

スリップフォーム工法における型枠表面材の離型性に関する研究

奥田 章子 川地 武
守屋 正裕

概 要

スリップフォーム工法において、スライド型枠とコンクリートとの離型性が悪いと、コンクリート表層に部分的な剥離や欠損などを生じ、補修を要する場合がある。また、型枠表面のケレン作業や、工事を一時休止する際に行う型枠とコンクリートとの縁切りのための空スライド作業が不可欠で、施工能率の低下原因となっている。本研究では、これらの問題を解決するために、型枠とコンクリートとの付着現象に着目し、離型性の良好な型枠表面材の開発を目的として実験的検討を行った。まず、室内試験で各種候補材料の離型性および摩耗に対する耐久性の評価を行い、次いでいくつかの候補材料について現場試験を行い、実工事における適用性を評価した。その結果、ポリテトラフルオロエチレンが型枠表面材としての実用性が最も高く、硬質塩化ビニル、ポリプロピレンも実用化できる可能性があると判断された。

1. はじめに

スリップフォーム工法において、型枠のコンクリート離型性が低下すると、型枠表面にモルタル分が付着して、次第に成長しながら固着し、それが原因となって、脱型したコンクリート表面に部分的な剥離や欠損などが生じ、補修を要する場合がある。また、型枠表面の固着物の除去（ケレン）作業や工事を一時休止する際に行う、型枠とコンクリートの縁切りのための空スライド作業が不可欠で、施工能率の低下原因となっている。これらの問題を解決する方法として、1) コンクリート調合の最適化、2) スライドスピードなど施工要領の最適化、3) コンクリートの離型性に優れた型枠表面材の使用、などが考えられる。このうち、1)、2)については、実績を重ねながら改善が進められてきている。

本研究では、コンクリートと型枠との付着現象に着目し、離型性に優れた型枠表面材の開発を目的に実験検討を行っている。この報告では、室内試験と現場試験の結果をまとめている。

2. 室内試験による各種材料の離型性評価

2.1 実験概要

型枠表面材として使えそうな各種材料について、コンクリート離型性を比較、検討する目的で、モルタルと試験材料間のせん断付着力を測定した。

2.2 試験材料

2.2.1 種類 離型性を比較する試験材料として、金属系材料、プラスチック系材料、樹脂コーティング材、型枠用塗料、離型性を向上させる物質を混合したエポキシ樹脂塗料などの全16種類を供試した。Table 1 に一覧を示す（以下、材料名はTable 1の記号で示す）。

SSは、従来の型枠表面材として使用されている鋼板である。UCは、離型性を改善するために実用化されているウレタン樹脂コーティング材である。

試験板（23×30cm）は、板材以外は鋼板に各材料を塗装あるいは被覆して製作した。実工事での表面の擦傷による付着力増加現象を想定して、#320研磨紙による研磨処理も併用している（研磨方向はランダム）。

2.2.2 新たに開発した材料 試験材料の中でZnEP、BEP、PEGEFは、離型性を向上させる表面材として新たに開発した塗料である（特許出願）。添加している硼砂、酸化亜鉛は、コンクリートの凝結遅延作用を持ち、塗膜から徐々に溶出してコンクリート表層部の凝結を遅延させ、付着力を低減させる効果を期待した。酸化亜鉛と硼砂では、塗膜からの溶出性は硼砂の方が高く、凝結遅延効果は酸化亜鉛の方が高い。また、予備実験としてこれらの塗膜上で整形した養生24時間のモルタルについて、塗膜と接触したモルタル表層をX線回折分析した結果、凝結遅延範囲は、ZnEPの場合に表面から約0.5mm、BEPの場合に表面から約2mmであった。PEG（ポリエチレングリコール）は、アルカリ可溶性ポリマーで、コンクリートが接触し

た際、塗膜中から溶出し、潤滑剤として付着力を低減させる効果を期待した。

2.3 試験内容与方法

試験板を底板型枠としてその中央部に、高さ10cmで底面積5×5cmまたは10×10cmのモルタルを打込み、所定時間養生後に試験板とモルタルとのせん断付着力を測定した。モルタルは、普通ポルトランドセメント、5mm以下の川砂を用い、小型ホバート型ミキサーにより空練り1分半、加水後2分間混練りした。調合は、セメント：砂：水=1:2:0.5とし、養生は、室内開放あるいは湿空中で所定時間行った。せん断付着力の測定は、試験板を水平に置いてモルタルを反力板で固定し、試験板を水平方向に一定速度で引っ張り、離型時の最大荷重を測定する方法によった。最大荷重をモルタルの底面積で除して単位面積あたりのせん断付着力 (kgf/cm²) とした (以下、付着力という)。

試験後の試験板表面について、目視及び低倍率実体顕微鏡で観察し、モルタルの付着残留状況や傷の発生状況について評価した。

2.4 離型性の改善目標

スライド型枠表面のコンクリート付着力の許容値は、スリップフォーム工法の現場の一例において、型枠上昇用のジャッキ能力とジャッキ自重を含めた工事装置の総重量を考慮して計算すると、約0.04kgf/cm² である。したがって、型枠表面材と24時間養生したモルタルとの付着力が0.04kgf/cm² 以下であれば、空スライド作業を大幅に軽減できる可能性がある。目標付着力に達していなくても、鋼板よりも低い付着力を示す表面材は、脱型コンクリート表面状態の平滑化や型枠表面のケレン作業の軽減化が行える可能性があり、離型性の改善が期待できる。

2.5 結果と考察

2.5.1 鋼板の離型性 スリップフォーム工法及び同種の工法で使われている従来の型枠材は、表面処理されていない裸の鋼板が一般的である。モルタルの鋼板に対する付着力を養生時間を変えて測定した結果をFig. 1に示している。

(1) 付着力は、養生時間が長くなるにつれて増加している。これは、セメントの凝結反応の進行が付着力の増加に寄与しているためと解釈でき、次のような付着力発現要因が考えられる。

- 1) 硬化体組織の強度増加や密度増加によって強まるセメント硬化体による物理的アンカー効果
- 2) セメントの水和反応による自由水の減少や水和鉱物の成長が鋼板との界面距離を短縮することによる物理化学的結合力の増加。また、鋼板表面に形成される電気二重層や鉄水和物イオンなどと、セメント水和物との間の電気化学的親和力や化学結合力の発現

(2) 湿空養生と開放養生を比較すると、開放養生の方が付着力の増加率がやや小さい。これは、試験体サイズ

が小さいために、開放養生においては自由水の蒸発によるモルタルの乾燥収縮が付着力を低減するように作用しているためと推定される。

(3) 24時間養生したモルタルで比較すると、目標付着力 (0.04kgf/cm²) よりも著しく高い値を示し、付着力低減化の重要性が再認識される。仮に、空スライドの操作を省略して24時間の休止を可能とするためには、24時間後の付着力を現状 (裸鋼板) よりも2桁低く抑える必要がある。

2.5.2 各材料の離型性の比較 モルタル養生条件を湿空24時間として、付着力を測定した結果をFig. 2に示している。

(1) 離型性は、材料の種類や表面研磨の有無によって大きく異なっており、予想通り研磨処理で表面を荒らすと離型性が悪化する傾向にある。

(2) 全ての材料が鋼板よりも良好な離型性を示し、表面材の選定によって、離型性の向上が図りうると判断された。

Table 1 室内試験用供試材一覧
List of Indoor Test Materials

記号	材料名及び表面処理方法
SS	鋼板 (耐水研磨紙#320による研磨), 黒皮付き (SSM)
SUS	ステンレス:SUS304 (#1000, #320研磨)
PE	ポリエチレン (未処理, #320研磨)
PP	ポリプロピレン (未処理, #320研磨)
PTFE	ポリテトラフルオロエチレン (未処理, #320研磨)
PVC	硬質塩化ビニル (未処理, #320研磨)
FC	フッ素樹脂焼き付けコーティング* (未処理)
PESC	ポリエステル樹脂流動浸漬コーティング* (未処理)
UC	ウレタン樹脂焼き付けコーティング* (未処理)
ULP	ウレタン樹脂塗装 (未処理)
FP	フッ素樹脂塗装 (未処理)
SP	シロキサン樹脂塗装 (未処理, #320研磨)
ACP	アクリル樹脂塗装 (未処理)
ZnEP	酸化亜鉛混入珪*キ樹脂塗装 (未処理, #320研磨)
BEP	硼砂混入珪*キ樹脂塗装 (未処理, #320研磨)
PEGEP	ホ*リエンク*リコール混入珪*キ樹脂塗装 (未処理, #320研磨)

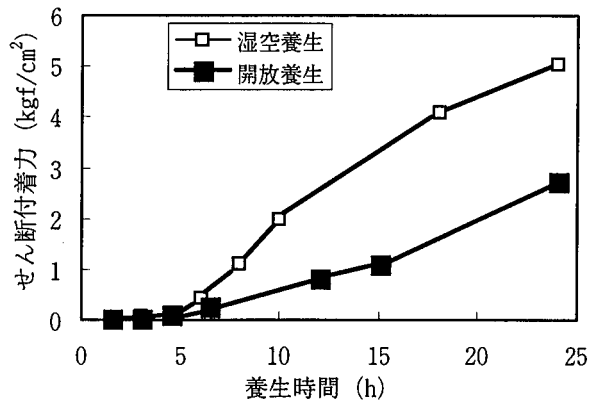


Fig.1 鋼板のモルタルとのせん断付着力
Shearing Adhesion Force of Steel to Mortar

(3) 新しく開発した材料であるZnEP, BEP, PEGEPは、表面研磨の有無に関係なく、付着力が測定限界値(0.001kgf/cm²)以下であった。これは、凝結遅延効果及び潤滑効果が発揮されているためと判断された。また、図示しないが同じ試験板で繰返し(3回連続)試験を行って付着力低減効果の持続性を確認したところ、良好な離型性を維持していた。

(4) PTFEは、研磨の有無にかかわらず、試験材料中で最も離型性が良好で、24時間養生という厳しい条件でも前記目標付着力(0.04kgf/cm²以下)を満足している。同材料の特性として知られている化学的な安定性(非反応性)や低摩擦性によるものと考えられる。

(5) その他の材料で、研磨していない条件で比較的良好な離型性を示したのは、PE, PP, PVC, SPの4種類である。
 2.5.3 試験後の材料表面状態 実際の工事においては、型枠表面に残留したモルタル固着物が原因となって、コンクリートの表面状態が悪化したり、型枠表面のケレン作業が困難となっている。そのため、離型後の型枠表面に付着物が残留しないことが望まれる。以下に、モルタル剥離後の各材料表面の残留付着物および傷の状態の観察結果を示す。

1) PTFE, ZnEP, BEP, PEGEP以外の試験材料は、材料表面が粗いほど、残留付着物が多い傾向にある。つまり、付着力が増加するに伴って残留付着物も増加する傾向にある。

2) ZnEP, BEP, PEGEP上には、モルタル脆弱物が薄く付着していたが、これらは簡単に除去できた。

3) 付着力試験後、いずれの材料表面も試験に伴う損傷は見られなかった。

3. 摩耗試験による耐久性評価

3.1 試験概要

型枠表面は、スライドに伴うコンクリートとの間の研磨作用によって、摩耗や損傷を受ける。そこで、研磨作用に対する耐久性を評価する目的で摩耗試験を行った。

3.2 試験材料

Table 1の試験材料のうち、比較的離型性に優れたPP, PTFE, PVCと実用化されているUCおよびSSの全5種類を試した。また、鋼板については黒皮付き(SSM)も評価している。

3.3 試験方法

3.3.1 摩耗試験 耐水研磨紙を研磨ジグに取り付け、一定の荷重をかけて材料表面を往復させる学振式摩耗試験法を適用した。研磨ジグの大きさは10×2cm(研磨面積20cm²)で、往復速度は33往復/分、ストロークは10cmとし、供試材中央の10×10cmの領域で試験した。研磨ジグに取り付けた耐水研磨紙は#320を使用し、124往復ごとに交換した。また、研磨ジグの載荷重は、実工事でのコンクリートの自重による側圧(打設高さ60cm×コンク

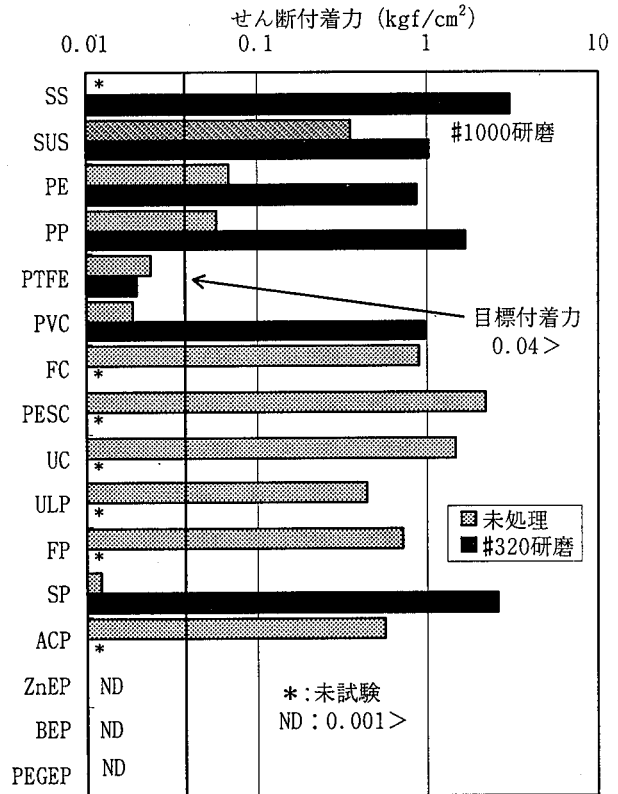


Fig.2 各種材料のせん断付着力の比較
 Comparison of Shearing Adhesion Force of Many Kinds of Materials to Mortar

リート比重2.3g/cm³ 0.1kg/cm²)と同程度の力を研磨面が受けるように2kg(0.1kg/cm²×20cm²=2kg)に設定した。研磨ジグの往復回数は、248回と992回の2条件で、これは延べ摩耗試験距離に換算すると8mと40mである。

3.3.2 摩耗量と表面粗さの測定 摩耗試験前後の試験板の質量を測定して摩耗減量を求め、各材料の密度から摩耗体積を算出し、摩耗量(cm³/100cm²)とした。表面粗さは、JIS B 0601に準じて、触針式の表面粗さ形状測定器を用いて測定し、試験前後の試験板の平均表面粗さを求めた。

3.4 結果と考察

3.4.1 磨耗量 測定結果をFig.3に示す。

1) いずれの材料も研磨ジグの往復回数が増加すると摩耗量が増加し、両者は比例している。

2) 研磨ジグ992往復後のUCとSSMは、部分的に下地(母材)の鋼板が露出していた。

3) 耐摩耗性はUCが特に悪く、その他の材料は鋼板とほぼ同程度であると判断された。

3.4.2 表面粗さ 摩耗試験前後の平均表面粗さをFig.4に示す。

1) 摩耗試験前の表面粗さが最も大きいのは、UCで、次いでSSである。その他の材料は表面粗さが1μm以下と小さい。UCの表面粗さが大きいのは、コーティング工

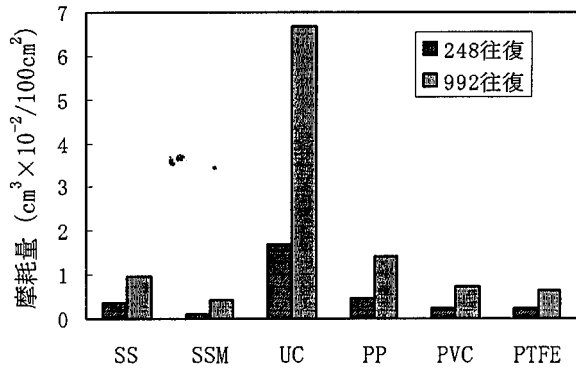


Fig. 3 摩耗試験による摩耗量の比較
Comparison of Wear Loss

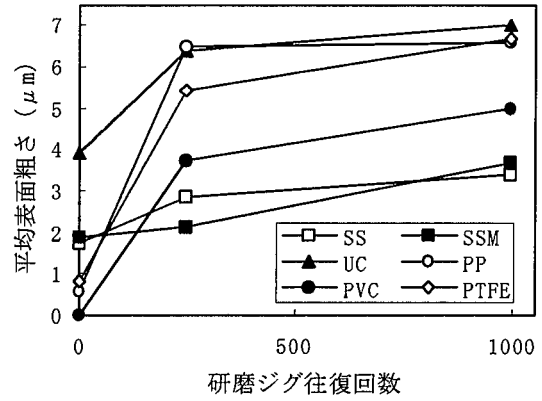


Fig. 4 摩耗試験による平均表面粗さの変化
Change of Surface Roughness by Wear

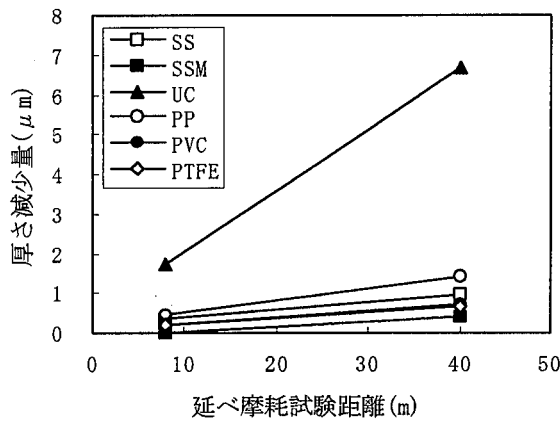


Fig. 5 延べ摩耗試験距離と厚さ減少量の関係
Relation between Thick Loss and Total Wear Length

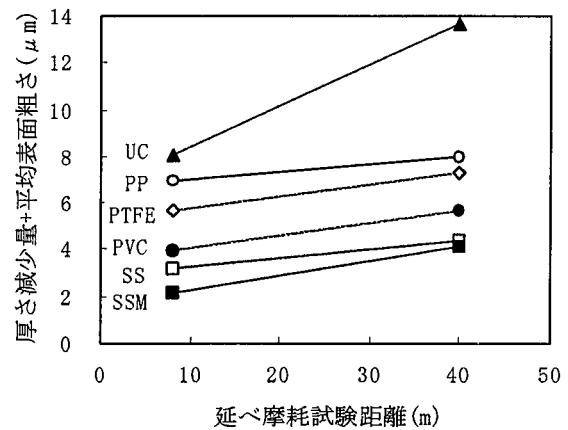


Fig. 6 摩耗試験による材料表面損傷状況
Surface Damage of Test Materials by Wear

程における下地鋼板のブラスト処理の影響と推定される。

2) 摩耗による表面粗さの変化は、材料によって差が認められる。SS, SSMは、摩耗による表面粗さの変化が比較的小さい。その他の材料の表面粗さは、研磨ジグ248往復で著しく増加し、その後の変化は小さい。摩耗試験後の表面粗さの程度は材料によって異なり、UC, PP, PTFEが同レベルでSSの約2倍、PVCは約1.5倍を示している。

3) 摩耗量と表面粗さとの間に、相関性は見られない。

3.4.3 耐久性評価 摩耗量を材料の厚さ減少量に換算し、延べ摩耗試験距離との関係をFig. 5に示す。また、厚さ減少量と平均表面粗さの和と延べ摩耗試験距離との関係をFig. 6に示し、摩耗試験による傷の深さを比較している。

UCは、延べ摩耗試験距離の増加に伴う厚さ減少量及び表面の傷の深さが他の材料と比較して著しく大きく、耐久性が最も悪いことが判明した。その他の材料は、厚さ減少量の増加傾向は同じであるが傷の深さが異なる。Fig. 6から、耐久性(耐摩耗性)順位を判定すると、SSM ≧ SS > PVC > PTFE > PP ≫ UCとなる。

4. 離型性に影響する因子の検討

4.1 表面粗さと付着力

離型性(付着力)に影響する因子の検討を行う目的で、摩耗試験後の材料について、24時間湿空養生のモルタルとの付着力を測定した。摩耗試験による付着力の変化をFig. 7に示す。

1) 同一材料で比較すると、PTFE以外は、摩耗試験による表面粗さの変化に伴って付着力が変化しており、表面粗さが増すと付着力が高くなっている。ただし、両者の間に一定の相関性は認められない。一方、PTFEは、摩耗による表面粗さの変化が付着力に影響していない。

2) 同程度の表面粗さで材質が異なると、付着力に大きな差が見られ、表面粗さに加えて材質の影響が大きい。

4.2 むれ張力と付着力

むれ張力は、材料(固体)表面を液体でぬらす際に材料が持つ表面自由エネルギーを表す。一般に、表面自由エネルギーの値が近い物質間では、親和性(接着性)が高くなると言われている¹⁾。したがって、モルタルと型枠表面材の表面自由エネルギーの差が大きい程、両者の

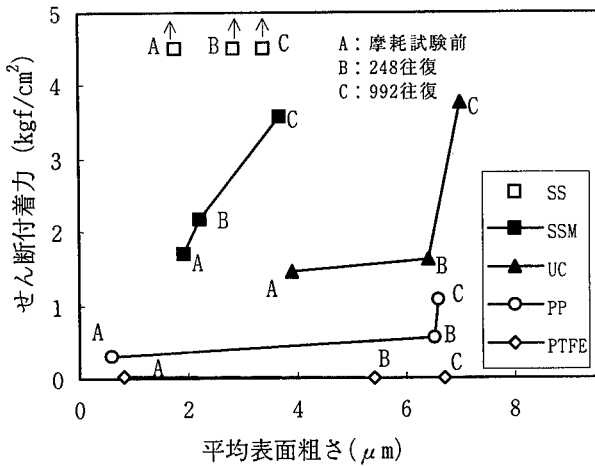


Fig. 7 平均表面粗さとせん断付着力の関係
Relation between Surface Roughness and Adhesion Force

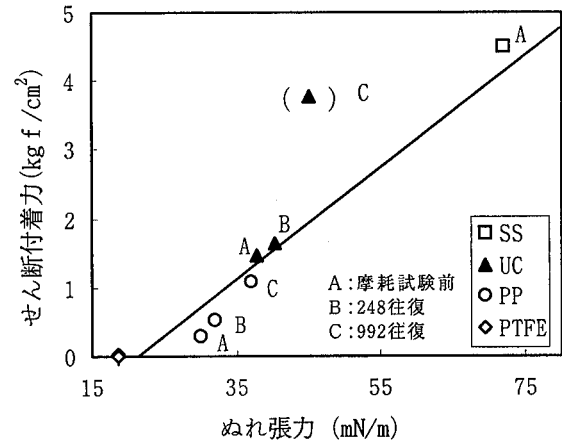


Fig. 8 ぬれ張力とせん断付着力の関係
Relation between Wetting Tension and Adhesion Force

付着力は小さくなる可能性がある。モルタルの表面自由エネルギーは水の値 (72mN/m) に近い大きい値を取ると考えられ、型枠表面材のぬれ張力が小さい程付着力が小さくなると予想される。

そこで、摩耗試験前後の試験材料のぬれ張力を測定し、付着力との関係を検討した。ぬれ張力の測定は、JIS K 6768 に準じてぬれ標準試薬を用いて室温で行った。

Fig. 8 にぬれ張力と付着力の関係を示す。ここで、PTFE のぬれ張力は、非常に小さいため正確な測定値が得られず、文献値¹⁾を使用している。逆にSSのぬれ張力は大きすぎて測定誤差を含み、過小評価している可能性がある。また、研磨ジグを992往復後のUC(C)は、一部下地の鋼板が露出しているため、Fig. 8 のプロット位置よりも多少右にずれる可能性がある。

1) 摩耗試験における研磨ジグの往復回数が増加するに伴いぬれ張力が変化しており、これは表面粗さの変化に起因すると考えられる。

2) 試験材料のぬれ張力がモルタル付着力とはほぼ一定の相関性を示している。つまり、材質や表面粗さの違いによる付着力への影響を、ぬれ張力というひとつの特性値で評価できる可能性が示されている。

5. 現場試験

5.1 試験概要

スリップフォーム工法によるタワー状 (高さ約50m) 高架水槽の建設工事において、一部の鋼製型枠パネルの内側に供試材を取り付けて実際に約50mスライドさせて、実工事での適用性試験を行った。

5.2 供試材料

供試材料は、Table 2に示す6種類9条件の型枠表面材の候補材料である。これらは、室内試験による離型性評価

Table 2 現場試験用供試材一覧
List of Field test Materials

No.	材料の種類	厚み	取り付け方法
1	PTFE	0.2mm	エポキシ系接着剤で貼付
2	PTFE	1mm	エポキシ系接着剤で貼付
3	PVCシュリンクチューブ [*]	0.5mm	熱収縮密着型
4	PVCシュリンクチューブ [*]	1mm	同上
5	PVC	1mm	PVC専用接着剤で貼付
6	PP	1mm	シアクリレート接着剤で貼付
7	硼砂混入エポキシ樹脂	2mm	塗装
8	硼砂混入シリコンゴム	2mm	塗装
9	PEG混入エポキシ樹脂	2mm	塗装

および摩耗試験による耐久性評価の結果と型枠への取り付け方法を考慮して選定した。No. 1, 2のPTFEは、裏面に特殊化学処理を施して鋼板への接着を可能にしてある。また、同材質で厚さを変えているのは、耐摩耗性や耐損傷性など耐久性に関する情報を得るためである。

パネルサイズは、高さ120cm、幅30cmまたは15cmである。合計9枚のパネルにそれぞれの供試材を被覆および塗装し、スライド開始から終了まで連続使用した。

5.3 評価方法

工事中は、コンクリート表面および型枠上部露出面の目視観察を行い、コンクリート表面の平滑性や型枠面へのモルタル分の固着状況、離型性を調査した。工事終了後は、試験型枠を回収して、供試材の表面状態 (損傷、付着物の状態) を目視および低倍率顕微鏡で観察した。

5.4 結果と考察

調査結果を4段階で評価して、Table 3に示す。

1) コンクリートの離型面はいずれも顕著な凸凹や欠損は見られなかったが、No. 2が最も平滑で、高さ50m

に渡って非常に良好な離型面が得られた。

No. 5, 6は、木鏝押さえ程度のわずかな肌荒れ状を呈した。

No. 1, 3, 4は、深さ数mmの小さなあばた状凸凹が見られ、特にNo. 1, 3はその程度が著しかった。

No. 7, 8, 9は、スライド初期に平滑な面が得られていたが、次第にコンクリート表層に深さ数mmのあばた状凸凹が見られるようになった。スライド中、これらの材料の脱型直後のコンクリート表層は明らかに凝結遅延効果及び潤滑効果が発揮されたことを確認した。

2) 工事後の供試材の表面状態は、やはりNo. 2が最も良好で、わずかに筋状の浅い傷が見られた程度で顕著な損傷は認められなかった。

No. 4, 5は、剥離や大きな損傷はないものの擦傷はNo. 2よりも目立った。

No. 6は、角部分に小面積の剥離損傷が見られた。

No. 1, 3は、損傷剥離が顕著で、同材質のNo. 2, 4と比較して厚さ不足の影響が明らかとなった。

No. 7~9は、いずれも塗膜が劣化していた。No. 7, 8は面積の1/2以上が、No. 9は上下部の角部分の小面積で塗膜が剥落し、耐久性に欠けることが判明した。コンクリートが打設されない型枠上部には、モルタル分が固着し、型枠上部以外の塗膜上には、付着物がほとんど見られなかった。これより、コンクリートの凝結遅延及び潤滑効果による付着力低減効果が発揮され、モルタル脆弱物はスライドに伴って除去されたと判断される。

3) 材料の擦傷程度を把握するために、試験後のNo. 2の表面粗さを触針式表面粗さ計で測定した。測定した部分は、縦方向の筋状の傷が比較的多く見られる型枠下部である。平均粗さは、数十µmであった。低倍率実体顕微鏡による観察の結果、傷の深さはおよそ20µm程度と推定され、これは供試したPTFEの厚さ(1mm)に対して約2%の損傷度である。Fig. 6の結果と比較すると、実工事では今回の摩耗試験よりもさらに過酷な摩耗現象が起きていると推定される。

5.5 総合評価

離型性、脱型コンクリートの表面状態、供試材の表面状態などを総合的に評価すると、No. 2の実用性が最も高く、No. 5, 6も実用の可能性があると判断された。前述の室内試験の結果も含めて判断すると、No. 2 (PTFE) は、工事休止時の空スライドを省略できる可能性もあり、コンクリート離型面の平滑性の向上だけでなく工事の省力化への効果も期待できる可能性が見出された。

なお、材料コスト(経済性)について、プラスチック系材料の中でも特に高価なPTFEを例に検討すると、型枠面積に相当するPTFE厚さ1mmの材料費は、空スライド作業及び型枠表面の付着物の除去作業にかかる費用(主に人件費)の1/20以下である。型枠表面材としてPTFEを適用し、型枠表面の付着物の除去作業が軽減されるだけでも、大幅なコストの低減につながると期待される。

ところで、No. 7~9は、連続使用するスリップフォーム工法用型枠表面材への実用性は低いと判断されるが、

Table 3 現場試験結果
Results of Field Test

No.	コンクリートの表面状態	工事中の型枠表面状態	工事後の型枠表面状態	離型性	総合評価
1	×	○→×	×	◎→△	×
2	◎	◎	◎	◎	◎
3	×	×	×	○→×	×
4	△	○	○	○→△	△
5	○	○	○	○	○
6	○	○	△	○	○
7	△→×	○→△	×	○→×	×
8	△→×	○→△	×	○→×	×
9	△→×	○→△	×	○→×	×

×:悪い

△:やや悪い

○:良好である

◎:非常に良好である

凝結遅延作用や潤滑作用による付着力低減効果は著しく高く、他方面への応用が期待できる。

6. まとめ

スリップフォーム工法におけるコンクリート離型性向上技術の開発を目標に、離型性に優れた型枠表面材の開発を目指して実験検討を行った。その結果、以下の点が明らかとなった。

1) 各種試験材料について、モルタルとのせん断付着力を測定し、離型性を評価した結果、従来のスライド型枠の材質である鋼板は離型性が著しく悪く、付着力低減の重要性が再認識された。また、材質や表面研磨の有無によって付着力に差が認められた。

2) 摩耗試験で材料の耐久性を評価した結果、型枠表面材として実用化されているウレタン樹脂コーティング材の耐久性が著しく悪いことが判明した。耐久性の良い順は、黒皮付き鋼板≧鋼板>硬質塩化ビニル>ポリテトラフルオロエチレン>ポリプロピレン≫ウレタン樹脂コーティング材であった。

3) 離型性(付着力)に影響する因子の検討を行ったところ、表面粗さおよび材質が付着力に影響し、特に材質の影響が大きいことが明らかとなった。また、表面粗さおよび材質によって変化するぬれ張力と付着力の間には一定の相関性が認められ、ぬれ張力からその材料の離型性をある程度推定評価できる可能性が見出された。

4) 室内試験の結果をもとに絞り込んだ候補材料について現場試験を行い実用性を評価した。その結果、最終的に、ポリテトラフルオロエチレンの実用性が高く、また、硬質塩化ビニル、ポリプロピレンも実用化できる可能性があると判断された。

参考文献

- 1) 目黒謙次郎, 他:ぬれの基礎と応用, リアライズ社, p. 3~30, p. 337