Japan Concrete Institute

論文　スパイラル筋による軸直交方向拘束を与えたケミカルプレストレス部材の Tension Stiffening 効果

石松　信哉[*1]・Raktipong Sahamitmongkol[*2]・岸　利治[*3]

要旨：膨張コンクリートを用いた RC 部材は，高い Tension Stiffening 効果を持つことが知られている。本研究では，軸方向鉄筋周りにスパイラル補強筋を配置し，膨張の反作用として軸方向拘束を与えて付着性能を改善することにより Tension Stiffening 効果がどのように変化するかを確認する目的で RC 部材の一軸引張試験を実施した。比較用普通コンクリートの結果より，スパイラル筋の配置自体が Tension Stiffening に著しい負の効果をもたらすことが確認されたが，膨張コンクリートの場合には，軸方向拘束による効用がこの負の効果をほぼ打ち消すことが確認され，軸直交拘束付与による改善効果が存在するものと考えられた。

キーワード：Tension Stiffening 効果，膨張コンクリート，付着

1. 研究背景

1.1 Tension Stiffening 効果

RC 部材は引張荷重の作用下において，鉄筋単体よりも高い荷重を負担することができる。特に，ひび割れ発生以降もコンクリートが引張荷重を負担して，部材の剛性が高くなる効果を Tension Stiffening 効果と呼ぶ(図-1)。これは，ひび割れ発生後もひび割れ間のコンクリートが鉄筋との付着により，引張力をある程度負担できるためである。膨張コンクリートは拘束下において，普通コンクリートに比べ高い Tension Stiffening 効果を発揮することが知られている。しかし，膨張コンクリートのこのような性能は，付着特性や伸び能力などどのような特性に起因するものなのか，機構面からの検証は未だ十分ではない。一方で，既往の研究では，膨張コンクリートの高い Tension Stiffening 効果は確認されるもの，ある段階からひび割れ近傍の部材軸直交方向のコンクリートのひずみが急増することが確認されており，部材軸方向に生じる割裂ひび割れの発生が，それ以降の Tension Stiffening 効果に負の影響をもたらしていることが考えられた[1)]。そこで本研究では，軸方向鉄筋周りにスパイラル補強筋（丸鋼を使用）を配置し，膨張の反作用として軸方向拘束を与えて付着性能を改善することにより，Tension Stiffening 効果がどのように変化するかを確認する目的で RC 部材の一軸引張試験を実施した。

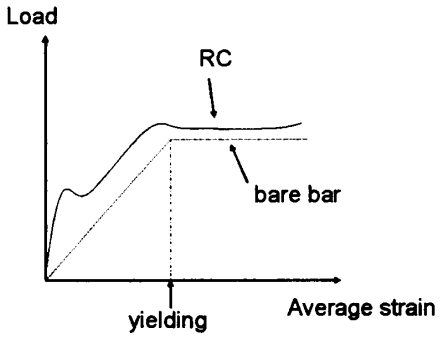


図-1　普通コンクリートにおける Tension Stiffening 効果

1.2 膨張コンクリートの拘束

膨張コンクリートは，部材軸方向の拘束があって初めてそのプレストレス効果や高い Tension Stiffening 効果を発揮することができる。しかし，これまでの一軸引張試験では，部材軸直交方向

*1 東京大学大学院工学系研究科　社会基盤学専攻　(正会員)
*2 東京大学生産技術研究所　都市基盤安全工学国際研究センター　博(工)　(正会員)
*3 東京大学生産技術研究所　助教授　博(工)　(正会員)

NII-Electronic Library Service

表-1　コンクリート配合表

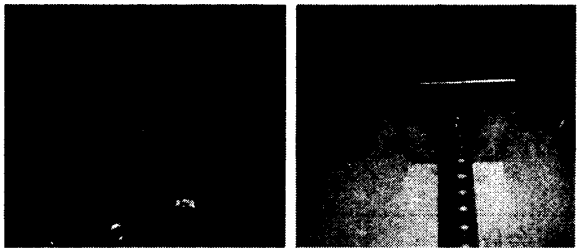
	W/(C+E)(%)	s/a(%)	単位量(kg/cm³)					AE(%)
			W	C	E	S	G	
普通N	50	45	165	300	0	828	1039	0.008
膨張E	50	45	165	240	60	828	1039	0.008

には拘束を行わないことが多かったため，軸直交方向にはほぼ自由な膨張が生じていたと思われる。そこで，軸方向だけではなく，軸直交方向にも何らかの拘束を加えることで，軸方向へのプレストレスの効果的な導入と，付着特性の向上が図られるものと考えた。そして，軸直交方向に拘束を与える手段として，スパイラルフープを設置し，膨張コンクリートの Tension Stiffening 効果にどのような影響を与えるかを検証するために比較実験を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

矩形断面内の中央に鉄筋を貫通させた鉄筋コンクリート供試体を作製し，一軸引張試験を行った。断面積は 100mm×100mm で，長さ 2000mm とし，鉄筋は D19 の異形鉄筋を用いた。鉄筋のヤング係数は 1.87×10^{6}N/mm^2，降伏ひずみは 2785μ だった。また，軸直交方向への膨張コンクリートの拘束のために用いるスパイラルフープは，ϕ3，ピッチ 50mm，外径 70mm，長さ 350mm 程度のものを 6 つ組合せて長さ 2000mm として用いた。したがって，スパイラルフープありの供試体では，かぶりが 15mm となる。スパイラルフープの設置には結束線を用い，型枠に結びつけることで固定した(**写真-1**)。鉄筋の両端には，膨張コンクリートの膨張を拘束するための拘束板をあらかじめ溶接により固定した(**写真-1**)。



写真—1　スパイラルフープの設置・溶接された端板

表-1 にコンクリートの配合を，**表-2** に実験ケースとその概要を示す。膨張材はエトリンガイト系のものを用いた。配合は普通コンクリートと膨張コンクリートの２配合，実験ケースは各配合について，スパイラルフープありの供試体とスパイラルフープなしの供試体の２ケースで計４ケースの実験を行った。供試体は全て湿潤養生し，材齢 28 日に載荷を行った。また，標準養生供試体を用いて測定した圧縮強度は，普通コンクリートは 38.6N/mm^2，膨張コンクリートは 35.1N/mm^2 であった。

表-2　実験ケース

供試体名	コンクリート	スパイラルフープ
CPCspiral	膨張コンクリート	あり
CPCnonspiral	膨張コンクリート	なし
NRCspiral	普通コンクリート	あり
NRCnonspiral	普通コンクリート	なし

2.2 試験方法

図-2 に示すように，供試体にアクリル板を設置し，ワイヤーを固定して錘を吊るし，ワイヤーのたるみを失くした上で変位測定を行った。その他に荷重，コンクリートの表面ひずみを中心と中心から上下に 500mm の３点×２面の計６

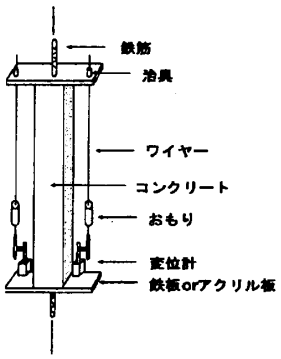


図-2　供試体概要

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

点，鉄筋のひずみを中心の２点に関して，計測した。また，鉄筋のひずみは打設直後から測定を開始し，膨張コンクリートの膨張によって導入されるケミカルプレストレインを求めた。

載荷は万能試験機で一軸引張載荷を行い，鉄筋が降伏するまで計測を行った(写真-2)。

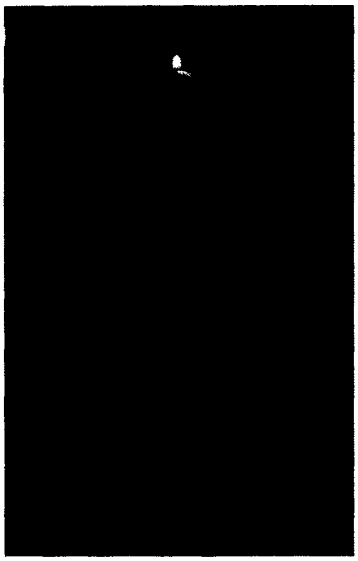


写真-2　万能試験機による引張試験

3. 実験結果と考察

3.1 初期ひずみ

打設直後から鉄筋ひずみの計測を開始し，載荷開始まで計測を続け，最終的なひずみの値から供試体に導入されたケミカルプレストレインを求め，その値を元に膨張コンクリートに導入されたケミカルプレストレスを算出した（表-3)。

表-3　導入されたケミカルプレストレインおよびケミカルプレストレス

供試体名	Prestrain(μ)	Prestress(Mpa)
CPCspiral	288.5	1.638
CPCnonspiral	255	1.410
NRCspiral	-52.5	-0.298
NRCnonspiral	-38.5	-0.213

3.2 荷重—平均ひずみ関係

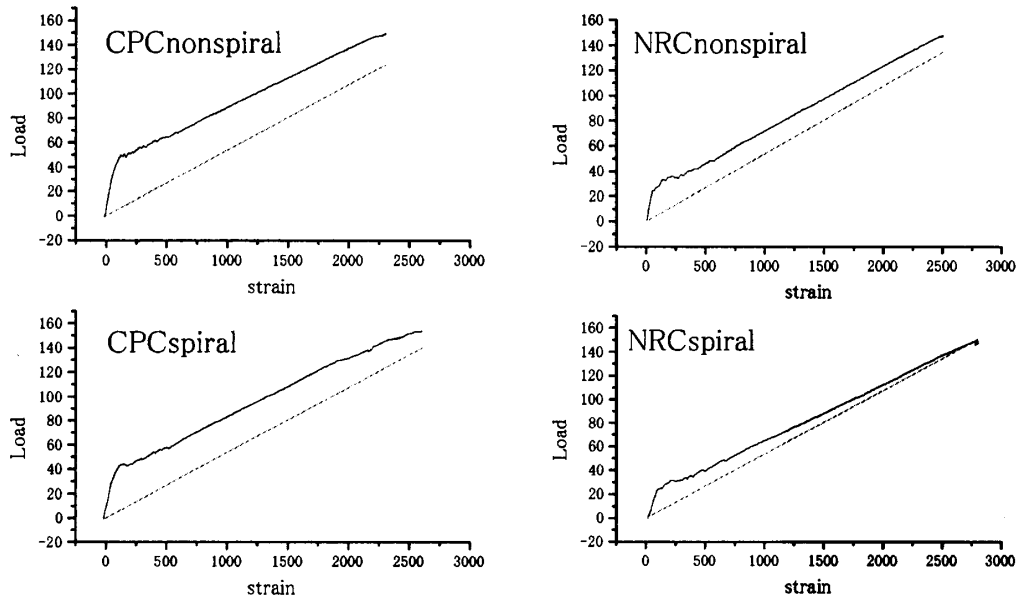
変位計で測定した左右２箇所の変位の平均をとり，初期の全長で除することによって供試体の平均ひずみを算出した。図-3 は，鉄筋コンクリート供試体および鉄筋のみの荷重と平均ひずみの関係を表している。CPC，NRC ともにスパイラルありのもののほうがひび割れ発生荷重は低く，スパイラルがひび割れ発生のきっかけ，要因となっていると考えられる。また，スパイラルありのものはコンクリートの負担する荷重の低減もスパイラルなしのものに比べて早いことがわかる。このことからもスパイラルフープの存在がコンクリートのひび割れ等の弱点を生むきっかけとなっているものと考えられる。特に，普通コンクリートのスパイラルありに関しては，降伏点付近ではコンクリートの受け持つ荷重がほとんど０に近い値になっていることがわかる。

3.3 コンクリート平均応力—平均ひずみ関係

供試体全体にかかる荷重から鉄筋の受け持つ荷重を差し引くことによってコンクリートの受け持つ荷重を求めることができる。その荷重をコンクリートの断面積で除することによってコンクリートの平均応力—平均ひずみ関係を算出することができる。なお，スパイラルフープに関しては体積を算出した上で，全長で除することによって断面積を算出した。また，ケミカルプレストレスの効果によりひび割れ発生荷重が向上することは膨張コンクリートの利点の一つであるが，ケミカルプレストレスの効果は，付着機構に基づく Tension Stiffening 効果とは区別すべきと考えられるので，膨張コンクリートではケミカルプレストレス分を差し引いて，普通コンクリートと比較することとした。平均応力—平均ひずみ関係を図-4 に示す。膨張コンクリートにおいて，応力が 0 以下である領域がケミカルプレストレスによる圧縮応力の領域である。

なお，スパイラルフープの断面積は以下のようにして求めた。ｘｙ平面において半径ｒの円，ｚ方向には一定の傾きで正方向にのびる螺旋を次のように定式化した。

NII-Electronic Library Service



図－３　荷重—平均ひずみ関係

$$\begin{cases} x = r\cos\theta \\ y = r\sin\theta \\ z = \dfrac{l}{2\pi}\theta \end{cases} \qquad (1)$$

（r：外径，l：ピッチ）

このような式で与えられる図形に関して，1 周期分の長さ s は次のようにして求められる。

$$s = \int_0^{2\pi} \sqrt{\left(\frac{dx}{d\theta}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\theta}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\theta}\right)^2}\, d\theta \qquad (2)$$

こうして求めた 1 周期分の長さにフープの断面積をかけることで体積を求め，長さで割ることで断面積を算出した。この結果，D19 の主鉄筋の断面積が 286.5mm^2 であるのに対し，φ３のスパイラルフープの断面積は 250.1mm^2 となり，全体の断面積 10000mm^2 の 2～3%に相当することがわかる。

こうして，スパイラルフープによる断面欠損を差し引いて，コンクリートのみの平均応力を求めることができる。

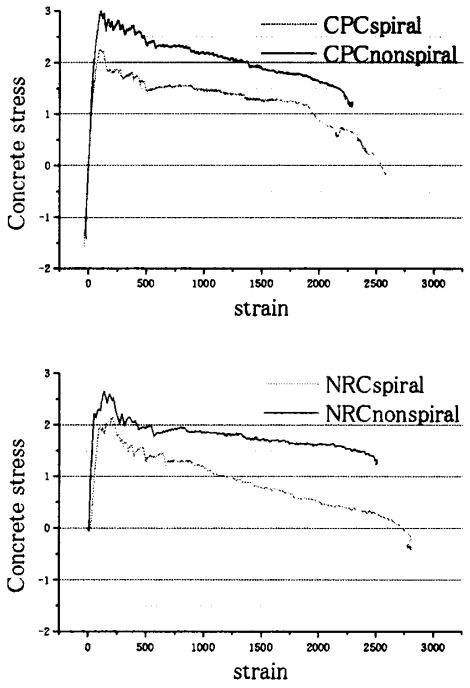


図-4　平均応力－ひずみ関係

3.4 Tension Stiffening 効果の評価

3.4.1 Tension Stiffening のモデル

Tension Stiffening 効果を表すモデルとして，岡村らは以下の式を提案した（図-5 参照）[3]。

NII-Electronic Library Service

$$\sigma_t = f_t(\varepsilon_{tu}/\varepsilon_t)^C \quad (3)$$

σ_t: 平均応力
f_t: 引張強度
ε_{tu}: ひび割れ発生ひずみ
ε_t: 平均ひずみ

C の値は Tension Stiffening 効果の良悪を表し，図-6 に示すように，C の値が小さいほどひび割れ発生後の応力低減が緩やかに評価される。普通 RC では，C は 0.4 程度とされている。なお，C の値はコンクリートと鉄筋の付着によって大きく変化すると考えられ，$(\varepsilon_{tu}/\varepsilon_t)^C$ をまとめて β と表し，付着係数と呼ぶこともある。

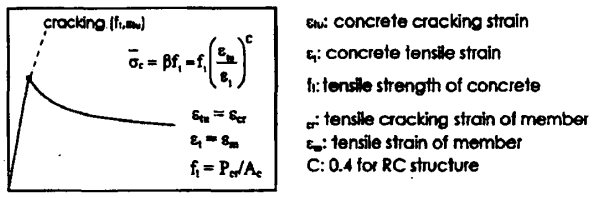
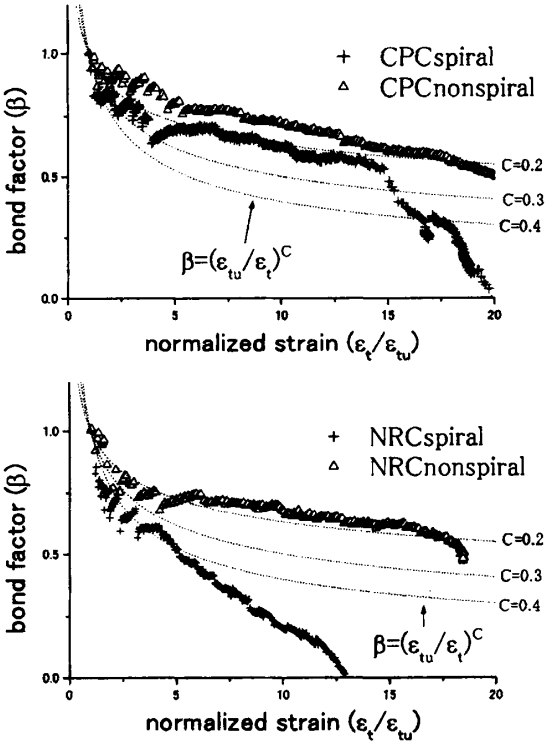


図-5　岡村らによって提案された Tension Stiffening モデル [3]

3.4.2 実験結果とモデルの比較

図-6 は，正規化された平均応力—平均ひずみ関係のプロットと，最大平均応力をひび割れ発生荷重とした場合の，C の値を変化させた Tension Stiffening モデルとの比較である。比較の基準となる NRCnonspiral は C=0.2 との整合が良く，一般に言われている C=0.4 よりも高い Tension Stiffening 効果を示しているように見える。しかし，図-4 に認められるように，今回の NRCnonspiral では最初のひび割れの発生が早く，その後の最大応力が必ずしも本供試体の Tension Stiffening 効果を考える上での原点として妥当なものであるかどうかは定かでない。これまでの経験では，同様の実験を行った場合，普通コンクリートのひび割れ発生荷重は，ケミカルプレストレス分を差し引いた膨張コンクリートのひび割れ発生荷重よりは大きいことが多い [1]。したがって，NRCnonspiral の Tension Stiffening 効果が大きく評価されたのには，何らかの原因によりひび割れが早く発生してしまい，最大応力が低くなった影響もあると考えられる。

CPCnonspiral に関しては，既往の研究で報告されている通り，C=0.2 をひび割れ発生直後から若干上回る程度の良好な Tension Stiffening 効果を示している。図-4 に認められるように，Tension Stiffening を考える上での原点となる最大応力は，最初のひび割れの発生時点での明確なピークとして表れており，CPCnonspiral に対する Tension Stiffening の評価は妥当なものと考えられる。



図－6　正規化された平均応力－ひずみ関係とモデルの比較

次に，注目したいのは，NRCspiral および CPCspiral とそれぞれの nonspiral との比較である。NRCspiral はひび割れ発生直後から，極端に応力が減少しており，最終的には応力が 0 まで到達している。それに対して CPCspiral は，正規化ひずみが 15 を越えたあたりで急速に応力が下がっ

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

ているが，それまでは nonspiral のものと比べて若干低い程度の値を保っている。普通コンクリートの２つを比較することで，スパイラルフープの配置が供試体の Tension Stiffening 効果に対して致命的なマイナス要因となっていることは明らかと思われるが，膨張コンクリートの２つにはそこまで顕著な差異は確認できない。このことから，スパイラルフープの配置は膨張コンクリートと普通コンクリートに共通して負の要因を与えているが，膨張コンクリートでは，それ以外の正の要因も働いているために，結果として普通コンクリート程に顕著な差異が確認できなかったのではないかと推測できる。

3.4.3 スパイラルフープによる応力減少

スパイラルフープの配置による負の要因として，スパイラルフープがコンクリート中に不連続な部分を生み，結果として，Tension Stiffening 効果に影響を与える鉄筋とコンクリートの付着特性を低下させたり，スパイラルフープがひび割れ発生のきっかけとなってしまっていることなどが考えられる。したがって，膨張コンクリートに対する軸直交拘束の影響を考える際には，普通コンクリートと同程度の負の効果の存在を前提として，改善効果の大小を評価する必要があるものと思われる。

3.4.4 軸直交方向への拘束による膨張コンクリートの改善効果の評価

今回の実験では，スパイラルフープの配置により，鉄筋と膨張コンクリートとの付着特性が改善され，結果として，Tension Stiffening 効果が向上するのではないかと期待したが，スパイラルフープの配置による欠陥部としての負の効果が大きかったために，Tension Stiffening 効果の向上としての軸直交拘束効果の確認は行えなかった。しかし，普通コンクリートにおけるスパイラルフープ配置の顕著な負の効果の確認から，膨張コンクリートにおけるスパイラルフープの配置は負の効果のみならず，これを補う正の効果を相当にもたらしているものと思われる。ただし，軸直交方向拘束の効果のみをより明確に確認するためには，軸直交方向拘束の与え方に改善を加える必要がある。

4. 結論

1) 丸鋼のスパイラル補強筋を用いた普通コンクリート供試体の一軸引張試験では，Tension Stiffening 効果が著しく低減した。スパイラル補強筋の配置が，欠陥として顕著な負の効果をもたらしているものと考えられる。
2) 丸鋼のスパイラル補強筋を用いた膨張コンクリート供試体では，Tension Stiffening 効果の明確な改善は確認することができなかったが，スパイラル補強筋なしの供試体とほぼ同等の Tension Stiffening 効果が確保された。
3) 普通コンクリートで確認されたスパイラル補強筋の負の効果を考慮すれば，膨張コンクリートにおける軸直交方向拘束による付着改善効果などの正の効果も同程度に発現されているものと推察される。

謝辞：本研究は，財団法人 東電記念科学技術研究所の研究助成を受けて実施した。ここに記して，謝意を表す。

参考文献

1) Raktipomg SAHAMITMONGKOL, 薄木義貴, 岸利治：Cracking and Tension-Stiffening of Chemically Prestressed Concrete under Uniaxial Tension, 日本コンクリート工学協会,Vol.26, No.1, p.237-p242, 2004
2) 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，pp36-38
3) 石村隆敏，丸山誉史，細田暁，岸利治：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，日本コンクリート工学協会，Vol.23, No.3, p.583-p588, 2001

NII-Electronic Library Service