

第2回 熱硬化性プラスチックの性質

1. はじめに¹⁾

前稿の「管路更生材のしくみ」に引き続き、本稿では、管路更生材料の単独管の反転工法、形成工法に使用される熱硬化タイプ、光硬化タイプ材料についてお話します。

熱硬化タイプの工法は、含浸用基材（ガラス繊維や有機繊維不織布等）に熱硬化性樹脂を含浸させた筒状の更生材を反転あるいは引き込み方法により既設管内に挿入し、更生材内部から空気圧や水圧等で既設管内に密着した状態のまま、温水や蒸気等で樹脂を硬化させて更生管を構築する方式です。

光硬化タイプの工法は、含浸用基材に光で硬化する樹脂を含浸させた筒状の更生材を反転あるいは引き込み方法により既設管内に挿入し、更生材内部から空気圧で既設管内に密着した状態のまま、光を照射して樹脂を硬化させて更生管を構築する方式です。

熱硬化タイプ、光硬化タイプで施工された単独管の構成を図-1に示します。このb) 複合品の中で硬化した樹脂を総称として“熱硬化性プラスチック”と呼びます。

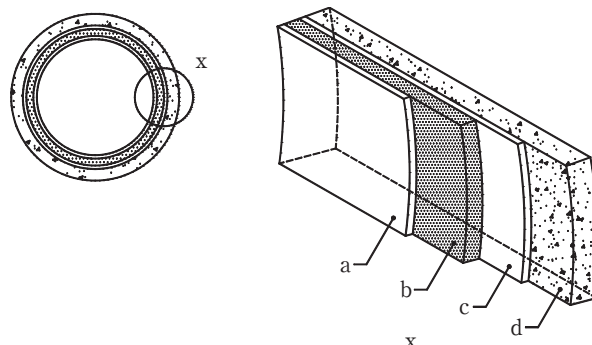
以後、この“熱硬化性プラスチック”について述べていきます。

2. 熱硬化性プラスチック^{2),3)}

熱硬化性プラスチックの樹脂原料は、低分子量で、主に液状の化合物から成っています。硬化剤などの化合物、熱あるいは光の作用によって、化学反応する官能基（手）が結び合って分子量が増大します。ある程度分子量が大きくなると構造に枝分かれが生じ、流動性を失うようになります。これをゲル化といいます。

さらに手が結び合って（硬化反応、架橋反応）、枝分かれの枝が多くなると、次第に網目状構造の高分子である熱硬化性プラスチックになります。構造が三次元網目であるので、加熱すると若干柔軟にはなりますが溶融しません。従って、硬化物は再加熱による再成形は不可能となります。前稿でもお話したお菓子のクッキータイプの材料になるわけです。

熱硬化タイプ、光硬化タイプの管路更生工法で



- a) インナーチューブ又は仮設インナーチューブ
- b) 複合品（含浸用基材や強化材と樹脂）
- c) アウターチューブ（無い材料もある）
- d) 既設管

図-1 熱硬化タイプ、光硬化タイプで施工された更生管構造

使用されている樹脂は、不飽和ポリエステル樹脂（UP）、ビニルエステル樹脂（VE）、エポキシ樹脂（EP）などがありますが、UPが管路更生材料として最も一般的であり使用量も多く、大きなシェアを占めています。その主な理由としては、

- ・ 硬化が速く、そのコントロールが容易である。
- ・ 物性、耐薬品性に優れている。
- ・ 生産性が高く、比較的low価格である。
- ・ 多様な成形方法が可能である。

などがあげられます。

UPは、PETボトルやカッターシャツなどに使われ、熱可塑性プラスチックである（飽和型）ポリエステル樹脂と異なり、液状の不飽和型である化合物が重合反応により、加熱しても溶融しない熱硬化性のプラスチックになるものです。

UPは、主に無水マレイン酸を単独または各フタル酸と併用する形でグリコールとエステル化反応（重縮合）させることにより合成したもので、これに、もう1つの主成分であるスチレンなどのビニルモノマーに溶解して製造されます。スチレンなどは単なる溶媒ではなく、反応して熱硬化性プラスチックに取り込まれます。

グレードとしては、JIS K 6919「強化プラスチック用液状不飽和ポリエステル樹脂」に規定されていますが、オルソ系、イソ系、テレ系、ビス系、ヘッ

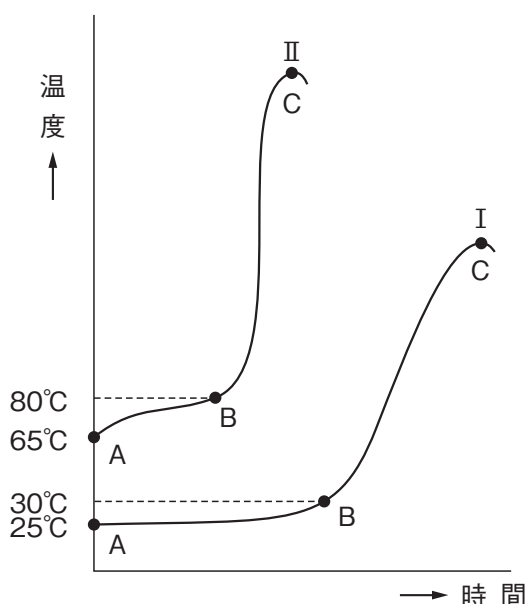


図-3 不飽和ポリエステル樹脂の硬化曲線

つとして用いられます。その他、UPを硬化させる場合の基礎知識として次のことを知る必要があります。

- 樹脂のゲル化は、硬化剤、促進剤の量、光量が増加するに従って速くなる。
- 樹脂のゲル化は、樹脂の温度が高くなるほど活性化して速くなる。
- 硬化発熱は、成形品のポリウム（厚さ）が大きいほど高くなる。
- 硬化の際、空気に触れると酸素の影響で重合が阻害され、ベトつきが残る場合がある。²⁾

熱硬化タイプの管路更生工法で使用されています。熱硬化性プラスチックは、多くが中温硬化用の硬化剤を使用します。分解する温度に達してから、それより高い、ある一定温度と時間を保つことにより、硬化剤が分解し、樹脂の反応を活性化させ、UPは硬化します。また、光硬化タイプの硬化剤では、一定の波長の光等で分解が発生し、硬化反応を進めます。このため、施工現場では、温度あるいは光の管理が重要になってきます。

3. 含浸用基材

含浸用基材にはポリエステル繊維あるいは、ポリアミド繊維からなる不織布から構成され、強化材にはガラス繊維からなる不織布、織物があり、また、その混合材料からなることもあります。

3-1. ポリエステル繊維

代表的な含浸用基材として、ポリエステル繊維の不織布が使用されます。材質はPETが多く、その比較的長い繊維を使った不織布（織っていない布ま

たはマット）に加工して使用されます。

不織布の製造方法は、基本的に①フリース（柔らかい起毛仕上げの繊維素材）を形成、②形成したフリースを結合の二段階があります。各段階において以下に示す様々な製法があり、不織布の原料・目的・用途に応じて選択されます。

管路更生の場合、樹脂をポリエステル繊維に含浸させるので、バインダー（接着剤等）などを使わない方法、もしくはUPに容易に溶けるバインダーを使用した方法を選択します。①フリース形成法として、乾式法（機械的にくし削りしながら形成するカーディング方式と、空気流を利用してランダムに形成するエアレイド方式）やスパンボンド法（高分子を溶融させ、連続した長繊維状に吐出しながら形成）などにより薄いシート状に形成させます。

次に、②フリース結合法として、ニードルパンチ法（かえしのある針を突き刺して機械的に繊維を結合させる）やスパンレース法（高圧水流を使用し繊維を絡み合わせる）などでマット状にします。

業界ではフェルトという呼び方もしますが、一般的にはフェルトとは、羊毛などを固めたものを指し、不織布が正しい呼び方と考えます。

3-2. ガラス繊維

管路更生の自立管など強度が必要な場合、FRP（繊維強化プラスチック）の強化材として一般的にガラス繊維が使用されます。強化用のガラス繊維の引張強度は、3～5GPa、引張弾性率は、60～90GPa、伸び率は、2～5%の範囲の物が使用されます。

ガラス繊維の形態は、強化方法により、各種の製品が使用されています。その形態およびその概要を表-2に示します。⁶⁾

管路更生の場合、ポリエステル繊維と同様に樹脂を含浸させますので、バインダーに注意したガラス繊維の形態を選択します。また、強化効率を上げるためにガラス繊維の高含有率を目指す、サンドイッチ効果を利用するなど各工法は工夫しています。但し、ロービングを使いすぎると、高含有率で高強度の材料に仕上がりますが、異方性（強度の方向が強くなる性質）が出てしまうので、ガラス繊維の方向の考慮、チョップドストランドやヤーンを使用するなど強度バランスを取る必要があります。

FRPの強化用ガラス繊維としては、E-ガラス繊維が一般的ですが、現在の管路更生の材料では、海外や日本で製造された耐酸ガラス繊維を使用してい

表-2 ガラス繊維強化材の形態とその概要

形態	形態の概要	性能
ロービング	千本から数千本の繊維を撚りを掛けずに引き揃えた形態	高含有率 異方性
ヤーン	撚り合わせた繊維の束	面内等方性
チョップドストランド	ロービングを数mm～数十mの長さに切断した繊維	低含有率 面内等方性
チョップドストランドマット	チョップドストランドをマット状に堆積、バインダーで固定	低含有率 面内等方性
ロービングクロス	ロービングの織物	高含有率
クロス	ヤーンの織物	高含有率
ニットロービング	ロービングを引き揃えて、編み糸で固定	高含有率 高強度
ニットマット	チョップドストランドをマット状に堆積、バインダーで固定	低含有率 低強度

ます。耐酸ガラス繊維は、耐酸性が優れ、他の一般的な耐薬品性はもちろん、同時に歪みが生じた場合の耐ストレインコロージョン性も優れています。

現在の強化プラスチック複合管も、E-ガラス繊維から耐酸ガラス繊維に変更し、耐ストレインコロージョン性に対応できるようになりました。

ストレインコロージョンは、“歪み腐食”と訳されています。FRPなどの複合材料を薬液に浸漬した場合、時間とともに腐食劣化が進行し、強度が低下していきます。また、同材料に曲げや引張りなどの力をかけ、歪みを与え続けると、微細なクラックが発生し、徐々に劣化が進行します。歪みを与えた状態で薬液に浸漬すると、それぞれ単独の場合よりも劣化の速度が速くなる傾向があり、この現象を“ストレインコロージョン”と呼びます。

管路更生の材料は、JIS K 7034「ガラス強化熱硬化性プラスチック（GRP）管－偏平負荷における管内面の耐薬品性の求め方」に準拠して、耐ストレインコロージョン性試験の試験結果により確認しています。

3-3. カーボン繊維

カーボン繊維は、FRP材料としては航空機や自動車部材など市場の成長が著しく、ガラス繊維の代わりに、次世代の強化材として注目されていました。しかし、管路更生の材料としては、伸びが小さいことによる耐震性への不安、コスト高によりまだまだ、これからの材料です。

4. 熱硬化性プラスチックの材料面から見た施工管理のポイント¹⁾

樹脂には有機溶剤系の成分が含まれているため、火気や臭気には厳重に注意が必要です。また、温度や光には敏感に反応するため、十分な施工管理が必要となります。

4-1. 熱硬化性プラスチックの安全管理および環境対策

安全管理および環境対策として考慮しなければならない代表的なものとして、UPを溶解するビニルモノマーであるスチレン（有機溶剤）があります。スチレンの主な性質を表-3に示します。⁴⁾⁵⁾

表-3 スチレンの主な性質

項目	内容
比重	0.91 (20℃)
爆発限界	上限 6.1%、下限 1.1%
引火点	31℃ (CC法: 32℃)
発火点	490℃
消防法上の危険物	第4類第2石油類；指定数量 1,000リットル（軽油相当）指定
労働安全衛生法	危険有害性（引火性のもの）物質 有機溶剤中毒予防規則（スチレン） 許容濃度：20ppm（作業場）
有害性 （急性毒性：吸入）	ラット：LD50 2,770ppm/4H マウス：LD50 4,940ppm/2H
他	VOC（揮発性有機化合物）

許容濃度を守れば、有機溶剤としては低毒性のものであり、生分解性も良好と判断され、体内に堆積する物質ではありません。

(1) 火気対策

スチレンは、消防法上の軽油や灯油レベルの危険物に該当します。ただし、ガソリンレベルの危険物ではありません。爆発限界は1.1%以上であり、労働安全衛生上の許容濃度20ppm（作業場）を維持しておれば、その危険性はありません。但し、引火点31℃で空気より重く滞留し易い危険物であり、煙草や漏電などによる発火などには十分に注意する必要があります。従って、もしもに備えて、現場には消火器の準備は必要です。

(2) 臭気対策

作業などで悪臭発生の恐れがあるときは、悪臭防

止法に基づく規制に十分注意して、事前に付近の住居者、店舗などに対して作業状況を説明し納得を得てできるだけ影響のないよう窓閉めなどの対策をとり、作業を開始します。

作業中も悪臭発生物をこぼしたり飛散させたりしないように注意して作業し、作業終了後は、良く清掃片付けを行って悪臭漏れのないことを確認して引き上げます。

熱硬化性プラスチックを使用した工法で、硬化性樹脂にUP（不飽和ポリエステルとスチレン等より構成）などを使用している場合、スチレン臭が苦情の原因となっており、スチレン臭が洩れないように脱臭装置等の設備が必要です。

- ・ マンホール部対策：脱臭装置を設置します。
- ・ 取付け桝部対策：止水プラグ等を設置してスチレン臭が洩れないなどの対策を取ります。

(3) 材料による対策

工法によっては、以下のように、スチレン臭の発生に対する対策を講じています。

- ① 未硬化樹脂をガスバリアー性のフィルムで覆い、スチレンの放出を極微量まで削減
- ② 樹脂の一部をノンスチレンのVEとして使用
- ③ スチレンの含有量を減らした樹脂を使用
- ④ 硬化に工夫を凝らし、硬化残存スチレンの減少

4-2. 熱硬化タイプおよび光硬化タイプに要求される保管および搬送・搬入

更生材の保管および搬送・搬入時の環境条件は適正なものにし、更生材の取り扱いにも、十分注意して行います。

更生材は、光または熱エネルギーにより化学反応を開始します。したがって、保管および搬送・搬入に際しては、適正な遮光や各メーカーで定めた更生材の適正保冷温度を維持する措置を講じます。

また、液状の熱硬化性樹脂が含浸された材料は、未硬化の比較的柔らかい素材であるため、搬送・搬入時には全体の質量を考慮し、損傷を与えないよう細心の注意を払います。

4-3. 熱硬化タイプおよび光硬化タイプに要求される挿入、硬化管理

(1) 熱硬化タイプ

硬化のための加温装置の熱源を、出入の熱媒体(温水、蒸気など) 温度を連続モニターする装置と連結

させます。上流または下流の更生材と既設管の間にセンサーを設置して更生材の温度を連続的にモニターします。(図-4 温度測定位置例参照)

最低限、測定すべき温度および圧力測定位置の箇所数は

- ・ 温度測定位置：熱媒体(温水、蒸気など)の温度が最も低くなる箇所(1箇所)と、上流または下流の更生材端部で表面温度が最も低くなる箇所(1箇所)
- ・ 圧力測定位置：更生管端部等で管内圧力(空気圧、水圧)を測定(1箇所)

また、管理項目は、次のとおりです。

- ① 材料挿入(反転・引き込み)速度管理
 - ・ 反転工法の場合には、反転速度の管理を行いデータシートなどに記録します。
 - ・ 形成工法の場合には、所定の引込速度の管理を行い、データシートなどに記録します。
- ② 反転時・拡径時・硬化時の圧力管理
 - ・ 空気圧を用いる工法については、施工中は圧力計や圧力センサーなどを用いて連続的に圧力と時間を計測し、データシートやチャート紙に記録します。
 - ・ 水圧(水頭)を用いる工法については、水頭高さや圧力計の計測値を随時計測しデータシートなどに記録します。
- ③ 硬化時・冷却養生の温度・時間管理
 - ・ 施工中は温度センサーなどを用いて連続的に温度と時間を計測し、チャート紙に記録します。

硬化不足を防ぐ留意点としては、既設管の損傷状況・管径・長さをまず、よく把握します。そして、各メーカーや工法協会で定めた浸入水などに対する事前処置を行います。拡張時は段階的に昇圧させ、

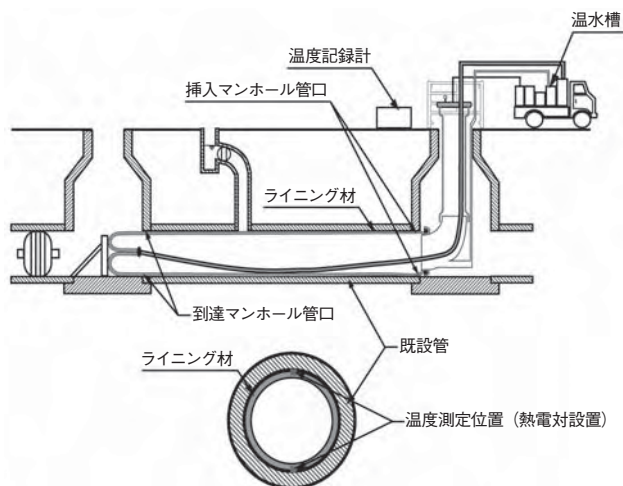


図-4 熱硬化タイプの温度測定位置の一例

既設管にフィットさせます。硬化時には、材料の種類・管厚も考慮した圧力、温度、時間管理が重要となります。

(2) 光硬化タイプ

入力電圧と発光力およびUVライトが管内を進む速度は、ライト制御盤に連結し連続モニターします。また、硬化時の圧力、温度についてもセンサーを設置し、連続的にモニターします。

最低限、測定すべき温度および圧力測定位置/箇所数は、次のとおりです。

- ・ 温度測定位置：更生材内面を施工スパン全延長にわたって連続測定
- ・ 圧力測定位置：更生管端部または同一圧力を測定できる箇所（1箇所）

また、管理項目は、次のとおりです。

① 材料挿入（反転・引き込み）速度管理

- ・ 熱硬化タイプと同様です。

② 反転時・拡張時・硬化時の圧力管理

- ・ 施工中は圧力計や圧力センサーなどを用いて連続的に圧力と時間を計測し、データシートやチャート紙に記録します。

③ 硬化時の電源管理

- ・ 硬化中は、UVライト制御盤に入力される電圧が適正な電圧および周波数であるかを計測し、データシートなどに記録します。

④ 硬化時の温度・時間管理

- ・ 施工中は、UV照射装置に搭載した赤外線温度センサーを用いて連続的に温度を計測し、チャート紙に記録します。また、UVライト点灯から消灯までの時間を連続的に計測し、チャート紙に記録します。（図-5参照）

⑤ 冷却養生時間管理

- ・ UVライト消灯後、所定の冷却養生時間を計測しデータシートなどに記録します。

硬化不足を防ぐ留意点としては、熱硬化プラスチックと同様に既設管の状況を把握し、各メーカーや工法協会が定めた事前処置を行います。特に、硬化時には、機械装置の能力、材料の種類・管厚を考慮し

光硬化イメージ図

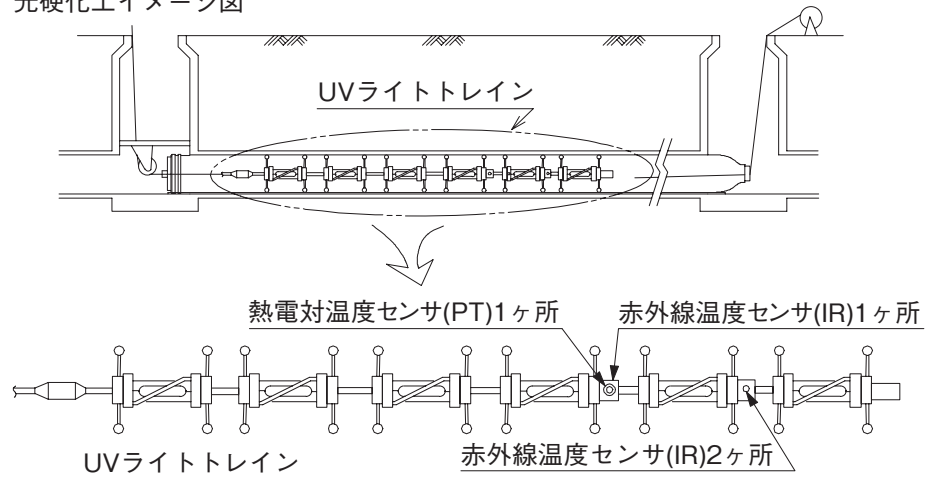


図-5 光硬化タイプの温度測定位置の一例

たUVライトが管内を進む速度が重要となります。

5. おわりに

管路更生材料の単独管の反転工法、形成工法に使用される熱硬化タイプ、光硬化タイプの材料についてと、その施工管理のポイントについてお話ししました。次回は、主に単独管では、熱形成タイプに使用される“熱可塑性プラスチック”についてさらに詳しく述べるとともに、施工管理のポイントについても説明を行います。

【参考図書】

- 1) 管きょ更生工法の品質管理 技術資料 2005年 (財)下水道新技術推進機構
- 2) だれでも使えるFRP - FRP入門 - 2002年 (社)強化プラスチック協会
- 3) FRP構成素材入門 2007年 「日本複合材料学会誌」
- 4) 第2版 危険物データブック 1993年 東京連合防火協会
- 5) 製品安全データシート 2000年改 石油化学工業協会
- 6) 製品開発に役立つ強化プラスチック材料入門 2007年 日刊工業新聞社

連載講座Ⅱ小委員会

委員長	宮川 恒夫	EX・ダンビー協会・技術委員
委員	瀬下 雅博	パルテム技術協会・技術委員
委員	安井 聡	FFT工法協会・技術委員
委員	村上 経司	EX・ダンビー協会・技術委員