

論文 引張軟化の影響と付着に基づくテンションスティフニングモデル

手塚 正道*¹・佐藤 良一*²・廣河 和男*³・安斎 慎介*⁴

要旨:本研究は、高強度コンクリートを用いたPRC部材を対象に、実測した鉄筋ひずみに基づく、ひび割れ断面引張域のコンクリートの応力負担と鉄筋の付着による引張剛性を分離した新たなテンションスティフニングモデルの考え方を提示した。提示したモデルは、ひび割れ発生からひび割れ定常状態に至る領域の短期および長期変形挙動を適切に評価することが認められた。

キーワード:テンションスティフニング, 引張軟化, 付着, 高強度コンクリート

1. はじめに

近年、コンクリート橋梁分野において、PRC構造が、経済的なメリットや施工性、機能性の改善に寄与することが認められるようになり、実構造物に適用されるケースが増加している。さらに、これに高強度コンクリートを用いることは、プレストレス導入応力が拡大されるため、一層合理的な設計を可能にするものであり、高耐久性の点からもその適用は強く求められてくるものと考えられる。この場合に、テンションスティフニングの評価が重要な検討項目の一つとして挙げられるが、CEB-FIP MODEL CODE 1990¹⁾(以下、MC90)およびBransonなどの既往の方法は、普通強度コンクリートを用いた場合を対象に、付着を基本として経験的に定められたものであり、高強度コンクリートを用い、かつひび割れ幅が小さく制御される場合に対し、その適用性は確認されていない。

そこで本研究は、高強度コンクリートPRC部材への既往のテンションスティフニングモデルの適用性を検証するとともに、実測した鉄筋ひずみに基づいて、ひび割れ断面引張域のコンクリートの応力負担と鉄筋の付着による引張剛性を

分離した新たなテンションスティフニングモデルの考え方を提示した。

2. 実験概要

2.1 供試体の種類

供試体の形状は、断面が20×25cm、長さが240cmの矩形断面はりである。断面諸元を図-1に示す。供試体の種類は、表-1に一覧表を示す。

2.2 コンクリートの配合と強度特性

供試体に用いたコンクリートの配合を表-2に、強度特性の試験結果を表-3にそれぞれ示す。標準養生以外のテストピースは、供試体と同条件で養生したものである。

2.3 載荷方法および計測方法

載荷はスパン210cm、せん断スパン長65cmの2点載荷とした。純曲げ区間80cmを試験対象区間として、鉄筋ひずみおよび平均曲率を計測した。鉄筋ひずみは異形鉄筋の縦リブの位置に深さ3mm、幅4mmの溝を切削加工して、その溝に2cm間隔で貼付したひずみゲージより求めた。平均曲率は試験対象区間中央で変位計(精度1/1000mm)を用いて計測された試験区間内のた

*1 オリエンタル建設(株) 大阪支店工事部 (正会員)

*2 宇都宮大学教授 工学部建設学科、工博 (正会員)

*3 日本電子計算(株) 大阪支店技術営業部 (宇都宮大学大学院) (正会員)

*4 宇都宮大学大学院 工学部建設学科建設工学専攻 (正会員)

表-1 供試体一覧表

実験の種別	NO.	名称 引張鉄筋 (PC鋼棒) -圧縮鉄筋	引張鉄筋	PC鋼棒	圧縮鉄筋	PC鋼棒 緊張 応力 (N/mm ²)	長期 載荷 モーメント (kN・m)
			断面積 As (mm ²)	断面積 Ap (mm ²)	断面積 As' (mm ²)		
長期 載荷	HL10	D19-0	573	---	---	---	19.5
	HL12	D19-D16	573	---	397.2	---	19.5
	HL20	D16(7.1)-0	397.2	80	---	900	22.1
	HL22	Dm16(7.1)-D16	317.5	80	397.2	900	22.1
	HL30	D13(9.0)-0	253.4	128	---	940	22.2
	HL32	Dm13(9.0)-D16	184.9	128	397.2	940	22.2
	HL40	D10(10.7)-0	146.7	180	---	940	23.5
	HL42	Dm13(10.7)-D16	184.9	180	397.2	940	23.5
短期 載荷	HM21	Dm16(7.1)-Dm13	397.2	80	184.9	900	破壊 まで
	HM31	Dm13(9.0)-Dm13	184.9	128	184.9	940	
	HM41	Dm13(10.7)-Dm13	184.9	180	184.9	940	

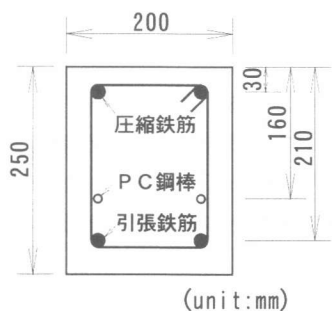


図-1 供試体断面図

(PC供試体はポストテンション方式によるものである。引張鉄筋 Dmは溝切り加工したものを表す。)

わみ量より求めた。

3. テンションスティフニングモデルの検討

3.1 テンションスティフニングの考え方

引張を受けるコンクリートにおいて、ひび割れの開口変位が 0.1mm程度以下の場合、ひび割れ部においても応力の伝達のあることが知られている。この微細なひび割れに生じる応力の影響は、引張部材に比べ断面内で勾配が生じる曲げ部材において大きく、開口変位が小さい場合には部材挙動に無視し得ない影響を及ぼすことが考えられる。

MC90およびBransonなどの既往の方法では、テンションスティフニング効果はひび割れ発生時を100%とし、荷重の増加につれて引張域コンクリートを無視した計算値に漸近し、さらに繰り返しや持続荷重によって低下する考え方が経験に基づいてとられている。このテンションスティフニングの性質は、鉄筋とコンクリートとの付着、ひび割れ分散、ひび割れの進展とそれに伴う引張域コンクリートの応力負担の減少、内部ひび割れの発生、ひび割れ近傍の付着劣化域の増大等によりもたらされたものと考えられる。MC90に見られるように、テンションスティフニングの主要因は、一般には付着であると解釈できる。しかし、これらの既往

表-2 コンクリートの配合表

W/B (%)	s/a (%)	SF/B (%)	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	SF	S	G	SP
25	45	10	150	540	60	766	640	12.2

ただし、B=C+SF、高性能A E減水剤(SP)は混練水(W)に含む。

表-3 コンクリートの強度試験結果

試験時期	プレストレス 導入時 (材齢9日)	持続荷重 および 短期載荷時	標準養生 および (材齢28日)
圧縮強度 (N/mm ²)	95.4	100.0	105.4
	94.3	112.2	121.5
引張強度 (N/mm ²)	---	4.27	6.43
	---	5.61	5.57
ヤング係数 (kN/mm ²)	35.2	36.6	38.7
	35.5	37.8	41.0

ただし、上段数値は長期載荷供試体を、下段数値は短期載荷供試体の場合をそれぞれ示す。持続荷重の載荷は材齢16日である。

の方法によれば、プレストレスが高く作用荷重下でひび割れ幅が小さい場合には変形を過大評価し、ひび割れ断面においても無視し得ない引張応力負担が行われ、付着が必ずしも主要因とはならないことの可能性が指摘されている²⁾。この可能性は、高強度コンクリートを用いた場合には、自己収縮応力が生じる反面、引張強度や付着剛性が高くなり、かつ材齢数日後以降の収縮ひずみの増加率が小さいことを考慮すれば、さらに高くなることが予想される。

そこで、テンションスティフニングの支配的要素を明らかにするとともにその評価の考え方

を検討するために、詳細な鉄筋ひずみの測定を行った。

3.2 引張鉄筋ひずみの挙動

ひび割れ断面における鉄筋ひずみの挙動を把握するために、短期載荷時の作用モーメントと引張鉄筋ひずみの関係の一例を図-2に示す。ひずみの原点は、載荷直前の状態の値である。ここで、ひび割れ断面の鉄筋ひずみ挙動として、実測による最大値を代表させることは平均曲率と関係づける場合には適切でない。そこで、スパン中央から

左右 400mmの範囲にある等曲げ試験区間におけるひび割れ断面のピーク値の平均値（以下、ピーク値平均ひずみ）を試験区間におけるひび割れ断面のひずみと位置付けるものとした。平均ひずみは試験区間の全平均値を示すものである。図中には、全断面および引張部コンクリートを無視したひび割れ断面の解析値（以下、ひび割れ断面解析値）も併せて示している。これによれば、平均ひずみはひび割れ断面解析値とほぼ並行に増大し、また、ピーク値平均ひずみはひび割れ断面解析値に漸近する性質を示しているのが認められる。このことは、ひび割れ断面においても引張部コンクリートが無視できない荷重領域を受け持つことを示している。

図-3に引張鉄筋ひずみの経時変化の一例を示す。図中には全断面およびひび割れ断面の解析値を併せて示す。ひずみの原点は、打込み後直後として、解析値は自己収縮を考慮したものである。図-3によれば、ピーク値平均ひずみとひび割れ断面解析値は経時的にほぼ一定の差を示し、持続荷重下においてもひび割れ断面引張部コンクリートはテンションスティフニング効果増大に貢献していることがわかる。

短期載荷直後、ピーク値平均ひずみが増大する現象は、短期載荷時では受け持っていたひび割れ断面引張域のコンクリート応力が持続載荷後徐々に減少することによると考えられるが、その速度は高強度の場合が、同一断面で普通強

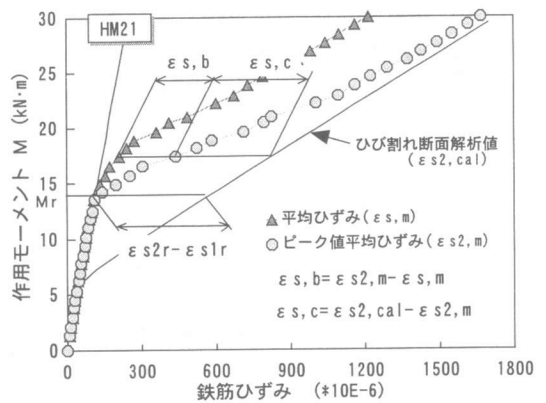


図-2 短期載荷時のモーメントと鉄筋ひずみの関係

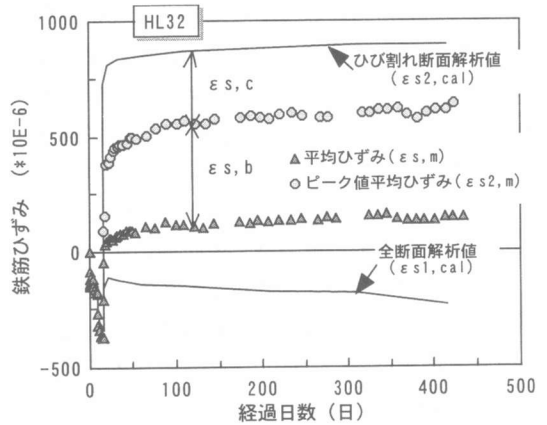


図-3 鉄筋ひずみの経時変化

度の場合²⁾に比べて緩やかである。さらに、普通強度の場合²⁾はひび割れ断面引張域のコンクリート応力がほぼ消失するのに対して、高強度の場合には無視し得ないコンクリート応力が残存し、テンションスティフニング効果を高めていると考えられる。

3.3 テンションスティフニングモデルへのアプローチ

図-2によれば、約14kN・mでひび割れが発生し、実測によるピーク値平均ひずみ(εs2,m)はひび割れ断面計算値(εs2,cal)に漸近しながら増大している。この漸増区間における両ひずみ差(εs,c = εs2,cal - εs2,m)は、ひび割れ断面引張域コンクリートの応力負担を示すものである。ひび割れ断面計算値が、約800*10⁻⁶のとき、コンクリートは鉄筋応力に換

算して、 $70\text{N}/\text{mm}^2$ の応力を負担していることになり、これが経時的に減少したとしても、意義ある程度に残留すれば、これを無視して、小さいたわみやひび割れ幅の制御を行うことは合理的ではない。一方、ピーク値平均ひずみと平均ひずみ($\epsilon_{s,m}$)の差($\epsilon_{s,b} = \epsilon_{s2} - \epsilon_{s1}$)は、付着によってもたらされるものであり、従来のテンションスティフニングと異なり、モーメントの増加に対して必ずしも漸減する性質を示さない。

そこで、図-4にはひび割れ断面引張域のコンクリートの引張応力負担を、図-5には付着によってもたらされる引張剛性の発現状況を実測値に基づいて示す。横軸はひび割れ発生時の作用モーメント(M_r)に対する作用モーメント(M)の比で、それぞれデコンプレッションモーメント(M_0)からの値としている。デコンプレッションモーメントからの値としたのは、鉄筋応力度の増加量と引張部の状態を対応させ、評価の一般性を高めるためである。縦軸はひび割れ発生時点のひび割れ断面と全断面の解析値の差($\epsilon_{s2r} - \epsilon_{s1r}$)に対するそれぞれの負担するひずみの比である。

図-4によれば、ひび割れ発生後、モーメントの増加と共に、ひび割れ断面引張域のコンクリート応力負担はほぼ線形に低下する傾向を示している。デコンプレッションモーメントから、ひび割れ発生モーメントに対する作用モーメントの比 $(M - M_0)/(M_r - M_0)$ が1.5のとき、ひび割れ発生時の引張域コンクリートの応力負担の0.2~0.6程度は残存していることになる。ちなみに、プレストレス量の大小に拘わらず、引張部コンクリートを無視して求めた鉄筋ひずみの計算値ではほぼ $1000(*10^{-6})$ 程度の値に相当し、実際にはこの程度の値までの範囲が多く用いられるものと考えられる。

図-5によれば、 $(M - M_0)/(M_r - M_0)$ が1.5まではほぼ線形に増加し、その後は漸増の傾向を示す。一部では低下する現象も見られるが、HM31およびHM41供試体では1.3~1.5程度まで達している。これはひび割れ発生時の全断面と

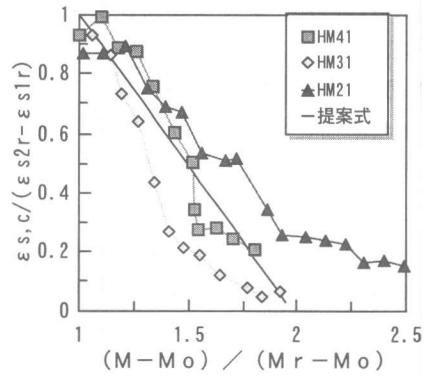


図-4 モーメントとひび割れ断面引張域コンクリート応力負担の関係

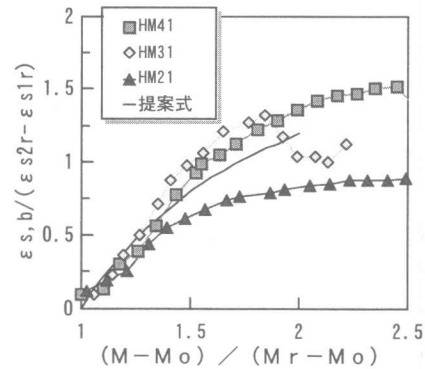


図-5 モーメントと付着に起因する引張剛性の関係

ひび割れ断面の剛性差を低減するMC90では定性的にも説明できないことを示すものである。

次に、ひび割れ断面引張域のコンクリート応力に対応する鉄筋ひずみ($\epsilon_{s,c}$)と付着作用に対応する鉄筋ひずみ($\epsilon_{s,b}$)の経時的な挙動を実測値に基づいて、図-6と図-7に示す。横軸は持続荷重載荷後の経過日数、縦軸は図-6の場合静的時の $\{\epsilon_{s,c}\}_{t=0}$ に対する所定の経過日数における $\{\epsilon_{s,c}\}_{t=1}$ の比を、図-7の場合静的時の $\{\epsilon_{s,b}\}_{t=0}$ に対する所定の経過日数における $\{\epsilon_{s,b}\}_{t=1}$ の比をそれぞれ示す。

図-6に見られるように、ひび割れ断面におけるコンクリートの引張応力負担は、経過日数100日まで比較的速い速度で減少するが、その後の低下は緩やかである。HL42供試体では、200日以降の低下は極めて小さく、ほぼ一定で

推移している。本供試体の場合、経過日数400日では短期载荷直後の引張応力負担の約40%以上がが残存しておりその残存率は高い。

図-7は、付着によってもたらされる鉄筋ひずみの経時変化を示すものであるが、HL42供試体を除けば、経時的な変化は小さく、ほぼ一定であり、持続荷重下において低下しないことを表している。HL42供試体は、短期载荷直後において、極微細なひび割れが生じていた。このときの鉄筋ひずみ分布から得られる平均付着応力は、 0.1N/mm^2 程度であり、その後、持続荷重下でひび割れの開口が進み、平均付着応力が 3.3N/mm^2 程度に増加したものである。

以上、本研究では、十分なデータが揃っていないわけではなく、今後詳細なデータの基での検証と、適用性の一般化を図る必要性は十分認識しているが、上述したように、高強度コンクリートを用いたPRC部材では、明らかに引張剛性の成分を分離でき、また分離しない従来法では、後述するように過大評価が顕著であるので、以下のひび割れ断面の破壊エネルギーによってもたらされるコンクリートの引張応力負担と、付着によってもたらされる引張剛性から成るテンションステイフニングモデルを提案することとした。この式は、平均鉄筋ひずみに関して構成したものを平均曲率に拡大適用したものである。

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_t &= \Psi_{2,t} - \Psi_{c,t} - \Psi_{b,t} \\ &= \Psi_{2,t} - (\Psi_{2r,t'} - \Psi_{1r,t'}) \times \\ &\quad \left\{ \alpha(t) \left[1 + C_c(1 - M_k) \right] + \gamma(t) C_b \left(1 - \frac{1}{M_k} \right) \right\} \end{aligned}$$

ただし、 $M_k = \frac{M - M_0}{M_r - M_0} \leq 2$ (1)

ここに、

- $\bar{\Psi}$: 平均曲率
- M : 作用モーメント
- M_r : ひび割れ発生モーメント
- M_0 : デコンプレッションモーメント
- $\Psi_{2,t}$: t 日におけるひび割れ断面の M に対応する曲率
- $\Psi_{c,t}$: t 日におけるひび割れ断面引張域のコンクリート応力負担による曲率

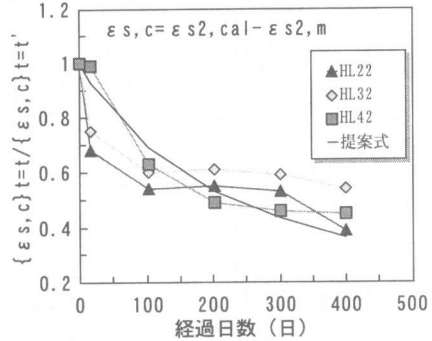


図-6 ひび割れ断面のコンクリート引張応力負担の経時変化

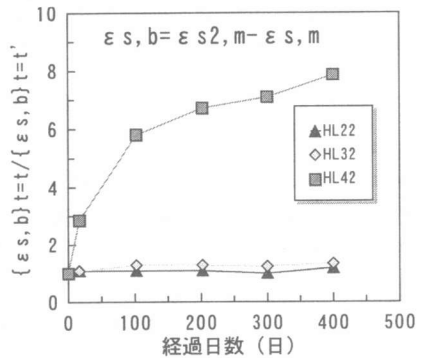


図-7 付着に起因する引張剛性の経時変化

$\Psi_{b,t}$: t 日における付着によってもたらされる引張剛性による曲率

$\Psi_{1r,t'}, \Psi_{2r,t'}$: ひび割れ発生時点 t' 日における全断面およびひび割れ断面の M_r に対応する曲率

C_c : 開口変位などの影響を表す係数

C_b : 付着特性などの影響を表す係数

$\alpha(t)$: ひび割れ断面引張域のコンクリート応力負担の経時変化を表す係数

$\gamma(t)$: 付着に起因する引張剛性の経時変化を表す係数

係数 C_c は破壊エネルギーに関わるコンクリート材料の性質、付着およびひび割れ間隔によって決まるひび割れ幅、すなわち開口変位などの影響を示す係数を表し、 $\alpha(t)$ は経時的に破壊エネルギーが減少し、ひび割れ断面引張域のコンクリート引張応力負担の低下を表す係数である。係数 C_b は付着特性などの影響を示す係数を表し、 $\gamma(t)$ は経時的な引張剛性の変化を表す係数である。

表-4 平均曲率の比較

NO.	短期載荷直後の平均曲率 ψ_e (*10E-6/cm)			対 実測値		経過日数400日の平均曲率 ψ_{400} (*10E-6/cm)			対 実測値	
	実測値 ①	CEB MC90 ②	提案式 (1) ③	CEB MC90 ②/①	提案式 (1) ③/①	実測値 ④	CEB MC90 ⑤	提案式 (1) ⑥	CEB MC90 ⑤/④	提案式 (1) ⑥/④
HL10	50.1	56.7	---	1.13	---	75.5	87.0	---	1.15	---
HL12	49.5	53.5	---	1.08	---	74.2	77.6	---	1.05	---
HL20	29.4	51.8	34.4	1.76	1.17	68.1	82.3	67.3	1.21	0.99
HL22	37.7	53.6	32.6	1.42	0.86	82.1	78.3	61.6	0.95	0.75
HL30	20.5	46.6	30.7	2.27	1.50	49.9	80.9	71.6	1.62	1.43
HL32	20.6	43.2	23.8	2.10	1.16	54.9	71.1	60.6	1.30	1.10
HL40	18.3 [○]	(16.3)	(16.3)	(0.89)	(0.89)	37.5	(35.8)	(35.8)	(0.95)	(0.95)
HL42	14.4	20.5	15.9	1.42	1.09	42.2	46.1	44.1	1.09	1.05
	平均			1.60	1.16	平均			1.20	1.06

○: ひび割れが発生していない場合を示す
 (): 全断面有効の解析値を示す 平均: () は省いた計算値を示す

本研究の範囲では、 C_c, C_b 係数はそれぞれの負担を表す式において実測値を回帰して、 $C_c = 1.0, C_b = 2.4$ としている。 $\alpha(t)$ は低下減少を双曲線で実測値を回帰し、 $\alpha(t) = 1/(0.0044 * t + 1)$ とした。図-4~7には、回帰した結果を提案式として図に示している。 $\gamma(t)$ については、ひび割れ断面の鉄筋ひずみと t との関係式とすべきであるが、データ数が少なく関係式を見出すには無理があるので、ここでは、図-7に示す実測の関係を用いることにした。HL42供試体を除けば、 $\gamma(t) = 1.0$ としても良いと考えられる。

4. 実験結果および考察

表-4には、テンションスティフニング効果を表するために、長期載荷供試体の短期載荷時および経過日数400日の平均曲率について、MC90および本研究で提示したテンションスティフニングモデルによる値を実測値と比較したものを示す。

実測値とMC90による値を比較すると、両時点において、RCおよびプレストレス導入レベルが低く、作用している鉄筋応力が高いPRCでは、MC90による値は実測値を比較的精度良く評価しているが、プレストレス導入レベルが高く、作用している鉄筋応力が低いほど過大評価する傾向である。これは、普通強度の場合と同

様である²⁾が、高強度の場合の方が過大評価する傾向がさらに顕著である。これは、前述したように、高強度コンクリートを用いたPRCのひび割れ発生からひび割れ定常状態に至る領域の短期載荷時の評価や、持続荷重下での評価において、MC90のテンションスティフニングモデルは適切に評価されていないためである。

これに対して、提案式(1)により求めた値は、MC90に比べ、平均的に精度の改善が認められる。

5. まとめ

ひび割れ断面の破壊エネルギーによってもたらされるコンクリートの引張応力負担と、付着によってもたらされる引張剛性から成るテンションスティフニングモデルの考え方を示した。その結果、高強度コンクリートを用いて、ひび割れ幅を小さく抑制するPRC部材の短期および長期の変形を高い精度で予測し得る一つの方法であることが認められた。ただし、この式の一般化にはさらに詳細な検討が必要である。

参考文献

- 1) CEB-FIP : MODEL CODE 1990
- 2) 手塚正道, 佐藤良一, 山本浩嗣, 鳥取誠一 : PRC部材の長期変形・応力に関する研究, 土木学会論文集 No. 613/V-42, 43-57, 1999.2