

論文 1 液型無溶剤エポキシ樹脂プライマーを適用したコンクリートの腐食ひび割れ特性

奥野 喜久^{*1}・堀井 久一^{*2}・高谷 哲^{*3}・山本 貴士^{*4}

要旨：本研究では、はく落防止用シート補強工法の下地処理用プライマーとして、無溶剤でありながら従来の溶剤型と同程度に粘度を低くしコンクリートへの含浸性を向上させ、かつ1液型とすることで施工性を高めた「1液型無溶剤エポキシ樹脂」プライマーを適用した既存部コンクリートの強度改善効果を、鉄筋腐食膨張圧シミュレーション装置を用いて明らかにした。その結果、かぶり面に骨材集中が起こっていなければ、プライマーの適用によって、軸方向ひび割れが発生するまでに必要な膨張圧が増加し軸方向ひび割れ進展に対する抵抗性が高まるとともに、はく離に至るまでの靱性に改善効果が得られることがわかった。

キーワード：1液型無溶剤エポキシ樹脂プライマー、鉄筋腐食、膨張圧、腐食ひび割れ、はく離

1. はじめに

塩化物による鉄筋腐食では、コンクリート表面にひび割れが生じ、ひび割れの形態によっては、かぶり部分のコンクリート片のはく落が生じて第三者被害が生じる危険性がある。はく落による被害を防ぐために、表面保護工法¹⁾の一つとして、連続繊維シートを補強材として用いるシート工法¹⁾が適用されることがある。

補強も含めたシート工法では、シートの引張強度をできるだけ活かすために、一般には、接着面となるコンクリート表面のレイタンス層を除去するケレン作業を要している¹⁾。同様に、接着面のコンクリート面の強度が劣化等によって低下している部材では、この部分の強度改善が必要であると考えられる。しかし、このケレン作業では、騒音や粉塵が問題となることも多い。これに対し、接着面の下地処理となるプライマー塗布によってコンクリート表面の強度改善が期待できる可能性がある。

本研究では、下地処理用のプライマーとして、無溶剤でありながら従来の溶剤型と同程度に粘度を低くし、コンクリートへの含浸性を向上させてケレン作業を不要とする工期短縮可能性を付与し、かつ1液型とすることで施工性を高めた「1液型無溶剤エポキシ樹脂」プライマー（以下、1液型）に着目した。このプライマーを鉄筋腐食に代表されるかぶりのはく落防止対策に適用することを想定した場合、強度改善効果により腐食膨張圧にともなうひび割れへの抵抗性が向上するとともに、はく落防止シートの機械的性質や目付量（補強量）をより低減できる可能性がある。あるいは、プライマー樹脂の含浸のみで腐食ひび割れにある程度まで抵抗できる時間的余裕が生まれるならば、シートの貼り付けは劣化進

行の経過を把握しつつ判断するという新たな補修戦略もまた可能となる。その結果、補強後に既存部材の目視点検が困難になるといった一般的なシート補強の問題点の軽減につながる可能性も生まれる。

そこで本研究では、鉄筋腐食膨張圧シミュレーション装置²⁾を用いて、1液型によるかぶりコンクリートの強度改善が腐食ひび割れの発生、進展に対する抵抗性に与える影響を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体の形状・寸法を図-1に示す。供試体は、150mm×400mm×400mmの角柱供試体とし、鉄道高架橋床版の配筋を参考として、異形鉄筋D19を150mmピッチで直交配筋した。なお、鉛直方向中央のみコンクリート打込

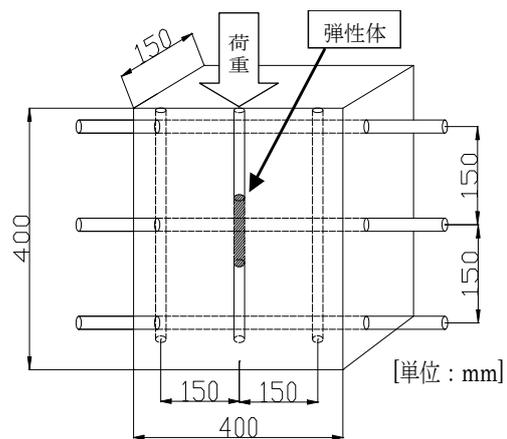


図 - 1 供試体概要

*1 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 修士課程 (正会員)

*2 コニシ (株) 浦和研究所研究開発第四部第一グループ 主任研究員 (非会員)

*3 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 助教 博士 (工学) (正会員)

*4 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

み時に円筒空洞を確保しており、載荷時に腐食鉄筋の膨張圧を模擬するための長さ 100mm のシリコンゴム製弾性体（弾性係数 $E=1.39\text{N/mm}^2$ ，ポアソン比 $\nu=0.49$ ）を挿入した。供試体は、2.2 に示す各要因ごとに 2 体ずつ作製した。

2.2 実験要因

(1) コンクリートの水セメント比 (W/C)

コンクリートの配合を表-1 に示す。W/C は、ブリーディング等によって強度が不十分である状況を想定した 60%，80%とした。このうち、60%のものでは、膨張材をセメント内割 30%で置換する配合（以下、W/C=60+E）を設け、図-2 に示すように 2 層に分けて打込みを行うことでかぶり部分に自由膨張にともなうひび割れを発生させ、かぶりの強度低下を模擬した。

(2) かぶり(c)

かぶりは、既往の研究^{2)~3)}を参考に、はく離破壊が生じやすいとされる 10mm と 30mm とした。このとき、かぶりと鉄筋径 (D19)の比は、それぞれ 0.53, 1.58 となる。

(3) プライマーの種類

本研究で対象とする 1 液型、従来のシート補強工法で用いられる 2 液型のエポキシ樹脂プライマー（以下、2

液型）と無塗布の 3 種類とした。プライマーの機械的性質を表-2 に示す。1 液型の施工では、含浸効果による母材表面のケレン作業を不要とする省力化も期待しており、ケレン作業は 2 液型でのみ行った。ケレン作業は、研磨紙(#60)をディスクグラインダーに取り付け行った。

2.3 実験方法および測定項目

鉄筋腐食膨張圧シミュレーション装置を図-3 に示す。載荷は、図-1 のシリコンゴム部分に鉛直下向きの変位を 0.01mm/s で与え、0.2mm 変化するごとに鉛直変位、荷重を計測した。ひび割れ性状を目視観察するとともに、軸方向ひび割れの確認用にコンクリート表面のひずみも計測した。さらに、載荷終了後のはく離片を用いてプライマーの含浸深さを測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 含浸深さ

載荷終了後に生じたはく離片を目視観察したところ、外縁部に 1 液型が含浸した跡がみられた。そこで、はく離片の外縁部のうち骨材の影響が少ない部分を 5 点選定し、ノギスで含浸深さの測定を行った。その結果を図-4 に示す。含浸深さは、W/C=60%<80%<60+E の順に大

表-1 コンクリートの配合

組骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和材(kg/m ³)
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	膨張剤 E	
15	3±0.5	60	4	50.5	179	298	897	900	0	743
15	6±2	80	4	50.5	185	231	981	921	0	576
15	12±2	60+E	4	50.5	179	209	897	896	89	743

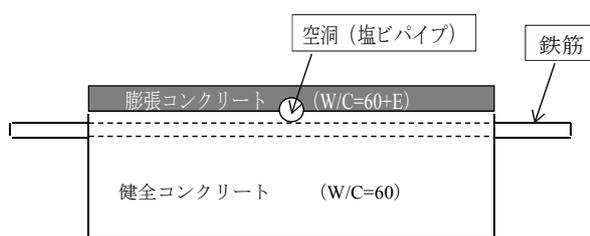


図-2 劣化模擬供試体の概要

表-2 プライマーの機械的性質

プライマー	粘度 (mPa・s)
1 液型	150±100 (23℃)
2 液型	500 (20℃)
水 (参考)	0.89 (25℃)

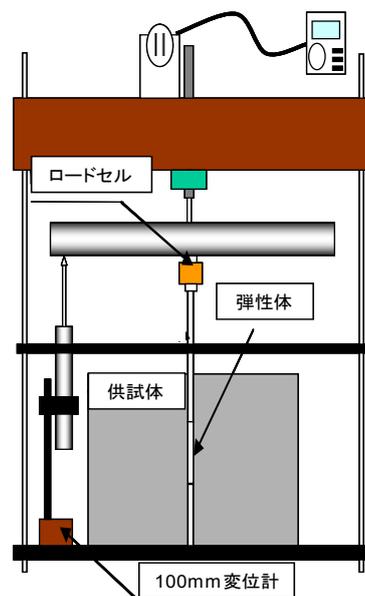


図-3 鉄筋腐食膨張圧シミュレーション装置

きくなり、含浸しやすい場合で約 1mm 程度であった。W/C=60+E では、コンクリート表面の自由膨張により微細なひび割れが発生していたため、含浸しやすかったものと考えられる。また、W/C=80%では、コンクリートの材料分離やブリーディングが W/C=60%よりも大きく、打込み時に底面側となったかぶり面側に骨材が集中していた可能性が高い。そのため、含浸しやすさの程度が場所ごとに大きく相違し、含浸深さに大きなばらつきが生じたものと考えられる。

3.2 破壊性状

(1) ひび割れ性状

最初に肉眼でひび割れが確認されたのは円柱空洞直上の軸方向ひび割れであった。その後のひび割れの進展から破壊形態を、以下の 2 種類に分類した。破壊形態の例を図-5～図-7 に示す。

(a) はく離破壊

軸方向ひび割れ発生・進展後、はく落を引き起こすはく離ひび割れが発生する破壊形態。

(b) 非はく離破壊

軸方向ひび割れは発生・進展するが、明確なはく離片をとまなうはく離が生じない破壊形態。隣接する鉄筋のあき方向へのひび割れが発生しているものもあり、実床版部材では大きな面積に至るはく離を起こす可能性のあるひび割れ形態である。

表-3 に破壊形態の一覧を示す。かぶり $c=30\text{mm}$ に着

目してみると、W/C=60%の 1 液型、2 液型、W/C=80%の無塗布で各 1 体、非はく離破壊がみられる。W/C=60+E ではすべてが非はく離破壊となっている。今回膨張材の利用による表面の劣化を試み、表面では自由膨張に伴う微細なひび割れが発生した一方で、円柱空洞周辺のコンクリートには、直交する鉄筋の膨張ひずみ拘束効果によって、圧縮力が導入され、供試体表面に向かうはく離ひび割れが進展しにくかったと考えられる。

(2) はく離性状・はく離表面積

1 液型で(a)のはく離破壊を生じた供試体のはく離片の外観観察を行ったところ、はく離片の外縁部には 1 液型が含浸した跡がみられ、その部分は約 1mm 程度の薄い層になっていた。弾性体側から見た 1 液型のはく離片のトレース例を図-8 に示す。斜線部が含浸層にあたる部分である。これは、1 液型が含浸したことによって、含浸層の強度が大きくなり、弾性体から進展してきたはく離ひび割れが含浸層に達した時点でその方向を変化させ、含浸層に対して平行に進展したと考えられる。なお、無塗布と 2 液型にはそのような部分はみられなかった。

次に、各要因のはく離表面積の平均値を図-9 に示す。1 液型、2 液型とも無塗布のものより概ねはく離表面積が大きかった。1 液型、2 液型とも強度の異なった層が存在することにより、ひび割れ角度に変化が生じ、ひび割れ経路が変化したと考えられる。また、かぶりが大きいほどプライマー塗布の影響が大きいようである。かぶ

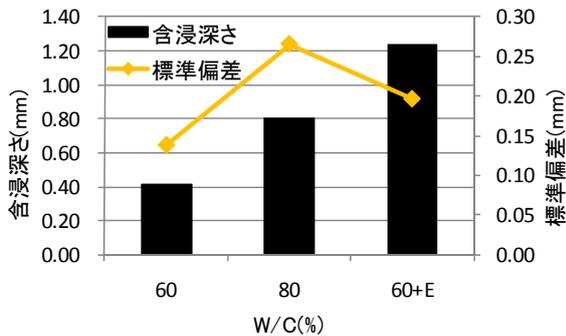


図-4 1 液型の含浸深さと標準偏差

表-3 破壊形態一覧

W/C (%)	c (mm)	プライマーの種類					
		無塗布		1 液型		2 液型	
60	10	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)
	30	(a)	(a)	(b)	(a)	(a)	(b)
80	10	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)
	30	(b)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)
60+E	10	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)
	30	(b)	(b)	(b)	(b)	(b)	(b)

(注) (a)…はく離破壊, (b)…非はく離破壊

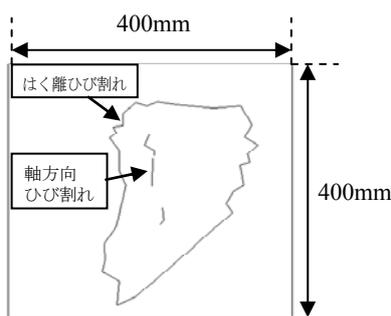


図-5 はく離破壊の例

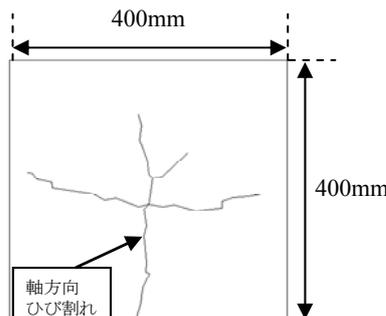


図-6 非はく離破壊の例①

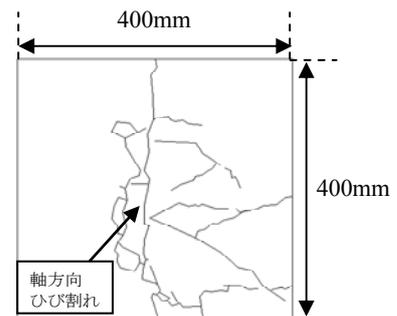


図-7 非はく離破壊の例②

りが大きいほどひび割れ角度が大きくなる, すなわちコンクリート表面に対して平行に近くなることが報告⁴⁾されているが, かぶりが大きく, はく離ひび割れが強度変化層となる表面部分に浅い角度で達した方が, ひび割れ角度が大きく変化したものと考えられる。

はく離表面積が大きくなることは, 第三者被害を考えた場合, 大きなはく離片をとまなう被害の拡大が懸念されるため, はく離に至るまでプライマー塗布のみで補修戦略を立てることは望ましくない。しかし, 1液型は淡黄色透明であり, シート補強工法を念頭に置いたプライマーとして, 軸方向のひび割れを確認するまで, 1液型のみ塗布した状況で劣化進行の経過を把握しつつ, シートの貼付けを判断するという補修戦略をとれる可能性がある。

3.3 最大内圧

測定した鉛直変位 dL , 荷重 P は, 以下の式 (1), (2) を用いて半径変化量 dr や内圧 p に換算した。また, 内圧が最大となる時点は, 実験結果から軸方向ひび割れ発生時とほぼ同時とみなせたことから, コンクリート表面が引張強度に達した時点と軸方向ひび割れ発生時と考え, 厚肉円筒弾性理論を用いて無塗布における理論最大内圧 (以下, 理論値) p' を, 以下の式 (3) で算出した。

$$dr = \frac{v \cdot dL \cdot a}{100} \quad (1)$$

$$p = \frac{vE}{v-1} \left(\frac{dL}{100} - \frac{P}{Ea^2\pi} \right) \quad (2)$$

$$p' = \frac{(b^2 - a^2)}{2a^2} \sigma_c \quad (3)$$

ここで, E :弾性体の弾性係数, v :弾性体のポアソン比, L_0 :弾性体の元長さ, a :弾性体の元半径, b :弾性体の元半径+かぶり, σ_c :コンクリートの引張強度である。

各要因の最大内圧を図-10に示す。プライマー無塗布の場合の理論値は, コンクリート強度に応じて低下する。これに対し, 無塗布の実験値かぶり 10mm では, W/C=60%よりも80%の方が, 最大内圧が若干大きくなった。粗骨材の最大寸法 15mm に対してかぶり 10mm であったため, かぶりに粗骨材が存在するか否かが, 最大内圧の大小に影響したと考えられる。一方, 無塗布よりもプライマーを塗布したもので最大内圧が同程度かあるいは大きくなる傾向にあり, かぶり内の粗骨材の存在状態にもよるが, 腐食ひび割れ発生への抵抗に寄与したと考えられる。

無塗布の実験値かぶり 30mm でも, W/Cの大きなもので最大内圧が大きくなった。W/C=80%では, コンクリート

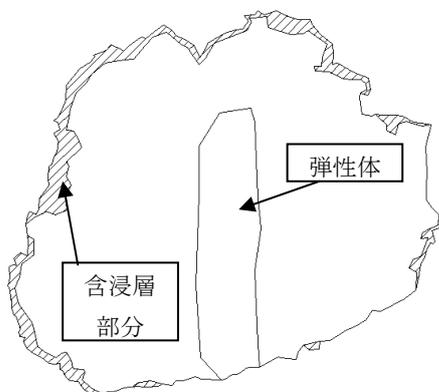


図 - 8 1液型のはく離片のトレース例 (1液型 - c10)

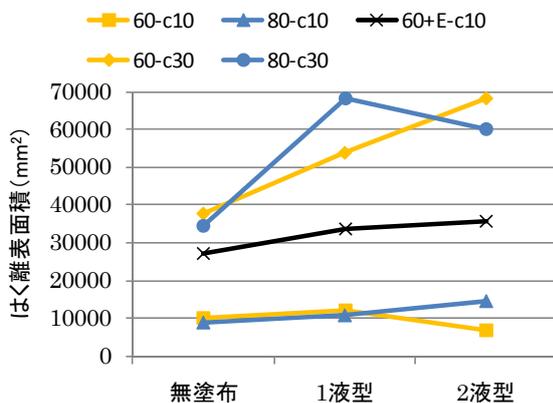
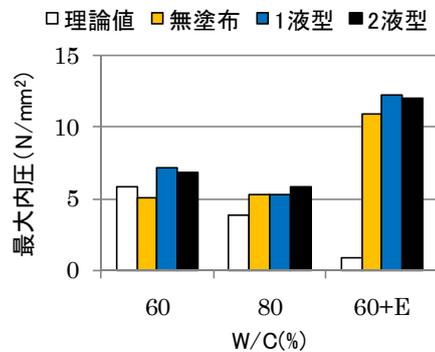
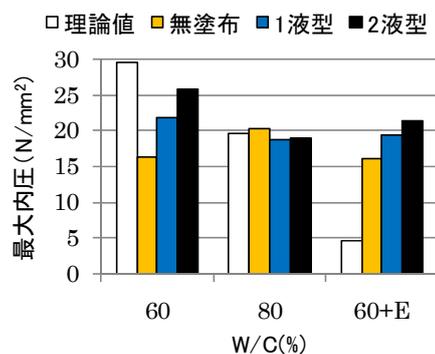


図 - 9 はく離表面積



(a) かぶり 10mm の場合



(b) かぶり 30mm の場合

図 - 10 最大内圧

トの材料分離やブリーディングによるかぶり面側へ骨材集中によって、円柱空洞からのひび割れ進展に対する抵抗性が高まったものと考えられる。一方、W/C=60%では、無塗布よりもプライマーを塗布したもので最大内圧が大きくなる傾向にあり、プライマーの塗布により、腐食ひび割れ発生への抵抗性が高まったといえる。しかし、W/C=80%では、塗布の有無による差がみられない。先述したかぶり面側へ骨材集中によるひび割れ進展に対する抵抗性が増大した影響が支配的で、表面の強度による最大内圧の差が見られなかったものと考えられる。なお、今回の結果のみでは、1液型と2液型の明確な差は判断できなかった。したがって、ひび割れ進展に大きな影響が表れると考えられるかぶり面への骨材集中が生じるような場合には、プライマー塗布の効果が見られないといえる。しかし、そのような骨材集中が起こっていないければ、含侵の有無に係らず、表面のわずかな層の強度増加により軸方向ひび割れ発生に対する抵抗が大きくなる可能性が見られた。

膨張材により表面の劣化を試みた W/C=60+E では、無塗布の最大内圧が、W/C=60%と同程度以上になっている。供試体表面では自由膨張にともなう微細なひび割れが発生し、1液型の含浸深さが大きくなった一方で、はく離ひび割れの起点となる円筒空洞周辺では、膨張材を添加したかぶりの膨張ひずみを拘束する直交鉄筋の効果により圧縮力が導入され、ひび割れの進展に対する抵抗性が大きくなったと考えられる。一方で、W/C=60%と同様に、1液型と2液型の明確な差は判断できないものの、無塗布よりもプライマーを塗布したもので最大内圧が大きくなる傾向がみられた。

3.4 ひび割れ進展エネルギー

荷重と鉛直変位の関係、内圧と半径変化量の関係から、ひび割れの進展に使われるエネルギー U_s ($=U-U_E-U_C$) を算出した²⁾。ここで U : 全エネルギー、 U_E : 弾性体に蓄えられるエネルギー、 U_C : コンクリートに蓄えられるエネルギー、である。はく離に対する抵抗性、すなわちじん性の大小は、ひび割れの進展に必要なとされるエネルギーの大きさを判断できるため、このエネルギーを用いてプライマーの効果を検討した。

軸方向ひび割れ発生時と終局時（はく離時）のひび割れ進展エネルギーの値の一例を図-11に示す。なお、3.3で述べたように、かぶり10mmでは粗骨材の配置の影響が大きいと考えられたため、ここでは、かぶり30mmの各要因2体の平均値を用いた。

軸方向ひび割れ発生時において、W/C=60%、80%では、ひび割れ進展エネルギーの値が無塗布よりもプライマーを塗布したもので若干大きい傾向にある。ただし、その差は微小であり、また1液型と2液型の明確な相違は

見出せない。このことから、プライマー塗布による軸方向ひび割れ発生に対する抵抗性は大きくなるものの、本実験で得られた1液型の含浸深さ程度である場合、2液型を表面に塗布した場合と大きな差はないといえる。一方、W/C=60+Eでは、軸方向ひび割れ発生時において、ひび割れ進展エネルギーが無塗布よりもプライマーを

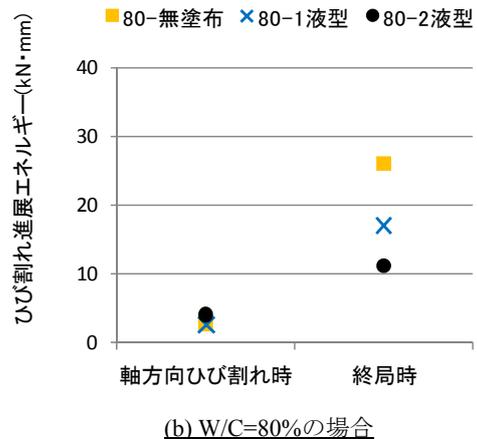
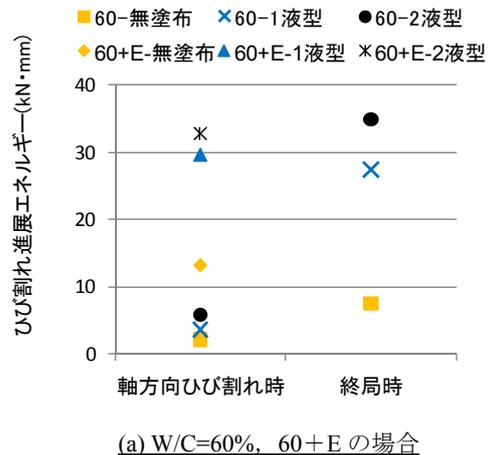


図 - 11 ひび割れ進展エネルギー

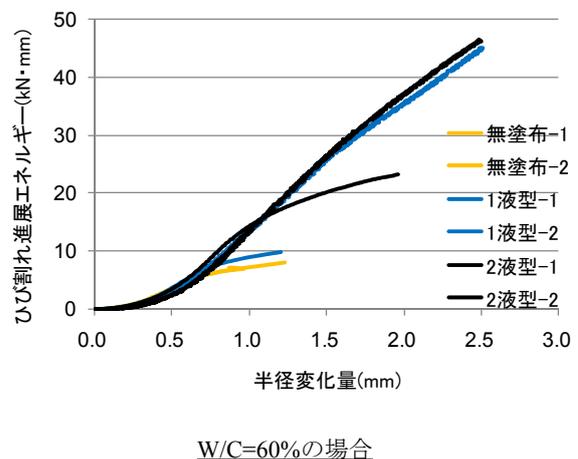


図 - 12 ひび割れ進展エネルギーの累積挙動

塗布したものの方が大きい。膨張材を添加したかぶりの膨張拘束にともなう円筒空洞周辺のひび割れ抵抗性の増大の影響を含むものと考えられる。

軸方向ひび割れ発生時に対して終局時のエネルギーでは、W/C=60%において無塗布よりもプライマーを塗布したものの方が大きい。プライマーの塗布によりはく離に至るまでのひび割れの進展に多くのエネルギーが必要となることが伺える。ただし、図-12のひび割れ進展エネルギーの累積挙動に示すように、軸方向ひび割れ発生までに比べて終局時のエネルギーにはばらつきが大きい。軸方向ひび割れは、その進展の方向がほぼ一定で表面に対して垂直の方向である。これに対し、はく離ひび割れは、W/C=60%、かぶり30mmの供試体で非はく離破壊の形態がみられているように、特にプライマー塗布による強度の変化層の存在により、その経路が敏感に変化し、最終的なエネルギー値にばらつきをもたらしたと考えられる。一方、W/C=80%では、これまで述べてきたように、骨材集中などの影響によって、無塗布のひび割れ進展エネルギーが大きく現れ、プライマーによる効果を確認することはできなかった。

以上のことから、プライマー塗布によって、はく離に至るまでの靱性に改善効果が得られる可能性がある。すなわち、無塗布と比べて軸方向ひび割れ後、はく離ひび割れの進展、発生に対して粘り強くなり、場合によっては、はく離を生じさせないことも可能である。しかし、今回の実験で得られた1液型の含浸深さ程度の場合、表面にのみ留まった2液型との相違は明確でなかった。

3.5 換算腐食減量

本実験に用いた弾性体の半径変化量は、腐食生成物の膨張によるみかけの断面増加量に相当する。そこで、式(4)(5)を用いて、半径変化量を腐食量を表す指標である軸方向ひび割れ発生時の腐食減量に換算した。

$$W_{\text{loss}} = \frac{\rho}{2r_0} (2\Delta r \cdot r_0 - \Delta r^2) \cdot 100 \quad (4)$$

$$\Delta r = r_0 - \sqrt{\frac{\gamma r_0^2 - (r_0 + dr_{\text{pmax}})^2}{\gamma - 1}} \quad (5)$$

ここで、 W_{loss} :換算腐食減量、 ρ :鉄の単位体積質量=7.85、 Δr :腐食による鉄筋断面半径減少量、 r_0 :初期鉄筋公称半径、 dr_{pmax} :最大内圧時の半径変化量、 γ :腐食膨張倍率=2.5である。

無塗布の腐食減量に対するプライマー塗布の腐食減量の比を表-4に示す。W/C=80%を除き、プライマーの効果により無塗布より1.1~1.6倍程度腐食減量が大きくなっている。すなわち、同一のかぶりと鉄筋径の系において腐食速度が同じである場合、軸方向ひび割れを発生させるための腐食量は、無塗布よりもプライマーを塗布

表-4 換算腐食減量の比

W/C (%)	かぶり (mm)	プライマー塗布の換算腐食減量 / 無塗布の換算腐食減量	
		1液型	2液型
60	10	1.45	1.26
	30	1.26	1.63
80	10	1.26	1.54
	30	0.91	0.92
60+E	10	1.27	1.13
	30	1.43	1.46

した場合の方が大きいといえる。

4. 結論

本研究で得られた主な結果をまとめて結論とする。

- (1)本実験で対象とした「1液型無溶剤エポキシ樹脂プライマー」をコンクリート表面に塗布した場合、含浸深さはW/C=60%<80%<60+Eの順に大きくなり、含浸しやすい場合で約1mm程度であった。
- (2)プライマーを塗布することで、はく離表面積は大きくなる傾向にあった。
- (3)かぶり面への骨材集中が起こっていなければ、プライマーを塗布することで、1液型と2液型の明確な差を判断することはできないものの、最大内圧・ひび割れ進展エネルギーが、無塗布と同等もしくは増加する傾向を示し、ひび割れ発生・進展に対する抵抗性が向上した。したがって、1液型は従来の2液型と同様に有効であり、ケレン作業を不要とする省力化が可能であることや施工性が高いことを考慮すると、従来型よりも工期削減が期待できると考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたっては、京都大学 宮川豊章教授、ならびにコニシ(株)若原直樹氏に多大なご協力、ご助言を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会:表面保護工法 設計施工指針(案), 2005.4
- 2) 高谷哲ら:コンクリート破壊エネルギー G_F 算出方法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, vol.27, pp163-168, 2005
- 3) Roger D Browne: Mechanisms of Corrosion of steel in Concrete in Relation to Design, Inspection, and Repair of Offshore and Coastal Structures, ACI SP65-11, 169-204, 1965
- 4) 堤知明ら:腐食ひび割れ発生機構に関する研究, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp159-166, 1996.2