樹脂皮膜の接着強度評価に関する研究*

瀬 尾 健 二^{*1}, 日 下 正 広^{*1}
野 方 文 雄^{*1}, 浦 上 良 樹^{*2}

Evaluation of Adhesive Strength of Resin Liner Film

Kenji SEO, Masahiro KUSAKA,
Fumio NOGATA and Yoshiki URAKAMI

In this study, a new method to evaluate the adhesive strength of the interface between resin liner film and cement mortar has been developed. The peel test for vinyl ester resin liner films on cement mortar surfaces was carried out. The critical energy release rate (G_c value) was obtained from the peel load and crack length measured during the peel test. G_c values were not affected by the crack length or the thickness of resin liner film. Therefore it was established that G_c values could be used to evaluate the adhesive strength of resin liner film. Furthermore, the effect of primer coats on the adhesive strength of resin liner film were revealed by obtaining the G_c value.

Key Words: Fracture Mechanics, Composite Material, Finite Element Method, Adhesive Joints, Peel Test, Adhesive Strength, Energy Release Rate, Resin Liner Film

1. 緒 言

下水道施設コンクリート構造物の防食対策として、コンクリート面に樹脂皮膜がライニングされることが多くなったが、樹脂皮膜の接着強度不足による樹脂皮膜のはく離が問題となっている⁽¹⁾。このような樹脂皮膜の接着強度評価には広く建研式引張試験(JIS A 6910)が用いられていた。しかしこの方法では、皮膜の接着強度が極端に弱い場合以外はコンクリート母材で破断し、接着強度を正確に評価できないという欠点がある。さらにこの試験で接着強度がコンクリート母材破断強度以上であると評価された場合でも、実際の施工で樹脂皮膜のはく離するという例が報告され⁽²⁾、樹脂皮膜の接着強度を合理的に評価できているとはいえない。

そこで本研究ではこのような樹脂皮膜の接着強度を合理的に評価する方法を確立することを目的として、モルタル母材表面に樹脂皮膜をライニングした試験片を用い、樹脂皮膜のはく離試験を行うことにより接着強度評価を試みた。すなわち、はく離試験中の刻々と

変化していくはく離荷重とはく離長さを測定し、その測定値からエネルギー解放率を算定し、これにより接着強度の評価を行った。その結果、モルタル母材と樹脂皮膜の接着界面の状態が同じであればはく離を生じている途中のエネルギー解放率は樹脂皮膜の厚さおよびはく離長さに影響されず一定値を示すことが明らかとなった。さらに接着界面の状態が異なった場合に対して従来広く用いられていた建研式引張試験では評価できなかった接着強度をエネルギー解放率で評価できることが明らかとなった。

2. 実 験

2・1 試験片 図1に示す形状のモルタル母材表面をサンドペーパー(#60)でサンディングした後ビニルエステル樹脂皮膜をライニングした。その際、モルタ

図1 はく離試験片

* 原稿受付 平成5年12月20日。

^{*1} 正員, 姫路工業大学工学部 (〒671-22 姫路市書写 2167)。^{*2} 兵庫県加古川土木事務所 (〒675 加古川市加古川町寺家町天神木 97-1)。

ル母材表面と樹脂皮膜の接着界面の状態を全く同じとし、樹脂皮膜の厚さ d が 1 mm と 2 mm の 2 種類の試験片を製作し実験に供した。なお、樹脂皮膜の厚さ 1 mm のものには補強材としてガラス繊維マット 1 枚を、2 mm のものには 3 枚をそれぞれ入れている。その結果、樹脂皮膜のヤング率 E_t は 5.4 GPa ($d=1$ mm の場合) と 9.2 GPa ($d=2$ mm の場合) となった。なお、樹脂をモルタルの上に塗工するにあたってはモルタル端部から 5 mm の所まで離型紙を置き、樹脂がモルタル端部に垂れ下がらないようにし、樹脂皮膜とモルタル母材の接着強度を正確に測定できなくなることを防止した。

2.2 実験方法 試験片は図 2 に示すジグを用いて、上部ジグの樹脂皮膜をはさむ部分の中心からはく離部分の先端までの距離が 20 mm になるように試験機にセットした。上部ジグは、樹脂皮膜を垂直上方に引き上げたとき荷重点にモーメントが発生しないように円形ベアリングを入れ、回転方向の自由度を持たせた。また、下部ジグと試験片の間には平形ベアリングを挿入することにより水平方向の自由度を持たせ、樹脂皮膜に垂直方向の引きはがし荷重のみが加わるようにした。図 3 に実験装置図を、図 4 にはく離試験の模式図を示す。実験は、最大容量 5 000 N インストロン形万能試験機を用い、引張速度 30 mm/min の試験条件で行った。そして実験時のはく離荷重 P および荷重点の変位 δ を AD 変換器を介してコンピュータに記録した。また、同時にビデオカメラをセットし、樹脂皮

膜のはく離していく様相をビデオに録画した。そしてはく離様相ビデオから、はく離中の荷重点からはく離先端までの距離、すなわちき裂長さ C の測定を行った。

2.3 実験結果 図 5 にコンピュータに記録された荷重-変位の関係を示す。樹脂皮膜を引き上げると、変位の増加に伴い荷重がほぼ比例して増加し最大荷重値に達する。そしてこの荷重で樹脂皮膜のはく離ははじめ、以後、はく離の進展とともに荷重が減少していく。しかしモルタル母材と樹脂皮膜の接着界面の状態を同じにしているにもかかわらず、その荷重-変位の関係は樹脂皮膜の厚さ d によって異なる。これは各樹脂皮膜厚さにより曲げ剛性が異なっているためである。つまり $d=2$ mm の場合、曲げ剛性が大きいため最大荷重値も大きくなっており、最終的に完全にはく離したとき(荷重値 0)の変位は 67 mm と小さくなっている。逆に $d=1$ mm の場合曲げ剛性が小さいため最大荷重値も小さく完全にはく離した変位の値も 130 mm と大きくなっている。これよりはく離荷重は接着強度を示すものでなく、樹脂皮膜の曲げ剛性に大きく影響されているものであることがわかる。

3. エネルギー解放率の解析

はく離試験におけるはく離荷重は樹脂皮膜の厚さにより異なり、これにより接着強度を評価することがで

図 2 試験ジグ

図 3 実験装置

図 4 はく離試験模式図

図 5 荷重-変位曲線

きない。そこで、接着強度を示すパラメータとして破壊力学に基づくエネルギー解放率に注目した。剛体に接着された皮膜のはく離時のエネルギー解放率は、はり理論が適用できる場合には理論的に次式で与えられている⁽³⁾。

$$G_{th} = 6P^2 C^2 / Ed^3 \dots\dots\dots (1)$$

P ：単位幅当たりの荷重， C ：き裂長さ

E ：皮膜のヤング率， d ：皮膜厚さ

しかし本研究で対象としたモルタル母材の上に樹脂皮膜を施し、き裂長さが比較的短い場合には、式(1)がそのまま適用できるかどうかは不明である。そこで本研究で行った実験の場合について、エネルギー解放率を有限要素法を用いて計算した。

3・1 解析方法 解析では図6に示すようなモデルを使用し、平面応力状態で弾性解析を行い、全エネルギー法⁽⁴⁾によりエネルギー解放率を算出した。分割要素は四節点四角形要素を用い、き裂先端付近の要素は一辺の長さが0.1mmの正方形とした。解析では、皮膜の端部に一定の垂直荷重 P (98 N) を加え、荷重点からき裂先端までの距離(き裂長さ) C 、皮膜の厚さ d 、母材のヤング率 E_m 、皮膜のヤング率 E_l をそれぞれ

図6 解析モデル

図7 エネルギー解放率に及ぼす母材のヤング率の影響

変化させた。

3・2 解析結果

3・2・1 母材および皮膜のヤング率の影響 皮膜の厚さ $d=2$ mm、皮膜のヤング率 $E_l=8.8$ GPa と一定にし、き裂長さ $C=20, 50, 80, 100$ mm の場合について母材のヤング率 E_m を 15.0 GPa から 2.0×10^8 GPa まで種々変化させ、エネルギー解放率を求めた。結果を図7に示す。この図より母材のヤング率が皮膜のヤング率の約3倍以上になるとエネルギー解放率はほぼ一定となり、母材は剛体とみなせることがわかる。したがって、本研究で対象としているモルタル母材は樹脂皮膜に対しては剛体とみなしてよいことがわかる。また樹脂皮膜のヤング率 E_l を変化させるとエネルギー解放率は樹脂皮膜のヤング率に反比例することも確かめられ、き裂が長い場合には式(1)が適用できることが明らかとなった。

3・2・2 き裂長さおよび皮膜の厚さの影響 皮膜の厚さが1mmと2mmの場合に対してき裂長さを種々変化させ、エネルギー解放率に及ぼすき裂長さの影響を調べた。なお、皮膜のヤング率は $d=1$ mm の場合 $E_l=4.9$ GPa、 $d=2$ mm の場合 $E_l=9.8$ GPa とした。解析結果を図8に示す。図の縦軸は式(1)より求められるエネルギー解放率 G_{th} で無次元化している。き裂長さ C が小さい範囲では式(1)の値より大きな値となり、また、同じき裂長さでも皮膜の厚さの厚いほうが大きい値となっている。これらの結果から皮膜の厚さに対してき裂長さが小さい場合には曲げの影響だけでなく、せん断力の影響を大きく受け、エネルギー解放率は式(1)で示される値よりも大きくなることがわかる。

3・2・3 エネルギー解放率の算定式 図8の横軸をき裂長さと皮膜の厚さの比で整理しなおしたものを図9に示す。なお図の縦軸は $(G/G_{th}-1)$ とした。この

図8 エネルギー解放率に及ぼすき裂長さの影響

ように整理することにより、エネルギー解放率 G は皮膜の厚さによらず同一曲線で表せることがわかる。図9の関係を最小二乗法により近似すると(図中実線で示す)皮膜ははく離していく際のエネルギー解放率は式(2)のように表示できる。

$$G = \{1 + 4.56 \times (C/d)^{-1.65}\} \times G_{th} \dots\dots\dots (2)$$

4. 限界エネルギー解放率による 接着強度評価

実験から得られたはく離途中のそのときどきの荷重 P および撮影ビデオより測定したき裂長さ C を前述の式(2)に代入し、はく離中の各々のき裂長さに対する限界エネルギー解放率 G_c 値を求めた。結果を図10に示す。図中の●印は樹脂皮膜の厚さ $d=1\text{mm}$ 、■印は $d=2\text{mm}$ の結果を示したものである。

図5の荷重-変位曲線では樹脂皮膜の厚さによりその挙動に大きな違いがみられたが、図10のように限界エネルギー解放率で整理すると樹脂皮膜の厚さによらず G_c 値はほぼ一致している。またはく離中も、各き裂長さにより多少の変動はあるが、限界エネルギー解放率はほぼ一定値を示している。これらの結果より、限界エネルギー解放率は樹脂皮膜の厚さ、き裂長さな

どに依存せず、接着界面の状態が同じであればほぼ一定の値を示し、界面の接合強度を評価できるパラメータであることがわかる。図10で、限界エネルギー解放率の値 G_c 値がき裂長さにより多少変動している。これは本実験では母材にモルタルを用いているため接着界面の状態が部分的に均質でなく、接着強度が場所により変動していたためと考えられる。

なお、線形破壊力学を用いてき裂を含む一様材の強度評価を行う場合、エネルギー解放率による評価と応力拡大係数による評価とは等価である。しかし本研究のような樹脂皮膜とモルタル母材の接着強度の評価を行う場合は等価できなくなる。図11ははく離途中の状態を応力拡大係数で整理したものである。樹脂皮膜の厚さによりガラス繊維マットの枚数が違うため樹脂皮膜のヤング率は厚さにより異なっている。そのため応力拡大係数で接着強度を評価すると、図11のように皮膜厚さにより接着強度が異なる値となる。すなわち樹脂皮膜とモルタル母材の接着界面の状態が全く同じであっても応力拡大係数で評価すると見かけ上接着強度が異なる値となる。したがって、このような樹脂皮膜の接着強度はエネルギー解放率で評価するのがより合理的であることがわかる。

5. 接着界面の状態を異ならせた場合の 接着強度評価

上述の方法が実際に多く用いられている樹脂皮膜の接着強度評価に適用できるかどうかを、モルタル母材と樹脂皮膜の接着界面の状態を種々変化した試験片を使用して検討した。

5.1 試験方法 実用の樹脂皮膜のライニングにおいては、樹脂皮膜とモルタル母材の接着強度を向上させるため種々のプライマが用いられる。そこで図12に示すようにモルタル母材と樹脂皮膜の間に表1に示すような種類のプライマを塗工した試験片を作製し実

図9 G/G_{th} と C/d の関係

図10 はく離途中の限界エネルギー解放率

図11 はく離途中の限界応力拡大係数

験に供した。なお、エポキシプライマはエポキシの希釈剤であるトルエン量を異ならせた3種類のものを用いた。樹脂皮膜のライニングは前述の方法と全く同じ方法で行い、樹脂皮膜の厚さはいずれも2mmとした。そして前述と同様の方法ではく離試験を行い、接着強度の評価を行った。また比較のため、従来広く用いられている建研式引張試験をJIS A6910により行った。

5・2 実験結果 はく離試験で得られた最大はく離荷重(皮膜の単位幅当たり)と建研式引張試験における接着強さを表2に示す。建研式引張試験ではいずれも破壊はモルタル母材で生じており、これらの値はほぼ等しく、モルタル母材の破壊強さと考えられる。一方はく離試験における最大はく離荷重に注目すると、プライマとしてビニルエステル、ウレタンを用いた場合はほぼ等しく、エポキシの場合が高い値を示している。またプライマなしの場合は最も低い値となり、接着界面の強度に及ぼすプライマの有効性が確認できる。しかし先にも示したように、最大はく離荷重値は樹脂ライニングの厚さや荷重位置により大きく影響を受け、単に同一形状試験片における比較値としての意味しか持たない。そこで、本報で示した方法で限界エネルギー解放率による接着強度評価を行った。

5・3 限界エネルギー解放率による強度評価 は

く離途中におけるはく離長さとそのときの限界エネルギー解放率の関係の一例を図13に示す。図中実線はプライマとしてエポキシを、破線はビニルエステルを用いた試験片の結果である。実験は同一プライマの試験片についてそれぞれ3本ずつ実験を行ったので各試験片ごと○□◇印で区別して示した。ビニルエステルプライマを用いた試験片の場合、はく離中の限界エネルギー解放率は小さいが、試験片によっても大きな差がなくはく離中の変動も小さい。いわゆる界面の接着強度はかなり安定した値を示すことがわかる。一方、エポキシプライマの場合、限界エネルギー解放率の値はビニルエステルの場合より高いが、その変動は大きくまた試験片によってもかなり異なり、いわゆる接着強度にかなりばらつきがあることがわかる。各種プライマによる限界エネルギー解放率の結果を図14に示す。図の縦軸の限界エネルギー解放率の値ははく離途中で得られる限界エネルギー解放率の平均値をとっている。この結果より、プライマを施していない場合が最も弱く、プライマの種類で接着強度が大きく異なることが明確にわかる。なお、表2の最大荷重で評価した場合ははく離開始時のみの接着強度であるが限界エネルギー解放率では接着界面全体の情報をもって接着強

表1 プライマの種類とその表面張力

Sample No.	Primer	Surface tension (N/m)
α	Vinyl ester	3.02×10^{-2}
β	Urethane	2.70×10^{-2}
γ -30	Epoxy (toluene 30%)	4.31×10^{-2}
γ -60	Epoxy (toluene 60%)	3.53×10^{-2}
γ -80	Epoxy (toluene 80%)	3.21×10^{-2}
δ	No primer	—

図12 試験片作製方法

表2 各試験片の最大はく離荷重値

Sample No.	Primer	Bonding Strength by KENKEN Test (MN/m ²)	Maximum peel load (N/m)
α	Vinyl ester	1.89	1647
β	Urethane	1.93	1652
γ -30	Epoxy (toluene 30%)	2.12	1975
γ -60	Epoxy (toluene 60%)	2.00	1982
γ -80	Epoxy (toluene 80%)	2.01	1829
δ	No primer	2.13	1213

図13 エポキシとビニルエステルのはく離途中の限界エネルギー解放率

図 14 各プライマによる限界エネルギー解放率

度を評価することができ、また得られた値は破壊靱性値と同じディメンジョンを持っており設計に即用いることができるという利点を有している。

各試験片のはく離した樹脂ライニングのはく離面写真を図 15 に示す。限界エネルギー解放率の最も低かったプライマを塗布していない試験片では、モルタルの極表面層の結合力の弱い部分のみが樹脂皮膜に薄く付着している。一方、プライマをウレタン、ビニルエステルとした場合、プライマによりモルタルの表面層が強化され、その表面層がはく離皮膜表面に薄く付着している。そのためプライマなしよりも接着強度が若干大きくなったものと考えられる。それに対し、エポキシの場合、はく離した樹脂皮膜面にモルタル砂粒が厚く付着していたり、樹脂皮膜内に曲げにより生じたと思われる割れが見られるなど、かなり強く接着されていた様相がうかがわれる。このように樹脂皮膜のはく離面観察からも図 14 で得られたプライマによる接着強度の異なりが妥当なものであることがわかる。

なお、以上の結果よりプライマとしてはエポキシが一見いちばん良いように思えるが、トルエン量の違いにより接着強度が大きく異なることや図 13 に示すように接着強度にばらつきが大きいことなどから使用環境の違いや経年的変化に対する信頼性の点で問題がある。今後、これら使用環境や経年変化による影響を本方法を用いて検討を行っていき、より良いプライマの選定を行っていく予定である。

6. 結 言

モルタル母材に樹脂皮膜をライニングした試験片を用い、樹脂皮膜のはく離試験を行った。そしてはく離途中のはく離荷重とはく離長さを測定することにより樹脂皮膜の接着強度を限界エネルギー解放率で評価す

図 15 樹脂ライニングのはく離面写真

る方法を提案した。そしてこの方法で接着強度を合理的に評価できることを明らかにした。得られた結果の主なものは以下のごとくである。

(1) 母材表面上に樹脂皮膜をライニングした場合、母材のヤング率が樹脂皮膜のヤング率の約 3 倍以上では母材を剛体と考えることができ、エネルギー解放率を樹脂皮膜のヤング率、樹脂皮膜の厚さおよびき裂長さのみで簡単に算定できる近似式を導いた。

(2) はく離試験により得られたはく離荷重およびき裂長さを導出した近似式に代入し、樹脂皮膜のはく離中の限界エネルギー解放率を求めた。その結果、接着界面の状態が同じならば限界値ははく離中一定の値を示し、その値は樹脂皮膜の厚さには影響されなかった。したがってこれより限界エネルギー解放率で樹脂皮膜の接着強度を評価できることが明らかとなった。

(3) モルタル母材と樹脂皮膜の間に各種プライマを挿入し、接着界面の状態を変化させた試験片を用いて接着強度の評価を行った。その結果従来広く用いられている建研式引張試験法では接着強度に及ぼすプライマの影響を明らかにできなかったが、本研究で示した方法では接着界面全体の情報を用いてその影響を明確にできた。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費の試験研究(B)の補助金および(財)川西記念新明和教育財団の助成金で行った。また本研究を遂行するに当たりタキロン(株)の中尾敏隆氏、昭和高分子(株)前田剛氏に試験片の提供を受けた。実験にあたっては、姫路工業大学学生・吉崎昌成氏の援助を得た。記して謝意を表す。

文 献

- (1) 浦上・山岡, 下水道協会誌, 28-323(1991), 71.
- (2) 浦上・中尾・高島・石井, 材料, 40(1991), 625.
- (3) Malyshev, B. M. and Salganik, R. L., *Int. J. Fract. Mech.*, 1(1965), 114.
- (4) 白鳥・三好・松下, 数値破壊力学, (1980), 62, 実教出版.