

1. はじめに

近年、山陽新幹線高架橋ひび割れ問題に代表されるように、構造物のひび割れが問題となっている。コンクリートの性質上、避けられない収縮ひび割れは鉄筋コンクリート構造物の耐久性に大きな影響を与える。鉄筋コンクリート構造物の長寿命化が重視されている現状がある。収縮ひび割れの発生計算式や、制御技術に関する研究は長年なされているが、発生メカニズムの複雑さから、統一的な解決策は見出されていない。また、構造物における外部拘束による温度ひび割れに関しても、打設後3～4日のうちに発生するため、これも解決が難しいとされている。しかし最近のひび割れ対策の中には、あえて構造的に無害なひび割れを発生させようとする技術が考えられている。ひび割れを分散させることによって、無害なものとして、コンクリート構造物の耐久性を向上させるのである。

このような背景のもと、本研究では温度ひび割れに対応させるため、打設後3日経った梁部材(鉄筋コンクリート棒部材)を対象とした直接引張試験を行い、補強鉄筋や繊維補強などの補強材の技術のひび割れ分散性能を実験的に検証した。

2. 鉄筋コンクリート部材のひび割れ分散手法

(1) 目的

ここでは鉄筋コンクリート棒部材の直接引張試験により、収縮ひび割れにおける様々な補強材のひび割れ分散性能を確認することを目的とした。

(2) 供試体の概要

本研究室では過去²⁾、材齢28日強度で同様の試験を実施しているが、前述にもあるように今回は打設の3日後に試験を実施した。本実験の供試体に使用したコンクリートの材齢3日における強度は表-1に示す。寸法は全長1,800mm、有効長さ1,500mm、幅100mm、高さ200mmの長方形梁とした。また、各供試体の補強状況を図-1に示す。

(3) 実験方法

両端を拘束した直接引張試験(図-2 参照)を行った。本試験では強制的に引張力を導入し、その際のひび割れ性状などを確認した。ここでは、供試体の上面に設置した15台のεゲージの変位の合計を供試体の伸びとして記録した。

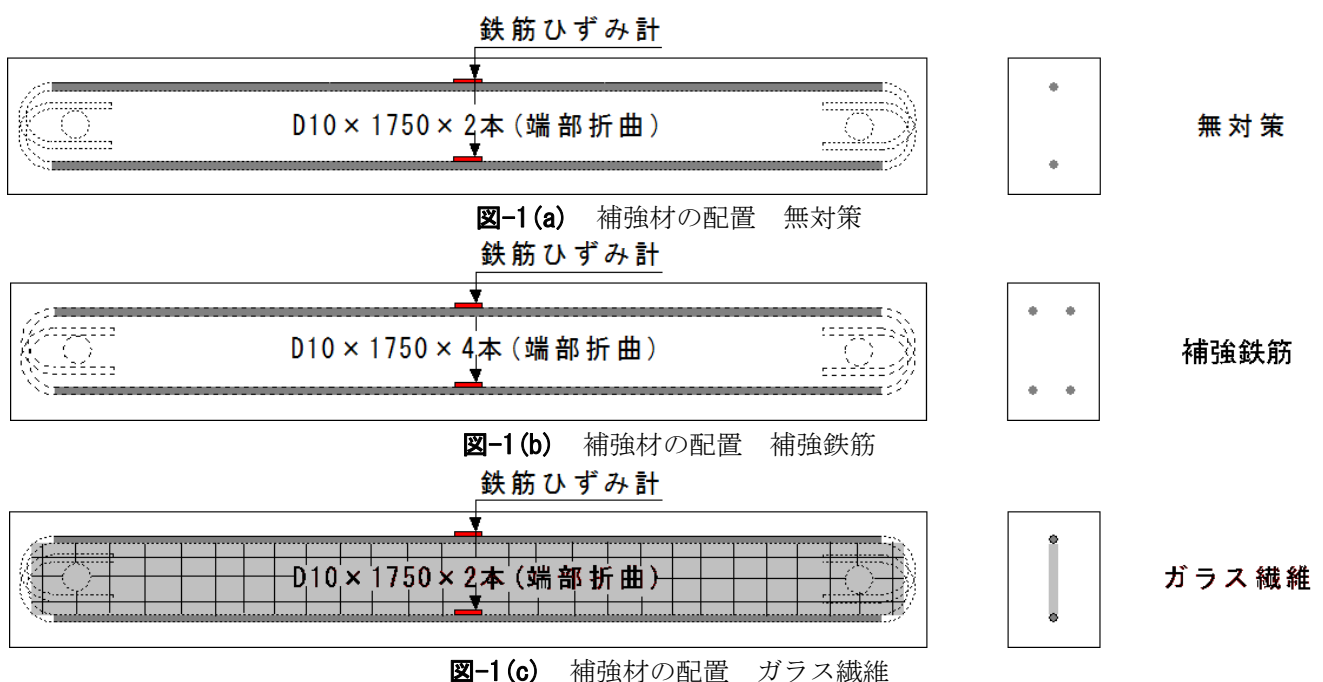


表-1 供試体の材料特性

コンクリート	
圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	18.9
鉄筋 (D-10)	
引張降伏強度 f_y (N/mm ²)	371
引張強度 f_u (N/mm ²)	492

表-2 引張試験結果

供試体 番号	補強材の 種類	ひび 割れ 本数 (本)	全体変位 1mm での最大ひ び割れ幅 (mm)	最大 荷重 (kN)
1-1	無対策 D-10(2 本)	4	-	42.54
1-2		5	0.401	51.7
1-3		4	0.576	51.4
2-1	補強鉄筋 D-10(4 本)	7	0.190	71.74
2-2		5	0.208	63.5
2-3		7	0.157	68.06
3-1	ガラス	5	0.301	55.12
3-2	繊維	6	0.289	58.06
3-3	D-10(2 本)	6	0.276	62.2

3. 実験結果

それぞれの補強材の実験結果について、以下に考察する。実験結果の一覧は表-2 に示す。

(1) ひび割れ性状

図-3 に試験後のひび割れ状況を示す。図中の○囲み数字はひび割れが発生した順番である。

まず、図-3(a) より、本来 1 本目のひび割れは部材の中心付近に発生するのが基本であるが、この無対策の供試体では 1 本目のひび割れが左端から 240mm ほどの距離に発生した。この現象は、他の供試体も図-3(b)、(c) でも確認できるようにほぼ同じことが起きた。しかし、その後、ひび割れは適当な間隔に分散された。また、多くのひび割れは供試体側面全体に広がったが、そうでないひび割れもいくつか確認できた。

これらの図から、ひび割れを最も分散させたのが補強鉄筋であることが明らかで、それに次ぐのはガラス繊維であった。したがって、補強鉄筋の供試体の最大ひび割れ幅が最も小さかったと言える。



図-2 軸方向引張力の導入状況

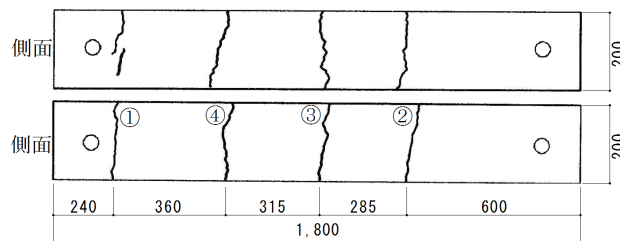


図-3(a) ひび割れ状況 無対策(1-3)

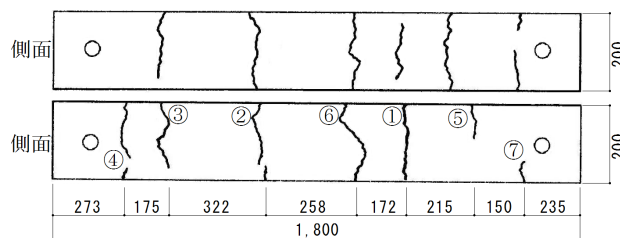


図-3(b) ひび割れ状況 補強鉄筋(2-3)

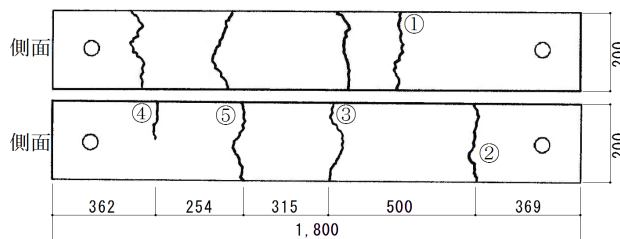


図-3(c) ひび割れ状況 ガラス繊維(3-1)

(2) 荷重- π ゲージ変位関係

荷重- π ゲージ変位曲線を図-5 に示す。これは荷重と有効スパン間の上面に設置した全ての π ゲージ(図-4 参照)の変位を示した図である。

図-5(a) より無対策では、 π ゲージ⑦でも確認されるように内部の鉄筋が降伏していることが分かる。図-5(b) より補強鉄筋では、 π ゲージによって測定された全てのひび割れ幅は、0.2mm 未満であることが確認された。除荷後の全ての幅は 0.05mm 未満であった。図-5(c) よりガラス繊維では、 π ゲージによって測定された最大ひび割れ幅は、0.35mm が確認できた。除荷後の全ての幅は 0.05mm 未満であった。

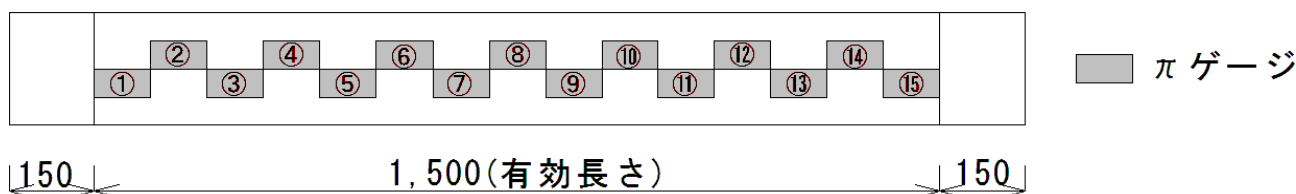


図-4 π ゲージの配置 (供試体上面)

4. ひび割れ幅, ひび割れ間隔に対する検討

引張部材における最大ひび割れ間隔, 及び最大ひび割れ幅は式(1), (2)によって与えられる¹⁾.

$$l_{\max} = \frac{C_1 \times \phi \times f_t}{p \times \tau_{\max}} \quad (1)$$

$$w_{\max} = \frac{l_{\max}}{E_s} \left(\sigma_s \max - \frac{C_2 \times f_t}{p} \right) \quad (2)$$

ここに, $l_{\max}$: 最大ひび割れ間隔

$w_{\max}$: 最大ひび割れ幅

p : 鉄筋比, $\tau_{\max}$: 鉄筋の最大付着応力度

E_s : 鉄筋のヤング係数 ($E_s = 200 \text{ GPa}$)

ϕ : 鉄筋の直径, f_t : コンクリートの引張強度

$\sigma_s \max$: 鉄筋の最大応力度

C_1, C_2 : Brice の理論による付着分布係数

$$4C_1 = 0.500, \quad C_2 = 0.500$$

ここで, 式(1), (2)は部材の鉄筋量に依存するものであり, 繊維シートの付着特性や引張強度を考慮していない. よって, 繊維補強シートを用いた際に適用できるかは未知である. 以下に, 実験による実測値と式(1), (2)から得た理論値を比較検討する. さらに, 誤差を修正した算定式を提案し, 実測値と比較する.

表-3 より, 本実験における最大ひび割れ間隔 $l'_{\max}$ を供試体の有効長さをひび割れ間隔で除したものと仮定し, 式(1)より得た理論上の最大ひび割れ間隔 $l_{\max}$ と比較すると, 鉄筋量に依存する無対策, 補強鉄筋は近似した値となっている. ガラス繊維は過大評価となっている. 一方, **表-4** より, 式(2)によって導き出した理論上の最大ひび割れ幅 $w_{\max}$ と, 実測した最大ひび割れ幅 $w'_{\max}$ を比較すると, 無対策, 補強鉄筋, ガラス繊維ともに理論値が過大に算定されている. よって式(2)は過大評価していると考えられる.

以上のことから式(1), (2)ともに繊維補強を施した場合には適用できないことが確認された. そこで本実験結果より, **表-5** に示す使用補強材の違いによる係数 k_1 , k_2 及び式(2)の過大評価分の乗数を計算要素に取り入れた最大ひび割れ間隔 $ml_{\max}$ と, 最大ひび割れ幅 $mw_{\max}$ の算定式(3), (4)を提案する.

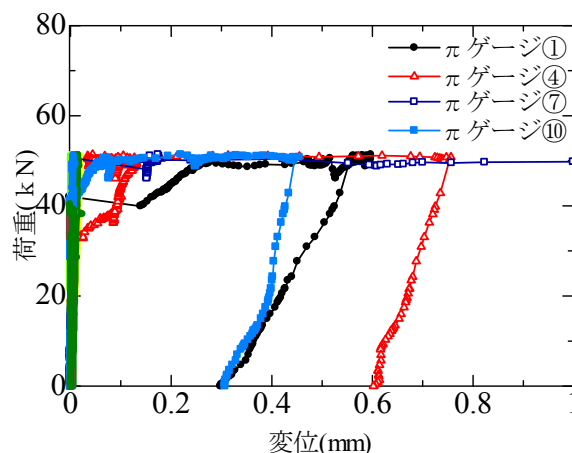


図-5(a) 荷重- π ゲージ変位曲線 無対策(1-3)

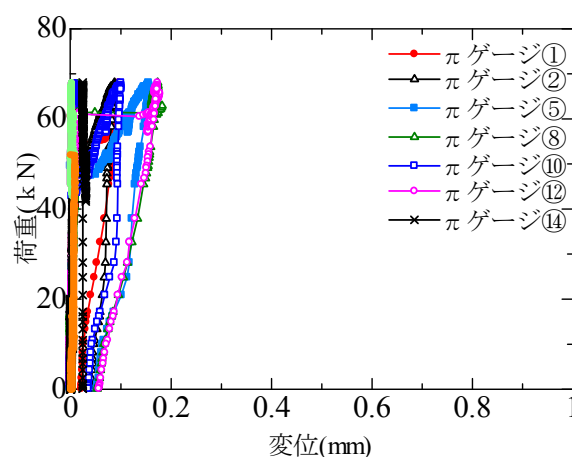


図-5(b) 荷重- π ゲージ変位曲線 補強鉄筋(2-3)

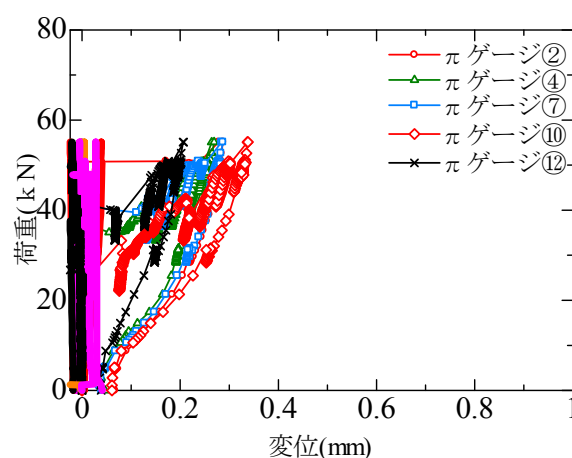


図-5(c) 荷重- π ゲージ変位曲線 ガラス繊維(3-1)

$$ml_{\max} = \frac{C_1 \times \phi \times f_t}{p \times \tau_{\max}} \times k_1 \quad (3)$$

$$mW_{\max} = 0.51 \times \frac{ml_{\max}}{E_s} \left(\sigma_{s\max} - \frac{C_2 \times f_t}{p} \right) \times k_2 \quad (4)$$

算定式(3), (4)の計算結果と, $l'_{\max}$ 及び $w'_{\max}$ を比較する. **表-3, 4** より最大ひび割れ間隔の算定は式(3)によって精度が改善された. 一方, 最大ひび割れ幅の算定式(4)は式(2)に比べると精度は高くなったが, 全体的にばらつきがある. これは, 本実験において最大ひび割れ幅の定義が正確ではなかったために, 見られるものと推察される. よって, 今後は最大ひび割れ幅の定義を正確にし, 更なる精度の向上を課題としたい.

5. おわりに

- (1) 今回の実験では無対策に比べると, ひび割れ本数においては補強鉄筋ではおよそ 1.5 倍, ガラス繊維ではおよそ 1.3 倍のひび割れ分散効果を発揮したことが確認できた.
- (2) 供試体の伸びが 1mm 時点での最大ひび割れ幅に関しては, 無対策と比較すると, 補強鉄筋はおよそ 1/4, ガラス繊維ではおよそ 1/2 倍に縮小することが確認できた.
- (3) 今回の条件では, ガラス繊維シートを内部に配置するより, 鉄筋量を増やす方がひび割れ分散性能は高くなることが確認できた.
- (4) しかし, ガラス繊維シートによる補強も, ひび割れ幅の拡大防止に効果があることが明らかになった.
- (5) 既往の研究から得られている最大ひび割れ間隔, 最大ひび割れ幅の算定式について考察を行い, より平均的に精度の良い修正式を提案した. また繊維シートを用いて補強した場合にも適用可能な式とした.
また, より正確な評価をするために, さらに多くの供試体で実験することが必要である.

参考文献

- 1) 岡田 清, 伊藤和幸, 不破 昭, 平澤征夫: 鉄筋コンクリート工学, 鹿島出版会, 2003.
- 2) 毎田悠承: 鉄筋コンクリート補強材のひび割れ分散性能に関する研究, 平成 19 年度徳山工業高等専門学校卒業研究論文集, 2007.

表-3 最大ひび割れ間隔の算定式との比較

供試体 番号	$l'_{\max}$ (mm)	$l_{\max}$ (mm)	$ml_{\max}$ (mm)	$\frac{l_{\max}}{l'_{\max}}$	$\frac{ml_{\max}}{l'_{\max}}$
1-2	250	248	248	0.99	0.99
1-3	300	250	250	0.83	0.83
2-1	187	179	179	0.96	0.96
2-2	250	233	233	0.93	0.93
2-3	187	189	189	1.01	1.01
3-1	250	255	232	1.20	0.93
3-2	214	246	223	1.15	1.04
3-3	214	242	220	1.13	1.03

表-4 最大ひび割れ幅の算定式との比較

供試体 番号	$w'_{\max}$ (mm)	$w_{\max}$ (mm)	$mw_{\max}$ (mm)	$\frac{w_{\max}}{l'_{\max}}$	$\frac{mw_{\max}}{l'_{\max}}$
1-2	0.25	0.31	0.26	1.23	1.02
1-3	0.27	0.31	0.25	1.14	0.95
2-1	0.13	0.17	0.14	1.34	1.11
2-2	0.14	0.16	0.13	1.13	0.94
2-3	0.09	0.17	0.14	1.90	1.58
3-1	0.22	0.30	0.17	1.36	0.77
3-2	0.13	0.31	0.17	2.30	1.30
3-3	0.19	0.31	0.18	1.66	0.94

表-5 使用補強材による係数

補強材	k_1	k_2
鉄筋	1.0	1.0
ガラス繊維シート	0.91	0.68