

論 文

[1100] 樹脂含浸を行った人工軽量骨材コンクリートの過酷環境下における21年暴露試験

正会員 小林一輔 (東京大学生産技術研究所)
 正会員 ○ 星野富夫 (東京大学生産技術研究所)
 重吉 勝 (ショーボンド建設機技術研究所)

1. はじめに

コンクリートの表層部分にエポキシ樹脂を含浸させることによって耐薬品性や水密性を大巾に改善する方法は、1967年に村田と小林によって開発されているが〔1〕、本試験はこれを過酷な自然環境下において実証することを目的として実施したものである。人工軽量骨材コンクリートに樹脂含浸を主体とした防食処理を行った供試体を、酸性水と凍結融解の作用を受ける過酷環境下に21年間にわたり暴露した結果、その優れた耐久性が確かめられた。

2. エポキシ樹脂含浸によるコンクリートの耐水・耐食処理

コンクリート中にエポキシ樹脂を含浸させる場合にはつぎの2つの条件、すなわち 1) コンクリート表層部を乾燥状態に置くこと、2) エポキシ樹脂が揮発性の溶剤を含まず、また粘度はできる限り低いものであること、を満足させることが必要条件となる。これらの条件のうち1)

を満足させることは比較的容易であるが、2) の条件を満足させることは、常温において粘度の著しく小さい樹脂が容易に得られないため困難である。これを解決するために、常温において比較的粘度の小さい低分子量のエポキシ樹脂を選び、エポキシ樹脂の粘度が温度上昇にともない著しく減少する性質を利用して、エポキシ樹脂を加熱する方法を採用した。

すなわち、表-1に示すような常温において1200cps程度の粘度を有するエポキシ樹脂を90~100℃に加熱することによってその粘度を、40~60cps程度に引き下げて使用した(図-1参照)。一方、コンクリートも含浸の際エポキシ樹脂が冷却して粘度が増大することを防ぐため、ほぼ同じ温度に加熱乾燥しておき樹脂を含浸させた。含浸させたコンクリートは、その温度が室温近くまで冷却されたのちに取り出して表面に付着している樹脂を拭き取り、第2段階の処理すなわち塗布を行った。

この含浸処理によってコンクリート中に浸透するエポキシ樹脂の量は、コンクリートの配合、材令、使用する骨材などによって多少の差があるが、約0.7~1.2 ℓ/m²程度である。含浸

表-1 使用したエポキシ基材の組成

エポキシ樹脂 エポキシ当量 175~210 平均分子量 350~400 比重 1.17	100
反応性希釈剤 モノエポキシ希釈剤	10
可撓性付与剤 アルコール系	5.5

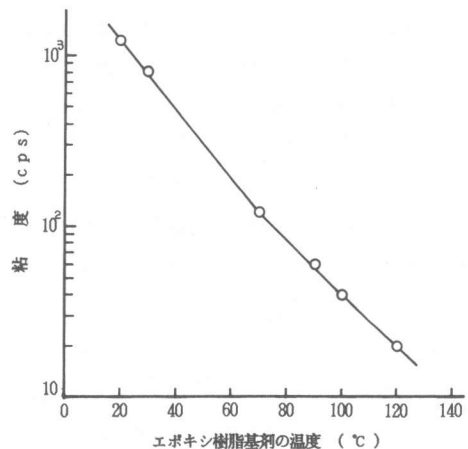


図-1 エポキシ樹脂基剤の温度と粘度との関係 (Brookfield 粘度計)

処理後の塗布には、含浸に用いたエポキシ樹脂（主剤）に硬化剤（表-2参照）を添加したものを、常温で硬化させた。

以上のような処理を行ったコンクリートが極めて優れた耐食性、耐候性ならびに高水圧に対する水密性を有することは既に室内実験を通じて確認している〔2〕。

3. 暴露用試験体

3.1 概要

暴露試験に適用した試験体は6×60×200cmの鉄筋コンクリート版と10×10×40cmの角柱試験体であって、暴露試験場への搬入を考慮して、いずれも人工軽量骨材コンクリートを使用した。

本報告では、後で述べるように鉄筋コンクリート版に関しては、耐久性の評価を行うことが困難であったので、角柱試験体による結果のみを取りまとめて報告する。

エポキシ樹脂による防食処理の種類は次の4種とした。

- a) 含浸処理：硬化剤を含まない主剤のみを含浸せしめた処理で、含浸樹脂を硬化させないもの。
- b) 含浸+塗布処理：a)の処理を行ったのち硬化剤を含んだ樹脂を塗布して硬化させたもの。
- c) 塗布処理：b)の処理で含浸を行わないもの。
- d) 市販の塗料を用いた塗布処理：プライマー処理を施した後、市販のエポキシ樹脂を塗布したもの。

3.2 コンクリートの配合と供試体の製作

(a) 使用材料とコンクリートの配合

使用した骨材は細・粗骨材ともに非造粒型の人工軽量骨材であり、その物理的性質を表-3に示す。一方、含浸および塗布に用いたエポキシ樹脂主剤ならびに硬化剤の組成は表-1および表-2の通りである。また、市販の塗料の組成を表-4に示す。なお、コンクリートの配合を表-5に示す。

(b) 供試体の製作と表面処理方法

角柱供試体は、コンクリートの脱型後材令2週まで水中養生を行い、この中で処理を施すものは全てその後、空中養生を2日間行ったのち以下の処理を施した。

含浸処理を施すものはコンクリートを110℃で24時間の加熱乾燥を行い、その温度が90℃程度を保っている状態ではほぼ同じ温度に加

表-2 使用した硬化剤の組成

ポリアミド樹脂 アミン価 380~400 平均分子量 500~700 比重 1.17	40
硬化促進剤 三級アミン系	3
可撓性付与剤 アルコール系	6.5

注) 塗布に用いたエポキシ樹脂は、表-1に示した基材と本表の硬化剤を7:3比で混合したものである。

表-3 使用骨材（人工軽量骨材）の性質

	表 乾 比 重	絶 乾 比 重	吸 水 率 (%)	粗 粒 率
細骨材（~2.5）	1.86	1.59	16.9	2.54
中粒品（2.5~5）	1.79	1.48	20.6	5.08
粗骨材（5~15）	1.38	1.20	14.4	6.41

表-4 市販のエポキシ樹脂塗料の組成

エポキシ樹脂	26.2%
変成ポリアミン	12.1%
芳香族炭化水素系溶剤	19.4%
アルコール系溶剤	2.5%
ケトン系溶剤	12.1%
エーテルアルコール系溶剤	5.6%
着色顔料	20.0%
添加剤	2.1%

表-5 人工軽量骨材コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	中粒骨材	G	空気量 (%)	スランプ (cm)	単位容積重量 (ton/m ³)
45	45	170	378	595	125	442	4.2	6.0	1.63

(単位: kg/m³)

熱されているエポキシ樹脂主剤を含浸させた。このあと、塗布を施すものは硬化剤を含んだ樹脂を3回塗布し常温で硬化させた。一方、塗布のみのものと、市販の塗料による塗布のものは、上記の気乾状態のコンクリートに各々の処理を施した。

4. 暴露試験場

上述のような処理方法の有望な適用分野として厳しい凍結融解作用または化学浸食に曝される構造物を対象とし、暴露試験場として日光国立公園尾瀬沼畔を選定した。この付近の気象条件は、図-2および図-3に示すように1年のうち約5ヶ月間はその月の平均気温が氷点下の値となり、冬期の降雪も7ヶ月以上にわたり積雪量も最大で3mに達するという厳しさである。これらの気象条件を見ると、3月～5月と9月～11月頃に凍結融解による作用を受けることが予想される。

これらの条件下での暴露試験を行うために、三平峠方面から長蔵小屋に入る尾瀬沼畔の歩道の一部として設置された鉄筋コンクリート版(写真-1)の下側に10×10×40cmの角柱供試体が土壌に半分程度埋まるように設置した(写真-2)。

鉄筋コンクリート版は両端から約30cmの個所で角材によって単純支持された状態で設置したので、凍結融解作用の他に歩行者と積雪による曲げ荷重の影響を受けることになり、試験体によっては明ら

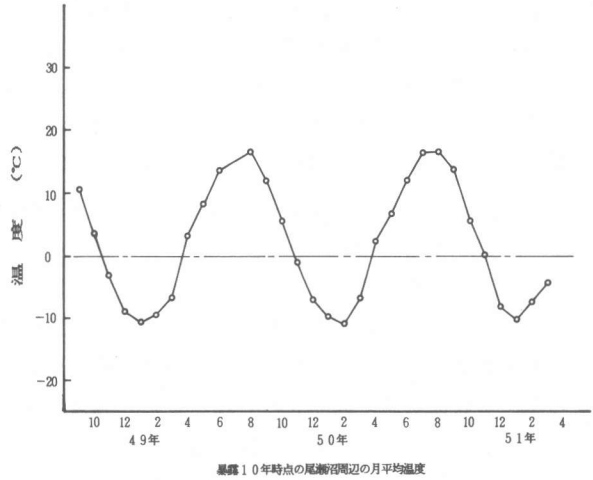


図-2 暴露10年時点の尾瀬沼周辺の月平均温度

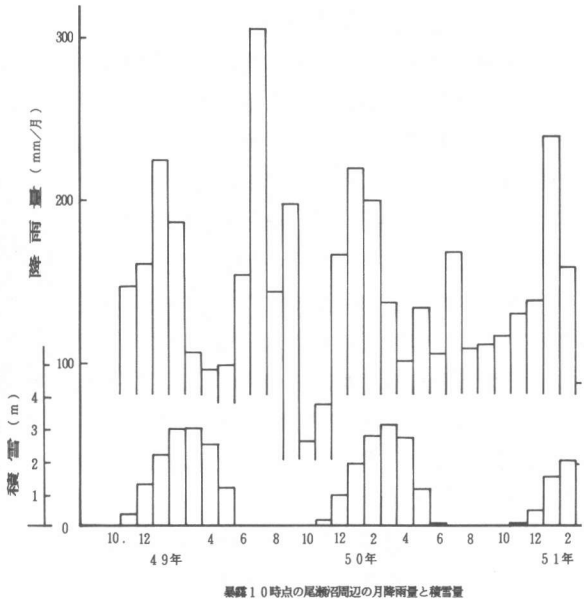


図-3 暴露10年時点の尾瀬沼周辺の月降雨量と積雪量



写真-1 コンクリート版の暴露状況

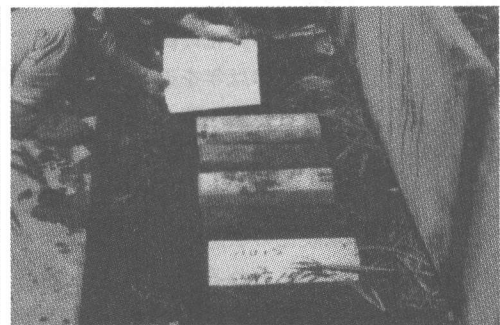


写真-2 角柱供試体の暴露状況

かにこれらに起因すると考えられるひびわれを生じたものが認められた。しかし、角柱供試体は大体において土壤中に埋没しており、しかも鉄筋コンクリート版の下側にあるので外的な荷重は全く受けないが、酸性の水や土壤による侵食と凍結融解の作用を受けている。

供試体周辺と尾瀬沼から尾瀬が原の歩道に沿って水および土壤の pH を測定したところ、供試体周辺の値は5.58～5.66であったが尾瀬が原では4.08の所もあった。また、火山で出来たヒウチ岳より流れる小川での pH は5.28であり、尾瀬沼の湖水の pH 値は6.34～7.29であった。

5. 試験結果と考察

5.1 試験の概要

供試体の劣化性状を経時的に調べるために、角柱供試体では暴露開始後5年時点で重量と表面状態の観察を行い、10年時点では動弾性係数と重量の測定ならびに表面状態の観察を行い、15年時点では表面状態の観察を行った。また、暴露21年時点では現地から供試体を引き揚げて、前述の試験を行うとともに破壊試験を通じて、強度、エポキシ樹脂の含浸深さ、コンクリートの中性化深さ、塗装材のコンクリートとの付着強度、コンクリート表面の劣化状態などを調べた。

5.2 角柱体供試体による試験結果

5.2.1 供試体の外観

21年間にわたって暴露試験を行った供試体の外観は、無処理のもの以外は体積変化をとまなうような変状は全く認められなかったが、含浸のみを施したものは表面が茶褐色に変色していた。

破壊試験の際にこの部分の表面から内部への変色深さを調べたところ1～2mm程度であり、いずれも含浸層(9.5～11.4mm)の表層部にとどまっていた。これは未硬化の樹脂が酸性水によって何等かの影響を受けて生じたものと考えられる。一方、無処理のものは写真-3に示すように表層部のモルタル部分の欠落によって粗面を呈しており、凍結融解作用による劣化の様相を示していたが、肉眼で検出できるようなひびわれは発生していなかった。

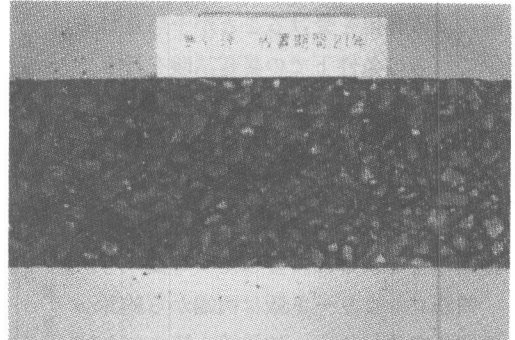


写真-3 無処理コンクリートの劣化状態

5.2.2 重量、動弾性係数、曲げ強度、および塗膜の接着強度試験結果

図-4および図-5は、それぞれの供試体の重量および動弾性係数と暴露期間との関係を示したものである。重量の変化に関しては表層劣化を生じた無処理のものは年を追って減少しているが、何らかの防食処理を施したものの供試体の重量は殆ど変化していない。含浸のみを施したものが重量増加の傾向を示しているのは、含浸した樹脂が未硬化の状態のものであるために吸水したためと考えられる。一方、動弾性係数の変化をみると、無処理の場合は暴露期間が長くなる程低下している。このような動弾性係

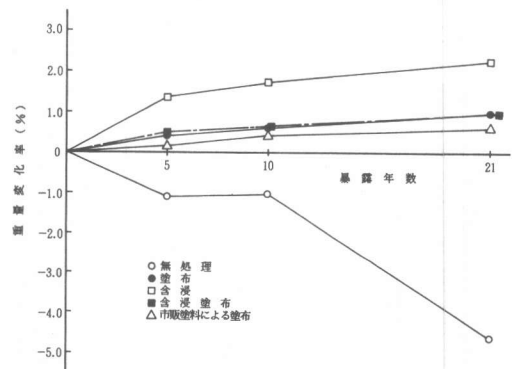


図-4 重量変化率の経時変化

表-6 角柱体破断面の中性化深さ

	測定面	無処理	塗布	含浸	含浸塗布	市販の塗布
平均 中性化深さ (mm)	打設面	4.74	0	全周にわたって1mmの茶褐色の着色部分が見られた。	0	0
	側面1	3.43	0		0	0
	側面2	3.40	0		0	0
	底面	2.37	0		0	0

数の低下の原因は、曲げ強度試験終了後の切片で調べた無処理の供試体の暴露21年後の中性化深さ（表-6）が3～4mm程度であったことを考慮すると、主として凍結融解作用により内部に生じた微小ひびわれによるものと思われる。これに対して防食処理を施したものはいずれも暴露年数とともに僅かではあるが動弾性係数が増大しており、この傾向はとくに暴露10年までの間に著しい。これは防食処理を施す際のコンクリートの材令が水中養生期間2週の段階で加熱乾燥を行ったことによるものと考えられる。即ち、乾燥によって表面に生じた微細なひびわれが樹脂の硬化に伴って修復され、たわみ振動の測定による動弾性係数の値に反映したものである。この意味では暴露を開始して間もなく、このような値に達していたとみてよいであろう。但し、含浸のみの処理を施した供試体の場合には、図-4に示すように明らかに吸水があり、これは最初の5年間に顕著であることから動弾性係数の増大は加熱によって一旦停止したセメントの水和が再開されたことによるものと思われる。

図-6は暴露21年後における曲げ強度試験結果を示したものである。各種の処理を施したものは全て無処理のものより大きな曲げ強度を示しているが、とくに含浸塗布を施したものは無処理のものに比べ2倍近い80 kgf/cm²の強度を示している。また、その他の処理を施したのも無処理のものに比し曲げ強度は25～30%の増加を示している。これらの中で、エポキシ樹脂を未硬化状態で含浸させただけで防食処理を行ったものが、塗布のみのもの以上の曲げ強度を示したことは注目し得る。

今回の暴露試験は21年間で終了したが、とくに含浸後塗布を行ったもの、あるいは塗布のみを行ったものの塗膜が外観を見るかぎり比較的健全であったので、今後の耐久性を予測する目的から、被着材としてのコンクリートに対する接着強度を建研式付着接着強度試験によって調べた。図-7はこの結果を

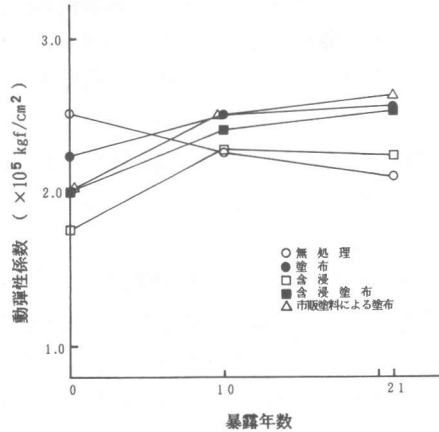


図-5 動弾性係数の経時変化

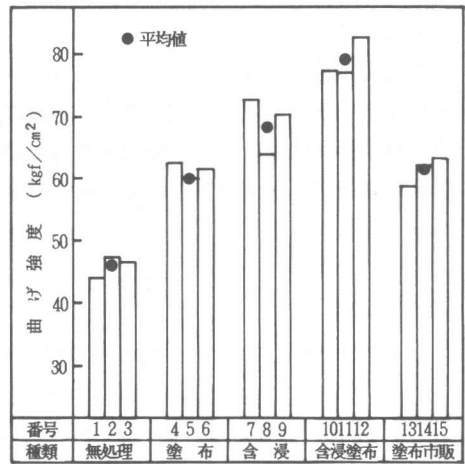


図-6 暴露21年時点の曲げ強度試験結果

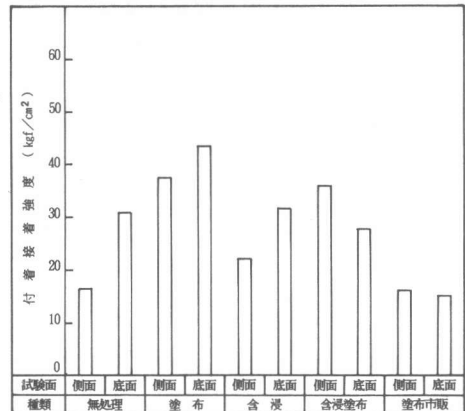


図-7 付着引張試験結果

示したものであり、いずれも試験値は数個の平均値である。これらの破断面をみると、市販のエポキシ樹脂を塗布しているものはコンクリートと塗膜の界面で接着破壊を生じていたが、表-1および表-2に示したエポキシ樹脂を用い塗布および含浸塗布の処理を施したものは被着体であるコンクリート部分において破壊を生じ、この種の塗膜の接着に対する耐久性が優れていることが確かめられた。なお、無処理および含浸の場合は何れもコンクリート部分で破壊したが、これらは参考として試験を行ったものである。

6. まとめ

エポキシ樹脂を人工軽量骨材コンクリートの表層部分に含浸させることにより、酸性水の影響を受け、しかも厳しい凍結融解の繰り返し作用を受けるような過酷な環境においても優れた耐久性を発揮することが、21年間の長期暴露実験を通じて確かめられた。本試験では、同時に含浸および塗布の場合にも同等の効果があることが確かめられたが、本研究の発端がピンホールなどによる欠陥を生じない塗装方法を追求した結果、無溶剤タイプのエポキシ樹脂による含浸という発想に到達したことを考慮すれば含浸をとまなう防食処理の方が信頼性が高いと言える。

あとがき

本暴露試験の実施にあたっては、本計画の立案と実施の面で御助力を頂いた都立大学の村田二郎教授と元三井金属鉱業㈱の清水 昭氏ならびに試験体の製作当初から測定を担当された千葉工業大学伊藤利治助教授、長期にわたって試験体の管理をして頂いた環境庁自然保護局日光国立公園管理事務所尾瀬沼分室の各位、また調査にあたり多大の御協力を賜った尾瀬長蔵小屋の方々から御礼申し上げます。

参考文献

- (1) Murata J, and Kobayashi K: Durability and Watertightness of Concrete Impregnated with Epoxy Resins, Proc of RILEM Symposium on Synthetic Resins in Building Construction, pp439~447, 1967
- (2) 村田二郎, 小林一輔: 樹脂含浸によるコンクリートの耐水耐食処理, セメントコンクリート, No.250, pp17~22, 1967
- (3) 財団法人国立公園協会: 尾瀬・自然解説資料, 1982年
- (4) 東京大学生産技術研究所小林研究室: 合成樹脂によって表面処理した人工軽量骨材コンクリートの長期暴露試験報告書-尾瀬沼畔10年暴露試験-, 昭和51年10月15日