。

一方, 実管において, 管内外面に発生した亀裂発生状況を表-6 に示す。従来の膨張材に比較して, 蒸気養生の最高温度を高くして, 配合量が大きいと亀裂発生の可能性が高くなる。

5. 結 論

- (1) 早強型膨張材型は膨張材としての機能だけでなく, 自己発熱等によりセメントの水和を促進させて早期強度を発現させる効果が認められた。
- (2) 特にケミカルプレストレスを導入して外圧強さを得るコンクリート製品へ適用した場合, 単位膨張材量を減じ, さらに蒸気養生温度を低下して製造すること可能である。
- (3) 2 種ヒューム管へ適用した場合, 拘束膨張率と外圧強さは 1000×10^{-6} までは比例関係にあるが, それ以上は外圧強さが変わらないしきい値の存在を確認した。
- (4) ヒューム管への適用は亀裂発生を考慮した早強型膨張材の配合量と蒸気養生条件他を設定する必要がある。また, 効率的なケミカルプレストレス導入が今後の検討課題である。

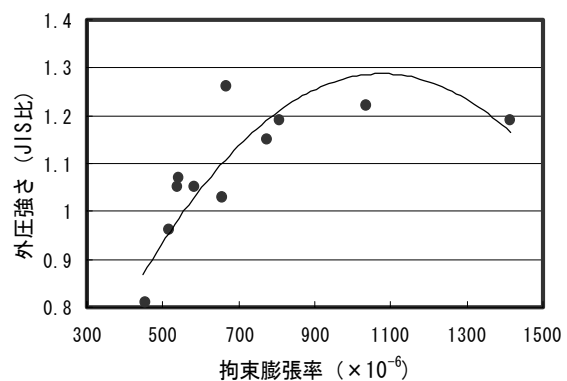


図-12. 拘束膨張率と外圧強さの関係

表-6. 実管の亀裂発生状況

配合	材齢		
	1 日	7 日	1 4 日
1	無	無	無
2	微	微	微
3	無	無	無
4	無	無	無
5-1	無	無	無
5-2	SK	SK	SK・SP
6	無	無	SK
7	SK・SP	SK・SP	SK・SP
8	無	無	無
9	SK・SP	SK・SP外	SK・SP外
10	無	無	無
11	無	無	無

備考 SK: 管接合部の外管部内面発生

SP: 管接合部の内管部内面発生

参考文献

- 1) 保利彰宏, 低添加型膨張材を用いたコンクリートの基礎物性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, 2002
- 2) 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, pp111-124, 1975
- 3) 飯田秀雄・門司唱, ケミカルプレストレスを導入する鉄筋コンクリート管の拘束条件に関する研究, 土木学会論文集, 第 225 号, pp85, 1974