

竹材の化学抵抗性に関する基礎的研究

寺井 雅和

Fundamental Study on Chemical Resistivity of Bamboo

Masakazu TERAI

Synopsis

Recently, in the attention in response to global warming issues and sustainable society, the manufacturing using natural materials has become actively. Bamboo, low cost, fast growing, and broad distribution of growth, is expected to contribute significantly to earthquake-resistant construction and seismic retrofit technology in developing countries. The authors also have been studied for understanding the mechanical behavior of bamboo reinforced concrete members and clarifying the differences of structural properties from steel reinforced concrete and bamboo reinforced concrete. A study of the feasibility of using bamboo and non-steel as the reinforcing material in concrete members was conducted in our laboratory. This paper deals with the effect of the corrosion of bamboo. The cross sectional area and the tensile strength filled with cement cured $w/c=50\%$ and 100% significantly are changed up and down with aging time. However, one year later, the cross sectional area and tensile strength are coming back to the state before.

Key words: Bamboo, Cement Composite, Chemical Resistivity, Corrosion, Alkali, Mineral & Chemical Admixture for Concrete

1. はじめに

竹材をコンクリート構造物の補強材に活用する竹筋コンクリート構造物がある。このときに問題となるのは、アルカリ性のセメントの中にセルロースが主成分の竹を挿入することで、組織が破壊され強度が下がったり、長期的なひびわれ抑制が不足することが既往の研究では指摘されている¹⁾。そこで竹材の物理的、科学的性質の研究について、竹材の細胞組織と強度、コンクリートとの化学反応などの研究を行う。

アルカリ中において、表面に何も処理していない素竹材は、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ことが既往の研究者により確認されている²⁾。しかし、古い時代の実験なので詳細が不明であり、このことについてはその後研究された事例がないので、本研究の中で確認することにした。

本研究報告では、コンクリート（モルタル）中に埋設

された竹材について、時間により起こる引張強度の変化とその理由について実験を行い判明した事を報告するものである。また、コンクリートには施工性や耐久性を向上させるために、混和剤を使用するのが常であるが、化学混和剤が植物細胞に及ぼす影響はあまり知られていない。そこで、本実験では、化学混和剤の成分が竹の細胞組織にとって影響があるのか（あるいは影響ないのか）を、実験結果に照らして科学的な視点でメカニズムを明らかにする。

2. 既往の研究（文献2）島田の研究より）

ここでは、竹をコンクリート部材の補強筋に活用する場合に問題となる現象として、竹がアルカリによって腐食されるメカニズムを検討した島田の論文を紹介する。竹材は、図1にモウソウチクの断面を示すように、通気孔、空隙、細胞などの細胞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。

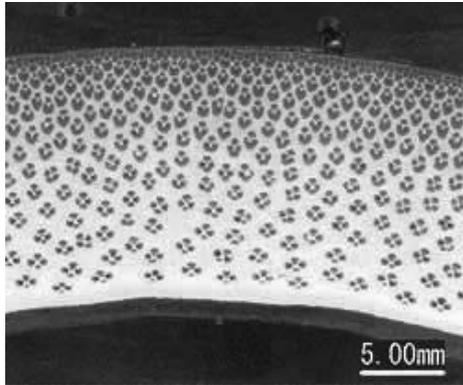


図1 マダケの横断面写真 (www.bichemi.co.jpより)

表1 モウソウチクの分析成分百分率

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2 セメントの成分及び含有量 (百分率)

名称	化学式	百分率(%)
石灰	CaO	60~65
ケイ酸	SiO ₂	21~24
アルミナ	Al ₂ O ₃	6~8
鉄酸化物	Fe ₂ O ₃	4以下
アルカリ		2以下
苦土	MgO	0.5~3
硫酸	SO ₄	1.5以下
硫黄	S	0.5以下

竹材をコンクリート（セメント）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にモウソウチクを構成する成分を示すが、このうちタンパク質及び脂肪が、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が起こり、強度や剛性が時間とともに失われることが知られている。

表2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（SiO₂）は石灰（CaO）と結合してケイ酸石灰（CaO・SiO₂）などの加水分解によって多量の遊離石灰（Ca(OH)₂）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している。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細胞飽和の形態検査と竹材の引張強度の変化を測定した。

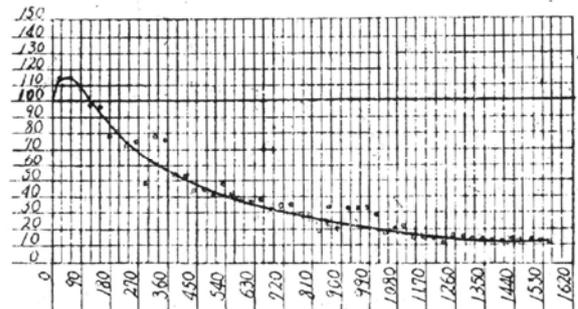


図2 竹材をCa(OH)₂飽和液中に投入した日数により起こる引張強度の変化曲線²⁾
(縦軸；引張強度の変化率(%), 横軸；投入日数(日間))

図2は、竹片をCa(OH)₂の飽和液中に投入し、日数により起こる引張強度の変化であるが、竹材の引張強度2,960kgf/cm²のものが、650日目で1,130kgf/cm²、1550日目で373kgf/cm²となり、竹材自身の強度の約12%に減少していることがわかる。1550日間石灰の飽和液中に投入した竹材は、柔細胞組織はほとんど破壊され、その原形のみをとどまる程度にして、引張り試験機にも挟むことが出来ないほどになっていた。従って、実験時の強度は主として繊維の強度と推定される。

この実験では、竹材は1550日間ずっとCa(OH)₂飽和液に浸してあった。しかし、実際の場合にコンクリート中に水酸化石灰として、飽和の状態が長い年月継続するという事はあり得ない。

そこで、島田は、実際にコンクリート中に竹材を打込んでおき、その打込み日数により起こる細胞組織の状態の検査と竹材の引張強度の変化も測定している。この実験結果によると、竹材の引張強度2,960kgf/cm²のものが、600日目で2,338kgf/cm²、1500日目で1,865kgf/cm²となり、竹材自身の強度の約68%に減少していることがわかる。このことから、石灰の飽和液中に投入した先の実験結果からも強度の減少率が小さいことが分かる。しかしながら、島田は、この実験は供試体を露天に放置したものであるから、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、参考資料程度の扱いとしたい、とまとめている。

3. 竹材の引張試験

本研究報告では、竹材の腐食に影響すると考えられる2つの要因について検討した。

一つは、コンクリート（モルタル）中に埋設された竹材について、時間により起こる引張強度の変化についての検討である。すなわち、コンクリート中の遊離石灰により竹材が腐食する現象を確認するため、島田の実験を再現したものである。

もう一つは、コンクリートには施工性や耐久性を向上させるために、化学混和剤を使用するのが常であるが、化学混和剤が植物細胞に及ぼす影響は、ほとんど知られていない。そこで、本実験では、化学混和剤の成分が竹の細胞組織にとって影響があるのか（あるいは影響ないのか）を確認することにした。

本研究報告では、前者の遊離石灰による竹の腐食実験を「シリーズA」、後者の化学混和剤による竹の腐食実験を「シリーズB」と区別することにする。

3.1 実験計画および概要

竹の引張強度のための試験片は、直径160mm程度、肉厚15mmの3年目の孟宗竹から、図3に示す寸法で試験片を削り出したものとする。図4に示すような型枠により、試験区間の60mmの部分にセメントペースト（モルタル）で硬化させ、一定の存置期間後に周辺のセメントペーストを叩き割り、竹試験片を取り出す。取り出した竹試験片の断面寸法を測定し引張試験を実施する。

シリーズAでは、水セメント比50%および100%のセメントペーストで2種類の試験体を製作し、シリーズBでは、3種類の化学混和剤を添加し、混和剤を添加しないものと合わせて4種類の試験体を製作した。化学混和剤は、建設現場で比較的使用度が高いAE剤、AE減水剤、高性能AE減水剤の3種類を用いる。

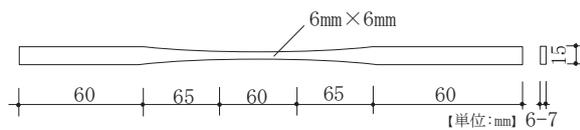


図3 引張試験片

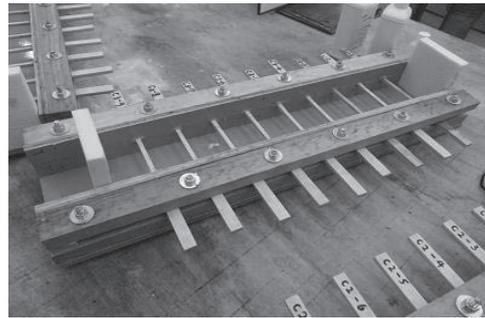


図4 引張試験体型枠（上）とモルタル充填直後

3.2 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は、島根県仁多郡奥出雲町阿井産の加工砂である。その物理的性質を表3に、写真を図5に示す。

シリーズBで使用した化学混和剤は、表5に成分を示す3種類を選択した。



図5 本実験で使用した骨材

表3 骨材の物理的性質

種別	比重 (g/cm ³)	吸水率 (%)	最大寸法 (mm)	各ふるいに残る重量百分率(%)								粗粒率 FM	
				15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15		受け皿
細骨材	2.52	1.15	-	-	0	0	5	29	57	77	93	7	2.61

表4 調合表

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
50	68.0	242	484	999	-	-
						AE剤(I種)
						AE減水剤 標準形(I種)
						高性能AE減水剤

表5 化学混和剤成分表

	AE 剤	AE 減水剤	高性能 AE 減水剤
主成分	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤	変性リグニンスルホン酸化合物	ポリカルボン酸エーテル系化合物
密度 (g/cm ^{20°C})	1.02~1.06	1.06~1.10	1.04~1.11
全アルカリ量 (%)	1.1	1.1	1.4
塩化物イオン量 (%)	0.01	0.03	0.01
外観	淡黄色液体	暗褐色液体	赤褐色液状
使用量	C×0.006%	C×1%	C×0.9%

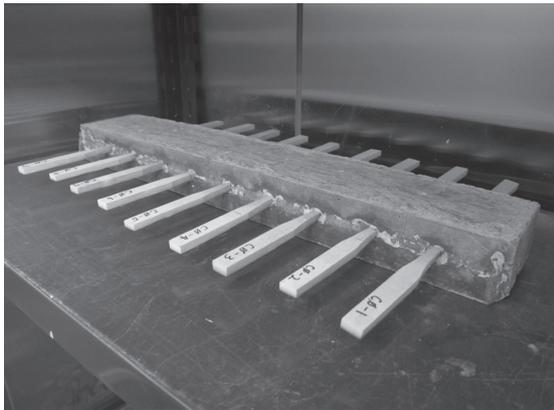


図6 恒温室内で養生中の様子

3.3 調合設計

シリーズAでは、セメントペーストで竹試験片を固めたので、水とセメントの比率を50%と100%の2種類を製作した。

シリーズBでは、表4に示すように、水セメント比50%で単位水量は242kg/m³、細骨材率68%、空気量4%とし、化学混和剤以外の条件はすべて同じとした。本来、化学混和剤には減水効果があるので、使用する混和材の性能に応じて単位水量を変えるべきであるが、今回の実験の目的から、施工性や耐久性は関係ないので、混和剤の添加がある・なし以外は配合を変えていない。

化学混和剤の使用量は、表5に示すとおりであるが、本実験では標準量の1.5倍を添加している。混和剤による影響を直接見たいため少し多めに添加した。これによって、空気の分散効果が大きく、スランプ値やフロー値が計測できない程やわらかいコンクリートが出来たが、上記の通り施工性については触れないので、このまま配合を変えずに型枠に打ち込んだ。

3.4 試験体製作

シリーズAでは、セメントペースト打設後は、乾燥を防ぐために上部を密封して養生した。打設後28日目まで養生し、1か月目の引張試験を行ったが、その後は室内に放置した。1, 2, 3ヶ月, 1, 2年目に、硬化したセメントペーストから試験片を3本ずつ取り出し、試験片の断面寸法を測定し引張試験を実施した。

シリーズBでは、モルタル打設後は、乾燥を防ぐために上部を密封して養生し、打設後28日目まで養生し、20°Cの恒温室内で養生した(図6)。なお、湿度は調整していないので、30%程度の乾燥した状態で養生することとなった。材齢1, 6ヶ月目に硬化したモルタルから試験片を3本ずつ取り出し、試験片の断面寸法を測定し引張試験を実施した。

4. 実験結果および考察

4.1 シリーズA

材齢3年目(1019日)までの引張強度と断面積の変化を、図7と図8にそれぞれに示す。図7の引張強度は、破断時荷重を実測断面積で除した値で求めている。W/C=100%では材齢28日目に大きく強度が低下するが、材齢が進むにつれて強度が上がり、セメントペースト埋設前の強度よりも大きくなっていることがわかる。これは、材齢28日目に水分を吸収して断面積が大きくなっているため、計算上の強度が下がっただけと考えられる。その後、2, 3ヶ月目は乾燥に伴い断面積が減っているため、引張強度は徐々に高くなっていくが、乾燥収縮が収まったであろう300日目、1000日目にはもとの強度に近い値となっている。W/C=50%の試験片も、同じような傾向が見られ、2章で紹介した既往の実験で見られたように、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。

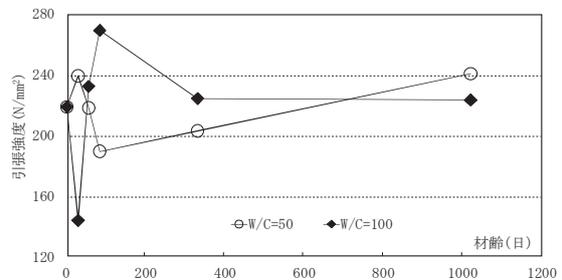


図7 引張強度の推移

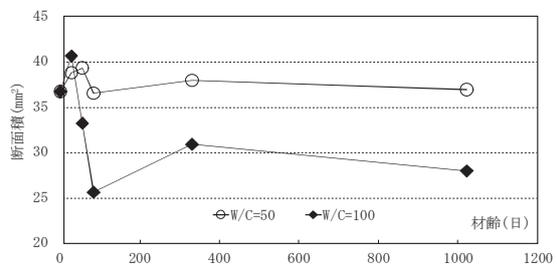


図8 断面積の推移

4.2 シリーズB

材齢28日目に引張試験をした試験片の試験部分を図9に示す。試験片ごとに大きな違いはなく、断面を輪切

りにするように破断したものと、縦方向に長く裂けるように破断したものがそれぞれであった。

同じシリーズは、3本ずつ試験したが、そのうち1本にはひずみゲージを2枚貼付して、ひずみを計測した。図10に、試験片4本の引張応力-ひずみ関係を示す。材齢28日では4本とも剛性にはほとんど違いがないことが分かる。

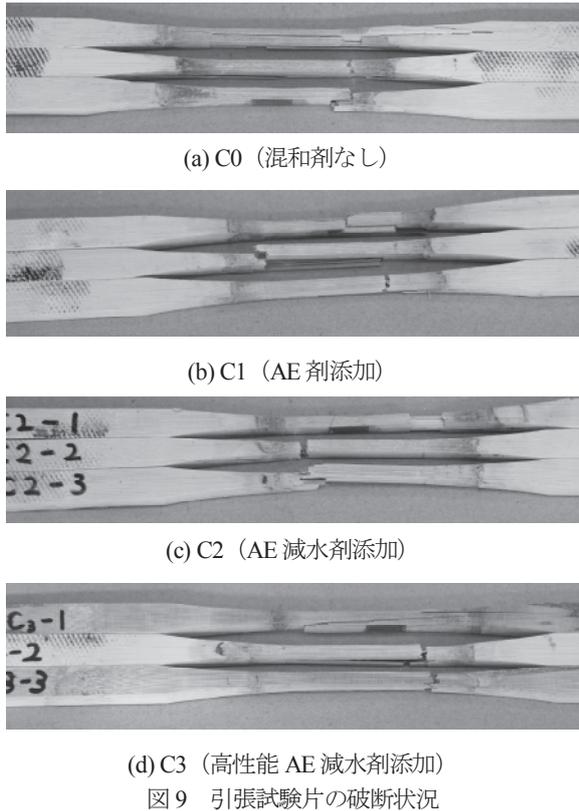


図9 引張試験片の破断状況

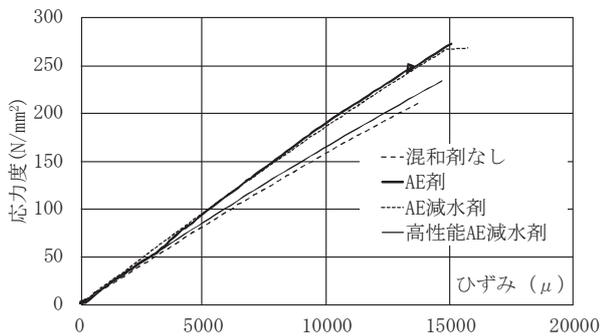


図10 引張応力-ひずみ関係

各シリーズ3本の引張強度を平均したものを、図11に示す。AE減水剤を添加したC2は、6ヶ月目に強度が上昇しているが、おおむね化学混和剤を添加したもの(C1~C3)が低下していることが分かる。ただし、この原因が混和剤の腐食の影響かどうかについては、現時

点のデータだけでは判別不能である。図12に、効果モルタルの単位容積重量を比較したものを示すが、配合方法、混和剤の添加量、養生方法などの影響から、混和剤を添加した試験体は軽くなっている。これは空気がモルタル内部に分散して、空気量が増えているためと考えられる。したがって、C1~C3の竹片は空気に広く触れているので、乾燥しやすくなっているとも考えられ、混和剤による化学的な作用があるかどうか、これから実施する12か月目の実験結果も踏まえ検討していきたい。

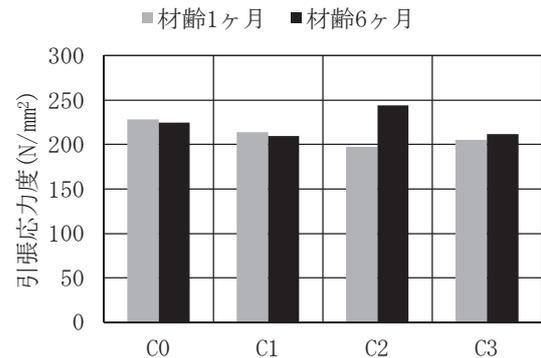


図11 引張強度の比較

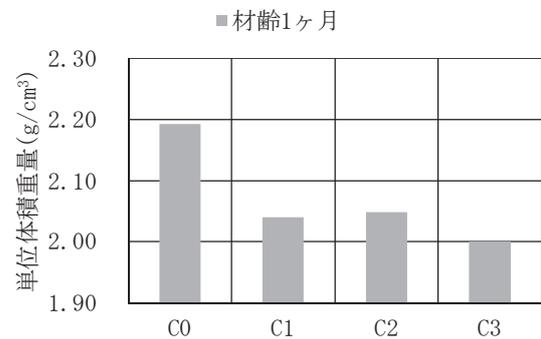


図12 単位体積重量の比較 (材齢28日目)

5. まとめ

筆者は、竹筋コンクリートや竹繊維補強モルタル複合材料の開発を目的に、基礎的な実験を行ってきた。これまで、コンクリート(モルタル)中に埋設された竹材には、時間により起こる引張強度の低下、すなわち腐食にともなう耐久性の問題が指摘されてきた。本研究報告では、腐食により竹材の引張強度がどのように変化するかを実験で確認した。また、化学混和剤の成分が竹の細胞組織にとって影響があるのかを確認するための実験も合わせて行った。

水セメント比50%と100%のセメントペーストで竹試験片を固めて、1000日目までの推移を確認したところ、既往の実験で見られたように、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。また、3種類の化学混和剤を添加したコンクリートに浸した竹材

の引張強度は、明らかに化学混和剤無添加に対して低下した。ただし、この原因が混和剤の腐食の影響かどうかについては、現時点のデータだけでは判別不能である。

謝辞

試験体の製作にあたり、中国アサノテクノス株式会社より骨材を提供していただきました。また、試験体製作および実験実施に際し、近畿大学工学部建築生産研究室のH25・26年度卒業生に協力いただきました。ここに記して深甚の謝意表します。

参考文献

- 1) 細田貫一：竹筋コンクリート工，修教社書院，1942.2
- 2) 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，昭和14年4月