

コンクリート接着性防水シートの改良

矢口 直幸* 間々田 祥吾* 舘山 勝** 楠戸 一正***

Improvement of Concrete-Adhesive Water-Proof Sheet

Naoyuki YAGUCHI Shogo MAMADA Masaru TATEYAMA Kazumasa KUSUDO

It is difficult to completely stop water leaks into underground concrete structures by using normal water-proof materials. We have developed a water-proof sheet that chemically adheres to structure concrete after it is cast, and by use of this sheet, it has become possible to prevent the water leakage remarkably. However, the conventional concrete-adhesive water-proof sheet requires considerable time to attain the sufficient strength, and it is more expensive than the ordinary water-proof materials, because the resin used as adhesive layer is so expensive. Therefore, we selected the materials that are priced moderately, durable and can attain the sufficient adhesive strength at short time, and confirmed its performance through laboratory tests.

キーワード：開削トンネル，防水工，高分子材料，防水シート，ジオメンブレン

1. はじめに

駅部あるいは土被りの浅い箇所における地下鉄工事では、開削工法により地下構造物が構築される。地下構造物は一般に地下水位以下に構築されるため、防水機能が発揮されなければ、コンクリート構造物内部への漏水に伴う各種施設への被害あるいは漏水処理に伴う経費の支出等が懸念される。地下構造物内部への漏水を防止する工法の一つとして、土留め壁等に防水材料を敷設後、躯体コンクリートを構築する工法が実施されている。しかし、一般に用いられている防水材料では、コンクリートと密着性が低いため、防水材料の局所的な損傷部から浸入した地下水が防水材料と躯体コンクリートの境界面を自由に移動し、損傷部から離れた箇所のクラック等から漏水が発生すると考えられている(図1(A))。そこで、図1(B)に示すように、防水材料に局所的な損傷等が生じた場合でも、防水材料を敷設後に打設される躯体コンクリートと化学的に接着することにより躯体コンクリートと防水材料の境界面への水廻りを防止するコンクリート接着性防水シートを開発した^{1) 2) 3)}。その結果、飛躍的な漏水の抑制が可能となり、多くの現場で実用されてきた。しかし、このコンクリート接着性防水シートは、シートの特徴である接着強度の発現に時間を要し、さらに接着層に用いられている樹脂が高価なため、製品コストが一般の防水材料と比較して割高であった。そこで、製品コスト低減及びコンクリートとの接着性能向上を目

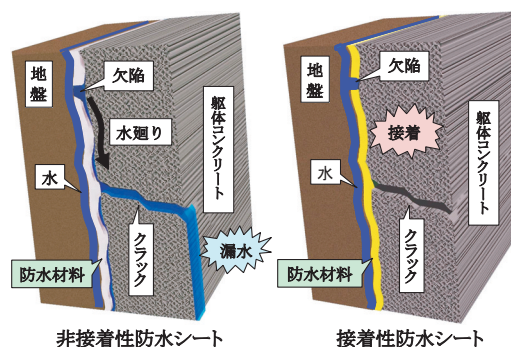


図1 漏水メカニズム

的としてコンクリート接着性防水シートの改良を行った。

2. 接着性防水シート材料(素材)の検討

2.1 素材

防水材料を敷設後に打設するコンクリートに対し、防水材料に接着性能を付加するには、水硬化反応の進行に伴い珪酸カルシウム水和物(C-S-H)を形成する素材を用いる方法が考えられる。水硬化反応に伴う珪酸カルシウム水和物の形成に必要な珪酸(SiO₂)を含む安価な素材としては、セメント混和材として用いられるスラグ(高炉急冷水滓)、フライアッシュ(石炭灰)、天然及び人工シリカ等がある。表1に混和材の主成分を示す。各混和材の化学成分中で、珪酸カルシウム水和物の形成に必要な珪酸の含有率は、スラグ、フライアッシュ及びシリカを比較するとシリカが最も高い。そのため、打設コンクリートと反応して、珪酸カルシウム水和物を形成し、

* 材料技術研究部(防振材料)
** 構造物技術研究部
*** (株)クラレ 産資開発部

特集：材料技術

表1 各混和材の主成分⁴⁾

種類		スラグ	フライアッシュ	シリカ
化学成分 (%)	SiO ₂	25～40	34～60	> 80
	Al ₂ O ₃	8～17	17～31	0.1～0.5
	Fe ₂ O ₃	5～10	2～25	< 1
	CaO	10～38	0.5～10	—
	MgO	1～3	1～3	—
	塩基度	1.0～1.8	0.2～0.7	0.1

接着力を発揮する素材としては、珪酸の含有率が高いシリカを選択した。

2.2 シリカの選定

シリカには天然シリカと人工シリカがあるが、品質の安定性から人工シリカを選定した。

人工シリカの製造法には湿式法、乾式法、電弧法等があり、粒子の凝集性と水分吸着性のバランスから湿式法を選択した。湿式法には沈殿法とゲル法の2種類があり、セメント成分と反応して珪酸カルシウム水和物(トバモライト結晶等)を形成するシラノール基(Si-OH)の数は、沈殿法シリカが約8個/nm²、ゲル法シリカが約5個/nm²である⁵⁾。このことからシラノール基数の多い沈殿法により製造されるシリカを採用した。

3. コンクリート接着性防水シートの構成

新たに改良したコンクリート接着性防水シート(以下、改良型防水シート)は、従来のコンクリート接着性防水シート(以下、従来型防水シート)と同様に、3層で構成されている(図2)。接着層には、敷設後に打設されるコンクリートのセメント成分と反応し、結合能力を有する珪酸カルシウム水和物を形成するシリカを含む特殊EVA樹脂(エチレン-酢酸ビニル共重合体)を適用した。損傷保護層には、従来型防水シートと同様に、地中壁の突起物等による防水シートの損傷を防止するためポリエステル製織布、防水樹脂層にはEVA樹脂を用いた。

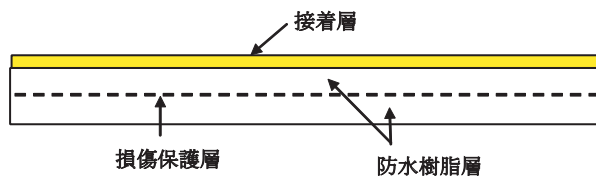
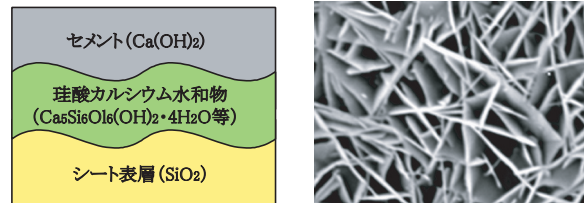


図2 改良型防水シートの構成

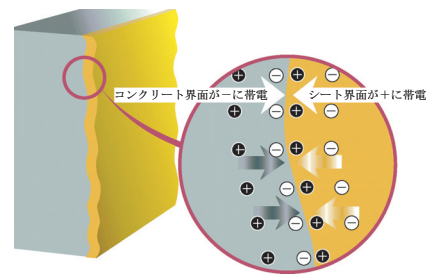
4. 接着メカニズム

シリカ(SiO₂)はそれ自体に水硬性はないが、水の存在下で水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)またはカルシウ

ム(Ca)イオンと反応し、硬化する性質があり、これをポズラン反応と言う。改良型防水シートは図3(a)に示すように、表層の特殊EVA樹脂に含まれるシリカ(SiO₂)と打設コンクリート中に含まれる水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)とでポズラン反応が進行し、結合能力を持つ珪酸カルシウム水和物を生成し、その一部にトバモライト結晶等が生成する(図3(b))。さらに、図3(c)に示すように、特殊EVA樹脂が分極し、この分極によりコンクリート表面と静電力が作用し接着する。



(a)珪酸カルシウム水和物の生成 (b)トバモライト結晶の生成



(c)イオンによる接着

図3 接着メカニズム(イメージ)

5. 特殊EVA樹脂転写量の検討

改良型防水シートは、基材(損傷保護層を含む防水樹脂層)に特殊EVA樹脂をグラビアロールにより転写して製造される。グラビア回数(グラビアロールによる特殊EVA樹脂の転写回数)は、接着層を形成する上で重要であり、接着性能に大きな影響を与える。そこで、グラビア回数に対し、防水シート表面状態の確認及び剥離強度試験を行い、最適なグラビア回数を検討した。

5.1 防水シート表面状態

グラビア回数に伴う特殊EVA樹脂の付着状態を走査型電子顕微鏡(日立製、S-510型)を用いて観察した。その結果、図4(a)～(d)に示すように、グラビア回数1回では、特殊EVA樹脂の付着は少なく基材が露出(海島模様)しており、接着性能にばらつきを発生させることが懸念される。しかし、グラビア回数2回以上では、基材表面に特殊EVA樹脂が均一に転写されることを確認した。

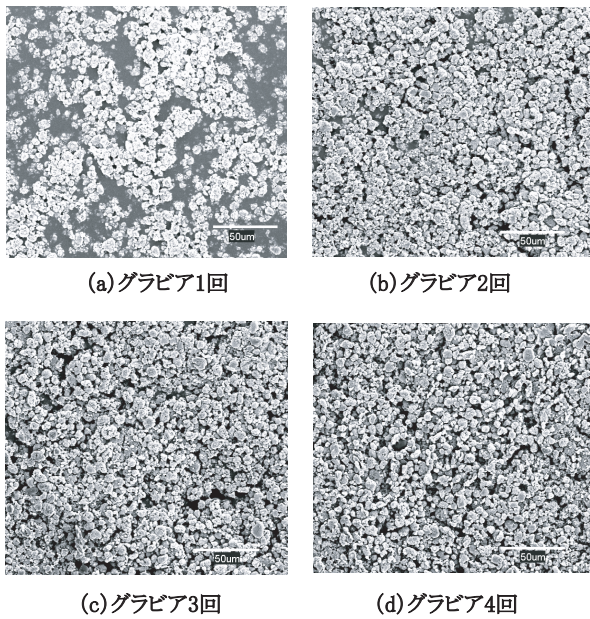


図4 特殊EVA樹脂の付着状態

5.2 グラビア回数と剥離強度

最適なグラビア回数を定めるため、剥離強度試験により強度を求めた。剥離強度試験には、シリカ転写面にモルタル（水/セメント比W/C=0.5、細骨材/セメント比S/C=2、W160×L40×t40mm）を直接打設し、飽和湿気中で28日間静置養生したものを試料として用いた。

その結果、グラビア回数1回の剥離強度に対する剥離強度比は、図5に示すようにグラビア回数2回で最も高い値を示した。

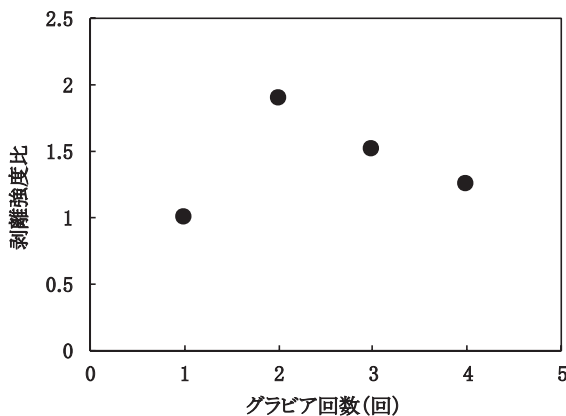


図5 剥離強度のグラビア回数依存性

6. 物性試験

防水シートに求められる物性試験として、強度（引張強度、接合部強度、モルタルと防水シートのせん断接着及び引張接着、剥離接着強度、ひび割れ追従性）、水密性（基本水密性、接合部水密性、釘孔水密性、モルタルと防水シートの水密性、不陸変形（凹凸による材料変形）を伴うモルタルと防水シートの水密性）及び流出物（赤外

線分光分析、原子吸光分析）があげられる^{8) 9)}。

強度試験で水密性を直接把握することは困難であるが、品質管理を行う上では重要な項目である。水密性試験は、防水用材料の直接的性能である。また施工した際、環境への影響が重要視されるため、流出物の定性分析により有害物質の有無を確認した。本報告では、これらの試験項目の中で本防水シートの特徴である接着性能と水密性に関する試験結果について報告する。

6.1 試験方法

6.1.1 剥離強度試験

供試体は、改良型防水シート表面（躯体コンクリート打設面）にモルタル（W160×L40×t40mm、W/C=0.5、S/C=2）を直接打設し、飽和湿気中で静置養生した。養生温度は、施工環境温度を考慮して、5±2℃及び23±2℃とし、さらに剥離強度の養生日数依存性を把握するため、養生期間7、14、21及び28日で試験した。各期間養生後、剥離強度測定用治具を装着した材料試験機を用いてモルタルと防水シートの剥離強度試験を行い、式(1)より剥離強度を算出した。試験速度は10mm/min、試験環境温度は23±2℃とした。試験状況及び供試体の寸法形状を図6に示す。

$$\text{剥離強度 (N/cm)} = P/W \cdots (1)$$

ここで、 P ：最大荷重 (N)、 W ：試料幅 (cm)

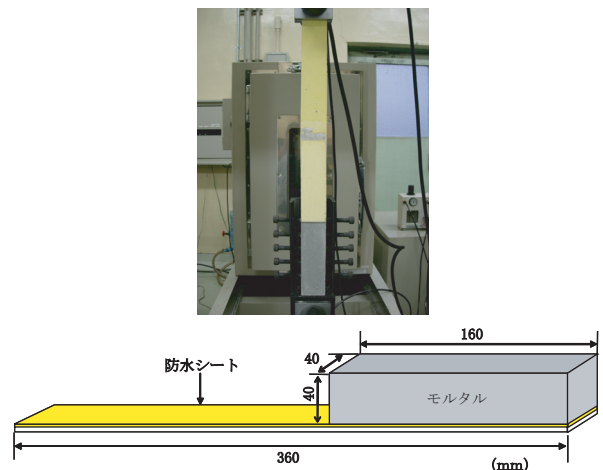


図6 剥離試験状況及び供試体の寸法形状

6.1.2 ひび割れ追従性試験

供試体には、改良型防水シート表面にモルタル（W160×L40×t40mm、W/C=0.5、S/C=2）を直接打設し、環境温度23±2℃の飽和湿気中で28日間静置養生を行ったものを用いた。養生後、3点曲げによるひび割れ追従性試験を実施した。ひび割れ追従性は、防水シートに切断、開穴等の欠陥が生じた時点のモルタル下部のクラック幅とした。試験速度は0.5mm/min、試験環境温度は23±2℃とした。試験状況及び供試体の寸法形状を図7に示す。

特集：材料技術

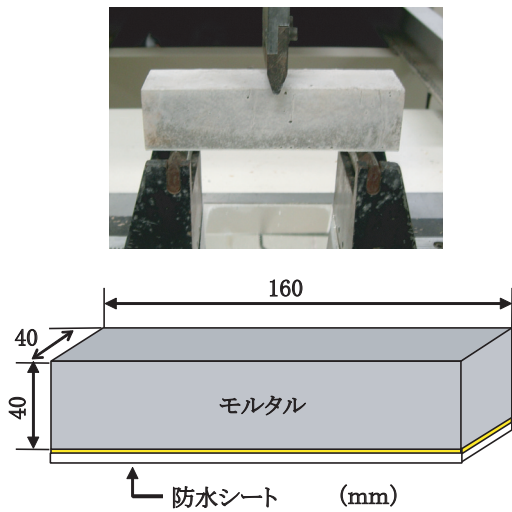


図7 ひび割れ追従性試験状況及び供試体の寸法形状

6.1.3 モルタルと防水シートの水密性試験

水密性は、加圧型透水試験機を用いて確認した(図8)。供試体は図9に示すように、改良型防水シートの表面にモルタル(φ100×H200mm, W/C=0.5, S/C=2)を直接打設し、23±2℃の飽和湿気中で7, 14, 21及び28日間静置養生を行った。各期間養生後、改良型防水シートとモルタルの接着面を通過して流出する水の通り道を確認するため、改良型防水シートの中心部位に打設したモルタルまで到達する深さの穴(φ10mm)を開け、モルタルと防水材料の水密性(図10)を確認した。負荷水圧は0.5MPa(水頭差50m相当)、試験水温は23±2℃とし、圧力円筒下部から流出する単位時間当たりの漏水量が一定となるまで放置後、漏水量をメスピペットで測定した。



図8 加圧型透水試験機

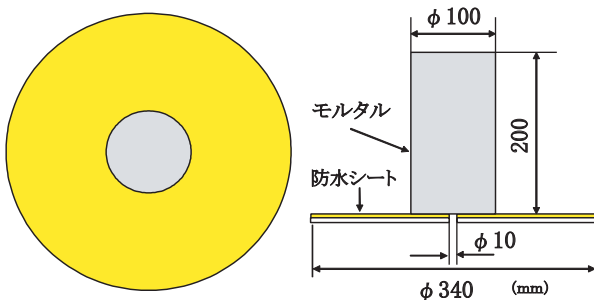


図9 水密性試験用供試体の寸法形状

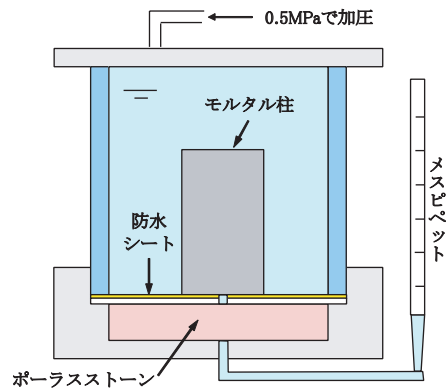


図10 水密性試験概念図

6.1.4 不陸変形を伴うモルタルと防水材料の水密性試験

ソイルモルタル地中壁面には不陸が存在するため防水材料に変形が想定される。そこで、セラミックボール(φ10mm)を用い、不陸が形成される条件を模擬して水密性を確認した(図11)。なお、本試験で用いたセラミックボールは実際の不陸と比べ曲率が小さく、防水材料との接触面積は少ないため、水圧により局所的な変形が防水材料に発生し易くなることが想定される。この際に生じる水圧は、静水圧よりは小さいと考えられるが、ここでは土留め工の設計で用いる仮想流体圧相当と考え、想定静水圧の1/2の0.25MPaを負荷水圧とした。漏水量の測定は、負荷水圧を作用させ圧力円筒下部から流出する単位時間当たりの漏水量(ml/sec)が一定となるまで放置後行った。試験に用いた供試体は、モルタルと防水材料の水密性試験と同様の寸法形状とした。

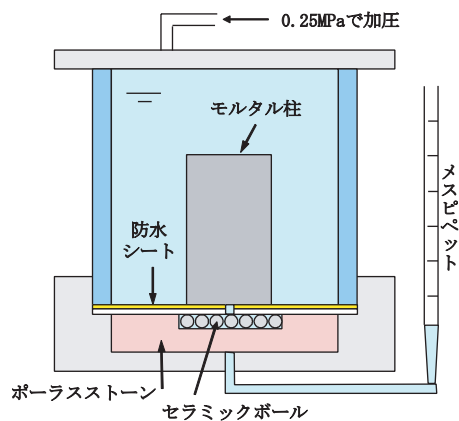


図11 不陸変形を伴う水密性試験概念図

6.2 試験結果

6.2.1 剥離強度試験

剥離強度試験の結果、図12に示すように養生温度23±2℃では養生7日で剥離強度が発現し、その後は僅かに増加する傾向を示した。しかし、養生温度5±2℃では養生日数に依存し、23±2℃と比較すると強度発現は遅れるが、養生日数の経過に伴い増加した。従って、コンクリート標準¹⁰⁾で示されているように、打設可能と

されているコンクリートの最低温度が5℃以上であれば、接着反応は十分に進行するものと判断した。さらに、実施工では1回に大容積のコンクリートを打設するため、コンクリートの硬化に伴う水和熱により防水シート敷設面の温度は高くなり反応は促進されると想定される。外気温約25℃におけるコンクリートの打設時の温度は約24時間後に最高値(約45℃)を示し、その後徐々に低下するが外気温までの到達時間は、約150時間を要することが確認されている^{1) 2)}。

このことから、寒中における施工においても、接着反応は水和熱により促進され進行するものと判断できる。また、本試験結果を従来型防水シートと比較すると、従来型防水シートは、図12に示したように20±2℃で養生7日において剥離強度約6N/cmであるのに対し、改良型防水シートは23±2℃、養生7日で約23N/cmに達しており、接着性能の向上を確認した。

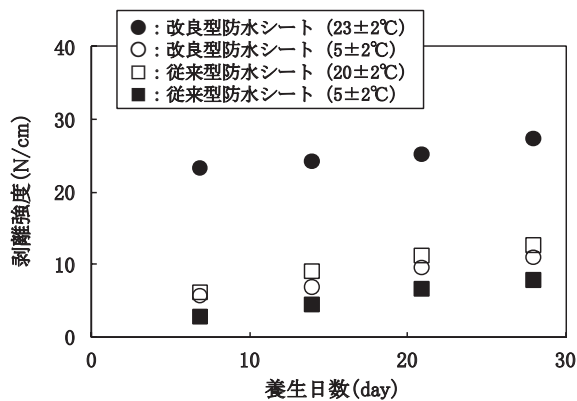


図12 防水シートの剥離強度

6.2.2 ひび割れ追従性試験

3点曲げによる防水シートのひび割れ追従性試験の結果、改良型防水シートはクラック幅10mmでも防水シートに開穴及び切断等の欠陥は認められず、開削トンネルで一般的に許容されているクラック幅0.5mm程度に対し、20倍以上の追従性を有し、従来型防水シートと同等の性能を有していることを確認した(図13)。

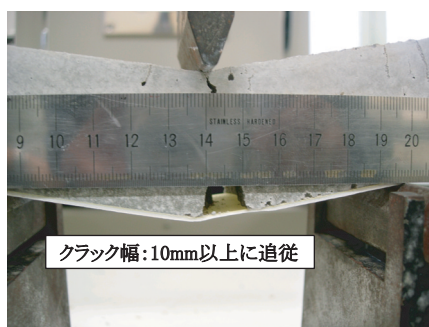


図13 ひび割れ追従性試験結果

6.2.3 モルタルと防水シートの水密性試験

図14に示すように、改良型防水シートは、養生日数7～28日において漏水量に著しい変化は認められず、養生日数28日では1.5ml/dayであった。

本試験において防水性能を評価するには、漏水を2つの形態に区分して検討する必要がある。一つは防水シートの表面から内部を透過してくる形態であるが、基本水密試験の結果では漏水は確認されず、内部を透過してくる漏水は無いものと考えられる。二つ目はモルタル中を透過する形態であるが、本試験方法においてモルタル柱の内部を透過してくる漏水量は1ml～2ml/dayであることを確認している^{1) 2)}。このことから、本試験において確認された漏水は、モルタルを透過して流出した漏水であり、23℃の環境温度であれば、モルタル打設後7日以内に漏水を防止可能であると考えられる。また、従来型防水シートの物性試験結果^{1) 2)}と比較すると、図14に示したように、従来型防水シートは、養生日数に依存して漏水量が減少する傾向を示すのに対し、改良型防水シートは、養生初期から高い水密性を示すことが確認され、従来型と同等以上の性能を有することを確認した。また、養生日数28日後の供試体に対して、試験終了後、モルタルと防水シートを剥離し接着面の状態を観察した結果、図15に示すように、接着境界面に水みち等の痕跡は認められなかった。

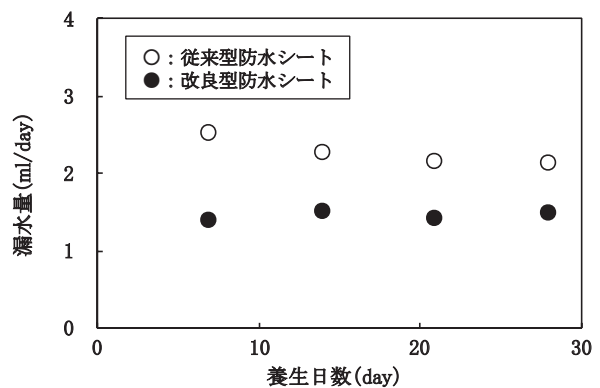


図14 モルタルと防水シートの水密性試験結果

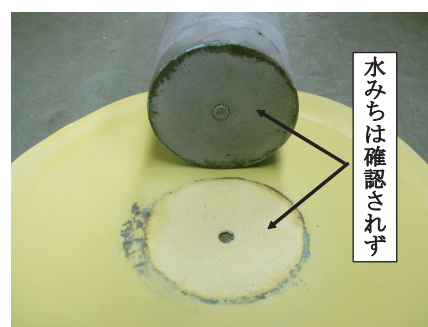


図15 モルタル剥離後の状態(水密性試験後)

特集：材料技術

6.2.4 不陸変形を伴うモルタルと防水シートの水密性試験

漏水量は約1.9ml/dayであった。試験後供試体の状態を目視により観察した結果、水圧により不陸を形成しているセラミックボールの凹凸に追随しシートの変形が見られたが、穴あき等の欠陥は認められなかった(図16)。さらに、試験後モルタル柱を剥離し、接着面の状態を観察したが接着境界面に水みち等の痕跡は認められなかった(図17)。

以上から、ソイルモルタル地中壁面のように不陸が存在する部位における使用についても、防水性能を有すると考えられる。

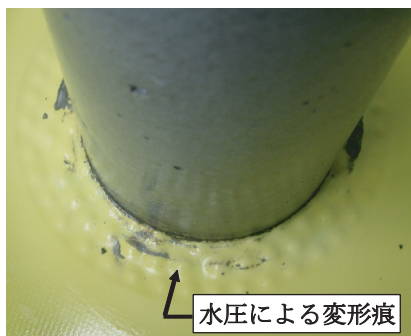


図16 不陸変形を伴う水密性試験後の状態

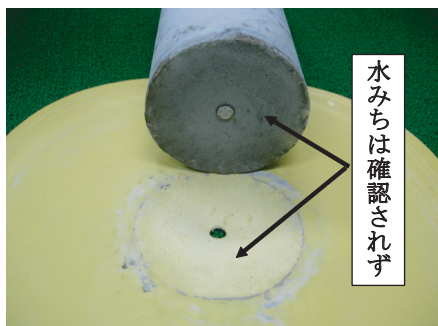


図17 モルタル剥離後の状態
(不陸変形を伴う水密性試験後)

7. まとめ

製品コスト低減と接着性能向上を目的として、コンクリート接着性防水シートの改良を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 改良型防水シートの接着層の素材には、珪酸の含有率が高く、安価なシリカが適している。
- 2) 製造過程において、接着性能に大きな影響を与えるグラビア回数は、2回が適している。
- 3) 従来型防水シートと比較して接着強度及び強度発現速度が向上した。
- 4) 開削トンネルで一般的に許容しているクラック幅に対し、十分な追従性を有する。
- 5) モルタルとの接着効果により、大深度地下構造物(地下50m相当)に作用する高い水圧に対し、従来型防

水シートと同等以上の防水性能を有する。

- 6) ソイルモルタル地中壁面のように不陸が存在する部位での使用についても防水性能を有する。

一方、製品コストについては、接着層に安価なシリカを含む特殊EVA樹脂を用いることにより、従来型防水シートと比較して10%~20%程度の製品コスト低減が可能となった。

8. おわりに

従来の防水シートに対して、製品コスト低減とコンクリートとの接着性能向上を目的にコンクリート接着性防水シートの改良を行った。改良型防水シートは従来型防水シートと同様に敷設後に打設されるコンクリートと化学的に接着することを特徴とし、大深度地下鉄のように高い水圧が作用する場所に対し、内面方向への水密性を確保する防水シートである。近年、開削トンネル内部への漏水処理等の維持管理に年間数億円の経費が掛かることから、防水材料にはこれまで以上の高い水密性が求められており、本改良品は漏水に対する抜本的な対策材料として、開削トンネル及び都市NATMでの使用が拡大している。今後は、廃棄物処分場、オフィスビル等の地下防水材料として広範で使用可能な材料及び工法にしていきたいと考えている。

文献

- 1) 矢口, 館山, 伊勢: コンクリート接着性防水シートの開発, 鉄道総研報告, Vol.17, No.10, p.11, 2003
- 2) N.Yaguchi, M.Tateyama, T.Ise: Development of Adhesive Waterproof Sheet for Concrete Structure, Quarterly Report of RTRI, Vol.45, No4, p.222, 2004.
- 3) 矢口, 館山, 出水, 田村: コンクリート接着性防水シートの開発, ジオシンセティックス技術情報, 国際ジオシンセティックス学会日本支部, Vol.19, No.2, p.41, 2003
- 4) 最新・コンクリート混和材の技術と応用, (株)シーエムシー, p.209, 2001
- 5) 赤崎, 福永: ゲル法シリカの特徴と応用, 東ソー研究・技術報告, 第45巻, p.65, 2001
- 6) 新水質化学分析法, 三宅康雄, 北野 康著, 地人書館
- 7) 水質調査法第3版, 半谷高久, 小倉紀雄著, 丸善, 1995
- 8) 矢口直幸, 青木一二三: ジオシンセティックス技術情報, 国際ジオシンセティックス学会日本支部, Vol.15, No3, p.20, 1999
- 9) 鉄道構造物等設計標準・同解説-開削トンネル: 国土交通省鉄道局 監修, 鉄道総合技術研究所 編, 丸善株式会社, p.451, 2001
- 10) コンクリート標準示方書[施工編]: 土木学会コンクリート委員会, 丸善株式会社, p.149, 2002