論文　鉄筋コンクリートのひび割れ分散性と鉄筋比の関係に関する研究

田村　隆弘[*1]・二宮　純[*2]

要旨：鉄筋コンクリート構造物に発生するひび割れの分散性と鉄筋比の関係について，実構造物から得たデータと実験室での鉄筋コンクリート棒部材の引張試験の結果から考察した。実構造物のデータは，平成 17 年度より山口県が取り組んできたコンクリート構造物の試験施工の記録から抽出した。得られたデータからは，橋台のような大型構造物においても，鉄筋比が 0.3%程度確保されることで，ひび割れ幅は耐久性への影響が小さなものになる可能性が高いことが確認された。引張試験は，鉄筋量とひび割れ分散性の関係を確認することを目的として行ったが，ここでも，鉄筋比とひび割れ分散性の関係を確認できた。

キーワード：ひび割れ間隔，ひび割れ幅，実構造物，鉄筋比，引張試験

1. はじめに

コンクリートの温度応力に起因するひび割れや乾燥収縮に起因するひび割れは，構造物の耐久性に影響があることから，近年その対策のために各種の方法が提案されている。また，鉄筋コンクリート構造物に発生するひび割れは，内部に配置された鉄筋の状態によって，ひび割れ分散性，すなわち，ひび割れ間隔やひび割れ幅が変化することが知られており，例えば，土木学会示方書では，鉄筋量をパラメータとして発生するひび割れの幅とひび割れ指数の関係を示している [1)]。

一方で，鉄筋コンクリート構造物のひび割れ解析技術の開発も進んでいる。最近では，コンクリート内の水分移動を考慮しつつ，ひび割れ幅を予測するソフトも開発されるに至っている。しかし，実構造物で発生するひび割れは，さまざまな要因を含んでおり，正確にひび割れ幅を予測し，効果的な抑制対策を施すには課題も多い。そのような中で，構造物の耐久性に配慮してひび割れ幅の制限値は，各学協会でも構造物や環境条件毎に示されており、JCI のコンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針 [2)]では，多くの研究を基に防水性からみた場合のひび割れ幅の限度を 0.2mm と示している。なお，山口県では竣工時の基準を 0.15mm としている [3)]。

山口県では，近年多発する鉄筋コンクリート構造物のひび割れに対してひび割れ抑制技術として提案されている各種対策法の効果を検証するため，平成 17 年から平成 19 年に掛けて，大がかりな試験施工を行った（**写真－1**）。その中には，鉄筋比を増加させること（以下，補強鉄筋）によってひび割れを分散させることで，構造物に発生するひび割れの幅をいわゆる耐久性に影響のないサイズに抑制する試みもあった。

また，著者らは実験室レベルで鉄筋コンクリート部材のひび割れ分散性を確認するために鉄筋量を変化させた鉄筋コンクリート棒部材の引張試験を行った [4)]。

ここでは，山口県の実構造物による試験施工のデータと実験室での引張試験の結果から鉄筋によるコンクリートのひび割れ分散性能について考察した。

2. 実構造物の状況について

2.1 試験施工について

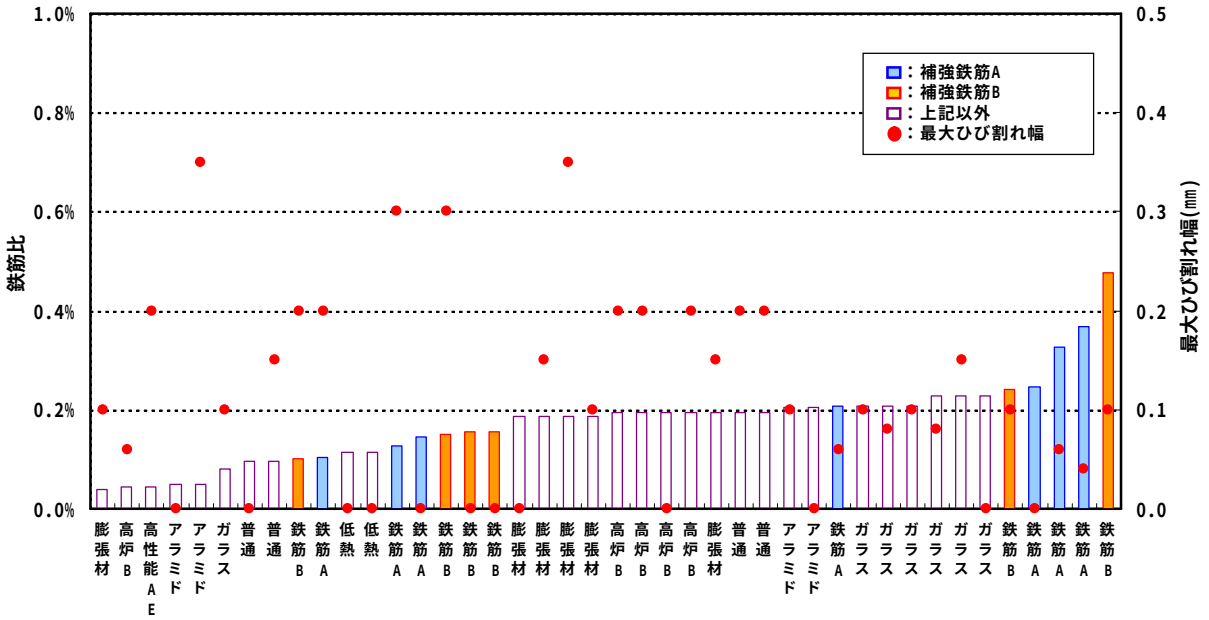
(1) 概要

山口県の試験施工では，鉄筋コンクリート構造物のひび割れ抑制対策として，低熱セメントや膨張材，高性能 AE 減水剤といった材料による対策から，補強鉄筋，ガラス繊維やアラミド繊維, PP 短繊維と言った補強材料による対策も検証した。そこでは鉄筋比が多いほどひび割れ幅が小さくなる傾向や，加えてガラス繊維等の付加的な対策を講じることでひび割れ幅が抑制されること等が確認された。これらについての詳細な情報は山口県のホームページに示されているが，本論文では鉄筋比とひび割れに着目して考察する。

(2) 実構造物における鉄筋比とひび割れ幅の関係

写真－1　実構造物におけるひび割れ抑制対策試験施工（山口県）

*1 徳山工業高等専門学校　土木建築工学科教授　工博　(正会員)
*2 山口県　土木建築部都市計画課主幹（(前)技術管理課主査）

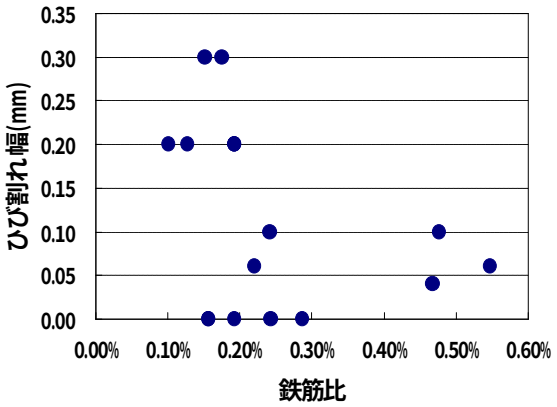


図－1　鉄筋比に対する最大ひび割れ幅の分布（山口県試験施工データ,H18）

図－1 は試験施工の対象とした構造物について鉄筋比をパラメータとして各種対策法と最大ひび割れ幅の関係を示したものである。なお，実構造物のひび割れの測定は市販のクラックゲージを用いた目視による測定値である。図より鉄筋比が大きくなるに従って，最大ひび割れ幅が小さくなり，また，これにガラス繊維による対策を取ると，より一層，ひび割れ幅が抑制されることを示している。

(3) **鉄筋によるひび割れ抑制対策と性能について**

図－2 は**図－1** の中から特殊なひび割れ対策を施した構造物のデータを除き，ひび割れ直行方向の鉄筋量の変化に着目して，ひび割れ幅と鉄筋比の関係を示したものである。**図－1，図－2** で示すデータは実構造物で得られたものであるために，それぞれ，構造物の大きさや形状，拘束度等の構造物の置かれた環境条件が異なる中でのデータであるが、（それにも係わらず）図より鉄筋比が大きくなるに従いひび割れ幅が小さくなる傾向が確認できる。そして，ここで得られたデータの範囲では，鉄筋比が 0.25%を超える領域でひび割れ幅が 0.2mm 以下に留まっていた。

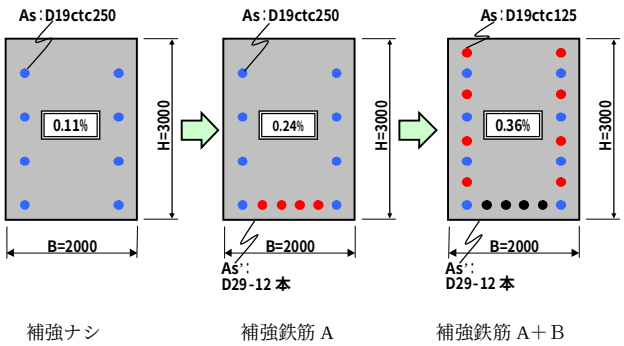


図－2　実構造物における鉄筋比とひび割れ幅の関係

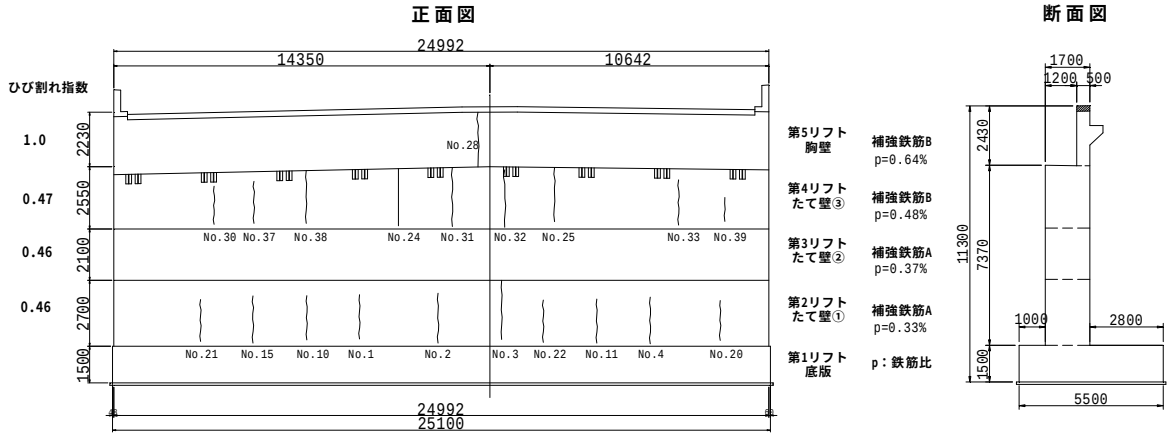
2.2 鉄筋比を割り増しした構造物

図－3 は，補強鉄筋の配置例を示す。**図－1** の中で「鉄筋 A」は部材下部に水平に鉄筋を配置し，「鉄筋Ｂ」は**図－3** 右図に示すように側面に割増分の鉄筋を配置している。**写真－1** の構造物は橋台の幅が 25m に及ぶため，これらの補強鉄筋によりひび割れ幅の抑制を目指した。

図－4 は，**写真－1** の橋台の（コンクリート打設後約１ヶ月での）ひび割れ状態を示している。第２リフト，第３リフトは補強鉄筋 A で第４リフトは補強鉄筋Ｂによって鉄筋比を割り増ししている。図左端の数字は(株)計算力学研究センターのコンクリート温度応力解析ソフト ASTEA MACS によって解析したリフト毎のひび割れ指数を示す。図より第３リフト（補強鉄筋 A）ではひび割れは確認されず，第５リフト（胸壁：補強鉄筋Ｂ）



図－3　ひび割れ抑制用の補強鉄筋の配置例



図－4　補強鉄筋を配置してひび割れを分散させた幅 25m の橋台（図左端の数字はリフト毎のひび割れ指数を示す）

では１箇所に 0.2mm のひび割れが発生したが，第２リフトと第４リフトでは，ひび割れが９本から 10 本分散して発生している様子が確認できる。ひび割れ幅は，第２リフト（補強鉄筋 A）では全て 0.06mm 以下に，第４リフト（補強鉄筋Ｂ）では１本のみ 0.1mm で他は 0.06mm 以下であった。

3. 鉄筋コンクリート棒部材の引張試験

3.1 目的

実構造物では，構造物の構造条件や環境条件が異なることから，ここで得られたデータから鉄筋量とひび割れ分散性の関係を定量化することは困難である。そこで，鉄筋コンクリート棒部材を供試体として，鉄筋量とひび割れ分散性（あるいは，ひび割れ幅の抑制効果）の関係を実験室レベルで検証することとした。

3.2 供試体

供試体を**図－5** に示す。高さ 300mm，幅 200mm，長さ 2000mm で，（軸方向引張力による応力度の高い）両端から 250mm の部分は，鋼板で包み込むように補強した。鉄筋は，D16(SD345)を２本配置したもの（鉄筋比 p=0.66%）と，D22(SD345)を２本配置した（鉄筋比 p=1.29%）ものを用意した。橋台などの実構造物では，一般に鉄筋比はこれより小さな値になるが，ここでは鉄筋比とひび割れ分散性の関係を確認することを目的とするためこのような鉄筋量とした。試験に使用した材料の特性を**表－1** に示す。

表－1　コンクリートと鉄筋の材料特性

コンクリート		
圧縮強度 f'_c (N/mm^2)	29.1	
弾性係数E_c (GPa)	32.2	
鉄　筋		
呼び名	D16	D22
引張降伏強度 f_y (N/mm^2)	399	399
引張強度 f_u (N/mm^2)	559	567

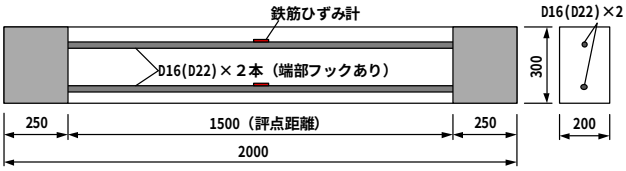
3.3 試験方法

引張試験は，**図－6** に示すように，供試体の一端を反力壁に固定し，他端からアクチェータによって引張力を導入することで行う。なお，両端にはヒンジ点を設け付加的なモーメントの発生を回避した。軸力のバランスは供試体の中央部の４面に設置したひずみゲージにより確認した。変位計測は，評点距離を 1500mm として，供試体の両端から 250mm の位置に変位計を設置しておこなった。**写真－2** は，引張試験の状況を示している。荷重は，変位制御により 0.25mm/min の載荷速度で，最大 5mm を目標に漸増させた。

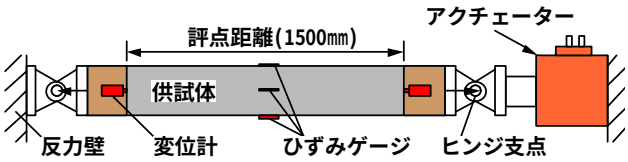
3.4 試験結果

(1) ひび割れ状況

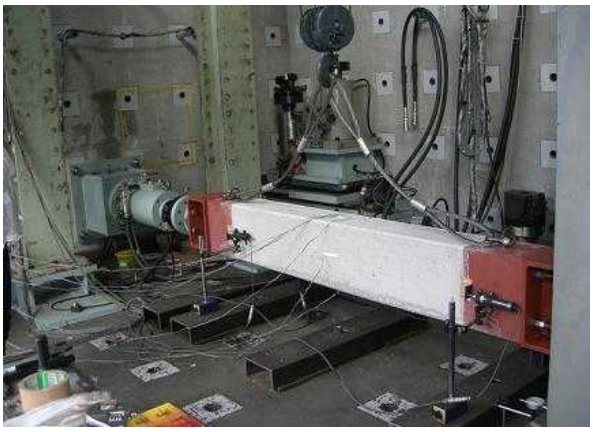
表－2 は，各供試体のひび割れ本数と最大荷重を示している。この表に示すように，ひび割れは，D16 を２本配置した場合は１本あるいは２本発生し，D22 を２本配



図－5　引張試験供試体



図－6　鉄筋コンクリート棒部材の引張試験イメージ



写真－2　鉄筋コンクリート棒部材の引張試験状況

置した場合には５本あるいは６本発生した。最大荷重は，D16 の供試体では約 160kN，D22 の供試体では約 300kN であったが，この値は，鉄筋の降伏荷重に概ね一致する。

図－7に全ての供試体のひび割れ図を示す。上段が D16 を２本配置した供試体で，下段が D22 を２本配置した供試体である。ほとんどのひび割れは貫通ひび割れとなっている。**図－7** の中の上面に示している○数字はひび割れの発生順序を示している。特に多くのひび割れが発生した D22 を２本配置した供試体では，供試体の左右で交互に（ほぼ規則的に）ひび割れが発生して行く様子が確認された。また，上下面では先に発生した部材軸に直行するひび割れから鉄筋に沿った部材軸方向のひび割れの発生も観察された。

表－2　引張試験の結果

供試体番号	呼び名鉄筋比	ひび割れ本数	最大荷重(kN)	降伏荷重(kN)
1-1	D16 (2本) p=0.66%	2本	163	158
1-2		2本	161	
1-3		1本	163	
2-1	D22 (2本) p=1.29%	6本	300	308
2-2		5本	297	
2-3		5本	303	

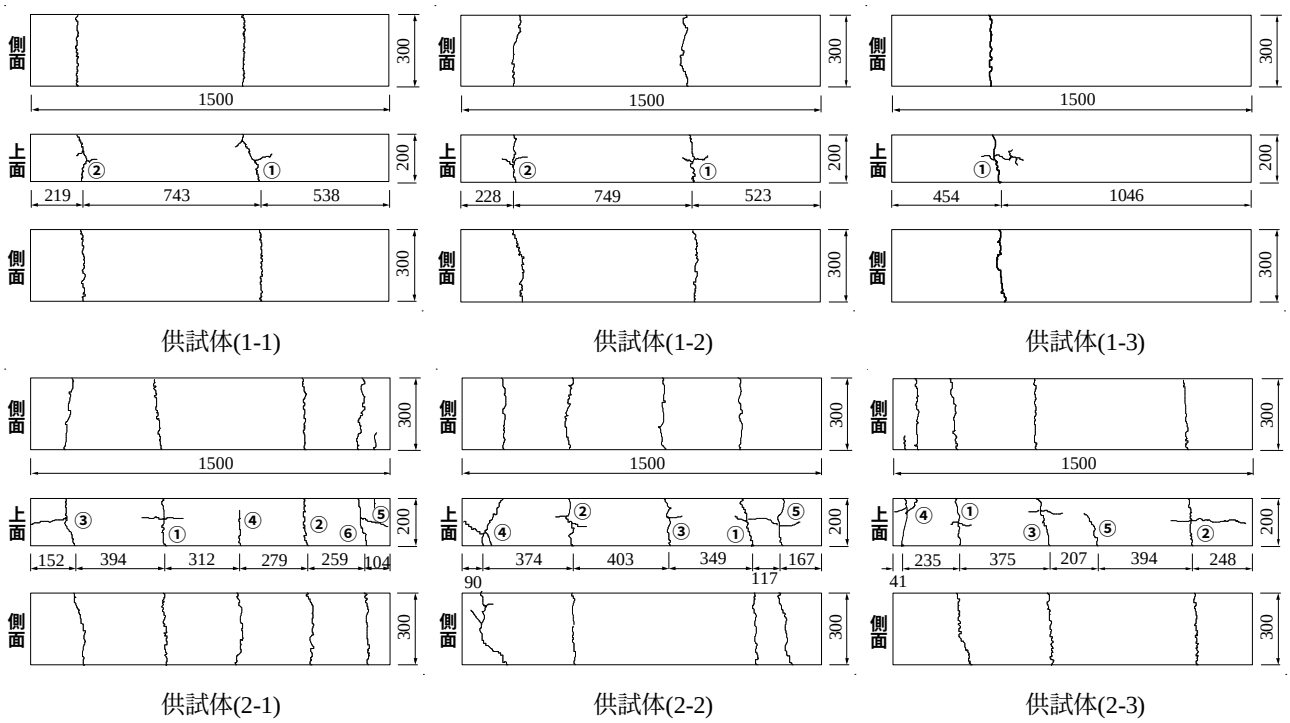
なお，ひび割れ間隔及びひび割れ幅については，後に**表－3** により考察する。

(2)荷重－評点間変位の関係

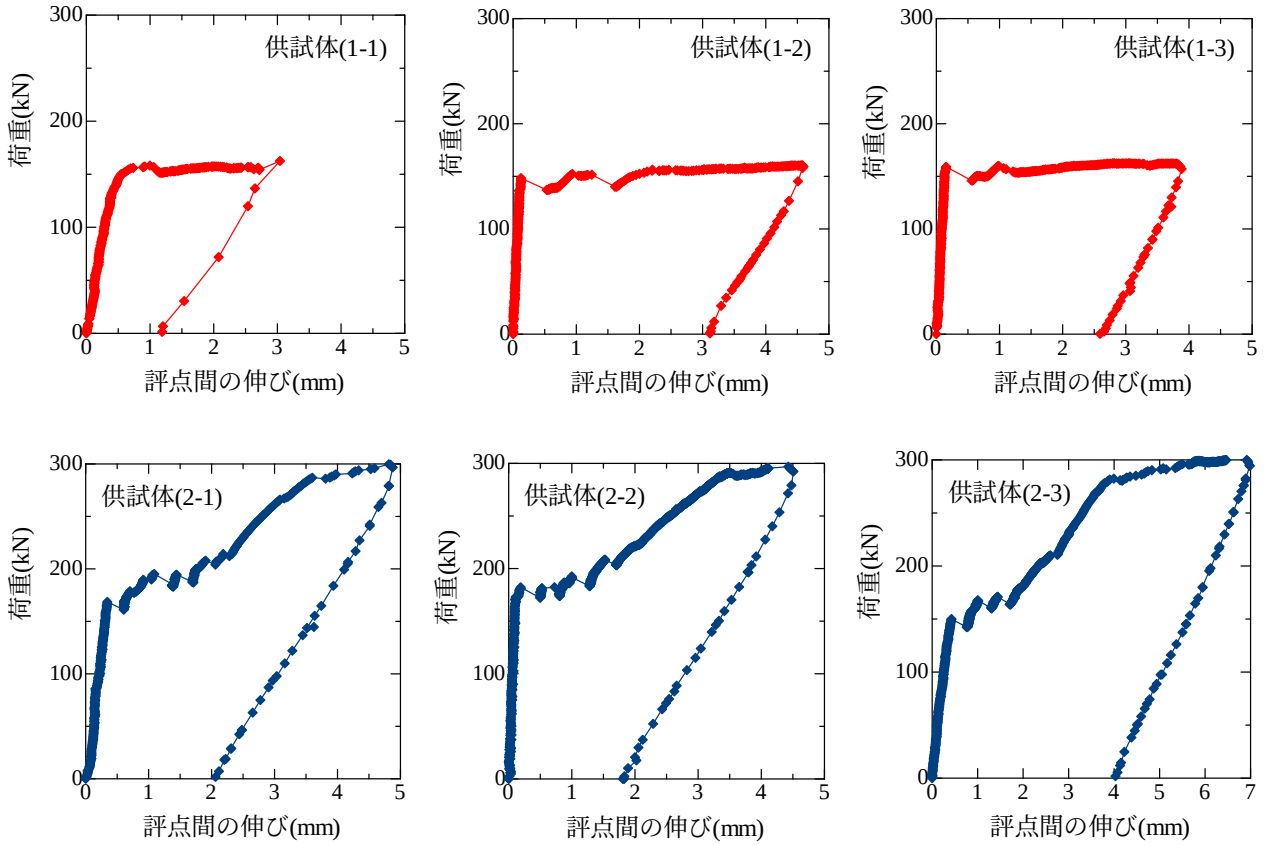
図－8 は全ての供試体の荷重と評点間変位を示している。ひび割れが発生する毎に荷重が低下して行く様子が観察できる。

D16 を配置した供試体では，約 150kN 程度の引張力で最初のひび割れが発生した。その後，わずかに荷重を上げた後に内部の鉄筋が降伏し，その後は荷重が増加することのないまま変位が増加して行く中で，供試体(1-1)と供試体(1-2)では，さらにもう１本のひび割れが発生した。供試体(1-3)では，最初に発生したひび割れのみがひび割れ幅を増大させていった。

一方 D22 を配置した供試体では，約 150kN から 170kN 程度で最初のひび割れが発生し，その後，荷重を上げて



図－7　ひび割れ図



図－8　荷重－評点間変位の関係

行く中で，鉄筋の降伏までに 4 本から 5 本のひび割れが発生している。

除荷後，供試体にひずみが残り，ひび割れが開口したままであることが示されるが，その大きさは，最大変位に比例して大きくなっている。

4. ひび割れ分散性

ひび割れ分散性能は，ひび割れ間隔とひび割れ幅によって表現される。実構造物においても，コンクリートの収縮に起因するひび割れの場合には，収縮応力から算出される部材全体の収縮量をいかに分散させて耐久性に影響のないひび割れ幅にすることが出来るかがひび割れ対策のポイントとなる。

ひび割れ間隔やひび割れ幅を算定するためには，鉄筋の付着応力を定義する必要があるが，これを正確に定めることは難しい [5]。また，実際の（理論値でない）ひび割れ間隔やひび割れ幅は，その評価や定義が困難である。そのため，今回の実験では，評点間変位が 3mm に達するまでにほとんどのひび割れが発生していることを理由に評点間変位が 3mm に達したときのひび割れについて評価するものした。すなわち，評点間距離 1500mm を評点間変位が 3mm の時のひび割れ本数で除したものを平均ひび割れ間隔とし，評点間変位の 3mm をひび割れ本数で除することで平均ひび割れ幅とした。**表－3** はひび割れ間隔の実験結果とこの値から算定した鉄筋の平均付着応力を示し，そして，この値を用いて求めたひび割れ幅を示している。ここで，式(1)及び式(2)は，両引張型の鉄筋コンクリート部材において，ひび割れ間のコンクリート応力は一定と仮定した場合の最大ひび割れ間隔と最大ひび割れ幅算定式である [5]。

$$l_{max} = \frac{C_1 \times \phi \times f_t}{p \times \tau_{max}} \tag{1}$$

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

ここで，l_{max} ：最大ひび割れ間隔
w_{max} ：最大ひび割れ幅
p ：鉄筋比
ϕ ：鉄筋の直径
τ_{max} ：鉄筋の最大付着応力度
E_s ：鉄筋のヤング係数 (200GPa)
f_t ：コンクリートの引張強度
σ_s ：鉄筋の応力度
C_1 , C_2 ：Thomas の理論による分布係数
4 C_1=0.750，C_2 =0.625

表－3　ひび割れ幅

供試体	$l_{ave}^{\exp}$ (mm)	φ (mm)	f_t (N/mm^2)	$\tau_{\max}$ (N/mm^2)	σ_s (N/mm^2)	$w_{ave}^{\exp}$ (mm)	$w_{\max}^{calc}$ (mm)	$\frac{w_{ave}^{\exp}}{w_{\max}^{calc}}$
D16×2 本	750	15.9	2.18	0.65	399	1.50	1.45	1.03
D22×2 本	375	22.2	2.18	0.94	323	0.75	0.82	0.91

$l_{ave}^{\exp}$ ：ひび割れ間隔（実験値）：評点距離(1500㎜)/ひび割れ本数
$w_{ave}^{\exp}$ ：ひび割れ幅（実験値）：3mm/ひび割れ本数
$w_{\max}^{calc}$ ：〃（理論値）：式(2)によって算出するひび割れ幅

これにより得られたひび割れ幅と実験でのひび割れ幅の比較から，算定値は比較的精度良くひび割れ幅を表現しているが，この値は鉄筋の付着応力の分布を仮定する係数（ここでは，Thomas の分布係数を使用）に強く依存している。

5. まとめ

コンクリートのひび割れ抑制対策として，鉄筋比とひび割れ分散性能の関係に着目して，実構造物で取り組んだ事例の報告と実験室での検証結果を報告した。以下に対象とした実構造物及び実験した結果から得られたデータについて結論をまとめる。

(1) 実構造物で得られたデータからは，鉄筋比が大きくなるに従い，ひび割れ幅が抑制されることが統計的に確認された。（山口県では、実構造物データの蓄積を継続的に実施しており、今後更に統計的な評価の精度を上げることが期待できる。）

(2) また，調査の対象とした実構造物では，鉄筋比が 0.25%を超えたものでは, ひび割れ幅は 0.2mm 以内に留まっていた。（但し，コンクリート打設後約１ヶ月程度での計測値である。）

(3) 実験室で行った鉄筋コンクリート棒部材の引張試験の結果からは，これまで言われているような鉄筋比とひび割れ間隔及びひび割れ幅の間の密接な関係が確認できた（今回の実験では鉄筋比を２倍程度にするとひび割れ間隔も２倍程度になり，ひび割れ幅も 1/2 程度になった。）

(4) ひび割れ間隔やひび割れ幅を算定するためには，鉄筋の応力分布を推定する必要があるが，実験結果から得られたひび割れ間隔から応力度を推定し，この値を用いたひび割れ幅の算定値は，実験で得られたひび割れ幅に比較的良く一致した。

最後に，実構造物におけるひび割れ間隔やひび割れ幅の算定は，構造物の拘束状態や応力状態が複雑であるため容易ではない。このため，統計的方法や JCI の提案する CP ひび割れ幅法，有限要素法による解析が有効であるとされている [1)]。しかし，有限要素法による解析も実用の途についたばかりであり，特に鉄筋の影響を考慮した解析については，解析精度の検証のために実構造物での統計的分析作業が必要であると思われる。山口県では，統計的手法の基本データを蓄積するために土木工事においてはコンクリート打設管理記録を整理し，その中には，各種のコンクリートのひび割れ抑制対策とその結果が示されている [6)]。また，県では鉄筋によるひび割れ抑制対策を推奨しており，今後の追跡調査によってその性能がより一層明らかになるものと思われる。

参考文献

1) 土木学会：コンクリート標準示方書「設計編」, pp.82-85, 2007
2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針，p.61, 2003
3) 山口県：コンクリート構造物ひび割れ抑制対策資料（第 1 回改訂版）, 6-7, 2007
4) Tamura, T., Maida, Y.: A study on the cracks dispersible performance of reinforced materials for R/C member, Proc. of the eight international conference on creep, shrinkage and durability of concrete and concrete structures, Vol.2, pp.1321-1328, Sep./Oct.2008
5) 岡田　清ほか，鉄筋コンクリート工学，鹿島出版会, p. 116, 2003
6) (財)山口県建設技術センターHP：http://www.yama-ctc.or.jp/data/index.html