

# 論文 膨張コンクリートのテンションスティフニング効果に関する 実験的研究

石村隆敏\*<sup>1</sup>・丸山誉史\*<sup>2</sup>・細田暁\*<sup>3</sup>・岸利治\*<sup>4</sup>

**要旨:** 本研究は、膨張コンクリートのテンションスティフニングについて検討をした。鉄筋で一軸に拘束された膨張コンクリートをひび割れ発生後鉄筋が降伏するまで一軸引張試験を行ったところ、膨張コンクリートはテンションスティフニング効果が非常に大きいことが明らかになった。特にひび割れ直後の挙動は普通コンクリートのそれと大きく異なると考えられる。また、変形の局所化に対する抵抗性が高くなることにより、普通コンクリートと比べ平均ひび割れ間隔が小さく、ひび割れが分散されることが明らかになった。

**キーワード:** 膨張コンクリート、テンションスティフニング、ひび割れ分散性

## 1. はじめに

膨張材を添加した膨張コンクリートは、その膨張を鋼材などで拘束することにより、コンクリートに圧縮応力が蓄積される。この圧縮応力(ケミカルプレストレス)を利用して収縮や荷重などによるひび割れを低減することが可能である。

過去の研究により、膨張を拘束したケミカルプレストレストコンクリートは、ひび割れ抵抗性、せん断耐力が向上し、曲げひび割れ幅も小さくなることがわかっている<sup>1)</sup>。しかし、硬化過程に膨張エネルギーが徐々に蓄積されていくケミカルプレストレストコンクリートは、硬化後に機械的に圧縮力を導入する通常のプレストレストコンクリートとは性状が異なる可能性がある。実際、ケミカルプレストレストコンクリートでは、導入された圧縮応力はクリープで簡単に消失することはなく、長期に渡ってその効果が保持されることが知られている<sup>2)</sup>。また、膨張コンクリートはひびわれ発生までに強い非線形性を示すことも分かっている<sup>3)</sup>。

しかしながら、引張応力下における膨張コ

ンクリートの挙動に関する知見は十分ではなく、特に、ひび割れ発生後の軟化領域については、過去の研究はほとんど見当たらない。ひび割れ発生後の軟化性状は、曲げひび割れ幅、せん断挙動に大きく影響するため、本研究では膨張コンクリートのテンションスティフニング効果について実験的に検討することにした。

引張を受ける場合、鉄筋コンクリートにひび割れが発生した後も、コンクリートは引張力を分担する。この現象は一般にコンクリートのテンションスティフニング効果と呼ばれる。このテンションスティフニング効果は鉄筋とコンクリートの付着作用によって生じるものであり、その効果は、部材の耐荷力の増加にあまり寄与しないが、鉄筋コンクリート部材の変形を解析的に追跡する場合にはこの影響を無視できないとされている<sup>4)</sup>。

テンションスティフニング効果をモデル化する手法のひとつに、ひび割れ発生後のコンクリートの応力-ひずみ関係をモデル化する方法があり、その精度の高いものとして、岡

\*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

\*2 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

\*3 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部構造技術センター 博(工) (正会員)

\*4 東京大学助教授 生産技術研究所 博(工) (正会員)

村・前川が提案しているコンクリートの平均応力-平均ひずみの関係式<sup>5)</sup>がある。

$$\sigma_t = f_t (\varepsilon_m / \varepsilon_t)^c \quad (1)$$

ここに、 $f_t$ はコンクリートの引張強度、 $\varepsilon_m$ はひび割れ開始時のひずみの2倍の値であり、 $c$ は付着特性を表すパラメータで、異形鉄筋の場合、 $c=0.4$ を用いる。このモデルでは塑性域を設けている。

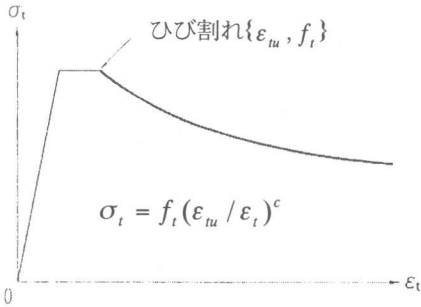


図-1 テンションスティフニングモデル<sup>5)</sup>

また、これまでに膨張コンクリートのテンションスティフニングのモデルがいくつか提案されており、そのひとつでは、ひび割れ発生荷重はプレストレスにより増加するが、テンションスティフニング効果は低下するとしている(図-2)。これは、膨張効果によって、鉄筋の周りのコンクリートも膨張し、付着が悪くなるとの推測や、解析上、初期ひずみに相当する応力分だけ引張強度を大きくするので、普通コンクリートと同じテンションスティフニングモデルを使うとコンクリートの負担分を過大評価するといった考えからである。

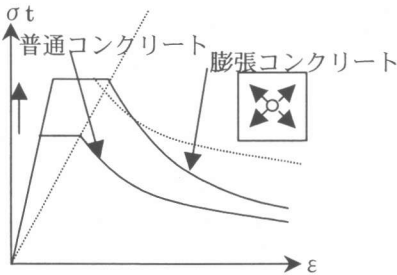


図-2 膨張コンクリートのテンションスティフニングモデル

## 2. 実験の概要

本研究では、鉄筋で一軸に拘束された膨張コンクリートに対して、ひび割れ発生後ひび割れ部の鉄筋が降伏するまで一軸引張試験を行った。使用材料として、膨張材は電気化学工業製 CSA #20、セメントは住友大阪セメント製の普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比38%、細骨材率44.9%、最大骨材寸法20mm、膨張材置換率11%とした。配合を表-1に示す。鉄筋はそれぞれの供試体にD13、D19、D22異形鉄筋を断面中央に一本配置してある。断面は100×100mmの正方形であり、部材長さは2900mmである(図-3)。供試体にひび割れが十分に入り、平均応力、平均ひずみの精度が十分高くなるように部材長さは十分に長いものとした。

表-2に示す鉄筋径、鉄筋比、養生条件の供試体を計4本作成し、材齢2日で脱型した。湿潤養生とは、ぬれむしろをかぶせた湿布養生であり、乾燥条件では脱型後に実験室内の雰囲気暴露した。いずれも温度約20℃の実験室内で行った。材齢28日で引張試験を行い、試験中は供試体表面にグリースを塗り、水分の出入りの影響を極力排除した。

表-1 膨張コンクリートの配合 (kg/m<sup>3</sup>)

セメント	膨張材	水	細骨材	粗骨材	混和剤
391	70	175	737	940	5.07

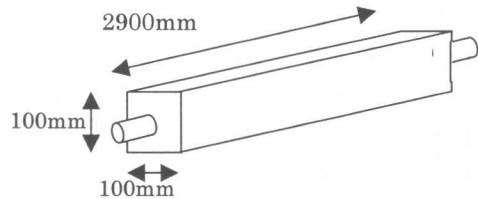


図-3 供試体形状

載荷時は、部材の端部から500mmの位置に変位計を設置し、供試体の伸びを計測した(図-4)。これは、過去の研究により、部材端部より500mm以上離れた断面内ではプレストレスの分布が一様である<sup>6)</sup>ことを参考にし、プレ

トレスが一様に導入された区間について計測するように配慮したためである。

表-2 供試体の鉄筋、養生条件

鉄筋径(mm)	鉄筋比(%)	養生条件
19	2.9	湿潤
22	3.9	湿潤
13	1.3	湿潤
19	2.9	乾燥

本研究では、鉄筋コンクリート及びそれを構成する鉄筋ならびにコンクリートの平均ひずみを等しいと仮定し、供試体の伸びからコンクリートの平均ひずみを求めた。実際にひび割れが発生するまでは、3者はほぼ完全に一致した。コンクリートの応力は、供試体の伸びから鉄筋の平均ひずみ(=コンクリートの平均ひずみ)を求め、鉄筋のヤング率を乗じることで鉄筋の負担する応力とし、全体の応力から鉄筋の負担する応力を引くことで、コンクリートの応力とした。

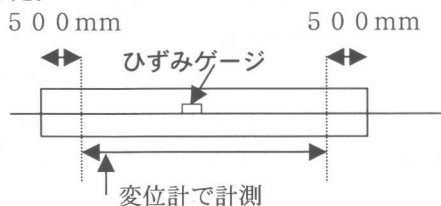


図-4 供試体伸びの計測方法

### 3. 実験結果とその考察

#### 3.1 テンションスティフニング

はじめに、材齢 28 日までのそれぞれの供試体のひずみを図-5 に示す。ひずみは鉄筋の中央部に貼り付けたひずみゲージで計測した(図-4)。載荷直前の初期ひずみは D19(湿潤養生)、D22(湿潤養生)、D13(湿潤養生)、D19(乾燥養生)の順に、 $450\mu$ 、 $280\mu$ 、 $440\mu$ 、 $140\mu$ であった。

図-6~図-9 にコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を示す。また、各図には(1)式の  $c=0.4$  と  $c=0.2$  の場合の曲線を実験結果とともに示している。

##### 3.1.1 膨張コンクリートのテンションスティフニングの特徴

図-6~図-9を見ると、湿潤養生した膨張コンクリートの場合、ひび割れ発生後直ちに応力が低下していくのではなく、ほぼ弾性ひずみと同程度の塑性域のような領域があり、その後徐々に低下していくことがわかる。鉄筋径を変えても、若干低下の程度に違いはあるが、同様の傾向が認められる。図-10 は玉井らが行った普通コンクリートの一軸引張試験の結果である<sup>7)</sup>。図の横軸に示されている範囲 ( $2\% = 20000\mu$ ) は、今回の実験結果で示した範囲 ( $2000\mu$ ) の 10 倍であるので比較をする場合には注意が必要であるが、少なくとも膨張コンクリートの場合に認められるような弾性ひずみと同程度の応力保持領域は、ピーク付近において認められない。また、コンクリートの平均応力-平均ひずみの関係式(1)と比較をしてみても、普通コンクリートに適用される  $c=0.4$  の曲線よりも膨張コンクリートの引張負担分は大きく、 $c=0.2$  のほうに近い。これらのことから、普通コンクリートに比べて、膨張コンクリートを使用した場合はひび割れ発生後の応力の低下がかなり緩慢であると考えられる。

なお、ひび割れ開始時のひずみに弾性限界ひずみの 2 倍を設定した平均応力-平均ひずみの関係式(1)は、膨張コンクリートの挙動を適切に表現しているように見受けられるが、両者が一致する必然性はないと考えられる。この式は、コンクリートに発生する応力がひび割れ発生基準に達しても直ちにひび割れが発生するのではなく、コンクリートの主引張ひずみはその限界ひずみに達した時にひび割れが発生するものにとらえ、具体的には、引張限界ひずみに引張強度に達したときの 2 倍のひずみを与えている<sup>5)</sup>

(図-1)。ただし、この取扱いは、必ずしも純粋に一軸応力下での引張挙動をモデル化したものではなく、はり、耐震壁などのひずみ勾配が存在する部材を含めた整合性を確保するための配慮と考えられる。普通コンクリートの挙動を示した図-10においても、少なくとも弾性限界ひずみと同程度の応力保持領域は認められない。

### 3.1.2 養生条件の影響

乾燥養生の場合、湿潤養生ほどは塑性域のような領域は存在していない(図-9)。また、式(1)と比較してみても、湿潤養生の場合と異なり、 $c=0.4$ の曲線の下に位置している。また、ひび割れ発生荷重が小さいことがわかる。

図-5 を見てみると、乾燥養生した供試体は材齢 2 日ぐらいから、ひずみが低下しており、乾燥収縮の影響が大きいことが分かる。材齢 28 日の時点で、同じ鉄筋径を用い、湿潤養生した供試体と比べ、鉄筋の引張ひずみが  $300\mu$  程度小さくなり、その分プレストレスも小さくなっている。このような乾燥収縮に起因するプレストレスの低下、水和の不完全さ、引張限界ひずみの減少などが原因で、ひび割れの発生荷重が低下し、テンションスティフニングも低下したと考えられる。

したがって、膨張コンクリートでは、材齢初期の養生条件が部材の性能に著しい影響を与えることに留意しなければならない。岡村らによると、膨張コンクリートを材齢 7 日まで湿潤養生をした場合は、その後乾燥させても、もう一度湿潤養生すれば、最初から湿潤養生していた供試体のひずみ近くにまで回復するのに対し、材齢 7 日まで乾燥養生した場合は、その後湿潤養生してもひずみは回復せず、湿潤養生した供試体のひずみを大幅に下回るとしている<sup>8)</sup>。つまり、前者は膨張コンクリートの特性が十分に確保された後に乾燥収縮によってひずみが小さくなったのに対し、後者はコンクリート硬化体の組織形成過程に乾燥の影響を受けたために、膨張材の効果が十分に発現されていないことを意味していると考えられる。本研究において、材齢 2 日後から乾燥養生した供試体では、極めて厳しい養生条件であったといえる。

## 3. 2 ひび割れ

各供試体のひび割れ状況を図-11 に、ひび割れ本数とひび割れ間隔を表-3 に示す。端板を用いていない今回の実験では、膨張コンクリー

トと鉄筋の一体性に疑問がある端部約  $50\text{cm}$ <sup>6)</sup> を除いた区間で平均ひび割れ間隔を求めた。

湿潤養生した D19 および D22 の場合には、供試体の中央部に比較的多くのひび割れが入っていることがわかる。湿潤養生した場合にはひび割れが入る場所にある程度の偏りがある。一方、乾燥養生した場合(D19 乾燥)には供試体全体に均等にひび割れが入っている。

普通コンクリートとの比較を行うために、Salem が作成したテンションスティフニングの数値解析手法<sup>9)</sup>により、普通コンクリートの平均ひび割れ間隔を解析した。解析における材料特性値は、圧縮強度  $40.3\text{MPa}$ 、引張強度  $3.17\text{MPa}$ 、破壊エネルギー  $0.1\text{kgf/cm}$  とした。解析結果を表-4 に示す。このモデルは、Qureshi らのモデル<sup>10)</sup>を適用し、さらにひび割れ面での引張軟化を考慮して、テンションスティフニングを数値解析で算出する方法で、その精度は十分に検証されたものである。

表-3~表-4 を比較してみると、膨張コンクリートは普通コンクリートに比べて全体的にひび割れ本数が多く、ひび割れが分散していることがわかる。平均ひび割れ間隔は  $6\sim 12\text{cm}$  ほど、割合にして 2 割~4 割程度膨張コンクリートのほうが小さくなっている。普通コンクリートにおいては、ひび割れが分散するほど(平均ひずみが大きくなるほど)コンクリートが負担する応力は小さくなるが、膨張コンクリートにおいてひび割れが分散するということは、あくまで局所化を極めて起し難いという特性の結果として表れる。ひび割れ幅が小さくなることは、耐久性の観点から特に望ましいと言える。一方、D19 乾燥のように、コンクリートの性能が著しく損なわれた場合にも、ひび割れが入り易いという逆の理由で、結果としてのマクロなひび割れは分散することになる。

言いかえれば、ひずみ勾配が存在する部材に膨張コンクリートを利用した場合には、今回の一軸引張状態でも十分に認められたテンションスティフニング効果が、ひずみ勾配の影響によって各段に大きくなるものと考えられる。

膨張コンクリートが高いテンションスティフニングを示す理由を一言で表現するとすれば、十分に拘束された膨張コンクリートは極めて局所化を起し難いからといえる。局所化が容易に起こらないということは、それだけコンクリートの全領域を有効に使って応力を負担することになり、テンションスティフニングは大きくなる。実際に、はりの曲げ実験において、引張縁にひずみゲージを隙間なくラップさせて広い範囲のコンクリートのひずみを詳細に観察した実験では、ケミカルプレストレスト部材の曲げひび割れは容易に開口せずに、変形の局所化に対して高い抵抗性を有することが確認されている<sup>11)</sup>。このような現象をもたらす機構については、さらに検討を進めることが必要である。

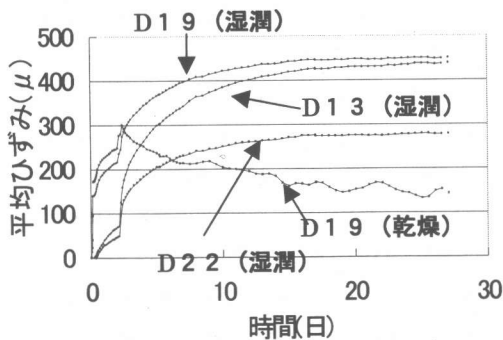


図-5 載荷までの供試体ひずみ

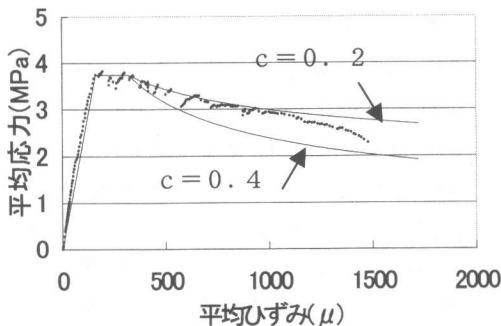


図-6 コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係 (D19 湿潤養生)

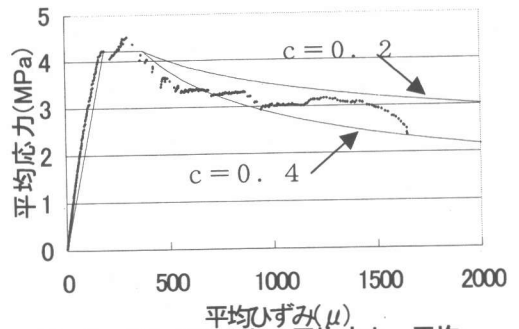


図-7 コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係 (D22 湿潤養生)

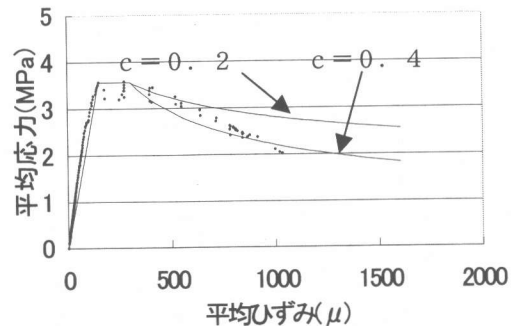


図-8 コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係 (D13 湿潤養生)

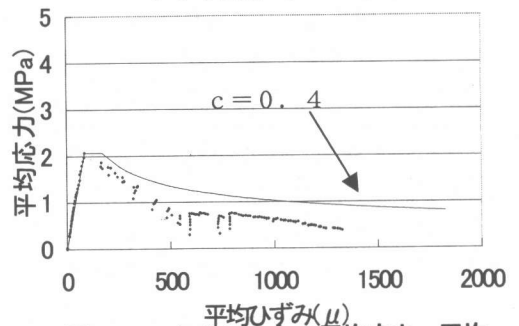


図-9 コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係 (D19 乾燥養生)

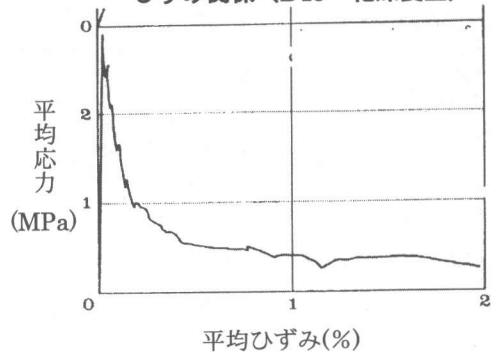


図-10 普通コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係

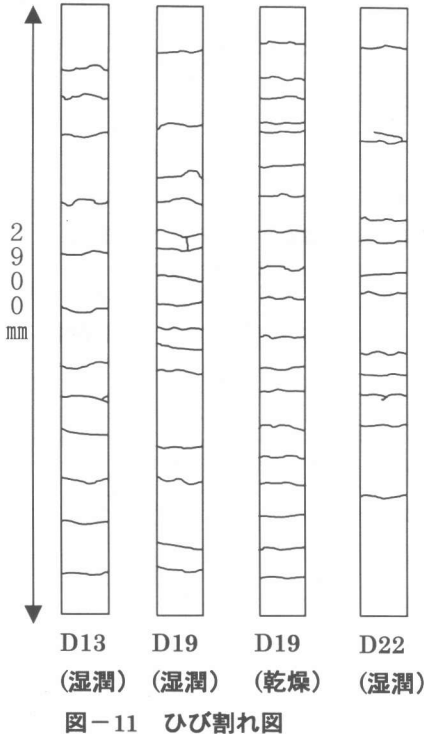


表-3 供試体のひび割れ本数とひび割れ間隔

鉄筋径(mm)	19	22	13	19
養生条件	湿潤	湿潤	湿潤	乾燥
ひび割れ本数	15	11	12	20
平均ひび割れ間隔(cm)	19.3	26.4	24.2	14.5
最大ひび割れ間隔(cm)	37	57.2	31.3	17.7
最小ひび割れ間隔(cm)	7.5	8.7	14.6	4.8

表-4 解析による普通コンクリートのひび割れ本数とひび割れ間隔

鉄筋径(mm)	19	22	13
養生条件	湿潤	湿潤	湿潤
ひび割れ本数	9	9	8
平均ひび割れ間隔(cm)	32.2	32.2	36.3

#### 4. まとめ

膨張コンクリートのひび割れ発生後の挙動を把握するため、一軸引張試験を行った。その結果、十分に拘束された良質な膨張コンクリートでは、テンションスティフニング効果が普通コンクリートよりもかなり大きく、ひび割れも分

散することが明らかになった。

#### 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, 土木学会論文集, 第 225 号, pp.101-108, 1974.5.
- 2) 土木学会: コンクリートライブラリ 75, 膨張コンクリート設計施工指針, 1993
- 3) 細田 暁, 岸 利治: 若材齢ケミカルプレストレスト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, pp787-792, 2000
- 4) 岡村 甫, 前川 宏一: 鉄筋コンクリートにおける非線形有限要素解析, 土木学会論文集, No366, pp1-10,1985.8.
- 5) 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
- 6) 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, No26, 1972.
- 7) 玉井真一ほか: 一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力-平均ひずみ関係, 土木学会論文集, No378, pp239-247,1987.2
- 8) H,Okamura et al.: Application of Expansive Concrete in Structural Elements, Journal of the Faculty of Eng'g, The Univ. of Tokyo(B), Vol.XXXIV, No.3, 1978
- 9) Salem, H. M. : Tension Stiffness Modeling for Cracked Reinforced Concrete Driven from Micro-Bond Characteristics, Proc. of JCI, Vol.19, No.2, pp549-554, 1997
- 10) Qureshi,J. and Maekawa,K. : Computational model for steel bar embedded in concrete under combined axial pullout and transverse shear displacement, Proc. of JCI, Vol.15, No.2, pp1249-1254, 1933.
- 11) 古谷明寿, 細田 暁, 岸 利治: 膨張コンクリートの曲げ部材におけるひび割れ抵抗性に対する多軸拘束の効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, 2001 (掲載予定)