

報告

[1100] 表面塗布材の機械的性能評価

正会員 伊藤 洋 (熊谷組 原子力開発室)
 西岡吉弘 (熊谷組 原子力開発室)
 正会員 ○坂口雄彦 (熊谷組 原子力開発室)
 清水昭男 (熊谷組 原子力開発室)

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の耐久性向上・保証を目的とした対策の1つとして、コンクリート表面に各種塗布材を施工する方法が盛んに用いられるようになり、その効果や塗布材自体の性質に関する研究も数多く見られる。しかしながら、これまでのこういった塗布材に係わる基礎研究は主にひびわれが無いコンクリート面に施工したものを対象としており、下地の力学的挙動(ひびわれ発生等)を加味した研究はあまりなされていなかったように思える。例えば代表的な塗布材であるエポキシ系塗布材は、コンクリートとの接着性や材料の水密性が長期間にわたって優れていることが知られているが、下地コンクリートにひびわれが発生すると、その位置で塗布材が同時に損傷しやすく、水分等の侵入に対し何ら抵抗しないといった事例がある。このように塗布材の性能評価を行うに当たっては、材料自体の水密性や伸び率だけでなく、下地の挙動に対する塗布材の機械的性能評価を適切に行う必要があると思われる¹⁾。

本報告は、このような観点から、新たに考案した評価・実験法による接着性・ひびわれ追従性・背面水圧抵抗性等の機械的性能に関する実験、及び耐久性に係わる凍結融解・中性化に対する抵抗性・水密性等の実験を行い、塗布材の総合性能評価を試みたものである。その結果、有用な知見が得られたと思われるのでここにまとめて報告する。

2. 実験概要

本研究で行った一連の実験概要を表-1にまとめて示す。

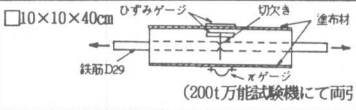
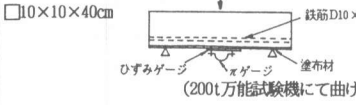
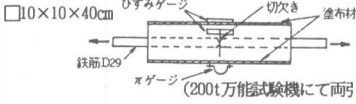
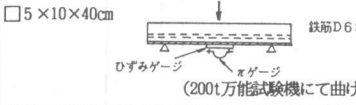
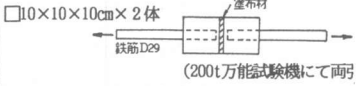
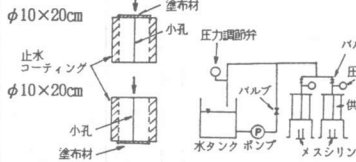
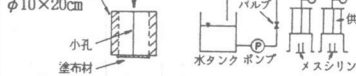
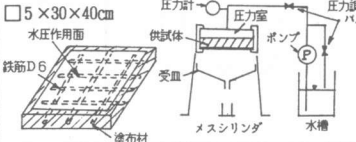
実験I-aは、塗布材のひびわれ発生時における基本的性質を明らかにし、追従限界ひびわれ幅を得ることを目的に実施したものである。供試体は同表にあるように、 $10 \times 10 \times 40$ cm供試体の相対する2面にメーカー仕様に従って塗布材を施工し、その中央部に中央をVカットした鉄筋とひびわれ誘発板を設置したものである。この供試体を用いて両引法によりひびわれを発生させ、ひずみゲージ、 π ゲージでコンクリート・塗布材のひずみ及びひびわれ幅を測定した。また、ひびわれ幅は目視によりクラックスケールでも同時測定している。なお、この実験供試体の半数は6か月間水浸した後に実施している。

実験I-bは、I-aとひびわれ発生法が異なり、曲げ法によって実施したものである。この方法は実験供試体の製作が容易なこと、大きなひびわれ幅を発生させられるといった利点があるが、ひびわれが複数発生した場合に精度が劣る欠点もある。

実験II-a及びII-bは、塗布材のひびわれ追従性における膜厚の影響を明らかにすることを目的に行ったものであり、実験方法はそれぞれ実験I-a及びI-bに対応する。メーカー仕様の塗布材膜厚(表-2、塗膜厚参照)を1plyとし、1ply、2ply、3plyの3種についてひびわれ追従性実験を行った。

実験IIIは、塗布材とコンクリート面との接着強度を調べることを目的に行ったものである。実

表-1 実験概要

| 実験名 | 供試体形状・寸法及び実験装置・方法 | 実験条件 | 測定項目 |
|----------------------------|---|---|--|
| I-a 両引法によるひびわれ追従性実験 |  <p>10×10×40cm ひずみゲージ 切れき 塗布材 鉄筋D29 αゲージ (200t万能試験機にて両引)</p> | <ul style="list-style-type: none"> 塗布材施工直後 6ヶ月水浸後 | <ul style="list-style-type: none"> 荷重 コンクリートひずみ 塗布材ひずみ ひびわれ幅 |
| I-b 曲げ法によるひびわれ追従性実験 |  <p>10×10×40cm ひずみゲージ αゲージ 塗布材 鉄筋D10×2 (200t万能試験機にて曲げ)</p> | <ul style="list-style-type: none"> 塗布材施工直後 6ヶ月水浸後 | <ul style="list-style-type: none"> 荷重 コンクリートひずみ 塗布材ひずみ ひびわれ幅 |
| II-a 膜厚を変えたひびわれ追従性実験 (両引法) |  <p>10×10×40cm ひずみゲージ 切れき 塗布材 鉄筋D29 αゲージ (200t万能試験機にて両引)</p> | <ul style="list-style-type: none"> 塗布材施工直後 1ply, 2ply, 3ply 1ply: メーカー標準仕様厚さ | <ul style="list-style-type: none"> 荷重 コンクリートひずみ 塗布材ひずみ ひびわれ幅 |
| II-b 膜厚を変えたひびわれ追従性実験 (曲げ法) |  <p>5×10×40cm ひずみゲージ αゲージ 塗布材 鉄筋D6×2 (200t万能試験機にて曲げ)</p> | <ul style="list-style-type: none"> 塗布材施工直後 1ply, 2ply, 3ply 1ply: メーカー標準仕様厚さ | <ul style="list-style-type: none"> 荷重 コンクリートひずみ 塗布材ひずみ ひびわれ幅 |
| III 接着性実験 |  <p>10×10×10cm×2体 塗布材 鉄筋D29 (200t万能試験機にて両引)</p> | <ul style="list-style-type: none"> 塗布材施工直後 6ヶ月水浸後 | <ul style="list-style-type: none"> 接着強度 |
| IV 透水実験 |  <p>φ10×20cm 塗布材 小孔 止水コーティング 圧力調整弁 バルブ 圧力計 水タンク ポンプ メスシリンダ</p> | <ul style="list-style-type: none"> 水圧 0.5, 1.0, 3.0kgf/cm²各10日間 (合計30日間加圧) | <ul style="list-style-type: none"> 漏水量 塗布材損傷状況 |
| V 背面水圧作用時の透水実験 |  <p>φ10×20cm 塗布材 小孔 水タンク ポンプ バルブ メスシリンダ</p> | <ul style="list-style-type: none"> 水圧3.0kgf/cm² 30日間 | <ul style="list-style-type: none"> 漏水量 塗布材損傷状況 |
| VI 背面水圧作用時のひびわれ追従性実験 |  <p>5×30×40cm 水圧作用面 鉄筋D6 塗布材 圧力計 圧力室 バルブ ポンプ メスシリンダ 水タンク</p> | <ul style="list-style-type: none"> ひびわれ、漏水発生まで加圧 (0~6kgf/cm²) | <ul style="list-style-type: none"> 水圧 コンクリートひずみ 塗布材ひずみ ひびわれ幅 漏水量 塗布材損傷状況 |
| VII 凍結融解実験 | <p>① 10×10×40cm ② φ10×20cm コンクリートの凍結融解試験方法 (JIS原案)</p> | <ul style="list-style-type: none"> 1サイクル4時間 (-18→5→-18℃) × 300サイクル | <ul style="list-style-type: none"> 相対動弾性係数、重量 (30サイクル毎) 圧縮、接着強度 (終了時) |
| VIII 中性化実験 | <p>φ10×10cm 炭酸ガス試験槽による中性化促進養生 (屋外暴露試験の145倍程度)</p> | <ul style="list-style-type: none"> CO₂濃度 10% 温度 40℃ 湿度 40% RH | <ul style="list-style-type: none"> 1, 3, 6ヶ月経過時の中性化深さ |

験は鉄筋が埋め込まれたコンクリートブロック2体を塗布材で突き合わせて接着し、塗布施工直後と6か月水浸後に両引法により実験を行った。

実験IVは、水みち(ひびわれ、小孔等)のあるコンクリート表面に塗布材を施工したときの透水性を調べることを目的に実施したものである。実験は直径1mmの小孔を設けた円柱供試体の上面に塗布材を施工し、この上面から定水圧を作用させた透水実験を行って、漏水量、塗布材損傷状況を測定した。

実験Vは、地下構造物等で壁体背面よりクラック等を通じて地下水が侵入し、塗布材接着面側に水圧が作用するような場合を想定し、その止水性を調べることを目的に行ったものである。実験はIVと同様の供試体及び実験装置を用い、供試体の塗布材面を下側にセットして上から定水圧を作用させた透水実験を行い、同様に漏水量、塗布材損傷状況を測定した。

表-2 実験使用塗布材対応表

| 記号 | 塗布材の種類 | 塗布厚 (mm) | 伸び率 (%) | 施工仕様 ^{*1} | 各実験における供試体の本数 | | | | | | | | | | |
|----|------------------------------|-------------|------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----|----|----|----|------|------|-----|
| | | | | | I ² ₃ | I ² ₆ | II ² ₃ | II ² ₆ | III | IV | V | VI | VII① | VII② | VII |
| A | ゴムアスファルト系 | 4.00 | 1000 ≤ | AC+BS (2) | 4 | — | — | — | 4 | 2 | 1 | — | 1 | 3 | 2 |
| B | エポキシ系 (硬質) | 0.61 | 3.9 | AC+PR+BC (2) | — | — | — | — | — | — | 1 | — | — | — | — |
| C | エポキシ系 (硬質) +ガラスクロス | 1.68 | 3.9 | AC+PR+BC+GC+BC (3) | — | — | — | — | — | — | 1 | — | — | — | — |
| D | エポキシ系 (硬質) (湿潤面プライマ使用) | 0.61 | 3.9 | AC+WPR+BC (2) | 4 | — | — | — | 4 | 2 | 2 | — | 1 | 2 | 2 |
| E | エポキシ系 (硬質) | 0.48 | 2.5 | AC+PR+BC (3)+TC | 4 | 4 | 6 | 6 | 4 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 2 |
| F | ポリブタジエン系 | 1.06 | 220 | AC+PR+BC (2)+TC | 4 | 4 | 6 | 6 | 4 | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| G | ポリマーセメントモルタル +エポキシ (TC) | 0.77 | — | AC+PR+BC+TC | 4 | — | — | — | 4 | 2 | 2 | — | 1 | 3 | 2 |
| H | ポリマーセメントモルタル (エチレン酢酸ビニル系) | 1.30 | 104 | AC+PR+BC | 4 | 4 | 6 | 6 | 4 | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| I | ポリマーセメントモルタル (アクリル系) | 2.15 | 224 | AC+PR+BC (2)+TC | 4 | — | — | — | 4 | 2 | 2 | — | 1 | 3 | 2 |
| J | 含浸系 (無機系) | — | — | AC+BC (2) | — | — | — | — | — | — | — | — | 1 | 3 | 3 |
| K | 含浸系 (シラン系) | — | — | AC+BC (2) | 4 | — | — | — | — | — | — | — | 1 | 3 | 3 |
| L | セメント系 | 0.55 | — | WC+BC (2) | 4 | — | — | — | 4 | 2 | 2 | — | 1 | 3 | 2 |
| M | エポキシ系 (軟質) | 0.68 | 110 | PR+AC+BC (2) | 4 | — | 6 | 6 | 4 | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| N | 塗布材無し | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 1 | 3 | 1 | 3 | 3 |
| 合計 | | | | | 40 | 12 | 24 | 24 | 36 | 18 | 18 | 15 | 12 | 34 | 27 |

*1: AC:下地処理, BS:主材吹付, PR:プライマ, BC:主材塗, GC:ガラスクロス, WPR:湿潤面プライマ, TC:トップコート, WC:水養生, (n):n層

*2: 半数は6ヶ月水浸

*3: 各塗布材について1ply 2体, 2ply 2体, 3ply 2体

実験VIは、塗布材面に曲げ引張と背面水圧が同時に作用した時の塗布材の止水性を調べるために行ったものである。実験は、平板型供試体を塗布材面を外側にして圧力室にセットし、徐々に水圧を作用させて、供試体にひびわれ・漏水が発生するまで加圧を行った。塗布材面には、ひずみゲージ及びπゲージを取り付けており、塗布材ひずみ、ひびわれ幅、漏水量及び塗布材損傷状況を測定した。

実験VII及びVIIIは、塗布材の耐久性に係わる凍結融解抵抗性及び中性化抑制効果を調べるために行ったものである。凍結融解実験は、「コンクリートの凍結融解試験方法 (J I S 原案)」²⁾ に準じて各供試体の重量と相対動弾性係数を測定し、終了時には、円柱供試体で圧縮強度を、角柱供試体で接着強度 (建研式引張試験) を測定した。中性化実験は、炭酸ガス試験槽によりCO₂濃度10%、温度40℃、湿度40%RHの条件で中性化促進養生を行い、1、3、6ヶ月経過時の中性化深さを測定した。

表-2は、I~VIIIの各実験に使用した塗布材の種類と性質及び試験体数を整理したものである。塗布材の選定に当たっては、一般的に広く用いられているエポキシ系、ポリブタジエン系、ゴムアスファルト系、ポリマーセメントモルタル系等の中から13種類を選び、さらに各実験の内容に応じて同表に示したように試験体を製作した。

3. 実験結果と考察

ここでは、代表的な実験結果についてその概略を述べる。各実験の詳細については、参考文献3)~9)を参照されたい。

(1) 実験I (ひびわれ追従性実験)^{3), 7)}

両引法及び曲げ法により、塗布材が損傷した時のコンクリートのひびわれ幅を求め、これを追従限界ひびわれ幅とした。この追従限界ひびわれ幅を塗布材施工直後と6か月水浸後について整理したものが図-1である。この結果からするとLとMを除いて追従限界ひびわれ幅は塗布後より水浸後の方が大きくなっているが、これは、①水浸により塗布材が軟化し伸び率が増大したこ

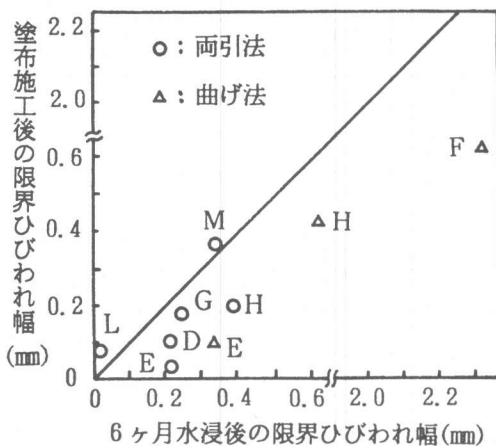


図-1 塗布材施工後と長期水浸後の追従限界ひびわれ幅

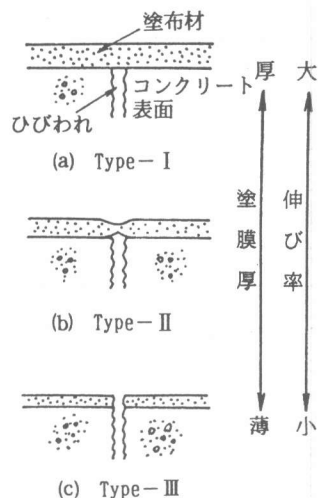


図-2 塗布材のひびわれ追従性パターン

と、②接着力が低下してひびわれ追従性に有利に作用したこと、によるものと判断される。しかし、このことはむしろ塗布材の劣化による結果であって、総合的には望ましいものではないと考え得る。

次に、実験で得られた各塗布材の挙動をもとにひびわれ追従性パターンを整理すると、図-2に示すように大きく3つに分類することができる。まず(a) Type-Iはコンクリートに1mm程度のひびわれが発生しても、塗膜厚の中でひずみが吸収されるため塗布材表面にはその影響がほとんど現れないタイプで、塗膜厚が比較的厚く、伸び率も大きい、コンクリートとの接着強度は劣るといった傾向をもつ。今回の実験では、塗布材A（ゴムアスファルト系）、F（ポブタジエン系）、I（ポリマーセメントモルタル-アクリル系）がこのタイプに相当する。(b) Type-IIは、0.2～0.3mm程度のひびわれには追従できるが、ひびわれ幅がそれ以上になるとひびわれ部の塗布材断面の上下が多少へこんだ後塗布材表面にもひびわれが発生するか、あるいは極端に塗布材が薄くなり正常な機能をはたさなくなるタイプである。塗布材M（エポキシ系-軟質）やH（ポリマーセメントモルタル-エチレン酢酸ビニル系）がこのタイプに属する。(c) Type-IIIは、下地コンクリートのひびわれにはほとんど追従しない塗布材で、伸び率が小さく、コンクリートとの接着強度は大きいものである。エポキシ系（硬質）のD、E、エポキシのトップコートが主体成分のG（ポリマーセメントモルタル+エポキシ）、L（セメント系）がこのタイプに相当する。またK（含浸系）もコンクリート面と同様の挙動を示すということでこのタイプに属するものとする。この Type-IIIの塗布材には、ひびわれ追従性はほとんど期待できないものと判断される。

(2) 実験II（膜厚を変えたひびわれ追従性実験）⁴⁾

本実験においても、実験Iと同様に、ひびわれ幅と塗布材ひずみとの関係から、追従限界ひびわれ幅を求めた。これらの結果をもとに各塗布材の膜厚 t と追従限界ひびわれ幅 w_L との関係についてまとめたものが図-3である。図中、 t と w_L との間に相関関係がみられたM（軟質エポキシ）、H（ポリマーセメントモルタル）、F（ポリブタジエン）については最小二乗法を用いて近似式を算定した。一方、E（硬質エポキシ）の w_L は0.15～0.5 mmであるが、 t との関係は

認められない。つまり、もともとひびわれ追従性がほとんど期待できない材質であると、塗膜厚さを厚くしてもあまり効果が現れないことになる。これとは対照的に、Fはtの増加にほぼ比例して W_L が増加しており、膜厚に伴う追従性の向上がかなり明確に表れているといえる。M及びHに関しては膜厚0.8~1.2mm程度ではFとほぼ同程度の追従性を示しているが、膜厚の増加に伴う追従性の向上はFより小さいものとなっている。このように、膜厚と追従限界ひびわれ幅との間には塗布材固有の傾向があることがわかった。この理由を塗布材のひびわれ追従状況から判断すると、Mにおいては、コンクリートのひびわれ幅が約1mm以上になると急激に塗布材の亀裂が進行するため、1mm以上では膜厚による効果が少なくなるが、Fについては亀裂発生後も塗布材が十分伸びることによってその顕著な進行はなく、追従効果が維持されるためと考えられる。

(3) 実験VI (背面水圧作用時のひびわれ追従性実験)⁸⁾

本実験と実験II-bで行った曲げ実験の結果(1plyのみ)を併せ検討する。本実験では、ひびわれの方向、形状、本数とも一様でないため一つ一つのひびわれと

漏水との関係を明確にできないので、精度はやや劣るが、両実験において塗布材が損傷あるいは漏水した時点でのひびわれ幅を図-4に示した。同図には、背面水圧のみを作用させた実験(実験V:円柱供試体を用いた背面水圧作用時の透水実験)での各塗布材の抵抗性評価点⁵⁾も併記してある。これらより、E(硬質エポキシ)では、ひびわれ発生とほぼ同時に漏水し、一方、曲げ実験での追従性に優れていたF(ポリブタジエン)及びM(軟質エポキシ)では、追従できる程度のひびわれ幅であっても背面水圧により塗布材が損傷し漏水に至っている。また、H(ポリマーセメントモルタル)は、曲げ実験では塗布材は完全に切れなかったが、本実験では複合材料であることもあって少しの伸びで空隙が拡大してポーラスな状態となり、塗布材自体を局部的に透水することとなった。結局、塗布材の背面水圧抵抗性は基本的にはひびわれ追従性を前提とし、加えてその接着性、材質等によって決まるものと考え得るが、全体にその抵抗性は小さい傾向にあることが示唆された。

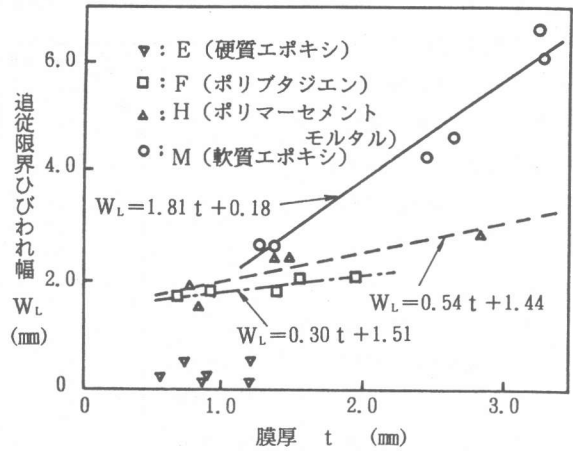


図-3 膜厚 t と追従限界ひびわれ幅 W_L の関係

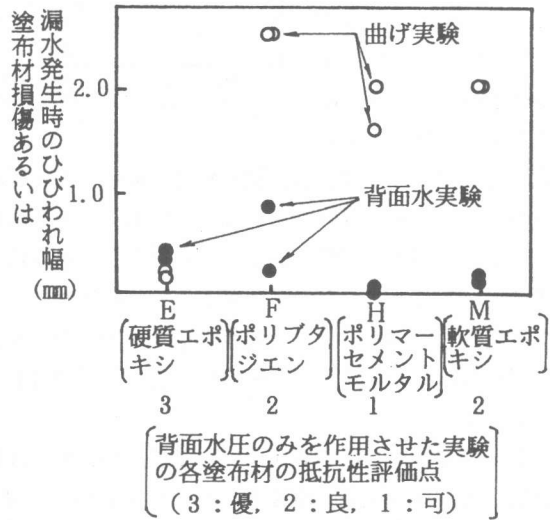


図-4 塗布材損傷・漏水発生時のひびわれ幅

4. まとめ

本実験結果に基づき、主に各塗布材の機械的性能に対し評価を加えたものを表-3に示す。ただし、表中のひびわれ追従限界値は1plyの場合であり、2~3plyのそれについては3.(2)の実験IIを参照されたい。

同表より塗布材の機械的性質を概ね評価することができるが、すべての項目で優れた塗布材はなく、何らかの弱点・欠点をもっている

ことがわかる。つまり、塗布材は、使用目的、環境条件、コスト、重要性等の点から詳細な検討を行って最適とはいえないまでも使用目的をある程度満足するものを選定せざるを得ないことになる。傾向としては、伸び率が大きくひびわれ追従性に優れた塗布材は逆にコンクリートとの接着性に劣るといった特徴がある。これは当然のこととも言えるが、両性質ともに必ずしも過大な性能をもつ必要はなく、両者をうまくバランスさせることも可能であろう。例えば、こういった観点のみから見ると、A~Mの塗布材の中ではFのポリブタジエン系が比較的バランスがよいと言えよう。

本実験では塗布材の機械的性質に焦点を当て、独自の方法・実験によって評価を試みた。その結果、塗布材の機械的性質のいくつかを定量的に明らかにすることができた。しかし、一方では施工法や環境条件等によってもその性質が大きく変化することが示唆され、今後の研究に期待されるところである。

なお、本研究は科学技術庁より「放射性廃棄物処理処分技術開発促進費補助金」を受け実施したものの一部である。最後に、本研究に御協力いただいた塗布材メーカー各位、(株)熊谷組技術研究所 松村哲夫氏、石田良平氏、同原子力開発室土木技術部 西山勝栄氏にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 例えば、小林和夫他：コンクリート表面樹脂ライニングのひびわれ追従性，セメント技術年報40，pp.447~450，1986。
- 2) J I S 原案：コンクリートの凍結融解試験方法（案），コンクリート工学，Vol.23，No.3，pp.31~32，1985.3。
- 3) 伊藤洋他：コンクリート表面各種塗布材のひびわれ追従挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集10-2，pp.281~286，1988。
- 4) 伊藤洋他：コンクリート表面塗布材のひびわれ追従性評価に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集11，pp.761~764，1989。
- 5) 伊藤洋他：背面水圧下におけるコンクリート表面塗布材の止水性に関する基礎研究，セメント技術年報42，pp.355~358，1988。
- 6) 坂口雄彦他：塗布施工による中性化および凍結融解抵抗性に関する基礎実験，第43回セメント技術大会講演集，pp.602~607，1989。
- 7) 伊藤洋他：コンクリート表面塗布材の曲げひびわれ追従挙動に関する基礎研究，土木学会第43回年次学術講演会講演概要V，pp.294~295，1988。
- 8) 西岡吉弘他：背面水圧下における塗布材の曲げひびわれ抵抗性に関する基礎実験，土木学会第44回年次学術講演会講演概要V，pp.670~671，1989。
- 9) 科学技術庁放射性廃棄物処理処分技術開発促進費補助金事業「コンクリートピットのひびわれ制御・止水技術の開発」（(株)熊谷組），成果報告書，1989.3。

表-3 塗布材の基礎実験結果

| 塗布材の種類 | ひびわれ追従限界値 (常温) (mm) | | コンクリートとの接着性 (常温) (kgf/cm ²) | | 水密性 | 背面 水抵抗 圧性 | 曲げ引 張+背 面水圧 抵抗性 | 凍結融 解抵抗 性 | 中性止 化効果 |
|-------------------------------|---------------------------|--------------|---|----------------|-----|-----------------|--------------------------|-----------------|------------|
| | 塗布直後 | 水漬後 | 塗布直後 | 水漬後 | | | | | |
| A ゴムアスファルト系 | 1.0* | 1.0* | 自重で破断 | 自重で破断 | ○ | × | — | ◎ | ◎ |
| D 珪砂系(硬質) | 0.1以下 | 0.1 ~ 0.2 | コンクリート 強度以上 | コンクリート 強度以上 | ◎ | ◎ | — | ◎ | ◎ |
| E 珪砂系(硬質) | 0.1以下 | 0.1 ~ 0.2 | コンクリート 強度以上 | コンクリート 強度以上 | ◎ | ◎ | △ | ◎ | ◎ |
| F ポリブタジエン系 | 0.6* | 2.3* | 20.5 | 23.9 | ◎ | ○ | ○ | ◎ | ◎ |
| G ポリマーセメントモルタル +珪砂(トップコート) | 0.1 ~ 0.2 | 0.1 ~ 0.2 | コンクリート 強度以上 | コンクリート 強度以上 | ○ | ○ | — | ◎ | ○ |
| H ポリマーセメントモルタル (エチレン酢酸ビニル) | 0.2 ~ 0.4 | 0.3 ~ 0.5 | 22.2 | 10.8 | ○ | △ | × | × | △ |
| I ポリマーセメントモルタル (アクリル) | 1.0* | 1.0* | 8.2 | 0 | ○ | × | — | △ | ○ |
| J 含漬系(無機系) | — | — | — | — | — | — | — | △ | × |
| K 含漬系(珪砂系) | — | — | — | — | — | — | — | △ | △ |
| L セメント系 | 0.1以下 | 0.1以下 | 8.2 | 6.3 | △ | △ | — | △ | × |
| M 珪砂系(軟質) | 0.2 ~ 0.3 | 0.2 ~ 0.3 | コンクリート 強度以上 | 12.3 | ◎ | ○ | ◎ | ◎ | ◎ |

*: 追従性を確認した値(追従性は優れている)。(評価: 各々の実験条件に対して、
注) コンクリート強度以上とは引張強度以上。 ◎: 効果大、○: 中、△: 小、×: 効果なし)