

竹纖維を混入した法面保護用吹付けモルタルの  
基礎的性状および耐久性に関する研究

学 位 論 文

2019年 9月

徳島大学大学院 先端技術科学教育部  
知的力学システム工学専攻

藤好 一男



## 目次

<b>第1章 序論</b> .....	1
1.1 本研究の背景.....	1
1.2 放置竹林の現状.....	1
1.2.1 放置竹林の拡大.....	1
1.2.2 竹材の利活用.....	4
1.3 法面保護用吹付けコンクリート.....	5
1.3.1 吹付けコンクリートの特徴と用途.....	5
1.3.2 法面保護用吹付けコンクリートの特徴.....	6
1.4 法面保護用吹付けコンクリートに関する既往の研究.....	8
1.4.1 法面保護用吹付けコンクリートの課題.....	8
1.4.2 ひび割れ抑制.....	10
1.4.3 乾湿繰返し抵抗性.....	11
1.4.4 凍結融解抵抗性.....	11
1.5 竹材に関する既往の研究.....	13
1.5.1 竹の構造.....	13
1.5.2 竹の成分と糖化.....	15
1.5.3 竹材の耐アルカリ特性.....	20
1.6 短繊維補強に関する既往の研究.....	26
1.6.1 短繊維とモルタルマトリックスとの付着形態.....	26
1.6.2 合成繊維の引張強度および付着強度.....	27
1.6.3 竹材の引張強度および付着強度.....	29
1.7 本研究の目的と構成.....	32
<b>第2章 竹繊維の基礎物性</b> .....	<b>34</b>
2.1 はじめに.....	34
2.2 実験概要.....	34

2.2.1	糖分溶出試験使用竹繊維	34
2.2.2	強度試験使用繊維	35
2.2.3	糖分溶出試験	35
2.2.4	繊維引張強度試験	38
2.2.5	繊維引抜き試験	39
2.3	実験結果と考察	40
2.3.1	糖度測定機器の選定試験	40
2.3.2	常温水による糖分溶出試験	41
2.3.3	温水による糖分溶出試験	41
2.3.4	煮沸による糖分溶出試験	42
2.3.5	本研究で使用する竹繊維	43
2.3.6	竹繊維の引張強度	43
2.3.7	竹繊維の引抜き付着強度	45
<b>第3章 竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルの室内実験による基礎的性状評価</b>		
3.1	はじめに	47
3.2	実験概要	47
3.2.1	使用繊維	47
3.2.2	基礎物性試験	48
3.3	実験結果と考察	50
3.3.1	空隙率	50
3.3.2	圧縮強度	51
3.3.3	曲げ強度および静弾性係数	52
3.3.4	乾燥収縮	53
3.3.5	接着強度	53
<b>第4章 竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルの吹付け実験による力学特性および耐久性評価</b>		
		56

4.1	はじめに.....	56
4.2	実験概要.....	56
4.2.1	使用繊維.....	56
4.2.2	吹付け実験.....	56
4.3	実験結果と考察.....	61
4.3.1	リバウンド率.....	61
4.3.2	空隙率.....	62
4.3.3	マイクロスコープ観察.....	62
4.3.4	圧縮強度.....	63
4.3.5	基盤面との接着強度.....	65
4.3.6	曲げ強度および曲げじん性.....	67
4.3.7	凍結融解抵抗性.....	68
<b>第5章 竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルの試験施工による実用性評価.....</b>		<b>70</b>
5.1	はじめに.....	70
5.2	実験概要.....	70
5.2.1	使用繊維.....	70
5.2.2	試験施工.....	71
5.3	実験結果と考察.....	73
5.3.1	リバウンド率と施工性.....	73
5.3.2	空隙率.....	74
5.3.3	圧縮強度.....	75
5.3.4	法面地山との接着強度.....	75
5.3.5	ひび割れ等の変状観察.....	77
<b>第6章 竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルのライフサイクルアセスメント.....</b>		<b>78</b>
6.1	はじめに.....	78
6.2	LCAの手法.....	78

6.2	LCA の手法	78
6.3	調査範囲の設定	78
6.4	システム境界および機能単位	78
6.5	竹繊維のインベントリ分析	79
6.5.1	原料採取	79
6.5.2	竹繊維製造	82
6.5.3	運搬	84
6.6	合成繊維のインベントリ分析	85
6.6.1	合成繊維製造	85
6.6.2	運搬	86
6.7	環境影響評価	87
<b>第7章</b>	<b>結論</b>	<b>88</b>
7.1	本研究の結論	88
7.1.1	竹繊維の基礎物性（第2章）	88
7.1.2	竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルの室内実験による基礎的性状評価（第3章）	88
7.1.3	竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルの吹付け実験による力学特性および耐久性評価（第4章）	88
7.1.4	竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルの試験施工による実用性評価（第5章）	88
7.1.5	竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルのライフサイクルアセスメント（第6章）	89
7.2	今後の課題と展望	89
7.2.1	今後の課題	89
7.2.2	今後の展望	89
	謝辞	91
	参考文献	92

## 第1章 序論

### 1.1 本研究の背景

法面におけるモルタル吹付け工は、外気や雨水等の浸透を遮断することで、切土地山の風化や浸食を防止することができることから広く利用されてきた。しかし、吹付け工部分が長年の環境作用にさらされるとともに、背面地山が土砂化するなどの劣化要因によって吹付け材の変状・ひび割れや、はく落等の発生が報告されている<sup>1)</sup>。また、吹付け工は施工直後から外部環境の影響を直接受けるため、気象条件等によっては初期ひび割れが生じやすく、その後の耐久性に大きな影響を与えることになる。このような厳しい使用条件を考慮して、近年では、初期ひび割れの抑制や、曲げ・引張じん性の向上を目的として鋼繊維や有機繊維等の短繊維を混入した吹付けモルタルの使用も増えている<sup>1)</sup>。

一方、国内に数多く存在する竹林は身近な天然資源として活用されてきたが、近年では十分な管理がなされずに放置された竹林が多く、根の浅い竹が密生することで土砂災害の危険性が高まるなど、防災上も好ましくないことが指摘されている<sup>2)</sup>。そこで、竹材の有効利用推進の観点から、竹を短繊維化したものをコンクリートやモルタルの補強材として活用することが検討されている。既往の研究<sup>2), 3)</sup>では、竹繊維をコンクリートに混入することで、曲げじん性やひび割れ進展の抵抗性が向上することが報告されている。

### 1.2 放置竹林の現状

#### 1.2.1 放置竹林の拡大

日本の竹林における竹の種類は、主に、孟宗竹（モウソウチク）、真竹（マダケ）、淡竹（ハチク）の3種類で、その分布は、およそ6:3:1の比率<sup>4)</sup>となっている。特に西日本の里山地域に

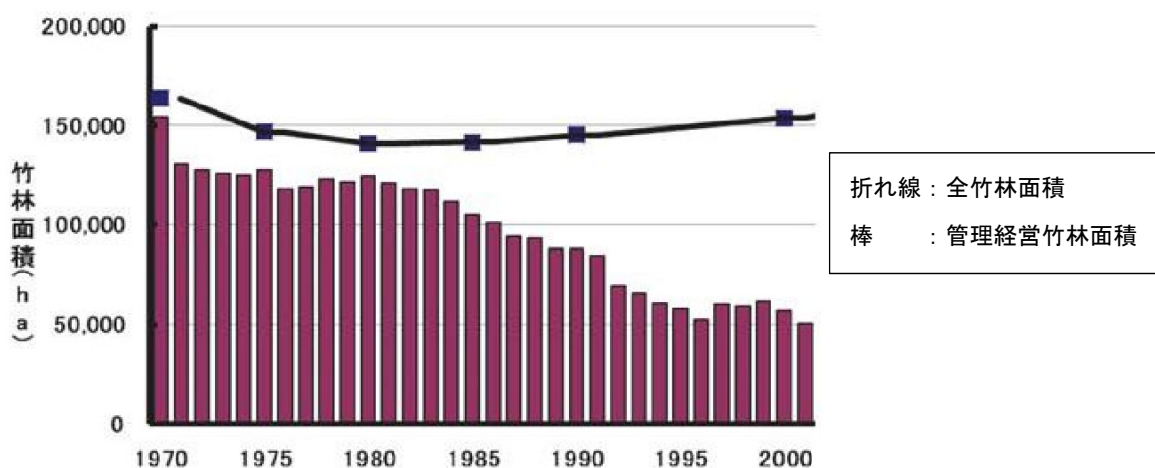


図 1.1 全竹林面積と管理経営竹林面積<sup>5)</sup>

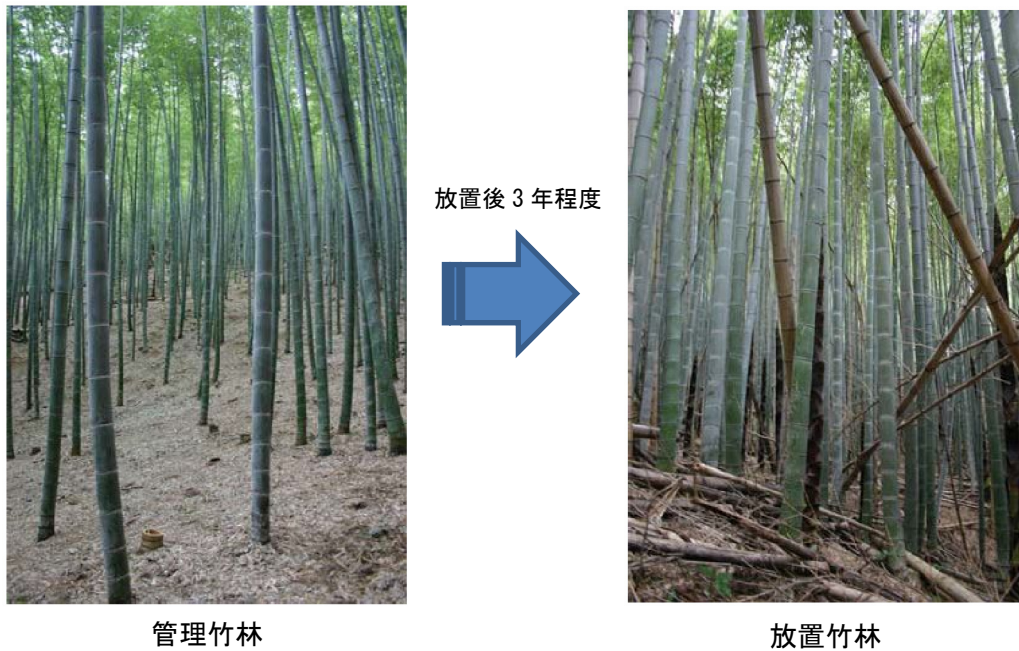


写真 1.1 管理竹林と放置竹林<sup>5)</sup>

多く分布しており、孟宗竹は中国から導入されてタケノコ栽培に使用され、真竹は竹細工の材料として使用されてきた。いずれも現在の竹林は、人為的に植栽されたものが多い。しかしながら、1970年頃の全国的な真竹の開花枯死による一時的な竹材供給のバランスの崩壊や生産者の高齢化によって、海外からの安価な竹材の輸入が増加し、竹材価格が低迷していった。また、竹材の加工技術そのものを海外輸出したことで、さらに海外輸入量が増加していった。そして、1980年代の竹材生産の減少に端を発し、1990年代に海外から水煮タケノコなどの輸入が急増したことで、国内のタケノコ生産が急減していった。その結果、管理竹林は減少の一途をたどり、放置竹林の拡大につながっていった<sup>5)</sup>。

図 1.1 に日本の全竹林面積と管理経営竹林面積の推移を示し、写真 1.1 に管理竹林と放置竹林の状況を示す。図 1.1 によれば、1980年から管理経営竹林面積が減少しているにもかかわらず、全竹林面積のほうは反対に増加している。このことから、放置竹林面積が急激に増加していることがわかる。

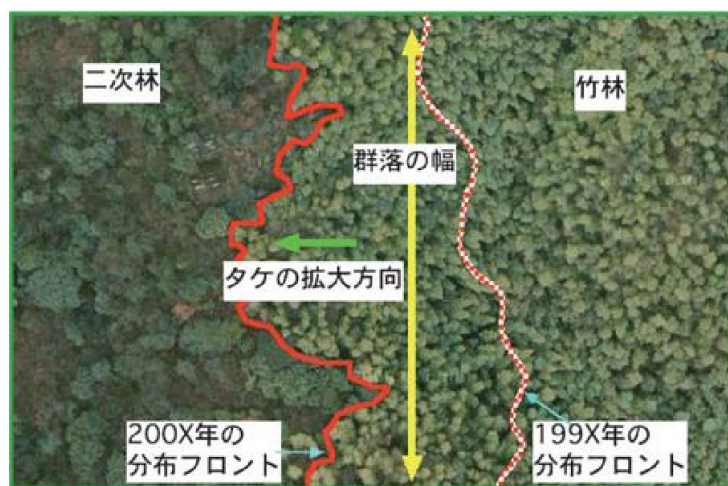


図 1.2 孟宗竹群落の拡大速度<sup>6)</sup>



鳥居らの近畿地区での研究<sup>6)</sup>では、放置竹林の分布拡大スピードは2~3 m/年であり、100年たっても分布のフロントは数百m拡大する程度にすぎないこと(図1.2)、現状の竹林面積が日本の全森林面積の1%にも満たないこと、などから国土が竹林で覆われるなどの広域的な問題はないと報じている。一方で、竹林が他人の敷地に侵入すれば生活環境を害する問題に発展するため、局所的な問題があるとしている。

また、小林らの香川県での研究<sup>7)</sup>によれば、図1.3に示すように約20年で約3倍に竹林面積が拡大したことを報じている。その要因として、1970年代のマツ枯れ問題によって松林が劇的に衰

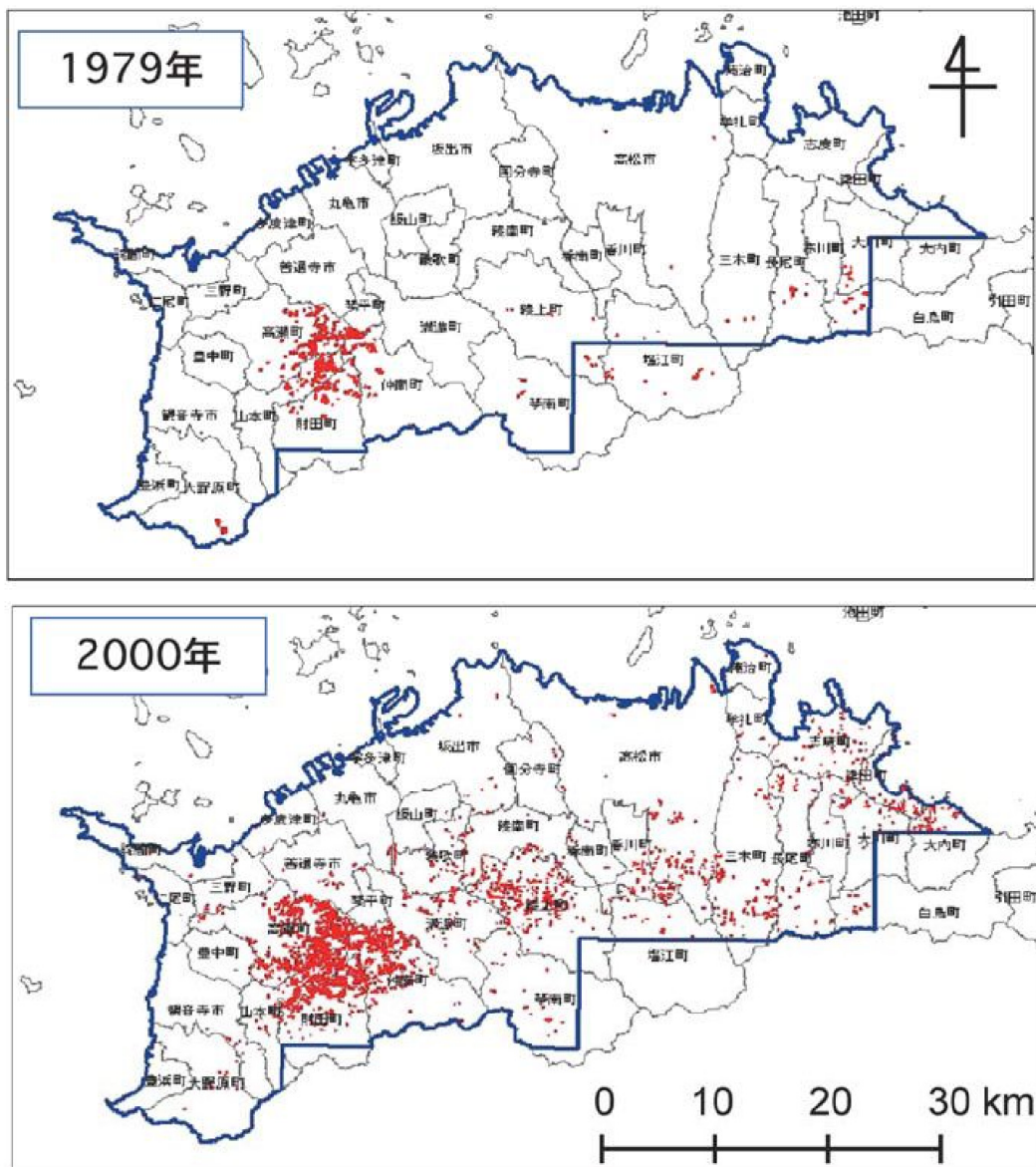


図1.3 香川県における竹林分布の変遷<sup>7)</sup>

退したことが里山林の管理放棄につながり、タケノコや竹材の生産のために増加していた竹林についても放置されるようになったと報告している。

以上の研究から、竹林の平均拡大スピードが2~3 m/年であったとしても、香川県の高瀬、財田などの西部地域にあげられるように、もともとの竹林の分布密度の違いによっては、急速に拡大することがわかる。このことより、地域的には竹林の非管理状態が切迫した問題であることが理解できる。

### 1.2.2 竹材の利活用

現在、放置竹林やプラスチックごみによる海洋汚染などの問題に対して、竹材を有効利用できる用途を開発する動きが活発化している。その主な分野として、農業、工業、建設などがあげられる。

#### (1) 農業分野

農業分野では、竹をチップ化し、堆肥としての利用や畜産業における敷料（家畜の寝床に敷かれる資材）への利用、家畜への飼料などの利用がある<sup>5)</sup>。

#### (2) 工業分野

工業分野では、発電事業での混焼、バイオマス発電、バイオエタノールの開発などのエネルギーとしての利用、竹炭や竹酢液に加工して土壌改良材から消臭剤、入浴剤等の薬剤にいたる広範囲な利用、繊維として紙資源、衣料原料、ナノ繊維などの利用、抽出物として殺虫剤、消毒液などへの利用がある<sup>5)</sup>。

また、強度、剛性、軽さに優れる FRP は自動車や航空機産業への利用が拡大しているものの、ガラス繊維や炭素繊維を使用しているため、リサイクルができず廃棄に多くのコストが生じている。そのため、自動車産業では、竹や麻などの植物系天然繊維を廃棄物の排出抑制に優れる生物分解性複合材料に利用する研究がなされている<sup>8)</sup>。たとえば、自動車では、竹繊維強化ポリブチレンサクシネートボードを電気自動車の実証走行試験車の内装材に採用している<sup>9)</sup>。また、竹材からセルロースナノファイバーを抽出し樹脂製品やタイヤなどの強化材に用いる研究も行われており、注目を集めている<sup>10)</sup>。

#### (3) 建設分野

建設分野では、竹は古くから土壁の骨組み材料としての利用されてきた。また、戦時中の鉄不足に対して、竹を鉄筋の代替え材とした竹筋コンクリートが施工されたが、戦後復興により鉄鋼の生産供給が安定したことで姿を消していった。

近年では、竹を繊維化して切土・盛土の法面保護用植生基材に添加し、植生基材のせん断強度を高めることで地山への活着を向上させる方法や、添加した竹繊維に繁殖する窒素固定菌が大気中の窒素を植生基材に固定することで化学肥料を不要とする方法等が開発されている。また、竹繊維を土や安定処理土に混合してせん断強度、じん性等の力学特性や耐浸食性の向上および植生の根の引抜き抵抗の向上などが期待できる繊維混合土として、堤防のり面の被覆材、土構造物の地盤補強などへ利用する研究がなされている。また、土系舗装やコンクリートに竹繊維を混入す

ることで力学特性の向上を図る研究等がなされている。

### 1.3 法面保護用吹付けコンクリート

#### 1.3.1 吹付けコンクリートの特徴と用途

吹付けコンクリート工法は、型枠を用いることなく、コンクリートやモルタルを地山等の吹付け面に圧縮空気によって直接吹き付け、吹付け面と密着した被覆構造物を形成する工法である。型枠が不要で、垂直壁面、天井下面、オーバーハングした面等、自由な面への急速施工が可能である。

吹付けコンクリートが日本で初めて本格的に使用されたのは、青函トンネル工事（写真 1.2、図 1.4）である。2016年3月に北海道新幹線新青森・新函館北斗間が開業されたことで、改めて青函トンネルが脚光をあびたが、青函トンネルは、日本最長の交通用トンネル（ $L=53.85\text{km}$ ）であり、世界最長の海底トンネルである。工事は、1964年に斜坑掘削が開始され、21年後の1985年に貫通した。津軽海峡の海面下250mを掘削するため、高圧・多量の湧水や多数の断層帯を突破する



トンネル壁面を安定させる吹付けコンクリート施工。海底トンネルの掘削面を早期に安定させるため、青函トンネルではより早強性の高い工法・材料が必要とされた（昭和45年3月）

写真 1.2 青函トンネル吹付けコンクリート工<sup>11)</sup>

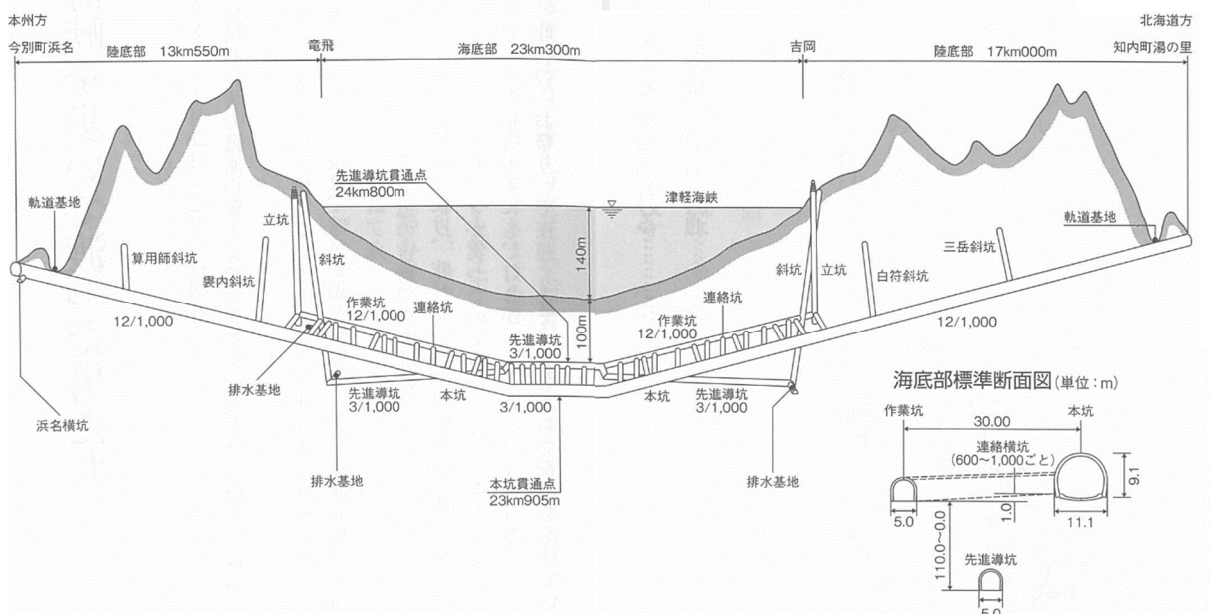


図 1.4 青函トンネル立体略図<sup>11)</sup>

必要があった。そのため、当時数々の先進技術が海外から導入され、技術改良や独自開発がなされた。なかでも、「先進ボーリング」、「地盤注入」、「吹付けコンクリート」が青函トンネルの三大技術といわれ、その後のトンネル工法の基盤技術となっている。

青函トンネルまでの工事では、掘削後の岩盤崩落の対策として、木製枠や鋼製枠を建込み、木製矢板をはめ込みながら掘り進めるというのが一般的であった。現在この工法は、在来工法または矢板工法と称されており、人力作業のため多くの時間を要する工法であった。青函トンネル工事では、迅速な地盤の安定が重要課題であったため、掘削した直後にコンクリートを岩盤に吹き付けて地盤崩壊を防止する吹付けコンクリートは、安全性の確保とともに掘削作業のスピードアップにも大きく貢献した。吹付けコンクリートは、1950年頃にヨーロッパで試験的な導入がなされており、日本では1964年に電源開発七色発電所工事と青函トンネル工事に導入された。特に青函トンネル工事において、作業方法、配合、はね返りや粉じん抑制などに対して改良がなされ、技術が確立されていった。その後、吹付けコンクリート、ロックボルトおよび鋼製支保工を主な支保材とする NATM 工法が上越新幹線中山トンネル工事 (L=14.83km, 1972年～1982年) に本格採用され、現在では山岳トンネルの標準工法となっている<sup>12)</sup>。

1974年のコンクリート標準示方書に、特殊コンクリートとして初めて吹付けコンクリートが登場した。上述したように、吹付けコンクリートは山岳トンネルにおける支保工として発展していったが、また、切土掘削法面の風化や浸食防止のための保護工、法面崩壊対策としての補強工としても発展していった。また、橋梁等のコンクリート劣化に対する断面修復や増厚等、一般構造物の補修・補強にも用いられてきている。このような用途に対応するため、土木学会より吹付けコンクリート指針(案)が[トンネル編]、[のり面編]、[補修・補強編]と3編に分類して発刊されている。なお、同指針では、のり面や補修・補強で多く使用される吹付けモルタルもあわせて吹付けコンクリートの用語に統一して表記され、同意に扱われている。

### 1.3.2 法面保護用吹付けコンクリートの特徴

一般に、法面保護用コンクリートは吹付け工と吹付け枠工に分類される(写真1.3)。はね返り



吹付け工



吹付け枠工

写真 1.3 吹付け工・吹付け枠工

や充填性などの吹付け施工性から、コンクリートよりもモルタルが多く使用されている。

### (1) 吹付け工

主に、法面の風化、浸食およびこれに起因するはく落や落石を防止することを目的とし、対象法面を全面的に吹付けコンクリートで被覆する。吹付け対象となる地盤に接する面積が大きく、吹付け厚が5～20cm程度と薄いことが特徴である。また、崩壊斜面の応急対策として使用されるケース（写真1.4）も多い。



斜面崩壊状況



吹付け工

写真 1.4 応急対策の例

### (2) 吹付け枠工

一般に、吹付けモルタルによって150×150～600×600mm程度の矩形断面を持つ梁を、縦横に中心間隔1～数mの範囲で枠状にのり面地盤上に配置するものである。枠内の裸地部は、景観を考慮して草本類や木本類により緑化を図ることが多いが、吹付けコンクリートによって被覆することもある。

設計においては、力学的な計算をもとに強度や部材寸法が決定されるが、受け持つことが可能な土圧は表層すべりの比較的小さいもの（抑制工）であるため、斜面崩壊対策の抑止工として設計する際は、ロックボルト工やグラウンドアンカー工等と併用される。

### (3) 要求性能

#### 1) 一般要求性能

法面保護用吹付けコンクリート構造物は、構造物として安全であること、局部的なはく離、はく落によって通行車両や歩行者などに被害を及ぼさないこと、構造物が景観に調和するとともに、動植物に与える影響を軽減すること、そしてそれらの機能が供用期間中に持続されることが要求される<sup>り</sup>。

一般に、吹付け工を施工してから補修するまでの期間は、25～35年程度が多く、施工や環境条件および維持管理の状況によっては、10年程度で補修するものもあれば、50年近く補修を行って

いないものもある。そのため、設計耐用期間は設定されていない。また、約 30 年の歴史がある吹付け砕工についても同様である<sup>1)</sup>。

### 2) 力学要求性能

法面保護用吹付けコンクリートの力学的性能は、コンクリートの圧縮強度を基本に設定され、一般には、関係する指針<sup>1),13),14)</sup>、手引き<sup>15)</sup>、各機関の仕様書などを参考に、一般に吹付け工の設計基準強度を  $15\text{N/mm}^2$ 、吹付け砕工の設計基準強度を  $18\text{N/mm}^2$  として設計される。

### 3) 耐久要求性能

法面保護用吹付けコンクリートの耐久性能は、打込みコンクリートと同様に、凍結融解、中性化、塩化物イオンの侵入、化学的侵食、アルカリ骨材反応などに対する抵抗性から、対象箇所環境条件を踏まえて適宜選択し設定される。一般には、実績調査から補強材のかぶりコンクリート 50mm が中性化するのに約 50 年がかかることが判明しているため、標準的な構造物については中性化の照査は省略される<sup>1)</sup>。

## 1.4 法面保護用吹付けコンクリートに関する既往の研究

### 1.4.1 法面保護用吹付けコンクリートの課題

法面保護用吹付けコンクリートは、1970 年代の高度成長期から現在まで多くの施工がなされてきたが、老朽化の進行や背面地山の風化、土砂化等によって吹付け材の変状やはく落にいたる事態が多数発生している（図 1.5、写真 1.5）。その原因としては、構造上の問題と維持管理上の問題があげられる。

#### (1) 構造上の問題

吹付け工は、コンクリート厚が比較的薄い構造物であり、広い面積で地山に直接吹付けられる。そのため、吹付けられたコンクリートは、水和反応による硬化収縮過程において地山による背面拘束を受け、表面に引張亀裂が入りやすい。また、吹付けコンクリートの品質はノズルマンの技量によって大きく変動するため、吹付け面の地山が凸凹状態であると吹付け厚の管理がいきとどかなくなり、設計よりも厚みが薄い部分が生じやすいといった問題がある。また、打込みコンクリートのような養生ができないため、現場の気象環境に左右され、急激な温度変化や乾燥状態に対応できないという問題がある。

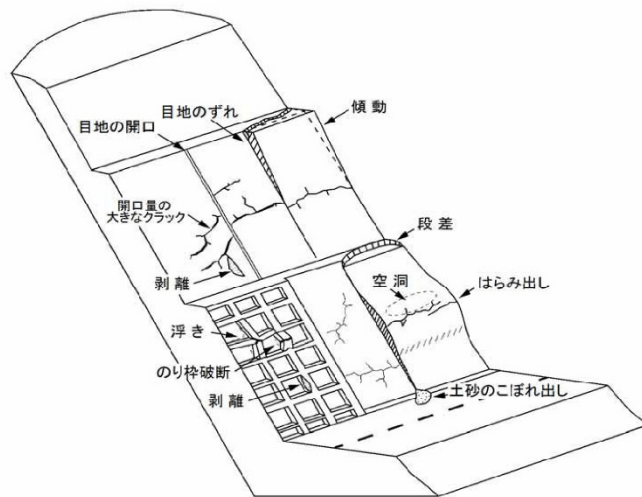


図 1.5 吹付けコンクリートの変状



水平ひび割れ，はらみ出し



目地のずれ，はらみ出し



はく離



はく落

写真 1.5 吹付けコンクリートの変状の例

## (2) 維持管理上の問題

法面保護用吹付けコンクリートは吹付け面の地山の風化や浸食を防止する工法であるが、吹付け後は直接地山の状態を確認できない。吹付け頂部に排水設備がない場合や、あっても維持管理がなされず排水機能が低下している場合、経年変化により地山との付着が低下した場合などでは、吹付け面の上部から侵入した雨水や地下水が地山と吹付けコンクリートの境界部に浸透して地山を劣化させ、風化や土砂化が進行する場合がある。また、乾湿繰返しや凍結融解作用が地山の風化と吹付けコンクリートの劣化を助長する。地山の風化や土砂化が進行すると、岩塊や土砂の移動（スライド）がおこり空洞化が生じる。このような状態からさらにひび割れやはく離が進行し、雑草や雑木が生えてしまう場合もある。また、当初は見込んでいない土圧やはく離したコンクリート自重によって、はく落に至ってしまうなどの問題がある。

既設の吹付けコンクリートの変状調査から変状要因を研究した事例<sup>16)</sup>では、吹付けコンクリート自体の劣化よりも背面地山の風化等による劣化によって、吹付けコンクリートと地山の境界面における付着力が低下してはく離やはく落等の変状が生じており、地山の劣化は、地形や地質特

表 1.1 吹付けコンクリートの変状要因調査結果<sup>16)</sup>

劣化種別	松山らによる劣化調査の結果
1. コンクリートの劣化	
(1)圧縮強度	調査した全試料で設計基準強度 15N/mm <sup>2</sup> を満足している。
(2)凍害	凍害危険個所では表層のスケーリングがあるが、法面保護機能の喪失までには至っていない。
(3)中性化	表面側の中性化はほとんど無く、施工不良や地山劣化により背面側に中性化の箇所がある。
2. 背面地山の劣化	
(1)風化深度	軟岩：地表から 2～4m までの風化がある。
(2)風化進行	軟岩：約 3 年で地山のスライドの発生がある。 中硬岩・硬岩：約 15 年で地山のスライドの発生がある。
(3)風化要因	主要因：地形・地質，副要因：地下水・植生，促進要因：施工不良

性によって進行が異なると報じている。変状要因調査結果の一覧を表 1.1 に示す。

#### 1.4.2 ひび割れ抑制

法面保護用吹付けコンクリートのひび割れ抑制のために、種々の短繊維補強材が使用されてきている。曲げ強度や曲げじん性の向上に優れる鋼繊維が早くから製品化されたが、法面保護用の吹付け工においては、トンネル用におけるリモコン操作の吹付けロボット作業（写真 1.6）とは異なり、ノズルマンが直接ノズルを持ち、比較的近距离から吹付け作業（写真 1.7）を行うため、はね返った材料に含まれる鋼繊維がノズルマンに傷害を負わせる危険性がある。また、吹付け表面の鋼繊維が腐食し美観を損なう問題もある。これらのことから、ビニロン、ポリプロピレン、ナイロン等の有機繊維が使用されるようになってきている。

繊維補強以外の方法としては、高性能 AE 減水剤や増粘剤等を用いて設計基準強度を一般の 15N/mm<sup>2</sup> から 24N/mm<sup>2</sup> などの高強度とすることでひび割れ抑制を行っている場合が見られる。

以上のように繊維補強材を混入する方法や高強度とすることでひび割れ抵抗性の向上を図ることが行われているものの、供試体実験によるものがほとんどであり、地山に吹付けられたコンク



写真 1.6 トンネル吹付けコンクリート工（吹付けロボット）<sup>17)</sup>



シートを対象とした研究はあまり見られない。また、有機繊維のうち、合成繊維の使用は増加しているものの、環境負荷低減にも寄与する天然繊維に関する研究はほとんどなされていない。

### 1.4.3 乾湿繰返し抵抗性

法面保護用吹付けコンクリートの品質は現場の気象環境に左右されるにもかかわらず、乾湿繰返し抵抗性について研究している事例は極めて少ないのが現状である。事例としては、乾湿繰返し作用による付着力の変化に着目した研究<sup>18)</sup>があるが(図 1.6)、実験で行った乾湿繰返し環境が実構造物の劣化をどの程度再現できているかの検討や、泥岩や結晶片岩等のスレーキング性地山は風化の進行が速いなど、岩盤の種類により経年劣化の程度が異なることから、岩種の違いが及ぼす乾湿繰返し抵抗性への影響についても検討が必要と考えられている。

また付着力に関して、既設の吹付けコンクリートを調査した研究<sup>16)</sup>では、ボーリング調査や孔内速度検層および岩石試験を行って背面地山の劣化特性を分析し、岩盤の種類を、軟岩、亀裂性の中硬岩・硬岩、亀裂の少ない中硬岩・硬岩の3種類に分類し、経過年数に応じた変状の発達状況から、図 1.7 に示すように岩盤ごとの風化の発達と吹付けコンクリートの変状を整理している。これによると、軟岩(新第三紀堆積岩)では、吹付けコンクリートによって風化を抑制できる期間は50ヶ月程度であり、軟岩のスライドは早い場合には3年程度で生じると報告している。また、中硬岩や硬岩でも15年程度でスライドが生じると報告している。一方で、表 1.1 に示すようにコンクリートは健全な状態であったことから、地山の風化の進行によって吹付けコンクリートとの付着力低下が生じると報じている。

以上より、研究事例が少ない乾湿繰返し作用を受ける法面保護用吹付けコンクリートの付着特性についての研究が求められている。また、地山との付着試験方法は規格がないことから、適切な試験方法の確立が求められている。

### 1.4.4 凍結融解抵抗性

吹付けコンクリート指針(案)[のり面編]<sup>1)</sup>には、単位セメント量が減少するに従い相対動弾性係数も低下するものの、単位セメント量が $360\text{kg/m}^3$ 以上では、一般に凍結融解抵抗性を有するとされる300サイクルで60%以上の値を示し、鋼繊維を混入した場合には、同係数は100%近くでほとんど低下がないことが報告されている(図 1.8)。一方で、ビニロン繊維を混入した場合には、



写真 1.7 法面吹付け作業 (吹付け砕工)

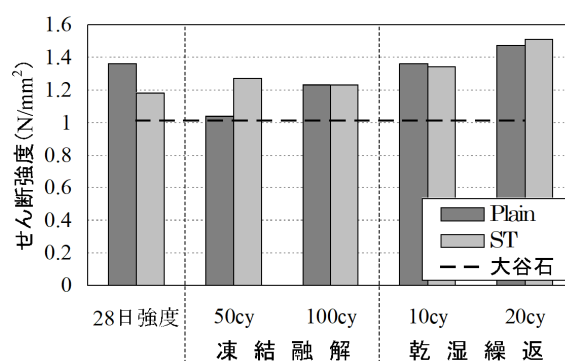


図 1.6 岩石と吹付けコンクリートとの付着強度<sup>18)</sup>

凍結融解抵抗性が低下することが示されている（図 1.9）。また、既往の研究<sup>19)</sup>では、鋼繊維を混

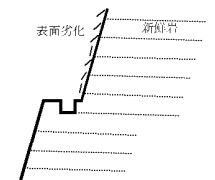
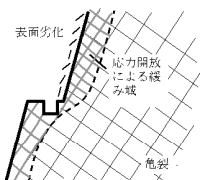
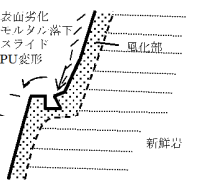
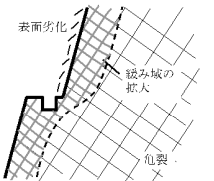
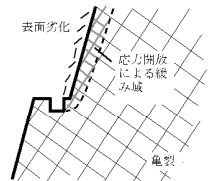
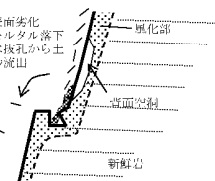
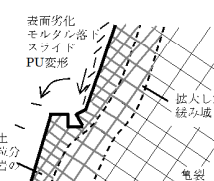
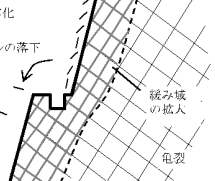
経過年数	変状ランク	軟岩 (新第三紀堆積岩)	変状ランク	亀裂性の中硬岩・硬岩 (中生代堆積岩、火成岩類、変成岩)	変状ランク	亀裂の少ない塊状の中硬岩・硬岩 (中生代堆積岩、火成岩類)
1年		表面剥離等		表面剥離、緩み域の発生		表面剥離、緩み域の発生
	1		1		1	目視できる変状としては表面劣化程度
3年		背面地山の風化進行		緩み域の拡大		
	2		2		2	
15年		背面地山の強風化		表層の緩み域で岩の細片化		
	3		3		3	切土による応力解放後、緩み進行は緩やか
20年以上						ゆるやかな緩みの進行
	3				3	

図 1.7 岩盤ごとの吹付け法面の変状発達過程<sup>16)</sup>

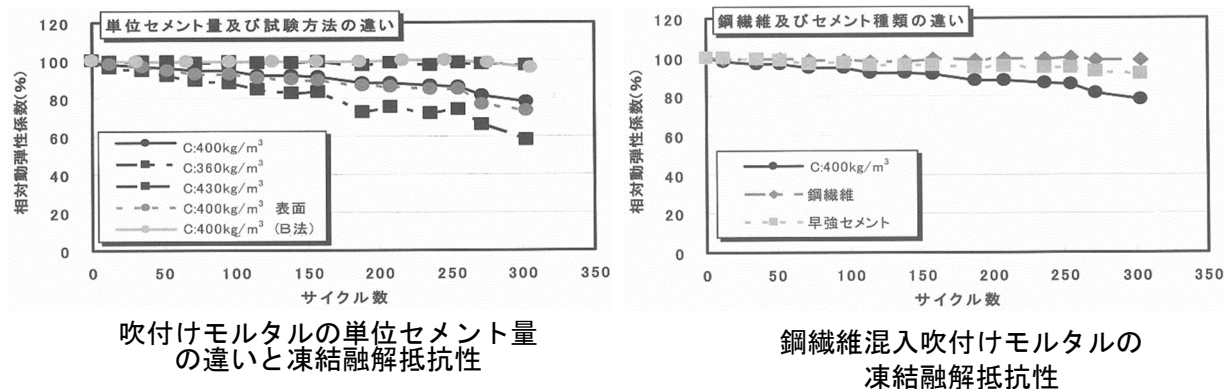


図 1.8 吹付けモルタルの凍結融解抵抗性<sup>1)</sup>

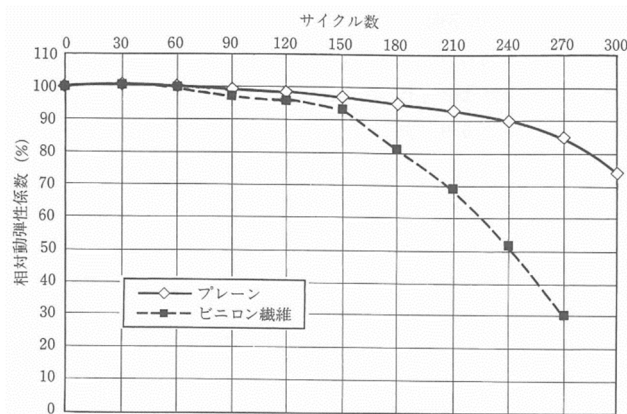


図 1.9 ビニロン繊維混入吹付けモルタルの凍結融解抵抗性<sup>1)</sup>

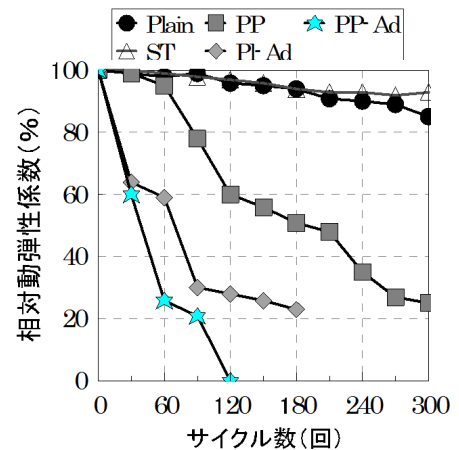


図 1.10 ポリプロピレン繊維混入吹付けモルタルの凍結融解抵抗性<sup>19)</sup>

入したモルタルは高い凍結融解抵抗性を示すものの、ポリプロピレン繊維を混入したケースでは、凍結融解抵抗性が低下することが報告されている (図 1.10)。

また図 1.11 に示すように、同じ AE コンクリート材料を用いて、打込み施工した場合と吹付け施工した場合の比較実験結果から、吹付け施工時の圧力によって凍結融解抵抗性に有用な気泡が消失することも報告されている<sup>20)</sup>。

これらの研究から、ビニロンやポリプロピレン等の合成繊維を法面保護用吹付けモルタルの補強材として使用する場合には、凍結融解抵抗性の低下が問題となることがわかる。これは、モルタル混練時に細骨材や繊維等の材料と

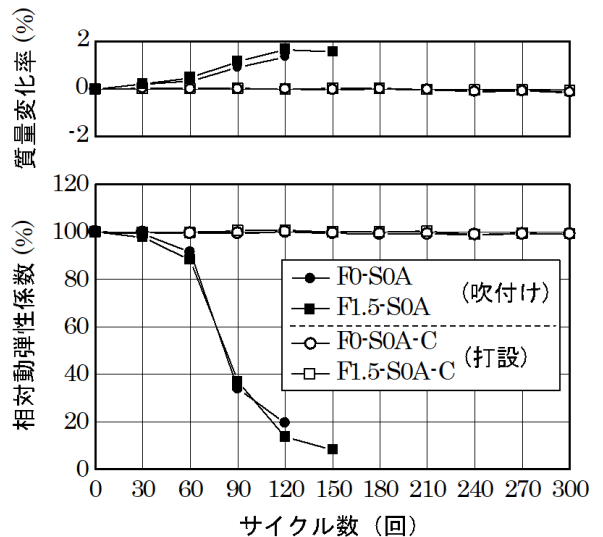


図 1.11 吹付けによる凍結融解抵抗性低下<sup>20)</sup>

ともに巻き込まれた微細な気泡が吹付け施工時の圧力によって消失するため、凍結時の膨張圧を気泡に吸収できず、モルタルマトリックスがほぼ全ての膨張圧を負担することとなり、普通モルタルよりも合成繊維を混入したモルタルの弾性係数は小さくなるため、合成繊維を混入したモルタルに凍結膨張圧による引張りひ割れが生じやすくなることが一因と推定される。

## 1.5 竹材に関する既往の研究

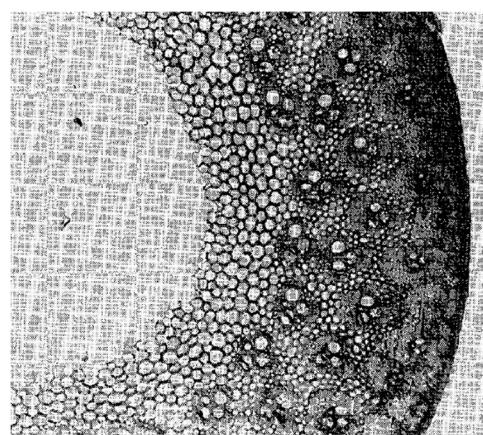
### 1.5.1 竹の構造

既往の研究<sup>21)</sup>によれば、竹は同じ木化植物である木材とは著しく異なる構造をもっており、竹擘の表面は極めて薄い薄膜細胞で覆われ、中空に面する内面にも非常に薄い髓細胞を有している。

また、維管束が基本組織中に散在し、内側は大きく、かつまばらに分布しているが、外側になるに従い小さく、また密に集合している（写真 1.8）。維管束は、外皮側に面した方が光合成による同化産物の通り道の師部、内皮側に面した方が水の通り道の木部になっており、師部と木部の間には形成層が見られない。これは前形成層が完全に分化してその間に分裂組織を残さないからで、このような形態のものを閉鎖管束と呼ぶ。従って竹材の生長は生長点の分裂組織のみで行われ、木材のような幹の肥大生長はない。写真 1.8 に示すように基本組織は柔細胞からなっており、1つの維管束は導管と筋管からなり 4 つの維管束鞘で囲まれている。南アジア原産の *Melocanna* 属の竹では維管束鞘の占有面積は 43% で、厚膜繊維からなっている。基本組織の柔細胞は薄膜で、横断面は円または五角形で幹方向に長く、平均長さ 105  $\mu\text{m}$ 、平均幅 32  $\mu\text{m}$  である。導管は長さ 14~1400  $\mu\text{m}$ 、平均 480  $\mu\text{m}$ 、幅 20~230  $\mu\text{m}$ 、平均 94  $\mu\text{m}$  であり、維管束鞘を構成する厚膜繊維は長さ 0.2~6.0mm、平均 1.75mm、幅 3~32  $\mu\text{m}$ 、平均 14.7  $\mu\text{m}$  であり、真竹で平均 1.57mm、孟宗竹で 1.37mm

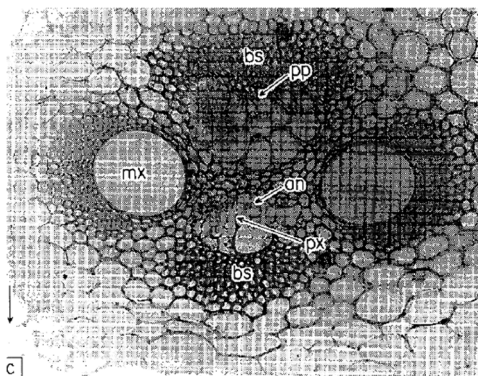


孟宗竹

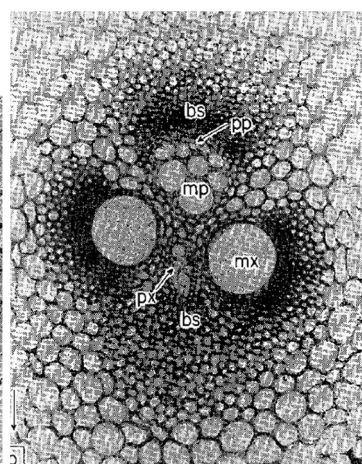


c b a  
孟宗竹断面 (×12)

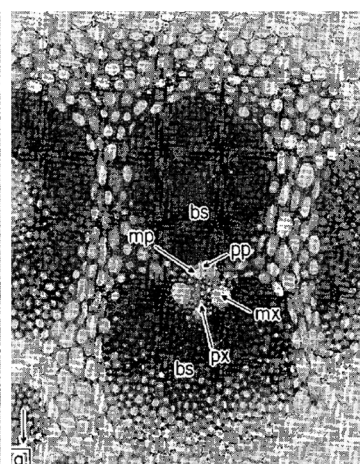
bs: 維管束鞘, px: 原生木部, mx: 後生木部  
pp: 原生師部, mp: 後生師部, an: 環紋



c: 内皮層部



b: 中央部



a: 外皮層部

写真 1.8 孟宗竹の維管束 (×90) <sup>21)</sup>

32  $\mu\text{m}$ , 平均 14.7  $\mu\text{m}$  であり, 真竹で平均 1.57mm, 孟宗竹で 1.37mm の長さを持つ。この厚膜繊維は, 竹材の組織を構成する中で全細胞中 70~80%を占めている。

竹が発筒してから成竹になるまでの生長過程で木化は竹稈を保持するための重要な役割を担っている。一般に木化する植物の細胞壁を構成する主要成分であるセルロース, リグニン, ヘミセルロースは, 鉄筋コンクリートにたとえた場合には, セルロースは鉄筋, リグニンはコンクリート, ヘミセルロースは前二者を有機的に結びつける複雑な作用を受けもつものと考えられる。セルロース, リグニン, ヘミセルロースの成分比率は, それぞれ約 50%, 約 20%, 約 20%となっている<sup>22)</sup>。タケノコから成竹になるまでの木化の推移をみると伸長方向では下部の節間から木化がはじまる。節間生長中の竹稈では伸長方向でみると上部の維管束から下部に向かって, 半径方向では外側の維管束鞘から内側へと木化は進行する。竹は肥大生長をしないが, 各厚膜細胞が細胞内腔に向かって肥厚し多層構造を作りあげることによって強度的性質を向上させているおり, 細胞の肥厚化現象は 2~3 年以内で終るものと推定されている<sup>21)</sup> (図 1.12)。

以上のことから, 3 年程度の年齢の竹材であれば, 法面保護用吹付けモルタルの補強材に用いることが可能と考えられる。

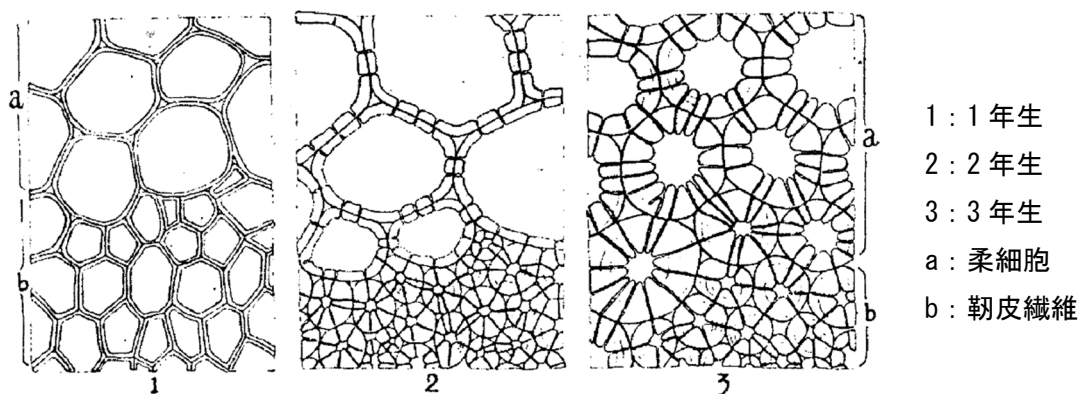


図 1.12 竹の細胞膜壁の肥厚<sup>21)</sup>

### 1.5.2 竹の成分と糖化

加圧熱水処理や植物細胞壁分解酵素の働きによって水に不溶性のセルロースやヘミセルロースから水溶性のグルコースやキシロース等の糖分が生成されることが知られている<sup>23), 24)</sup>。また, 植物系バイオマスエネルギー資源化するための変換法として, 直接燃焼, 熱分解, 液化等の熱化学的変換法およびアルコール発酵, メタン発酵等の生物学的変換法等があり, 特に石油代替液体燃料を生産する観点からアルコール発酵によるエタノール生産が注目されている。植物系バイオマスからエタノールを生産するためには糖化と発酵の工程が必要となる。セルロースは, グルコース (単糖) が直線状に結合 (多糖化) したものであり, 水素結合で強く結合されて結晶化し, その周りをリグニンが取り囲みリグノセルロースとなっているため水に溶けない。また, ヘミセルロースはセルロースとリグニンの間にあり, セルロースと水素結合しリグニンとは化学結合し

ているので水に溶けないが、セルロースとは異なり希アルカリで溶出する特徴がある。竹のセルロースを糖化するためにはリグニンを除去する必要がある。爆砕、蒸煮、微粉碎、パルプ化などの方法がある。リグニン除去後の糖化は、セルロースを構成するグルコース同士の水素結合に対して水分子  $H_2O$  (加水) を反応させ、一方に  $H$  を、もう一方に  $OH$  を加えることで、セルロース  $(C_6H_{10}O_5)_n$  からグルコース  $C_6H_{12}O_6$  を生成させる。糖化方法には、硫酸や塩酸等の酸による加水分解、植物細胞壁分解酵素による加水分解、高温・高圧にした亜臨界水による加水分解などがある。糖化後、酵母菌等の微生物が嫌気条件下でエネルギーを得るためにアルコール発酵 ( $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$ ) する能力を利用してグルコース  $C_6H_{12}O_6$  からエタノール  $C_2H_5OH$  を生成させる。発酵微生物には、アルコール発酵を行う酵母菌以外に、乳酸菌などの嫌気性ものと酢酸菌のような好気性のものがある。

(1) 加圧熱水処理による糖化

生田らの研究<sup>3)</sup>において、竹を高压容器内に入れて高温高压の水蒸気で蒸煮後に瞬時に減圧して爆砕する方法(以下、爆砕法、写真 1.9)によって製造された竹繊維からは糖分が溶出することが報告されている(図 1.13)。熊谷らの研究<sup>23)</sup>によれば、100~300℃の加圧熱水を用いた水熱反応によって植物系バイオマスが糖化され、ヘミセルロースは加圧熱水温度 140℃付近で成分分解が始まり約 200℃でほとんどキシロース等に分解される。また、200℃付近ではリグニンの一部が溶出し、230℃付近でセルロースがグルコースに熱水分解し始める。また、高木らの研究<sup>26)</sup>によれば、爆砕法による竹繊維の製造過程では高压容器内に入れた竹を水蒸気加熱温度 170~190℃、加熱時間 1.2~3.6ks 等の条件で加熱処理を行う。これらのことから、図 1.13 に示す爆砕法により製造した竹繊維から溶出した糖分は、ヘミセルロースが分解されたキシロースが主であると推察される。その理由として、図 1.13 の生田<sup>3)</sup>らの実験方法が 30l の水に爆砕法により製造した竹繊維を 100g 投入後煮沸し糖分の溶出を測定したものであり、煮沸水の温度は 100℃程度で無加圧状態

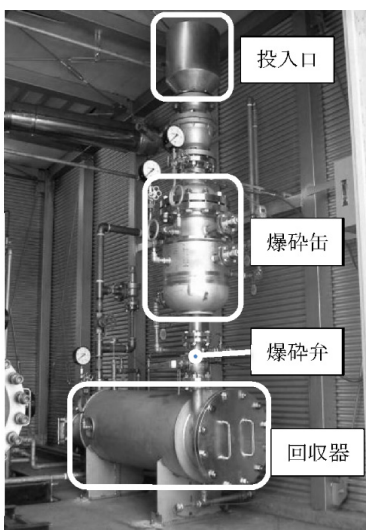


写真 1.9 爆砕装置<sup>25)</sup>

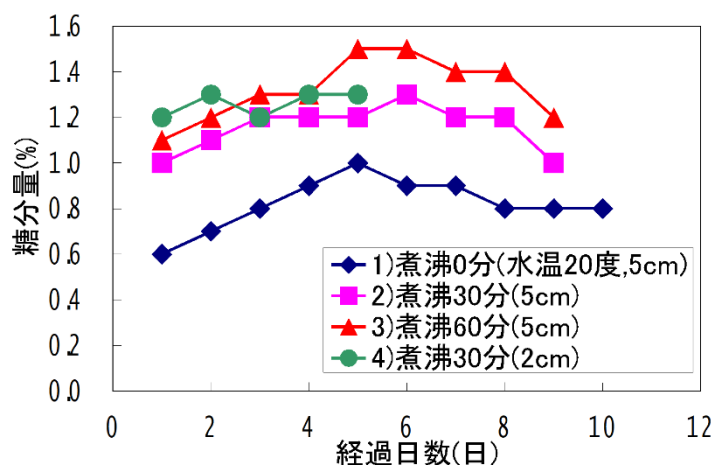


図 1.13 爆砕法により製造した竹繊維からの糖分溶出量<sup>3)</sup>

と考えられるため、ヘミセルロースの分解が始まる条件には達していない。そのため、爆砕法による竹繊維の製造過程で加圧熱水処理された際にヘミセルロースが分解され生成されていた水溶性のキシロース等の単糖成分が煮沸水に溶出したものと考えられる。なお、前川らの研究<sup>27)</sup>では、竹のヘミセルロースの構成糖組成はキシロースを主とし、ほかにアラビノース、ガラクトース、グルコース、ウロン酸などから成り、キシロースとアラビノースおよびウロン酸の比は15~16:1:1であり、主な成分はキシロースであることが報告されている。

## (2) 酵素による糖化

植物細胞壁分解酵素により多糖のセルロースやヘミセルロースを単糖のグルコースやキシロース等に分解できることが知られており、セルロースを分解する酵素をセルラーゼと呼び、ヘミセルロースを分解する酵素をヘミセルラーゼと呼ぶ。また、ヘミセルロースを構成する主要成分は、キシロースが結合したキシランであることから、キシランを分解する酵素としてキシラナーゼとも呼ばれる。セルラーゼ、ヘミセルラーゼを中心とする植物細胞壁分解酵素を生産する微生物は自然界に広く見出されており、特にカビやキノコの糸状菌は植物細胞壁分解酵素を多く分泌することが知られている。

微生物が生産する酵素を糖化反応に利用するために、酵素の生産性に優れた微生物の選抜や個々の植物細胞壁分解酵素の機能解析が行われてきている。特にカビ酵素系の糸状菌トリコデルマの一種 *Trichoderma reesei* は優れたセルラーゼ生産微生物として知られており、セルロース系バイオマスの分解に必要な一連の酵素群を大量に分泌生産する<sup>28)</sup>。また、不完全菌の一群であるコウジカビは古くから味噌や醤油、日本酒などを作るために用いられており、菌糸の先端からデンプンやタンパク質などを分解する様々な酵素を生産し放出して、培地の蒸米、燕麦のデンプンやタンパク質を分解し生成されるグルコースやアミノ酸を栄養源として増殖することが知られている<sup>22)</sup>。中でも、味噌、醤油、日本酒製造に使用される代表的な麹菌に黄麹菌があり、焼酎製造に使用される麹菌に黒麹菌と白麹菌がある。黒麹菌は黄麹菌に比較してセルロースやヘミセルロースを分解するためのセルラーゼやヘミセルラーゼを多く生産することが知られている。このようにコウジカビが日本における醸造の代表菌種であることに対して、中国ではケカビと黒カビの一種であるクモノスカビが代表菌種で、特にクモノスカビは紹興酒などの酒の製造に用いられており、セルラーゼをよく生産することが知られている。また、ケトミウムもセルロース分解能が高い菌としてよく知られている。ケトミウムはケタマカビとも称されるが厳密にはキノコであり、クロカビと同様に肉眼では黒っぽい点として見える。このように、一般に黒カビと称されるものの中にはセルラーゼやヘミセルラーゼを多く生産し、水溶性のグルコースやキシロース等の単糖に分解する能力がある。

## (3) 糖分がモルタルに及ぼす影響

砂糖（サッカロース）をセメント固化材に添加すると、硬化遅延や強度低下が生じることが知られている。このメカニズムは、糖質がセメントに含まれるアルミナの溶解度を高め、液中で吸着性のあるアルミナシリカゲルを生成し、そのアルミナシリカゲルがセメント粒子のフロックの

形成を阻害することによって生じる（図 1.14）と報じられている<sup>29)</sup>。また、砂糖は、セメントに対する添加率が 0.05%程度であれば、凝結遅延剤として使用できるが、0.15%以上を添加すると凝結時間が非常に短くなる。これは、砂糖が C<sub>3</sub>A と反応してアルミナゲルを生じ急結するためといわれている<sup>30)</sup>。

竹内ら<sup>30)</sup>の解説によれば、Young は有機化合物の遅延作用機構として、上記に挙げた「吸着」以外に「沈殿」、「錯塩形成」、「核形成のコントロール」なども可能性として挙げている。

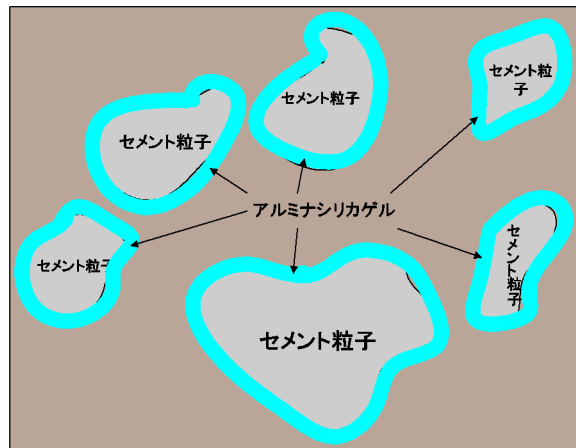


図 1.14 糖分によるセメント固化阻害<sup>29)</sup>

- ① 吸着：有機化合物がセメント粒子表面に吸着し、水とセメントの水和反応を抑制する。
- ② 沈殿：有機化合物が不溶性物質となり、セメント粒子表面上に沈殿する。
- ③ 錯塩形成：有機化合物がカルシウムイオンなどと錯塩を生成する。
- ④ 核形成のコントロール：有機化合物が水酸化カルシウム結晶核に吸着し結晶の成長を抑制する。

これらのうち、Young は水酸化カルシウムへの吸着を有力視しており、凝結遅延剤が未水和相にも吸着すると考察しながら、凝結遅延剤の種類によっては異なる作用機構で遅延している可能性は大きく、一つの仮説のみですべてを説明出来ないとしている。この吸着説を支持する報告は多く、Thomas らは凝結遅延剤が水和生成物に吸着すると述べ、Hansen は有機化合物のセメント粒子表面への化学吸着を示唆している。また、山本は吸着説以外の仮説が遅延作用の主因とは考えにくいとの検証結果から、主として凝結遅延剤がセメント粒子上に吸着し、水和作用が緩和されることを示している。しかし、アルカリ環境下において、有機化合物がカルシウムイオンと不溶性沈殿物質塩を生成する場合には遅延作用が弱くなることも示している。また竹内ら<sup>30)</sup>は、遅延性が大きいと言われている化学構造の範囲を網羅した約 50 種類の有機化合物について、セメント液相中の有機化合物の定量分析（セメント粒子への吸着性）、セメント液相中のカルシウムイオンの定量分析、セメントペースト液相中での有機化合物の溶解性、および有機化合物のカルシウムイオンの錯塩化能力を検討し、次の結果を示している。

- ・ 吸着しない化合物は遅延性を示さない。
- ・ 沈殿を生じる化合物は最大の遅延効果を示さない。
- ・ 高吸着性を有する化合物は遅延効果が大きいもののその効果に程度差がある。
- ・ 錯塩を形成する化合物は遅延性を有するが、短時間でその錯塩は減少する。
- ・ 水酸化カルシウム結晶核の形成および成長はセメントの凝結時期にほぼ一致するため、核形成のコントロールの仮説は遅延作用機構の主因とは考えにくい。



このように、有機化合物がセメント凝結を遅延させる要因としては吸着説が有力であり、水とセメントが極初期に接触して僅かに生じた水和反応の生成物によって、この緻密な吸着層が長時間要して破壊され、その後セメントと水との接触が容易になって水和反応が徐々に加速され、未添加セメントと同様の水和速度で凝結硬化に至るものと推定されている。

田中ら<sup>31)</sup>の二糖類サッカロース、単糖類 d-グルコース、多糖類デキストリンなどの3種の糖類を用いたポルトランドセメントの水和反応の研究では、セメントペーストの凝結時間への糖類添加の影響を表 1.2 のように報告している。表 1.2 によれば、サッカロースの添加量の増加とともにセメントペーストの凝結開始時間と凝結終了時間が遅延し、添加量 0.15% をピークにこれを超えると無添加の場合よりも凝結時間が短くなり、添加量 1.0% では急結する。また、d-グルコースの場合もサッカロースの場合と同様に、添加量の増加とともにセメントの凝結時間が遅延し、添加量 0.25% をピークにそれを超えると極端に凝結時間が短くなり急結する。なお、糖類の添加量はセメント質量に対する質量率 (wt. %) で示している。また田中ら<sup>31)</sup>は、表 1.3 に示すようにモ

表 1.2 セメントペーストの凝結時間への糖類添加の影響<sup>31)</sup>

Saccharose				d-Glucose				Dextrin			
Amounts of admixture (%)	Water cement ratio (%)	Initial setting (hr, min)	Final setting (hr, min)	Amounts of admixture (%)	Water cement ratio (%)	Initial setting (hr, min)	Final setting (hr, min)	Amounts of admixture (%)	Water cement ratio (%)	Initial setting (hr, min)	Final setting (hr, min)
0	27.5	2-16	3-15	—	—	—	—	—	—	—	—
0.01	27.5	2-26	2-26	0.01	28.0	2-23	3-23	0.01	28.0	2-23	3-20
0.03	27.5	3-25	4-20	0.03	28.0	2-46	4-01	0.03	28.0	2-30	3-20
0.06	27.5	5-53	7-23	0.06	28.0	3-52	5-02	0.06	28.0	3-08	3-38
0.10	27.8	7-39	14-46	0.10	28.3	7-50	9-45	0.10	28.3	4-00	5-15
0.15	28.0	15>	20>	0.15	28.3	12-28	20-00	0.15	27.5	13-00	20-00
0.25	28.0	0-25	2-45	0.25	28.0	12>	24>	0.25	27.0	15>	24>
0.50	28.5	0-22	1-00	0.50	27.8	0-30	0-45	0.50	27.5	4-00	12-00
1.00	28.0	0-13	0-28	1.00	27.5	0-15	0-20	1.00	28.0	2-27	5-30

表 1.3 モルタル強度への糖類添加の影響<sup>31)</sup>

Admixtures	Amount of admixture (%)	3 days		7 days		28 days		
		Bending strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Bending strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Bending strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	
none	—	36.1	109	51.3	194	70.4	406	
Sacchrose	0.03	28.6	84	49.7	196	83.1	327	} 約 80%
	0.07	32.1	109	53.5	209	75.7	323	
	0.15*	0	0	63.8	208	81.8	372	
d-Glucose	0.03	32.4	106	55.9	210	79.0	340	} 約 85%
	0.07	33.9	123	40.5	238	64.9	348	
	0.15**	27.3	92	64.9	225	81.5	342	
Dextrin	0.03	34.1	108	53.9	254	78.7	393	} 97 ~82%
	0.07	29.1	105	55.2	178	92.1	359	
	0.15	26.3	79	52.1	176	89.3	333	

\* four days wet state curing in air at 20°±2°C

\*\* two days wet state curing in air at 20°±2°C

ルタル強度への糖類添加の影響も報告している。表 1.3 によれば、サッカロース 0.03~0.07% 添加のモルタルの圧縮強度（材齢 28 日）は、無添加の普通モルタルに比較して約 80%の強度に低下している。また、d-グルコース 0.03~0.15% 添加の場合は約 85%の強度となり、デキストリン 0.03~0.15% 添加の場合は 97~82%の強度となっている。これらのことから、d-グルコースはサッカロースほどではないが、モルタルの凝結遅延や圧縮強度低下などに影響を与えることがわかる。なお、d-グルコースは、D-グルコースや単にグルコースとも表示され、ブドウ糖  $C_6H_{12}O_6$  の別称である。また、分子構造の違いに

より  $\alpha$ -D-グルコース、 $\beta$ -D-グルコース等があり、セルロースは  $\beta$ -D-グルコースが重合したものであり、デンプンは  $\alpha$ -D-グルコースが重合したものである。

また、竹内ら<sup>30)</sup>は遅延性の大きい 11 種類の有機化合物をセメントに対して 0.3% 添加したモルタルの凝結終了時からの材齢と圧縮強度の関係を図 1.15 のように報告している。図 1.15 によれば、グルコースを添加したモルタルが最も小さい圧縮強度となっている。

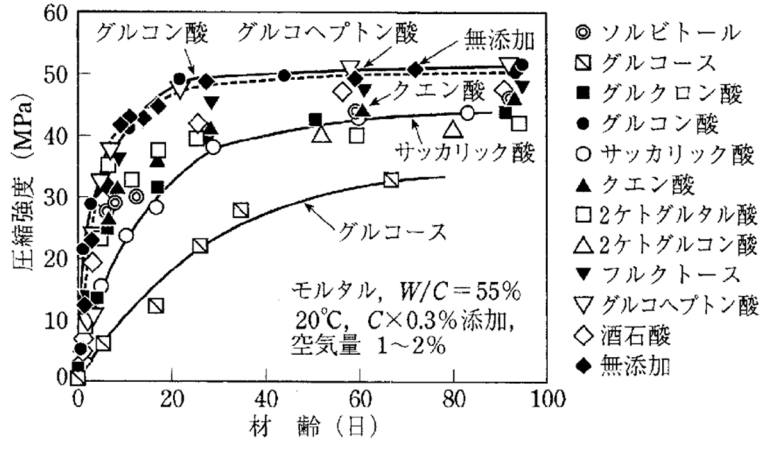


図 1.15 高遅延性の有機物の圧縮強度<sup>30)</sup>

このようにモルタルに混入した竹材から糖類が溶出する場合には、セメントの凝結時間の遅延や圧縮強度の低下をもたらす可能性がある。

1.5.3 竹材の耐アルカリ特性

(1) 竹筋コンクリート

竹筋コンクリートの研究は古くからなされており、海外ではマサチューセッツ工科大学の Chow HK. が 1914 年に中国から輸送した竹をコンクリートの補強材として用いた実験を発表している<sup>32)</sup>。また、インド人の Datta K. が 1936 年にコンクリート建築における竹の使用に関する実験を発表し、戦時下のドイツで材料不足となった鉄筋の代替材として竹を使ったとされている<sup>33)</sup>。日本においても、1937 年の支那事変を機に鉄鋼が不足して価格が暴騰したため、翌 1938 年に鉄鋼配給統制規制が施行され、鉄鋼が戦略物資として軍に優先的に回された。そのため、それまで主流となっていた鉄筋コンクリート構造物については、鉄筋に代わる材料を用いる必要性が生じた。鉄筋代替材として木材が検討されたが、木材もまた材料不足となり価格も異常暴騰し、強度や耐久性等の点で鉄筋よりも大きく劣ることもあり除外された。そこで、日本に豊富にある天然資源の竹材が注目された。竹材は土壁の補強材として用いられているなど、よく知られた建材の一つでもあったので、竹筋によって補強されたコンクリート、すなわち竹筋コンクリートの

実用化が計画された。当時、鉄道省の沼田政矩（のちに東京帝国大学教授を併任）、神戸高等工学校（旧制専門学校）の巽純一、警視庁の栗山寛、滋賀県水口土木出張所の河村協などが竹筋コンクリートの研究を行っていた<sup>34)</sup>。鉄筋の代替として竹を広く用いていくためには、竹の材料特性、設計法、施工法等を取りまとめた技術的な体系として整理する必要性があり、1941年に河村協の著作により「竹筋コンクリート」が出版され、1942年には細田貫一の著作により「竹筋コンクリート工」が出版されて、多くのコンクリート建造物に利用された。なお、当時指摘されていた竹の材質的な問題としては以下のようなものがある<sup>33), 34)</sup>。

- ☑竹の種類や材齢，部位によって強度に差があり均一性を欠いている。
- ☑竹の弾性係数は鉄筋の1/10程度と非常に小さい。
- ☑竹の表皮とコンクリートとの接着性が悪い。
- ☑セメントから加水分解によって遊離した水酸化石灰のアルカリ成分によって竹の主成分のたんぱく質や脂質が分解されて細胞組織が腐食し長期的に強度が低下する恐れがある。
- ☑竹材そのものが吸水乾燥によって膨張収縮するために、膨張によりコンクリートにひび割れが生じる恐れや収縮により付着強度が低下する恐れがある

このような問題に対して、当時推奨された対策に以下のようなものがある<sup>34)</sup>。

- 竹材は比較的強度が高い4～6年材を選定し、竹材の含水量が最も低くなる9～11月に伐採を実施する。

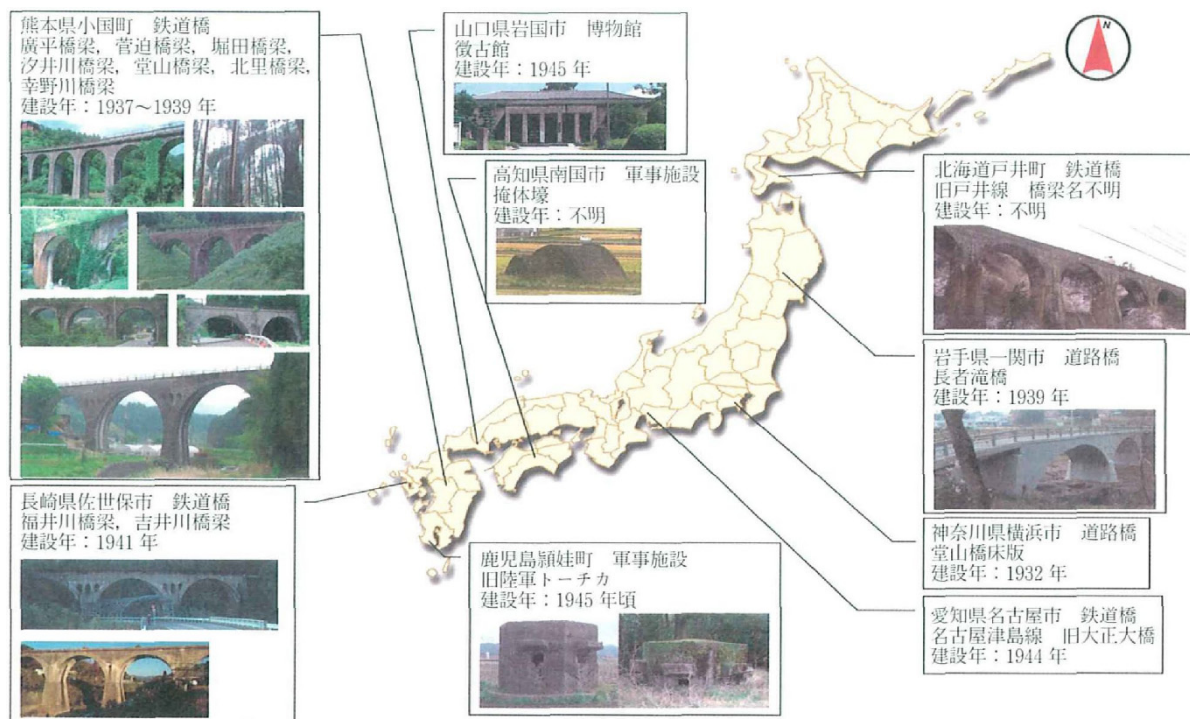


図 1.16 日本の竹筋補強とされる構造物分布の一例<sup>35)</sup>

- 使用する竹のうち最も弱い強度で設計する。
- 構造物の重要度に応じて、安全率を4から7とる。
- あまり強度が必要な部材に対して優先的に竹材を用いる。
- 半割や切込みなどの加工を行い、付着性を高める。また、割竹を用いる場合は、表皮部分を応力の大きいほうに向ける。
- 竹の表面に鉱物油や植物油、鉛白等を塗布することや、耐酸塗料や調合した薬品を浸透させること等によって、耐アルカリおよび吸水防止の対策を行う。
- 竹を吸水させてから使用し、生コンクリート中からの水分の吸水を抑制する。

このような対策をとりながら、大きな曲げ強度を負担する梁や桁を避け、柱や底版、橋脚基部などの主に圧縮応力を負担する部材に用いられたが、戦後間もなく鉄鋼の供給体制が回復し、鉄筋コンクリートが復活すると竹筋コンクリートは瞬く間に廃れていった。日本においては、現在でも竹筋コンクリート構造物が現存しており、中には現役の構造物も存在する<sup>35)</sup> (図 1.16)。

## (2) 竹材のアルカリ腐食

近年、環境負荷低減などのために竹材活用の研究がなされてきている中、寺井<sup>36)</sup>は、竹材の化学抵抗性に関する基礎的研究を行う上で、戦前の島田の研究<sup>37)</sup>を紹介している。それによれば、アルカリ中において、表面に何も処理していない竹材は、アルカリ成分によって竹の細胞が侵され、次第に引張強度が低下していく。竹材は、通気孔、空隙、細胞等の組織で構成されている有機物質であり、その構成状態は竹材の各部分とも一様ではない。従って、強度も場所によってばらつきがある。竹材をコンクリートの補強材として用いる場合、問題となってくるのは耐久性(腐食)である。すなわち、表 1.4 に孟宗竹を構成する成分を示すが、このうちたんぱく質および脂肪が、コンクリートが硬化する際、またはその後溶出される水酸化石灰との化学反応によって侵され、竹材の強度や剛性が時間の経過とともに失われていく。表 1.5 にセメントの成分を示すが、コンクリートが硬化するには、セメント中のケイ酸(SiO<sub>2</sub>)は石灰(CaO)と結合してケイ酸石灰(CaO・SiO<sub>2</sub>)などの加水分解によって多量の遊離石灰(Ca(OH)<sub>2</sub>)を生じる。この遊離石灰が有機物である竹に重大な影響を及ぼす。また、ある程度時間が経つとこの反応は収まるが、コンクリートが硬化し、水分が無くなった状態となっても、コンクリートとして

表 1.4 孟宗竹の分析成分百分率<sup>37)</sup>

成 分	百分率(%)	成 分	百分率(%)
たんぱく質	25.12	ブドウ糖	8.15
脂 肪	2.49	可溶性無窒素物質	30.49
繊 維 索	11.60	灰 分	9.22
でんぷん	3.33	そ の 他	9.60

表 1.5 セメントの成分及び含有量(百分率)<sup>37)</sup>

名 称	化学式	百分率(%)
石 灰	CaO	60~65
ケ イ 酸	SiO <sub>2</sub>	21~24
アルミナ	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6~8
鉄 酸 化 物	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4以下
アルカリ		2以下
苦 土	MgO	0.5~3
硫 酸	SO <sub>4</sub>	1.5以下
硫 黄	S	0.5以下

の使用期間に表面から浸透する水分はゼロではなく、また経年劣化から亀裂が発生するとそこから水分が浸入し、再び石灰が溶出することが考えられる。このような背景から島田は、石灰の飽和液を使用した実験を行っている。常に飽和の状態にある常温液に竹材の供試体を投入しておき、その投入日数により起こる竹材の引張強度の変化を測定している。図 1.17 は、竹片を  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の飽和液中に投入した時の引張強度の経時変化を示

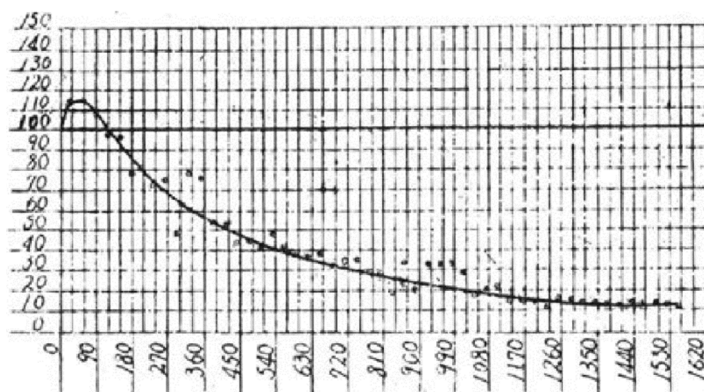


図 1.17 竹材を  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  飽和液中に投入した日数により起こる引張強度の変化曲線<sup>37)</sup>

(縦軸；引張強度の変化率 (%), 横軸；投入日数 (日間))

している。図 1.17 によれば、飽和液投入後 1500 日程度で飽和液投入前の強度の約 10% に減少している。この実験中において、竹片は常時  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  飽和液に浸してあったが、実構造物のコンクリート中に水酸化カルシウムが飽和した液体のままの状態が長い年月継続するということはありません。そのため、島田は、実際にコンクリート中に竹材を打込み、竹材の引張強度の経時変化を調査している。この実験では、竹材の引張強度は 1500 日目で約 68% に減少している。これは、石灰の飽和液中に投入した先の実験結果よりも強度の減少率が小さい。島田は、コンクリート中に竹材を打込んだ実験では供試体を露天に放置したので、水分の乾燥、温度の高低、風量等の環境が不均一であるため、実構造物中の竹材の引張強度を明らかなものにはできていないと考察している。

そこで、寺井<sup>36)</sup>は島田の実験で確認されたコンクリート中の遊離石灰によって竹材が腐食する現象を再現するため、モルタル中に埋設された竹材 (図 1.18) の引張強度について、材齢 1019 日までの経時変化を調査している (図 1.19, 図 1.20)。なお、竹の引張強度試験のための試験片

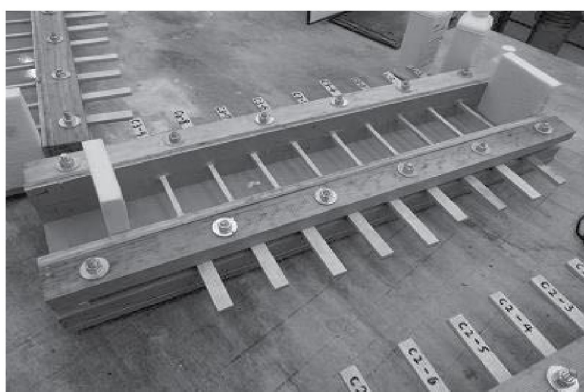


写真 1.10 竹材引張試験体型枠<sup>36)</sup>

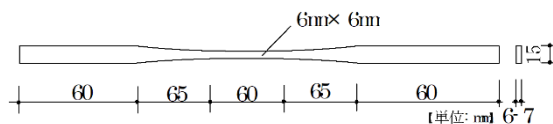


図 1.18 竹材引張試験片<sup>36)</sup>

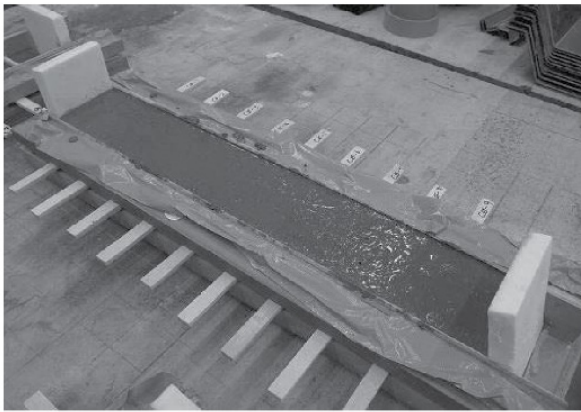


写真 1.11 引張試験体モルタル打設<sup>36)</sup>

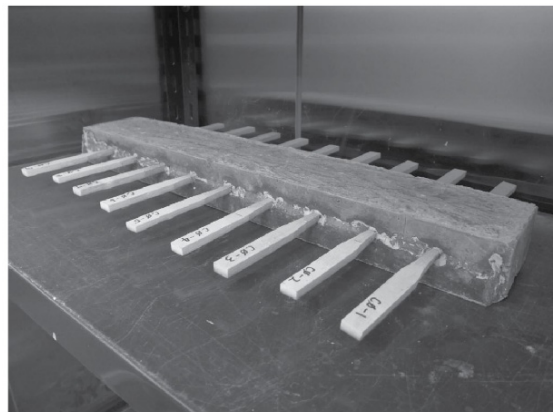


写真 1.12 引張試験体恒温室内養生<sup>36)</sup>

は、直径 160mm 程度、肉厚 15mm の 3 年目の孟宗竹から、図 1.18 に示す寸法で試験片を削り出したものである。写真 1.10 に示す型枠により、試験区間の 60mm の部分をモルタルで硬化させ(写真 1.11, 写真 1.12), 一定の

存置期間後に周辺のモルタルを叩き割り、竹試験片を取出し、取出した竹試験片の断面寸法を測定し、引張試験を実施している。図 1.19 よれば、W/C=100%では材齢 28 日目に大きく引張強度が低下するが、材齢が進むにつれて強度が上昇し、モルタル打設前の強度よりも大きくなっている。これは、図 1.20 に示すように竹試験片の断面積が材齢 28 日目に水分を吸収して大きくなったため、計算上の強度が下がったものであり、その後、2, 3 ヶ月目は乾燥に伴い断面積が減少して引張強度は徐々に大きくなり、300 日目以降はもとの強度に近い値となっていると報じ、このことから 300 日程度で竹材の乾燥収縮が収

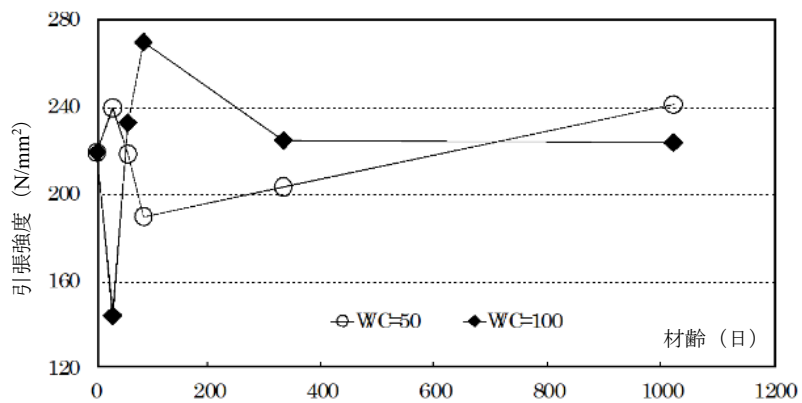


図 1.19 竹材の引張強度の推移<sup>36)</sup>

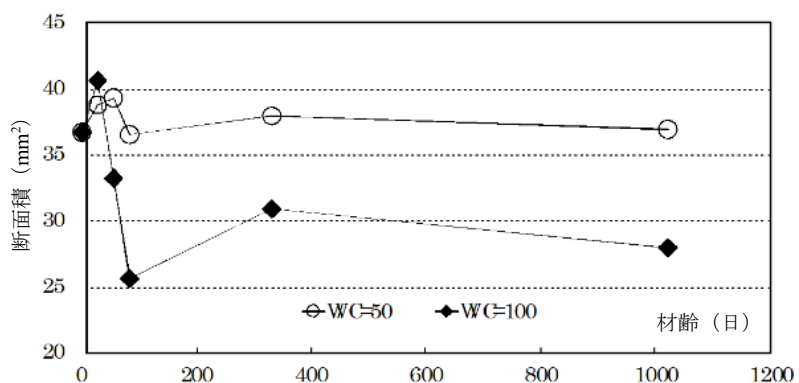


図 1.20 竹材の断面積の推移<sup>36)</sup>

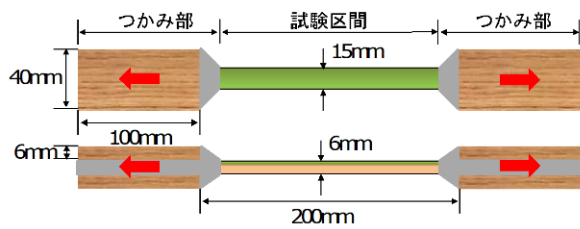


図 1.21 竹筋引張試験体<sup>38)</sup>



写真 1.13 竹筋引張試験体コンクリート埋込み<sup>39)</sup>

まったものと考察している。W/C=50%の試験片も、同様な傾向が見られ、島田の実験で見られたようなアルカリ中の竹片が極端に強度を失うような腐食は確認できなかったことを報告している。この要因として、寺井ら<sup>2)</sup>は、島田の実験では試験片をアルカリ溶液に浸漬したままの状態にしていたので、竹が乾燥することはない、竹材の内部も常にアルカリ溶液に満たされており、次々と竹細胞が侵されたと考えられる

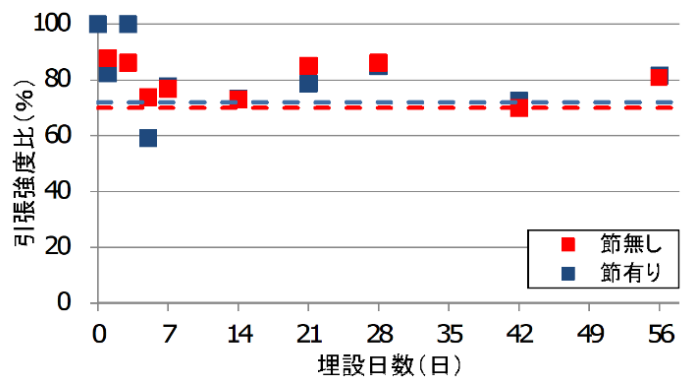


図 1.22 竹筋の引張強度低下率<sup>38)</sup>

が、コンクリートに埋め込まれた竹は、乾燥によって水分が失われる際に竹の内部からアルカリ成分も抜けていくので竹の細胞が侵され続けることがない、と考察している。

また、伊藤<sup>38)</sup>と松田<sup>39)</sup>は、真竹を材料とした竹筋をアルカリ環境下のコンクリートに一定期間埋め込み(図 1.21, 写真 1.13), その間の竹筋の引張強度の推移を調査している(図 1.22, 図 1.23)。図 1.22 より、伊藤は材齢 56 日までで最も竹筋の引張強度が低かった試験体は、材齢 0 日の強度

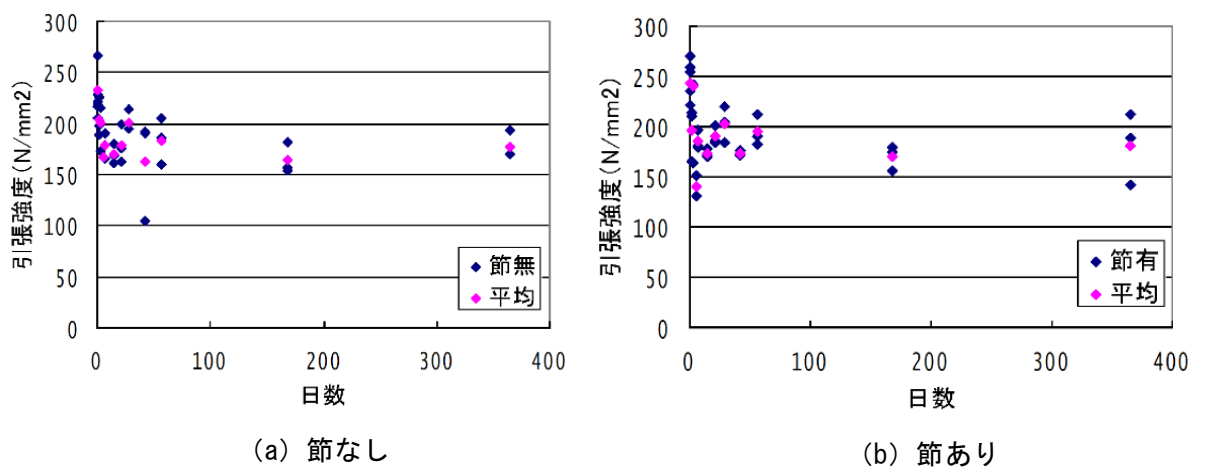


図 1.23 竹筋の引張強度の経時変化<sup>39)</sup>

に比較して約 70%であったことを報告している。なお、節ありの場合の 5 日目の強度が約 60%であったのは竹材自体の強度のばらつきが影響したと考慮して、除外としている。また、松田は伊藤が行った実験を継続した結果、図 1.23 に示すように 1 年経過時でも竹筋の引張強度は約 70%を維持しており、弾性係数にも経時変化が見られなかったことを報告している。

### (3) 竹繊維を法面保護用吹付けモルタルに混入した場合のアルカリ腐食

1930～1940 年代に建設された竹筋コンクリート構造物が現在もその機能を果たしている点 (図 1.16) や寺井<sup>36)</sup>、伊藤<sup>38)</sup>および松田<sup>39)</sup>らのコンクリートに埋め込まれた竹材の引張強度の経時変化に関する研究から、竹繊維を法面保護用吹付けモルタルに混入した場合には、吹付け直後から自然の乾湿繰返し環境が吹付けモルタルに作用し、乾燥時には、セメントから供給されたアルカリ成分は水分とともに竹繊維から放出される。そのため、モルタル内部の竹繊維が  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  のアルカリ溶液により侵されて、その機能が大きく損なわれることはないものと考えられる。

## 1.6 短繊維補強に関する既往の研究

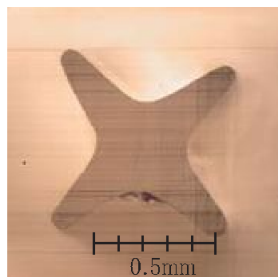
### 1.6.1 短繊維とモルタルマトリックスとの付着形態

短繊維をモルタルに混入すると、短繊維とモルタルマトリックスの界面における付着によって一体となって外力などに抵抗すると考えられるので、界面での付着強度が重要な役割を持つことになる。モルタルは引張強度と圧縮強度の比が非常に小さい脆性材料のため、引張に対する強化方法としてモルタルの引張強度よりも大幅に高い強度の短繊維を混入することは有効な手段となる。そのため、鋼繊維や合成繊維等の短繊維で補強することにより、エネルギー吸収能力、伸び変形能力、ひび割れ発生後の負荷能力、衝撃や疲労に対する抵抗性を向上させ、じん性を著しく増進させる。また、構造体にひび割れを分散させ、その進展を抑制してよりじん性の高いモルタルを作り上げることができるとされている<sup>40)</sup>。

一方、短繊維とモルタルマトリックスとの界面付着形態は様々であり、付着機構についてはいまだに不明な点が多い。董ら<sup>40)</sup>は、界面での付着特性の相違による付着機構の例として以下の 3 タイプを報告している。

#### ① 幾何形状、アスペクト比および表面の凸凹

短繊維の製造・成型過程において、表面に凸凹を付けるような異形加工を施す (写真 1.14)、繊維の長さや断面直径の比 (アスペクト比) を変える、繊維を曲げて波形にする、などの物理的な加工を施すことにより付着強度を高める。また、練混ぜ過程において繊維表面に凸凹が形成されることも同様の効果がある。



十字形状の  
ポリプロピレン繊維



凸凹加工された  
ポリプロピレン繊維

写真 1.14 繊維の異形加工の例



## ② 細分化

数束の線状繊維を用いて縄のように紐を編んだ組紐状繊維をマトリックスに混入し練混ぜを行う場合、組紐状繊維はマトリックスとのぶつかり合いにより解かれるようにはらばらになって細分化され(写真 1.15)、単位体積当りの表面積、つまりマトリックスとの付着面積が増えることによって付着強度を高める。

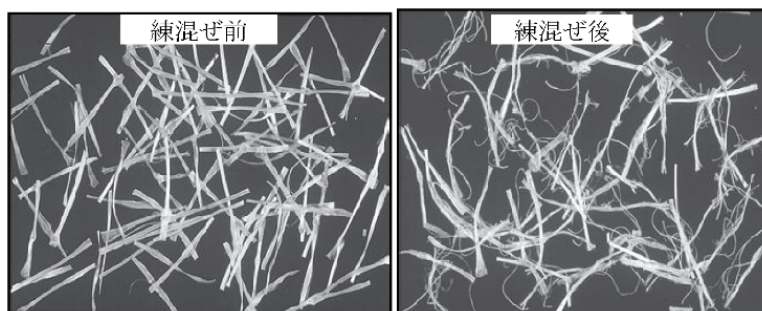


写真 1.15 PE&PP 組紐状繊維の練混ぜ前後における性状変化の SEM 画像<sup>40)</sup>

## ③ ケミカル結合

合成短繊維の分子構造(図 1.24)に存在する水酸基(-OH)に親水性があるため、マトリックスとの間に強力なケミカル結合(水素結合)を生じ、短繊維の引抜き抵抗力を増加させる。

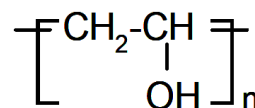


図 1.24 ビニロン繊維の分子構造<sup>40)</sup>

鋼繊維は上記のうち①により付着強度を高めるものであり、合成繊維のうち、ポリプロピレン繊維についてはマトリックスのアルカリ環境において化学的に安定であるものの、撥水性のアルキル基がありマトリックスとの付着強度は小さく①または②の方法により付着強度を高めている。またビニロン繊維については、表面は滑らかでありマトリックスとの摩擦抵抗力は小さいと考えられるものの、水酸基に親水性があるため③の方法によりマトリックスのセメント水和生成物中の酸素との間に水素を介して強い結合力が作用して付着強度を高めている。

本研究で使用する竹繊維については、竹生材の表面から切削することによって製造されたものを使用するため、写真 1.16 に示すようにビニロン繊維に比較して繊維表面は複雑な形状をしている。練混ぜ過程では細骨材とのぶつかり合いにより多少の細分化が生じる可能性もあるが、マトリックスとの付着機構としては主に①によるものと考えられる。

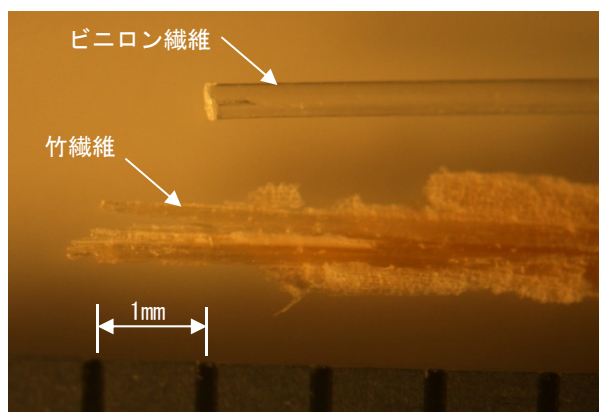


写真 1.16 竹繊維(生材)とビニロン繊維(φ0.2mm)の表面(実体顕微鏡)

## 1.6.2 合成繊維の引張強度および付着強度

### (1) 引張強度

現在、吹付けコンクリートに用いられている短繊維には表 1.6 に示すような種類があり<sup>11)</sup>、いずれの繊維も高い引張強度を有している。一般に、繊維強化複合系材料ではひび割れ荷重に

表 1.6 短繊維の種類<sup>12)</sup>

繊維の種類	直径 ( $\mu\text{m}$ )	長さ (mm)	引張 強度 (MPa)	破断 伸度 (%)	引張 剛性 (GPa)	密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	繊維の添加目的			
							たれ防止 性の向上	ひび割れ 分散性の 向上	曲げ強度 の向上	じん性 の向上
鋼繊維	300~ 600	20~ 60	1200	3~4	200	7.85	—	○	○	○
ビニロン繊維	4~700	2~40	900~ 1700	6~10	25~45	1.3	○	○	○	○
ポリプロピレン繊維	10~ 700	6~60	200~500	15~25	5	0.95	○	○	—	○
ガラス繊維	9~16	4~50	2200	0~4	80	2.5	○	○	○	○
アラミド繊維	10~20	4~25	3000	4	100	1.4	—	○	○	○
カーボン繊維	10~20	4~25	3500	0~2	250	1.7	—	○	○	○
アクリル繊維	10~20	4~12	500~ 1000	10~20	5~10	1.4	○	○	—	—

達するまでにおいては、複合系材料の引張強度 ( $\sigma_c$ ) は式(4.1)に従って、マトリックス強度 ( $\sigma_m$ )、繊維の破断強度 ( $\sigma_f$ )、繊維の配合率 ( $V_f$ ) および配向係数 ( $\beta$ ) に支配されると考えられていることから<sup>41)</sup>、引張強度の高い繊維が使用されている。

$$\sigma_c = \beta \times \sigma_f \times V_f + \sigma_m \times (1 - V_f) \quad \text{式(4.1)}$$

## (2) 付着強度

複合系材料にひび割れが生じた時には、マトリックスと繊維の界面付着によりマトリックスからひび割れ両端に跨る繊維の荷重伝達が行われ、高い引張強度を有する補強繊維に荷重が負担され、ひび割れの進行を抑制する、いわゆる架橋効果が機能する。そのため、繊維の補強効果に強

表 1.7 合成繊維の物性<sup>40)</sup>

項目 記号	繊維の 材質	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	長さ (mm)	アスペ クト比	単位体積あたりの 表面積( $\text{mm}^2/\text{mm}^3$ )	断面積 ( $\text{mm}^2$ )	側面積 ( $\text{mm}^2$ )	周長/付着面積*) ( $\text{mm}/\text{mm}^2$ )	断面形状
F-1	PE&PP	540	9.5	0.92	40	90	19.66	0.154	120.8	3.02/45.3	シート状
F-2	PE&PP	540	9.5	0.92	48	82	12.00	0.266	152.6	3.18/47.7	シート状
F-2-1	PE&PP	540	9.5	0.92	30	52	12.01	0.266	95.4	3.18/47.7	シート状
F-2-2	PE&PP	540	9.5	0.92	35	60	12.01	0.266	111.3	3.18/47.7	シート状
F-2-3	PE&PP	540	9.5	0.92	40	69	12.00	0.266	127.2	3.18/47.7	シート状
F-3	PE&PP	550	4.3	0.92	40	69	9.48	0.350	132.0	3.30/49.5	繊維状
F-4	PVA	880	29.4	1.30	40	61	6.99	0.340	94.4	2.36/35.4	矩形状
F-4-1	PVA	880	29.4	1.30	30	45	7.01	0.340	70.8	2.36/35.4	矩形状
F-5	PP	440	9.8	0.91	48	60	6.04	0.500	144.0	3.00/45.0	矩形状
F-5-1	PP	440	9.8	0.91	30	38	6.07	0.500	90.0	3.00/45.0	矩形状

表 1.8 付着試験モルタル配合<sup>40)</sup>

設計強度 (MPa)	W/C (%)	C : S	セメントの種類	砂の種類
30	50.0	1 : 2	普通*1)	標準*2)
36	45.0			

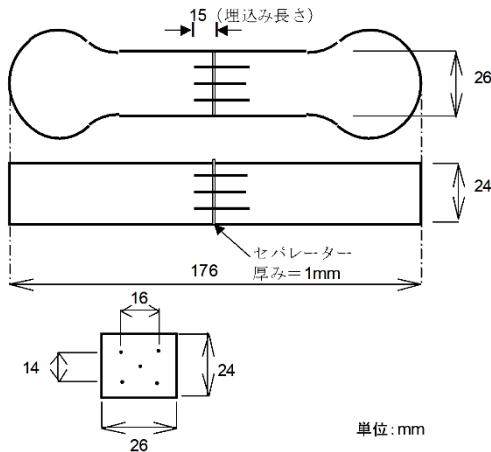


図 1.25 付着試験モルタル供試体<sup>40)</sup>

い影響を及ぼす要因としては、繊維とマトリックスそれぞれの強度特性とともに、両者の界面の付着特性があげられる。

董ら<sup>40)</sup>は、複数の合成繊維の付着特性について、JCI-SF8（繊維の付着試験法）に準じて調査している（表 1.7～表 1.9、図 1.25、図 1.26）。図 1.26 によれば、試験繊維の中では F-5 のポリプロピレン繊維が最も付着応力が大きい。これは、使用した繊維が大きな凸凹を有し、マトリックスとの間の物理的な摩擦抵抗が強いためと報告している。また、F-4 のビニロン繊維も大きい値を示している。これはビニロン繊維がマトリックスとの間に強いケミカル結合をしているためと報告している。

### 1.6.3 竹材の引張強度および付着強度

#### (1) 引張強度

高木ら<sup>26)</sup>は、推定 2～3 年の孟宗竹を爆砕法により抽出した竹繊維と生竹の繊維の引張強度について、地盤面より同一高さ（7m）の部位のものを比較調査している（図 1.27、図 1.28）。図 1.28 によれば、爆砕法にて抽出した竹繊維は生竹から抽出した竹繊維よりも高強度である。この原因として、生竹の場合は繊維の取出しが極めて困難であり、取出しの際に機械的ダメージを導入し

表 1.9 繊維の付着試験組合せ<sup>40)</sup>

記号	繊維の種類	曲げ試験				付着試験	
		30MPa*)		36MPa*)		30MPa*)	36MPa*)
		繊維混入率(%)					
		0.30	0.50	0.75	1.00		
F-1	PE&PP	○	○	○	—	○	○
F-2	PE&PP	○	○	○	—	○	○
F-2-1	PE&PP	—	○	○	○	—	—
F-2-2	PE&PP	—	○	—	—	—	—
F-2-3	PE&PP	—	○	—	—	—	—
F-3	PE&PP	○	○	—	—	○	○
F-4	PVA	○	—	—	—	○	○
F-4-1	PVA	—	○	○	○	—	—
F-5	PP	○	—	—	—	○	○
F-5-1	PP	—	○	○	○	—	—

\*) マトリックスおよびモルタルの設計強度

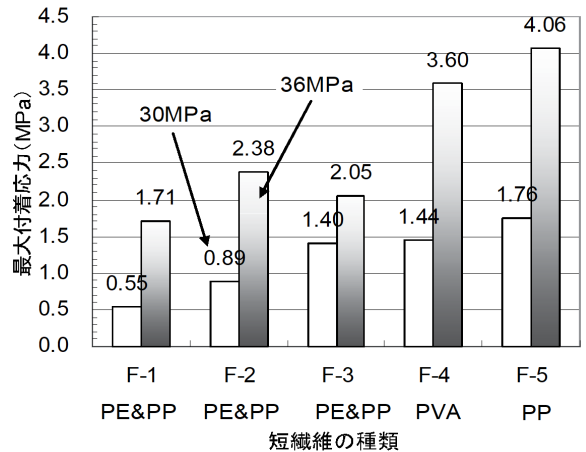


図 1.26 各種繊維の最大付着応力<sup>40)</sup>

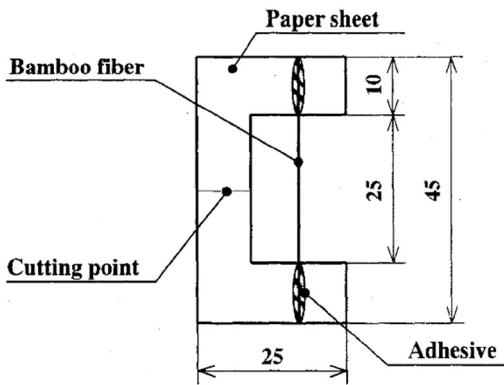


図 1.27 繊維引張供試体<sup>26)</sup>

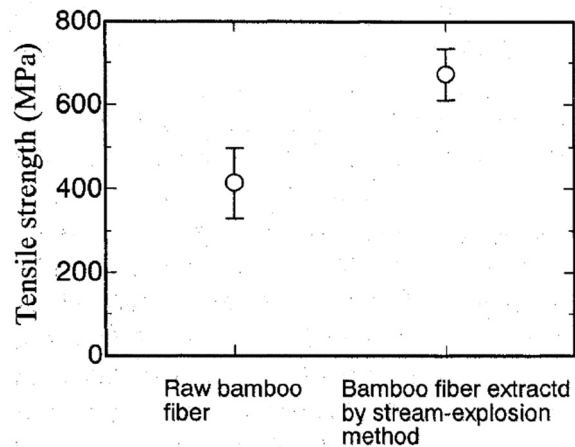


図 1.28 繊維引張強度<sup>26)</sup>

やすいことを挙げている。なお、爆砕法により製造した竹繊維は、爆砕した竹試料を幅約 10mm に割り、これを台の上で試料の上面に金属製ローラーを押し当て往復運動させて直径約 200 $\mu$ m の繊維状の維管束鞘をほぐし出したのち、繊維周りに付着している柔細胞を水で湿らせたウエスを用いて拭き取り除去したものをを用いている。また、生竹の竹繊維については、生竹からカッターナイフを使用して竹繊維を切出して製造している。

また高木らは、同じ爆砕法で抽出した竹繊維でも地盤からの高さの違いにより、引張強度が異なることも報告している (図 1.29)。図 1.29 によれば、地盤面からの高さが 11m の竹材の引張強度は高さ 1m のものと比較して約半分となっている。この理由として、先端部の竹繊維は下部および中部の繊維と比較して柔らかいため、爆砕時に熱的・機械的なダメージを受けて強度が低下すること、あるいは先端部の繊維には根本部の繊維よりも直径が小さいため取出し時にダメージが導入されやすいことを挙げている。また、竹が育った日照条件、栄養条件などにより個体差が生じることも併せて報告している。

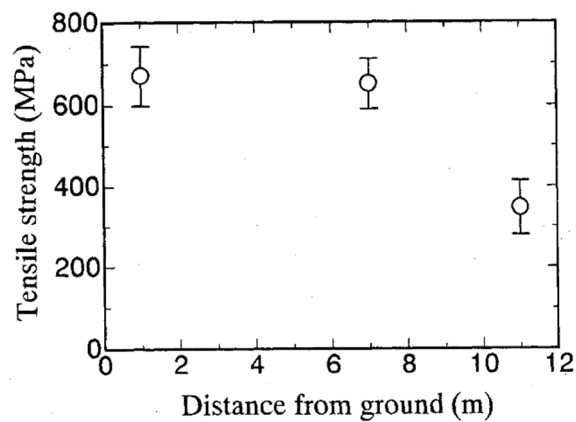


図 1.29 地盤面からの高さや爆砕法による竹繊維の引張強度<sup>26)</sup>

我喜屋ら<sup>42)</sup>は、3年生の真竹を3ヶ月間屋外で放置し、図 1.30 に示すように表皮がついていない状態で、厚さ約 1.2mm、幅約 3mm、長さ 300mm の薄肉竹素材を切出したのち、20 $^{\circ}$ C、60% (RH) の条件下に2週間静置して気乾状態にした供試体を用いて、スチレンブタジエンゴムラテックス (SBR) およびカチオン系ポリアクリル酸エステルエマルジョン (PAE) の2種類の表面処理剤を塗布し、竹素材を荷重速度 1mm/min で載荷して、引張強度の違いを調査している (図 1.31)。図

1. 31によれば、表面処理剤を塗布しない生竹では、引張強度は約200MPa、引張弾性係数は約32GPaとなっている。また、表面塗布剤の塗布量20g/m<sup>2</sup>以上で竹素材の引張強度が向上している。

以上のように、竹材の引張強度は竹の種類、年齢、生育条件、取出し部位などに加えて、竹素材の取出し方法の違いによっても、大きく強度が異なることがわかる。また、本研究で用いる竹繊維は特殊回転刃物により生竹の表面から切削する方法（以下、機械切削法）により製造されるため、竹繊維を生材のまま使用する場合には、切削により生じた機械的ダメージによって、竹片として切り出されたものやカッターナイフ等を用いて慎重に切り出された竹繊維（図1.19、図1.23、図1.28、図1.31）よりも引張強度は小さくなることが予測される。

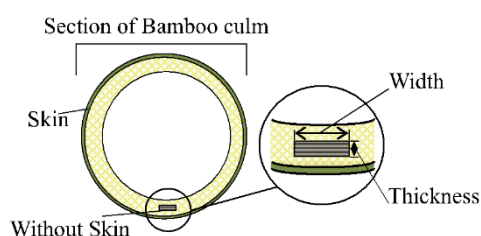


図 1.30 薄肉竹素材切出し<sup>42)</sup>

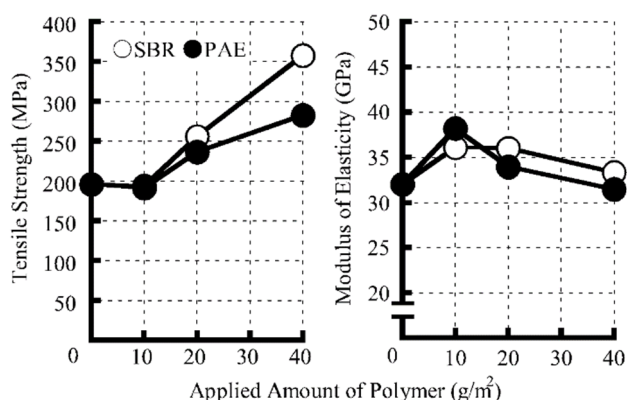


図 1.31 薄肉竹素材の引張強度と引張弾性率<sup>42)</sup>

## (2) 付着強度

我喜屋ら<sup>42)</sup>は、図1.30の薄肉竹素材を用いて、水セメント比50%、セメント：砂=1：3（質量比）、セメントに対する高性能減水剤添加率を0.6%としたフロー値170±5の供試モルタルを調製し、寸法40×40×160mmに成型したセメントモルタルに対して埋込み長さが40mmになるよう

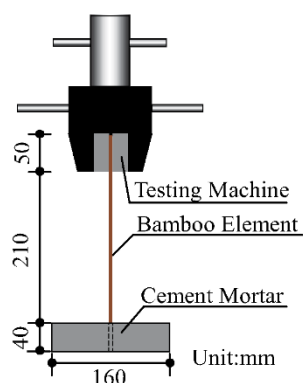


図 1.32 薄肉竹素材付着試験の概要<sup>42)</sup>

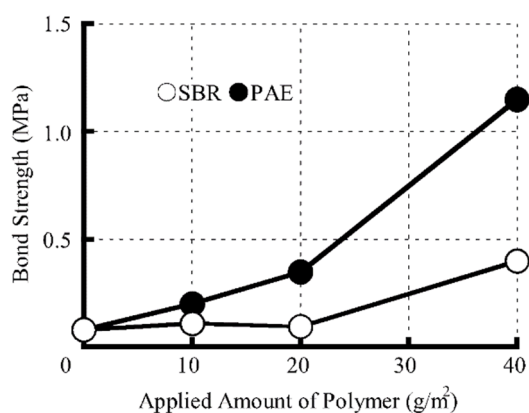


図 1.33 薄肉竹素材付着強度<sup>42)</sup>

に表面処理竹素材を設置した後、湿空 [20 °C, 90% (RH)] 1 日間、水中 (20 °C) 6 日間及び乾燥 [20 °C, 60% (RH)] 21 日間の養生を行い、表面処理竹素材をクロスヘッド速度 5mm/min で引抜き、付着試験を行っている (図 1.32, 図 1.33)。図 1.33 によれば、表面処理剤の塗布量ゼロの生竹では付着強度は 0.1MPa 程度であり、表面処理剤の塗布量の増加に伴い付着強度も増加している。

以上のことから、機械切削法によって製造された竹繊維を生材のまま用いる場合には、竹繊維とモルタルの付着強度は 0.1MPa 付近と、図 1.26 に示した合成繊維の付着強度よりもかなり小さくなることが予測される。

### 1.7 本研究の目的と構成

本論文は、竹繊維を法面保護用吹付けモルタルに混入した場合の基礎的性状および耐久性を評価することを主目的とした。

本研究の構成を図 1.34 に示す。第 1 章では、法面におけるモルタル吹付け工の変状や放置竹林の課題、法面保護用吹付けコンクリートや竹材および短繊維補強に関する既往の研究について取りまとめるとともに、本論文の構成を示した。第 2 章では、セメントの凝結時間や圧縮強度に影響

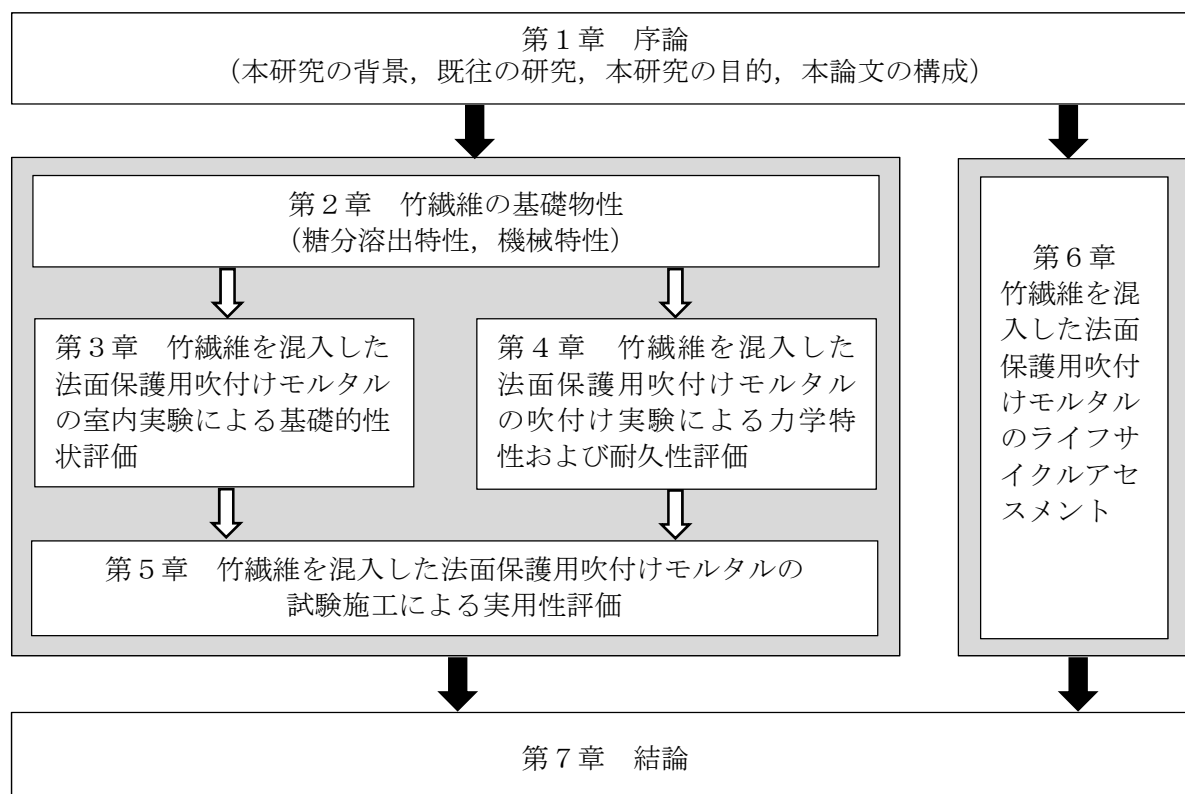


図 1.34 本論文の構成

響を及ぼす可能性がある竹繊維の糖分溶出特性および繊維架橋効果と関係が深い竹繊維の引張強度やモルタルからの引抜き付着強度等の機械特性を評価する。第 3 章では、法面保護用吹付けモルタルに竹繊維を混入した場合の強度特性および初期ひび割れに関する収縮特性などの基礎的性状を室内実験によって確認するとともに、竹繊維の適切な混入量を検討する。第 4 章では、実機を用いた吹付け実験により、竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルの力学特性および乾湿繰返しや凍結融解に対する抵抗性を評価する。第 5 章では、切土した地山法面を対象に試験施工を行い、竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルの実用性を評価する。第 6 章では、竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルについて、ライフサイクルアセスメントにより環境影響評価を行う。第 7 章では、本研究の結論と今後の展望について述べる。

## 第2章 竹繊維の基礎物性

### 2.1 はじめに

本章では、法面保護用吹付けモルタルの短繊維補強材として、機械切削法により製造された竹繊維の基礎物性を評価する。

吹付けモルタルに混入した竹繊維から糖分が溶出した場合には、セメントの凝結時間の遅延やモルタルの圧縮強度の低下をもたらす可能性がある。本研究で使用する竹繊維は製造過程で加圧熱水処理を行わないため、植物細胞壁分解酵素による竹繊維の糖化および糖分溶出特性について実験により評価した。

また、鋼繊維や合成繊維等の短繊維をコンクリートに混入することで、曲げ強度、曲げじん性、ひび割れ開口に対する引張抵抗性等の力学特性の改善やはく落に対する抵抗性が向上することが知られている。特に力学特性は繊維の架橋効果によるものが大きいことから、架橋効果に関係が深い竹繊維材料の引張強度やモルタルからの引抜き付着強度等の機械特性を実験により評価した。

### 2.2 実験概要

#### 2.2.1 糖分溶出試験使用竹繊維

糖分溶出試験に使用した竹繊維を写真 2.1 に示す。3～5 年の孟宗竹（兵庫県淡路産）を特殊回転刃物により、竹の表面から切削する方法で繊維化したものを、1.2～5.0mm のふるいを用いて分級後、繊維長が  $L=20\pm 10\text{mm}$  となるように調整し、気乾状態になるまで乾燥したもの（竹繊維 A）、1～2 年の孟宗竹（兵庫県淡路産）を同様に繊維化し、非乾燥状態の段ボール箱内に 3 日間程度放置させ、竹繊維に植物細胞壁分解酵素を生成する可能性の高い黒カビを発生させたのち気乾状態になるまで乾燥したもの（竹繊維 B）、の 2 種類の竹繊維を用いた。なお、本実験で使用する竹繊維を製造する過程においては爆砕法のような高温高圧の水蒸気を用いないため加圧熱水によるヘミセルロースの分解は生じないと考えられるものの、自然界に広く存在するカビが竹繊維に付着し増殖した場合には、植物細胞壁分解酵素による糖化によって、竹繊維の細胞壁を構成する



写真 2.1 使用竹繊維



セルロースやヘミセルロースからグルコースやキシロース等の糖分が生成される可能性がある。そのため、自然状態で黒カビを繁殖させた竹繊維を用いて糖分の溶出特性を調査するものとした。なお、伐採直後に繊維化した高含水状態の竹繊維を非乾燥環境の段ボール箱内に置くことで黒カビの発生を促進させた。

### 2.2.2 強度試験使用繊維

竹繊維の強度試験には、無処理の気乾状態の生材 (Ra)，生材を 110°Cの乾燥炉で 24 時間加熱乾燥した後に気乾状態にしたもの (He)，生材を 30 分間水中で煮沸して糖分除去を行った後に気乾状態にしたもの (Bo)，30%過酸化水素水に 60 分間浸漬して殺菌処理後に水洗して気乾状態にしたもの (HO) の 4 種類を用いた (写真 2.2)。なお、写真での判別は困難であるが、HO が過酸化水素水による脱色効果によってやや白く変色しているが、それ以外の外観上の違いは見られない。

ビニロン繊維については、一般に吹付けモルタルに用いられている  $\phi 0.2\text{mm}$ ，長さ 18mm のもの (V18) と、一般に打込みコンクリートに用いられている  $\phi 0.66\text{mm}$ ，長さ 30mm のもの (V30) の 2 種類を用いた (写真 2.3)。

### 2.2.3 糖分溶出試験

#### (1) 糖度測定機器の選定試験

写真 2.4 に示すグルコース計 (株式会社タニタ製 GF501) と写真 2.6 に示すデジタル糖度計 (株



写真 2.2 使用竹繊維の外観



写真 2.3 使用ビニロン繊維の外観

株式会社アタゴ製 SMART-1) および写真 2.7 に示すポケット糖度計 (株式会社アタゴ製 PAL-1) を用いて、水道水 40cc に竹繊維 B を 1.6g 投入し (写真 2.5), 常温状態のまま 3 日間浸漬後に, それぞれの機器を用いて竹繊維 B から水道水に溶出した糖度を測定した結果を基に, 糖度測定機器を選定するものとした。なお, 水道水に対する竹繊維 B の量は, W/C=50% のモルタルに竹繊維を 1.0vol.% 混入した時の練混ぜ水と竹繊維の質量比から設定した。なお, ここで計測する糖度は水道水の質量に対する糖分の濃度となる。

測定機器の特徴としては, グルコース計はグルコースのみを計測するため, ヘミセルロースが分解されたキシロースの計測はできないものの, 測定精度が高い利点がある。また, デジタル糖度計は, 既往の研究<sup>3)</sup>において爆砕法により製造された竹繊維からの糖分溶出量の測定に用いられた実績があり, グルコースやキシロースの区別なく計測できる利点があるものの, グルコース計より測定精度が劣る。ポケット糖度計は, デジタル糖度計よりもさらに測定精度が低い。なお, グルコース計は, グルコースオキシターゼ・過酸化水素電極法によりグルコースのみを選択して測定し, 比色法やグルコースアナライザーと同等の高精度測定を可能とするものである。これに対して, ポケット糖度計とデジタル糖度計は, いずれも光の屈折率の違いにより液体の濃度を測



写真 2.4 グルコース計



写真 2.5 測定検体

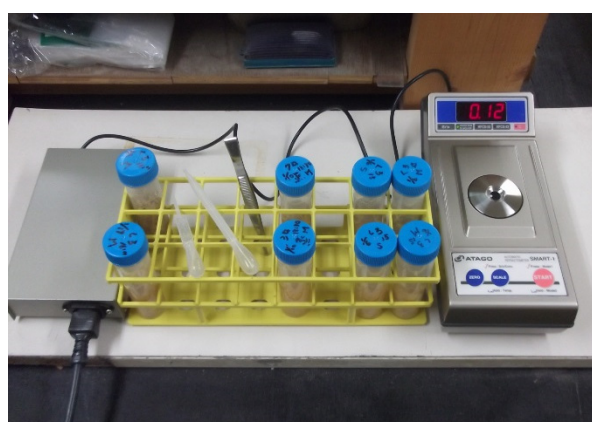


写真 2.6 デジタル糖度計



写真 2.7 ポケット糖度計

定するものであり、糖分のみを測定しているとは限らない。

## (2) 常温水による糖分溶出試験

常温の水道水 300cc に竹繊維を 12g 投入したビーカーを 1 検体とし、竹繊維 A, B それぞれ 3 検体の糖分溶出試験を行った(写真 2.8)。なお、水道水に対する竹繊維 B の量は、W/C=50%のモルタルに竹繊維を 1.0 vol.%混入した時の練混ぜ水と竹繊維の質量比から設定した。糖分の溶出量は、グルコース計(株式会社タニタ製 GF501)を用いて測定し、溶媒となる常温水道水のグルコース濃度を 120 時間経過するまで測定した。なお、溶媒の種類に関わりなく採水量は 1 検体当たり 6cc とした(写真 2.9)。

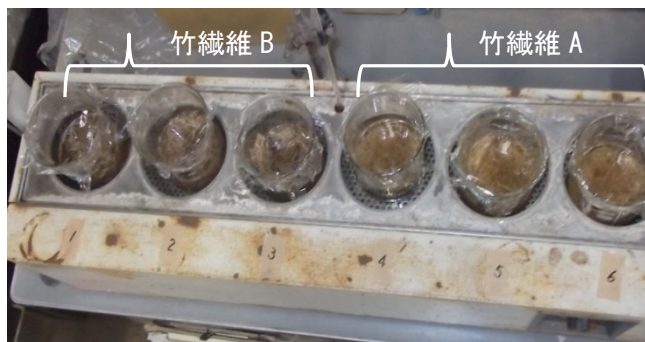


写真 2.8 常温水による糖分溶出試験



写真 2.9 溶媒採水

## (3) 温水による糖分溶出試験

恒温水槽を用いて、60℃の恒温状態にした水道水 300cc に竹繊維を 12g 投入したビーカーを 1 検体とし、竹繊維 A, B それぞれ 3 検体の糖分溶出試験を行った。グルコース濃度の測定は 30 分

ごとに 3 時間経過するまで行った (写真 2.10)。

#### (4) 煮沸による糖分溶出試験

竹繊維 A, B それぞれ, 水道水 900cc に竹繊維を 36g 投入したビーカー1 検体について糖分溶出試験を行った。グルコース濃度の測定は, 水温が 60℃から 95℃に上昇するまで約 30 分実施した。

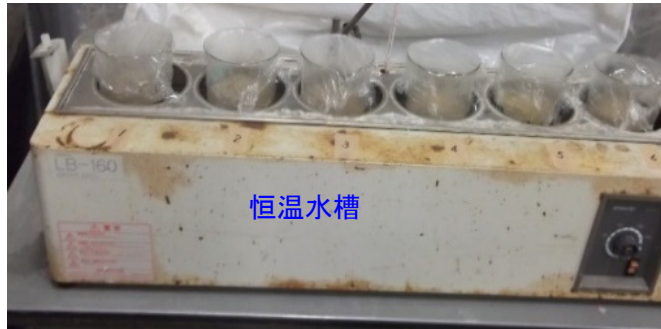


写真 2.10 温水による糖分溶出試験

#### 2.2.4 繊維引張強度試験

繊維の引張強度試験は, 図 2.1 に示すように, 定着間距離を 5mm とし, 繊維貼付用の台紙にエポキシ系接着剤にて両端を固定して試験片を作製した。

強度評価する際の竹繊維の断面積は, 個々の試験片に対して直交する二方向の長さをマイクロメータによって測定し, だ円近似により算出した。試験は, インストロン万能試験機 (Model 5567, 写真 2.11) を使用し, 試験片を取り付けたのち, 小型ハサミで台紙を破断し, 载荷速度 1.0mm/min で実施した。本試験は繊維種別ごとに 10 回行った。

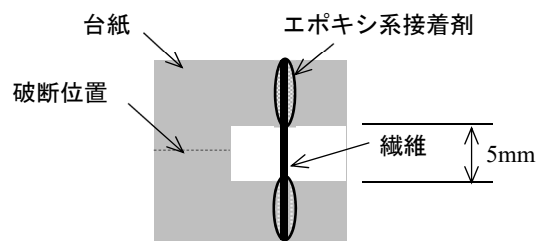


図 2.1 繊維引張強度試験片

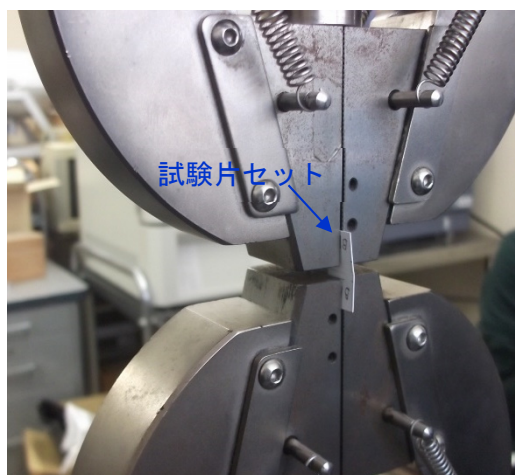


写真 2.11 インストロン万能試験機の外観

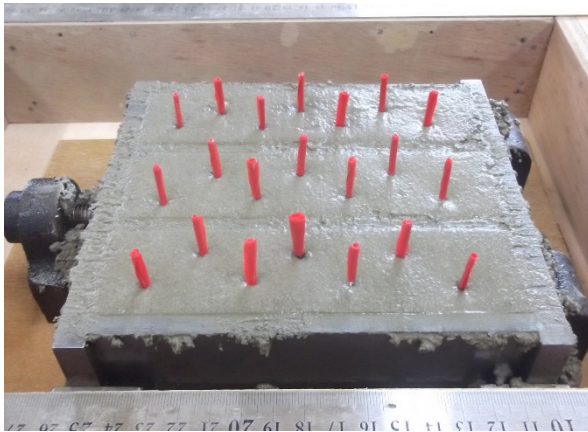


写真 2.12 穿孔

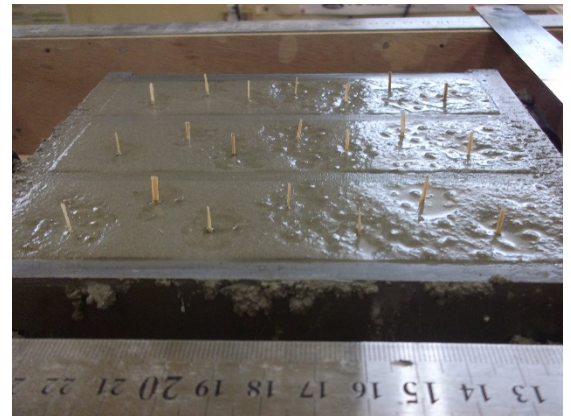


写真 2.13 繊維埋込み

## 2.2.5 繊維引抜き試験

### (1) モルタル供試体

繊維を埋め込むモルタルは、標準的な吹付けモルタルの配合である  $W/C=55\%$ 、 $S/C=4.0$ 、 $C=400\text{kg/m}^3$  とし、モルタルの練混ぜについては、セメントの物理試験方法 (JIS R 5201) に準じたモルタルミキサによる機械練りとした。本実験の湿式吹付け用モルタルは  $S/C$  が大きく、流動性が小さい固練りモルタルである。実施工では、コンプレッサーによる圧縮空気圧によってモルタルを地山に吹付けて付着させるため、圧縮空気圧による締固め効果を得ることができるが、室内試験においては、吹付けを行わずに吹付け時と同程度の締固め効果を得るため、入念な締固めにより供試体を作製することとし、突き棒と振動による 3 層締固めによって角柱供試体 ( $40\times 40\times 160\text{ mm}$ ) を作成した。

### (2) 繊維埋め込みおよび養生

モルタルを打設して 1 時間後に表面整形を行い、 $\phi 0.7\text{mm}$  針金を穿孔材にして各繊維の埋込み長を事前に穿孔したのち、試験繊維を挿入し振動によって埋設した (写真 2.12, 写真 2.13)。図 2.2 に示すように、モルタル角柱 1 本につき 7 本の繊維を埋め込み、3 本のモルタル角柱 (繊維 21 本) を繊維種別ごとに作成した。なお、竹繊維は事前に全長を  $20\text{mm}$  に切りそろえ、埋込み長は  $10\text{mm}$  とした。

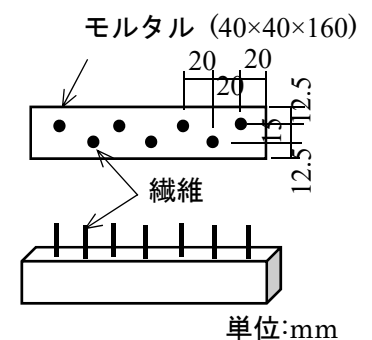


図 2.2 試験繊維の配置

供試体養生については、実施工条件を考慮して、上面以外を封緘し、28 日間の室内気中養生 (温度:  $20^\circ\text{C}$ 、 $50\%R.H.$ ) を行った。

また、 $R_a$  と  $V18$  についてのみ、28 日気中養生後に 12 日間の乾湿繰返し作用を与えた。乾湿繰返し条件は、法面への吹付け後の劣化環境を考慮して、岩石の促進スレーキング試験 (地盤工学会: JGS 2125) の方法に準拠し、 $40^\circ\text{C}$  炉乾燥 48 時間の後、 $20^\circ\text{C}$  水浸 24 時間、 $110^\circ\text{C}$  炉乾燥 24 時間を 1 サイクルとして、これを 3 回繰返した。

### (3) 荷荷方法

繊維引抜き試験は、繊維引張試験と同様インストロン万能試験機 (Model 5567) を使用し、**図 2.3**、**写真 2.14** に示すようにモルタルから突出した繊維を荷荷速度 1.0mm/min の条件で引き抜いた。なお、繊維種別ごとの試験本数は 21 本とした。また、竹繊維の引抜き付着応力算定の際に用いた付着面積は、マイクロメータによって測定した竹繊維個々の断面寸法からだ円近似により算出した周長と埋込み長より算出した。

また、モルタル強度の把握のため、セメントの物理試験方法 (JIS R 5201) に従い、曲げ強度試験と圧縮強度試験を材齢 28 日時点と養生後に実施した乾湿繰返しの後に行った。

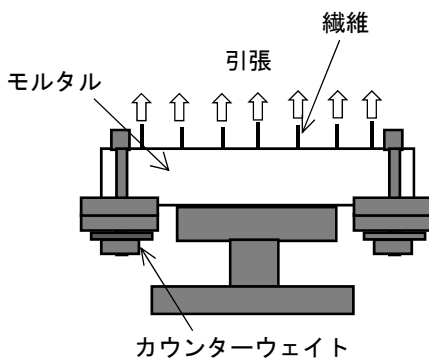


図 2.3 繊維引抜き試験の概要

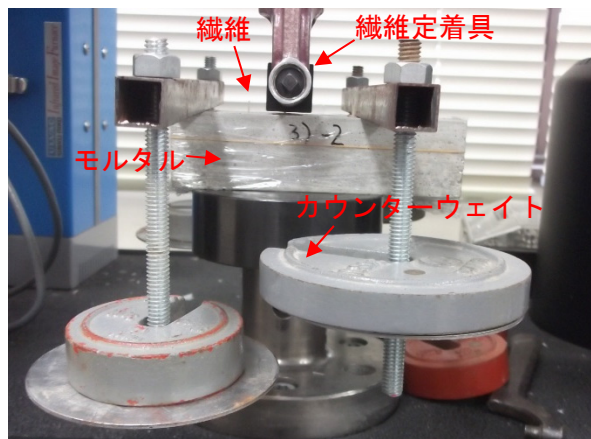


写真 2.14 繊維引抜き試験

## 2.3 実験結果と考察

### 2.3.1 糖度測定機器の選定試験

グルコース計、デジタル糖度計およびポケット糖度計を用いて、竹繊維 B から溶出した水道水の糖度を測定した結果を表 2.1 に示す。表 2.1 から、グルコース計はセルロースから分解されたグルコースを計測し、ヘミセルロースから分解されたキシロースは計測されないものの、計測精度が高く、糖度 0.01% 以下の変動が確認できる。また、表 1.2、表 1.3 (第 1 章参照) のグルコースの添加量 ( $C \times 0.01 \sim 1.0\%$ ) とセメントペーストの凝結時間やモルタル強度への影響を調査した研究事例と比較し評価することが可能である。一方、デジタル糖度計での測定結果はマイナス表示となり低濃度領域での測定精度の信頼性が得られなかった。ポケット糖度計の場合は 0.1% 未満を計測できる精度がないため本実験には不適と判断した。以上の結果、本実験ではグルコース計を用いて糖分を測定するものとした。

表 2.1 糖度測定機器比較

グルコース計	デジタル糖度計	ポケット糖度計
0.006%	-0.02%	0.1%

### 2.3.2 常温水による糖分溶出試験

常温の水道水による糖分溶出試験を5日間程度行った結果を図2.3に示す。図2.3によると、竹繊維A、Bとも±0.01%以下の糖分溶出量となっている。これを吹付けモルタルW/C=50%のセメント質量に対する比率に換算すると0.005%以下の糖度となる。この結果を表1.2、表1.3（第1章参照）のd-グルコース添加量（セメント質量率）とセメントペーストの凝結時間およびモルタル強度の関係表（以下、グルコース添加関係表）に照らして評価すると、セメントの凝結時間や圧縮強度への影響はほとんどないものと考えられる。

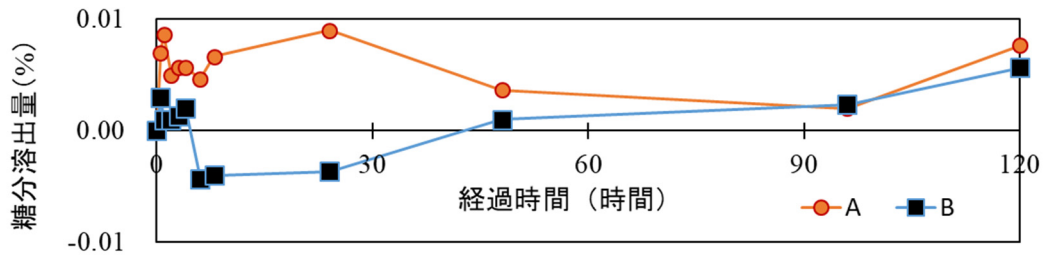


図 2.3 常温水による糖分溶出試験

### 2.3.3 温水による糖分溶出試験

温水による糖分溶出試験結果を図2.4に示す。図2.4によると、竹繊維Aよりも黒カビが発生した竹繊維Bのほうが糖分の溶出量が多い。それぞれピークの糖分溶出量をセメント質量率に換算すると、竹繊維Aは約0.015%の糖度となり表1.2、表1.3（第1章参照）のグルコース添加関係表に照らすと、凝結時間や圧縮強度への影響はほとんどないものと考えられる。一方、竹繊維Bは約0.03%の糖度となり、セメントの凝結時間の遅れや圧縮強度の低下等の影響が生じる可能性がある。法面保護用吹付けモルタルは、型枠を用いないで吹付け直後から地山と一体化させる急速施工法であり、吹付けたモルタルが傾斜のある法面から移動することなく硬化することが重要である。モルタルの凝結遅延時間が長くなるに従いモルタルと法面との界面に生じるブリーディング水が増加して摩擦抵抗が低下し、モルタルが硬化する前に滑動や滑落する可能性が考えられ

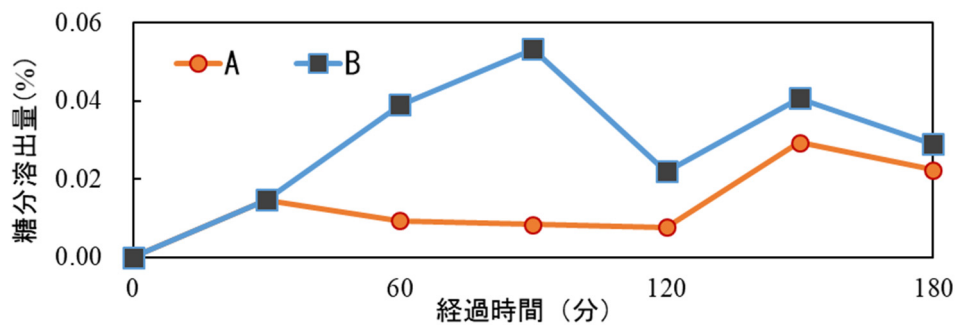


図 2.4 温水による糖分溶出試験

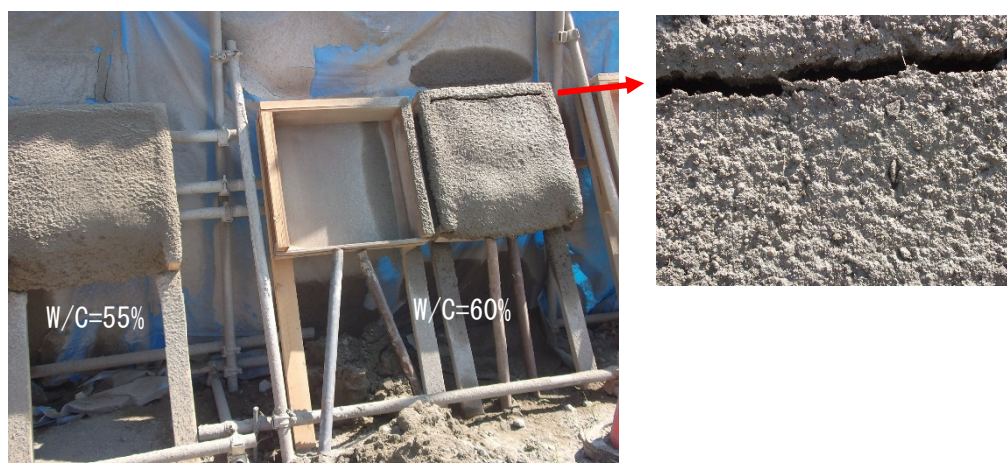


写真 2.15 吹付け直後のモルタル滑動の例 (W/C=60%)

る (写真 2.15)。そのため、できるだけ凝結遅延を避けるべきと考えられる。また、圧縮強度の低下とともに引張強度や付着強度も低下する可能性があり、ひび割れ抵抗や付着力の低下につながる恐れがあることから、できるだけ圧縮強度の低下は避けるべきである。なお、竹繊維 B が竹繊維 A よりも糖分溶出量が多くなった理由としては、黒カビから植物細胞壁分解酵素が生産され、セルロースの分解が生じてグルコースが生成されたものと推定される。

### 2.3.4 煮沸による糖分溶出試験

溶媒の水道水を 60℃から 95℃になるまで煮沸した際の糖分溶出試験結果を図 2.5 に示す。図 2.5 によると、竹繊維 A, B とも煮沸によって糖分溶出が促進される傾向がみられるものの、温水ほどの溶出は見られず、ピークの溶出量をセメント質量率に換算すると、0.005%程度であり常温水の場合と同様にセメントの凝結時間や圧縮強度にはほとんど影響がないものと考えられる。煮沸の場合の方が温水の場合よりも糖分溶出量が少なくなる要因として、竹繊維 B の黒カビや視認できないほど微量の糸状菌が竹繊維 A に付着していることによって、これらによる植物細胞壁分解酵素の生成や酵素の働きが活発化する環境温度が温水付近にあり、セルロース分解とグルコース生成が促進されることが一因と推定される。また、煮沸時間をより長くした場合には糖分溶出

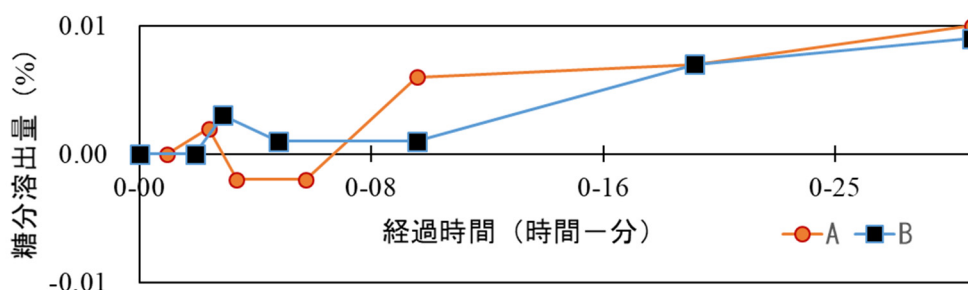


図 2.5 煮沸による糖分溶出試験



量が増加することも考えられる。

### 2.3.5 本研究で使用する竹繊維

竹繊維からの糖分溶出試験の結果、竹繊維 A、B とも常温水や煮沸水を溶媒とした場合にはセメント質量に対して 0.005%程度の糖分の溶出が見られたものの、セメントの凝結時間や圧縮強度にはほとんど影響がないと考えられる。一方で、60℃の温水を溶媒とした場合には、竹繊維 A の糖分溶出量はセメント質量に対して 0.015%程度であり、セメントの凝結時間や圧縮強度にはほとんど影響がないものと考えられるが、竹繊維 B の糖分溶出量はセメント質量に対して 0.03%程度であり、凝結時間や圧縮強度に影響する可能性がある。凝結時間の遅延が生じると、吹付けたモルタルに滑動や滑落の危険性が生じる。また、圧縮強度の低下はひび割れ抵抗性や付着力の低下につながるリスクがある。法面保護用吹付けモルタルの施工においては、60℃のような高温水を吹付けモルタルの練混ぜ水に使用することはなく、練混ぜ時間も数分程度であるため、練混ぜ時に竹繊維から糖分が溶出する可能性は低い、セメントの水和熱によってモルタルの温度が上昇した際に竹繊維から糖分が溶出する可能性も考えられる。そのため、黒カビが発生している竹繊維 B を用いることは適当ではないと考えられる。

以上から、黒カビが発生していない竹繊維 A を用いて次章以降の法面保護用吹付けモルタルに混入する実験を行うものとする。また、製造した竹繊維に黒カビが発生しないように、生竹を特殊回転刃物により繊維化したのち速やかにシートの上に竹繊維を敷き並べ、扇風機による風乾燥を行うものとした。

### 2.3.6 竹繊維の引張強度

各種の処理をした竹繊維とビニロン繊維の引張強度と引張弾性率の測定結果を図 2.6 に示す。引張弾性率は JIS R 7606 に準じて算出した。これによると、竹繊維の生材 Ra に各種の処理を行った、He、Bo、HO はいずれも、Ra と比較して 6%程度の引張強度の上昇と約 20%の引張弾性率の上昇が見られた。これは、加熱や水中での煮沸または過酸化水素水への浸漬処理によって、竹繊維内の水分や非晶性のヘミセルロースまたはリグニン等が減少<sup>43)</sup>した結果、引張強度の高いセルロースの成分比率が高まったためと推定される。

また、竹繊維の引張強度はビニロン繊維の 1/3~1/2 程度で、引張弾性率は 1/3~2/3 程度であった。ビニロン繊維 V18 と V30 の比較では、引張強度は V18 が高く、引張弾性率は V30 が大きい結果となった。これは、繊維径の細い V18 の引張応力ピーク時ひずみが V30 のその 1.4 倍程度であり、V30 よりもひずみの制限を受けないこ

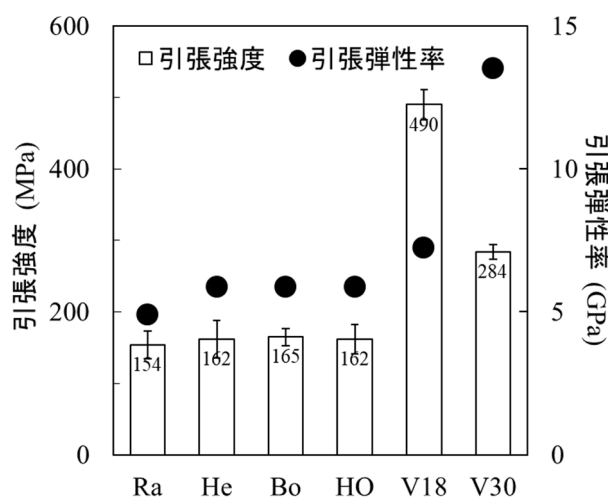


図 2.6 引張強度および引張弾性率

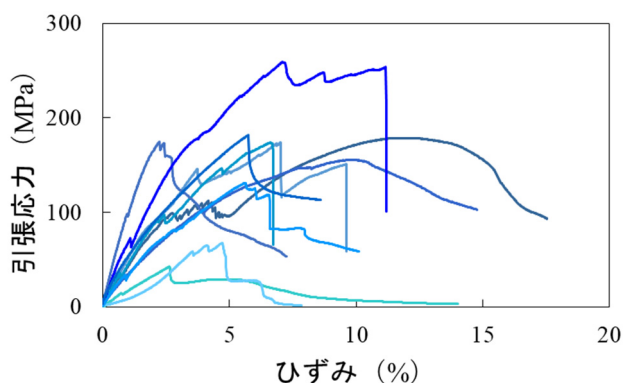


図 2.7 引張応力-ひずみ曲線 (竹繊維 Ra)

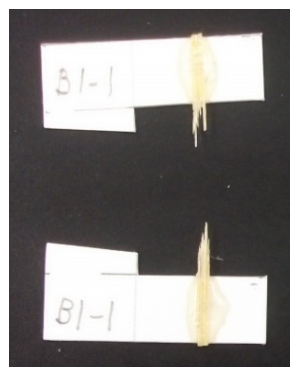


写真 2.16 竹繊維破断の例 (Ra)

とによってひずみと相関する引張応力も上昇し、引張強度が高くなったものと考えられる。一方、繊維径の太い V30 は V18 よりもひずみが制限されたことによって引張弾性率が大きくなったものと考えられる。

竹繊維を代表して Ra の引張応力-ひずみ曲線を図 2.7 に示し、竹繊維の引張破断の例を写真 2.16 に示す。図 2.7 によれば、最大引張応力に達したのち、瞬時に破断するタイプとゆるやかに応力が低下しながら破断するタイプが見られる。瞬時に破断するタイプは竹繊維断面を構成する小繊維が一度に破断したと考えられ、ゆるやかに破断に至るタイプは繊維の一部が徐々に破断されながら全断面の破断に至ったものと考えられる。図 2.7 に示した 10 本の竹繊維の最大引張応力は 50~250MPa とばらつき、破断に至る曲線も様々なものとなっている。これは、竹繊維原料の竹材品質のバラツキ、機械切削法による竹繊維製造時の品質のバラツキ、竹繊維を構成する柔細胞や維管束鞘等の配置のバラツキなどが複合的に起因したものと考えられる。なお、本実験で得られた引張強度や引張弾性率の値が図 1.28, 図 1.31 (第 1 章参照) に示した既往の研究における生竹材のものよりも下回った理由として、本実験で使用した竹繊維が機械切削法により製造され

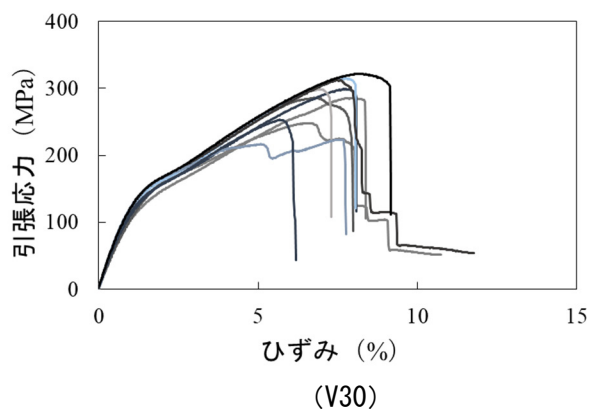
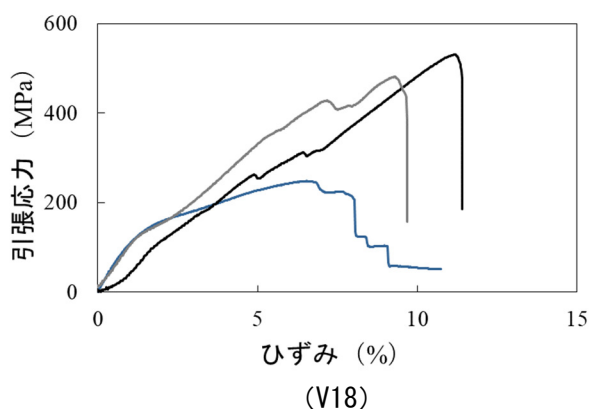


図 2.8 引張応力-ひずみ曲線 (ビニロン繊維)

たものであるため、カッターナイフ等を用いて慎重に切り出された既往の研究における竹繊維よりも製造過程で受けたダメージが大きかったためと考えられる。

また、図 2.8 にビニロン繊維の引張応力-ひずみ曲線を示す。図 2.8 によれば、ほとんどが引張応力に達したのち瞬時に破断している。最大引張応力や破断に至る曲線もある程度近似しており、竹繊維ほどのバラツキは見られない。これは、ビニロン繊維が工業製品であるため、一定程度の品質が確保されているためと考えられる。なお、V18 については、引張試験時に接着剤による定着部からビニロン繊維が抜け出す現象が多く発生したため 3 個の試験データとなっている。

### 2.3.7 竹繊維の引抜き付着強度

竹繊維とビニロン繊維のモルタルからの引抜き付着強度とモルタル強度試験結果をそれぞれ図 2.9 および表 2.2 に示す。

材齢 28 日の乾湿繰返し前の試験での終局破壊形態は、竹繊維では 90%以上、ビニロン繊維では 100%が繊維の引抜きとなり、繊維破断が生じたものについては強度算定から除外した。図 2.9 より、引抜き付着強度は、Ra, He, Bo, HO の 4 種の竹繊維とも同程度であった。このことは、竹繊維に各種の処理を行って引張強度や弾性率を上昇させても、モルタルマトリックスとの付着強度の向上にはつながらないことを示している。また、竹繊維の引抜き付着強度はビニロン繊維の 2/5 程度であった。これは、ビニロン繊維の表面は滑らか（写真 1.16, 第 1 章参照）でありマトリックスとの摩擦抵抗力は小さいと考えられるものの、ビニロン繊維の親水性に

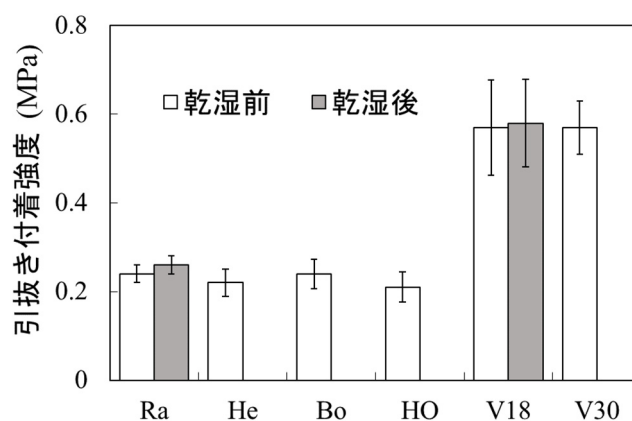


図 2.9 引抜き付着強度

表 2.2 引抜き試験用モルタルの曲げ強度および圧縮強度

モルタル強度	乾湿前	乾湿後
曲げ強度 (MPa)	8.62	10.1
圧縮強度 (Mpa)	41.4	43.7

よってモルタルマトリックスとの間にケミカル結合が働いて大きな引抜き付着強度が発現されたものと考えられる。また、本実験における竹繊維の引抜き付着強度は、図 1.33 (第 1 章参照) に示した既往の研究における竹材の付着強度の約 2 倍となった。これは、機械切削法により竹繊維を製造した結果、写真 1.16 (第 1 章参照) に示すように複雑な表面形状となり、カッターナイフで切り出した既往の研究の竹材よりもモルタルとの付着強度が向上したと考えられる。

Ra と V18 について、乾湿繰返し後の繊維引抜き付着強度は、ともに乾湿繰返し前に比べてやや上昇している。これは、乾湿繰返し後のモルタルの強度が表 2.2 に示すように乾湿繰返し前よりもやや上昇したことも一因と考えられるが、今回の乾湿繰返し条件が繊維の引抜き付着強度を大きく低下させるようなことはないと言える。

また、図 2.10 に乾湿繰返し後の Ra と V18 の引抜き付着応力ー引抜き距離曲線を示す。図 2.10 によれば、Ra では引抜き付着応力のピークが複数生じながら、徐々に応力が低下しているケースが多く見られる。これは、Ra の竹繊維の表面が写真 1.16 (第 1 章参照) に示すように複雑な形状をしているため、最大引抜き付着応力後一気に引抜きが生じないものと考えられる。また、V18 では最大引抜き付着応力後一気に応力が直線状に低下するものも一部に見られるが、最大引抜き付着応力付近の応力がある程度一定にかかりながら引抜き距離が増加しているものも多く見られる。これは、ビニロン繊維 V18 とモルタルとのケミカル結合箇所が一気に分離されないことによるものと推定される。

以上のことから、竹繊維を生材のままモルタルに混入して吹付け、乾湿繰返し作用を受けたとしても、竹繊維の引抜き付着強度にはほとんど影響せず、モルタルと竹繊維の一体性は保たれるものと考えられる。

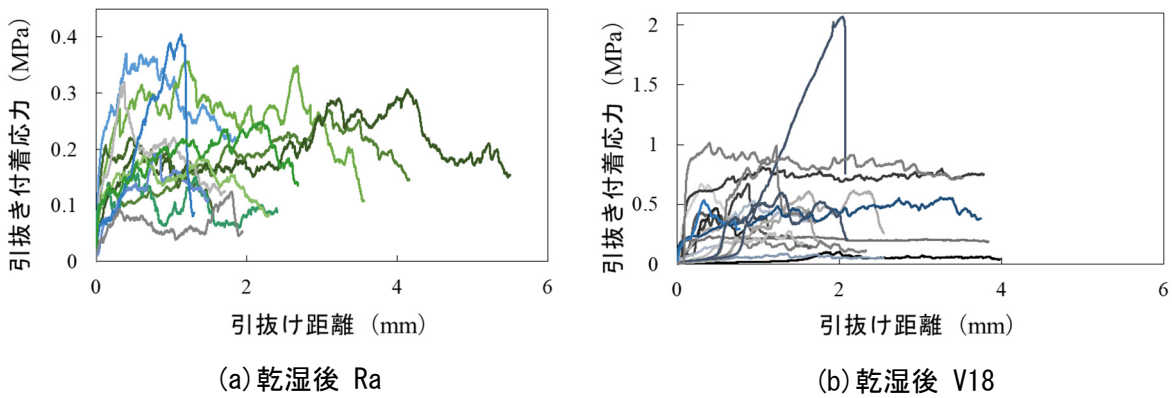


図 2.10 引抜き付着応力ー引抜き距離曲線

### 第3章 竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルの室内実験による基礎的性状評価

#### 3.1 はじめに

本章では、竹繊維を生材のまま法面保護用吹付けモルタルに混入した場合のモルタルの強度特性および初期ひび割れに関する収縮特性などの基礎物性を室内実験によって確認するとともに、竹繊維の適切な混入量を検討した。

#### 3.2 実験概要

##### 3.2.1 使用繊維

本実験で用いた竹繊維（写真3.1(a)）は、3～5年の孟宗竹（兵庫県淡路市産）を特殊回転刃物により、表面から切削する方法で繊維化したものを、1.2～5.0 mmのふるいを用いて分級後、繊維長が $L=20\pm 10$  mmとなるように調整したものを使用した。作製した竹繊維は、約3週間室内で

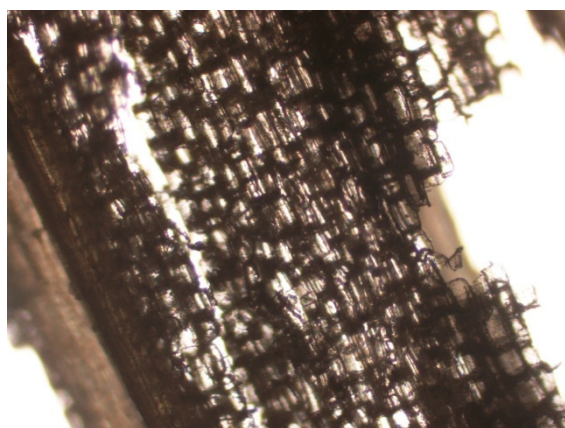


(a) 竹繊維

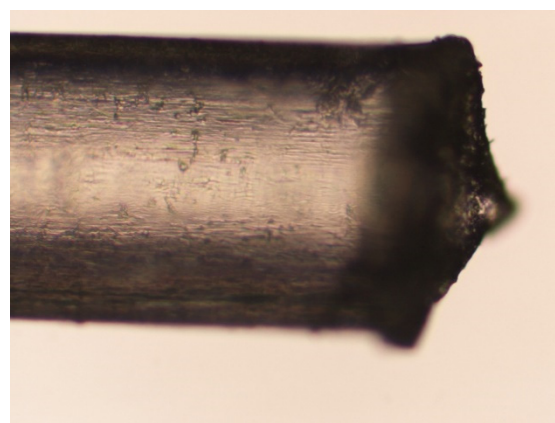


(b) ビニロン繊維

写真 3.1 使用繊維の外観



(a) 竹繊維



(b) ビニロン繊維 ( $\phi 0.2\text{mm}$ )

写真 3.2 使用繊維拡大（光学顕微鏡×400）

自然乾燥して気乾状態としたものを実験に使用した。写真 3.2(a)に光学顕微鏡で撮影した竹繊維組織を示す。光による濃淡から竹特有の中空の柔細胞が識別できる。また、竹繊維との比較のため、モルタル混入用の市販品であるビニロン繊維（写真 3.1(b)）を使用した。写真 3.2(b)に光学顕微鏡で撮影したビニロン繊維を示す。また、竹繊維とビニロン繊維の材料特性の一覧を表 3.1 に示す。なお、繊維の表乾状態を 24 時間の吸水後に繊維表面が乾燥するまで脱水された状態と定義し、吸水後に遠心脱水機を用いて 3 分間の脱水を行った。

表 3.1 竹繊維とビニロン繊維の材料特性

	竹繊維	ビニロン繊維
気乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	0.77	1.09
表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.27	1.17
吸水率 (%)	87.2	12.1
繊維長 (mm)	19.8 (平均)	18.0
直径 (mm)	0.59 (平均)	0.2
アスペクト比	34	90
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	154	490

### 3.2.2 基礎物性試験

#### (1) モルタル配合および供試体作製

基礎物性試験用モルタルの配合を表 3.2 に示す。湿式吹付け用のモルタルを想定し、W/C=55%、S/C=4.2 の普通モルタルを標準配合 N とした。N に対して、竹繊維を体積混入率で 0.25、0.75、および 1.25% 混入する配合をそれぞれ B0.25、B0.75、B1.25 とし、ビニロン繊維を 0.75% 添加した配合を V、竹繊維とビニロン繊維をそれぞれ 0.375% ずつ複合混入した配合を B+V とした。さらに、フライアッシュを竹繊維と併用することによる吹付けモルタルの性能向上効果を確認するため、B0.75 に対して細骨材代替でフライアッシュを 20% 混和したケースを B+FA とした。この場合、フライアッシュを結合材と考えると、W/B は 32% となる。

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16 g/cm<sup>3</sup>）、細骨材は鳴門市撫養町産砕砂（表乾密度 2.57 g/cm<sup>3</sup>、粗粒率 2.63 g/cm<sup>3</sup>）を用いた。またフライアッシュは JIS A 6201 で規定された II

表 3.2 モルタル配合（室内実験）

配合名	繊維種別	繊維添加率 (vol. %)		W/B (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )							
					C	W	S	Fiber	FA			
N	—	—		55	400	220	1679	0	—			
B0.25	竹繊維	0.25					1676	1.93	—			
B0.75		0.75					1670	5.78	—			
B1.25		1.25					1663	9.63	—			
V		ビニロン繊維	0.75				1662	8.14	—			
B+V	竹繊維	0.375	0.75				32	1356	5.78	1674	2.89	—
	ビニロン繊維	0.375									4.07	
B+FA	竹繊維	0.75								280		

種フライアッシュ（密度：2.33 g/cm<sup>3</sup>，比表面積：3240 cm<sup>2</sup>/g，強熱減量：2.8%）を使用した。

モルタルの練混ぜについては、セメントの物理試験方法（JIS R 5201）に準じたモルタルミキサによる機械練りとし、繊維は混練り直前に練混ぜ水に浸した状態で混入した。本実験の湿式吹付け用モルタルは S/C が大きく、流動性が極めて小さい固練りモルタルである。実施工では、コンプレッサーによる圧縮空気圧によってモルタルを地山に吹付けて付着させるため、圧縮空気圧による締固め効果を得ることができるが、室内で行う基礎物性試験においては、吹付けを行わずに吹付け時と同程度の締固め効果を得るため、入念な締固めにより供試体を作製することとした。圧縮試験用の円柱供試体（φ50×100 mm，φ100×200 mm）および曲げ試験・長さ変化試験用の角柱供試体（40×40×160 mm）について、突き棒で3層締固めの後、セメントの物理試験用振動台によって120秒間の振動を与えた。

## (2) 養生および各種試験

打設後の供試体について、実施工条件を考慮して上面以外を封緘し28日間の室内気中養生（温度：20℃，75%R.H.）を実施した。ただし、長さ変化試験用供試体についてはJIS A 1129-1 付属書 A にしたがって、20±2℃，60±5%R.H.の室内で封緘養生を14日間行った後、封緘を解いて同じ室内で保管し、一週間間隔でコンタクトゲージにより長さ変化の測定を行った。

圧縮強度試験については28日間気中養生後と28日気中養生後に12日間の乾湿繰返しを行った場合で測定した。乾湿繰返し条件は、法面への吹付け後の劣化環境を考慮して、岩石の促進スレーキング試験（地盤工学会：JGS 2125）の方法に準拠し、40℃炉乾燥48時間の後、20℃水浸24時間、110℃炉乾燥24時間を1サイクルとして、これを3回繰返した。

材齢28日の円柱供試体（φ5×10cm）を用いて空隙率試験を行った。試験方法は、供試体を80℃の乾燥炉で24時間乾燥した後の質量（Wd）と20℃の水中に48時間浸漬した後の表乾質量（Ws）から、式(3.1)によってモルタル空隙率を求めた。

$$\varepsilon = ((W_s - W_d) / (\rho \times V)) \times 100 \quad \text{式(3.1)}$$

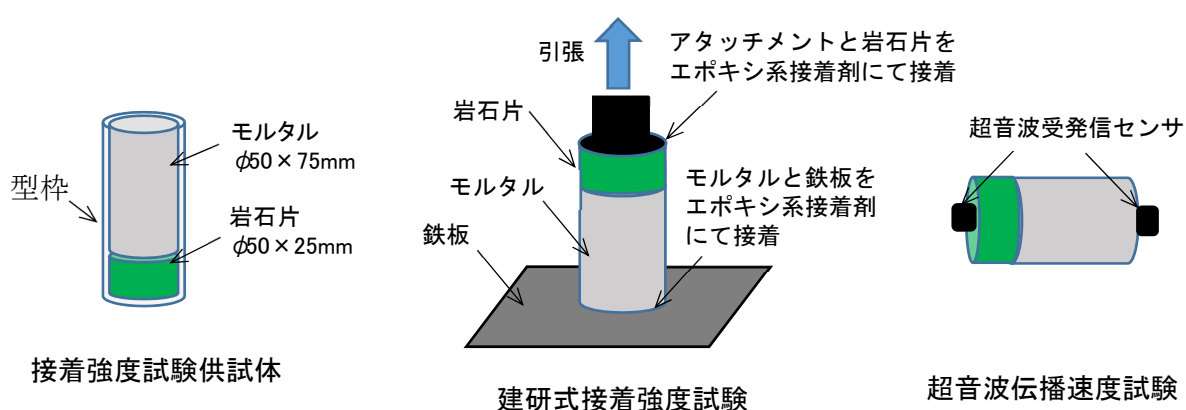


図 3.1 接着強度試験供試体および試験概要

ここに、 $\varepsilon$  : 空隙率 (%),  $\rho$  : 水の密度,  $V$  : 供試体の体積

法面保護用吹付けモルタルの接着強度試験については、研究事例が少なく規格もないことから、本実験では図 3.1 に示すように、岩石片  $\phi 50 \times 25 \text{mm}$  の上にモルタル  $\phi 50 \times 75 \text{mm}$  を打設して岩石片とモルタルが接着した状態の円柱供試体を作製し、28 日間の気中養生後と 28 日気中養生後に 12 日間の乾湿繰返しを行った場合の岩石片とモルタル間の接着強度を、建研式接着強度試験装置および超音波伝播速度試験装置を用いて直接的 (写真 3.3)、間接的に測定した。乾湿繰返し条件については、圧縮強度試験の条件と同様に、 $40^\circ\text{C}$  炉乾燥 48 時間の後、 $20^\circ\text{C}$  水浸 24 時間、 $110^\circ\text{C}$  炉乾燥 24 時間を 1 サイクルとして、これを 3 回繰返した。なお、岩石片は徳島県鳴門産砂岩 (圧縮強度 207MPa, 吸水率 2.46%) を石材用カッターで成型し表乾状態としたもので、モルタルとの接着界面はカッターの切断面となることから比較的平滑な面となっていた。また、接着強度試験に用いた岩石および各配合モルタルの母材について、 $\phi 50 \times 100 \text{mm}$  の円柱供試体を作製して乾湿繰返しによる変化 (劣化) を超音波伝播速度試験装置により測定した。



写真 3.3 建研式接着強度試験

### 3.3 実験結果と考察

#### 3.3.1 空隙率

材齢 28 日のモルタル空隙率の測定結果を図 3.2 に示す。これより、竹繊維の混入量 0% の N 配合から 1.25% の B1.25 配合まで段階的に繊維混入量が増加するにしたがって空隙率も増加している。これは、繊維を混練する際に微細な気泡を同時に巻き込むことが原因と考えられる。

また、ビニロン繊維を混入した V 配

合の空隙率が最も大きくなっている。これは、繊維直径が竹繊維の換算直径の  $1/3$  程度 (表 3.1 参照) であるため、同じ混入量 (0.75%) を竹繊維で添加する場合 (B0.75) と比較して、単位モルタル容積当たりの混入繊維本数が 10 倍程度に多くなることが一因と考えられる。

竹繊維とビニロン繊維の複合繊維とした B+V 配合の空隙率は、竹繊維単独の B0.75 配合の空隙率と同程度となった。また、竹繊維とフライアッシュを併用した B+FA 配合の空隙率が最も小さ

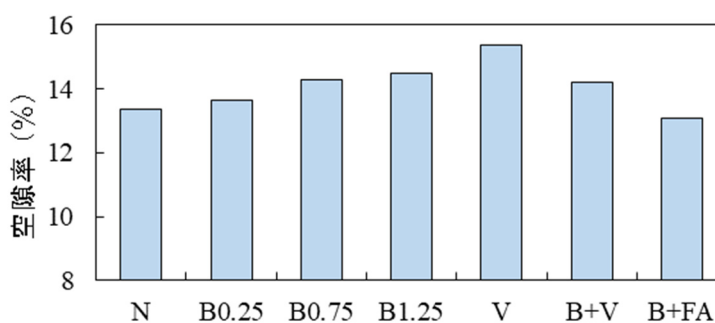


図 3.2 空隙率 (室内実験)



くなった。これは、細骨材の一部をフライアッシュで代替したため、微粉末であるフライアッシュのフィラー効果によって空隙が充填され、緻密な細孔構造が得られたものと考えられる。なお、長期材齢になれば、フライアッシュのポズラン反応が進行するため、空隙率はさらに減少するものと考えられる。

### 3.3.2 圧縮強度

モルタル圧縮強度の測定結果を図 3.3 に示す。材齢 28 日では、竹繊維の混入量が 0% の N 配合から 0.75% の B0.75 配合までは竹繊維混入量の増加に伴って圧縮強度も上昇しているが、混入量が 1.25% の B1.25 配合になると、圧縮強度は低下している。一般に、空隙率が大きいほど圧縮強度は小さくなるが、竹繊維の混入率が 0.75% までは、図 3.3 に示したように、竹繊維混入率

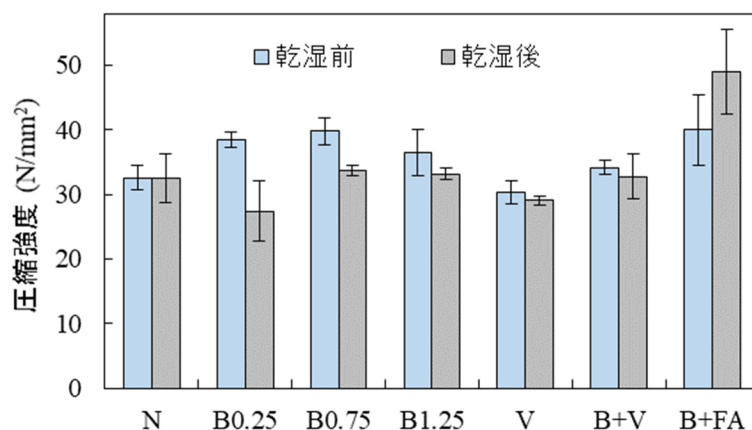


図 3.3 圧縮強度 (室内実験)

の増加とともに空隙率も増加しているにも関わらず、材齢 28 日の圧縮強度は増加した。これは、本実験の供試体の養生条件を気中養生としたために、吸水性の高い竹繊維に含まれる水分によるモルタル内部からの自己養生効果により、竹繊維を混入したモルタルで圧縮強度が増加したものと推定される。一方で、繊維混入量が 1.25% まで増加した場合には、図 3.2 に示したように空隙率が増加することに加えて、練混ぜ時に繊維を十分に分散させることが困難になるため、圧縮強度は低下したものと考えられる。

また、ビニロン繊維を単独混入した V 配合は空隙率が大きかったこともあり、N 配合より低い圧縮強度であったが、竹繊維とビニロン繊維を複合使用した B+V 配合では N 配合と同程度の圧縮強度を示している。竹繊維とフライアッシュを併用した B+FA 配合は空隙率が小さく、最も大きな圧縮強度となっているが、B0.75 配合も B+FA 配合と同程度の高い強度を示しており、強度の観点から 0.75% 程度の竹繊維混入量が適切であると考えられる。

28 日気中養生後に乾湿繰返しを行った時の強度変化としては、竹繊維混入配合で比較的大きな強度低下が認められ、フライアッシュを併用した B+FA 配合で大きな強度増進が見られる。竹繊維の気乾密度は小さく (表 3.1)、写真 3.2 に示したように乾燥時には竹繊維の細胞内は中空状態となる<sup>44)</sup>ので、乾燥収縮時の応力によってモルタル内部に欠陥が発生したものと推定される。一方、フライアッシュを併用した場合には、結合材となる粉体量が増加していることから、乾湿繰返しにおける水浸期間中に未反応の結合材の水和反応が急速に進展したものと考えられる。

各種モルタル円柱供試体の材齢 28 日における圧縮載荷時における圧縮応力-横ひずみ曲線の

例を図 3.4 に示す。これらの曲線において最大圧縮応力に達した後徐々に横ひずみとして引張ひずみが増大し、最終的に破壊に至る。図 3.4 における各曲線と横軸の囲む面積の大きさが、各モルタルの引張じん性の指標となるものと考えられ、これを図 3.5 に示す。図 3.5 によると、N 配合に対してじん性向上が認められるのは、竹繊維とビニロン繊維を複合混入した B+V 配合とフライアッシュを混和した B+FA 配合であり、それぞれ N 配合の面積の 1.15 倍および 1.79 倍となっている。B+V 配合については、特性の異なる繊維材料を混合することで、竹繊維による内部養生効果がもたらすモルタル強度の増加に加え、段階的なひび割れ進展に対して各繊維材料が複合的に抵抗したものと推定される。B+FA 配合については、竹繊維による内部養生効果がもたらすモルタル強度の増加に加え、フライアッシュにより緻密なモルタルマトリックスが形成され、ひび割れ部分における竹繊維の引き抜け抵抗性が增大したものと考えられる。

### 3.3.3 曲げ強度および静弾性係数

角柱供試体の材齢 28 日における曲げ強度測定結果を、圧縮载荷時に測定した静弾性係数の値とともに図 3.6 に示す。これより、すべての繊維混入配合の曲げ強度が N 配合の値を上回っており、特に竹繊維混入量が最も多い B1.25 配合の曲げ

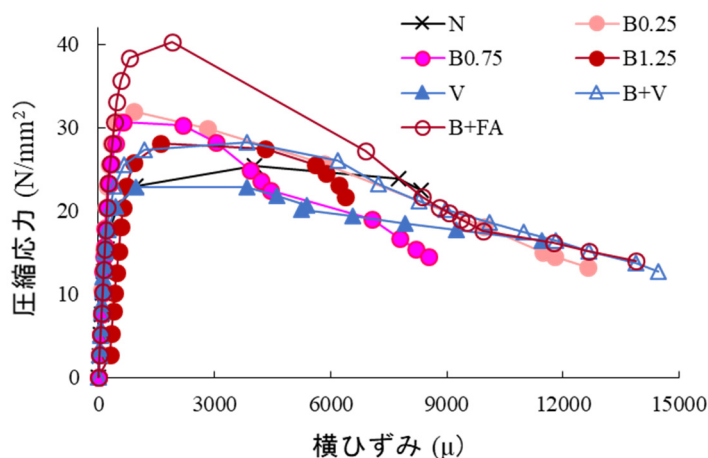


図 3.4 圧縮応力-横ひずみ曲線（室内実験）

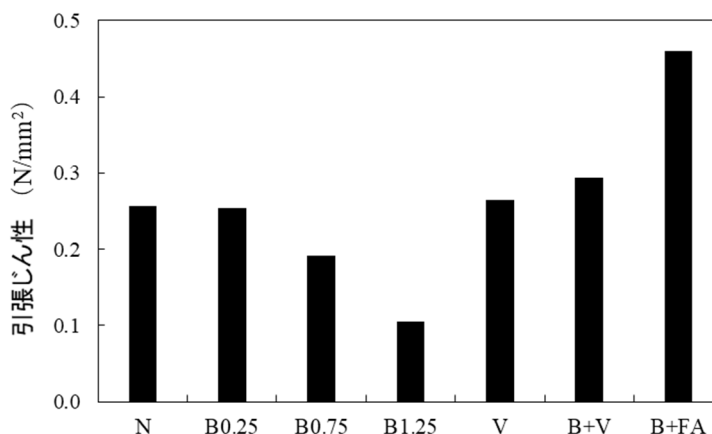


図 3.5 引張じん性

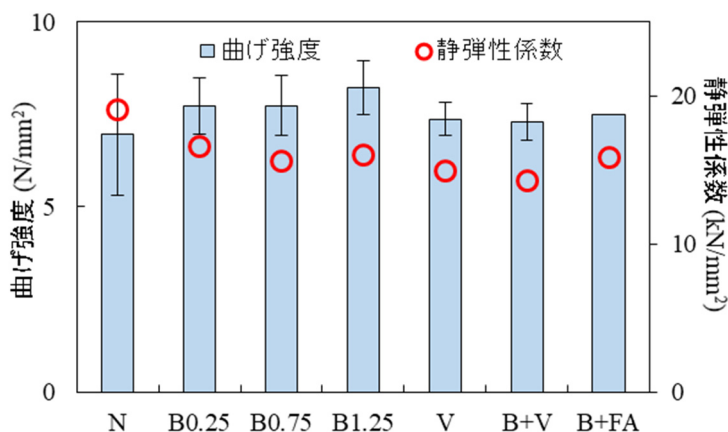


図 3.6 曲げ強度および静弾性係数（室内実験）

強度が最も大きくなっている。これは、竹繊維による内部養生効果がもたらすモルタル強度の増加に加え、繊維材料が架橋効果によって曲げひび割れの進展に抵抗したことによるものと考えられる。一方で、モルタルの静弾性係数の値は繊維材料を混入することによって低下している。すなわち、繊維材料を混入することで、曲げ応力に対する抵抗性が增大するとともに、一定の圧縮応力に対する変形量は大きくなっており、様々な応力状態に対して柔軟に対応可能な材料になっていると言える。

### 3.3.4 乾燥収縮

長さ変化試験におけるモルタル収縮ひずみの測定結果を図 3.7 に示す。これによると、B+FA 配合以外の繊維混入配合モルタルについては、繊維種類によらず、N 配合より若干小さな収縮ひずみを示している。これより、竹繊維を混入することによって、ビニロン繊維と同程度の乾燥収縮低減効果が期待できるものと考えられる。

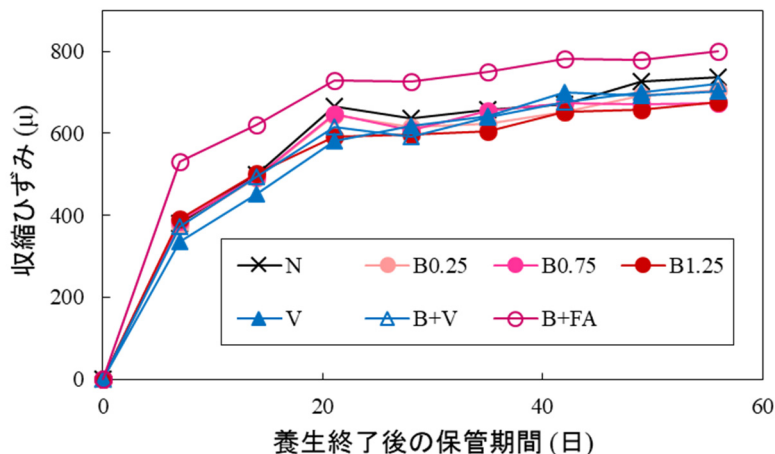


図 3.7 乾燥収縮ひずみ

一方で、B+FA 配合は、N 配合よりも大きな収縮を示している。これはフライアッシュを細骨材置換で 20% 添加したため、他の配合に比較して結合材の量が多くなり、自己収縮が大きくなったものと考えられる。ただし、図 3.7 によると、時間の経過とともに B+FA 配合の収縮量と他配合モルタルの測定値との差は小さくなっている。

### 3.3.5 接着強度

建研式接着強度試験装置を用いた接着強度試験（以降、建研式接着強度試験）による岩石面とモルタルとの接着強度測定結果を図 3.8 に示す。図 3.8 によれば、乾湿繰返し後の接着強度は、すべての配合で乾湿繰返し前よりも低下している。これは、乾湿繰返し作用によってモルタルに体積変化が生じ、接着界面で岩石面とのせん断ひずみが増大したためと考えられる。また、B0.75、B1.25 および B+V の 3 配合は、

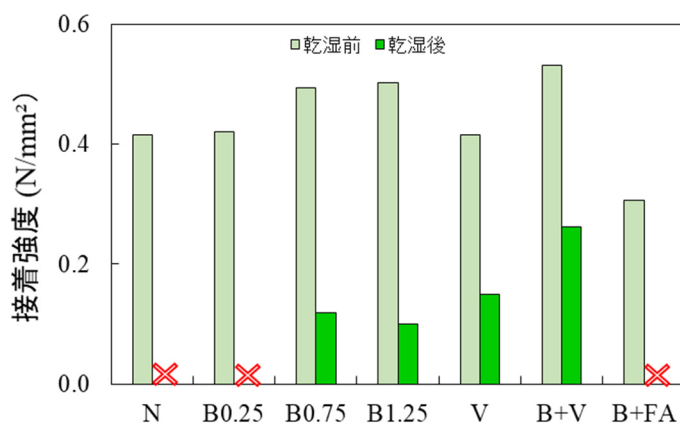
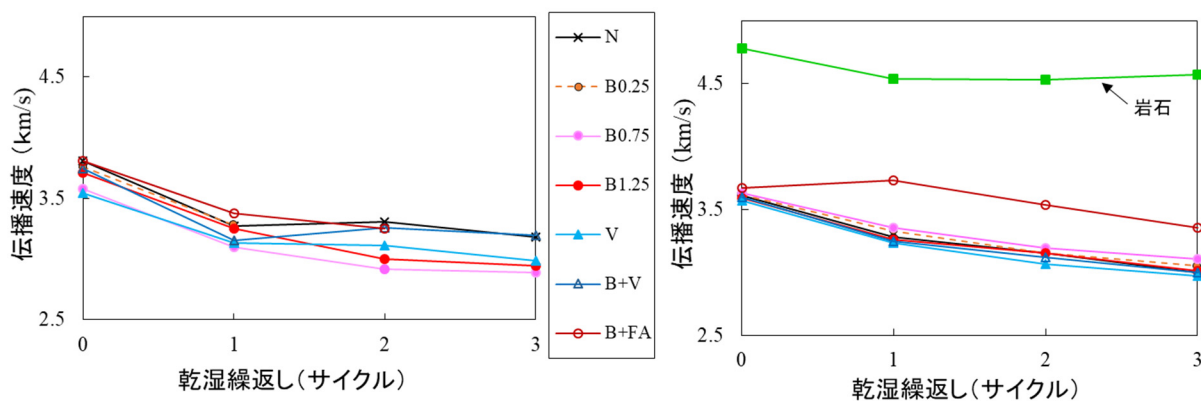


図 3.8 岩石面とモルタルとの接着強度 (建研式接着強度試験)

乾湿繰返し前, 乾湿繰返し後とも N よりも大きな接着強度となっている。特に, B+V は乾湿繰返し前, 乾湿繰返し後とも最も大きな値となっている。これは, 竹繊維は表 3.1 に示したように吸水率が高いので, 吸水した竹繊維による内部養生効果によりモルタルの圧縮強度や曲げ強度等の力学特性が向上する傾向があること (図 3.3, 図 3.6) と同様に, 竹繊維の内部養生効果によって, B0.75, B1.25, B+V の乾湿繰返し前の接着強度が増加したことが考えられる。また, 乾湿繰返しの湿潤期間中に吸水した竹繊維が乾燥状態におかれたモルタルの内部から徐々に水分を補給することで乾燥収縮ひずみを抑制して, 乾湿繰返し後の接着強度の低下を抑制したことが考えられる<sup>45)</sup>。また, V は乾湿繰返し後の接着強度が N よりも大きな値となっている。これは, 接着界面付近のビニロン繊維がモルタルと岩石にケミカル結合していることにより, 乾湿繰返しに対する抵抗性が向上したものと推定される。また B+V は, 竹繊維の内部養生効果による乾燥収縮ひずみ抑制に加えて, ビニロン繊維のケミカル結合による乾湿繰返し抵抗性の向上との相乗効果により乾湿繰返し前および後の接着強度が最も大きくなったものと考えられる。これらのことから, 竹繊維単独または竹繊維とビニロン繊維の複合繊維を用いることで, モルタルと岩石面との接着力が向上すると考えられる。

超音波伝播速度試験の測定結果を図 3.9 に示す。なお, 図 3.9(a) の B0.25 の乾湿繰返し 2 サイクル完了時以降および B+FA の 3 サイクル完了時の値は岩石片が自然剥離をしていたため欠測となっている。図 3.9(b) によれば, 母材の乾湿繰返し 3 サイクル完了時の伝播速度は乾湿繰返し前に対してすべて小さくなっており, 乾湿繰返し前の伝播速度との相対比率は岩石で 96%, B+FA で 91%, その他の配合で 83~85% となっている。このことから, B+FA は他の配合よりも乾湿繰返し抵抗性が高いと考えられる。また, 乾湿繰返し前では竹繊維やビニロン繊維を混入した配合と N が同程度であり, 繊維混入による伝播速度の低下はほとんど見られない。また, 図 3.9(a) によれば, 乾湿繰返し 3 サイクル完了時の伝播速度は, 乾湿繰返し前に対してすべて小さくなっており, 乾湿繰返し前の伝播速度との相対比率は, N の 84% に対して B0.75 が 81%, B1.25 が 79%,



(a) 接着強度試験供試体  
(岩石 φ50×25mm + モルタル φ50×75mm)

(b) 母材 (φ50×100mm)

図 3.9 超音波伝播速度

V が 84%, B+V が 85%であった。このことから、超音波伝播速度試験の結果からは図 3.8 の建研式接着強度試験で見られたような、竹繊維やビニロン繊維を混入することによる接着力の向上は確認されなかった。

なお、建研式接着強度試験結果の図 3.8 においては、乾湿繰返し前の材齢 28 日での接着強度は全体的に  $0.3\sim 0.5 \text{ N/mm}^2$  程度と比較的小きな値となっている。これは、岩石の接着面がカッターによる切断面のためその表面が比較的平滑であったこと、モルタル打設時には振動台を用いて入念に締固めたものの実機プラントを用いて吹付けた場合と比較すると接着効果が小さかった可能性があること、などが考えられる。また、28 日間の室内気中養生後に乾湿繰返しを行った際には N, B0.25, B+FA の 3 配合の値が測定できなかった。これは乾湿繰返しを行っている過程で、接着強度試験用供試体として作製したすべての供試体 (1 配合当り 3 供試体) において、岩石片が接着界面から自然剥離したことによるものであり、測定できたものについても 2 供試体は自然剥離し 1 供試体のみのものであった。

以上のことから、法面保護用吹付けモルタルの岩石等との接着強度を測定する試験としては、超音波伝播速度試験よりも建研式接着強度試験が接着力の違いを明らかにできる方法であると考えられるものの、本章で実施した建研式接着強度試験の結果が全体的に比較的小きな強度であったため、各配合の吹付けモルタルの接着特性を明らかにすることはできていないと考えられる。よって、改めて次章の吹付け実験において建研式接着強度試験を行うものとする。

## 第4章 竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルの吹付け実験による力学特性および耐久性評価

### 4.1 はじめに

第3章の室内実験から、法面保護用吹付けモルタルに混入する竹繊維の量を0.75vol.%とすることとし、実機の法面用吹付けプラントを用いて型枠への吹付け実験を行い、モルタルの力学特性および乾湿繰返しや凍結融解に対する抵抗性を評価した。

### 4.2 実験概要

#### 4.2.1 使用繊維

吹付け実験で用いた竹繊維は、室内実験と同様に3～5年の孟宗竹（兵庫県淡路市産）を特殊回転刃物により、表面から切削する方法で繊維化したものを、1.2～5.0mmのふるいを用いて分級後、繊維長が $L=20\pm 10$ mmとなるように調整したものとした。作製した竹繊維は、約3週間室内で自然乾燥して気乾状態としたものを実験に使用した。また、竹繊維との比較のため、市販品のモルタル添加用ビニロン繊維を使用した。

#### 4.2.2 吹付け実験

##### (1) モルタル配合および吹付け

吹付け実験用モルタルの配合を表4.1に示す。吹付け実験では第3章の室内実験の結果を踏まえ、繊維添加率を0.75vol.%に統一し、N、B、V、B+V、B+FAの5配合について実施した。ただし、B+FA配合は細骨材代替で混和したフライアッシュの影響で粘性が高く、吹付けノズルが閉塞する可能性が高いと判断し、室内実験のフライアッシュ混和量から低減する配合修正を行った。これにより、細骨材代替でのフライアッシュ置換率を7%、フライアッシュを結合材と考えた場合のW/Bを45%とした。

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 $3.15\text{ g/cm}^3$ ）、細骨材は兵庫県赤穂市産砕砂（表乾

表 4.1 モルタル配合（吹付け実験）

配合名	繊維種別	繊維添加率 (vol.%)		W/B (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )				
					C	W	S	Fiber	FA
N	—	—		55	400	220	1600	0	—
B	竹繊維	0.75					1590	5.78	—
V	ビニロン繊維	0.75					1582	8.14	—
B+V	竹繊維	0.375	0.75				1595	2.89	—
	ビニロン繊維	0.375						4.07	
B+FA	竹繊維	0.75		45	1485	5.78	90		

密度  $2.61 \text{ g/cm}^3$ 、粗粒率 2.78) を用いた。フライアッシュは JIS A 6201 で規定された II 種フライアッシュ (密度:  $2.24 \text{ g/cm}^3$ 、比表面積:  $3850 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、強熱減量: 2.6%) を使用した。

モルタル吹付け作業は実機プラントを用いて行い、吹付け方式は湿式吹付け方式とした。繊維の偏りを防止するため、繊維は小分けにしながらかミキサーに投入し、1 バッチの練混ぜ時間は空練り 30 秒後 2 分間とした。

## (2) 供試体作製および各種試験

モルタル吹付け用型枠と切出し供試体の概要を図 4.1 に示す。各配合モルタルに対して、用いた木製型枠は図に示した 3 種類で、 $850 \times 300 \times 150 \text{ mm}$  の型枠で圧縮強度試験用の円柱コア供試体 ( $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ ) 3 本および、接着強度試験用供試体 4 体を作製した。モルタル接着強度試験供試体は、実施工を想定して、岩石片 ( $\phi 75 \times 25 \text{ mm}$ ) に吹付けた場合と、 $300 \times 300 \times 60 \text{ mm}$  のコンクリート平板 (曲げ強度:  $5.5 \text{ N/mm}^2$ 、インターロッキングブロック用) に吹付けた場合の 2 種類を作製した。なお、岩石片は第 5 章の室内実験と同様に徳島県鳴門市産砂岩 (圧縮強度  $207 \text{ MPa}$ 、吸水率 2.46%) を石材用カッターで整形したもので、モルタル接着面は切断面となることから、コンクリート平板と比較すると平滑な面となっていた。また、 $700 \times 600 \times 150 \text{ mm}$  の木製型枠を用いて、曲げ試験用の角柱供試体 ( $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ ) 4 本を切出した (写真 4.5)。また、 $550 \times 250 \times 250 \text{ mm}$  の木製型枠を用いて、凍結融解試験用の円柱供試体 ( $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ ) 2 本を切出した。これらの供試体以外に、NEXCO の規格である JHS 315 「吹付け用コンクリート及びセメントモルタルの強

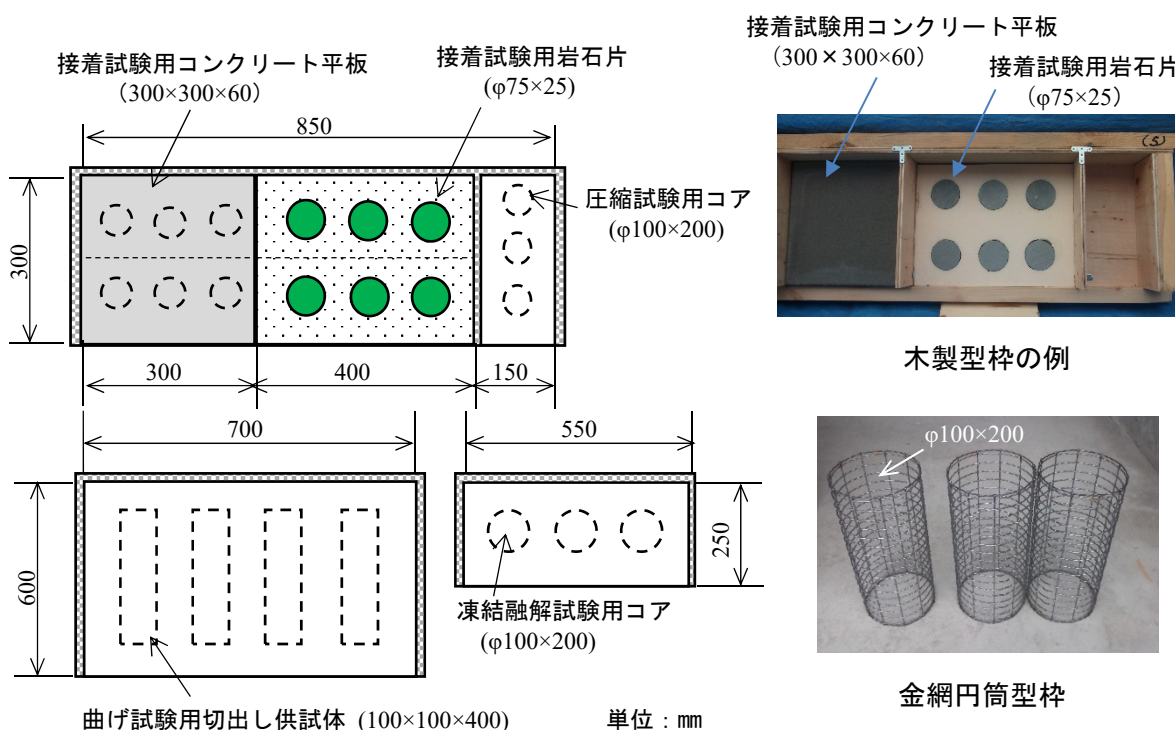


図 4.1 吹付け型枠上面図と切出し供試体の概要

写真 4.1 木製型枠と金網円筒型枠



木製型枠吹付け



金網円筒型枠  
吹付け



湿式吹付けプラント

写真 4.2 吹付け実験状況

度用供試体の作り方 (案)」に従って、 $\phi 100 \times 200$  mm の金網製円筒型枠を用いた圧縮強度試験用の供試体を 3 体ずつ作製した。木製型枠の例と金網円筒型枠を写真 4.1 に示し、吹付け実験状況を写真 4.2 に示す。また、供試体作製用の吹付けとは別に、JSCE-F 563-2013 に従って、5 分勾配にセットした木製型枠を用いてモルタルリバウンド率を測定するための吹付けを実施した (写真 4.3)。

吹付けを実施した型枠は、11/24 から 12/22 までの 28 日間の屋外暴露を実施した (写真 4.4)。この間の平均気温は  $8.3^{\circ}\text{C}$ 、雨の日が 7 日間あった。凍結融解試験以外の各供試体の切出しは材齢 25 日の時点で実施し、材齢 28 日に達した時に、圧縮強度試験 (JIS A 1108)、曲げ強度試験 (JIS A 1006) と建研式接着強度試験装置を用いた接着強度試験



写真 4.3 リバウンド試験



写真 4.4 屋外暴露養生



(JSCE-K 561-2013) を実施した。

接着強度試験用供試体のうち 2 体 (図 4.2, 写真 4.6, 写真 4.7) は, 28 日間の屋外暴露後に



写真 4.5 供試体切出し状況 (曲げ強度試験用)

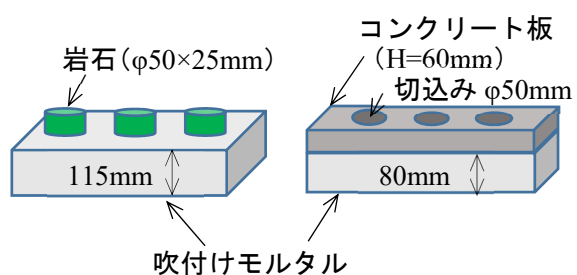


図 4.2 接着強度試験供試体



写真 4.6 岩石面と吹付けモルタルの接着強度試験供試体

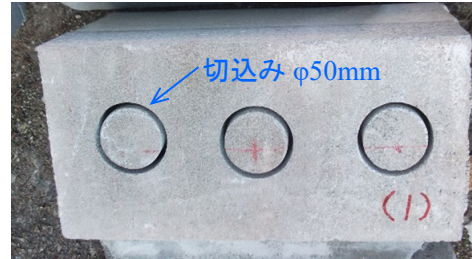


写真 4.7 コンクリート面と吹付けモルタルの接着強度試験供試体

12 日間の乾湿繰返しを行った。乾湿繰返し条件は、第 5 章の室内実験と同様に、岩石の促進スレーキング試験（地盤工学会：JGS 2125）の方法に準拠し、40℃炉乾燥 48 時間の後、20℃水浸 24 時間、110℃炉乾燥 24 時間を 1 サイクルとして、これを 3 回繰返した。さらに、乾湿繰返し後の接着強度試験を行った後（写真 4.8）、コア供試体（φ50×100 mm）3 本を切り出し（写真 4.9）、圧縮強度試験を実施した。



写真 4.8 建研式接着強度試験



写真 4.9 接着強度試験後の  
圧縮強度試験用コア供試体切出し

凍結融解試験用供試体は、材齢 56 日時点でコア抜きし、凍結融解試験を行った。試験は、コンクリートの凍結融解試験方法（JIS A 1148）に準じて供試体の水中凍結融解試験（A 法）を 300 サイクル実施し、相対動弾性係数および質量減少率を求めた。なお、相対動弾性係数は、既往の研究<sup>46)</sup>を参考に超音波伝播速度より求めた。

凍結融解試験用供試体を切り出した残りのモルタルブロックを継続して屋外暴露養生し、材齢

256日時点でコア供試体(φ50×100mm)を切り出し、空隙率試験を行った。試験は、第5章の室内実験と同様に、供試体を80℃の乾燥炉で24時間乾燥した後の質量(Wd)と20℃の水中に48時間浸漬した後の表乾質量(Ws)からモルタル空隙率を求めた(式(3.1),第3章参照)。

また、マイクロスコープを用いて曲げ強度試験後の角柱供試体破断面の繊維の混入状況を観察した。

曲げ強度試験後の破断した角柱供試体(写真4.10)、凍結融解試験用供試体を切り出した残りのモルタルブロック(写真4.11)および乾湿繰返し前の岩石面接着強度試験後のモルタルブロックを継続して屋外暴露養生し、コア供試体(φ50×100mm)を随時切り出して材齢28日~336日までの圧縮強度の推移を調査した。



写真 4.10 曲げ強度試験破断供試体からのコア採取状況



写真 4.11 凍結融解試験モルタルブロックからのコア採取跡

### 4.3 実験結果と考察

#### 4.3.1 リバウンド率

モルタル吹付け時のリバウンド率の測定結果を図4.3に示す。これによると、ビニロン繊維のV配合が最もリバウンド率が低く、N配合からは約50%低下している。竹繊維のB配合はN配合から10%程度の低下であるが、竹繊維とビニロン繊維の複合繊維を用いたB+V配合はN配合の値から35%程度低下している。これらの配合の繊維混入量は0.75%で一定であることから、混入された繊維の種類と本数がリバウンド率に大きく影響したものと考えられる。

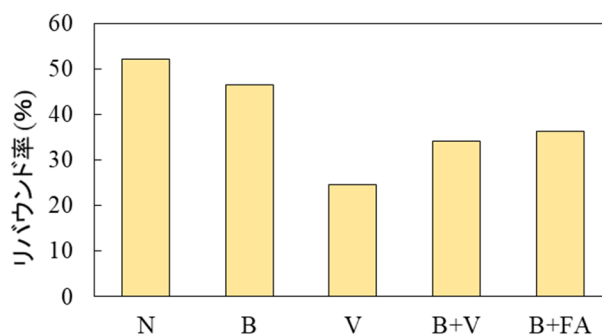


図 4.3 リバウンド率

また、フライアッシュを混和した B+FA 配合の値は N 配合から 30%程度小さく、B 配合からは 20%程度低下した。これは、フライアッシュの混和によってフレッシュモルタルの粘性が向上し、吹付け時に型枠に付着しやすくなったことに加え、材料分離抵抗性が向上して竹繊維が均一に分散させられたことが原因と考えられる。

なお、N 配合のリバウンド率が約 50%と高くなった原因は、近年における良質な細骨材の入手が困難な状況を踏まえ砕砂を用いたことで粘性が低下し、空気搬送時や吹付け時におけるモルタルの材料分離傾向が高まったためと考えられる。これは、マテリアルホースの脈動やノズルからの吐出状況に不連続性が見られたことから推察するものである。このことから、良質な細骨材の入手が困難な場合においては、竹繊維とビニロン繊維の混合使用や竹繊維にフライアッシュを併用することでモルタルの粘性が向上して、リバウンド率低減に寄与すると考えられる。

#### 4.3.2 空隙率

材齢 256 日時点でコア供試体 (φ50×100mm) を切り出し、モルタル空隙率を測定した結果を材齢 28 日の室内実験 (第 3 章) での空隙率と合わせて図 4.4 に示す。

これによると、吹付け供試体の B、V については室内実験の値よりも少なく、N と同程度の空隙率となっている。これは、吹付け施工時の圧力によって、繊維を混練りする際に巻き込んだ微細な気泡が消失したためと考えられる<sup>20)</sup>。また、B+FA の

吹付け供試体の空隙も室内実験の値より低下している。これは、吹付け施工時の圧力による気泡消失に加えて、256 日と長い材齢であるため、フライアッシュのポゾラン反応が進行してモルタルの緻密化が進み空隙が減少したものと考えられる。

#### 4.3.3 マイクロスコープ観察

曲げ強度試験後に供試体破断面の繊維状況をマイクロスコープによって観察した例を写真 4.12 に示す。

これによると、竹繊維周辺に空隙はなく、モルタルマトリックスと一体化されていることがわかる。これにより、竹繊維は乾燥状態においてもモルタルマトリックスとの一体化を阻害するほどの体積変化はないものと考えられる。なお、曲げ強度試験後の供試体破断面の目視およびマイクロスコープ観察からは、竹繊維およびビニロン繊維ともに、鋼繊維を混入した吹付けモルタルに見られるような繊維の配向性<sup>47)</sup>は確認されなかった。これは、竹繊維やビニロン繊維は鋼繊維に比較して密度が小さく、剛性がないために、不規則に配置されたものと考えられる。

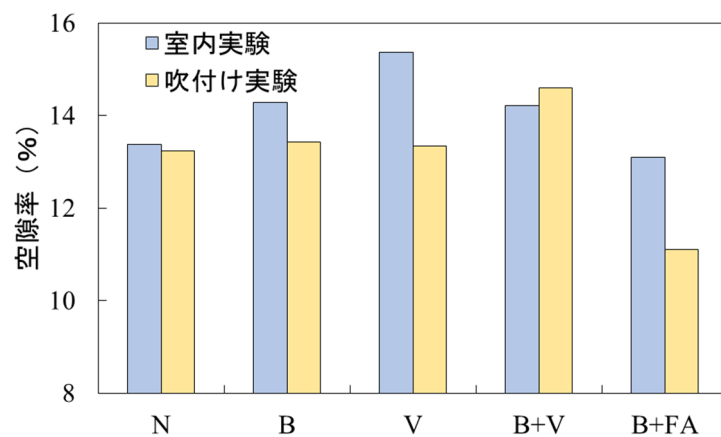
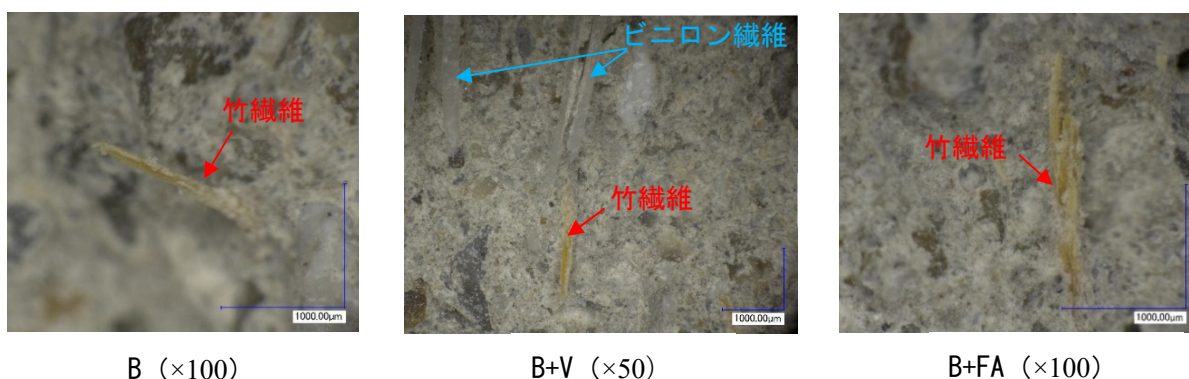


図 4.4 室内実験と吹付け実験の空隙率



B (×100)

B+V (×50)

B+FA (×100)

写真 4.12 マイクロスコープ観察

#### 4.3.4 圧縮強度

材齢 28 日における  $\phi 50 \times 100$  mm のコア供試体と  $\phi 100 \times 200$  mm の金網円筒型枠供試体の圧縮強度を図 4.5 に示す。図 4.5 より、コア供試体の強度に比べて金網円筒型枠供試体の強度の方が全体として小さい値を示している。金網円筒型枠供試体は、供試体作製のための吹付け時に型枠からのリバウンドモルタルの巻き込みを防止できる利点があるものの、網目の間から吹付け圧が逸散するため、吹付け圧によるモルタルの締固め程度が低下したものと考えられる。ただし、既往の報告りでは、コア供試体と金網円筒型枠供試体は同程度の圧縮強度が得られており、供試体作製時の吹付け材料や方法の影響などについて今後検討を加える必要がある。

コア供試体の圧縮強度の測定値を室内実験の測定値と比較 (図 4.6) すると、 $2 \sim 7 \text{ N/mm}^2$  程度の差はあるものの、全体としては室内実験と同程度の強度が得られている。室内実験では、吹付けを行う代わりに入念な締固めにより供試体を作製したが、これにより、吹付け実験と同様の硬化体が得られたものと考えられる。また、図 4.4 において、吹付け実験の N, B, V が同程度の空隙率を示していることと相関するように、図 4.6 における吹付け実験の N, B, V も同程度の圧縮強度を示している。

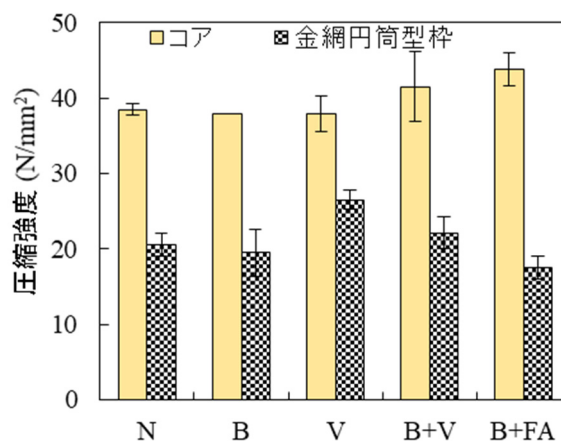


図 4.5 圧縮強度 (吹付け実験)

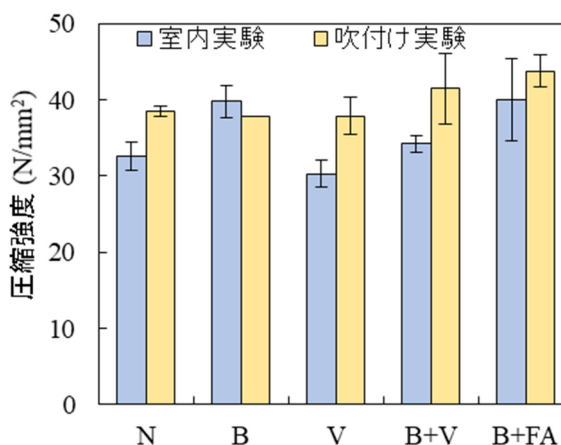


図 4.6 室内実験と吹付け実験の圧縮強度

φ50×100 mm 円柱コアの乾湿繰返し前後の圧縮強度と単位容積質量の測定結果を図 4.7 に示す。これによると、材齢 28 日の乾湿繰返し前では、竹繊維を混入した B 配合は単位容積質量が最も小さいにもかかわらず圧縮強度は N, V と同程度であった。これは、屋外暴露養生時において、吸水した竹繊維が徐々に水分を補給する、内部養生効果によるものと推定される。同様な理由から、B+V の圧縮強度が V よりも高くなったものと考えられる。また、B+FA が最も高い強度となったのは、竹繊維による内部養生効果に加えて、フライアッシュ混入による水結合材比の低下やフィラー効果により緻密なモルタルマトリックスが形成されたものと考えられる。

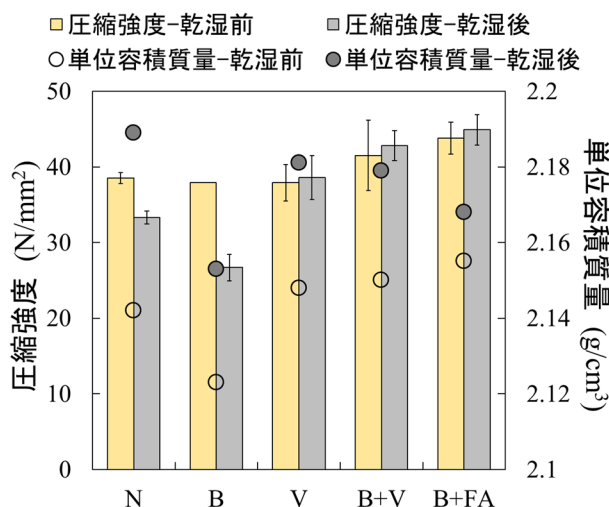


図 4.7 乾湿繰返し前後の圧縮強度および単位容積質量

28 日間の屋外暴露養生後に乾湿繰返しを行った場合に、すべての配合で単位容積質量が増加したが、N, B の 2 配合で強度低下が認められた。室内で作製した N 配合のモルタルは乾湿繰返しによる強度低下は見られなかったが (表 2.2, 第 2 章参照), 実際の吹付け条件では乾湿繰返しによってモルタル内部に微細な欠陥が発生しやすかったものと考えられる。これは、空気搬送時や吹付け時における材料分離, 不均一な吹付け圧力等によって、モルタルの品質が室内で作製したものよりも低下することが要因と考えられる。また、B が N よりも低い強度となった理由としては、竹繊維の気乾密度は小さく (表 3.1, 第 3 章参照), 乾燥時には竹繊維の細胞内は中空状態となる<sup>44)</sup>ので、乾燥収縮時の応力によってモルタル内部に欠陥が発生したものと推定される。一方、V, B+V, B+FA の 3 配合については乾湿繰返しによって強度がやや増加した。これは、乾湿繰返しの湿潤期間中に未反応であった結合材の水和反応が促進されたものと考えられ、V, B+V は竹繊維よりも吸水性が少なく中空も無いビニロン繊維を混入したことで、乾湿繰返し時においては繊維周辺の体積変化が小さく、乾燥収縮時の応力もあまり発生しなかったものと考えられる。また、B+FA については、フライアッシュを併用しているので、結合材となる粉体量が増加していることに加え、フライアッシュのポズラン反応が長期強度の増進に寄与したものと考えられる。

約 1 年間にわたり屋外暴露養生を継続した時の、φ50×100 mm 円柱コアによる圧縮強度の推移を図 4.8 に示す。全体的には、材齢 28 日以降も変動が生じながら材齢が大きくなるに従い圧縮強度も大きくなっている。強度の変動が生じている理由としては、各種試験を行ったあとの 3 種類のモルタルブロックからコア採取をしたためにモルタルブロックごとに品質の違いがあること、外部暴露養生のため気象の影響を受けること、などが考えられる。図 4.8 によれば、B+FA は他の配合に比較して平均して高い強度で推移している。これは、フライアッシュ混入によりポズラン反応が経時的に進行して空隙が減少したためと考えられる。また、B, V, B+V と N とほぼ同

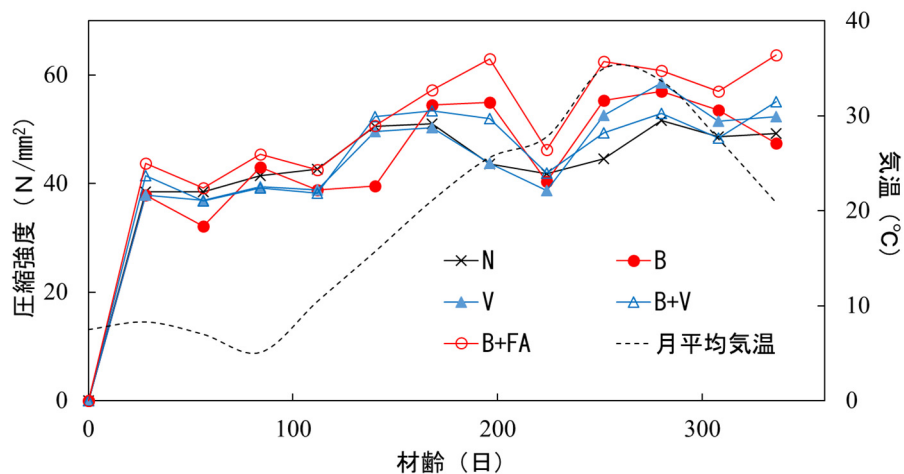


図 4.8 圧縮強度の推移

様な強度の変動傾向が見られる。このことから、竹繊維は細胞内が中空状態であるため、気温、湿度の変化によるモルタルの乾燥収縮の進行に応じて中空部に収縮応力が集中して内部欠陥が発生し圧縮強度が低下する等、気象変動の影響を受けやすいと考えられるものの、1年間程度の自然暴露環境ではその傾向を把握することは困難と考えられる。そのため、長期的な観察とすることが望ましい。

#### 4.3.5 基盤面との接着強度

乾湿繰返し前後の吹付けモルタルと岩石またはコンクリートの基盤面との接着強度測定結果を図 4.9 に示す。乾湿繰返し前（材齢 28 日）では、岩石面は接着界面の剥離破壊となり、接着強度も  $1.0 \text{ N/mm}^2$  程度の小さい値となった。これは、接着面が岩石用カッターで切断した平滑な面であったためと考えられる。これに対して、コンクリート面の場合には基盤コンクリートまたは吹付けモルタルの破壊となり、モルタルやコンクリートの引張強度に近い値と考えられる  $2.0 \text{ N/mm}^2$  を超える値を示した。また、基盤の種類によらず、複合繊維を用いた B+V 配合が最も大きい値であった。写真 4.13 に供試体の破壊状況を示す。

28 日間の屋外暴露養生後に乾湿繰返しを行った時の接着強度は、岩石面およびコンクリート面ともに、すべての配合で乾湿繰返し前よりも低下した。これは、乾湿繰返し作用によってモルタルに体

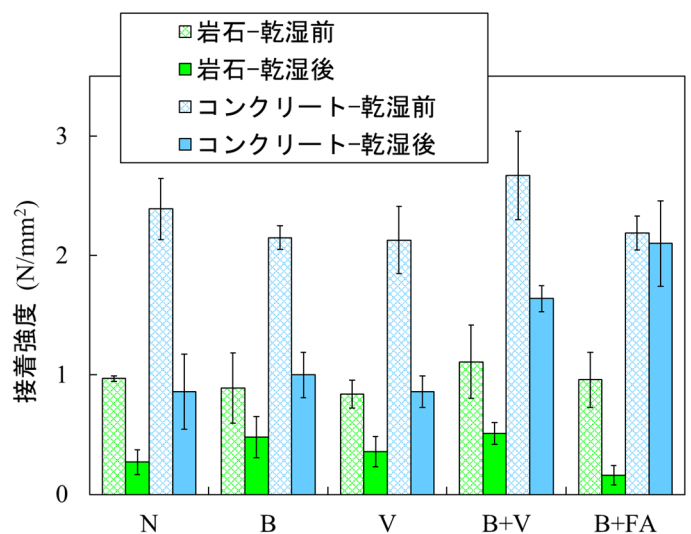


図 4.9 基盤面と吹付けモルタルとの接着強度



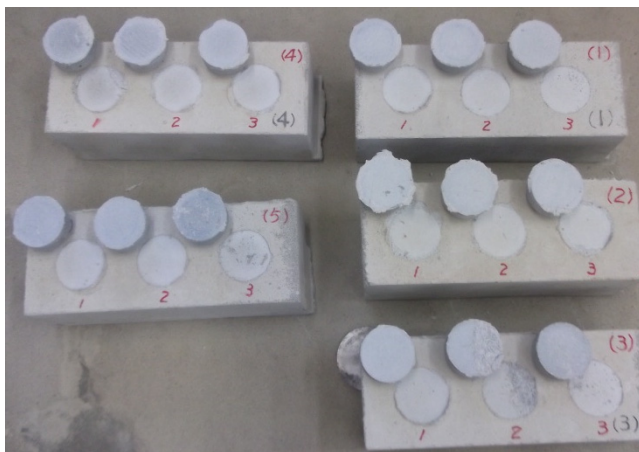
岩石面：接着界面での剥離破壊



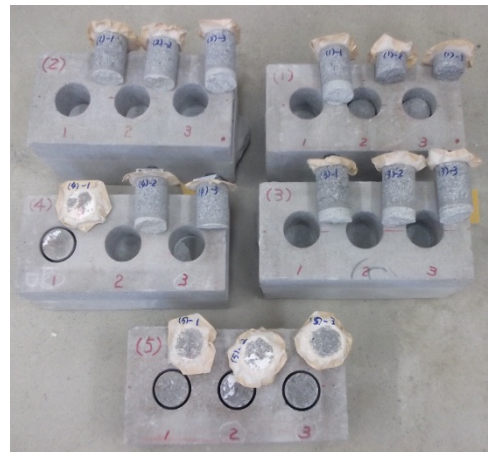
コンクリート面：基盤コンクリートまたは吹付けモルタルの破壊

写真 4.13 供試体破壊状況（乾湿前）

積変化が生じ、接着界面で基盤とのせん断ひずみが増大したためと考えられる。岩石面の場合では、乾湿繰返し前と同様にすべて接着界面の剥離破壊であり、N配合の強度に対して、BおよびB+Vの強度は約2倍で、Vよりも大きな値を示した。コンクリート面の場合では、乾湿繰返し前と同様に基盤コンクリートか吹付けモルタルの破壊となり、岩石面の場合と同様にB+VおよびB+FAの強度は他の配合よりも大きな値であった。これは、乾湿繰返しの湿潤期間中に吸水した竹



岩石面：接着界面での剥離破壊



コンクリート面：基盤コンクリートまたは吹付けモルタルの破壊

写真 4.14 供試体破壊状況（乾湿後）



繊維が乾燥状態におかれたモルタルの内部から徐々に水分を補給することで乾燥収縮ひずみを抑制<sup>45)</sup>していることが原因と考えられる。写真 4.14 に供試体の破壊状況を示す。

岩石面について、第 3 章の室内実験の接着強度（図 3.8，第 3 章参照）と比較すると、乾湿繰返し前および乾湿繰返し後とも B+V の接着強度が最も大きい点、乾湿繰返し後における B と V の接着強度が N よりも大きな値を示している点が共通している。つまり、竹繊維の内部養生効果により乾湿繰返し作用時の乾燥収縮ひずみが抑制されたこと、接着界面付近のビニロン繊維とモルタルおよび岩石とのケミカル結合により乾湿繰返しに対する抵抗性が向上したこと、などが考えられ、B+V はこれらの相乗効果によって乾湿繰返し後の接着強度が最も大きくなったものと考えられる。なお、乾湿繰返し前における B の接着強度が、第 3 章の室内実験とは異なり N よりも大きな値とはならなかった理由として、図 4.7 に示したように乾湿繰返し前における N と B の圧縮強度が同程度であったため、接着強度についても N と B はほぼ同程度になったものと考えられる。これらのことから、竹繊維単独または竹繊維とビニロン繊維の複合繊維を混入することで、乾湿繰返しを受ける吹付けモルタルの岩石面との接着力が向上すると考えられる。

#### 4.3.6 曲げ強度および曲げじん性

材齢 28 日における曲げ強度の測定結果と曲げ載荷時の曲げ荷重—中央変位曲線をそれぞれ図 4.10 および図 4.11 に示す。また、図 4.11 の曲線と横軸の囲む面積を曲げタフネスと定義し、図 4.10 に併せて示した。

図 4.11 によると、N 配合は曲げひび割れ発生と同時に破壊するので中央変位はほぼ 0 だが、繊維混入配合の場合には、曲げ荷重の最大値以降、荷重低下とともに中央変位が増大している。図 4.10 に示したように、最も曲げタフネスが大きい配合はビニロン繊維を単独使用した V で、変位の増大とともに複数のひび割れ開口に抵抗する強い架橋効果が発現され、荷重—中央変位曲線に 2 つのピークが見られる。竹繊維を用いた配合は、ひび割れに架橋した竹繊維が変位とともに引抜けや破断をする場合が多く、V 配合で見られた 2 つ目のピークが見られず、最大荷重のピーク後、変位の増大とともにゆるやかに荷重が低下している。図 4.10 の曲げタフネスは、N, B および B+FA, B+V, V の順に増加している。これは繊維本数と繊維引抜き付着強度に大きく影響しているものと考えられる。繊維の混入

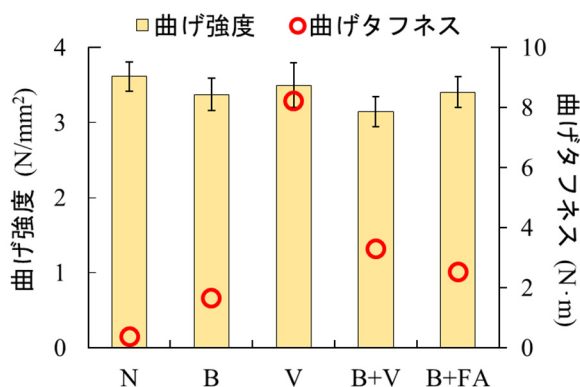


図 4.10 曲げ強度および曲げタフネス

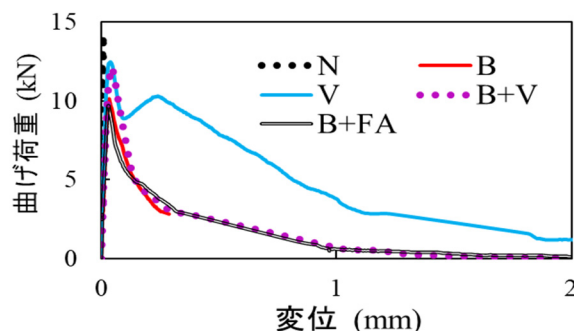


図 4.11 曲げ荷重—中央変位曲線

量はすべて 0.75vol.%としているため、繊維径が細いビニロン繊維を単独配合した V が最も繊維本数が多くなり、竹繊維単独配合の約 10 倍の本数となる。また、図 2.9 (第 2 章参照) よりビニロン繊維は竹繊維の約 2.5 倍の引抜き付着強度があることから、架橋効果が得られやすいものと推定される。以上より、竹繊維単独ではビニロン繊維と同程度の曲げタフネスを得ることは困難であるが、竹繊維とビニロン繊維の複合繊維として混入配合することやフライアッシュと併用してモルタル強度を増加 (図 4.6) させ竹繊維の引抜き付着強度を向上させることである程度の曲げじん性向上が可能となるものと考えられる。

#### 4.3.7 凍結融解抵抗性

図 4.12 に凍結融解試験結果の質量減少率と相対動弾性係数を示す。また、写真 4.15 に供試体の外観を示す。図 4.12 によれば、N, V, B+V の 3 配合は 200 サイクルまでに相対動弾性係数が急激に低下した。このような低下は、円柱供試体隅角部の剥離破壊に伴って進行しており、吹付け時に生じた部分的な砂スジからひび割れが進展して剥離破壊に至ったものと考えられる。一方、竹繊維を混入した B と B+FA については、

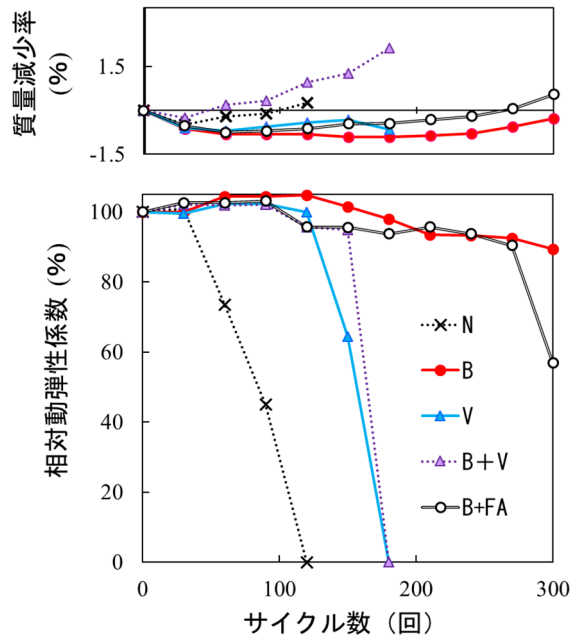


図 4.12 凍結融解試験における質量減少率および相対動弾性係数

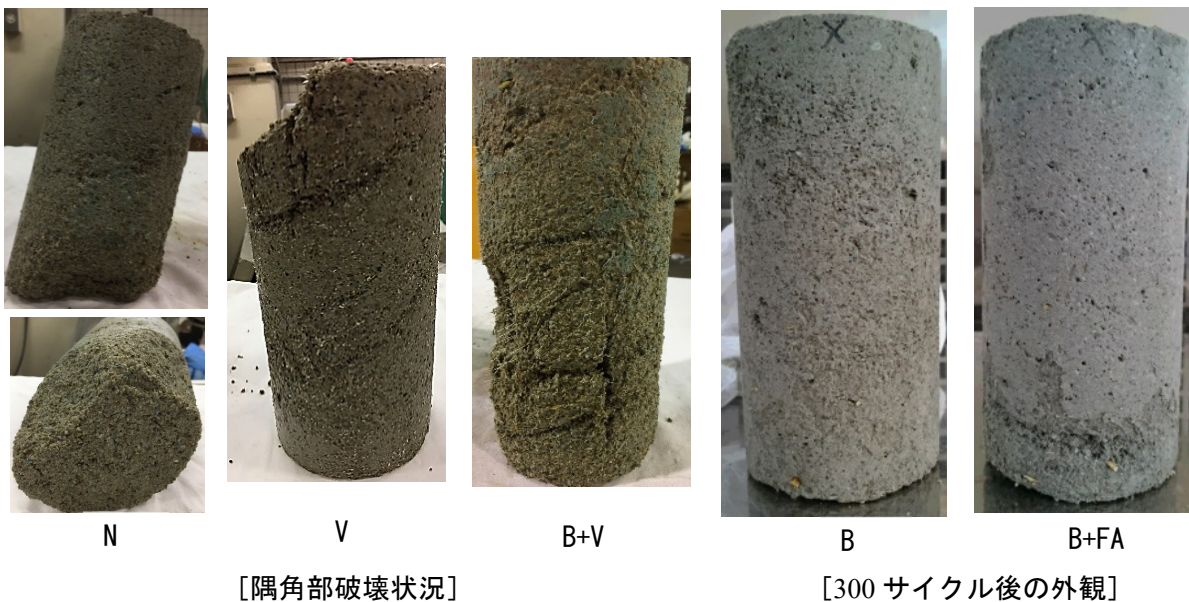
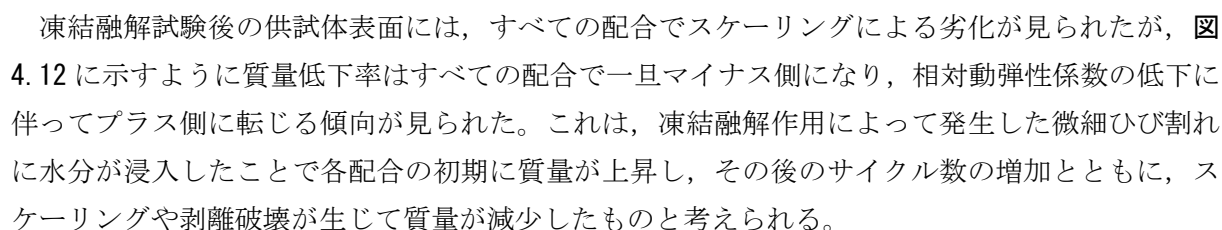


写真 4.15 各供試体の外観

砂スジはあるものの相対動弾性係数はゆるやかな低下を示し、300 サイクルではそれぞれ 89%と 57%であった。

凍結融解試験後の供試体表面には、すべての配合でスケーリングによる劣化が見られたが、 4.12 に示すように質量低下率はすべての配合で一旦マイナス側になり、相対動弾性係数の低下に伴ってプラス側に転じる傾向が見られた。これは、凍結融解作用によって発生した微細ひび割れに水分が浸入したことで各配合の初期に質量が上昇し、その後のサイクル数の増加とともに、スケーリングや剥離破壊が生じて質量が減少したものと考えられる。

吹付けコンクリートに関する既往の研究<sup>20)</sup>では、吹付け施工時の圧力によって凍結融解抵抗性に有用な気泡の消失が生じることや、気泡消失対策を行った上で、ビニロン繊維を混入した吹付けコンクリートでは、繊維によって微細クラックが抑制され、相対動弾性係数の低下はほとんどなかったこと等が報告されている。本実験では、特に吹付け圧力による気泡消失対策を行っていないため、ビニロン繊維を混入した V、B+V の配合は、凍結融解抵抗性が小さかったものと考えられる。

これに対して竹繊維混入配合の場合には、竹繊維の柔細胞内に残留した気泡が凍結時の膨張圧力を吸収緩和することで、竹繊維を混入した B や B+FA の配合の凍結融解抵抗性が向上したものと考えられる。

## 第5章 竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルの試験施工による実用性評価

### 5.1 はじめに

竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルの実用化を図るため、岩盤地山の法面を対象とした吹付けモルタルの試験施工を実施し、施工性および法面に吹付けたモルタルの力学特性を評価するものとした。

試験施工のモルタル配合について検討するに当たり、第3章の室内実験および第4章の吹付け実験から、竹繊維を単独混入した場合、竹繊維とビニロン繊維の複合繊維を混入した場合、竹繊維に加えてフライアッシュを併用して混入した場合、の3ケースの竹繊維混入配合について、特徴的な効果を整理すると次のようになる。

#### (1) 竹繊維を単独混入した場合

- ① 乾湿繰返しにより圧縮強度が低下するリスクがある。
- ② 普通モルタルよりも曲げじん性がやや向上する。
- ③ 普通モルタルよりも基盤面との接着強度がやや向上する。
- ④ 普通モルタルよりも凍結融解抵抗性が大きく向上する。

#### (2) 竹繊維とビニロン繊維の複合繊維を混入した場合

- ① 乾湿繰返しによる圧縮強度低下のリスクは少ない。
- ② 竹繊維単独混入よりも曲げじん性が向上する。
- ③ 竹繊維単独混入よりも基盤面との接着強度が向上する。
- ④ 凍結融解抵抗性の向上は期待できない。

#### (3) 竹繊維に加えてフライアッシュを併用して混入した場合

- ① 乾湿繰返しによる圧縮強度低下のリスクは少ない。
- ② 竹繊維単独混入よりも曲げじん性が向上する。
- ③ 竹繊維単独混入よりも基盤面との接着強度が向上する。ただし、岩石面は確認を要する。
- ④ 普通モルタルよりも凍結融解抵抗性が大きく向上する。

以上の効果を踏まえると、竹繊維とビニロン繊維の複合繊維 (B+V) や竹繊維とフライアッシュを併用して混入する (B+FA) ことで、竹繊維単独混入の場合の乾湿繰返しによる長期圧縮強度の低下リスクを補いつつ、力学特性や耐久性の向上が期待できる。そのため、普通モルタル (N) とこれらの2ケースについて試験施工を実施し、その性能を評価した。

### 5.2 実験概要

#### 5.2.1 使用繊維

試験施工で用いた竹繊維は、第3章の室内実験、第4章の吹付け実験と同様に3～5年の孟宗竹（兵庫県淡路市産）を特殊回転刃物により、表面から切削する方法で繊維化したものを、1.2～5.0 mm のふるいを用いて分級後、繊維長が  $L=20\pm 10$  mm となるように調整したものとした。作製

した竹繊維は、約 3 週間室内で自然乾燥して気乾状態としたものを実験に使用した。また、竹繊維と混合使用する繊維として、市販品のモルタル添加用ビニロン繊維を使用した。

## 5.2.2 試験施工

### (1) 吹付け法面

試験施工は、写真 5.1 に示すように領家帯和泉層群に位置する砂岩優勢砂岩泥岩互層の岩盤地山の法面（徳島県鳴門市大麻町）を対象に実施した。本法面は採石場において岩石が採取された後の法面であり、法面は斜面勾配 60～80 度で概ね北方向に向いており（N60° E70～80° N）、地質構造は北北西から南南東の走行で北に中角度傾斜している（走行傾斜 N10° W55～42° N）。法面の岩盤は、簡易弾性波試験による層理面直行方向の弾性波速度で、砂岩 6.0km/sec 程度、泥岩 3.0km/sec 程度、シュミットロックハンマーによる推定強度で、砂岩 200～250N/mm<sup>2</sup> 程度、泥岩 10～25N/mm<sup>2</sup> 程度であり、電研式岩盤等級で砂岩が CM 級の硬岩、泥岩が D 級の軟岩と判定される。岩質としては、砂岩は硬質で新鮮な堅牢岩であり、泥岩の表面は風化やスレーキング等により褐色化、細片化が進行した脆弱岩である。風化抵抗力の弱い泥岩の周辺部には砂岩からの剥離型落石の発生が認められる。



写真 5.1 試験施工法面

試験施工は、一配合当りの吹付け面積を 5m<sup>2</sup>、吹付け厚を 80mm とし、法面の浮石除去や除草等の法面清掃を行ったのち、ラス金網（φ2.0×50×50mm）をアンカーピン（φ9×200mm）で固定し、水抜きを 1 箇所（φ50mm）設けた。吹付け箇所は、3 配合がほぼ同条件となるよう、吹付け

試験施工は、一配合当りの吹付け面積を 5m<sup>2</sup>、吹付け厚を 80mm とし、法面の浮石除去や除草等の法面清掃を行ったのち、ラス金網（φ2.0×50×50mm）をアンカーピン（φ9×200mm）で固定し、水抜きを 1 箇所（φ50mm）設けた。吹付け箇所は、3 配合がほぼ同条件となるよう、吹付け



写真 5.2 砂岩泥岩互層



写真 5.3 ラス金網設置(縦 2.0×横 2.5m)

表 5.1 モルタル配合（試験施工）

配合名	繊維種別	繊維添加率 (vol. %)		W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					C	W	S	Fiber	FA
N	—	—		53.1	420	223	1680	0	—
B+V	竹繊維	0.375	0.75	51.2		215	1680	2.89	—
	ビニロン繊維	0.375						4.07	
B+FA	竹繊維	0.75		45.0	215	1485	5.78	58	

面積内に 300～400mm 程度のやや幅が広い泥岩層を 1 層挟むように設定した(写真 5. 2, 写真 5. 3)。

(2) モルタル配合および吹付け

試験施工用モルタルの配合を表 5. 1 に示す。一般に施工されている吹付けモルタルの標準配合 C=420kg/m<sup>3</sup>, S=1680kg/m<sup>3</sup> を N とし, 第 4 章の吹付け実験と同様に N に対する繊維添加率を 0.75vol.%に統一し, N, B+V, B+FA の 3 配合について実施した。なお, B+FA 配合の細骨材代替でのフライアッシュ置換率を 4%, フライアッシュを結合材と考えた場合の W/B を 45%とした。

セメントは普通ポルトランドセメント (密度 3.15 g/cm<sup>3</sup>), 細骨材は長崎県壱岐市産海砂 (表乾密度 2.61 g/cm<sup>3</sup>, 粗粒率 2.35) を用いた。フライアッシュは JIS A 6201 で規定された II 種フライアッシュ (密度 : 2.26 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 : 3870 cm<sup>2</sup>/g, 強熱減量 : 2.6%) を使用した。

モルタル吹付け作業は実機プラントを用いて行い, 吹付け方式は湿式吹付け方式とし, プラントから吹付け法面まではマテリアルホース 40m を用いて空気搬送するものとした。繊維の偏りを防止するため, 繊維は小分けにしながらかミキサーに投入し, 1 バッチの練混ぜ時間は空練り 30 秒後 2 分間とした。写真 5. 4 に実機プラントおよび吹付け法面を, 写真 5. 5 に吹付け状況を示す。



写真 5.4 プラントおよび吹付け法面



写真 5.5 吹付け状況

### (3) 供試体作製および各種試験

JSCE-F 563-2013 に従って、5分勾配にセットした木製型枠を用いてモルタルリバウンド率を測定するための吹付けを実施した(写真5.6)。吹付けた型枠は、現地で5/18から6/15までの28日間の屋外暴露を実施した後、円柱コア供試体(φ50×80mm)3本を切り出し、圧縮強度試験(JIS A 1108)を実施した。なお、屋外暴露の間の平均気温は22.1℃、雨の日が16日間あった。また、法面に吹付けたモルタルから、材齢25日の時点で円柱コア供試体3本(φ50×80mm)を切出し(写真5.7)、材齢28日に達した時に圧縮強度試験を実施し、前述の型枠に吹付けたモルタルとの比較を行った。

型枠に吹付けたモルタルから材齢25日でコア供試体1本(φ50×80mm)を切出し、材齢28日に達した時に空隙率試験を行った。試験は、第5章の室内実験および第4章の吹付け実験と同様に、供試体を80℃の乾燥炉で24時間乾燥した後の質量(Wd)と20℃の水中に48時間浸漬した後の表乾質量(Ws)からモルタル空隙率を求めた(式(3.1), 第3章参照)

法面に吹付けたモルタルに対して、材齢25日時点で地山までの切込みφ50mmを2箇所設け(写真5.7)、材齢28日に達した時に、建研式接着強度試験装置を用いた接着強度試験(JSCE-K 561-2013)を実施した。

また、材齢25日時点でコア供試体の切出し前に、法面に吹付けたモルタルのひび割れ、浮き等の観察を行った。

## 5.3 実験結果と考察

### 5.3.1 リバウンド率と施工性

#### (1) リバウンド率

モルタル吹付け時のリバウンド率の測定結果を第4章の吹付け実験結果と合わせて図5.1に



写真 5.6 リバウンド試験



写真 5.7 圧縮強度試験用供試体切出し・接着強度試験用φ50mm切込み

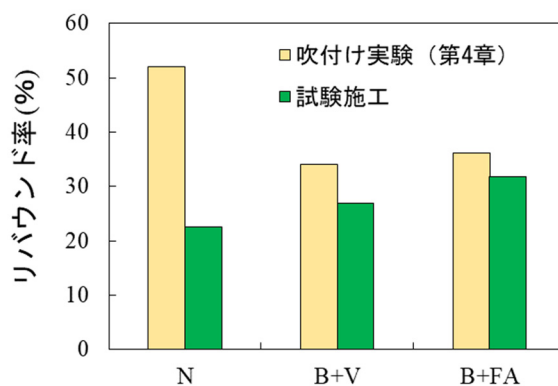


図 5.1 リバウンド率

示す。図 5.1 によると、試験施工のリバウンド率は全体的に吹付け実験のリバウンド率よりも低下しており、N 配合では 1/2 程度になっている。これは、吹付け実験では細骨材に砕砂（粗粒率 2.78）を用いたが、試験施工ではやや細めの海砂（粗粒率 2.35）を用いたことで、モルタルの粘性向上や吹付け時の型枠への衝撃が抑制され、リバウンドが減少したものと考えられる。一方で、試験施工では、B+V、B+FA は、N よりもそれぞれ約 4%、約 9%増加している。これは、第 4 章の吹付け実験では W/B=55%および C を固定値とし、残りの S で 1m<sup>3</sup>に調整したものを標準配合 N としたが、試験施工では広く示方配合に用いられている仕様に沿って C および S を固定値とし、残りの W で 1m<sup>3</sup>に調整する配合を N としたため、N の W/B が第 4 章の吹付け実験よりも約 2%低下していること、B+V では混入した繊維量に相当する水量（約 2%）が N よりも少ないこと、B+FA では W/B が 45%と N よりも水量が約 8%少ないこと、また使用した細骨材が粗粒率 2.35 と指針<sup>14)</sup>等で推奨されている範囲（2.5~3.1）よりも細いものであったため細骨材全体の表面積が比較的大きくなること、などが水量不足につながる要因となり、均一な練混ぜとならずに材料分離の傾向が高まった可能性が考えられる。

## (2) 施工性

試験施工における法面への吹付け作業の施工性については、N 配合ではスムーズに連続してモルタルが吐出されたが、B+V および B+FA ではマテリアルホースの詰まりが発生した。詰まりはリバウンド率が高かった B+FA が B+V よりも多く発生し、詰まり解消作業の間は吹付け作業の中断が生じた。

モルタル 1 バッチの練混ぜ時間は、N 配合については一般に行われている 1 分間とし、繊維を混入した B+V と B+FA については空練り 30 秒後 2 分間として、各配合 5 バッチの吹付け作業を連続して行ったところ、N についてはスムーズな連続作業となったが、B+V と B+FA については 1 バッチの吹付け作業が練混ぜ時間よりも早く終了するため、1 バッチごとに吹付け作業に 30 秒程度の待ち時間が生じた。

以上のリバウンド率および施工性の結果から、繊維混入配合の W/B については、第 4 章の型枠への吹付け実験で一定の実績が得られた値（55%）を基本に修正を行い、品質を確保した上で練混ぜ時間短縮の可能性を検討する必要があると考える。

### 5.3.2 空隙率

型枠に吹付けたモルタルから円柱コア供試体（φ50×80mm）を切出し、材齢 28 日時点でモルタル空隙率を測定した結果を、第 4 章の吹付け実験での空隙率（材齢 256 日）と合わせて図 5.2 に示す。

図 5.2 によると、各配合とも試験施工の空隙率が吹付け実験よりも大きい値となっている。これは、W/B や使用した細骨材の違いが影響しているものと考え

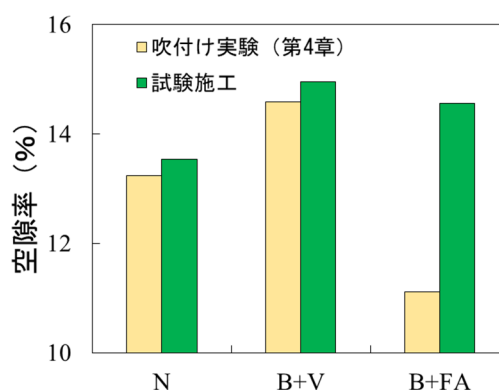


図 5.2 試験施工と吹付け実験の空隙率



られる。また、B+FA の空隙率が試験施工と吹付け実験との間に比較的大きな差が生じた理由としては、試験施工の供試体材齢は 28 日であるが、吹付け実験の供試体は 256 日と長い材齢であるため、フライアッシュのポズラン反応が進行してモルタルの緻密化が進み空隙が減少したためと考えられる。

### 5.3.3 圧縮強度

材齢 28 日における法面に吹付けたモルタルおよび型枠に吹付けたモルタルの圧縮強度を図 5.3 に示す。図 5.3 より、N 配合については法面に吹付けたモルタルと型枠に吹付けたモルタルの圧縮強度、単位容積質量とも同程度であるが、B+V および B+FA については、法面に吹付けたモルタルの圧縮強度は、それぞれ型枠に吹付けたモルタルの約 2/3、約 1/4 であり、単位容積質量も共に法面に吹付けたモルタルの値の方が小さい。これは、型枠に吹付けた面積が 0.1m<sup>2</sup> 程度と微小な面積であるため材料分離による影響が少なく、吹付け作業の中断もなかったためと考えられるが、法面の吹付け面積は 5m<sup>2</sup> とある程度の面積があり、実施工と同様にモルタル 1 バッチの練混ぜを繰返しながら吹付け作業を行うので、材料分離の影響が表面化しやすく、マテリアルホースの詰まりや詰まり解消のための吹付け作業の中断によって、モルタル品質の低下につながったと考えられる。写真 5.8 に法面に吹付けたモルタル供試体の外観を示す。B+V についてはモルタル内部に空隙が見られ、B+FA については 3 供試体ともに材料分離が層状に見られる。これらは、空気搬送や吹付け作業時における材料分離や作業中断による重ね吹きの影響などにより生じたものと考えられる。

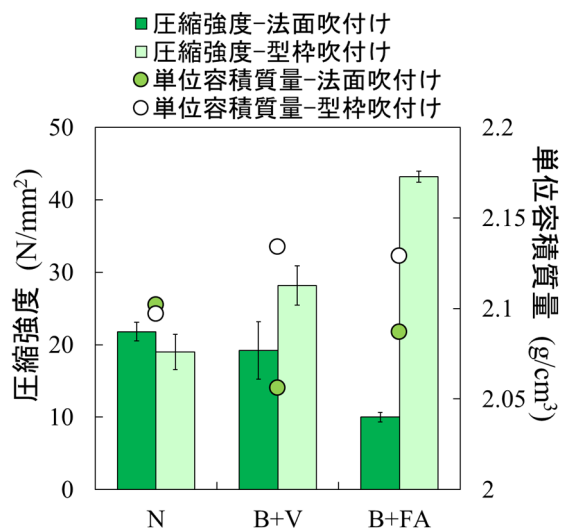


図 5.3 法面吹付けモルタルと型枠吹付けモルタルの圧縮強度および単位容積質量

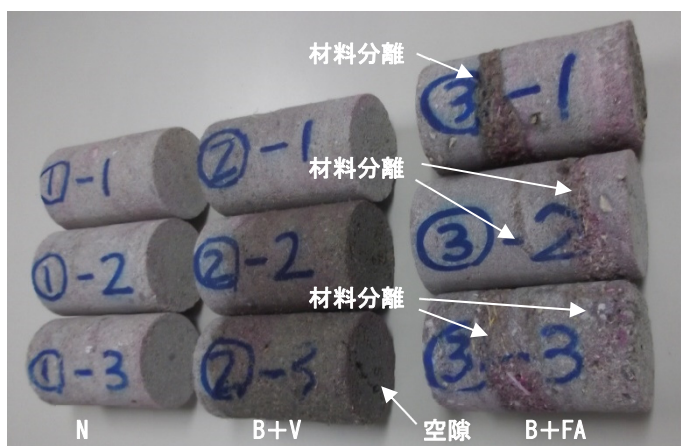


写真 5.8 法面吹付けモルタル供試体の外観

### 5.3.4 法面地山との接着強度

砂岩部の法面に吹付けたモルタルについて、材齢 25 日時点で φ50mm の切込みを行い、材齢 28 日に達した時に地山との接着強度を測定した結果を図 5.4 に示す。また、写真 5.9 に供試体の破

壊状況を示す。図 5.4 によれば、接着強度は全体的に  $0.1\sim 0.2\text{N/mm}^2$  程度と第 4 章の吹付け実験で行った岩石片（砂岩）との接着強度（約  $1.0\text{N/mm}^2$ ）よりも非常に小さな値となった。これは、現地に砂岩の剥離型落石が多く発生していることから明らかなように（写真 5.10）、風化した泥岩部に比べて砂岩部は全体的には堅牢であるものの、砂岩部にも層理、節理等の大小の亀裂があり、表層部はある程度の衝撃で剥離しやすい状況にあることが推察される。そのため、試験に先立ち実施した  $\phi 50\text{mm}$  コアビットによる地山切込みの際、穿孔時の衝撃や穿孔後の周囲の岩盤との一体性の喪失によって、接着強度試験では岩石内部に潜在した亀裂から剥離破壊したものと考えられる。つまり、本試験の強度は岩石の引張強度に支配されたものであり、モルタルと地山との界面の接着強度は明らかにはできていない。

なお、泥岩部ではモルタルとの接着状況が悪く、吹付けたモルタルを  $\phi 50\text{mm}$  で穿孔後地山への切込みを行う際に界面付近から剥離する現象が多発したため、泥岩との接着強度試験については断念した。これは、泥岩の表層が風化やスレーキングによって細片化が進行しており、コアビットによる切込みによって脆弱部から剥離したものと考えられる（写真 5.11）。この現象は、吹付けコンクリートの背面地山の風化によって吹付けコンクリートと地山の接着力が低下することを報告した松山らの研究<sup>16)</sup>とも関連し、地山

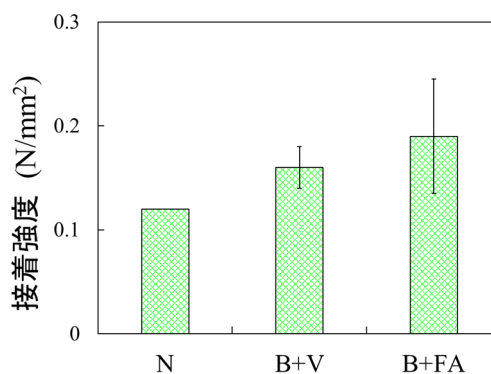


図 5.4 法面（砂岩部）との接着強度



写真 5.9 砂岩剥離破壊 (B+FA)



写真 5.10 現地砂岩落石状況



写真 5.11 泥岩部への切込み時に剥離した供試体 (N)

が吹付け前の状態で風化していても（本研究）、吹付け後に風化したとしても（松山らの研究）、地山とモルタルとの接着力は共に低下すると考えられる。

### 5.3.5 ひび割れ等の変状観察

地山に吹付けたモルタルの材齢 25 日時点のひび割れ、浮き等の観察を行った結果、N 配合については、特段の変状は見られなかったが、B+V に 2 本、B+FA に 1 本のひび割れが確認された（写真 5.12）。いずれも吹付け面の比較的端部で水平方向に発生しており、B+V では幅 1.0mm で長さ 0.4m のものと幅 0.4mm で長さ 0.2m のものがあり、B+FA では幅 0.3mm で長さ 0.5m のものがあった。これらのひび割れは、マテリアルホースの詰まり解消後に重ね吹きを行った箇所が十分に一体化しなかったこと、練混ぜ時の水量不足により材料分離したモルタルがひび割れ抵抗性を低下させたこと、等により暴露期間中の乾燥収縮によって発生したものと考えられる。

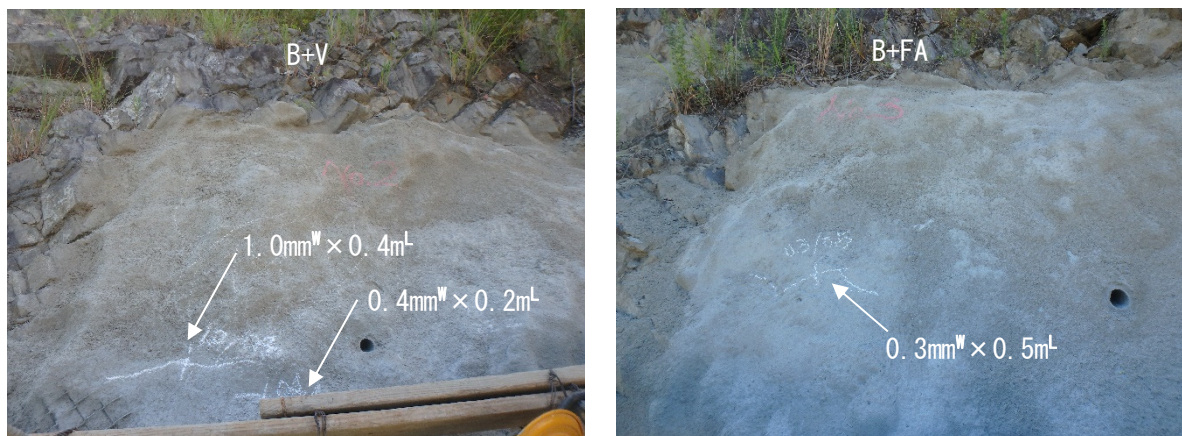


写真 5.12 法面吹付けモルタルひび割れ状況

## 第6章 竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルのライフサイクルアセスメント

### 6.1 はじめに

天然材料である竹を繊維化して法面保護用吹付けモルタルの補強材として用いることで、放置された竹林が有効利用されることとなる。また、既往の繊維は比較的大規模な設備によって製造された製品であるが、竹繊維は天然材料そのままを原料とし、小規模な設備によって製造され、密度も小さくて軽いという特徴がある。そのため、環境負荷低減にも寄与することが期待されることから、ライフサイクルアセスメント（以下、LCA）の手法によってCO<sub>2</sub>削減効果を定量的に評価して、合成繊維との比較を行うものとする。

### 6.2 LCAの手法

LCAは国際規格ISO14040に準じて行うものとし、調査範囲の設定、インベントリ分析、環境影響評価の順で実施した。

### 6.3 調査範囲の設定

竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルと既往繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルについてLCA比較を行うものとし、繊維以外の吹付けモルタルの材料や施工にかかわる部分については、同条件のため調査範囲の対象外とした。また、繊維材料を吹付けモルタルに混入することで吹付けモルタルの耐久性が向上する可能性があるが、現地の地質や気象等の環境条件により異なるものでもあるため、ここでは耐用期間については調査範囲の対象外とした。また、法面保護工としての耐用期間終了後に撤去した吹付けモルタルのリサイクルにかかる範囲についても調査範囲の対象外とした。その理由としては、モルタル・コンクリートの主なリサイクル先として舗装の路盤材があげられるが、鋼繊維については、強度が高く鋭利であり腐食もするため、道路の維持管理上や施工時における作業員の安全性に問題があり、路盤材には適していない。一方、竹繊維や合成繊維については、鋼繊維のような問題がないので、路盤材にリサイクルしても支障はないものと考えられる。このことから、リサイクルに関しては、竹繊維は鋼繊維に対しては有利であるものの、合成繊維に対しては同等と考えられるため、竹繊維と比較する既往繊維を合成繊維とし、リサイクルにかかる範囲を対象外とした。

以上から、ここでは竹繊維と合成繊維の短繊維補強材にかかる部分のみを対象とし、これらに関する原料、製造、運搬に係わる過程を調査範囲とした。

### 6.4 システム境界および機能単位

LCAを行うためには、製品のライフサイクルに関して検討するプロセスをシステム境界によって明らかにする必要がある。ここで検討を行う竹繊維と合成繊維（ビニロン繊維）のLCAデータ分析の対象とするシステム境界を図6.1、図6.2に示す。竹繊維のシステム境界は、図6.1に

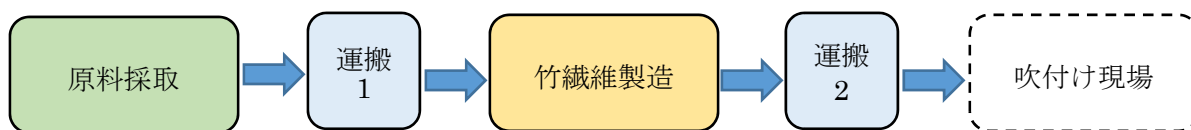


図 6.1 竹繊維 LCA システム境界



図 6.2 合成繊維 LCA システム境界

示すように、竹繊維原料となる竹材を竹林で伐採し採取するプロセス（原料採取）から、竹繊維製造所まで竹材を運搬するプロセス（運搬 1）、竹繊維製造所において竹繊維を製造するプロセス（竹繊維製造）、製造された竹繊維を吹付け現場まで運搬するプロセス（運搬 2）を対象とし、各プロセスにおける環境負荷量を算出して積上げるものとした。ビニロン繊維のシステム境界は、図 6.2 に示すように、公開されている LCA 用の環境負荷原単位データベースを利用して原料採取から合成繊維製造にかかわる環境負荷量を算出するものとし、その合成繊維製造プロセスと製造された合成繊維を製造所から吹付け現場まで運搬するプロセスを対象とした。

また、LCA を行う上での基準となる機能単位は、吹付けモルタルの施工面積 1000m<sup>2</sup> 当りとし、吹付け厚みを 8cm、竹繊維およびビニロン繊維の混入量を 0.75vol.%, リバウンド等による材料ロス率を 27%として算出した。

## 6.5 竹繊維のインベントリ分析

インベントリ分析では、製品のライフサイクルにおいて投入される資源および環境へ排出される物質の定量を行う。製品のライフサイクルにおいて関連するプロセスを調査し、各プロセスにおける原料およびエネルギーの消費量と環境への物質の排出量に関するデータを収集する。それらの収集したデータを積み上げて解析することにより、製品のライフサイクルにおいて投入される資源および環境へ排出される物質量を算出する。

データの収集は、各プロセスの所有者からプロセスの入出力に関するデータを直接収集すると品質、信頼性ともに高くなるが、対象とする製品が複雑で、検討する環境負荷物質の種類が多くなるに従い、データ収集にかかる時間が膨大となる。そこで、可能な範囲で自社および製造サイトからデータを直接収集し、その他のプロセスに関しては、公開されているインベントリデータ（環境負荷原単位データベース）を利用して LCA を実施するものとした<sup>48)</sup>。

### 6.5.1 原料採取

竹繊維は天然材料であることから、竹繊維の使用量が増加していくに伴い放置竹林が管理されることとなる。そのため、放置状態の竹林では炭素の吸収は停滞するが、管理竹林となることで、

炭素の吸収が促進されると考えられる。その差分の炭素吸収量を換算し、原料の採取プロセスにおける CO<sub>2</sub> 吸収量として算出するものとした。

(1) 竹繊維使用による竹林の CO<sub>2</sub> 吸収量の増加

既往の研究<sup>49)</sup>より、竹林バイオマスの全国平均は 245.8±149.3 t/ha であり、竹林のバイオマス炭素吸収量は、単位面積当たりの竹林バイオマスに、竹林の面積を掛け合わせ、さらに炭素含有率をかけることで推定できる。また、放置竹林のバイオマスのほうが管理竹林よりも大きいと報告されているので、管理竹林のバイオマスを下限値の 245.8-149.3 t/ha とし、放置竹林のバイオマスを上限値の 245.8+149.3 t/ha とした。また、地上部バイオマスは全体量の 7 割とした。また、竹は外観的には 1 年で親竹に成長し、2~3 年で細胞内の多層化が進んだ後、20 年程度で寿命を終えると考えられている。そこで、ここでは 3 年ものの竹を用いるものとした。また、本研究で用いる竹繊維は特殊回転刃物により竹の表面から切削する方法にて製造するものとした。この製造方法では、地上部バイオマスのうち繊維化が可能なものは 45%程度であり、さらに吹付けモルタルに使用できる繊維長 20±10mm のものはその 35%程度であった。なお、使用できない竹繊維も堆肥や土壌改良材などに利用できることから、廃棄による環境負荷はないものとした。炭素含有率については、立竹を伐採後に繊維化した竹繊維の含水率が 61.8%であったことから、乾物成分を 38.2%、乾物成分中の炭素含有率 0.5 t-C/t-dm<sup>50)</sup>として、式(6.1)により竹繊維を使用することによる竹林の CO<sub>2</sub> 吸収増加量を算出した。なお、吹付けモルタルに混入する竹繊維量は、0.75 vol.% (気乾状態 5.78 kg/m<sup>3</sup>) とした。

$$A=B \times a \tag{式(6.1)}$$

ただし、 $B=C/b$ ,  $C=D \times E$ ,  $D=(F-G) \times c$ ,  $E=I/(H \times c \times g \times h)$

$$F=H \times (b/3-1), G=d \times f, H=e \times f, I=i \times (1000/j) \times (1+k) \times m/n$$

ここに、A : 1 年間当りの吹付けモルタル 1000m<sup>2</sup> 当りの竹林の CO<sub>2</sub> 吸収増加量 (t-CO<sub>2</sub>/年)

B : 1 年間当りの吹付けモルタル 1000 m<sup>2</sup> 当りの竹林の C 吸収増加量 (t-C/年)

C : 吹付けモルタル 1000 m<sup>2</sup> 当りの竹林の炭素増加量 (t-C)

D : 1ha 当りの放置竹林から管理竹林に転換時の炭素増加量 (t-C/ha)

E : I を得るために必要な管理竹林面積 (ha)

F : 1ha 当りの放置竹林から管理竹林に転換時の地上部バイオマスの増加量 (t/ha)

G : 1ha 当りの放置竹林の地上部バイオマス量 (t/ha)

H : 1ha 当りの管理竹林の地上部バイオマス量 (t/ha)

I : 吹付けモルタル 1000 m<sup>2</sup> 当りの絶乾状態の竹繊維量 (bone dry-t)

a : 炭素量を二酸化炭素量に換算する係数 (44 / 12)

b : 竹の寿命年 (20 年)

c : 地上部バイオマスの炭素含有率 (0.382×0.5)

d : 1ha 当りの放置竹林のバイオマス量 (245.8+149.3 t/ha)

- e : 1ha 当りの管理竹林の地上部バイオマス量 (245.8–149.3 t/ha)
- f : 地上部バイオマス比率 (0.7)
- g : 地上部バイオマスの繊維化可能率 (0.45)
- h : 繊維化されたもののうち吹付けモルタルに利用できる比率 (0.35)
- i : 吹付けモルタル 1m<sup>3</sup> 当りの竹繊維混入量 (5.78kg/m<sup>3</sup>)
- j : 吹付けモルタル 1m<sup>3</sup> で吹付け厚 8cm が施工可能な面積
- k : 吹付け施工時のロス率 (0.27)
- m : 竹繊維の絶乾密度 (0.68 g/cm<sup>3</sup>)
- n : 竹繊維の気乾密度 (0.77 g/cm<sup>3</sup>)

## (2) 竹繊維の原料採取

竹繊維の原料採取のプロセスを図 6.3 に示す。



図 6.3 竹繊維原料採取プロセス

竹伐倒プロセスは、一般のチェーンソーよりも刃数の多い竹用チェーンソー1 台で行うものとし、集材プロセスは、枝葉がついたままでも集材が可能なように最大牽引能力 10kN のポータブルウィンチ 1 台で行うものとした(写真 6.1)。玉切り、枝払いプロセスは、チェーンソーで行う場合にはキックバックが発生しやすく危険な作業となるため、ノコ、ナタを使用した人力作業とした。また、林内小運搬プロセスでは、軽トラックでも運搬が可能な車幅 1m 程度、最大積載重量 500kg の小型のクローラ式運搬車(写真 6.2)を用いて竹林内から公道まで小運搬するものとした。

既往の研究<sup>51)</sup>を参考に、小運搬する 1 回当りの積載重量を 500kg とし、1 日当り 4 回運搬して 2.0wet-t の原料を採取するものとした。また、伐倒に 1 時間、集材に 30 分、小運搬に 30 分を 1 サ



写真 6.1 ポータブルウィンチによる集材の例<sup>51)</sup>



写真 6.2 クローラ運搬の例<sup>51)</sup>

イクルとし、1日8時間当り4サイクルとして、使用機械の稼働時間を設定した。

実際に使用する燃料はガソリンとオイルの混合燃料（50：1）等であるが、計算上ガソリン燃料に統一して燃料消費量を算出した。また、チェーンソーの機関出力は、建設機械等損料算定表（日本建設機械化協会）から引用し、その他はカタログ値を使用するものとした。燃料消費率は、建設機械燃料等消費量の積算（大阪市建設局）から引用し、クローラ運搬車については同積算に該当する機械がないため類似のクローラ式トラクタのものを使用した。

また、ガソリンの1ℓ当りのCO<sub>2</sub>排出量を2.32（kg-CO<sub>2</sub>/ℓ）として、チェーンソー、ポータブルウィンチ、クローラ運搬車について、それぞれ1日当りの作業におけるCO<sub>2</sub>排出量を式(6.2)により算出し、それらを集計したものを竹繊維原料採取1日当りに係わるCO<sub>2</sub>排出量とした。

$$J = \Sigma (p \times q \times r \times s \times t) \quad \text{式(6.2)}$$

ここに、J：竹繊維原料採取1日当り（2.0 wet-t）に係わるCO<sub>2</sub>排出量（kg-CO<sub>2</sub>）

p：ガソリン1ℓ当りのCO<sub>2</sub>排出量（2.32 kg-CO<sub>2</sub>/ℓ）

q：機械台数、r：機械稼働時間（h/日）、s：機関出力（kW）、t：燃料消費率（ℓ/kW-h）

式(2.2)の竹繊維の原料採取に係わる1日当りのCO<sub>2</sub>排出量を基に、吹付けモルタルに竹繊維を0.75vol.%（気乾状態 5.78kg/m<sup>3</sup>）混入した時の吹付けモルタル1000m<sup>2</sup>当りに使用する竹繊維量に対して、その原料採取に係わるCO<sub>2</sub>排出量を式(6.3)より算出した。

$$K = J \times L / u \quad \text{式(6.3)}$$

ここで、 $L = (I / (g \times h)) \times v / m$

ここに、K：吹付けモルタル1000m<sup>2</sup>当りの竹繊維原料採取に係わるCO<sub>2</sub>排出量（kg-CO<sub>2</sub>）

J：竹繊維原料採取1日当り（2.0 wet-t）に係わるCO<sub>2</sub>排出量（kg-CO<sub>2</sub>）：式(2.2)

L：吹付けモルタル1000m<sup>2</sup>当りの自然状態の竹繊維量（wet-t）

I：吹付けモルタル1000 m<sup>2</sup>当りの絶乾状態の竹繊維量（bone dry-t）

u：1日当りの竹繊維原料採取量（2.0 wet-t）

g：地上部バイオマスの繊維化可能率（0.45）

h：繊維化されたもののうち吹付けモルタルに利用できる比率（0.35）

v：自然状態の含水率61.8%の時の自然密度（1.1 g/cm<sup>3</sup>）

m：竹繊維の絶乾密度（0.68 g/cm<sup>3</sup>）

## 6.5.2 竹繊維製造

一般的な竹繊維の抽出法としては、機械式せん断法、アルカリ処理法、爆砕法などがあり<sup>52)</sup>、





写真 6.3 自動竹繊維作成装置

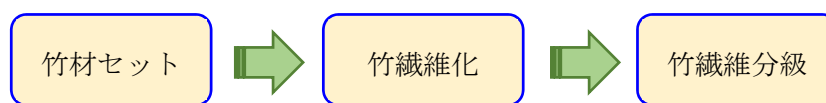


図 6.4 竹繊維製造プロセス

マイクロファイバーやナノファイバーの抽出法には、加圧または常圧の加熱水蒸気処理後に機械的粉砕を行うもの、爆砕処理とアルカリ処理をあわせたもの、水中カウンターコリジョン法や水中対向衝突法などがある。法面保護用吹付けモルタルに使用する竹繊維は、太さ 0.5mm 程度、長さ 20mm 程度のものなので、経済性に優れる機械式せん断法により抽出するものとし、写真 6.3 に示す自動竹繊維作成装置を用いるものとした。この設備は、長さ 2m 程度にカットした竹材を丸竹のまま機械にセットし、特殊回転刃によって竹の外側から連続して切削することで竹を繊維化するものであり、竹材 1 本の繊維化が終了すると自動で次の竹材が送り込まれる装置である。

表 6.1 竹繊維製造速度

回転刃等 機関出力	モーター 一台数	生竹の繊維化速度
200V 1.5kW	1	0.918 wet-kg / min
200V 0.4KW	1	

竹繊維の製造に関するプロセスを図 6.4 に示す。図 6.4 のプロセスのうち、竹材セットおよび竹繊維分級については人力で行うものとし、竹繊維化のプロセスの CO<sub>2</sub> 排出量を求めるものとした。なお、竹繊維製造拠点は兵庫県淡路市とした。また、自動竹繊維作成装置により生竹から竹繊維が製造される速度を調査した結果を表 6.1 に示す。回転刃などの駆動モーターの出力から算出した消費電力量を基に、環境省にて公表されている電気事業者別排出係数を参考に単位電力量当りの CO<sub>2</sub> 排出係数を 0.531 kg-CO<sub>2</sub>/kWh として、式(6.4)により吹付けモルタル 1000m<sup>2</sup> 当りに使用する竹繊維の製造に係る CO<sub>2</sub> 排出量を算出するものとした。

$$M=N \times w$$

式(6.4)

ここで、 $N = \sum(x \times O)$ ,  $O = L / y$

ここに、M:吹付けモルタル 1000m<sup>2</sup> 当りに使用する竹繊維の製造に係わる CO<sub>2</sub> 排出量 (kg-CO<sub>2</sub>)

N : 消費電力量

O : 竹繊維製造に係わるモーター駆動時間 (h)

L : 吹付けモルタル 1000m<sup>2</sup> 当りの自然状態の竹繊維量 (wet-t)

w : 単位電力量当りの CO<sub>2</sub> 排出係数 (kg-CO<sub>2</sub>/kWh)

x : 機関出力 (kW), y : 竹繊維製造速度 (wet-kg/min)

### 6.5.3 運搬

#### (1) 運搬 1 (原料)

ここでは、原料として採取した竹材を竹繊維製造場所まで公道を運搬する時の CO<sub>2</sub> 排出量を求めた。原料採取場所は、竹繊維製造拠点のある兵庫県淡路市内で、製造拠点より片道 10 km 圏内とした。運搬車両は、1 日当りの竹繊維の原料採取量 2.0 wet-t に釣り合うように、2.0t 吊クレーン装置付 2.0t 積トラックとした。なお、運転時間は平均時速 30km として往復の時間を計上した。機関出力は建設機械等損料算定表（日本建設機械化協会）から、燃料消費率は建設機械燃料等消費量の積算（大阪市建設局）から引用して、式(6.5)により吹付けモルタル 1000m<sup>2</sup> 当りの運搬 1 に係わる CO<sub>2</sub> 排出量を算出するものとした。

$$P=Q \times L \times g / u \quad \text{式(6.5)}$$

ここで、 $Q=s \times t \times z \times p$

ここに、P : 吹付けモルタル 1000m<sup>2</sup> 当りの竹材の運搬 1 に係わる CO<sub>2</sub> 排出量 (kg-CO<sub>2</sub>)

Q : 竹材 2.0wet-t 当りの運搬 1 に係わる CO<sub>2</sub> 排出量 (kg-CO<sub>2</sub>)

L : 吹付けモルタル 1000m<sup>2</sup> 当りの自然状態の竹繊維量 (wet-t)

g : 地上部バイオマスの繊維化可能率 (0.45)

u : 1 日当りの竹繊維原料採取量 (2.0 wet-t)

s : 機関出力 (kW), t : 燃料消費率 (ℓ/kW-h), z : 運転往復時間 (h)

p : ガソリン 1ℓ 当りの CO<sub>2</sub> 排出量 (2.32 kg-CO<sub>2</sub>/ℓ)

#### (2) 運搬 2 (竹繊維)

ここでは、製造した竹繊維を吹付けモルタルが施工される現場まで運搬する時の CO<sub>2</sub> 排出量を求めた。運搬起点を竹繊維製造拠点の兵庫県淡路市とし、運搬終点の施工現場を徳島県阿南市付近とし、片道運搬距離を 88 km に設定した。なお、片道運転時間は神戸淡路鳴門自動車道を利用するものとして、1.5 時間とした。また、竹繊維の荷姿の容積は、写真 6.4 に示す気乾状態の竹繊維の単位容積質量試験 (JIS A 1104) で得られた結果 (0.123kg/ℓ) を基に、かさ容積として式(6.6)により算出した。

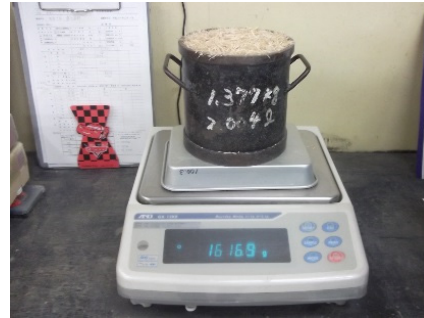


写真 6.4 竹繊維の単位容積質量試験

$$R=(I \times n / m) / \alpha \quad \text{式(6.6)}$$

ここに、R：吹付けモルタル 1000m<sup>2</sup> に用いる竹繊維のかさ容積 (m<sup>3</sup>)

I：吹付けモルタル 1000 m<sup>2</sup> 当りの絶乾状態の竹繊維量 (bone dry-t)

n：竹繊維の気乾密度 (0.77 g/cm<sup>3</sup>)， m：竹繊維の絶乾密度 (0.68 g/cm<sup>3</sup>)

α：気乾状態の竹繊維の単位容積質量 (0.123 kg/l)

式(6.6)によって算出した竹繊維の運搬量 (R=4.8 m<sup>3</sup>, 0.6t) を基に、運搬時の安全性を考慮して積み荷の高さが荷台高さの 2 倍以下 (以降, 2 段積み以下) となる運搬車両を選定するものとし、2t 吊クレーン装置付 4t 積トラックとした。なお、同トラックの荷台寸法が 2120W×5550L×400H (日野自動車) であることから平積み容積は 4.7m<sup>3</sup> となり、2 段積み以下の積載となる。また、竹繊維は一定量ごとに耐候性のある袋等に詰めて運搬することが考えられるが、ここでは、荷台の容積のみで荷姿を見積もるものとし、吹付けモルタル 1000m<sup>2</sup> 当りの運搬 2 に係わる CO<sub>2</sub> 排出量を式(6.7)により算出するものとした。

$$S=s \times t \times z \times p \quad \text{式(6.7)}$$

ここに、S：吹付けモルタル 1000m<sup>2</sup> 当りの竹繊維の運搬 2 に係わる CO<sub>2</sub> 排出量 (kg-CO<sub>2</sub>)

s：機関出力 (kW)， t：燃料消費率 (l/kW-h)， z：運転往復時間 (h)

p：ガソリン 1l 当りの CO<sub>2</sub> 排出量 (2.32 kg-CO<sub>2</sub>/l)

## 6.6 合成繊維のインベントリ分析

### 6.6.1 合成繊維製造

合成繊維は吹付けモルタル混入用として市販されているビニロン繊維 (株式会社クラレ, クラテック RFS400×18) とし、その製造拠点は岡山県岡山市とした。ビニロン繊維の原料採取から製造までの CO<sub>2</sub> 排出量については、公表されている社会資本 LCA 用の環境負荷原単位データベース 二酸化炭素排出量 2005 年版 (国土交通省国土技術政策総合研究所) の合成繊維 (部門コード

20510210) の原単位を用いるものとし、吹付けモルタル 1000m<sup>2</sup> 当りに使用するビニロン繊維の CO<sub>2</sub> 排出量を式(6.8)にて算出するものとした。なお、竹繊維と同様に吹付けモルタルに混入するビニロン繊維量を 0.75 vol.% (気乾状態 8.14kg/m<sup>3</sup>) とした。

$$T=U \times \beta \quad \text{式(6.8)}$$

ここで、 $U = \gamma \times (1000 / j) \times (1 + k)$

ここに、 $T$  : 吹付けモルタル 1000m<sup>2</sup> 当りに使用するビニロン繊維の CO<sub>2</sub> 排出量 (kg-CO<sub>2</sub>)

$U$  : 吹付けモルタル 1000m<sup>2</sup> 当りに使用するビニロン繊維量 (t)

$\beta$  : 社会資本 LCA 用 DB 合成繊維 1t 当りの CO<sub>2</sub> 排出量 (3.85E+03 kg-CO<sub>2</sub>/t)

$\gamma$  : 吹付けモルタル 1 m<sup>3</sup> 当りのビニロン繊維量 (8.14kg/m<sup>3</sup>)

$j$  : 吹付けモルタル 1m<sup>3</sup> で吹付け厚 8cm が施工可能な面積

$k$  : 吹付け施工時のロス率 (0.27)

## 6.6.2 運搬

運搬起点をビニロン繊維製造拠点のある岡山県岡山市とし、竹繊維同様に運搬終点の施工現場を徳島県阿南市付近とし、片道運搬距離を 168km に設定した。なお、片道運転時間は瀬戸大橋、高松自動車道を利用するものとして、2.75 時間とした。また、ビニロン繊維の荷姿の容積は、写真 6.5 に示すように気乾状態のビニロン繊維の単位容積質量試験 (JIS A 1104) で得られた結果 (0.141kg/ℓ) を基に、かさ容積として式(6.9)により算出した。

$$V=U / \delta \quad \text{式(6.9)}$$

ここに、 $V$  : 吹付けモルタル 1000m<sup>2</sup> に用いるビニロン繊維の荷姿の容積 (m<sup>3</sup>)

$U$  : 吹付けモルタル 1000m<sup>2</sup> 当りに使用するビニロン繊維量 (t)

$\delta$  : 気乾状態のビニロン繊維の単位容積質量 (0.141 kg/ℓ)



写真 6.5 ビニロン繊維単位容積質量試験

式(6.9)にて算出したビニロン繊維の運搬量 ( $V=5.9 \text{ m}^3$ ,  $0.8\text{t}$ ) から、竹繊維の場合と同様に 2t 吊クレーン装置付 4t 積トラックによる運搬とした。なお、同トラックの平積み容積は  $4.7\text{m}^3$  であるので、2 段積み以下の積載となる。なお、ビニロン繊維は一定量ごと ( $15\text{kg}/\text{袋}$ ) に紙袋に梱包されて運搬されるが、ここでは、荷台の容積のみで荷姿を見積もるものとし、吹付けモルタル  $1000\text{m}^2$  当りのビニロン繊維の運搬に係わる  $\text{CO}_2$  排出量を式(6.10)により算出した。

$$W=s \times t \times z \times p \quad \text{式(6.10)}$$

ここに、 $W$ : 吹付けモルタル  $1000\text{m}^2$  当りのビニロン繊維の運搬に係わる  $\text{CO}_2$  排出量 ( $\text{kg-CO}_2$ )

$s$ : 機関出力 ( $\text{kW}$ ),  $t$ : 燃料消費率 ( $\ell/\text{kW-h}$ ),  $z$ : 運転往復時間 ( $\text{h}$ )

$p$ : ガソリン  $1\ell$  当りの  $\text{CO}_2$  排出量 ( $2.32 \text{ kg-CO}_2/\ell$ )

## 6.7 環境影響評価

竹繊維とビニロン繊維の吹付けモルタル施工面積  $1000\text{m}^2$  当りの  $\text{CO}_2$  排出量を図 6.5 に示す。竹繊維では竹林が管理されることで、竹の寿命を 20 年とした時に 3 年ごとに伐倒される単位面積当りの累計バイオマスが非管理状態で 20 年放置されたバイオマスを大きく上回る事となる。そのため竹林に吸収される  $\text{CO}_2$  の量が多くなり、原料採取から運搬2までの各プロセスで生じる  $\text{CO}_2$  排出量を加算しても  $\text{CO}_2$  排出量の合計は  $-0.8\text{t}$  程度であるが、ビニロン繊維では繊維製造過程で排出される  $\text{CO}_2$  が多く各プロセスの合計は約  $3.3\text{t}$  であった。

また、 $\text{CO}_2$  排出量取引におけるクレジット価格を  $7000 \text{ 円}/\text{t-CO}_2$  として環境付加価値の評価を行った結果、竹繊維を混入した吹付けモルタルはビニロン繊維を混入した吹付けモルタルよりも吹付け面積  $1000\text{m}^2$  当り  $29000 \text{ 円}$  程度、繊維無混入の普通モルタルよりも  $6000 \text{ 円}$  程度の付加価値があった。この環境付加価値は、竹繊維を混入した吹付けモルタルの力学特性、耐久性等に加えて考慮すべき重要な特性であると考えられる。

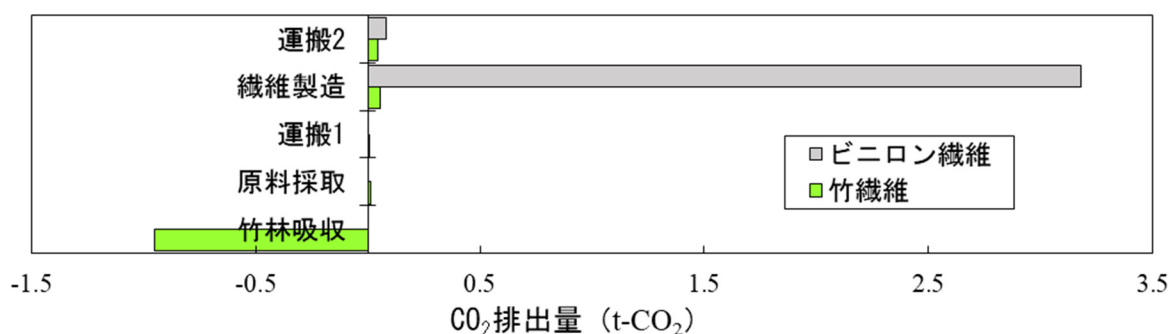


図 6.5 竹繊維とビニロン繊維の  $\text{CO}_2$  排出量 (吹付けモルタル  $1000\text{m}^2$  当り)

## 第7章 結論

### 7.1 本研究の結論

本研究で得られた結果を以下に示す。

#### 7.1.1 竹繊維の基礎物性（第2章）

- (1) 竹繊維を生材のまま常温水に浸漬させてもセメント凝結時間やモルタルの圧縮強度に影響するほどの糖分の溶出は見られなかった。
- (2) 黒カビが発生した竹繊維をモルタルに混入する場合には、セメント質量率で0.03%程度の糖分が溶出し、セメント凝結時間の遅れや圧縮強度が低下する可能性があることが分かった。
- (3) 竹繊維に加熱等の処理を行って引張強度や弾性率を上昇させたとしてもモルタルマトリックスとの付着強度の向上にはつながらなかった。
- (4) 乾湿繰返し作用を受けても竹繊維の引抜き付着強度が大きく低下するようなことはなかった。

#### 7.1.2 竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルの室内実験による基礎的性状評価（第3章）

- (1) 竹繊維の混入率の増加に応じて空隙率も増加するものの、混入量0.75vol. %までは圧縮強度は増加した。さらに混入量を増加させると圧縮強度は低下したことから、0.75vol. %程度の竹繊維混入量が適切と考えられた。
- (2) 竹繊維を単独混入した場合には、乾湿繰返し作用によって圧縮強度の低下が見られたが、竹繊維とビニロン繊維の混合使用やフライアッシュを併用することにより改善された。
- (3) 竹繊維の混入率の増加に応じて曲げ強度も増加した。

#### 7.1.3 竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルの吹付け実験による力学特性および耐久性評価（第4章）

- (1) 竹繊維を混入することで、吹付けモルタルのリバウンド率が低減され、竹繊維とビニロン繊維の混合使用やフライアッシュを併用することでより顕著となった。
- (2) 竹繊維を単独混入した場合には、乾湿繰返し作用によって圧縮強度の低下が見られたが、竹繊維とビニロン繊維の混合使用やフライアッシュを併用することにより大きく改善された。
- (3) 竹繊維を混入することで、乾湿繰返しを受ける吹付けモルタルの基盤面との接着強度や曲げじん性が向上し、竹繊維とビニロン繊維の混合使用やフライアッシュを併用することでより顕著となった。
- (4) 竹繊維を混入することで、吹付けモルタルの凍結融解抵抗性が向上した。

#### 7.1.4 竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルの試験施工による実用性評価（第5章）

- (1) 竹繊維とビニロン繊維の混合使用や竹繊維にフライアッシュを併用する配合では、W/B=45～50%程度の場合に単位水量不足となり材料分離傾向が高まった。
- (2) 1バッチの練混ぜ時間を空練り30秒後2分間とした場合、吹付け作業に1バッチ当たり30秒程度の手待ちが生じた。

### 7.1.5 竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルのライフサイクルアセスメント（第6章）

- (1) 竹繊維製造により管理された竹林に吸収される CO<sub>2</sub> の量が、竹繊維製造過程で排出される CO<sub>2</sub> の量を大きく上回るため、竹繊維を混入した吹付けモルタルの CO<sub>2</sub> 排出量はマイナスとなった。
- (2) 竹繊維を混入した吹付けモルタルの CO<sub>2</sub> 排出量を環境付加価値として評価した結果、施工面積 1000m<sup>2</sup> 当りに、ビニロン繊維を混入した吹付けモルタルよりも 29000 円程度、繊維無混入の普通モルタルよりも 6000 円程度の付加価値を有することが分かった。

## 7.2 今後の課題と展望

竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルの実用化に向けては、施工性とモルタル品質の両方を確保する観点からはまだ課題があるものの、耐久性や環境面での利点がかかなり大きいことが分かったことから、今後も課題解決に向けた研究を継続していくものとする。

### 7.2.1 今後の課題

第5章の試験施工の結果、竹繊維とビニロン繊維の混合使用や竹繊維にフライアッシュを併用する配合では、W/B=45~50%程度の場合に単位水量不足となり材料分離傾向が高まることから、いずれの配合（B+V、B+FA）も単位水量を増やして、マテリアルホースの詰まりや材料分離の改善状況を確認する必要がある。また、1バッチの練混ぜ時間を空練り30秒後2分間とした場合に吹付け作業には30秒程度の手待ちが生じることから、モルタルの品質を確保した上で練混ぜ時間の短縮が可能か検討する必要がある。

### 7.2.2 今後の展望

今後の展望として、第5章の試験施工と同じ法面を対象に、単位水量を修正して試験施工（その2）を行い、施工性、法面に吹付けたモルタルの力学特性および面的なひび割れ抵抗性等を評価していくことで、実用化を目指すものとする。

試験施工（その2）のモルタル配合は、W/B=55%、C=400kg/m<sup>3</sup>を固定値とし、細骨材は粗粒率が2.5~3.1の範囲のものを使用する（表7.1）。また、B+VおよびB+FAについては練混ぜ時間を空練り30秒後2分間としたケースと30秒短縮したケースの比較実験を行う。

表 7.1 モルタル配合（試験施工）

配合名	繊維種別	繊維添加率 (vol. %)		W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
					C	W	S	Fiber	FA			
N	—	—		55	400	220	調整	0	—			
B+V	竹繊維	0.375	0.75					400	220	調整	2.89	—
	ビニロン繊維	0.375									4.07	
B+FA	竹繊維	0.75						270	5.78	90		

試験施工（その2）は、本研究第5章の試験施工と同様に、各配合 5m<sup>2</sup>程度の吹付けを行い、吹付け後1年程度の間、ひび割れ、浮き等の変状を調査するとともに、吹付け法面のコア（φ5cm）を採取し、圧縮強度や中性化深さを調査するものとする。



## 謝辞

本論文は、筆者が徳島大学大学院先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻建設創造システム工学コース博士後期課程に在学中の研究成果を取りまとめたものである。

本研究の遂行に当たっては、徳島大学大学院教授・上田隆雄先生に指導教官として終始、手厚いご指導を賜りました。徳島大学大学院教授・高木均先生には本研究第2章の機械特性に関する実験のご指導を賜りました。徳島大学大学院教授・上月康則先生には科目履修に当り同第6章のライフサイクルアセスメントの研究テーマにお導きいただきました。維持再生研究室の学生・丸尾有紀氏（現・積水ハウス株式会社）には同第3章および第4章の各種試験にご協力をいただきました。院生・大谷一将氏には同第4章の凍結融解試験にご協力をいただきました。ここに、これまでのご厚情に対して深謝の意を表します。

バンブーモルタル・コンクリート技術研究会の有限会社杉本商店代表取締役・杉本龍亮氏には、本研究で使用した竹繊維原料をご提供いただきました。同研究会株式会社グリーンシステム代表取締役・原敏雄氏には、本研究第4章および第5章の実機プラントによる吹付け実験および試験施工にご支援をいただきました。松浦開発興業株式会社常務取締役・福田芳博氏には、本研究第5章の試験施工のフィールドをご提供いただきました。ここに感謝の意を表します。

本研究のため徳島大学大学院博士後期課程への入学をご許可いただいた株式会社環境防災前代表取締役・丸山泉氏，社会人ドクターの有用性をご教示いただいた同社前相談役・山本洋一博士，筆者の実験を応援いただいた同社技師長・吉川敏明氏，顧問・井上耕治氏，技術顧問・渡邊誠氏，部長代理・河野美博氏，部次長・以西喜照氏，係長・飯田恭浩氏，係長・宮田剛吏氏，主任・郡昌弘氏および有形無形のご支援をいただいた同社役職員の方々に対し，感謝の意を表します。

皆様のお蔭で、本研究を通して研究者としての考え方とともに楽しさも学ばせていただきました。印象深い事例では、第4章の凍結融解試験では思ってもいなかった良好な効果が現れ、そのメカニズムを考察しました。しかしながら、指導教官の上田先生より、他の実験結果との矛盾が生じる、との的確なご指摘に加えて、竹繊維特有の何かがあるのではないかと、の機知に富んだご示唆をいただきました。そこで、竹に関する情報や既往の研究をもう一度調べ直してやっとなつとつの仮説にたどり着き、何度も練り直しを行った結果、上田先生から、適切な考察である、との評価をいただいた時、またその内容を含む論文が採択された時は、格別な喜びがありました。このような貴重な機会に恵まれましたこと、感謝に堪えません。本当にありがとうございました。

最後に、いつも私を支えてくれた妻・起代子に感謝の意を表し、本論文の謝辞といたします。

2019年9月

## 参考文献

- 1) 土木学会：吹付けコンクリート指針（案）[のり面編]，コンクリートライブラリー122，2005.7
- 2) 寺井雅和，南 宏一：竹繊維補強コンクリートの力学特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 34，No. 2，pp. 1279-1284，2012.7
- 3) 生田麻実，武田字浦：竹繊維を用いた環境負荷低減型コンクリートの開発，土木学会第 66 回年次学術講演会概要集，V-598，pp. 1195-1196，2011.9
- 4) 清野嘉之，鳥居厚志，奥野史郎，野田巖，金森匡彦：日本の竹林のバイオマス炭素蓄積量、吸収量の算出手法の開発，森林総合研究所第 2 期中期計画成果集，ISBN 978-4-902606-83-6，pp.12-13，2011
- 5) 柴田昌三：竹資源の新たな有効利用のための竹林施業，日本森林学会森林科学，No.58，pp.15-19，2010.2
- 6) 鳥居厚志，奥田史郎：タケは里山の厄介ものか，日本森林学会森林科学，No.58，pp.2-5，2010.2
- 7) 小林剛，多田壮宏：モウソウチクは里山林の炭素吸収・貯蔵および有機物分解にどのような影響をもたらさうるか，日本森林学会森林科学，No.58，pp.6-10，2010.2
- 8) 星野和義，朝比奈敏勝，村田守，中川一人：高温高压処理による竹の繊維抽出とバイオマス利用，日本大学生産工学研究報告 A，第 43 巻，第 2 号，2010.10
- 9) 板倉雅彦：セルロースを強化材とするグリーンコンポジットの現状と将来展望，「材料」(Journal of the Society of Materials Science, Japan)，Vol.60，No.1，pp.79-85，2011.1
- 10) 京都大学生存研究所，京都市産業技術研究所，京都大学産官学連携本部：Nano Cellulose symposium2014 セルロースナノファイバー，生存圏シンポジウム，第 250 回，pp.63-66，2014.3
- 11) 青函トンネル物語編集委員会：青函トンネル物語，(株)交通新聞社，2013.6
- 12) 土木学会：吹付けコンクリート指針（案）[補修・補強編]，コンクリートライブラリー123，2005.7
- 13) 全国特定法面保護協会：のり砕工の設計・施工指針（改訂版），2006.11
- 14) 日本道路協会：道路土工一切土工・斜面安定工指針，2009.7
- 15) フリーフレーム協会：新版フリーフレーム工法，2008.4
- 16) 松山裕幸，天野浄行，山本高司：吹付けコンクリートの安定性と劣化状況，土木学会論文集 F，Vol.62，No.3，pp.445-458，2006.7
- 17) 高速道路技術センター：写真でみる道路トンネル，1996.7
- 18) 山崎勲，吉田行，田口史雄，嶋田久俊：岩盤の風化防止を目的とした吹付けコンクリートの付着性状，土木学会第 56 回年次学術講演会，V-251，2001.9
- 19) 吉田行，山崎勲，熊谷守晃：岩盤の風化防止を目的とした吹付けコンクリートの凍結融解抵抗性，土木学会第 55 回年次学術講演会，2000.9
- 20) 田口史雄，栗橋祐介，三上浩，岸徳光：PVA 短繊維および中空小球を混入した補修・補強用吹付けコンクリートの材料特性，土木学会論文集 E，Vol. 64，No. 1，pp. 94-109，2008.2

- 21) 野村隆哉：＜総説＞竹の成長について，木材研究・資料，Vol. 15，pp. 6-33，1980.12
- 22) 森川豊，伊藤雅子：各種バイオマス原料を用いたバイオエタノール試作に関する検討，あいち産業科学技術総合センター研究報告 2013，pp. 52-53
- 23) 熊谷聡，林信行，坂木剛，中田正夫，柴田昌男：加水熱水 2 段階昇温による籾殻中セルロース，ヘミセルロースの成分分離と糖化，Journal of Japan Institute of Energy，83，pp. 776-781，2004
- 24) 松岡浩，伊藤明子，佐藤未怜：酵素糖化とパン酵母発行による竹からのエタノール生産，帝京科学大学紀要，Vol. 8，pp. 87-91，2012
- 25) 瀧波勇人，小梁川雅，美馬孝之：竹繊維の繊維補強材としての利用に関する研究，土木学会第 67 回年次学術講演会概要集，V-331，pp. 661-662，2012.9
- 26) 高木均，田倉隆輝，一原洋平，越智真治，三澤弘明，仁木龍祐：爆砕法により取り出した竹繊維の引張強度特性，「材料」(J. Soc. Mat. Sci., Japan)，Vol. 52，No. 4，pp. 353-356，2003.4
- 27) 前川英一，北尾弘一郎：竹のヘミセルロースに関する研究（1）：ヘミセルロースの単離およびその構成糖について，木材研究：京都大学木材研究所報告，Vol. 34，pp. 100-104，1965
- 28) 池 正和，徳安 健：Trichoderma reesei 由来繊維質原料糖化酵素の低コスト生産に向けた取り組み，応用糖質科学，Vol. 4，No. 3，pp. 219-223，2014
- 29) 中川健太郎，末政直晃，木下文男，高見澤宇希：糖添加がソイルセメントの遅延効果に及ぼす影響，土木学会関東支部技術研究発表会，Vol. 37，III-36
- 30) 竹内徹，長瀧重義：超遅延剤を用いたコンクリートの特性，コンクリート工学，Vol. 37，No. 11，pp. 9-19，1999.11
- 31) 田中弘文，村上恵一，小松忠明：ポルトランドセメントおよびその構成鉱物の水和におよぼすサッカロース，d-グルコース，デキストリンなどの影響，窯業協会誌，75 [2]，pp. 54-62，1967
- 32) Chow HK. “Bamboo as a material for reinforcing concrete”，Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology. 1914.5
- 33) 杉本賢司：竹筋コンクリート探訪，Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan, No. 9，pp. 439-444，2002
- 34) 栗山 寛：竹筋コンクリートに就て，衛生工業協会誌，Vol. 14，No. 6，pp. 375-390，1940.6
- 35) 玉井孝幸，嵩英雄：現存する竹筋コンクリート造を求めて－熊本県小国町コンクリートアーチ橋群の調査より－，コンクリート工学，Vol. 17，No. 6，pp. 19-27，2009.6
- 36) 寺井雅和：竹材の化学抵抗性に関する基礎的研究，近畿大学工学部研究報告，No. 48，pp. 47-52，2014
- 37) 島田 一：竹筋の化学的研究（第一報），建築学会大会論文集，pp. 17-25，1939.4
- 38) 伊藤祐貴，松田一樹，鬼頭宏明，角掛久雄：竹筋コンクリート部材の基本特性と数値解析法に関する研究，土木学会関西支部年次学術講演会，第 V 部門，pp. 9-10，2012

- 39) 松田一樹：曲げとせん断を受ける竹筋コンクリート部材に関する研究，大阪市立大学大学院修士論文概要集，2013.2
- 40) 董 賀祥，西村 正，関 博：合成短繊維の付着特性が補強コンクリートの曲げ特性に与える影響に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol. 20, No. 1, pp. 1-13, 2009.1
- 41) 中村雅彦，福島孝弘：ビニロン繊維強化セメント系板材の特性改善，Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol.104, No. 9, pp. 886-891, 1996
- 42) 我喜屋満，齋藤俊克，出村克宣：竹補強材用表面処理剤の種類が竹補強セメントモルタルの曲げ性状に及ぼす影響，Cement Science and Concrete Technology, Vol. 69, pp.741-746, 2016
- 43) 古田裕三，中嶋聖充，中新絵里，大越誠：飽水木材の熱軟化特性に及ぼすリグニンおよびヘミセルロースの影響，木材学会誌，Vol. 56, No. 3, pp. 132-138, 2010
- 44) 小川圭二，廣垣俊樹，青山栄一，小川幸子，高木陽太：マシニングセンタ抽出竹繊維のみを用いた資源完全循環型の自己接着成形体の製造と性能評価，日本機械学会論文集（C編），78巻，787号，pp. 213-222, 2012.3
- 45) 小澤満津男，大橋一樹，山本基由，森本博昭：天然繊維を用いた内部養生によるセメントペーストの自己収縮低減効果，Cement Science and Concrete Technology, No. 65, pp. 276-281, 2011
- 46) 高田龍一，郭世文，緒方英彦，服部九二雄：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解性能評価に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26, No. 1, pp. 1911-1916, 2004
- 47) 楊 勤，福井勝則，大久保誠介，高見法侑：吹き付けた鋼繊維補強モルタルの一軸圧縮応力下での挙動，資源と素材，Vol. 113, pp. 655-661, 1997
- 48) 足立芳寛，松野康，醍醐市朗，瀧田博明：環境システム工学—循環型社会のためのライフサイクルアセスメント—，東京大学出版会，2004.4
- 49) 清野嘉之，鳥居厚志，奥野史郎，野田巖，金森匡彦：日本の竹林のバイオマス炭素蓄積量、吸収量の算出手法の開発，森林総合研究所第2期中期計画成果集，ISBN 978-4-902606-83-6, pp.12-13, 2011
- 50) 環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会：温室効果ガス排出量算定に関する検討結果第5部森林等の吸収源分科会報告書，pp. 11, 2006.8
- 51) 伊藤崇之，村上勝，谷山徹：竹利用のキーは伐出のコスト，日本森林学会森林科学，No.58, pp.20-23, 2010.2
- 52) 星野和義，朝比奈敏勝，村田守，中川一人：高温高圧処理による竹の繊維抽出とバイオマス利用，日本大学生産工学研究報告 A, 第43巻，第2号，2010.10