連載講座Ⅱ

管路更生材の化学入門

第1回　管路更生材のしくみ

1．はじめに

下水道の管路更生は昭和50年代後半に最初に施工され、20数年が経過しています。平成19年度の実績は440kmで、その間の累計は3800kmに達しましたが、下水道管きょの総延長の1％にも満たしません。人孔と人孔の間を改築更新する管路更生工法は28工法が㈶下水道新技術推進機構の建設技術審査証明を取得しています。これらの中で単独管（自立管と二層構造管）の更生材の化学について全3回で紹介していきます。

2．管路更生工法の概要

管路の更生は、マンホールを用い、既設の管を掘らずに、既設管内に新たな管を築造する必要があります。更生管材料は、マンホールから既設管路内に更生管を挿入する時には材料が柔軟である必要があり、その後、最終的には土圧や地下水圧に耐え、しかも耐久性がある硬くて強い必要があります。現在では、① 液状の熱硬化性樹脂を円筒状の含浸用基材に含浸させた材料を既設管きょ内に挿入し、管に密着させた状態で加熱して更生管を形成する方法、② 熱可塑性材料に熱を加えて柔らかくし既設管路内に挿入し、その後、冷却固化させ更生管を形成する方法があります。

管更生工法を、ライニング後の構造で分類すると単独管と複合管に分かれます。ここでは、単独管に使用される材料について説明します。単独管は、損傷している既設管きょ内に反転工法、形成工法で構築したプラスチック製の更生管です。

反転工法を成形方法別に分類しますと熱硬化タイプと光硬化タイプに分かれます。また、形成工法を成形方法別に分類しますと、熱硬化タイプ、光硬化タイプ、熱形成タイプに分かれます。

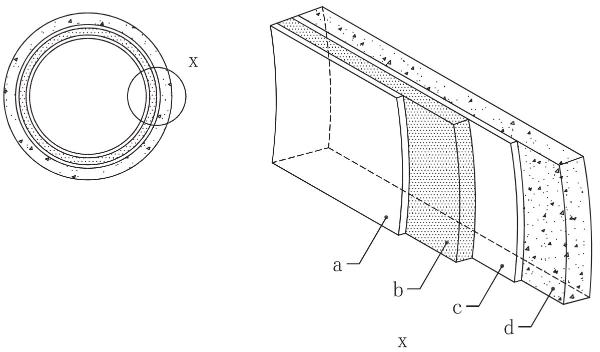
熱硬化タイプは含浸用基材（ガラス繊維や有機繊維不織布等）に熱硬化性樹脂を含浸させた筒状の更生材を反転あるいは引き込み方法により既設管きょ内に挿入し、更生材内部から空気圧や水圧等で既設管内に密着した状態のまま、温水や蒸気等で樹脂を硬化させて更生管を構築する方式です。

光硬化タイプは含浸用基材（ガラス繊維や有機繊維等）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路内に挿入し、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。

熱形成タイプは既設管路に挿入可能な変形断面形状にした熱可塑性樹脂（塩化ビニル系樹脂）を蒸気で軟化させ、引き込み方法により既設管路内に挿入し、蒸気圧等で拡径させ、既設管内面に密着した状態のまま冷却固化することで更生管を構築する方法です。

3．更生材の構成

ここでは、実際に既設管路内に構成された更生管の構造と各構成材料のおもな成分を説明します。熱硬化タイプあるいは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。更生材は少なくとも樹脂と含浸用基材からなり、さらに、機能性を向上させる目的などから、付加されるものとして、強化材、インナーチューブまたは仮設インナーチューブとアウターチューブから構成されています。仮設インナーチューブとは、施工後に取り除かれるチューブのことです。含浸用基材に含浸させる樹脂は、熱硬化性プラスチックであり、主に不飽和ポリエステル樹脂、エポキシ樹脂、ビニルエステル樹脂が用い

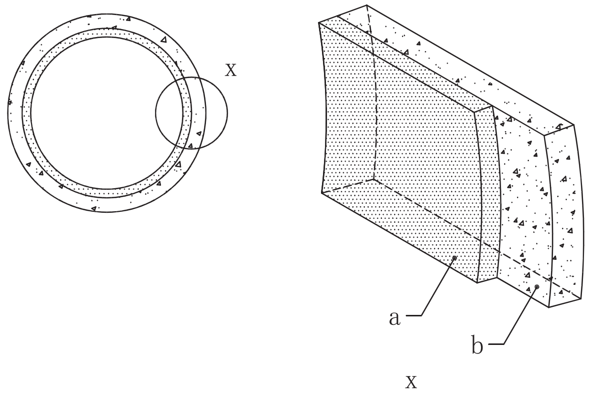


a　インナーチューブ又は仮設インナーチューブ
b　複合品（含浸用基材や強化材と樹脂）
c　アウターチューブ
d　既設管

図−1　熱硬化タイプ、あるいは光硬化タイプで施工された更生管構造

表－1　各構造体に使用される材料

構　造　体	材　　　料
熱硬化性プラスチック	
樹脂タイプ	不飽和ポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂、エポキシ樹脂
充填材	なし、無機充填材、有機充填材
硬化システム	熱硬化、光硬化、自然硬化
含浸用基材 / 強化材	ガラス繊維：耐酸ガラス繊維 高分子繊維：ポリエステル繊維、ポリアミド繊維、ポリプロピレン繊維 上記繊維の組み合わせ
インナーチューブ	ポリエチレン樹脂、ポリアミド樹脂、ポリエステル樹脂、ウレタン樹脂 耐酸性があり、下水道に用いた時に問題のないこと。
仮設インナーチューブ	ポリエチレン樹脂、ポリアミド樹脂
アウターチューブ	ポリエチレン樹脂、ポリアミド樹脂
熱可塑性プラスチック	ポリ塩化ビニル



a　熱可塑性樹脂パイプ
b　既存の配管路

図－2　熱形成タイプで施工された更生管構造

られます。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、マット状物、織物があり、また、その混合材料からなることもあります。

熱形成タイプで施工された更生管の構成を図－2に示します。更生材は熱可塑性プラスチックである塩化ビニル系樹脂からなっています。

表－1に各構成材の材料として使用する主材料等を記します。

4. 更生材について

管更生に使用されている材料には、プラスチックと、有機繊維、ガラス繊維などがあります。ここで、プラスチックについて、少し詳しく述べたいと思います。

プラスチックとは、ギリシャ語のPlastikosという言葉に由来しています。このPlastikosとは「粘土などの柔らかな材料で物などを造ること」を意味します。

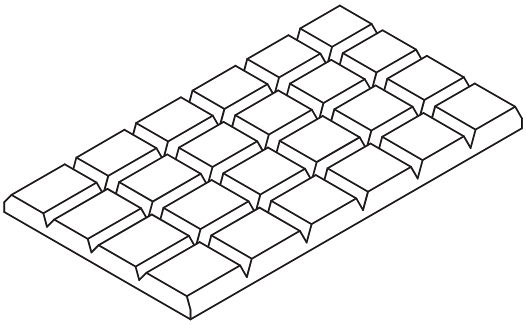
Plastikosを語源とする英語のPlasticも、「形を作ることができる」という意味の形容詞です。つまり、プラスチックという言葉は、ものの性質を表す言葉であり、この性質のことを、日本語では可塑性または単に塑性といいます。可塑性とは「力を加えて変形させたとき、変形したままの状態になる物質の性質のこと」という意味です。

プラスチックのことを合成樹脂とも言います。樹脂とは、松ヤニや漆のような樹木から出る樹液が固まったものです。こうした自然から得られる樹脂のことを天然樹脂といいます。この天然樹脂の特性をもつ物質が人工的に作り出されると、それらを天然樹脂に対して合成樹脂と呼ぶようになりました。

現在使われている多くのプラスチックは、原料に熱を加えて変形させたあとに冷やして固めるタイプのものと、原料に熱を加えて固めるタイプのものがあります。前者は可塑性を利用しているので熱可塑性プラスチック、後者は熱で固める性質を利用しているので熱硬化性プラスチックといいます。

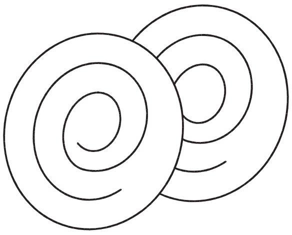
熱可塑性プラスチックと熱硬化性プラスチックは、チョコレートとクッキーによく例えられます。チョコレートは、チョコレートそのものを融かした原料を、型に入れて冷やして固めて作ります。出来上がったチョコレートに再び熱を加えますと、もとの原料のように融けてしまいますが､融けていても、固まっていても、チョコレートにかわりはありません。

熱可塑性樹脂（チョコレートタイプ）



熱を加えると融け、冷やすと固まる

熱硬化性樹脂（クッキータイプ）



熱を加えて固める。
再加熱しても元の原料には戻らない

図－３　熱可塑性プラスチックと熱硬化性プラスチックの比較

一方クッキーは、小麦粉、バター、砂糖などの原料を混ぜたものを、オーブンなどで焼いて固めて作ります。できあがったクッキーに再び熱を加えても、もとの原料に戻ることはありません。クッキーの原料と、できあがったクッキーは違うものなのです。熱可塑性プラスチックと熱硬化性プラスチックの大きな違いは、チョコレートタイプかクッキータイプかということです[1)]。

プラスチックとはどのような物質でしょうか

プラスチックを考えていくと、高分子、モノマー、ポリマー、重合という単語がでてきます。プラスチックがどのような構造を持つ物質であるかを検討します。

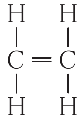
中学の理科の授業で習いましたが、私たちの体も含めて、身の回りにあるすべてのものは原子からできています。自然のものも、人工的に作られるものも、すべての物質は原子が組み合わさってできているのです。原子と原子が結びついたものを分子といいます。例えば水は、水素原子２つと酸素原子１つからなる分子からできています。水は小さな分子でできていますが、物質には大きな分子からできているものもあります。例えば、生物の体を作っているたんぱく質、脂肪、砂糖、デンプンは、極めて大きな分子からできています。この大きな分子を高分子といいます。

プラスチックも高分子ですが、プラスチックは簡単な分子を人工的にたくさん繰り返しつなげて作られた高分子です。そのため、プラスチックのことを合成高分子ともいいます。

例えば、熱可塑性プラスチックの代表的なポリエチレンというプラスチックは石油から作られる炭素原子２つと水素原子４つからなるエチレンという化合物から作られます。エチレンの分子をたくさんつなげて作ったものが、ポリエチレンです。図－４にエチレンとポリエチレンの構造を示します。エチレンのような簡単な分子が繰り返し結合したものをポリマーといいポリマーの「ポリ」は、「たくさん」という意味です。ポリエチレンの構造をみると、エチレンの分子が繰り返しつながっていることがわかります。この繰り返しの最小単位のことをモノマーといいます。モノマーの「モノ」は、「1つ」という意味です。このモノマーが繰り返しつながったものがポリマーなのです。

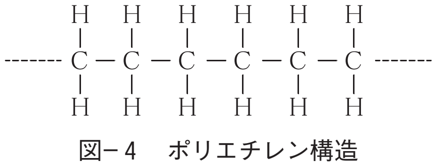
モノマーをつなげて、ポリマーにする化学反応のことを重合といいモノマーの繰り返し数のことを重合度といいます。高分子の大きさを表すのに分子量という値が用いられます。分子量とは、分子を構成する原子量を全て足したものです。

エチレンの分子構造



H:水素原子
C:炭素原子

ポリエチレン構造



図－４　ポリエチレン構造

熱硬化性プラスチック

熱硬化性プラスチックは、いくつかの原料を型に入れて、加熱して作るタイプのプラスチックです。このとき原料が化学反応を起こし、重合などにてプラスチックとなります。すなわち、加熱して固める時点ではじめてプラスチックとなるものです。熱硬化性プラスチックの樹脂原料は比較的低分子量で、化学反応する手（官能基）の数が３以上の化合物（液体状が多い）から成っています。硬化剤や触媒または熱あるいは光の作用によって、化学反応する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になります（三次元網目構造）。構造が三次元網目であるので、加熱すると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。熱硬化性プラスチックは耐熱性が優れ表面硬度も大きいですが、脆い性質もあわせもっています。

硬化収縮の低減と脆性の改善のため、一般には充填材や強化材を併用されます。管更生に用いられる樹脂は、不飽和ポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂、エポキシ樹脂があります[2),3)]。

不飽和ポリエステル樹脂

不飽和ポリエステルは無水マレイン酸とプロピレングリコールをほぼ同等の割合で配合し、200℃前後の高温で混合加熱して､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が混合したものから成り立っています。この不飽和ポリエステル樹脂に硬化剤である有機過酸化物を添加します。この時、樹脂の硬化させる方法に応じて、適切な分解温度の硬化剤や硬化形態（例えば光で硬化させる）を選定して使用されます。熱硬化タイプの管更生工法で使用されている熱硬化性プラスチックは、ほぼ、中温硬化用の硬化剤を使用し、分解する温度に達してから、ある一定温度保つことにより、硬化剤が分解し、樹脂の反応を活性化させ、不飽和ポリエステル樹脂は硬化します。また、光硬化タイプの硬化剤では、一定の光の波長等で分解が発生し、硬化反応を進めます。このため、施工現場では、温度あるいは光源の管理が必要になってきます。不飽和ポリエステル樹脂の代表的な組成を表－２に示します。

不飽和ポリエステル樹脂の硬化の仕組みは以下のように行われます。

① 有機過酸化物の分解
② スチレンの二重結合への付加
③ ポリエステルの不飽和基への付加と進む
④ ②③が連続して進んで、不飽和ポリエステルの分子間をスチレンが架橋した構造を形成

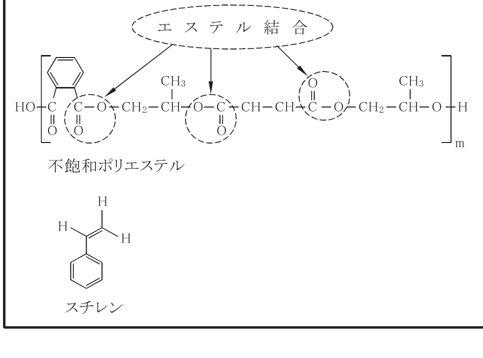
このように、不飽和ポリエステル樹脂をＡ、硬化剤をＢで表すと、硬化物は、ＢＡＡＡＡ…という形になるので、Ｂの影響はほとんどなく、樹脂Ａの特性が大きく反映した物になります[2),3)]。

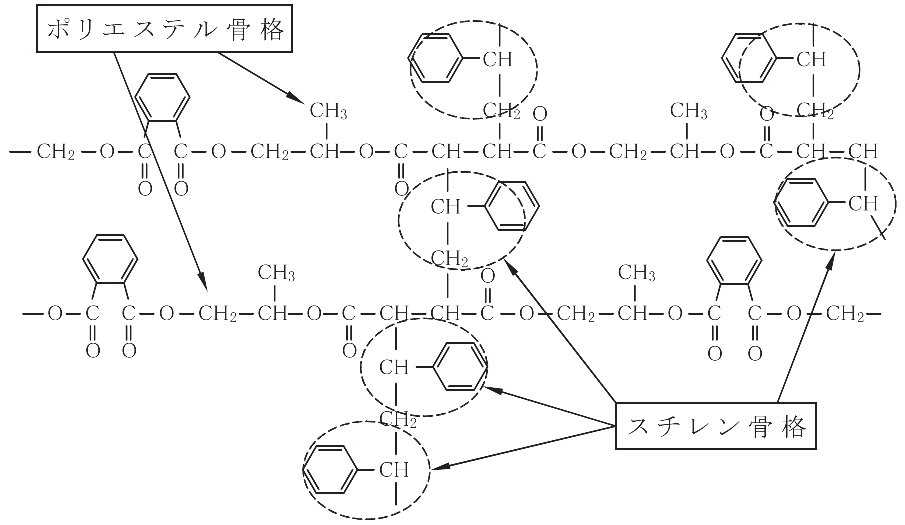
代表的な不飽和ポリエステル樹脂の構造を表－２に、その反応後の模式図を図－５に示します。

ビニルエステル樹脂

ビニルエステル樹脂は、外観も、使い方も、不飽和ポリエステル樹脂と見分けがつきません。不飽和ポリエステル樹脂の一種と考えてもよいくらいです。ベース樹脂は、エポキシ樹脂のエポキシ基の部分をアクリル化したものであるため、エポキシアクリレートともいいます。不飽和ポリエステル樹脂に比べると、一般的に耐蝕性はいいですが、価格は多少高くなっています。

表－２　代表的な不飽和ポリエステル樹脂と代表的な硬化剤

代表的な不飽和ポリエステル樹脂		代表的な硬化剤
	常温用	① メチルエチルケトンパーオキサイド ② ベンゾイルパーオキサイド
	中温用	① t-ブチルパーオキシ2エチルヘキサノエート ② パーオキシカーボネート系，他
	高温用	① ベンゾイルパーオキサイド ② t-ブチルパーオキシベンゾエート
	光硬化	① アセトフェノン誘導体 ② ベンジルケタール系



図－５　硬化樹脂の化学構造の模式図例（架橋構造）

エポキシ樹脂

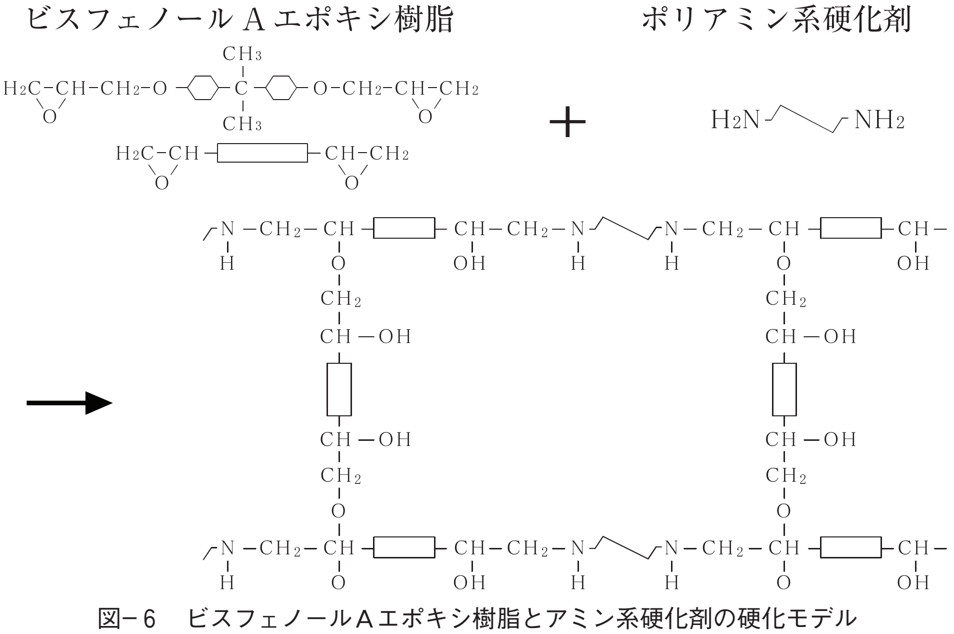
エポキシ樹脂とは、分子内に２ヶ以上のオキシラン環（エポキシ基）を有する化合物の総称で、主として､接着材あるいは電子部品として用いられます。ビスフェノールＡ型エポキシ樹脂は、汎用樹脂として、エポキシ樹脂の半分以上を占めており、単にエポキシ樹脂といえば､一般に、この樹脂をさします。この樹脂はビスフェノースＡとエピクロルヒドリンとをアルカリの存在下で反応させて製造させます。

エポキシ樹脂の主反応は、樹脂をＡと硬化剤をＢとしますと、ＡＢＡＢＡＢ…というように、交互につながっていくものです。このため、硬化したものの性質の半分は硬化剤で決まります。例として、エポキシ樹脂とポリアミン系硬化剤の硬化反応を図－６に示します。

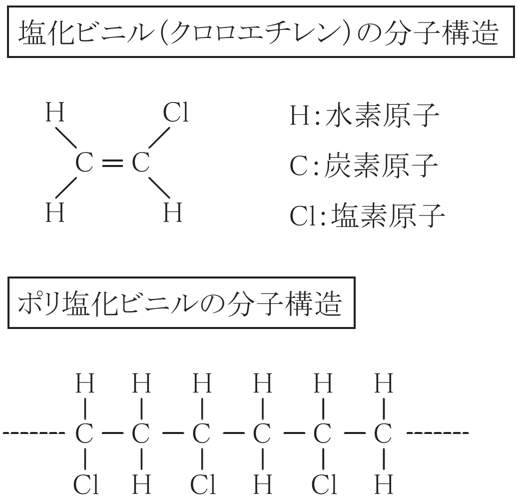
熱可塑性プラスチック

熱可塑性プラスチックは、さきほどの例のポリエチレンに代表されますが、管更生として形成工法で使用されている材料はポリ塩化ビニル（塩化ビニル樹脂とも言います）です。構造を図－７に示します。

ポリ塩化ビニルは塩化ビニル（クロロエチレン）を重合し、ポリ塩化ビニル素材を製造させ、このポリ塩化ビニル素材を加熱してどろどろに融かし、それを型に入れて冷却することによって目的の成形物を製造します。塩化ビニルを重合させただけの樹脂は、硬くて脆く、紫外線などにあたると分子を構成する塩素原子がはずれて劣化黄変しやすいため、柔らかくする成分（可塑剤）と、劣化を防ぐ安定剤を加えます[4)]。工場であらかじめ､作られたプラスチック素材を融かして固めるだけなので、品質が安定



図－６　ビスフェノールＡエポキシ樹脂とアミン系硬化剤の硬化モデル



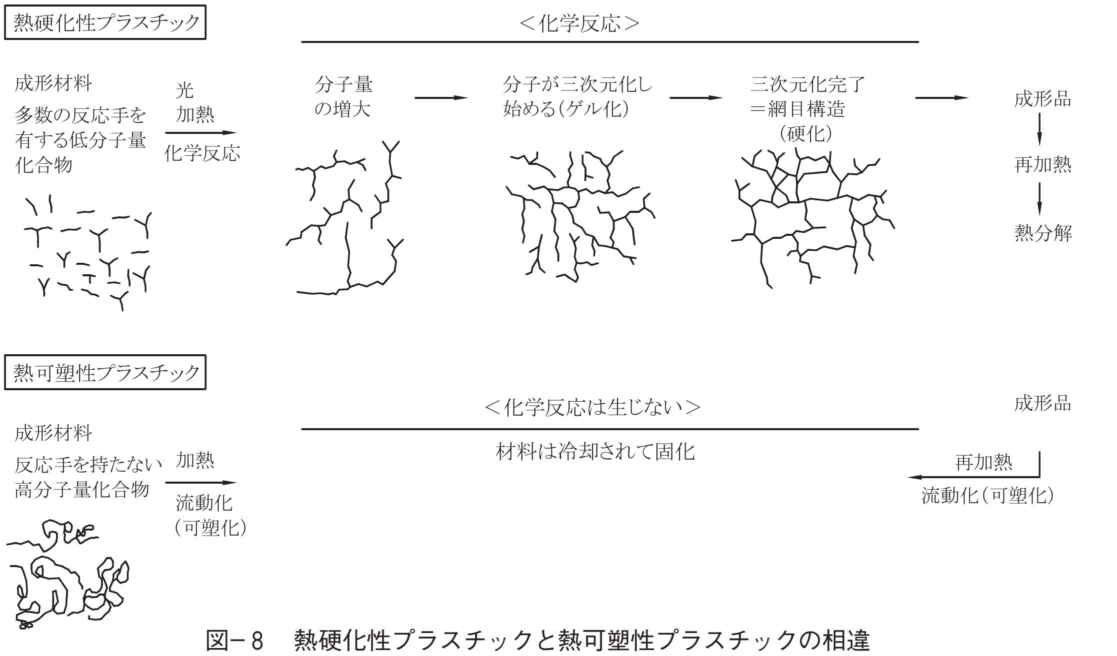
図－7　ポリ塩化ビニルの分子構造

したプラスチック製品を安価で大量に作ることができます。でき上がったプラスチック製品は再加熱すると、柔らかくなり、さらに温度を上げるとどろどろの融けた状態にもどります。熱可塑性プラスチックを用いる形成工法の場合も、柔らかくする温度まで、温度をあげ、蒸気圧等で拡径させ、既設管内面に密着した状態のまま冷却養生する必要がありますので、施工現場での温度管理は必要になります。

熱可塑性プラスチックは化学反応をする手（官能基）を持たない線状で、分子量が数万以上の高分子量の固体ですが、加熱に伴って分子の運動が活発になり、軟化し、溶融します。

熱硬化性プラスチックと熱可塑性プラスチックを比較し、図－8にまとめました。

次回からは、これら“熱硬化性プラスチック”および“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っていきます。



図－8　熱硬化性プラスチックと熱可塑性プラスチックの相違

【参考図書】
1)　よくわかる最新プラスチックの仕組みとはたらき　2008年「秀和システム」
2)　FRP構成素材入門　2007年「日本複合材料学会誌」
3)　プラスチック読本　2002年「プラスチック・エージ」
4)　ポリ塩化ビニル　その基礎と応用　㈳近畿化学協会ビニル部会編　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