

設計施工の観点からの接着技術

Adhesion Technology from the Point of View of Design and Fabrication

猪瀬 幸太郎	技術開発本部生産技術センター溶接技術部	担当部長	博士（工学）	技術士（建設部門）
坂元 理絵	技術開発本部生産技術センター溶接技術部	主査	博士（工学）	
村田 祥	技術開発本部生産技術センター加工技術部			
糸日谷 剛	技術開発本部生産技術センター加工技術部	主査		

樹脂材料同士、または金属と樹脂材料を接合する技術として接着技術の重要性が増しており、このような状況に対応するため接着技術の研究開発を行っている。接着剤を使用する設計施工側の視点から、接着技術（接着剤、接着施工、接着継手の力学的特性）について概説する。また、当社での接着技術適用例、および開発例を紹介する。

Adhesion technology has become more importance as a joining technology of resins or metal to resin. Because of this circumstance, IHI is developing adhesion technology. From the point of view of design and fabrication, this article outlines adhesion technologies, such as adhesives, adhesion fabrication and mechanical characteristics of joint, and introduces application and study examples of adhesion technology in IHI.

1. 緒 言

造船業を祖業とし、鋼構造物、プラント、原動機、産業機械、航空宇宙機材などへと事業領域を拡大した企業において、溶接・接合技術は重要な基幹技術である。溶接施工は金属同士を溶融凝固によって接合する。局所溶融のための熱源や制御技術が数多く開発された。しかし、近年そうした企業においても、樹脂材料と樹脂材料、金属と樹脂材料を接合する技術ニーズが高まっている。

樹脂材料の接合技術には溶着など溶接の派生技術もある。しかし、一般的には接着剤を用いる接着の方が適用できる被着体の種類、施工実績などの点で有利と見なされる。さらに、接着が多用されてくると、金属同士の接合にも接着が用いられるようになる。

接着は、接合部位に塗布された接着剤が硬化して被着体を接合する。その機構は、被着体と硬化した接着剤との間のアンカー効果や水素結合といった分子間力などとされている。接合強度や耐久性は、被着体の材質や接着剤の成分、被着体の表面性状の影響を強く受ける。そのため、被着体の材質に合わせた接着剤の選定、被着体の前処理、確実な硬化（架橋）のための施工管理が重要となる。多数の優れた技術文献がそれらを解説しているが、接着剤を製造する側の視点や記述が多いように思われる⁽¹⁾。そこで、接着剤を使用する側の立場から接着技術について概説する。

2. 接合技術としての接着の特徴

2.1 接着剤の種類と知見の収集

接着剤の種類は非常に多い。硬化機構もさまざまであるが、同種のものであっても基剤と添加剤の成分、配合比率などが被着体の材質、継手への要求性能、使用環境によって違ってくる。そのため、溶接接合やボルトなどの機械締結などと比較すると、実用的かつ汎用性のある設計基準を確立することが難しい。よって、詳細構造を確定した後に、対象部位に限った接着の仕様や施工が検討されることが多い。こうして得た知見は分散しがちであるため、収集分類し、以後の設計作業に供することが重要となる。

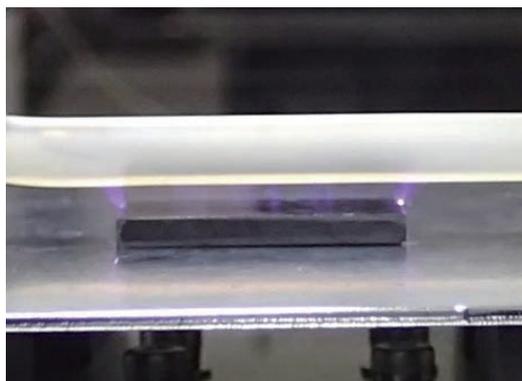
例えば、接着剤の種類としては、熱硬化性樹脂系や熱可塑性樹脂系がある。後述する構造部材用接着剤として多用されているエポキシ樹脂系、アクリル樹脂系、ウレタン樹脂系などは前者である。一方、接着剤の用途としては、構造部材用、機械部品用、機能的用途などがある。用途それぞれにおいても、例えば構造部材用では航空機用、自動車車体用、船舶・海洋構造物用、建設用、機械構造部品用などがある。それら接着剤の種類と用途の組み合わせを整理し、被着体、接着剤、施工方法、強度や耐久性などの情報を集約することが求められている。個別の知見を体系的に運用するためのデータベース構築を現在進めている。

2.2 接着施工

基本的な接着施工手順は、① 被着体と接着剤の準備、② 接着部の表面処理、③ 接着剤の塗布、④ 接着剤の硬化のための施工、⑤ 養生、である。

表面処理は、接着機構であるアンカー効果や分子間力を効果的に発現させるための工程である。被着体表面の汚れの除去、粗面化、極性をもつ官能基の活性化などを行う。サンドブラストなど機械的方法、処理液への浸漬など化学的な方法、コロナ放電、大気圧プラズマ処理など高エネルギー状態の物質などを利用するものもある。第1図にコロナ放電による表面処理施工状況を示す。施工条件を変え、表面性状に及ぼす影響、効果の持続性などを検証している。

接着剤の塗布は重要な施工ノウハウの一つである。例えば、2液型エポキシ系接着剤で重要なのは接着剤の均一な混合と塗布、接着厚さの管理である。一方、接着剤によっては第二世代アクリル系接着剤 (Second Generation Acrylic Adhesive : SGA) のように反応性が高く、2液の混合比率



第1図 コロナ放電による表面処理施工状況
Fig. 1 Surface treatment by corona discharge

にそれほど厳密性を求めないものもある。施工上の留意点は、用いる接着剤次第である。

硬化のための施工は、用いた接着剤の硬化機構により異なる。例えば、熱硬化型接着剤では硬化のための加熱が必要であり、その温度と時間管理が重要となる。

養生は固定養生が一般的である。接着した部材は、搬送するにも相応の強度が必要となる。可搬強度に達するまでの養生時間は工程設計の重要な要素となる。

2.3 接着強度と接着継手の力学的特性

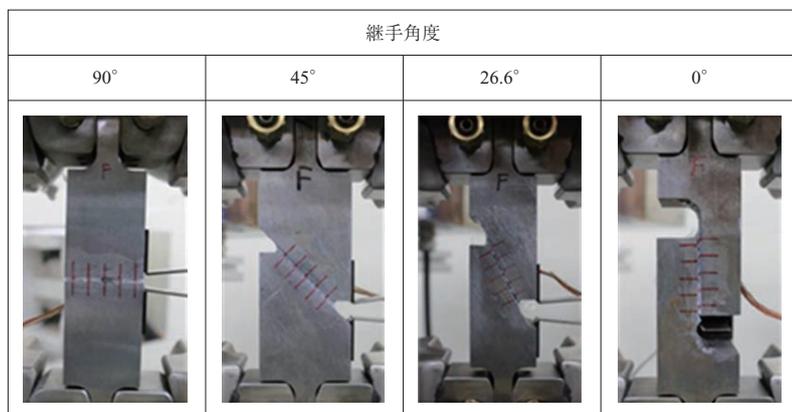
接着継手の要求性能はさまざまではあるが、まずは接着剤そのものの強度特性（接着強度）が重要となる。第1表に接着強度の測定方法例を示す。こうした規格化された試験であれば接着剤メーカーから結果を得ることができる。しかし、例えば荷重の方向が接着面と垂直（継手角度：90°）から平行（継手角度：0°）のように変化する場合、その強度値をメーカーから得ることは難しい。そのため、多軸応力下の接着継手を設計する場合は、独自に試験を行い、強度特性を明らかにする必要がある。一例を第2図に示す。ここでは、継手角度ごとに測定した破断応力を相当応力によって整理し、設計に供している。

第1表 接着強度の測定方法例

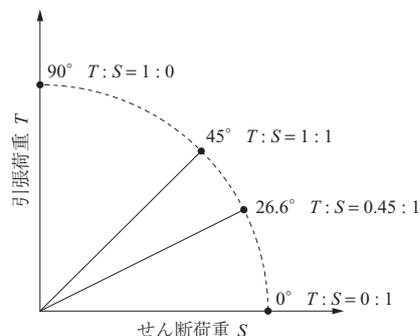
Table 1 Examples of adhesive strength testing method

測定方法	試験規格	試験対象
引張試験	JIS K6850	板材重ね継手
	JIS K6849	角材、円断面棒材
	ASTM C297	ハニカム材
曲げ試験	ASTM C393	ハニカム材
剥離試験	JIS K6854-1	90°剥離
	JIS K6854-2	180°剥離
	JIS K6854-3	T形剥離
衝撃試験	JIS K6855	ブロック接着体

(a) 強度試験



(b) 降伏曲線の例



第2図 引張・せん断荷重下における接着剤の強度試験
Fig. 2 Adhesive strength test under tensile and share load

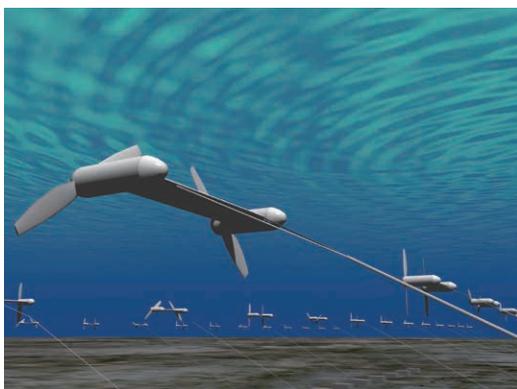
接着強度を踏まえての継手設計では、接着部の応力分布が被着体の物性値、継手の構造寸法などの影響を受けることにも留意が要る。第3図に最も基本的な接着継手を示す。被着体の重ね部の両端は応力集中部となる。そのため、重ね長さと継手強度は単純には比例しない。この応力集中は被着体をテーパ付平板（端部の板厚を減じた形状）とすれば緩和できる。また応力分布は、寸法形状だけでなく、被着体の材質によっても変わる。金属と樹脂材料など異材継手では両者の縦弾性係数の比率によっても応力分布が異なる。

3. IHI グループにおける接着技術適用事例

樹脂材料の接着施工例として、第4図に水中浮遊式海流発電システムを示す。機体には互いに逆方向に回転する2基のタービン水車が搭載されており、海中で安定した姿勢を保持して海流発電を行う。2017年に黒潮海域での発



第3図 重ね継手の応力分布の特徴
Fig. 3 Stress distribution of lap joint

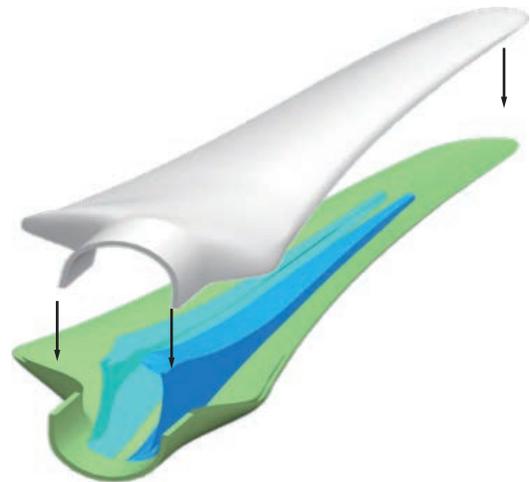


第4図 水中浮遊式海流発電システム
Fig. 4 Floating type ocean current turbine system

電実証試験を完了した。実証機では、性能検証のため全長4.5 mのタービン翼を製作した。材質はガラス繊維強化プラスチック (GFRP) であり、第5図に示すように成形した表裏の材料片をアクリル系接着剤で接合している。

金属と樹脂材料の接着施工例としては、航空エンジン部材がある⁽²⁾。低燃費化を図る高バイパス比エンジンはファンの直径は大きく、モジュール自重は軽量に設計する。金属材料では軽量化に限界があるため、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) が用いられる。第6図は旅客機用エンジン PW1100G-JM のファンケースを支持する構造案内翼 (Structural Guide Vane : SGV) である。主に耐エロージョン対策として、前縁はチタン合金で補強されている。この接着にはシートタイプのエポキシ系の接着剤が用いられている。

金属同士の接着施工例としては、長大吊橋のメインケー



第5図 海流発電（ブレード接着工程）概念図
Fig. 5 Schematic of ocean current turbine blade bonding process



第6図 PW1100G-JM エンジン複合部材 SGV
Fig. 6 PW1100G-JM engine composite SGV



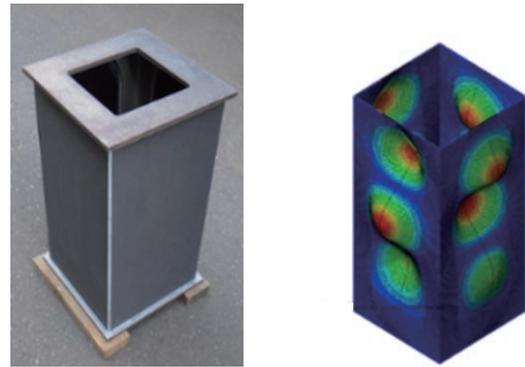
第 7 図 長大吊橋全景（トルコ：「オスマン・ガズィー橋」）
Fig. 7 General view of long-span suspension bridge (“Osman Gazi Bridge”)



第 8 図 サドルへのケーブルストランド設置
Fig. 8 Installing Cable strand on tower top saddle

ブル素線とサドルとの定着がある。第 7 図に例示するような吊橋では主桁を吊り下げるメインケーブルを 2 基の主塔と橋体の両端にあるアンカレッジが支えている。ある橋のメインケーブルは $\phi 5.91$ mm の素線を 127 本束ねたストランドを中央径間（主塔の間）は 110 本、側径間は 112 本用いていた。橋体との定着はストランドごとに第 8 図に示すサドルに設置して固定する。完成系では固定は専ら摩擦力によるが、架設中は補助的に接着剤も用いた。本橋ではアクリル系 2 液混合型接着剤を使用した。

鋼と CFRP の複合構造体の研究開発における接着の適



第 9 図 鋼 CFRP 複合構造部材（供試体と座屈解析モデル）
Fig. 9 Steel-CFRP hybrid structure member

用事例を第 9 図に示す。これは鋼 CFRP 複合柱構造体であり、鋼と CFRP の特性を活かす設計を試みている。同じ外形寸法の鋼構造と比較すると耐力は同等以上であり、かつ部材中央部の単位長質量は約 3/4 まで軽量化した。接着にはエポキシ系接着剤を用いている。設計試作、構造解析、耐力試験より接着継手に関する課題を抽出して、大型化のための技術開発を進めている。

4. 結 言

従来は金属材料を用いるような場合にも、樹脂材料を用いる構造設計が近年増える傾向にある。このため接着技術の重要性が増している。これに対応する接着技術の基礎研究、知見の収集、継続的なデータベース整備を行っていく。

参 考 文 献

- (1) 例えば、原賀康介：高信頼性を引き出す接着設計技術、日刊工業新聞社、2013 年 11 月
- (2) 村上 務、盛田英夫、及川和喜：複合材ファンシステム研究開発、IHI 技報、Vol. 53, No. 4, 2013 年 12 月、pp. 63 - 67