解体性接着剤と建材への実用性評価[†]

石川 博之* 瀬戸 和夫* 下間 澄也**
岸 信夫** 佐藤 千明***

Dismantlable Adhesive and Evaluation of Practical Uses for Building Materials

by

Hiroyuki ISHIKAWA*, Kazuo SETO*, Sumiya SHIMOTUMA**,
Nobuo KISHI** and Chiaki SATO***

A new form of dismantlable adhesive technology has been developed. This is a revolutionary development in the construction industry, which makes it possible for the bonded building materials to be separated by the simple application of heating over 100°C.

This article describes the design of dismantlable adhesives (elastomer type and emulsion type) and the evaluation of uses for building materials. For the elastomer type dismantlable adhesive, the weight fraction of thermally expansive particles from 5 to 15% is suitable for both bond strength and dismantlement of joints. For the emulsion type, that from 5 to 20% is suitable for these characteristics. The bond strength of joints could not decrease after durable test at 60°C, 95%RH for 30days. Then the joints were separated easily by heating at from 150 to 180°C. In this technology, manufacturing process is equal to the case using conventional adhesives and the time of heating for dismantlement is quite short. So it is efficient for not only performance (adhesion and dismantlement), but also manufacturing and cost.

Key words: Adhesive, Dismantlement, Recycling, Elastomer, Emulsion

1 緒 言

建築廃材のリサイクル推進は、建材業界における大きな課題である。市場の建材は、機能向上のために異種材料を複合したものが多く、廃棄処理時にそれらの分離が困難で業者へ処理を委託している現状にある^{11), 14), 15)}

平成12年6月に施行された循環型社会形成推進基本法をはじめとした数々の法律の制定により、廃棄物の3R(リデュース, リユース, リサイクル)の推進は今後ますます重要となる。建材の中では特に資源有効利用促進法で明記されている浴室部材, キッチン部材, およびその中で金属との複合体は解体容易設計を必須とする部位である。浴室部材では、管理型廃棄物指定されている石こうボードと金属の複合体である浴室壁, またキッチン部材では、金属と樹脂, 木材の複合体であるキッチンユニットが分離のターゲットとなる。

Table I^{1)~9), 13)}に、市場の解体性接着技術の開発状況を示す。これら技術の解体因子としては、熱溶解がほとんどで、他は吸水性樹脂の膨張力を利用したものであり、住環境の使用に耐え得る建材用途の大面积対応の接着力を発現する技術は残念ながら開発されていない。Table II¹⁰⁾には弾性系接着剤とエマルジョン系接着剤の建材への用途を示す。これら2種の接着剤を解体容易化

設計することで、広範囲の建材用途に展開可能であることが分かる。

以上のような背景のもと、本論文では新規に開発した弾性系とエマルジョン系の解体性接着技術について述べる。これは従来の接着剤と同等の耐久性を発現しつつ、

Table I. Technology of dismantlable adhesives.

developer	type	factor of dismantlement	operation of dismantlement	used for
Nagase Chemitex	thermoplastic epoxy resin	soften and melt	heating	rework for IC chips
Kaken-tech	water absorbing materials mixed resin	expansion	dipping in water	dismantlement for cosmetic caps
Tokyo Denki University	thermoplastic resin	soften and melt	heating by electromagnetic waves	dismantlement for partial bonded building materials
Nitto-denko	thermally expansive particles mixed resin	expansion	heating	dismantlement for partial bonded materials

Table II. Uses of adhesives for building materials.

adhesives	adherends	for building materials
elastomer type adhesives	steel bonded cement board	bath wall
silyl terminated polyether resin	steel bonded plastic board	kitchen counter
epoxy resin		
urethane resin		
chloroprene rubber		
emulsion type adhesives	sheet laminated wood	wooden interior
vinyl acetate resin	steel bonded plaster board	bath wall and ceiling
vinyl urethane resin		
styrene butadiene rubber resin		

[†] 原稿受理 平成16年2月13日 Received Feb. 13, 2004

* 松下電工(株) 〒571-8686 門真市大字門真, Matsushita Electric Works, Ltd. Ohaza Kadoma, 571-8686

** コニシ(株) 〒541-0046 大阪市中央区平野町, Komishi Co, Ltd, Chuou-ku, Osaka, 541-0046

*** 正会員 東京工業大学精密工学研究所 〒722-6503 横浜市緑区長津田, P & I Lab, Tokyo Inst. of Tech. Midoriku, Yokohama, 226-8503.

ある高温域では効率良く分離できるように接着剤と熱膨張性マイクロバルーンとの組成・配合を見出したもので、複合建材の接着耐久性と分離という相反する性能の両立が可能となる。そこで本研究では、これら接着剤の接着性と解体性について、建材として用いられる材質、および実際の建材を対象に実験的に検証した。

2 理 論

2・1 解体（分離）性容易の原理

接着力を発現する因子としては、一般に水素結合および分子間力が主体的であるといわれており¹²⁾これらの力に打ち勝つ被着体同士を分離させる手段が必要となる。本開発技術の原理としては、通常の使用環境では到達しない高温域で膨張するマイクロバルーンを接着剤中に分散させ、リサイクル時に高温加熱することでバルーンが膨張し、その膨張力で接着界面に応力が発生し分離が可能となるものである。分離のメカニズムを Fig. 1 に、熱膨張性マイクロバルーンの構造を Fig. 2¹⁶⁾に示す。

2・2 解体時のプロセス

Fig. 3 に解体に至るまでのプロセスを示す。プロセスは以下の段階を踏むことになる。

(1) 熱膨張性マイクロバルーンの膨張と同時に接着剤被膜が軟化し、膨張による接着界面への応力発生と接着力の低下が起こる。

(2) 被着体の熱膨張と収縮により、接着界面に応力が発生する。

Fig. 1. Disbonding mechanism of the dismantlable adhesive including thermally expansive particles.

Fig. 2. Structure of the thermally expansive particles and behavior after heating.

Fig. 3. Process of dismantlement.

(3) 接着力低下と応力発生により、複合部材から成る建材が分離される。

3 実 験

3・1 解体性接着剤の基本設計

(a) 弾性系解体性接着剤

接着剤は、浴室、キッチン等で使用される金属との接着体である銅板とセメント板複合体、および銅板と樹脂板複合体の分離を目的とした。解体性接着剤設計において、マイクロバルーンが膨張する際に接着剤被膜がその膨張を妨げないように柔軟化すること、またマイクロバルーンは膨張前には接着力低下への影響が小さく、かつ分離も容易という点、さらに剤としての貯蔵安定性から組成・配合を導き出すことが重要となる。

開発した解体性接着剤の基本組成、および構成材料の効果を Table III に示す。基本配合は、重量で変成シリコン系樹脂（旭硝子製エクセスター S2420、固形分 99% 以上）30%、エーテル系樹脂（三井武田ケミカル製アクトコール P21、固形分 99% 以上）10%、および脱水剤としてテトラエトキシシラン（信越化学工業製 KBE04、固形分 99% 以上）5%、充てん剤として炭酸カルシウム（日東粉化工業製 NS#400、固形分 99% 以上）45%、および熱膨張性マイクロバルーン（エクспанセル製 EXPANCEL 092DU、固形分 99% 以上）10% とした。

Fig. 4 に接着剤の伸び率と引張強度（JISK6251 準拠：ダンベル 3 号試験片）の関係を示す。基本組成における接着剤の伸び率は 100%、引張強度は 2MPa であった。また 50℃で 30 日間加熱養生した後においても、粘度上昇率が 50%（JISK6833 準拠、20℃、50%RH 雰囲気下測定）以下で貯蔵安定性があると判断した。

Table III. Main composition of the elastomer type dismantlable adhesive.

polymer	item	compounding rate (%)	effect
silyl terminated polyether resin		30	for strong adhesive
polyether resin		10	for softening
dehydrating agent		5	for dehydration
inorganic filler		45	for filling
thermally expansive particles		10	for dismantlement

Fig. 4. Relationship between tensile strength and percentage elongation of the elastomer type dismantlable adhesive.

(b) エマルジョン系解体性接着剤

接着剤は、浴室、内装材等で使用される鋼板と石こうボード複合体、および樹脂化粧シートと木質材複合体の分離を目的とした。開発した解体性接着剤の組成、構成材料の効果を Table IV に示す。基本配合は、重量で酢酸ビニル系樹脂（住友化学製スミカフレックス 400HQ、固形分 55%）70%、ウレタン系樹脂（第一工業製葉製スーパーフレックス 750、固形分 40%）10%、アクリル系樹脂（コニシ製 CE310H、固形分 50%）10% と熱膨張性マイクロバルーン（エクспанセル製 EXPANCEL053DU、固形分 70%）10% とした。

Fig. 5 に接着剤の伸び率と引張強度の関係を示す。基本組成における接着剤の伸び率は 500%、引張強度は 7MPa であった。Fig. 6 に 40℃ 雰囲気下で 90 日間養生した際の粘度を示す。本条件下において粘度変化はほとんどなく、貯蔵安定性があると判断した。

Table IV. Main composition of the emulsion type dismantlable adhesive.

polymer	item	compounding rate (%)	effect
modified poly vinyl acetate resin		70	for strong adhesive
poly urethane resin		10	for thermal resistance
poly acrylic resin		10	for plastic materials
thermally expansive particles		10	for dismantlement

Fig. 5. Relationship between tensile strength and percentage elongation of the emulsion type dismantlable adhesive.

Fig. 6. Relationship between viscosity of the emulsion type dismantlable adhesive and exposure time.

3・2 試験体作製

3・2・1 小サイズ試験体

(a) 弾性系解体性接着剤

(1) 化粧鋼板とセメント板複合体 150mm 角, 9mm 厚のセメント板 (A & AM 製) に開発した接着剤を 0.15 kg/m² 均一塗布し, 0.6mm 厚の化粧鋼板 (東洋鋼板製: 接着面アルキッド樹脂コート, 濡れ張力 34 ~ 38 mN/m) を 20℃, 0.5MPa で圧縮した後, 20℃で 72 時間養生した。

(2) ステンレス鋼板と樹脂板複合体 150mm 角, 8 mm 厚のポリエステル製樹脂板 (松下電工製) に開発した接着剤を 0.15kg/m² 均一塗布し, 0.6mm 厚のステンレス鋼板 (SUS304) を 20℃, 0.5MPa で圧縮した後, 20℃で 72 時間養生した。

(b) エマルジョン系解体性接着剤

(1) 化粧鋼板と石こうボード複合体 150mm 角, 12mm 厚の石こうボード (吉野石こう製) に開発した接着剤を 0.10kg/m² 均一塗布し, 0.6mm 厚の化粧鋼板 (東洋鋼板製) を 20℃, 0.5MPa で圧縮した後, 20℃で 24 時間養生した。なおピーリング強度測定用試験体は, 接着剤を鋼板に 0.10kg/m² 均一塗布し, 綿布を 20℃, 0.5 MPa で圧縮した後, 20℃で 24 時間養生した。

(2) 樹脂化粧シートと木質材複合体 150mm 角, 2.7mm 厚の中密度繊維板 (MDF: N & E 製) に開発接着剤を 0.10kg/m² 均一塗布し, 0.07mm 厚の化粧ポリエチレンテレフタレート (PET) フィルム (大日本印刷製) を 20℃, 0.5MPa で圧縮した後, 20℃で 24 時間養生した。なお, 上記試験体の構成断面は Fig. 7 に示す。

3・2・2 実大サイズ試験体

(1) キッチンカウンター模型 (樹脂板と鋼板, および木質材) (Fig. 8: 650mm × 900mm) ポリエステル製カウンター (松下電工製) とシンク (SUS304), および木質材の接着部位に弾性系解体性接着剤を 0.15kg/m² 均一塗布し, 各部材を所定位置に設置した状態で 20℃, 0.1 MPa で 5 分間圧縮した後, 20℃で 72 時間養生した。

(2) 浴室壁模型 (石こうボードと鋼板) (Fig. 9: 800 mm × 800mm) 12mm 厚の石こうボード (吉野石こう製) にエマルジョン系解体性接着剤を 0.10kg/m² 均一塗布し, 0.6mm 厚の化粧鋼板 (東洋鋼板製) を 20℃, 0.1MPa で圧縮した後, 20℃で 24 時間養生した。

Fig. 7. Construction of building materials.

- (a-1) Steel plate and cement board
(a-2) Stainless steel plate and polyester resin board
(b-1) Steel plate and plaster board
(b-2) PET film and MDF board

Fig. 8. Feature after heating of a kitchen counter (polyester resin counter and wooden bar, stainless steel sink) bonded by the elastomer type dismantlable adhesive.

Fig. 9. Feature after heating of a bath wall (steel plate and plaster board) bonded by the emulsion type dismantlable adhesive.

3・3 接着耐久性評価

3・3・1 小サイズ試験体

(a) 弾性系解体性接着剤

接着耐久性として、住環境での使用を想定し Table V に示す各環境条件下（自主規格）に暴露した後の平面引張り強度（JIS A1612 準拠）を測定した。なお接着力は、通常建材に使用される合板の材料破壊強度である 1MPa 以上を目標値とした。

(b) エマルジョン系解体性接着剤

接着耐久性として、Table VI、および Fig. 10、11 に示す各環境条件下で、平面引張り強度（JIS A1612 準拠）、ピーリング強度（JIS K6854 準拠）、およびクリープ耐性（自主規格：60℃雰囲気中で 25mm 幅の試験片に 500g 静荷重を 90 度角に負荷した際のはく離長さ）を測定した。

Table V. Results of adhesive durability and dismantlable tests of the elastomer type dismantlable adhesive.

tests	methods	results	
		bond strength and dismantlement	
		steel and cement	steel and plastic
1 Initial		2.0 MPa easily dismantlable	2.0 MPa easily dismantlable
2 Heating and cooling cycle test	at 60℃ for 8 hours and at -20℃ for 8 hours 10cycles	2.4MPa easily dismantlable	2.5 MPa easily dismantlable
3 Heat-resistant test	at 60℃ for 30 days	2.5MPa easily dismantlable	2.9 MPa easily dismantlable
4 Humidity-resistant test	at 60℃ 95%RH for 30 days	2.6MPa easily dismantlable	2.4 MPa easily dismantlable
5 Water-resistant test	at 20℃ in water for 7 days	1.3 MPa easily dismantlable	1.2MPa easily dismantlable

Specimen 150x150mm

Table VI. Results of adhesive durability and dismantlable tests of the elastomer type dismantlable adhesive.

tests	methods	results
1 Peeling test	peeling/180° direction JIS K6854 25mm width at 60℃	2.0 N/mm (MDF broken)
2 Cleave test	Original method 500gf load/90° direction 25mm width at 60℃	Separate length 0mm/1 hour
3 Dismantlable test	Infrared rays heating at 150~180℃	easily separable

Specimen 150x150x3mm

Fig. 10. Relationship between bond strength of the emulsion type dismantlable adhesive and exposure time.

Fig. 11. Relationship between peeling strength of the emulsion type dismantlable adhesive and exposure temperature.

3・3・2 実大サイズ試験体 耐久性評価として、Table VIIに示す各環境条件下（自主規格）に順次暴露した後に接着部の剥がれ等を確認した。さらにキッチンカウンターにおいては、試験後シンクを満水にし漏水評価を行った。

3・4 解体（分離）性評価

3・4・1 小サイズ試験体

(a) 弾性系解体性接着剤

Table Vに示す耐久試験後における分離性の評価を行った。なお、分離の際の加熱は遠赤外線加熱炉（松下電工製）を用い、炉内温度を500℃、試験体表面温度が150～180℃になるように設定し2分間行った。

(b) エマルジョン系解体性接着剤

同様に、Fig. 10に示す耐久試験（60℃、95%RH）30日後における分離性の評価を行った。

3・4・2 実大サイズ試験体 キッチンカウンター、浴室壁ともに、Table VIIに示す各環境条件下（自主規格）に順次暴露した後に、分離性評価を行った。なお、分離の際の加熱は熱風乾燥器（エスベック製）を用い、180℃で15分間行った。

4 結果 および 考察

4・1 小サイズ試験体

Fig. 12に弾性系解体性接着剤、Fig. 13にエマルジョン系解体性接着剤の硬化状態、および遠赤外線加熱炉で1分間加熱した際の膨張状態を示す。加熱により体積が膨張し、前者で初期の200～300%、後者で400～500%の体積まで膨張した。

(a) 弾性系解体性接着剤

Table Vに耐久試験結果を示す。全ての過酷な環境に暴露された後にも接着層の剥がれはなく、特に寒熱繰り返し試験、および長期耐熱試験後においては、接着力は

Table VII. Durability and dismantlable tests of the dismantlable adhesive for a kitchen counter and a bath wall.

tests	methods
1 Heating and cooling cycle test	at 60℃ for 8 hours and at -20℃ for 8 hours 10cycles
2 Drying and humidify cycle test	at 40℃,30%RH for 8 hours and at 40℃,90%RH for 16 hours 10cycles
3 Heat-resistant test	at 60℃ for 96 hours
4 Cooling-resistant test	at -20℃ for 96 hours

Fig. 12. Feature after infrared rays heating of the elastomer type dismantlable adhesive.

Fig. 13. Feature after infrared rays heating of the emulsion type dismantlable adhesive.

初期よりも向上する傾向にある。耐水試験においては初期の70%程度に接着力は低下するが、本接着力は合板の材料破壊強度よりも高く、実使用上問題ないものと考えられる。また耐久試験後において、遠赤外線加熱で容易に複合体の分離が可能であった。

Fig. 14に接着時の温度と接着強度の関係を示す。なお、接着後の養生は20℃、50%RH、および10℃、50%RH雰囲気下で3日間行った。接着力は接着時の基板温度、および接着後の養生温度の影響を受けることが分かるが、10℃接着後10℃養生した場合でも、接着力は合板の材料破壊強度よりも高く、低温環境下での接着性も高いことが分かった。

Fig. 15に寒熱繰り返し試験（-20℃で2時間、60℃で2時間）100サイクル時における接着力変化を示す。接着力は初期よりも向上し、温度変化に対しても強い耐久性を保持していることが分かった。

Fig. 14. Relationship between bond strength of the emulsion type dismantlable adhesive and assembly temperature.

Fig. 15. Relationship between the bond strength of the elastomer type dismantlable adhesive and the cycle number of heating and cooling cycle tests.

(b) エマルジョン系解体性接着剤

Fig. 10 に化粧鋼板と石こうボード複合体を 65℃ (dry), および 60℃, 95%RH の環境下に 30 日間暴露した後の接着力の変化を示す。結果は全て 0.2MPa 以上で石こうボードの材料破壊となり, 高温環境, 高湿環境において低下は認められなかった。

Fig. 11 に試験体を -20℃ から 20℃ の環境下に 24 時間暴露した後のピーリング強度を示す。なお本試験においては, 試験体作製後, 養生を 20℃, 2℃ の双方で 24 時間行った。低温側でピーリング強度が高温 (20℃) 側よりも高い傾向にあるが, これは接着剤が硬くなっていることに起因すると考えられ, 特に低温使用においても問題ないものと考えられる。

Table VI に樹脂化粧シートと木質材複合体におけるピーリング試験とクリープ試験結果を示す。ピーリング試験において, 接着力は 2.0N/mm で MDF の材料破壊となった。またクリープ試験において, シートと MDF のはく離は全く発生せず, 樹脂シートにおいても強い耐久性を示した。

Fig. 9 に化粧鋼板と石こうボード複合体, Fig. 16 に樹脂化粧シートと木質材複合体の, 耐久試験 (60℃, 95%RH, 30 日間) 後の加熱による分離状態を示す。これらの複合体は化粧材と芯材の熱膨張率が大きく異なるため, 加熱中に接着界面で応力が発生し, 加熱後は自発的に双方が分離した状態となっているものもある。

4・2 実大サイズ試験体

キッチンカウンターにおいて, Table VII に示す各環境条件下 (自主規格) に順次暴露した後に接着部の剥がれはなく, その後の満水試験においても漏水は認められなかった。

また浴室壁においても, 同様に接着部の剥がれ等異常はなく, さらに耐久試験後の加熱で各々分離可能であり (Fig. 8, 9), 実大サイズにおいても耐久性と分離性の双方を満たすものであった。

Fig. 16. Feature after infrared rays heating of building material (RET film and MDF board) bonded by the emulsion type dismantlable adhesive.

上記結果より, 開発接着剤が異種材料から成る複合建材に使用された場合, 従来の接着剤同様, 住環境 (耐低温性, 耐高温性, 耐高湿性等) での使用に耐え得る接着力を発現し, さらに使用後のリサイクル時における分離も可能であると考えられる。

5 結 言

本論文では, 現状分離ができずリサイクルが困難なさまざまな複合建材の分離・リサイクルを可能とする「解体性接着技術」をとり上げ, 弾性系とエマルジョン系解体性接着剤において, その接着耐久性と解体性について実験的に検証した。その結果, 以下の知見が得られた。

(1) 解体性接着剤において, 接着耐久性と廃棄時の分離性の両立は可能であり, その際の熱膨張性マイクロバールの配合量は, 弾性系で 5 ~ 15%, エマルジョン系で 5 ~ 20% が有効であった。

(2) 弾性系解体性接着剤の接着剤成分は, 変成シリコン系樹脂, ポリエーテル系樹脂, 脱水剤, 無機充填剤から構成され, またエマルジョン系は, 酢酸ビニル系樹脂, ウレタン系樹脂, アクリル系樹脂から構成される配合成分が有効であった。

(3) 開発接着剤は, いったん高温で膨張して接着力が失われた後に冷却されても, その膨張状態を維持するため, 人が触れても安全な温度で容易に複合建材を分離させることができる。

参 考 文 献

- 1) 佐藤千明, 日本接着学会誌, **39**, 295 (2003).
- 2) 富田英雄, 日本接着学会誌, **39**, 271 (2003).
- 3) 堀 薫夫, 日本機械学会講習会資料集, 01-86, 9 (2001).
- 4) 西口隆公, 日本機械学会講習会資料集, 01-86, 1 (2001).
- 5) 佐藤千明, 日本機械学会講習会資料集, 01-86, 23 (2001).
- 6) ロバート・チュウ, 日本機械学会講習会資料集, 01-86, 17 (2001).
- 7) 富田英雄, 日本機械学会講習会資料集, 01-86, 13 (2001).
- 8) 佐藤千明, 工業技術会「解体性接着剤並びに接着技術の開発動向」講習会, 1 (2003).
- 9) 化研テック(株), 可剥離型接着剤カタログ.
- 10) コニシ(株), ボンド製品一覧カタログ (1999).
- 11) 環境庁, 建設省, 通産省, 厚生省, 公布資料 (2000).
- 12) 本山卓彦, “接着剤” (1988) 工業調査会.
- 13) Y. Nishiyama, N. Uto, C. Sato and H. Sakurai, Int. J. Adhesion & Adhesives, **23**, 377 (2003).
- 14) 本多淳裕, “ゴミのリサイクル” (1991) 省エネルギーセンター.
- 15) 秋山俊夫, “木材のリサイクル” (1998) 産調出版.
- 16) 松本油脂(株), マイクロカプセルカタログ (2002).