

支台築造用コンポジットレジンの曲げ強さと接着性

和田 悠 希* 青木(三宅) 香 亀 山 祐 佳 大 橋 桂
緑 野 智 康 押 川 亮 宏 下 山 和 夫 二 瓶 智 太 郎

神奈川歯科大学大学院歯学研究科口腔科学講座クリニカル・バイオマテリアル学分野
(受付：2018 年 10 月 2 日)

Flexural strength and adhesion of resin composite for constructing tooth foundation

Yuuki WADA*, Kaori MIYAKE-AOKI, Yuka KAMEYAMA, Katsura OHASHI,
Tomoyasu MIDONO, Akihiro OSHIKAWA, Kazuo SHIMOYAMA and Tomotaro NIHEI

Division of Clinical Biomaterials, Department of Oral Science, Graduate School of Dentistry,
Kanagawa Dental University
82 Inaoka-cho, Yokosuka, Kanagawa 238-8580, Japan

Abstract

Purpose: The aim of this study was to investigate the three-point bending strength and tensile bond strength to dentin of six resin composites used for building up the core of the tooth.

Methods: The resin composites were submitted to a three-point bending test after being stored under the following conditions: dry storage at room temperature for 7 days, storage in water at 37°C for 7 days, and storage under thermal stress (at 5 and 55°C) for 10,000 cycles. The tensile bond test of the specimen was measured after storing in water at 37°C for 24 h. The filler content of each resin composite was measured. Data were analyzed using one-way analysis of variance and Tukey's multiple comparison tests ($\alpha = 0.05$).

Results: The three-point bending strengths of all resins were lower than that of dentin; in addition, the strength tended to decrease in five of the resins after immersion in water or subjection to thermal stress. Significant differences in tensile bond strengths were noted among the six composite resin materials. Positive correlations were observed between the filler content, flexural strength, and flexural modulus. Alternatively, a negative correlation was noted between filler content and tensile bond strength.

Conclusions: Thus, resin composites appear to be useful for building up the core of the tooth and preventing root fractures. The tensile bond strength to dentin varied among the six resin composites depending on the type of material.

* 責任著者連絡先；〒 238-8580 神奈川県横須賀市稲岡町 82

神奈川歯科大学大学院歯学研究科口腔科学講座クリニカル・バイオマテリアル学分野

和田悠希

TEL & FAX: 046-822-8864 e-mail: wada@kdu.ac.jp

Table 1 Resin composite for constructing tooth foundation used in this study

製品名	製造業者	組成	製造番号	コード
ビューティコア LC ポストペースト	SHOHU	ガラス粉, Bis-GMA, TEGDMA, UDMA, 反応開始材, その他	051606	BP
ビューティコア LC インジェクタブル	SHOHU	ガラス粉, Bis-GMA, TEGDMA, 反応開始材, 着色材, その他	041610	BI
クリアフィル DC コア オートミックス	KURARAY	A ペースト: モノマー (Bis-GMA, その他のメタクリル酸系モノマー) フィラー (表面処理ガラス粉, 表面処理シリカ系マイクロフィラー, シリカ系マイクロフィラー), 光重合触媒, 化学重合触媒, 着色剤, その他	9G0171	DC
		B ペースト: モノマー (TEGDMA, その他のメタクリル酸系モノマー) フィラー (表面処理ガラス粉, 表面処理シリカ系マイクロフィラー, アルミナ系マイクロフィラー), 化学重合促進剤, その他		
エステコア	TOKUYAMA	A ペースト: シリカジルコニアフィラー, Bis-GMA, TEGDMA, Bis-MPEPP, その他	066095	EC
		B ペースト: シリカジルコニアフィラー, Bis-GMA, TEGDMA, Bis-MPEPP, 過酸化水素, カンファークイノン, ラジカル増幅剤, その他		
ルクサコア Z デュアル	DMG	バリウムガラス, ジメタクリレート類, 酸化ジルコニウム, 重合開始剤, 色素, その他	014690	LC
ユニフィルコア EM	GC	ベース: フルオロアルミノシリケートガラス, ウレタンジメタクリレート	1604191	UC
		キャタリスト: フルオロアルミノシリケートガラス, ウレタンジメタクリレート		

緒 言

支台築造は、崩壊した歯冠形態を回復し、上部構造物を装着できるようにする処置であり、その目的は補綴物の保持力増大や残存歯質の補強などが挙げられる¹⁻⁴⁾。支台築造体は、口腔内での咬合力、温度変化、唾液の存在など厳しい環境下で長期間において、その機能を維持しなければならない。現在、支台築造には、金属の鋳造によるメタルコアと支台築造用コンポジットレジンを用いたレジンコアがある。メタルコアは、機械的強度が高く、歯冠崩壊が著しい場合に使用される⁴⁻⁷⁾。しかし、弾性係数が象牙質より高いことから、ポスト先端に応力集中を起し、骨縁下での歯根破折の原因となると報告されている^{2, 7-15)}。一方、レジンコアの機械的強度は、メタルコアと比べて劣るものの、弾性係数が象牙質と近似しているため、歯根破折を防止でき、アンダーカット部にも利用できることから、健全歯質の保存や審美性の点で有利である^{3, 4, 11, 12, 14-18)}。さらに近年、Minimal Intervention in the Management of Dental Caries (MI) の概念^{12, 19-21)}やコンポジットレジン硬化体の機械的強度の向上、象牙質接着システムの進歩により臨床での応

用が増加しつつある^{4, 5, 22)}。レジンコアが抜歯につながる歯根破折の原因となるメタルコアに代わる支台築造材料として、今後臨床においてさらに普及するためには欠点とされている機械的強度と接着性の問題を明らかにする必要があると考えられる。

そこで本研究では、市販されている6種の支台築造用コンポジットレジンの機械的性質と象牙質に対する接着性について検討した。

材料および方法

1. 材料

本研究に供した支台築造用コンポジットレジンには、ビューティコア LC ポストペースト (以下 BP, SHOHU), ビューティコア LC インジェクタブル (以下 BI, SHOHU), クリアフィル DC コア (以下 DC, KURARAYNORITAKE), エステコア (以下 EC, TOKUYAMADENTAL), ルクサコア (以下 LC, DMG), およびユニフィルコア (以下 UC, GC) の6種を使用した (Table1)。

2. 方法

1) 3 点曲げ試験

各支台築造用コンポジットレジンに 2×2×25 mm の

Table 2 Adhesion system used in this study

製品名	製造業者	組成	製造番号
ビューティーデュアル ボンド EX	SHOHU	ボンド A: 精製水, アセトン, 反応開始材	A: 111506
		ボンド B: アセトン, Bis-GMA, カルボン酸系モノマー, TEGDMA, 反応開始材, その他	B: 011608
クリアフィルボンド SE ONE	KURARAY	モノマー (Bis-GMA, MDP, HEMA, その他メタクリル酸系モノマー), フィラー (シリカ系マイクロフィラー), エタノール, 光重合触媒, 化学重合促進剤, 精製水, フッ化ナトリウム, その他	5C0032
エステリンク	TOKUYAMA	ボンド A: アセトン, リン酸モノマー, Bis-GMA, TEGDMA, HEMA, その他	066095
		ボンド B: アセトン, イソプロパノール, 水, ボレート系触媒, 過酸化物質, その他	
ルクサボンド	DMG	プレボンド: エタノール, ベンゼンスルフィン酸ナトリウム	014690
		ボンド A: メタクリレート類, 重合開始剤, その他	
		ボンド B: メタクリレート類, 重合開始剤, その他	
セルフエッチングボンド	GC	エッチングゲル: リン酸, 二酸化ケイ素, 色素, その他	163011
		A 液: 水, エタノール, 4-メタクリロキシエチルトリメリット酸, メタクリル酸エステル B 液: エタノール, 重合促進剤	

ステンレス製分割金型に填入し、プラスチック板を介して、金型の上板をのせた状態で 1 kg の荷重で 60 秒間圧接した。その後、金型の上板を撤去し、上方向より可視光線照射器（オブチラックス、サイブロンデンタル株式会社）にて光照射を 60 秒間行い重合させた。耐水研磨紙 #600 まで研磨し、作製した試料は室温 24 時間放置後、室温で 7 日間保管した群（以下、R 群）、37℃水中に 7 日間保管した群（以下、W 群）、および 5℃と 55℃の水槽に各 40 秒間浸漬したサーマルストレスを 10,000 回負荷した群（以下、S 群）の各条件にて保管した。JIS 規格 T6523 6.9 に準じて、小型卓上試験機 EZ Test（島津製作所）を用いて、支点間距離 20 mm、クロスヘッドスピード 1 mm/min で 3 点曲げ試験を行い、分析ソフト（TRAPEZUM2、島津製作所）により曲げ強さと曲げ弾性率を算出した。なお、試料は各群 3 個とした。

2) 引張接着試験

被着体は、ウシ前歯歯冠部を自動回転切断機（ISOMET, BUEHLER）にて切断した後、歯根部を歯軸と平行に 2 分割したものをを用いた。これを常温重合レジジン（TRAYRESIN II, 松風）に包埋し、被着面となる歯根内面を回転研磨機（丸本試料琢磨機 5627-56, 丸本工業）にて耐水研磨紙 #600 まで表面が水平になるまで研削した後、超音波洗浄器（AS482, アズワン）で 30 分間超音波洗浄を行った。接着面を 20 秒間乾燥後、デンティンコンディショナー（GC）

を 10 秒間塗布し、水洗、乾燥した。その後、BP と BI はビューティデュアルボンド EX（SHOHU）、DC はクリアフィルボンド SE ONE（KURARAYNORITAKE）、EC はエステリンク（TOKUYAMADENTAL）、LC はルクサボンド（DMG）、UC はセルフエッチングボンド（GC）を用い、各業者指示通りに歯面処理を行った（Table2）。処理後、直径 3 mm の穴を開けた厚さ 60 μm のメンディングテープ（Scotch, 3M）で接着面積を規定し、メッシュ加工した直径 10 mm の円柱状ステンレス製接着子（Tomy International）に各支台築造用コンポジットレジンを約 0.2 g 盛り、手指にて軽く圧接した後、垂直に 1 kg の荷重で 10 秒間圧接した。余剰部を除去し、可視光線照射器（オブチラックス、サイブロンデンタル株式会社）にて光照射を 2 方向から 10 秒間ずつ行い、重合させた。製作した試料は室温にて 30 分間放置後、37℃水中にて 24 時間保管した。保管後、オートグラフ EZ Test（EZ-S 500N, 島津製作所）を用いて、クロスヘッドスピード 1 mm/min にて引張接着試験を行い、接着破断面は光学顕微鏡（SZX10, Olympus）にて観察し、破断面の評価を行った。破断面の評価は、レジジン層と被着面での破壊を界面破壊、レジジン層内部での破壊を凝集破壊、界面破壊と凝集破壊が混合したものを混合破壊とした。なお、試料は各群 10 個とした。

3) 無機フィラー含有量の測定

支台築造用コンポジットレジンの無機フィラー含有

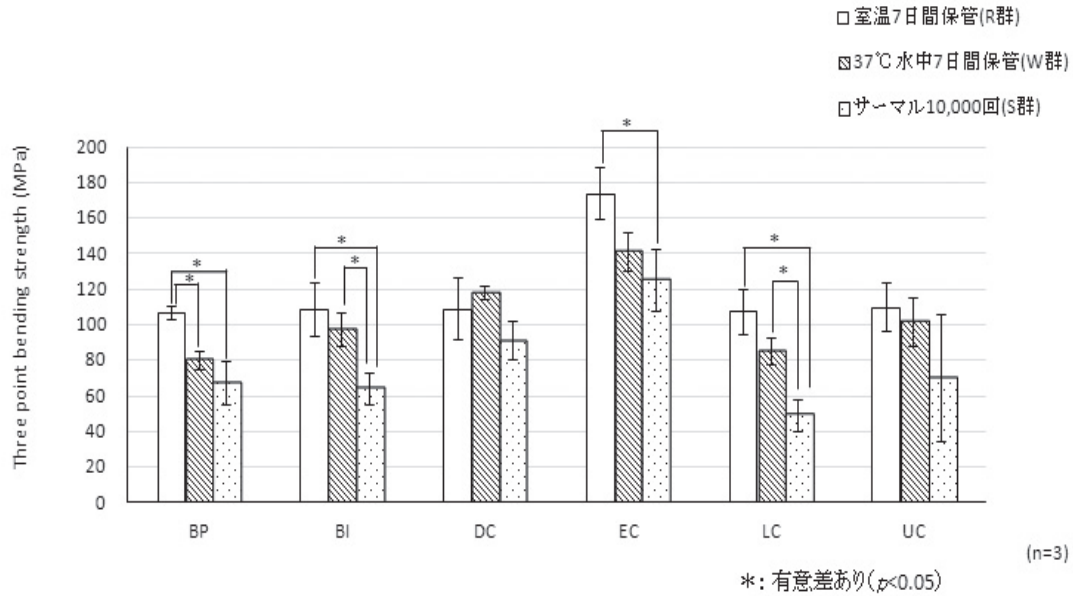


Fig.1 Three point bending strength of resin composite for constructing tooth foundation
 BP, BI, EC, LCでR群と比較してS群で有意に低い値を示した ($p < 0.05$)。BPではR群と比較してW群で有意に低い値を示し ($p < 0.05$)、BIおよびLCではW群と比較してS群で有意に低い値を示した ($p < 0.05$)。

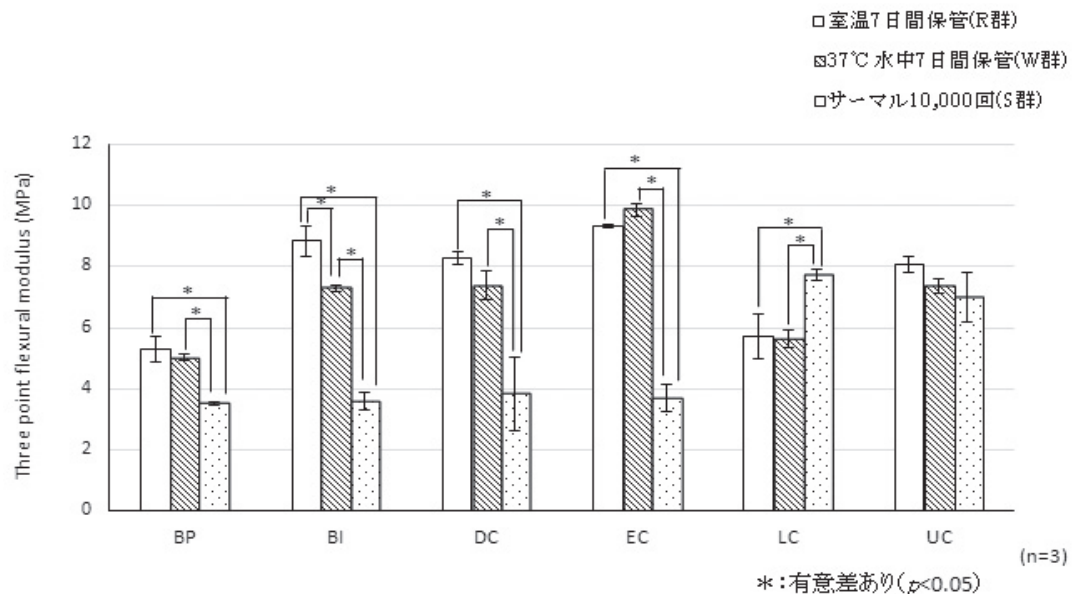


Fig.2 Three point flexural modulus of resin composite for constructing tooth foundation
 BP, BI, DC, ECでR群およびW群と比較してS群で有意に低い値を示した ($p < 0.05$)。LCではR群およびW群と比較してS群で有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。

量の測定は、各試料を3点曲げ試験と同寸法の試験片を作製後、装置の試料皿に移送し、熱重量測定装置 (TG/DTA 6300, セイコーインスツルメント) を用いて、昇温速度 $10^{\circ}\text{C} / \text{min}$ の条件で 800°C 、3時間加熱後、室温まで冷却し、加熱処理前後の重量の差より、無機フィラー含有量 (wt%) を算出した。なお、試料数は各群3個とした。

4) 統計学的分析

曲げ強さ、曲げ弾性率、引張接着強さ、およびフィラー含有量について得られた値は、平均値と標準偏差を求め、一元配置分散分析により有意水準5%で統計処理を行い、有意差が認められた場合にはさらに Tukey's の多重比較検定を行った。

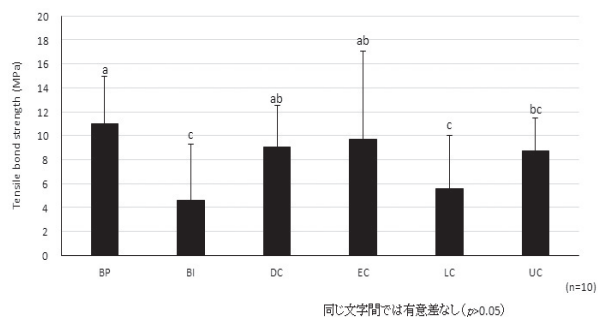


Fig.3 Tensile bond strength of resin composite for constructing tooth foundation
BP, DC, およびECがBI, LCと比較して有意に高い値を示した ($p<0.05$)。

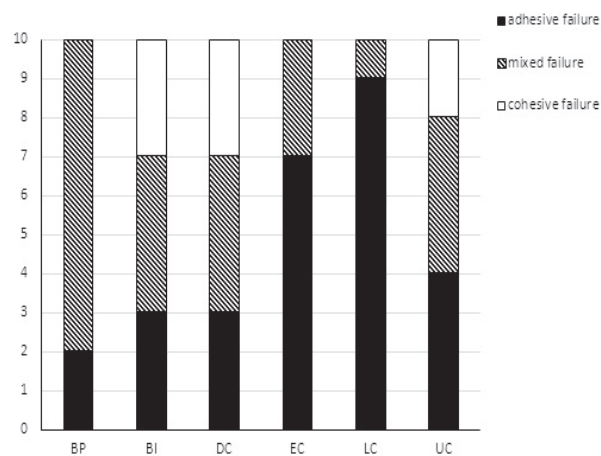


Fig.4 Fracture mode of resin composite for constructing tooth foundation to dentin after tensile bond test
BPで混合破壊, ECおよびLCで界面破壊が多く認められ, BI, DC, およびUCではすべての破壊形態が認められた。

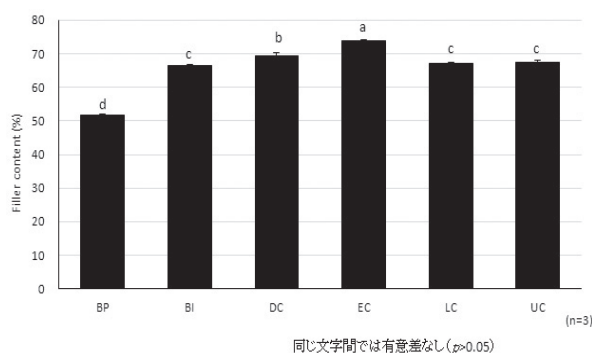


Fig.5 Filler content of resin composite for constructing tooth foundation
ECが他群と比較して有意に高い値を示し ($p<0.05$), BPが他群と比較して有意に低い値を示した ($p<0.05$)。

結 果

1. 3 曲げ強さおよび曲げ弾性率

曲げ強さおよび曲げ弾性率の結果を Fig.1, 2 に示す。R 群の曲げ強さは、BP が 106.4 ± 3.9 MPa, BI が 108.3 ± 14.9 MPa, DC が 108.9 ± 17.7 MPa, EC が 173.7 ± 14.7 MPa, LC が 107.1 ± 13.1 MPa, UC が 109.5 ± 13.5 MPa であった。W 群の曲げ強さは、BP が 80.0 ± 5.0 MPa, BI が 96.8 ± 9.3 MPa, DC が 117.9 ± 4.1 MPa, EC が 140.9 ± 10.4 MPa, LC が 85.2 ± 7.4 MPa, UC が 101.6 ± 13.4 MPa であった。S 群の曲げ強さは、BP が 66.9 ± 12.0 MPa, BI が 63.7 ± 8.7 MPa, DC が 90.7 ± 10.9 MPa, EC が 124.9 ± 17.0 MPa, LC が 48.5 ± 8.8 MPa, UC が 69.7 ± 36.0 MPa であった。R 群と W 群を比較すると BP は W 群で有意に低い値 ($p<0.05$) を示し、

W 群と S 群を比較すると BI, LC は S 群で有意に低い値 ($p<0.05$) を示した。R 群と S 群を比較すると BP, BI, EC, LC は S 群で有意に低い値 ($p<0.05$) を示したが、DC, UC では有意な差は認められなかった ($p>0.05$)。

R 群の曲げ弾性率は、BP が 5.3 ± 0.4 GPa, BI が 8.9 ± 0.5 GPa, DC が 8.3 ± 0.2 GPa, EC が 9.3 ± 0.1 GPa, LC が 5.7 ± 0.7 GPa, UC が 8.1 ± 0.3 GPa であった。W 群の曲げ弾性率は、BP が 5.0 ± 0.1 GPa, BI が 7.3 ± 0.1 GPa, DC が 7.4 ± 0.5 GPa, EC が 9.9 ± 0.2 GPa, LC が 5.6 ± 0.3 GPa, UC が 7.4 ± 0.2 GPa であった。S 群の曲げ弾性率は、BP が 3.5 ± 0.1 GPa, BI が 3.6 ± 0.3 GPa, DC が 3.8 ± 1.2 GPa, EC が 3.7 ± 0.4 GPa, LC が 7.7 ± 0.2 GPa, UC が 7.0 ± 0.8 GPa であった。R 群と W 群を比較すると BI は W 群で有意に低い値 ($p<0.05$) を示

した。W 群と S 群を比較すると BP, BI, DC, EC は S 群で有意に低い値 ($p<0.05$), LC は S 群で有意に高い値 ($p<0.05$) を示し, UC では有意な差は認められなかった ($p>0.05$)。R 群と S 群を比較すると BP, BI, DC, EC は S 群で有意に低い値 ($p<0.05$), LC は S 群で有意に高い値 ($p<0.05$) を示し, UC では有意な差は認められなかった ($p>0.05$)。

2. 引張接着強さ

引張接着強さの結果を Fig.3 に示す。引張接着強さは, BP が 11.0 ± 4.0 MPa, BI が 4.6 ± 4.7 MPa, DC が 9.0 ± 3.5 MPa, EC が 9.7 ± 7.4 MPa, LC が 5.5 ± 4.5 MPa, UC が 8.7 ± 2.8 MPa を示した。BP, DC, および EC が BI および LC と比較して有意に高い値 ($p<0.05$) を示した。また, 破壊様式の結果を Fig.4 に示す。BP ではほとんどが混合破壊であったのに対し, EC, LC では界面破壊が多く見られ, BI, DC, UC では混合破壊と界面破壊と凝集破壊がほぼ同数であった。

3. フィラー含有量

フィラー含有量の結果を Fig.5 に示す。フィラー含有量は BP が 51.6 ± 0.4 wt%, BI が 66.6 ± 0.1 wt%, DC が 69.5 ± 0.7 wt%, EC が 73.9 ± 0.2 wt%, LC が 67.1 ± 0.4 wt%, UC が 67.5 ± 0.7 wt% であった。EC が最も高い値を示し, 他群と比較して有意差が認められた ($p<0.05$)。一方, BP は最も低い値を示し, 他群と比較して有意差が認められた ($p<0.05$)。

考 察

支台築造は, 歯冠崩壊の著しい歯に対して歯冠形態を回復するために行う操作であり, 象牙質を対象としているため, 象牙質と近似した機械的特性が必要と考えられる。また, 支台築造において重要なのは歯質との一体化であるため²⁰⁾, 歯質とレジンの間には良好な接着が求められる。そこで, 本研究では市販の支台築造用コンポジットレジンの機械的性質の評価として 3 点曲げ試験を行い, 曲げ強さと曲げ弾性率を求め, 接着性の評価として直接引張試験を行い, 材料学的特性について検討した。なお, 支台築造用コンポジットレジンには機械的強度の規格はないが, 既報の研究においても充填用コンポジットレジンの規格が用いられているため²⁰⁾, 本研究でも同様な規格を採用して実験を行った。

今回供した支台築造用コンポジットレジンの曲げ強さは, 約 106 ~ 173 MPa の値を示した。この値は, 既報の充填用コンポジットレジンの値 80 ~ 180 MPa²³⁾ と比較して同等の値を示したが, 象牙質の値, および銀合金の値 153 ~ 229 MPa, 277 ~ 343 MPa²⁴⁾ と比較して低い値を示した。曲げ強さは,

口腔内において咬合力に抵抗するために重要な機械的強度であると考えられ, 築造体は冠によって被覆されるものの, 支台築造は象牙質を対象としているため, 象牙質と同等以上の強度が求められる。本研究の結果より, レジンコアはメタルコアと比較して機械的強度が劣り, これを補うために, 現在臨床では既成ポストやファイバーポストが併用されているが⁴⁾, ポストとレジン, および象牙質との接着性の検討も今後必要であると考えられる。

また, 支台築造用コンポジットレジンの曲げ弾性率は約 5 ~ 9 GPa の値を示した。これは, 銀合金の値 60 ~ 70 GPa²⁵⁾ と比較して, 象牙質の値 12 ~ 19 GPa^{13, 20)} に近い値を示した。本研究の結果より, レジンコアはメタルコアと比較して弾性率の値が象牙質に近似していることから歯根破折の予防に有用な材料であることが示唆された。

また, 試料の保管条件の違いでは R 群と比較して W 群, S 群では曲げ強さおよび弾性率の低下が認められた。一般的にレジン吸水や熱刺激により劣化することが知られている^{5, 16, 26, 27)}。レジンの劣化には化学的因子としてマトリックスレジンおよびフィラーとの接合部のシランカップリング層の加水分解, 物理的因子として重合率, 吸水, 溶出が関与しているとの報告がある⁵⁾。したがって, W 群での物性低下の原因は, 水中浸漬によるレジンの吸水とそれに伴うシランカップリング層の加水分解が生じたためであると推察される。さらに S 群では, サーマルストレスによる熱刺激で加水分解が促進, フィラーとマトリックスレジン界面に応力が発生しフィラー成分が溶出したため, さらなる物性低下を招いたと考えられる。一方でサーマルストレスの熱負荷はレジンの後重合を促進し, モノマーの重合率が上昇するため物性向上を生じることがある²⁸⁾。材料により傾向が異なったのは, 前述のマトリックスレジンの種類, 重合度やフィラーの種類, 含有量の違いが関与していると推察される。マトリックスレジンの種類としては Bis-GMA, TEGDMA, UDMA, Bis-MPEPP などが挙げられ, 各々の特徴としては Bis-GMA は芳香族の親水性モノマーであり分子内に水酸基を有している。また Bis-GMA は粘性が高いことからフィラーの混入が不可能なため, 希釈材として TEGDMA が含有されている^{26, 29)}。TEGDMA は中心骨格にエーテル結合をもち, 吸水性が高いことが知られている²⁶⁾。UDMA は脂肪族の疎水性モノマーであるが二重結合間距離が長いことから経時的に吸水量は増加するが取り込まれた水が可塑剤として働くことから物性への影響は少なくなるとされている²⁶⁾。よって, LC はマトリックスレジンの詳しい記載は明

Table 3 Pearson coefficient of correlation

	曲げ強さ	曲げ弾性率	引張接着強さ
フィラー含有量 (有意確率)	0.536 * (0.043)	0.766 * (0.001)	-0.61 * (0.007)

* : 相関係数は5%水準で有意差あり

らかにされていないがUDMAの含有やTEGDMAの配合量などが他の材料と異なるため、サーマルストレス後も物性向上が認められたと推察される。

今回、供した支台築造用コンポジットレジンのフィラー含有量は、51～74%の値を示した。この値は、既報の支台築造用コンポジットレジンの値70～80 wt%²²⁾、あるいは68.2～77.8 wt%³⁰⁾と同等の値を示した。また、Pearsonの相関係数より、フィラー含有量と曲げ強さとの間に中程度の正の相関(0.77)、弾性率との間に中程度の正の相関(0.54)がそれぞれ認められたことから(Table3)、フィラー含有量の増加は機械的強度の増加に寄与することが示唆された。

象牙質に対する引張接着強さは、材料により有意な差を示し、Pearsonの相関係数より、フィラー含有量と引張接着強さとの間には中程度の負の相関(-0.61)が認められた(Table3)。レジンと象牙質の接着機構で重要なのは、象牙質に表面処理を行うことで生成される樹脂含浸層の存在である³¹⁻³³⁾。象牙質は水分とコラーゲンを多く含んでおり、親水性のコラーゲンは疎水性のレジンとのぬれ性が低いため、レジン成分の浸透が困難である。そこで、前処理として歯面にボンディング材を塗布することでレジンの浸透を促進する。ボンディングシステム中には酸性モノマーが含まれており、これにより歯質を脱灰、アパタイトから溶出したカルシウムイオンと酸塩基反応を起こすことで歯質と接着にする。したがって、この酸性モノマーの脱灰能力および歯質との反応性が接着に大きく関与していると考えられる。酸性モノマーの脱灰能力はリン酸基をもつものがカルボン酸基をもつものと比較して強いとされているが³¹⁾、脱灰により生じる微小な凹凸による機械的嵌合力が接着の主体となるエナメル質接着とは異なり、象牙質接着では脱灰能力が強すぎると脱灰層が厚くなり、さらにコラーゲン露出によりレジンが浸透しにくくなるため接着力は低下する^{34, 35)}。このため、カルボン酸系の酸性モノマーの方が象牙質接着には適していると考えられる。一方、歯質との化学的結合はMDP、4-MET、Phenyl-Pの順に強く^{33, 36)}、特にMDPはアパタイトに強固に吸着することで良好な歯質接着性を示すとされている^{33, 34, 36-42)}。今回供したボンディング材ではBPおよびBIにカルボン酸系モノ

マー、DCにMDP、ECにリン酸モノマー、UCに4-METが含まれており、良好な歯質接着性を示す酸性モノマーであるMDP、4-METを含有しているDCとUCは安定した結果を示したと考えられる。なお、引張試験後の破断面の観察では、接着強さの値と破壊様式は完全には相関しておらず、今後、接着界面のボンディング材の浸透程度の観察が必要であると考えられた。また、接着操作において被着面への水分の残存は、レジンの重合を阻害し接着力低下につながるため、適切な水分の排除が必要となってくる^{43, 44)}。水分の排除には、ボンディング材中のアセトンやエタノールなどの揮発成分、そして光照射前のエアブローが大きく影響すると考えられる。揮発成分としては、BP、BIおよびECにアセトン、それ以外のシステムにはエタノールが含まれている。エタノールは、水分の揮発とともにボンディング材の粘度を下げるができるため、歯質への浸透性が向上するが、アセトンは揮発性が高く、モノマー濃度を適切に保てないことから歯質への浸透が困難となるとの報告がある⁴⁵⁾。したがって、歯質へのモノマーの浸透を促進するエタノールを揮発成分として含有しているDCとUCは安定した結果を示したと考えられる。一方、エアブローの強度に関しては各業者より異なる指示がされている。中でも、弱圧もしくは中圧等の指示の場合、すべて全く等しい圧で行うのは困難であるため、術者の手技が影響する可能性があるとされている⁴⁶⁾。さらに、水分などの接着阻害因子は被着面から徹底的に排除する必要があるが、エアブローが強すぎるとボンディング層が薄くなり接着力低下につながる恐れもある⁴⁷⁾。このため、適切なエアブローを行うことが接着において非常に重要であると考えられた。その他の歯質接着に関与する因子としてはレジンの重合方式や、熱膨張係数および重合収縮率などが挙げられる⁴⁾。今回供した支台築造用コンポジットレジンの重合方式に注目するとBPおよびBIが光重合型、ECが化学重合型、その他がデュアルキュア型であり、光重合型やデュアルキュア型では光が到達しない部位は光重合による硬化が不十分となるため、重合度の低下により接着強さは低下するとの報告もある⁴⁸⁾。本研究においては光照射条件は一定とし、接着を行ったため、ECは他群

と比較して有意差を示さなかったことから光照射による影響はほとんど認められなかった。また、レ진은重合時の収縮により接着界面で収縮応力が発生、この界面の脆弱な部分が試験時に破壊されやすいため接着強度の低下につながる。特に光照射距離が短いと収縮応力が強くかかり、接着強さは低下するとされている⁴⁹⁾。本研究では光照射距離は統一しているため、この影響は低いと考えられた。

したがって、象牙質接着にはボンディング材の成分やエアブローの強度、その他の因子が関与するため、接着強さは各材料により異なる結果を示したと考えられた。また、今回の研究では水中 24 時間保管での引張接着強さの測定のみを行ったが、前述の 3 点曲げ強さと同様に長期水中保管およびサーマルストレス負荷によるレ진의劣化の接着への影響も今後は検討する必要があると思われる。

以上の結果より、支台築造用コンポジットレ진은象牙質と近似した曲げ弾性率を有することから歯根破折を予防するのに有効な材料であるが強度および歯質接着性は十分であるとは言い難いため、さらなる検討が必要である。今後は、レジン劣化の原因となる吸水性や光重合において懸念される重合深度などについても調査することで臨床への普及に繋がると思われる。

結 論

市販支台築造用コンポジットレ진의曲げ強さおよび曲げ弾性率、引張接着強さを検討した結果、以下の結論が得られた。

1. 曲げ強さは、すべての材料で象牙質より低い値を示したが、BP, BI, EC, および LC は水中浸漬やサーマルストレス負荷による強さの低下も認められた。
2. 曲げ弾性率は、すべての材料で象牙質と近似した値を示したが、BP, BI, DC, および EC は水中浸漬、サーマルストレス負荷による低下が認められた。
3. 引張接着強さは、BP, DC, および EC が BI, LC と比較して有意に高い値を示した。
4. フィラー含有量と機械的強度は中程度から高い正の相関が認められた。
5. 本研究に供した支台築造用コンポジットレ진은曲げ強さが象牙質と比較して多少劣るものの、曲げ弾性率は象牙質と近似していたことから歯根破折の予防に有用な材料であることが示唆された。また、歯質接着性はシステムにより異なる値を示し、十分な接着強さを有しているとは言い難いため、今後さらなる検討が必要であると考えられた。

本論文に関して申告すべき利益相反なし。

文 献

1. 尾崎元紀. 支台築造用材料の補強効果に関する実験的研究. 鶴見歯学 **14**: 27-46, 1988.
2. 北村 茂, 積田光由, 坪田有史, 小久保裕司, 福島俊士. 二次元有限要素解析による支台築造の力学的検討. 鶴見歯学 **33**: 21-29, 2007.
3. 安田源沢, 吉田武史, 山口佳奈子, 大藤竜樹, 大岡悟史, 黒川弘康, 宮崎真至. 超音波透過法を用いたコア用レ진의重合挙動観察. 歯材器 **27**: 363, 2008.
4. 坪田有史. 根管処置歯における支台築造. 歯産学誌 **28**: 3-8, 2014.
5. 原島 厚, 中 貴弘, 本多宗暁, 山崎淳史, 森山明勲, 倉持健一, 高橋洋子, 山賀谷一郎, 日比野 靖, 中嶋 裕. 熱水浸漬による支台築造用コンポジットレ진의物性変化. 歯材器 **23**: 211-219, 2004.
6. Peroz I, Blankenstein F, Lange KP, Naumann M. Restoring endodontically treated teeth with posts and cores-a review. *Quintessence Int* **36**: 737-746, 2005.
7. 武井秀典. さまざまなレジンコアとクラウンによる修復支台歯の歯根象牙質に加わる応力の光弾性的解析. 口腔病学誌 **77**: 71-80, 2010.
8. Ferrai M, Vichi A, Garcia-Godoy F. Clinical evaluation of fiber-reinforced epoxy resin posts and cast post and cores. *Am J Dent* **13**: 15B-18B, 2000.
9. 高橋英和. 支台築造歯の歯根破折のメカニズム. 日補綴会誌 **45**: 669-678, 2001.
10. 大柁貴俊. ファイバーポスト併用レジン支台築造のポスト長に関する研究. 日補綴会誌 **50**: 180-190, 2006.
11. 川村謙輔, 作 誠太郎, 山本宏治. 試作根管用レジンコアに関する研究. 日歯保存誌 **49**: 648-657, 2006.
12. 坪田有史. 接着と合着を再考する 支台築造を中心に. 日補綴会誌 **4**: 364-371, 2012.
13. 小田 豊, 副島寛貴, 原田麗乃, 服部雅之, 河田英司, 吉成正雄. ファイバーポストを用いた支台築造体の破断強度. 歯産学誌 **27**: 31-37, 2013.
14. 吉田記代, 田島清司, 田中達朗, 鱒見進一. 支台築造材料および荷重方向の違いが上顎中切歯の応力分布に及ぼす影響. 九州歯学 **67**: 63-75, 2013.
15. 副島寛貴, 武本真治, 小田 豊, 河田英司. ファイバー強化型コンポジットレジンポストを用いて直接法で支台築造したポストの維持力. 日歯保存誌 **58**: 185-191, 2015.
16. 西村 康. 歯冠部歯質が失われた失活歯に対する支台築造に関する研究. 日補綴会誌 **48**: 49-58, 2004.
17. 石上恵一, 倉澤郁文, 山口泰彦. ファイバーポスト併用レジン築造の問題点と可能性 議論の端緒にあたって. 日補綴会誌 **50**: 145-165, 2006.
18. 坪田有史, 山崎弘光, 福島俊士. 新しいレジンコア材料による支台築造とジルコニアオールセラミッククラウン. 歯界展望 **114**: 132-139, 2009.

19. 加藤正治. ミニマルインターベンションを日常臨床のなかでとらえ直す. 歯界展望 **99**: 1226-1236, 2002.
20. 坪田有史, 西村 康, 大祢貴俊, 深川菜穂, 橋本 興, 小林和弘, 野本理恵, 平野 進, 福島俊士. 支台築造用コンポジットレジンの加熱処理による物性への影響. 歯材器 **23**: 225-235, 2004.
21. 神農泰生, 岸本麻実, 穴吹優佳, 神谷絵里子, 大前正範, 西谷佳浩, 吉山昌宏. 白歯直接修復用コンポジットレジンの物性に関する検討. 日歯保存誌 **51**: 622-629, 2008.
22. 山田敏元, 細田裕康, 鶴貝隆男. コア用コンポジットレジンの分類と理工学的諸性能. 歯材器 **9**: 205-217, 1990.
23. 藤島昭宏, 池田訓子, 宮崎 隆, 佐々竜二. フィラータイプによるコンポジットレジンの分類と機械的性質. 昭和歯学 **19**: 16-24, 1999.
24. 坪田有史. いま, 支台築造に求められるものとは. 日本歯科評論 **76**: 28-36, 2016.
25. 小田 裕. 歯科鑄造用銀合金の疲労特性. 歯産学誌 **25**: 26-31, 2011.
26. 村上あつ子, 牧 志寿子, 杉山 久. 各種マトリックスレジンがコンポジットレジンの物性に与える影響について. 歯学 **79**: 605-626, 1991.
27. 原島 厚, 山崎淳史, 本多宗暁, 長沢悠子, 倉持健一, 高橋洋子, 新倉美奈子, 山賀谷一郎, 日比野 靖, 中島 裕. 熱水浸漬後の支台築造用コンポジットレジンの曲げ強さと圧縮強さの変化. 歯材器 **24**: 15-22, 2005.
28. 高見澤俊樹, 色川敦士, 前田 徹, 山口佳奈子, 安田源沢, 森 健太郎, 渡邊孝行, 宮崎真至. 暫間修復用レジンに関する研究(第2報)サーマルサイクリングの負荷が曲げ特性に及ぼす影響. 接着歯学 **24**: 172-178, 2006.
29. 平野 進. わが国のコンポジットレジンの研究. 日本歯科理工学会誌 **29**: 356-369, 2010.
30. 高橋英和, 岩崎直彦, 青柳裕仁, 金 景月, 砺波健一, マンスワン・アクソスキット. 最近のデュアルキュア型支台築造用コンポジットレジンの諸性質. 歯材器 **23**: 287-293, 2004.
31. 新谷明一, 新妻瑛紀, 亘理 薫, 五味治徳. コア用レジンの使用条件が根管象牙質との接着強さにおよぼす影響. 接着歯学 **33**: 139, 2015.
32. 大藤竜樹, 辻本暁正, 大岡悟史, 色川敦士, 坪田圭司, 陸田明智, 安藤 進, 宮崎真至. 照射時間がコア用レジンの象牙質接着性に及ぼす影響. 歯材器 **28**: 101, 2009.
33. 竹林千賀子, 増田美樹子, 小滝美佐子, 北川剛至, 會田雅啓. 新規コンポジットレジン用接着材の象牙質接着性について. 日大口腔科学 **31**: 138-147, 2005.
34. Inoue S, Koshiro K, Yoshida Y, De Munck J, Nagakane K, Suzuki K, et al. Hydrdytic stability of self-etch adhesives bonded to dentin. *J Dent Res* **84**: 1160-1164, 2005.
35. 市村 崇, 堀田正人, 小竹宏朋, 山本宏治. 各種ボンディングシステムにおけるボンディング材の機械的性質. 日歯保存誌 **51**: 379-395, 2008.
36. 勝俣愛一郎, 門脇佳孝, 川野晋平, 丁 世俊, 角田晋一, 星加修平, 池田考績, 田中 享, 佐野英彦. 象牙質湿潤状態がユニバーサルボンドの接着性能に及ぼす影響. 日歯保存誌 **59**: 32-39, 2016.
37. 菊地信之. 軟化根管象牙質の再硬化に関する基礎的研究(第2報) 再硬化された根管象牙質へのコアレジンの接着強さ. 日歯保存誌 **51**: 557-564, 2008.
38. 吉田靖弘. 接着と合着を再考する 歯質接着のためのナノ界面分析. 日補綴会誌 **4**: 353-363, 2012.
39. 堤 春比古. 実力アップセミナー 支台築造 レジンコアおよびファイバーコアの臨床 デンティンボンディングの概念とその実践. 補綴臨床 **39**: 570-575, 2006.
40. Yoshida Y, Nagakane K, Fukuda R, Nakayama Y, Okazaki M, Shintani H, et al. Comparrative study on adhesive performance of functional monomers. *J Dent Res* **83**: 454-458, 2004.
41. 藤田 光, 横田容子, 内山敏一, 岡田珠美, 大村基守, 西山典宏, 平山聡司. MDP 含有ワンステップボンディング材の歯質接着性に関する研究. 日歯保存誌 **58**: 192-199, 2015.
42. 藤田 光, 岩井仁寿, 岩井啓寿, 岡田珠美, 鈴木英明, 内山敏一, 西山典宏, 平山聡司. ワンステップボンディング材の歯質脱灰能に関する研究. 日歯保存誌 **58**: 273-281, 2015.
43. 宇野 滋, 杉崎順平, 森上 誠, 山田敏元, 有田明史, 小島真一, 眞塩 剛, 赤羽正治. リン酸エステル系モノマー/4-MET 含有ワンボンド・ワンステップ接着システム G-BOND の歯質接着性. 接着歯学 **23**: 60-68, 2005.
44. 福岡杏理, 小城賢一, 井上 哲, 吉田靖弘, 田中 享, 池田考績, 鈴木一臣, 小松久憲, 佐野英彦. スミヤー層が1ステップ接着システムの短長期的象牙質接着性能に及ぼす影響. 日歯保存誌 **52**: 27-38, 2009.
45. 藤田 光, 関根哲子, 岡田珠美, 伊東哲明, 内山敏一, 西山典宏, 平山聡司. 保管期間によるワンステップボンディング材の変性. 日歯保存誌 **58**: 398-405, 2015.
46. 砂田識敦, 黒川弘康, 田村ゆきえ, 田久保周子, 古賀賢策, 藤井雄介, 宮崎真至, 近藤 貢. 圧搾空気の汚染がワンステップ接着システムの歯質接着性に及ぼす影響. 日歯保存誌 **52**: 229-236, 2009.
47. 西村美穂. レジンコア用試作デュアルキュア型ボンディング材の歯髄側象牙質への接着性. 接着歯学 **24**: 22-25, 2006.
48. 清村正弥, 安田 登. 市販ボンディング材の接着性能 ボンディング材の厚みが引張接着強さと窩壁適合性に与える影響. 接着歯学 **23**: 190-201, 2005.
49. 若木 卓. 症例と対応 歯面処理材について考える. 歯学 **102**: 20-23, 2014.