

# 構造物へのプラスチックの応用

資 料

山 本 宏\*

## ま え が き

現在土木技術者は、鉄鋼・セメント・アスファルト・石材・木材等を用いて構造物を作っているが、ここで目を転じると、近年プラスチックが非常な発達をしてきて、応力的に問題のないところにはすでに使用されつつあるが、最近では、これを応力のかかる部分にも利用しようとする傾向にあるという事実がある。

一般に、構造技術者が日常念頭におくことは、

- (1) 構造物の軽量化
- (2) 各種工作の簡便化

ということであろう。この観点よりプラスチックの構造物への利用について考えてみると、

(1) 構造物の軽量化に関しては、ポリエステル樹脂をガラス繊維で補強した、いわゆる強化プラスチックでは、引張強さ 42 kg/mm<sup>2</sup>、圧縮強さ 48 kg/mm<sup>2</sup> で、比重 1.8 という軽くて強いものが製造されるようになってきているので、これを構造物として用いることはできないか？

(2) 各種工作の簡便化ということについて、従来部材の接合は、ボルト・リベット・溶接等で行なわれているが、これを接着によることはできないか？ということが考えられる。

このように、プラスチックを構造物に利用する場合には、

- ① 鋼・コンクリートその他の材料に代る新しい構造物材としての利用
- ② 接着材としての利用

が取りあげられるのである。最近 Engineering Plastics という言葉が現われた。これに対する邦語はまだないようであるが、プラスチックの工業用、構造物としての利用の傾向の一端を示していると思われる。

従来、プラスチックについては、主としてそれを供給する化学技術者にその多くを負っていた。したがって、必ずしも満足すべきデータが揃っていないとはいいがたく、構造技術者もそろそろこの問題にタッチしてよい時機にきているのではあるまいか。本文は、構造物への

\* 正会員 工修三菱重工業 KK 広島研究所・広島大学工学部講師

プラスチックの応用を目標に、構造技術者の目でこれを見、その概念的な説明を試み参考に供せんとするものである。ただ、プラスチックの強度その他のデータは、現在統一的に確立されたものがあるとはいいがたく、それぞれの場合で実験を行なわざるを得ない状態であるので、以下の記述においては、材料力学的諸データは、説明の都合上必要な場合に代表値を示す程度にとどめる。

## 1. 構造物としての利用について

構造物として利用した場合の利点は、

- (1) 軽量であるために死荷重が減少する
  - (2) 強度はコンクリートより大きく、鋼に匹敵する
  - (3) 圧延の必要がなく、任意の断面の部材を作ることが容易で、寸法精度も高い
  - (4) 死荷重が小さいために、運搬・組み立ても容易である
  - (5) 耐久性がよい
- などをあげることができる。

しかし、プラスチックは、弾性率が小さいという欠点を持っている。また、価格も現在では単位容積あたり鋼の 1.5~2.0 倍であるが、最近のプラスチックの生産計画などをみれば、大量生産のきざしも見えており、将来は鋼より安くなることが考えられる。またこの分野の改良発展はめざましいものがあるので、今後さらに高強度のもの開発も期待される。したがって、その性質を有効に利用すれば、構造物として鋼およびコンクリートとともに重要な位置を占めるようになると思われる。

### (1) 構造物の軽量化

構造物をいかにして軽くするかという試みは、古来、航空機・船舶・自動車等の“動く構造物”から、土木建築の“動かない構造物”に至るまで、真剣に検討されてきた。軽量化をはかるためには、軽くて強い材料が必要であるが、ただ単に軽いだけではだめである。必要な力学的性質を十分に果たさなければならない。第一は強度であり、第二は剛性の問題である。

各種材料の軽量メリットを検討するには、上記の性能

表-1

部材の形状	荷重	破壊の形	軽量メット
棒	引張	強さ	$\sigma_B/\rho$
棒	引張	伸び	$E/\rho$
棒	曲げ	強さ	$\sqrt{\sigma_B}/\rho$
棒	曲げ	たわみ	$\sqrt[3]{E}/\rho$
棒	圧縮	座屈	$\sqrt{E}/\rho$
平板	圧縮	座屈	$\sqrt[3]{E}/\rho$
円筒	圧縮	座屈	$\sqrt{E}/\rho$
円筒	曲げ	座屈	$\sqrt{E}/\rho$
円筒	ねじり	座屈	$E^{2/5}/\rho$

$\sigma_B$ : 引張強さ,  $E$ : ヤング率,  $\rho$ : 比重

に対応する材料力学的量を比重で除した量が普通用いられる。棒・平板・シェルの強度, 変形, 座屈に対する材料のメリットを示すファクターをまとめると表-1のようになる。部材の形状, 荷重の種類, 部材のはたすべき力学的性能などによって,  $\sigma_B/\rho$ ,  $\sqrt{\sigma_B}/\rho$ ,  $E/\rho$ ,  $\sqrt{E}/\rho$ ,  $\sqrt[3]{E}/\rho$  などにより材料のメリットが評価されるわけである。

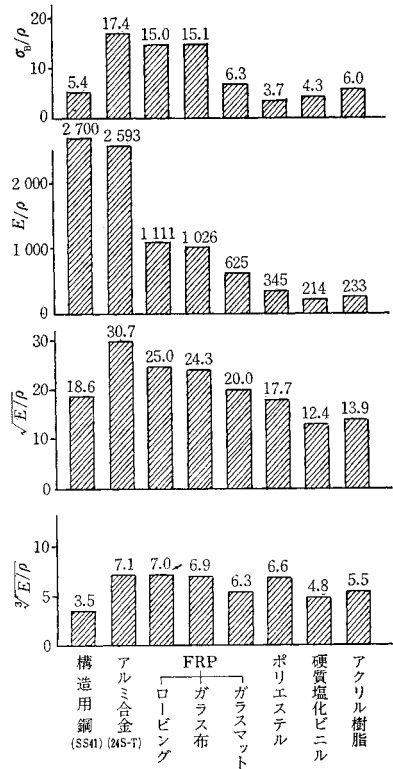
そこで, この評価方法によって代表的な材料を評価してみよう。表-2 は代表的構造材(金属およびプラスチック)の機械的性質をまとめたもので, これにより上記の各メリットを図示すると図-1のようになる。これによると, 強さメリット  $\sigma_B/\rho$ ,  $\sqrt{\sigma_B}/\rho$  ではプラスチック単体は鋼におとるが, これを強化したもの(図中FRPと表示)は, アルミ合金に迫り鋼をりょうがしている。座屈メリットも同様であるが, 鋼性メリット  $E/\rho$  は強化されたプラスチックでも金属材料に比して小さい。このことはプラスチック材料の欠点であることは銘記しておかねばならない。

(2) プラスチックス

プラスチックの性質については, 本誌に松尾教授がすでに述べておられるので, 特にふれないが, 要するにこれを力学的にみた場合,

- (1) 引張強さが小さい
- (2) ヤング率が小さい

図-1



- (3) 圧縮強さは相当大きい
  - (4) せん断強さは相当大きい
- ということが出来る。(1), (2)の性質が, プラスチックを構造材として考える場合の大きな欠点なのである。

(3) 強化プラスチック

圧縮強さは大きくて, 引張強さの小さい既存材料としてはコンクリートがある。そこでプラスチックの強化材として, 樹脂中へ有機または無機材料で作った繊維を入れたらよいと考えるのは, コンクリートに対する鉄筋の考え方から自然の類推であろう。樹脂と繊維の最もよい組み合わせを探す研究の結果, 不飽和ポリエステルとガ

表-2

材	料	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	ヤング率 (kg/mm <sup>2</sup> )	圧縮強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	曲げ強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	せん断強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	シャルピー衝撃値 (kg·cm/cm <sup>2</sup> )	比重
金属	構造用鋼 SS 41	42	21 100	—	—	—	1 500	7.8
	アルミニウム合金 24 S-T	47	7 000	—	—	28	280	2.7
FRP*	朱子織 ガラス布	33	2 000	28	50	8	130	1.8
	ロービング布	27	2 000	17	24	16	200	1.8
	平織 ガラス布	20	1 600	17	26	8	100	1.7
	ガラスマット	10	1 000	15	15	8	100	1.6
プラスチック単体	ポリエステル (注型)	4.1	380	16	11	6	3	1.1
	硬質塩化ビニル	6.0	300	10	10	4	3	1.4
	メタクリル樹脂	7.2	280	10	10	4.5	3	1.2

\* ポリエステル FRP, それぞれの補強材に対する性能値は代表値の一例を与えたもので, ガラス含量, 成形法によりかなり異なる。

ラス繊維の組み合わせが構造用としてはすぐれた性質をもつことが発見され、今日強化プラスチックといえば、この組み合わせを指すほど代表的なものになっている。強化プラスチックは Fiberglass Reinforced Plastics の頭文字をとって普通 FRP と呼ばれている。

a) FRP 材料

① 合成樹脂：合成樹脂は熱に対する性質から、

a) 熱可塑性樹脂 (Thermo-plastic Resin)

b) 熱硬化性樹脂 (Thermo-setting Resin)

に分類される。

前者は普通、粉、ペレット、板または塊状の固体であって、加熱すれば軟化または溶解して、流れたり変形したりする。いわゆる可塑性を示し冷やせば元にもどる。この変化はちょうどチョコレートに似ていて、単なる物理的変化である。

一方、後者はきわめて粘調な流体、溶液、粉または塊状であり、加熱（硬化）前の性質は熱可塑性樹脂と同じである。すなわち、温度をあげれば変形したり流れたりするし、それぞれの化学的性質に適合する溶剤にもとける。いわば生の卵に相当するが、これを加熱すれば、ゆで卵のようになって再加熱しても溶解せず、溶剤にもとけなくなってしまう。すなわち化学的変化によって固化するわけで、これが熱可塑性樹脂と本質的に異なる点である。

これを分子構造的に言えば、熱可塑性樹脂は1次元直鎖状構造であり、熱硬化性樹脂は3次元網状構造を持つことである。このため熱硬化性樹脂は構造が安定しており、再加熱しても容易に架橋が崩れないので、変形も小さく不溶不融性をもち強度も大きい。

熱可塑性樹脂にはつぎのものがある。

塩化ビニル樹脂、塩化ビニリデン樹脂、酢酸ビニル樹脂、ポリビニルアルコール、ポリビニルアセタール、ポリビニルメチルエーテル、メタクリル酸樹脂（アクリル樹脂）、ポリエチレン、ポリスチレン、飽和ポリエステル、フッ素樹脂等。

熱硬化性樹脂は、

フェノール樹脂、ユリア樹脂、メラミン樹脂、フラン樹脂、アルキド樹脂、不飽和ポリエステル、エポキシ樹脂、ポリウレタン、ケイ素樹脂等。

つぎに成形性について考えると、ユリア、フェノール等の縮合型のもの、成形の際に型へ入れて加熱と同時に高圧力をかけねばならない。加熱するのは粘度を低くして流動性をまし、型の隅々まで樹脂を行きわたらせ、かつ重合を促進させるためである。高圧力をかけるのはこれが縮合型であるため、重合の際に水・アンモニア等の副生成物を生ずるからである。もし圧力をかけなければ副生成物によるガスの気泡が樹脂内に残り、そのため

強度や腐食に弱くなってしまう。

一方、プラスチックを強化するのにガラス繊維を使用すると述べたが、ガラス繊維は強度は圧倒的に大きい、比較的もろいので、高压成形を行なったのでは繊維と繊維が重なって曲げられ折損してしまう（これと関連して、この重なりによる曲げ応力は太い繊維ほど大きくなるので細いものがよく、また細い方が同じ容積—重量—の下では表面積が大きくなって樹脂との接触面積が大となり結合力をますことができるので、普通5~7μのものを用いられる）。

以上によって、補強繊維との関連において樹脂としては低圧できれば無圧で成形硬化できるものがよく、それには重合の際に副生成物が生じないものがよいわけである。安定性と強度をも考えると、不飽和ポリエステルはこれら条件に好都合な樹脂である。

ポリエステルに有機過酸化物を触媒として加え加熱すると、活性ラジカルを生じ重合が開始され3次元構造をとって硬化する。このプロセスにおいて加熱操作を代行するものがあれば室温で成形されて便利である。この目的に使用されるのが促進剤である。不飽和ポリエステルはこれが可能で室温で大形成形品を容易に作るができる。これを要するに不飽和ポリエステルは、

i) 低圧成形ができる

ii) 室温硬化樹脂である

iii) 3次元網状構造をもつので、工業用・構造用特性がすぐれている

などのためにFRP用樹脂として使用されるわけである。

② 補強材：補強材としてはガラス繊維が用いられる。この他にも石綿・合成繊維等があるが、ガラス繊維が用いられるのは強度が非常に大きいからである。ガラス繊維の性質は、

i) 無機繊維である。したがって不燃性である

ii) 耐久性が大

iii) 非吸水性、非吸湿性である

iv) 繊維としては伸びが小さい。またもろくて耐摩耗性が小さい

v) 金属に比べると伸びと強度が大きいので、衝撃に耐える力が大きい

以上のような諸条件を勘案のうえ選出されたのが、＜不飽和ポリエステルとガラス繊維の組み合わせ＞である。特殊な場合にはこの他の組み合わせも考えられるが、普通一般にFRPといえば、この組み合わせを指す。

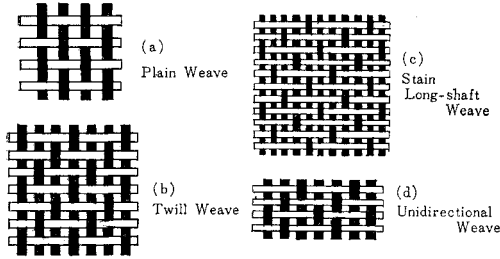
さて、FRPに使用されるガラス繊維は、

○ガラス布

○ガラスマット

の形で用いられる。

図-2



ガラス布は図-2に示すように、平織(Plain Weave)、綾織(Twill Weave)、朱子織(Stain Long-shaft Weave)、一方織(Unidirectional Weave)などがあり、それぞれ力学的特質を有する。一般に、平織→綾織→朱子織→一方織の順に強度が増加する。

ガラス布は強さは大きい、原糸および紡織の面で価格が高くなる。さらに成形品の厚みをだすためには、ガラス布を幾枚も重ねなければならない。このためにガラス布ほどの強度を要しないものにはマットが使われる。これは、ガラス布のように織らずに繊維を交錯させたり、束にしたり、無定方向に散布交錯させたりしたものである。

なお、FRPはガラス繊維と合成樹脂との結合によってできるものであるから、その接着が十分でないとFRPの特質である強度がでない。接着をよくするために、ガラスの表面には処理剤が施される。この処理剤にはボラン(Volan)とかシラン(Silane)などがある。

b) FRPの機械的性質

樹脂に比べればガラス繊維の強度は非常に強く、したがって製品中に含まれるガラスの量が多いほど強くなる。しかしこれには限度があって、ある限度以上にガラスを多くすればかえって強度は低下する。たとえば、ガラスマットの場合にはガラス含量が50~60%のときに

最も強く、それ以上では低下している。これはガラス含量を多くするためには圧力をかけねばならず、圧力が30~50 kg/cm<sup>2</sup>ぐらいになるとガラス繊維自体の接触によって相互に破断がおこり、かえって強度が低下するためと考えられる。なお参考のために、実用上FRPの規準を示すと考えられるアメリカの軍用規格MIL-P-17549 Aに示されたガラス含量と強度特性の関係を図-3に示す。

表-3にFRPの機械的性質の一例を示すが、その他の性質を列記すると、

(1) 一般にFRPは100°C程度までは使用可能である。ごく短時間であれば、さらに高温にも耐えられる。

(2) 10<sup>7</sup>回における曲げ疲れ強さは、引張強さの25~30%、曲げ強さの20~25%程度である。一般的に静的強さの高い材料ほど疲れ強さと静的強さの比は小さくなり、逆に静的強さの低いものほど疲れ強さが案外大きい。これはガラス積層板ではマット積層板に比べて補強効果が強く、逆に応力集中度も大きいため疲れ強さにきてくるものと思われる。

(3) FRPのS-N曲線は10<sup>7</sup>回では水平にならな

図-3

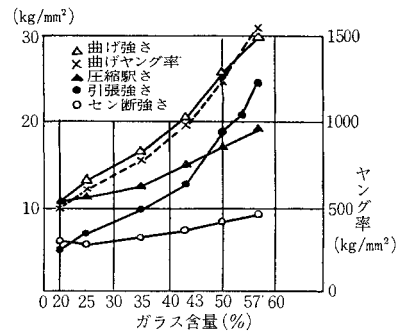


表-3 ポリエステル・ガラス積層板の機械的性質 (タテ糸方向)

補強材の構成*	成形法	板厚 (mm)	ガラス含量 (%)	標準状態の値** (kg/mm <sup>2</sup> )						湿潤状態の値*** (kg/mm <sup>2</sup> )						
				$\sigma_t$	$E_t$	$\sigma_b$	$E_b$	$\sigma_c$	$\sigma_s$	$\sigma_t$	$E_t$	$\sigma_b$	$E_b$	$\sigma_c$	$\sigma_s$	
12 SC	プレス	3	63	39.8	—	52.7	2 120	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M	〃	3	20	6.4	710	14.6	730	—	7.3	6.0	820	16.6	700	—	—	—
M	〃	3	25	8.2	850	20.0	900	—	8.3	8.0	830	23.2	830	—	—	—
2 PC+2 M+PC+2 M +PC+2 M+2 PC	手積み	10	28	8.5	—	15.6	660	13.1	—	7.3	—	16.2	650	14.4	—	—
PC+3 R+4 M+3 R+PC	〃	10	37	13.1	—	17.6	970	10.6	—	11.1	—	18.1	860	10.9	—	—
3 PC+2 R+4 M +2 R+3 PC	〃	10	40	6.8	—	18.1	820	10.4	—	9.2	—	17.9	830	10.2	—	—
C+M+C+M+C+M+C +M+C+M+C+M+C	〃	10	30	10.7	—	20.4	820	16.3	—	—	—	19.6	960	17.2	—	—
M+PC+R	〃	2	36	13.0	990	26.5	780	10.3	7.6	11.8	1 050	21.6	750	9.7	6.1	—
M+R+R	〃	2.3	45	19.2	1 200	28.1	870	10.2	10.4	16.2	1 190	21.9	870	9.6	7.7	—
28 SC	真空 バッグ	7	59	31.1	2 150	38.7	2 220	27.8	12.8	—	—	—	—	—	—	—

\* SC: 朱子織布, M: マット, PC: 平織布, R: ロービング布, 数字は層数を示す。

\*\*  $\sigma_t$ : 引張強さ,  $E_t$ : 引張ヤング率,  $\sigma_b$ : 曲げ強さ,  $E_b$ : 曲げ弾性率,  $\sigma_c$ : 圧縮強さ,  $\sigma_s$ : せん断強さ。 \*\*\* 30日間浸水。

い。すなわち疲れ強さに達しない。曲げ応力疲れでは $10^8$ 回で実用的な疲れ限度に達しているとみなすことができる。低温における疲れ強さは常温より大きく、低温における衝撃値の増加とともに低温域における構造材としての可能性を示す。ただし、高温では疲れ強さは低下する。

(4) FRP がプラスチックの一種である以上、多分にレオロジカルな性質を有しており、クリープについては考慮をあらわねばならない。初期ひずみ/クリープひずみの値は、ガラス布積層板で約 0.90 以上、マット積層板では、0.60 にまで低下するようである。

(5) FRP の耐衝撃性については、その最大弾性ひずみエネルギーは金属に比べるとかなり大きい(構造用鋼 SS-41,  $1.7 \text{ kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^2$ ; アルミニウム合金 24 S-T, 6.5; 朱子織ガラス布 FRP, 19.5; ガラスマット FRP, 5.1)。したがって、同じ衝撃エネルギーに対し、鋼構造は永久変形するのに、FRP は弾性復元する場合が多い。

この他にも、(a) 透光性があるので採光用に、(b) 電気絶縁性があるので電気部品に、(c) 電波を通すのでレードームに使われたりする。

#### (4) サンドイッチ構造 (Sandwich Construction)

先に、プラスチックは強さの割にヤング率が小さいと述べた。そのため強さを合わせた設計では剛性が低すぎ、剛性を合わせて設計すれば厚さを鋼の設計より増さねばならず、軽量化の効果がうすくなりコストも上がる。したがって、I ビームの考え方を導入すると、図-4 (b) に示す上下2枚の FRP 製表面材の間に、軽い、しかし圧縮・せん断等に耐える強さを有する心材を接着した構造が考えられる。これがサンドイッチ構造である。

心材として最も多く用いられるのは、0.04~0.12 の比重のもので、強さ以外にも使用目的によって電波透過性、吸湿性、しゃ熱性、しゃ音性などの性能が要求される。心材として広く用いられているものを大別すると、

- (1) ハニカム心材
- (2) 発泡プラスチック心材

になる。

ハニカム心材は金属または非金属製のシートをハニカ

図-4

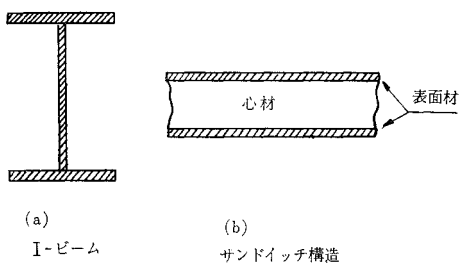
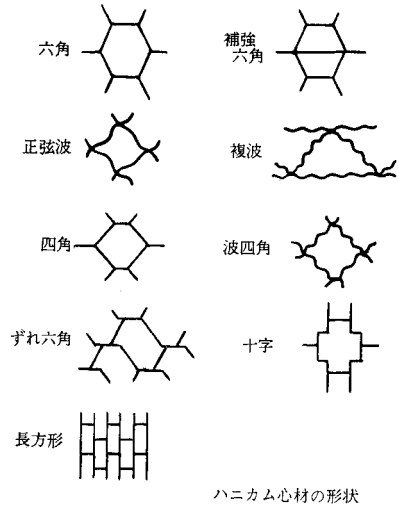


図-5



ム (honeycomb) 状に作ったもので、材料・厚さ・セルサイズ・セル形状により、密度・性質の異なったものが作られる。図-5 にその形状を示すが、六角形のものが最も多く用いられる。発泡プラスチック心材としては、ポリウレタンフォームと塩化ビニールフォームが普通用いられる。ポリウレタンフォームのように現場発泡させることのできるものは、心材の厚みを変化させる場合とか、心材の中にパイプなどをとおす必要がある場合には便利である。

## 2. 接着剤としての利用について

つぎに、接着剤としての樹脂の利用について考える。

もちろん接着にも長所と短所があるが長所としては、

(1) 接着に高温を必要としない

部材を接合するのに溶接のような高温を必要としない。ろう付けでも約 200°C が必要であるが、接着の場合は最高 200°C であって、加熱をきらう場合には常温でも接着できる。したがって熱による変形は少ないか、または全然ない。まして溶接時のような変質はない。

(2) 異種材料の接合が可能

異種材料はくぎ・カスガイ・ネジ・鉄などで接合はできるが、堅い材料同士に自ら限定される。溶接の場合には材料の溶接性の問題がある。接着の場合は、堅い材料と柔らかい材料の接合、柔らかい材料同士の接合も可能である。

(3) 複雑な形状の接合ができ、逆に構造を簡単にすることができる

(4) 接合部表面が滑らかで美しく、気密・水密になる

(5) 接合部の応力分布が一様になり、応力集中が小さくなって疲労強度が大きくなる

(6) 接着層は熱および電気の絶縁層になる

(7) 接着層は耐薬品性、耐食性である

(8) 製作費が軽減できる

があげられるが、欠点としては、

(1) 耐熱性に限度がある

接着剤はとくに耐熱性のよいものでも 200°C が限度であり、一般の熱硬化性樹脂では 120°C 程度、熱可塑性樹脂で 60°C までである。

(2) 接着剤の選定に注意を要する

接着強さは単に接着剤の強さだけではなく、被着材と接着材の種類およびその方法によって変わる。したがって、接着材の選定が必要となり、接着に適した細部設計が必要となる。

(3) 熱硬化性樹脂で接着すると、接合部を損傷しないで解体することができない。

(1) 接着剤の応用例

土木構造物に実際に応用されている例を二、三あげると、つぎのようなものがある。

a) 接着接合

西ドイツの Lippe-Seitenkanal にかげられた 2 つの橋梁(トラス)は、接着接合によっている。接着剤としてはポリエステル樹脂が使用されているが、はじめての試みであるために不慮の災害にそなえて小数の普通ボルトや高張力ボルトを併用している。報告によると、ガセットプレートはいちじるしく小さくてすみ、接着剤の材料費はきわめて安かったようである。

b) 接着合成桁

従来のジベルによる合成の代りに、接着剤で鋼桁とコンクリート床板を接着させて合成せしめようとするもので、わが国にもすでに一等橋 2 橋の架設例がある。接着合成桁の場合には、

① 従来のジベル合成に比べて、上フランジ全面で合

成効果がでるので応力・たわみ等が小さくなる

② プレキャストコンクリート床板を用いれば、接着強度の出る期間が必要なだけで、架設開始後交通に開放できるまでの期間が非常に短縮され、ある程度のプレハブ化が可能となる

などのメリットが生ずる。

その他コンクリートとコンクリートの接着、プラスチックとの接着など各所で行なわれているようである。

(2) 接着剤の種類

見方によっていろいろの分類ができるが、その種類を以下に述べる。

a) 硬化方法による分類

① 溶剤蒸発型：多くの接着剤は、溶剤溶液または水分散液である。これらの接着剤は接着後に溶剤または水が接合部の端から揮散するか、または材質自体に吸収されるかして、媒体の全部が消失すると固体の接着皮膜を形成して強度を示す。この硬化は純物理的であり、完全に可逆的である。接着後に溶剤または水が接触すると、接着材は軟化したり溶解して結合が破壊してしまう。一般に耐熱性に乏しく、硬化速度は周囲の湿度、温度、被着材の有孔性や含水量、さらに接合部の大きさ、加圧などによっていちじるしく影響される。

② 熱溶融型：この種の接着剤は加熱すると熔融するので、この状態で使用する。接合部が室温に冷却すると固化して強度がでる。ただし、これも完全に可逆的である。

③ 化学反応型：化学反応によって硬化する。しかもこの硬化は不可逆的であるので、構造物への利用という点で最も重要な接着材である。高い強度と剛性を有し、水・溶剤・熱・菌類に強く、きびしい条件下で強度と耐久性のある接合を可能にする。接着剤の化学変化は硬化剤を添加するか、熱を加えることによって生じる。

表-4 は上記を総括したものである。

表-4

硬化の種類	接着剤
完全に可逆的な物理変化による硬化	ケイ酸ソーダ、でんぷん、デキストリン、アスファルト、ゼラチン、セルロースエステル類、ビニルエステル類
主として可逆的な変化によるが、一部の化学変化をとともう硬化	カゼイン、大豆たんぱく、血漿、アルブミン
わずかに可逆的な物理変化をとともうが、主として化学変化による硬化	ユリア樹脂
ほとんど完全に不可逆的な化学変化による硬化	メラミン樹脂、レゾルシノール樹脂、フェノール樹脂、エポキシ樹脂

b) 接着剤の形態による分類

表-5 に示す。いずれを選ぶかは、設備・接合部の性

表-5

	形 態	特 長
液 体	もっともありふれた形態。事実上あらゆる配合に用いられる。溶剤分散液が主	適用が容易。使用者により粘度調整が可能
ペースト	稠度範囲が広い。配合に制限あり。この種の構造用接着剤は主として変性エポキシである	待ち時間が短いので高能率の生産組立に適す。せん断、クリープ強度が高い
粉 末	硬化を生ぜしめるには混合または加熱を要す	貯蔵性が長い。必要な量を混合する
しっくい	コテ塗り	穴埋め、非流動性
フィルム、テープ	支持体のあるものもないものがある。適用は、普通平滑な表面に限られる。硬化が容易	適用が早く、容易。むだや越出がない。均一な厚さが得られる

質等によってきめる。

c) 硬化温度による分類

表-6 のとおりである。

表-6

接着剤の種類	硬化温度
低温硬化性	20°C 以下
室温硬化性	20°C~30°C
中温硬化性	30°C~99°C
高温硬化性	99°C 以上

d) 化学組成による分類

表-7 にその一覧を示す。

① 天然接着剤：植物、動物基ならびに天然樹脂接着剤がこれに属するが、強度が低く紙・軽木材に用いられる程度。

表-8

種 類	概 要	特 性	被 着 材
フェノール樹脂	溶液、粉末、フィルム。硬化には熱圧を要す	金属、ガラスなど接着困難な多くの材料に対し接着性は高い。クリープ強度は良いが、引きはがし強度は低温ではかなり良、高温で弱い(-34°~93°Cの範囲)	金属、ガラス、合板その他の製品
レゾルシノールおよびフェノール・レゾルシノール樹脂	一般にアルコール・水の溶液。適度の圧力を用いて室温またはそれ以上の温度で硬化する	外部用として適当。水、カビ、菌、グリーン油、多くの溶剤に侵されぬ。接着強度は木材の強度程度。金属に直接結合せず	木材、プラスチック、紙、繊維物、繊維板
ユリア樹脂	通常、樹脂と硬化剤の2成分より成る。圧力下で硬化	他の熱硬化性のものほど耐久性はないが、かなりの範囲の実用条件に適す。一般に低コストで適用と硬化が容易	主として合板
メラミン樹脂	硬化剤と混合して用いる粉末。加熱硬化	耐久性、耐水性はフェノール、レゾルシノール樹脂に等しい。コストをさげるためにユリア樹脂を混合することあり。ユリア樹脂より耐熱性大	合板、その他の木材
ポリエステル	溶剤放出のない2成分型接着剤	化学薬品、湿気、熱、風雨に強い。電気的性質がよく、強度範囲が広い	金属、箔、プラスチック

エポキシ樹脂をのぞく。これについては表-9 参照。

② 熱可塑性接着剤：熱可塑性樹脂を基材とした溶剤溶液、または水分散液である。加熱冷却すると幾度も溶解固化する。大部分のものは0°Cでもろくなり、60°C以上で軟化する。クリープ抵抗が小さく、長時間にわた

表-7

	天 然	熱 可 塑 性	熱 硬 化 性	エラストマー	混 合 型
種 類	カゼイン、血漿アルブミン、でんぷん、ロジン、セラック、アスファルト無機質(ケイ酸ソーダ、リサージ・グリセリン)	酢酸ビニル樹脂、ポリビニルアルコール、アクリル樹脂、硝酸セルロース、アスファルト、オレオ樹脂	フェノール樹脂、レゾルシノール樹脂、フェノール・レゾルシノール樹脂、エポキシ樹脂、エポキシ・フェノール樹脂、ユリア樹脂、メラミン樹脂、アルキド樹脂	天然ゴム、再生ゴム、ブタジエン・ステレン、ネオプレン、ニトリルゴム、シリコン	フェノールリック・ビニル、ブチラール樹脂、フェノールリック・ビニルホルマール樹脂、フェノールリック・ネオプレン、フェノールリック・ニトリルゴム変性、エポキシ樹脂
主な形態	液体、粉末	液体(乾燥フィルムもある)	液体(あらゆる形態がある)	液体(フィルムもある)	液体、ペーストフィルム
強度特性	広範囲にわたるが一般に強度は低い。熱薬品に強い。湿気に弱い	65°~93°Cに良好。クリープ強度が低い。引きはがし強度はかなり良	93°~260°Cに良。クリープ強度が良。引きはがし強度はかなり	65°~204°Cに良。完全に溶解せず。低強度たわみ性が大	配合により両者の均衡した性質ともつ。一般に他の種類より広い温度範囲で強度が高い
主な用途	家庭用、一般用、硬化が早く、貯蔵期間が長い	外力をうけない接合部。キャップ、重ね合わせ、補強材の使用を要す	いくぶん高温で外力をうける接合部	軽量材料の外力をうけない接合部。曲げをうける接合部	最高かつもっとも苛酷な実用条件を満足せねばならぬ場所
もっとも普通の被着材	木材、紙、繊維物、食品包装、数種の金属およびプラスチック	すべての材料が対象となるが非金属が主。とくに木材、レザー、コルク、紙など	構造用途(エポキシフェノール樹脂)、木材、積層(アルキド樹脂)。エポキシ樹脂接着剤は大部分変性される(混合型)	大部分が合成樹脂で変性される。少数の変性されないものはゴム、繊維物、箔紙、レザー、プラスチックフィルムに用いられるにすぎない	金属、陶器、ガラス、熱硬化性プラスチック。被着材の種類よりも、しばしば接合部の設計および最終実用条件(強度、温度など)が問題になる

る静荷重のもとでは、強度を維持することができない。

③ エラストマー接着剤：エラストマーとは、弾性の大きい高分子物質に与えられた名称で、広い意味でのゴム状弾性体をさす。天然ゴムまたは合成ゴムを主成分とする。溶剤溶液または水分散液の形。熱可塑性のものと同様加熱すると軟化するが完全に溶解しない点が異なる。

④ 熱硬化性接着剤：熱硬化性樹脂を主とするもので、加熱すると硬化し、硬化樹脂はもとにもどらない。前三者より強度は大きくクリープに対しても良好であるが、衝撃強度が少し低い。

⑤ 混合型接着剤：熱硬化性樹脂と熱可塑性樹脂、またはエラストマーとの組み合わせによる接着剤。2種の異なる樹脂を混合するため、熱硬化性樹脂が第2の樹脂の混合により強化され、たわみ性を増し、衝撃に強いものとなる。したがって、組み合わせる樹脂の種類・配合によって広範囲の性質を得ることができる。代表的な混合型接着材を表-9に示す。

表-10は各種被着材と接着材の関係を示す。

### (3) 接着力の原因

接着力の原因としては、くぎ打ち説、化学結合説、吸着説、相互混合説などがあるが、物質分子間の引力としての Van der Waals の力に原因を求める吸着説と、被着材と接着剤の分子が相互に移動し合って縫い合せたようになるという相互混合説とが相ともにおこることによると解釈しておけばよい。

### (4) 接着接合の実際

#### a) 接着材の組成

一般に接着剤は、主剤 (Basic material)、溶剤 (Solvent)、充填剤 (Filler)、硬化剤 (Curing agent, Catalyst) より構成される。

主剤は上記のように樹脂、ゴム、れき青などである。

種 類 性 質	変 性 エ ポ キ シ		フェノール リック・ニ トリルゴム	フェノー リック・ ビニル
	室温硬化型	加熱硬化型		
硬 化 条 件				
温 度 (°C)	21~32	160~260	149~204	121~177
圧 力 (kg/cm <sup>2</sup> )	接 触	接 触	1.8~14	3.5~14
時 間 (min)	1~7日	2~60	2~60	30~120
機械的性質せん断強度 (kg/cm <sup>2</sup> )				
-54°C	25~176	91~352	246~316	141~211
20	176~295	211~352	141~422	176~352
82	13~63	183~352	105~197	56~281
121	—	56~253	35~176	7~127
149	—	32~225	28~156	7~84
ク リ ー プ 強 度				
室 温	E	E	G	E
高 温	P	G	G	G
引 き は が し 強 度	P	P	E	F~G
た わ み 性	P	P	E	F~G
化 学 的 抵 抗 性				
水	F	E	G	E
100% 湿 度	F	E	G	E
塩 水 噴 霧	P	E	G	E
油	E	E	G	E
グ リ コ ー ル 類	G	G	G	E
燃 料	E	E	G	E

E: Excellent, G: Good, F: Fair, P: Poor

硬化剤は主剤の中に入れて、3次元分子構造に硬化せしめる触媒であって、その添加量は可使時間 (Pot life, 主剤と硬化剤を混合して使用し得る最大限の時間)、接着力などに影響する。

充填剤は木粉、カーボンブラック、黒鉛、金属粉、酸化アルミニウム、炭酸カルシウムなどを混入して、つぎの物理的性質について接着を良好ならしめるためのものである。

弾性率、熱膨張率、収縮 (硬化による)、粘度、耐衝撃性、耐熱性。

溶剤は水・アルコール等前記のとおりである。

#### b) 接着手順と安全率

接着剤の選定が終れば接着にとりかかるわけである

被 着 物	木 材	タイル・陶磁器	コンクリート・モルタル	ガ ラ ス	金 属
金 属	E-MR R-MR	BP-DR E-MR E-MH	Pe-MR E-MR V-DR	Pe-MR E-MR E-MH E-SH	E-MR E-MH E-SH
ガ ラ ス	Pe-MR V-DR Vcp-ER	Pe-MR E-MR E-MH NP-DR	Pe-MR E-MR	E-MR E-MH E-SH Va-DH Pe-MR	
コンクリート・モルタル	V-DR Vcp-ER	BP-DR V-DR Pe-MR	E-MR Vcp-ER Pe-MR		
タイル・陶磁器	V-DR Vcp-ER	E-MR E-MH Pe-MR			
木 材	Vcp-ER P-MR Pe-MR				

凡 例  
B (主原料), P (副原料), D (接着剤の  
状態), R (加工法)

原料記号  
B ブタン系 (合成ゴム)  
E エポキシ系  
N ネオプレン系 (合成ゴム)  
P フェノール系  
Pe ポリエステル系  
R レゾルシノール系  
V ビニル系  
Vcp ビニル共重合系  
状態記号  
D 溶剤希釈形  
E エマルジョン形  
M 2液混合形  
S 固体、粉末形  
加工記号  
R 常温硬化  
H 加熱硬化



が、その手順は、① 表面処理、② 接着剤の準備、③ 接着剤の塗布、④ 接着部の硬化処理、⑤ 清浄処理となる。この際特に注意せねばならぬのは表面処理で、表面に水・油脂・異物・酸化物が付着していると良好な強度が得られない。

安全率の取り方については、一般的な規準のようなものは無いではないが、対象とする構造の種類、接着剤の種類、使用箇所、使用条件等によって、個々の場合について検討するのが現状ではよいと考えられる。

### 3. あとがき

以上強化プラスチック、接着剤について概略を述べた。非構造用として用いるのであれば大した問題もなく実用可能であるし、構造用として使用している分野も多数ある。しかし土木構造物のようにきびしい条件下で使用するには、その歴史が浅く実績も乏しくデータの蓄積が不十分である。今後、理論的実験的検討が加えられるべきであるが、そのためには構造技術者の積極的な参画が必要である。材料革新の新しい時代を迎えつつある現在、その機械的・物理化学的性質を把握し、特質を十分考慮したうえで、力学的構造法的検討が加えられれば土木構造物への応用も十分可能であるし、たとえば本誌に横道教授のかかれたプラスチック橋梁などの実現も意外に早くなるかもしれない。

### 参 考 文 献

- 1) 横道英雄：“土木界 これからの 課題—土木構造物と材料”，土木学会誌，Vol. 50, No. 1
- 2) 松尾新一郎：“高分子材料の建設工事への応用”，土木学会誌，Vol. 50, No. 2, 3
- 3) 雀部高雄：“材料革新の新しい時代と科学の動き”，科学，1965.8
- 4) 島村昭治：“構造材料としてのFRP”，機械学会誌，Vol. 65, No. 524
- 5) 松田種光：“プラスチックの性質と利用”，機械学会誌，Vol. 65, No. 524
- 6) 島村昭治：“FRP の設計データについて”，工業材料，Vol. 11, No. 6
- 7) 大石 新：“ポリエステル樹脂を中心とした最近のFRP用樹脂”，工業材料，Vol. 11, No. 6
- 8) 牧野・飯塚・富岡・吹野・島村・高林・星野・竹鼻・尾関：“サンドイッチ 構造材使用上の問題点”，工業材料，Vol. 12, No. 10
- 9) 田部井・古宮：“FRP 板の長期耐候性・耐水性・耐薬品性”，強化プラスチック，Vol. 8, No. 3
- 10) マコウスキイ：“建築構造の軽量化の試み”，カラム，No. 9
- 11) 接着技術便覧編集委員会：“接着便覧”，日刊工業新聞社
- 12) 高分子学会編：“接着と積層”，高分子工学講座の，他人書館
- 13) 井本・黄慶雲：“接着の科学”，岩波新書
- 14) G. Trittler, K. Dörnen：“Die Vorgespannte Klebverbindung, eine Weiterentwicklung ger Verbindungstechnik im Stahlbau”，Der Stahlbau, Heft 9-Sept. 1964
- 15) 渡辺・松島：“橋梁における鋼主桁とコンクリート床板とのエポキシ樹脂接着工法の開発について”，橋梁，No. 1, 1965
- 16) W. Gilde：“Increasing the Fatigue strength of Dynamically Stressed Welded Structures by Plastic Coating”，溶接学会誌，Vol. 34, No. 9

## 土質実験指導書改訂版頒布

土質実験指導書が刊行されてから2年半……この間多くの学校や職場で実験指導参考書としてご利用いただき好評を得ております。今回の改訂では各使用者の声を取り入れ、従来の15項目に新たに「土の三軸圧縮試験方法」を追加し16項目とし、それぞれの項目を1. 目標、2. 試験器具、3. 試料、4. 試験方法、5. 計算および結果の整理、6. 注意事項、等々に分けて解説し、必要に応じて設問を設けるとともにデータシートへの記入例もとり入れましたので広くご利用下さるようご案内いたします。

体 裁：B5判 64 ページ データーシート 26 葉  
定 価：320 円（〒 60 円）

## 土木材料実験指導書頒布

本書は土木材料を 第1章 セメント、第2章 骨材、第3章 コンクリート、第4章 鉄筋、第5章 アスファルト、の5つに分け、それぞれ目標、使用器具、実験要領、注意事項、関連知識などの各項目についてわかりやすく解説した、若い技術者の必読の書である。

体 裁：B5判 本文 90 ページ データーシート 36 枚  
定 価：380 円 送料：70 円