

# プラスチック等のひずみ回復機能を用いた複合体作製と解体法

玉川大学 工学部 機械システム学科

教授 春日幸生

(平成 16 年度 研究開発助成 AF-2004016)

キーワード：接合，分離解体，ひずみ回復

## 1. 研究の目的と背景

異種材継手や複合体を作製する方法としては，すでに多くの接合法が存在し，確立された技術として広く使われている．継手強度はできる限り高くあるべきであり，継手効率 100%，すなわち母材と同一強度に近いほど良いというのが従来の考え方である．近年，工業製品の解体・再利用プロセスにも注目が集まるようになり，容易な解体の検討に関する研究も見られる<sup>1)</sup>．

要素結合された複合体や工業製品を解体する際，外力を作用させずに，或いはより少ない外力で解体可能な，人に優しい解体法の可能性を検討したい．

## 2. 実験方法ならびに条件

本研究では，金属系あるいはプラスチック系の形状記憶材料を接合部材として軸状物と円板を接合し，その後の熱処理工程における形状回復により継手が自然解体できるかどうか調査する．

まず，金属系形状記憶材料を検討した．(株)古河テクノマテリアル製 NT-M 材は Ni-Ti 系形状記憶材料<sup>2)</sup>で，耐久性（変態回数）は 100 回未満と低いものの，変態温度 10～100℃と利用しやすい変態温度域を有している．また，回復ひずみは 6～8%と比較的大きいことも特徴である．しかしながら，通常入手可能な製品は直径 1mm のワイヤーの状態である．本材料を第三部材として使用し，継手を作成するには寸法が小さく，塑性変形量も限られる．

このため，今回の実験では金属系形状記憶材料を塑性変形させて継手を製作する手法は採用せず，プラスチックを第三部材に用いた手法に限定して実験を行った．

を設置し(a)，プラスチック(機械的性質の高いポリカーボネート(PC)を用いる)を塑性変形させると軸とディスクが接合する(b)．その後の焼きなましにより，プラスチックの形状記憶現象により元の形状に戻る(c)．したがって外力を加えることなく継手を解体することができる．

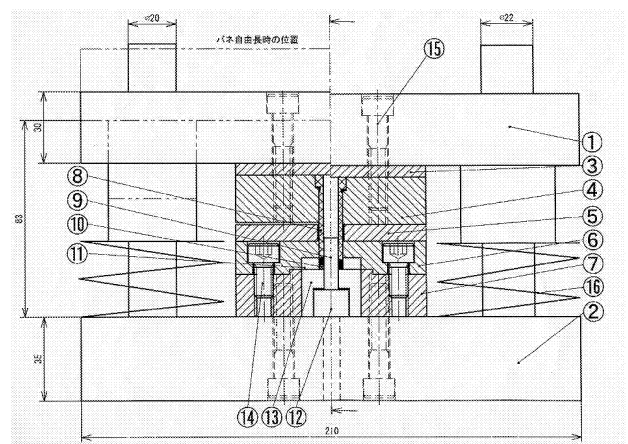


図 2 接合実験装置

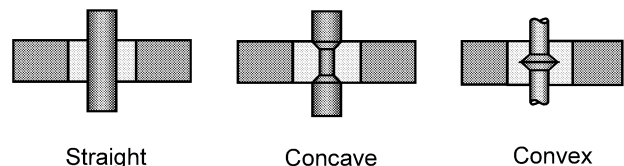
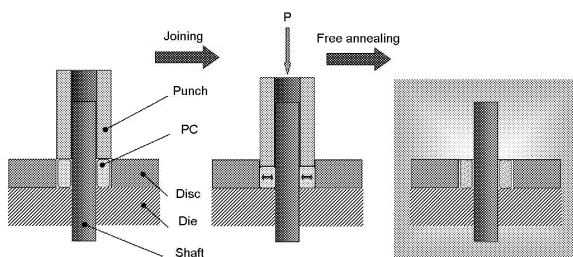


図 3 軸形状(流入法)



(a) 接合前 (b)接合 (c)ひずみ回復による分離

図 1 軸と円板の接合と分離

### 2.1 接合と分離の手法

図 1 に，接合と分離(解体)の概略を示す．軸とディスク

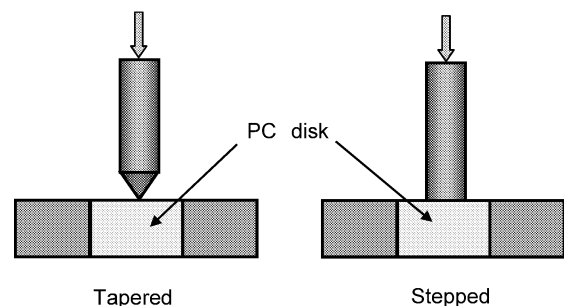


図 4 同時接合

図 2 はその接合金型を示す．ダイス⑩内にセットした軸⑨とディスク⑪は，中空パンチ⑧によるプラスチックリング⑩の圧縮変形により一体化する．

軸、プラスチックリングそしてディスクの各形状は継手の接合強度ならびに分離性能に影響を与える。図3に、軸⑨の形状を示す。ストレート形状に加えて、凹凸のある形状も用意した。円形リングの鍛造では、試験片と金型間の摩擦係数にもよるが、内径変化はさほど大きくない一方で外径が広がる傾向を示す<sup>3)</sup>。これより、本実験においても、リング外径とディスク内径をほぼ同一寸法として外側への材料流れを拘束し、その分内側へ材料が流れる状況を想定して軸形状に変化を設ける。半径方向片側凹凸量を  $a$  とする。 $a = 0\text{mm}$  は凹凸のないストレート軸形状である。 $a$  が増加しても押込んだ体積と軸凹凸部に流入する体積が等しくなるようにプラスチックリングの初期高さ  $h$  を決定した。

比較のため、リング⑩を円板に替えて、ストレートな軸をプラスチック円板に直接打込んで同時接合する方法も用いる。形状を図4に示す。軸形状は、先端が平らな場合とテーパ状に加工した場合の二通りとする。

表1 試験片寸法

Shaft	軸径 $d_s(\text{mm})$	6
	凹凸量 $a(\text{mm})$	0~1.5(流入法)
Disk	外径 $D(\text{mm})$	25
	内径 $d(\text{mm})$	10.5
	厚さ $H(\text{mm})$	5
PC 材	外径 $D_o(\text{mm})$	10(流入法) 10.5(同時接合)
	内径 $D_i(\text{mm})$	6(流入法)
	高さ $h(\text{mm})$	5.8~7.3( $a$ に対して) 5(同時接合)

## 2.2 試験片

表1に、各試験片の寸法を示す。試験片は軸が S45C 磨き引抜き棒材、ディスクが調質 S45C 材とする。

## 2.3 寸法変化

リング圧縮変形における高さ方向、直径方向変化を確認するため、リングの圧縮試験を行う(図5)。圧縮前後での変化率を次式で定義する。「'」は変形後を示す。

$$\text{直径変化率 } \phi = \frac{(D' - D)}{D} \quad (1)$$

$$\text{高さ変化率 } r = \frac{(h - h')}{h} \quad (2)$$

## 2.4 せん断試験

接合状態を調べる方法としては、せん断、引張り、曲げ、ねじり、衝撃、疲労試験などがあるが、本研究では、継手に軸方向せん断力を加えて抜け荷重を調べる。

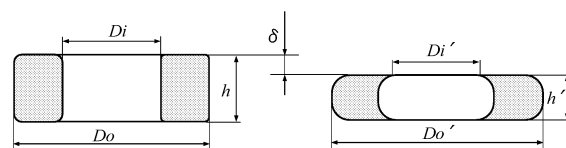


図5 リング圧縮に対する変化率

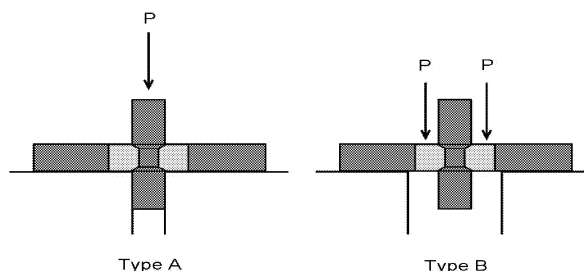


図6 せん断強度試験方法

図6に試験方法を示す。荷重荷重方法は2通りあり、軸に荷重を加えて軸とPC間で継手を分離させるType Aと、同様にPCとディスク間で分離させるType Bである。

## 2.5 ひずみ回復

接合後、ひずみ回復を発現させるための焼きなましは、100℃にて予熱30分、その後190℃にて20分行う。第三部材として用いるポリカーボネイトは、さほど高い温度領域でなくともひずみ回復が可能であるほうが望ましい。実際100℃前後で回復機能を発現させる材料も公表されている<sup>4)</sup>が、入手が困難である。このため、市販の板材(三菱樹脂(株)製ステラ P300)を切断後旋削加工して用いる。表2にポリカーボネイトの基本的特性<sup>5)</sup>を示す。

表2 ポリカーボネイトの機械的、熱的性質

ヤング率 $E(\text{MPa})$	引張強さ $\sigma_B(\text{MPa})$	せん断強さ $\tau_s(\text{MPa})$	ガラス転移点 $T_g(^{\circ}\text{C})$
2156	72.6	64.7	136

## 3. 実験結果

### 3.1 PCの圧縮に対する直径変化

PC円板に鉛直方向荷重を加えてリングを圧縮した時の直径変化率を図7に示す。外径は外側に広がったが、やはり内径は減少せず、若干外側へ広がった。このことより、PCを第三部材として使用する場合には、PCに塑性変形を加えたときに、外側寸法の変形を拘束し、それにより内側への材料流動を促進させる方法をとらねばならない。

このリングを圧縮成形し、その後焼きなましを行ったときの外観形状変化を図8に示す。初期外径10mm、同内径6mm、同高さ7.3mmである。圧縮変形により、リングが樽形となるものの、焼きなましにより元の形状にほぼ回復していることが観察される。なお、焼きなまし後のリングには材料内に気泡が発生している。これは、

焼きなまし前に十分な除湿を行っていないため、材料内の吸湿した水分が完全に抜けなかったことによる。

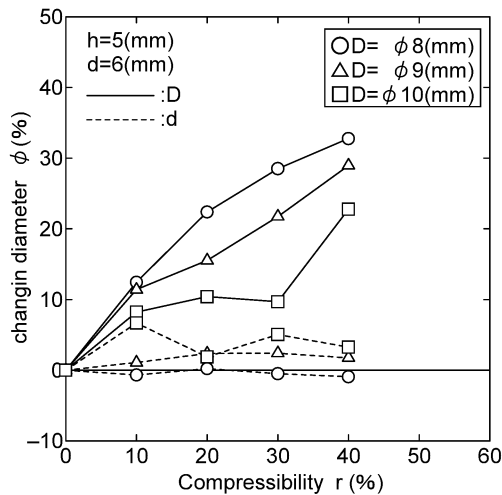


図7 直径変化率

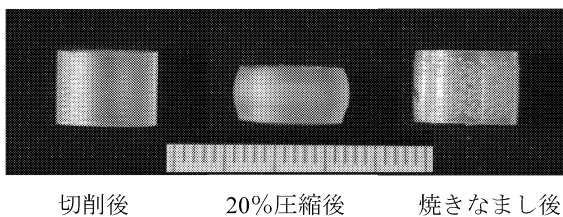


図8 PCリングの変形

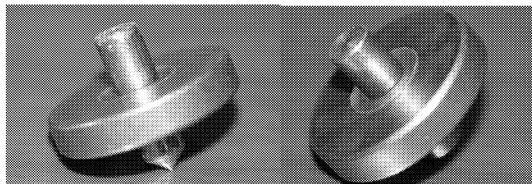


図9 接合された軸継手(同時接合法による)

### 3.2 継手の解体

接合された継手の一例を図9に示す。図は同時接合法により、軸にパンチの役割を持たせてPC円板中央に押し込みした結果である。本接合法の場合、軸を手で引張った場合には軸やPCリングが外れることはなかった。

一方、あらかじめリング状に加工したPCを用いて接合を行った場合(流入法)は以下の結果である、まず中央部に突起を設けた軸を使用した場合、型から取り出した時点でも軸はまだPC円板に接合されていなかった。中央部に凹み部を設けた軸を使用した場合には、接合後金型から取り出した直後は十分接合が確認されたものの、条件によっては時間経過とともにリングとディスクの間にすき間が生じるようになり、ひずみ回復を待たずに手の力ではずすことができる状態になった。

せん断試験を行って、抜け荷重を具体的に調べた結果を以下に示す。図10はシャフトの凹凸量 $a$ を変化させ、リング-シャフト間 (Type A) およびディスク-リング

間 (Type B) で抜け荷重を測定している。突起を設けたシャフト(convex)を使用した場合には、先述したようにシャフトとリング管の接合が十分でなかったため、 $a$ を変化させた実験は $a=0.5\text{mm}$ の場合のみ行うにとどめた。Type Bの場合、外側接合面では解体時の抵抗はほとんどなく、継手としての機能はほとんど期待できない。Type Aの場合抜け荷重が急激に増加した。これはプラスチックリング内側をせん断したのではなく、本試験により軸の突起部分がせん断破壊したことによる。

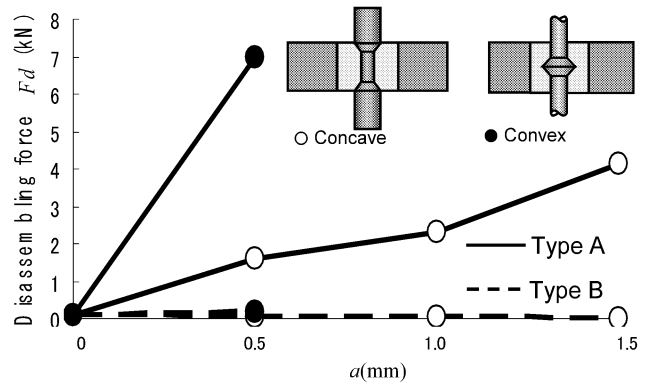


図10 軸の凹凸量が抜け荷重に及ぼす影響

一方凹みを設けた軸(concave)についても、内側は $a$ とともに抜け荷重は大きくなるものの、外側接合面での抜け荷重がほとんど生じなかった。すなわち、本流入法では解体機能を付与する以前に継手としての機能が備わらないことが判明した。

以上、解体機能を付与する以前に継手としての機能が具備されることが判明したが、理由は以下のとおりである。継手の構成要素であるプラスチックは、時間経過とともにその形状がわずかながら回復する。すなわち、高さ方向圧縮を受けて半径方向に広がるプラスチックは、軸方向に高さが戻り、したがって半径方向に収縮する。

図11はリング圧縮時の断面形状を示す。リング外側は図8のように樽形変形を示すが、そのため内側については、高さ方向中央部がひける。このため軸に突起を設け、リング外側の広がりを拘束した場合であっても、高さ方向中央部の接合が十分でないことが予想される。

図12は、同時接合を行った継手について同様に抜け荷重を測定した結果である。この場合、Type A,Bともに接合はなされている。特にテーパ付軸の場合には、抜け荷重が高いので接合状態はより良好である。先端をテーパにすることによりせん断変形と同時に半径方向圧縮力が働くためであると考えられる。以上図10, 11の結果より、接合状態にある間は接合力を確保し、ひずみ回復により軸とディスクを分離することが可能となるような接合法は、軸に凹凸をつける方法ではなく、ストレートな軸を直接PC円板に打込むことである。

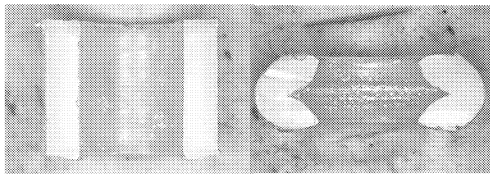


図 11 圧縮変形における横断面変化

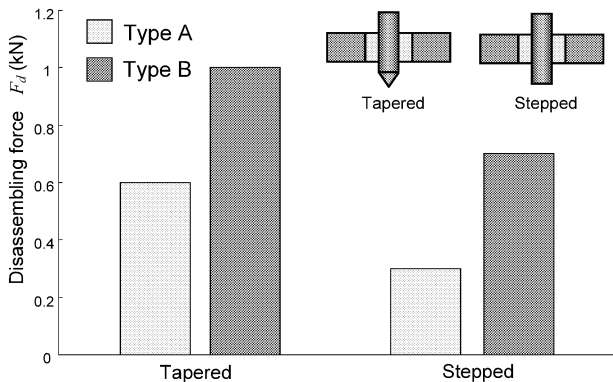


図 12 軸先端形状が抜け荷重に及ぼす影響

表 3 回復ひずみによる自然解体

	流入法				同時接合法	
	$a$ (mm)	0	0.5	1	1.5	Tapered
Convex	○	○	-	-	×	×
Concave	○	○	○	○		

○：ディスクと PC リング間が分離

×：分離されず

### 3.3 焼きなましによる継手の自然解体

接合した継手の焼きなましを行って、自然解体が可能か調べた。結果を表 3 に示す。流入法では、もともと継手の抜け荷重が小さかったため、PC リングとディスクの間で分離した。同時接合法では、自然解体はなされず継手を維持した。しかし、焼きなましにより接合状態はゆるくなっていることが推定される。

## 4. 今後の研究の進め方

以上の結果から、接合時に PC 材に変形を加えて接合すると、その後常温でわずかにひずみ回復が生じ、継手としての機能を満足しないこと、またせん断接合による同時接合の場合には熱処理によるひずみ回復機能が十分でなく分離が完全でないことがわかった。そこで新たな方策として、

- ① リングを圧入して継手を作製する。これにより、半径方向の焼きなまし前のひずみ回復を防ぐ
  - ② 板厚方向にあらかじめひずみを加えた PC 板からリングを作製し、同時接合による継手を作製する
- といった手法を今後引き続き検討する。以下に予備検討を行った結果を示す。

板厚 2mm の PC 板を冷間圧延し、ひずみ回復したときの板厚、板幅および長手方向各ひずみを工程ごとに調べた結果を図 13 に示す。最終的にひずみはほぼ零となり、形状が回復していることがわかる。また、引張試験の結果を図 14 に示すが圧延後は強度が上がることもわかり都合がよい。したがって、上記②の工法は有望であることが予想される。

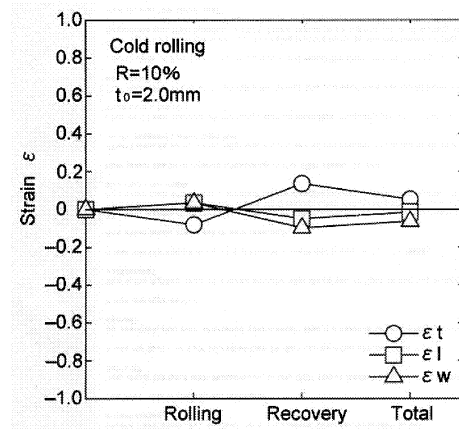


図 13 圧延によるひずみとその回復

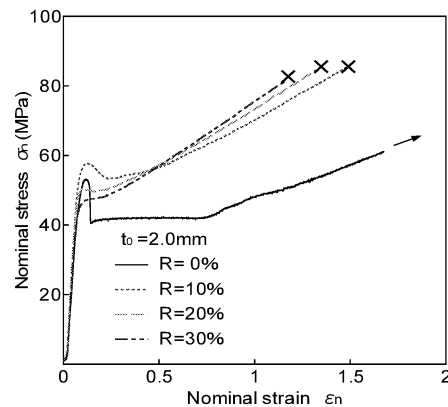


図 14 圧延による強度向上

## 5. 結論

解体・再利用を目指して、プラスチックのひずみ回復を利用した接合・解体の手法を検討し、試験を行った。接合強度と解体を同時に満たすのは困難であるが、更なる開発を行い、両方を満足する工法を検討していく。

## 参考文献

- 1)春日:52 回塑加連講論, (2001), 341.
- 2)古河テクノマテリアルホームページ,  
<http://www.fitec.co.jp/ftm/nt/lib/furu-nt4.htm>
- 3)川井:曲げおよびリング圧縮に関するベンチマークテスト, 塑性と加工, 18-202 (1977), 948.
- 4)日本工業新聞, (2002 年 6 月 27 日), 14.
- 5)三菱樹脂カタログ