

論文 穴あき鋼板を用いた鉄筋コンクリートのひび割れ幅低減効果の評価手法に関する検討

原田 匠^{*1}・梅本 宗宏^{*2}・関根 一郎^{*3}・田中 徹^{*1}

要旨：穴あき鋼板を用いた鉄筋コンクリートのひび割れ幅低減効果を定量的に評価するため、穴あき鋼板を埋設した鉄筋コンクリート試験体の曲げ載荷実験を行った。ひび割れ幅低減効果はひび割れ抑制係数および換算鉄筋比により評価した。その結果、ひび割れ抑制係数により穴あき鋼板の効果を示せることを確認し、また、穴あき鋼板のひび割れ幅低減効果を鉄筋比に換算することで、簡易に評価ができる可能性が示された。

キーワード：穴あき鋼板、曲げ、載荷、ひび割れ抑制係数、鉄筋比

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性を向上させることは、良質な社会資本を構築するうえで重要であり、耐久性向上のためにひび割れの少ないコンクリート構造物とすることが望まれる。

これまで鉄筋コンクリート(以下、RC と表す)構造物のひび割れを制御する技術に関する研究が多く報告され、その中には、補強鉄筋や繊維補強シートなどのひび割れ低減材を用いることで、コンクリートのひび割れを制御する方法も提案されている¹⁾。

筆者らも、穴あき鋼板(以下、MB と表す)を用いたコンクリートのひび割れ低減材を開発し、土木建築構造物を対象とした現場適用にて有効性の確認を行ってきた²⁾³⁾。

各種ひび割れ低減材の有効性に関する評価手法の検討も多くみられるが、ひび割れの発生個所や要因など状況も異なり、実験の場合は特定の環境影響における想定とするため、材料の有効性を一義的に表すことは難しい。

本研究では、穴あき鋼板を用いた RC のひび割れ幅の低減効果を定量的かつ簡易に求める手法の確立を目的として、RC 試験体の曲げ実験を行い、ひび割れ抑制係数 α を用いる手法と、換算鉄筋比を用いる手法により評価した。

2. 実験概要

2.1 ひび割れ幅低減効果の評価方法

コンクリートのひび割れは材料・設計・施工に由来する多岐の要因により発生するため、ひび割れ抵抗性を評価する実験方法や解析方法は多くの手法が提案されている。ここでは、ひび割れ幅を低減する材料の簡易な評価手法の確立を目的として、硬化後のコンクリート構造物へ掛かる応力により発生するひび割れを想定して、RC 試験体を作製し、曲げ応力によりひび割れを発生させ、以

下に示す実験手法にて、ひび割れ幅低減効果を評価した。

(実験 1) ひび割れ抑制係数 α による評価：RC 試験体の曲げ実験結果から、ひび割れ低減材のひび割れ幅低減効果およびひび割れ分散効果を示す指標をそれぞれ数値化し、両者から算出されるひび割れ抑制係数 α を求めることで評価する手法。

(実験 2) 換算鉄筋比による評価：RC 試験体の曲げ実験結果から、ひび割れ低減材の有無における同一応力時におけるひび割れ幅の差を、鉄筋比として換算して、換算鉄筋比を求めることでひび割れ幅低減効果を評価する手法。

2.2 コンクリートの配(調)合

表-1 にコンクリートの配(調)合を示す。コンクリートの水セメント比は 50.3%，細骨材率は 44.9%，粗骨材の最大寸法は 20mm とした。

配(調)合したコンクリートは $\Phi 100 \times H200\text{mm}$ のプラスチックモールドを用いて供試体を作製し、標準養生して材齢 28 日に圧縮試験に供した。強度は 38.0N/mm^2 ，ヤング係数は 22.1kN/mm^2 であった。

2.3 使用材料

図-1 に MB の形状を、表-2 にその寸法を示す。本実験で使用した穴あき鋼板の形状は、厚み 0.6mm の鋼板に直径 40mm の穴が空けてあり、表面に溶融亜鉛メッキを

表-1 コンクリートの配(調)合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		セメント C	水 W	細骨材 S1	細骨材 S2	粗骨材 G
50.3	44.9	328	165	562	242	1005

セメント (C) 普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm^3
 水 (W) 地下水
 細骨材 (S1) 陸砂 (茨城県つくば市産) 密度 2.69g/cm^3
 (S2) 砕砂 (茨城県行方市産) 密度 2.58g/cm^3
 粗骨材 (G) 碎石 (茨城県つくば市産) 密度 2.69g/cm^3
 混和剤 高性能 AE 減水剤標準形

*1 戸田建設 (株) 技術研究所 社会基盤再生部 工修 (正会員)

*2 戸田建設 (株) 技術研究所 構造技術部 工修 (正会員)

*3 戸田建設 (株) 技術研究所 社会基盤構築部 工博 (非会員)

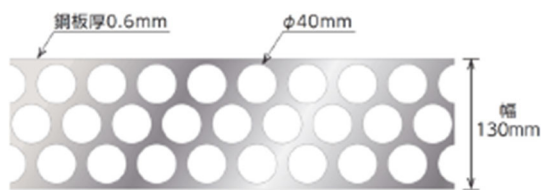


図-1 MB 形状

表-2 MB の寸法

材質	溶融亜鉛メッキ鋼板
厚み	0.6mm
幅	130
長さ	600mm
断面積	32.8mm ²

施すことで、高い耐食性を付与し防錆効果を高めたものである。この形状により、鋼材としての引張応力を負担しつつ、穴を通じてコンクリートとの一体性を確保することで、コンクリートに発生する引張応力を効率的に負担するとともに、ひび割れの発生した箇所では効果的にひび割れ幅を低減することが期待できる。実用上では MB を帯方向に連続して鉄筋に固定し、覆工コンクリートのインパート部などの拘束によるひび割れが懸念される箇所などに設置する。

3. (実験 1) ひび割れ抑制係数 α による評価実験

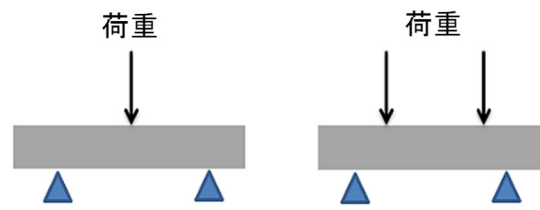
3.1 評価手法について

ひび割れ抑制係数 α による評価は、コンクリート用の連続繊維補強シートを用いたひび割れ抑制効果の評価検討に関する報告⁴⁾を参考として、RC 試験体を中央載荷法および 2 点載荷法の曲げ実験により実施した。

図-2 に載荷方法の模式図を示す。本手法では、中央載荷法の結果より算出されるひび割れ幅抑制効果を表す指標 W と、2 点載荷法の結果より算出されるひび割れ分散効果を表す指標 D を取得し、両者の比よりひび割れ抑制係数 α を求める。ひび割れ抑制係数 α は総ひび割れ幅をひび割れ本数で割ることで、ひび割れ低減材を用いた場合の無補強のコンクリートに対するひび割れ抑制効果を定量的に表すとされる。

式(1)にひび割れ幅低減効果を示す指標 W を、式(2)にひび割れ抑制効果を示す指標 D を、式(3)にひび割れ抑制係数 α を算出する式を示す。

本手法はコンクリートのひび割れ抑制効果をひび割れ幅およびひび割れ分散性を表す指標を用いて評価しており、実験的にその効果の定量化を試みたものである。



中央載荷法

2点載荷法

図-2 載荷方法の模式図

$$W = \frac{W_H}{W_{PL}} \quad (1)$$

ここに、 W : ひび割れ幅低減効果を表す指標

W_H : PL の RC 試験体に生じる曲げひび割れ幅

W_{PL} : MB を埋設した RC 試験体に生じる曲げひび割れ幅

$$D = \frac{D_H}{D_{PL}} \quad (2)$$

ここに、 D : ひび割れ分散効果を表す指標

D_H : PL の RC 試験体の荷重-変位曲線における鉄筋降伏荷重までの積分値

D_{PL} : MB を埋設した RC 試験体の荷重-変位曲線における鉄筋降伏荷重までの積分値

$$\alpha = \frac{W}{D} \quad (3)$$

ここに、 α : ひび割れ抑制係数

W : ひび割れ幅低減効果を表す指標

D : ひび割れ分散効果を表す指標

表-3 試験水準

No.	鉄筋種類 (SD345)	鉄筋断面積 (mm ² /本)	鉄筋比 ρ (%)	MB (枚)
1	D6	31.7	0.51	0
2				1
3	D10	71.3	1.18	0
4				1
5	D13	126.7	2.16	0
6				1

3.2 試験水準

表-3 に試験水準を示す。鉄筋は、SD345 の D6、D10、D13 のいずれかを使用した。各鉄筋条件に対し、MB を用いた場合および無補強のもの(以下、PL と表す)の場合にて、各載荷方法につき 3 本ずつ RC 試験体を作製した。

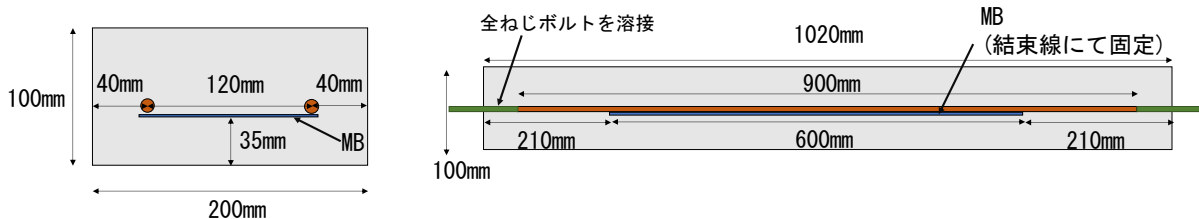


図-3 RC 試験体断面図

3.3 RC 試験体の作製

図-3 に RC 試験体断面図を示す。RC 試験体は高さ 100mm 幅 200mm 長さ 1020mm とした。MB は RC 試験体表面から深さ 35mm 部に配置されるよう鉄筋に敷設し、結束線で固定した。

中央載荷法に供する RC 試験体では、中央にはひび割れが分散して生じることを防ぐため、7mm の切り欠きを設けた。

2 点載荷法に供する RC 試験体では、等曲げモーメント区間を 200mm とし、配置した鉄筋の載荷点および鉄筋中央の 3 か所にひずみゲージを貼り付け、鉄筋に発生するひずみを確認しながら載荷した。

写真-1 に MB を鉄筋に配置した状況を示す。

3.4 曲げ実験

図-4 に曲げ実験に用いた治具の概要を示す。治具と RC 試験体との接触部には $\phi 30\text{mm}$ の丸鋼を挟んで、幅 30mm の鋼製プレートをあてて載荷するよう設計した。

曲げ実験の載荷速度は、ひび割れが発生するまで実験機のロードセル指示値の増加量が $0.04 \pm 0.02 \text{ kN/s}$ となるよう調整し、ひび割れ発生後は実験機のスローク位置表示値の増加量が 0.004 mm/s となるよう操作した。

RC 試験体中央のたわみ量を測定するため、接触型変位計を用いた。

中央載荷法の際のひび割れ幅は、RC 試験体中央にゲージ長 100mm の π 型変位計を設置して測定した。

2 点載荷法の等曲げモーメント区間は 200mm とした。

3.5 実験結果

(1) 曲げ荷重とひび割れ幅の関係

図-5 に中央載荷法による曲げ荷重とひび割れ幅の関係を示す。MB を用いた RC 試験体は、PL に対して、ひび発生以降における同一ひび割れ幅での荷重が高くなる傾向が確認でき、発生したひび割れの幅を抑制することが確認できた。

(2) ひび割れ幅低減効果を示す指標 W

ひび割れ幅低減効果を示す指標 W は、PL および MB

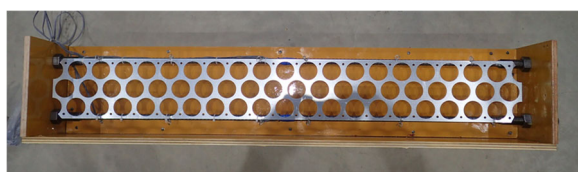


写真-1 MB を鉄筋に配置した状況

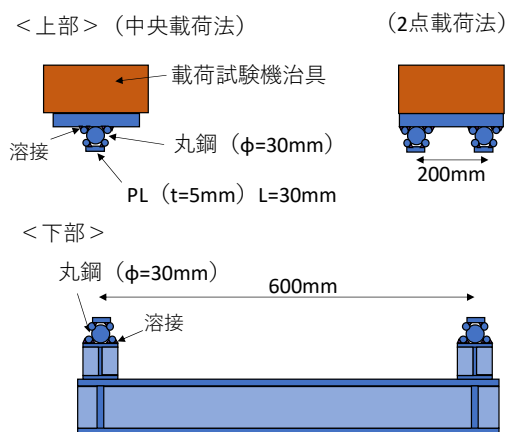


図-4 曲げ実験に用いた治具の概要

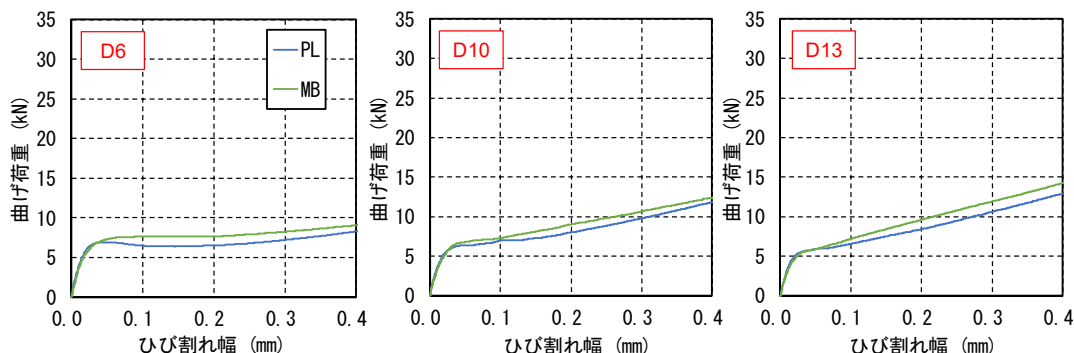


図-5 中央載荷法による曲げ荷重とひび割れ幅の関係

を用いた RC 試験体のひび割れ幅の測定データにおいて、ひび割れ発生時点からその 2 倍の荷重までの計測点に対し算出して求め、それら全てを平均した。

表-4 にひび割れ幅低減効果を表す指標 W を示す。

鉄筋比の増大に伴い、ひび割れ幅低減効果を表す指標 W が増大する傾向が確認され、鉄筋比が小さいほど MB を用いることによるひび割れ幅低減効果が増大することが確認できた。

(3) ひび割れ分散効果を表す指標 D

荷重－変位曲線における最大荷重までの積分値と等曲げモーメント区間に生じたひび割れ本数の間には、相関関係があるとされ⁹⁾、杉野らにより、補強材なしの RC 試験体およびひび割れ低減材を埋設した RC 試験体の荷重－変位曲線における鉄筋降伏となる荷重までの積分値の比が、ひび割れの分散性を評価する指標となり得る⁹⁾と報告されている。

本研究では、これらの手法を参考として、荷重－変位曲線における鉄筋降伏となる荷重までの積分値を算出し、ひび割れ分散効果を表す指標 D を求めた。

表-5 にひび割れ分散効果を表す指標 D を示す。ひび割れ分散効果を表す指標 D は鉄筋比の一番低い D6 の鉄筋を用いた RC 試験体にて、他の鉄筋を用いた場合よりも高い数値となった。これは、D6 の鉄筋が降伏に到達しやすく、ひび割れ発生後の鉄筋ひずみがばらつくことに起因していると考えられる⁹⁾。

一方で、本実験で実施した D10 および D13 の鉄筋を用いた RC 試験体では、ひび割れ分散を表す指標に大きな差は確認されなかった。これらは、2 点荷法法の治具や RC 試験体の作成精度を向上させることで、等曲げモーメント区間にかかる荷重が均一となり、測定精度が向上する可能性がある。

(4) ひび割れ抑制係数 α

表-6 にひび割れ抑制係数 α を示す。いずれの条件においても、ひび割れ抑制係数 α は 1 を下回り、MB を用いることで、RC のひび割れ抑制効果を発揮することが確認できた。

3.6 ひび割れ抑制係数 α による評価手法に関する考察

図-6 にひび割れ低減材/鉄筋比とひび割れ抑制係数 α の関係を示す。ここで、ひび割れ低減材/鉄筋比とは、MB と鉄筋の断面積比である。

既往の報告では、ひび割れ低減材/鉄筋比が大きくなると、ひび割れ幅低減効果を表す指標 W が小さくなり、ひび割れ幅の低減効果が大きくなるとされる。また、ひび割れ分散効果を表す指標 D に関しても、ひび割れ低減材/鉄筋比の増大に伴い大きくなり、ひび割れの分散効果は大きくなる。したがって、MB の断面積比が増加、あるいは鉄筋量が減少するほど、ひび割れ低減材のひび割

表-4 ひび割れ低減効果を示す指標 W

鉄筋	鉄筋比 p (%)	ひび割れ幅低減指標 W
D6	0.51	0.63
D10	1.18	0.84
D13	2.16	0.88

表-5 ひび割れ分散効果を表す指標 D

鉄筋	鉄筋比 p (%)	No.	鉄筋降伏荷重 (kN)	鉄筋降伏荷重までの積分値	ひび割れ分散指標 D
D6	0.51	1	9.61	19.75	2.80
		2	11.06	55.34	
D10	1.18	3	19.59	42.20	1.12
		4	20.89	47.25	
D13	2.16	5	30.30	98.76	1.17
		6	32.35	115.43	

表-6 ひび割れ抑制係数 α

鉄筋	ひび割れ低減材/鉄筋面積比 (%)	ひび割れ抑制係数 α
D6	51.7	0.23
D10	23.0	0.75
D13	12.9	0.75

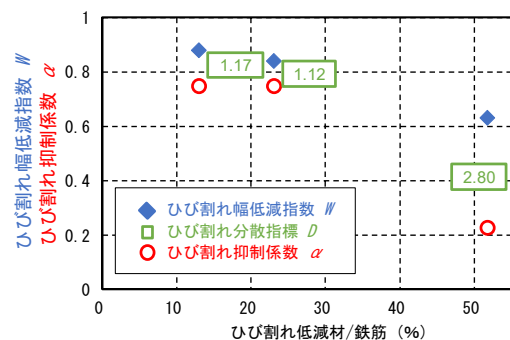


図-6 ひび割れ低減材/鉄筋比とひび割れ抑制係数 α の関係

れ幅低減効果、ひび割れ分散効果が共に大きくなる。このため、双方の影響を受け、ひび割れ抑制効果が大きくなるとされており、本実験でも同様の結果となることが確認できた。

4. (実験 2) 換算鉄筋比による評価実験

4.1 評価手法について

換算鉄筋比による評価は、MB を埋設したことで低減し

たひび割れ幅を、鉄筋比へと換算し、その効果を簡易かつ定量的に示すことを目的として検証した。

鉄筋比への換算には、コンクリート標準示方書⁶⁾に記載の、初期ひび割れ幅の照査の際に用いる最大ひび割れ幅を求める式(4)を用いた。これはコンクリートの外部拘束が卓越し、内部拘束、乾燥の影響を受けた壁構造モデルの実験結果を元にして、三次元有限要素解析により最大ひび割れ幅と鉄筋比および最小ひび割れ指数の関係を示したものであり、セメントの水和に起因する初期ひび割れ幅の照査に用いられる。この式は、温度応力による初期ひび割れに対して提案されているが、ひび割れ低減材の評価にあたり、鉄筋比という直感的な数値として表現する試みを目的として実験的に採用した。

ひび割れ低減材を用いる効果を、換算鉄筋比として表すことは、RC 構造物の設計の観点からも直感的に認識することが可能となり、また、異なる種類のひび割れ低減材を評価する場合にも同様の手法を採用することで、材料同士の比較が容易となることが期待できる。

4.2 試験水準

表-7 に試験水準を示す。鉄筋は、SD345 の D10、D16 のいずれかを使用した。各水準に対して RC 試験体を各 3 本ずつ作製し、載荷実験に供した。

4.3 RC 試験体の作成および曲げ実験

図-7 に RC 試験体断面図を示す。RC 試験体は鉄筋比が所定の範囲となるよう、高さ 180mm 幅 250mm 長さ 1000mm とし、かぶり厚さは 35mm とした。用いた鉄筋は、載荷範囲外の寸法にて両端部をフック状に加工したものをを用いた。

MB の鉄筋への固定や、ひび割れが分散防止の切り欠き等は前項と同様の対処とした。

曲げ実験に用いる治具や変位計は前項と同一のものをを用いた。

4.4 実験結果

図-8 に中央載荷法による曲げ応力度とひび割れ幅の関係を示す。MB を用いた RC 試験体では、前項同様に曲げ応力度が大きくなり、その傾向は、D10 または D16

の鉄筋を用いたいずれの RC 試験体の場合も同様となり、MB がひび割れ発生後のひび割れ幅の増加を抑制していることを確認できた。

4.5 換算鉄筋比の算出

各ひび割れ幅における測定値を抽出して、式(4)に基づき、結果を整理した。

表-8 に換算鉄筋比の算出結果を示す。初期ひび割れ幅の最大値である w_c は 0.1~0.4mm の範囲で 0.1 刻みに設定し、鉄筋比を PL の RC 試験体の設計値として各 I_{cr} を算出した。PL の RC 試験体における各ひび割れ幅に到達した際の曲げ応力度を求め、MB を用いた RC 試験体で同一となる応力度におけるひび割れ幅 w' を抽出し、換算鉄筋比を求めた。

$$w_c = \gamma_a \left(\frac{-0.18}{p} + 0.12 \right) \times (I_{cr} - 1.54) \quad (4)$$

ここに、 w_c : 最大ひび割れ幅 (mm)

p : 鉄筋比 (適用範囲 : 0.25%~0.9%)

γ_a : 安全係数 (1.0)

I_{cr} : 最小ひび割れ指数

表-7 試験水準

No.	鉄筋種類 (SD345)	鉄筋断面積 (mm ² /本)	鉄筋比 p (%)	MB (枚)
7	D10	71.3	0.32	0
8				1
9	D16	198.6	0.88	0
10				1

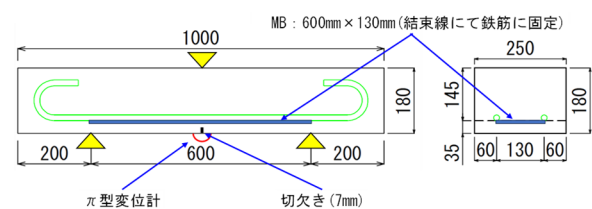


図-7 RC 試験体断面図

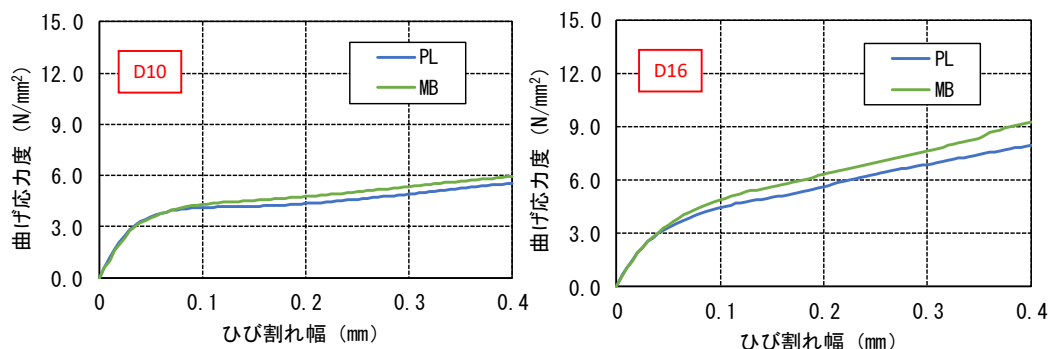


図-8 中央載荷法による曲げ応力度とひび割れ幅の関係

表-8 換算鉄筋比の算出結果

A	B	C	D	E	F	G
鉄筋比 ρ (%)	PL 試験体の ひび割れ幅 w_c (mm)	想定 最小ひび割れ指数 I_{cr}	B ひび割れ幅 (w_c) 時 の MB 有試験体の 曲げ応力度 (N/mm^2)	D 時の MB 有試験 体のひび割れ幅 w' (mm)	C, D, E より 求めた 換算鉄筋比 ρ' (%)	ひび割れ幅 低減効果 ($F-A$) $\rho' - \rho$ (%)
0.32	0.1, 0.2, 0.3, 0.4	0.975*	4.752*	0.189*	0.408*	0.088*
0.88	0.1	0.357	4.556	0.085	0.938	0.058

※：各 w_c における算出値の平均

D16 の鉄筋を用いた RC 試験体における w_c の 0.2～0.4mm では、想定最小ひび割れ指数が負の値を示したため、検討から除いた。

図-9 に MB を用いた RC 試験体の設計鉄筋比と換算鉄筋比の関係を示す。算出結果より、鉄筋コンクリートへの MB の適用による効果は、設計鉄筋比に対して D10 の鉄筋を用いた RC 試験体で平均 +0.088%，D16 の鉄筋を用いた RC 試験体で+0.058%で程度となり、ひび割れ幅の低減効果を定量的に表せることを確認した。

4.6 換算鉄筋比による評価手法に関する考察

本実験では D10 および D16 の鉄筋を用いて鉄筋比が 0.32～0.88% の範囲で検討したが、D16 の鉄筋を用いた RC 試験体では、鉄筋比が増大したことで、最小ひび割れ指数が負の値となり、通常の鉄筋コンクリートで想定されない状況でのひび割れとして算出されることとなった。このため、ひび割れ低減材による効果を鉄筋比への換算に用いるには、係数の設定など計算手法の検討が必要であると考えられる。一方で、得られた換算鉄筋比においては、MB によるひび割れ幅低減効果を示すことができおり、簡易な手法として、ひび割れ低減材の適用効果や評価できる可能性を示すと考える。

5. まとめ

MB を用いた RC 試験体の曲げ載荷実験によって得られた知見を以下に示す。

- (1) ひび割れ抑制効果を表す指標 α を用いた評価実験では、MB を用いた RC 試験体にてひび割れ幅低減効果を示せることを確認した。
- (2) MB を用いた RC 試験体のひび割れ幅低減効果を鉄筋比に換算する手法では、MB によるひび割れ幅低減効果を示すことができた。
- (3) 換算鉄筋比による評価手法は、MB のようなひび割れ低減材のひび割れ幅低減効果を簡易に評価できる可能性がある。

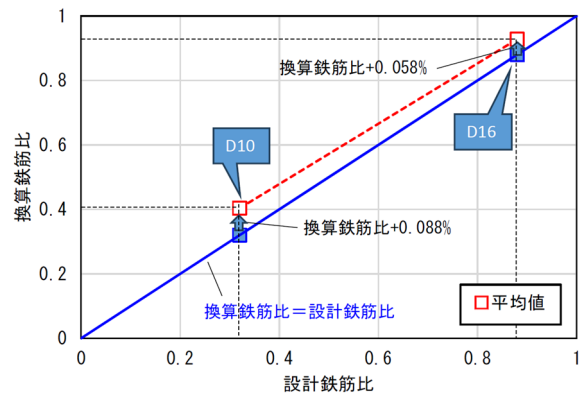


図-9 MB を用いた RC 試験体の設計鉄筋比と換算鉄筋比の関係

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針・同解説第2版，2023.2
- 2) 関根一郎，浅野均，田中徹：穴あき帯状鋼板によるコンクリートのひび割れ抑制効果について，土木学会第 69 回年次学術講演会，VI-328，2014.8
- 3) 関根一郎，山田勉，田中徹，山火智洋：穴あき鋼板によるひび割れ抑制材料の特性実験と覆工コンクリートへの適用について，土木学会第 72 回年次学術講演会，VI-836，2017.8
- 4) 杉野雄亮，竹下永造，郭度連：耐アルカリ性ガラス繊維ネットのひび割れ抑制効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1847-1853，2010
- 5) 国枝稔，森川秀人，山下賢司，六郷恵哲：複数ひび割れを生じる高靱性セメント複合材料のひび割れ分散性の評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.1，pp.285-290，2004
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，標準:6 編 2 章，p.334，2023.3