

論文 竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルの基礎的性状

藤好 一男*1・丸尾 有紀*2・上田 隆雄*3・塚越 雅幸*4

要旨：ひび割れ抑制効果や耐久性の向上を期待して、鋼繊維や有機繊維等の短繊維を混入した法面吹付けモルタルの使用実績が増加している。一方で、竹林の適切な管理を進めるにあたり、竹材の有効利用の観点から、本研究では竹繊維を混入した法面保護用吹付けモルタルに関する基礎的検討を行った。この結果、竹繊維を 0.75%混入することで、同体積のビニロン繊維を混入した場合と同程度以上の圧縮および曲げ強度が確認できた。また、竹繊維とフライアッシュを併用することによって、竹繊維を単独使用した場合に比べて強度特性が改善されるだけでなく、吹付け時のリバウンド率低減に効果があることが確認できた。

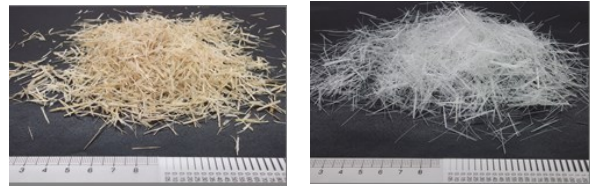
キーワード：吹付けモルタル, 竹繊維, ビニロン繊維, フライアッシュ, 曲げじん性

1. はじめに

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¹⁾。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¹⁾。

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²⁾。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^{2), 3)}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。

そこで本研究では、法面吹付け用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物性を室内実験によって確認するとともに、実機を用いた吹付け実験により、竹繊維を混入した吹付けモルタルの実施工への適用可能性を検討することとした。なお、火力発電所からの産業副産



(a) 竹繊維 (b) ビニロン繊維
写真-1 使用繊維の外観

表-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 ³)	0.77	1.09
表乾密度 (g/cm ³)	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 ²)	153	975

物である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についても併せて検討することとした。

2. 実験概要

2.1 使用繊維

本実験で用いた竹繊維(写真-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±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、気乾状態になるまで乾燥したものを実験に使用した。また、

*1 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 ((株)環境防災) (学生会員)

*2 徳島大学 工学部建設工学科

*3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部社会基盤デザイン系教授 博(工) (正会員)

*4 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部社会基盤デザイン系助教 博(工) (正会員)

表-2 モルタル配合（基礎物性試験）

配合名	繊維種別	繊維添加率 (vol. %)	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)				
				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	—
B+FA	竹繊維	0.75	32			1356	5.78	280
V	ビニロン繊維	0.75	55			1662	8.14	—
B+V	竹繊維	0.375				1674	2.89	—
	ビニロン繊維	0.375					4.07	

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-1(b)）を使用した。竹繊維とビニロン繊維の材料特性の一覧を表-1に示す。

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-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、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、W/Bは32%となる。さらに、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。

セメントは普通ポルトランドセメント（密度3.16 g/cm³）、細骨材は鳴門市撫養町産砕砂（表乾密度2.57 g/cm³、粗粒率2.63 g/cm³）を用いた。ま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：2.33 g/cm³、比表面積：3240 cm²/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、繊維材料は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にしたがい、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(1)によってモルタル空隙率を求めた。

$$\varepsilon = ((Ws - Wd) / (\rho \times V)) \times 100 \quad (1)$$

ここに、 ε ：空隙率(%)、 ρ ：水の密度

V：供試体の体積

2.3 吹付け実験

(1) モルタル配合および吹付け

吹付け実験は基礎物性試験の結果を踏まえ、N、B0.75、V0.75、B+V、B+FAの5配合に絞って実施した。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、配合修正を行った。これにより、細骨材代替

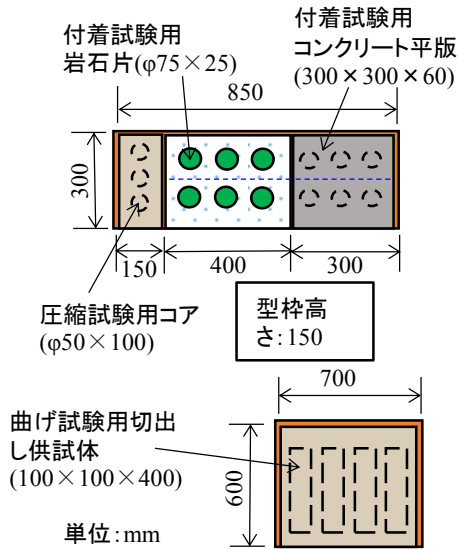


図-1 吹付け型枠上面図と切出し供試体の概要

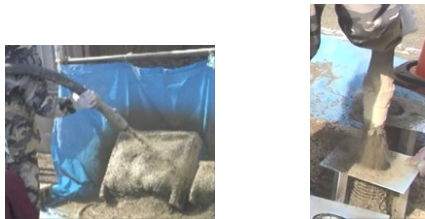


写真-2 吹付け実験状況

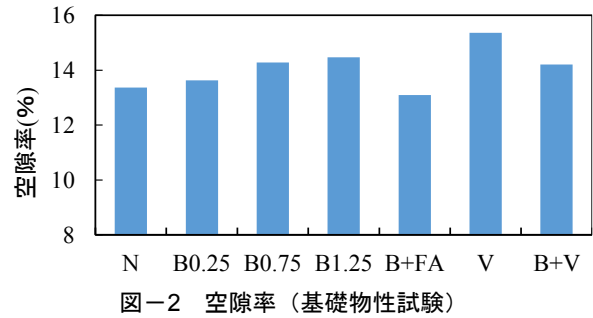
(左：木製型枠吹付け 右：金網円筒型枠吹付け)

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=45%とした。

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、繊維は小分けしながらミキサーに投入し、練り混ぜ時間は2分とした。

(2) 供試体作製および各種試験

吹付け型枠と切出し供試体の概要を図-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2種類で、850×300×150 mmの型枠で圧縮強度試験用の円柱コア供試体(φ50×100 mm)3本および、付着強度試験用供試体4体を作製した。付着強度は、実施工を想定して、岩石片(φ75×25 mm)に吹付けた場合と、300×300×60 mmのコンクリート平板(曲げ強度:5.5 N/mm²)に吹付けた場合の2種類作製した。なお、岩石片は徳島県鳴門産砂岩を石材用カッターで整形したもので、モルタル付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、700×600×150 mmの木製型枠を用いて、曲げ試験用の角柱供試体(100×100×400 mm)を4本切り出した。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度用供試体の作り方(案)」に従って、φ100×200 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。吹付け実験状況を写真-2に示す。また、供試体作製の吹付けとは別に、JSCE-F 563-2013に従って、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。

吹付けを実施した型枠は、モルタルの整形を行った後に11/24から12/22までの28日間の屋外暴露を実施した。この間の平均気温は8.3℃、雨の日が7日間あった。各供試体の切出しおよびコア抜きは材齢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)と建研式付着強度試験装置を用いた付着強度試験(JSCE-K 561-2013)を実施した。

3. 基礎物性試験結果

3.1 空隙率

材齢28日のモルタル空隙率の測定結果を図-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-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。

3.2 圧縮強度試験

モルタル圧縮強度の測定結果を図-3に示す。材齢28

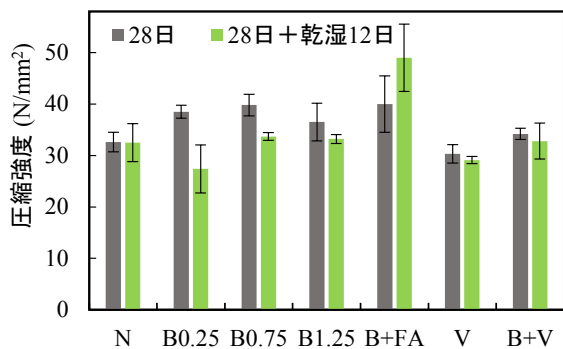


図-3 圧縮強度（基礎物性試験）

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-2に示したように、竹繊維混入率の増加とともに空隙率も増加しているにもかかわらず、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-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。竹繊維は吸水性が高いため、乾湿の繰返しによる体積変化の影響を強く受け、今回のような急激な温度および湿度変化によりモルタル内部に欠陥が発生した可能性がある。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-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に

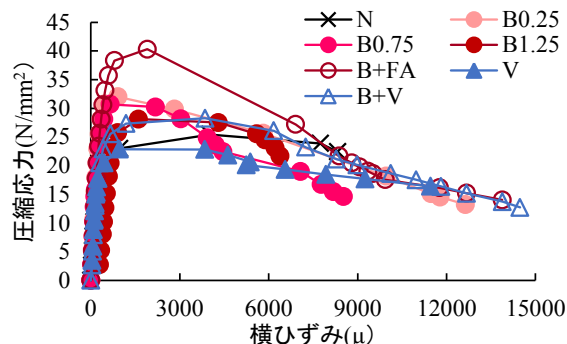


図-4 圧縮応力-横ひずみ曲線（基礎物性試験）

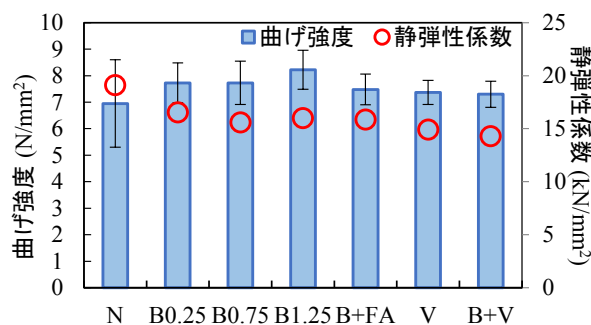


図-5 曲げ強度および静弾性係数（基礎物性試験）

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-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る。これによると、N配合に対してじん性向上が認められるのは、B0.25、B+VおよびB+FAの3配合で、特に、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配合は、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、段階的なひび割れ進展に対して各繊維材料が重層的に抵抗したものと推定される。B+FA配合については、フライアッシュの混和によって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増大したものと考えられる。

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、圧縮載荷時に測定した静弾性係数の値とともに図-5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配合の曲げ強度が最も大きくなっている。これは、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増大するとともに、一定の圧縮応

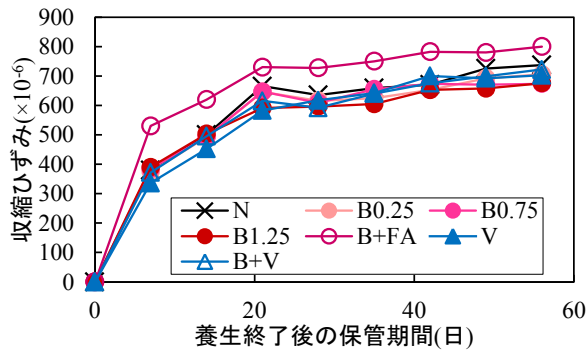


図-6 乾燥収縮ひずみ

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。

3.4 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-6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。

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-6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。

4. 吹付け実験結果

4.1 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-7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B0.75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。

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、B0.75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。

4.2 圧縮強度

材齢28日におけるφ50×100 mmの円柱コアとφ100×200 mmの金網円筒型枠吹付けモルタルの圧縮強度を図

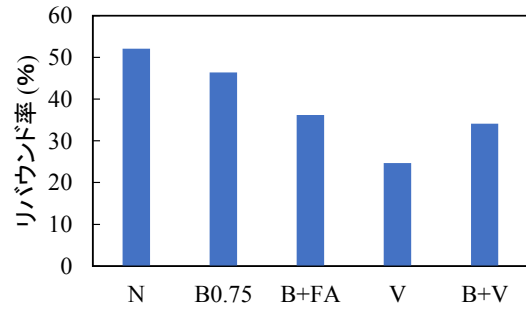


図-7 リバウンド率

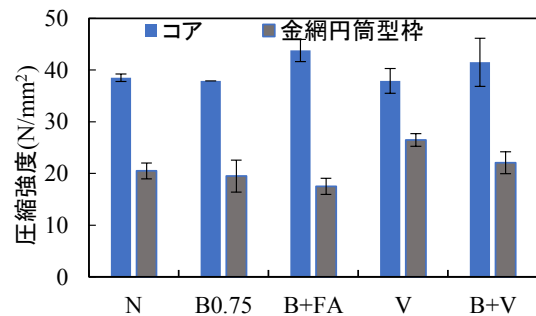


図-8 圧縮強度 (吹付け実験)

図-8に示す。図-8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¹⁾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図-3に示した基礎物性試験の測定値と比較すると、N配合とビニロン繊維を用いた配合は吹付け実験の強度の方がやや高いものの、全体としては基礎物性試験と同程度の強度が得られている。基礎物性試験では、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。

4.3 曲げ強度

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-9および図-10に示す。また、図-10の曲線と横軸の囲む面積を曲げタフネスと定義し、図-9に併せて示した。図-9に示した各配合の曲げ強度は、図-5に示した基礎物性試験の際の曲げ強度より全体的に小さい。圧縮強度に関しては同程度の値となったが、曲げ強度の場合には、吹付け実験で作製した供試体の大きさが、基礎物性試験の際の供

試体よりも大きいことや、吹付け時に微細な欠陥ができやすいことなどにより、吹付け実験の場合の方が小さい曲げ強度を示したものと考えられる。

一方、図-10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-9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、強い架橋効果により、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、V配合で見られた2つめ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。これより、現状の竹繊維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、ビニロン繊維との複合繊維配合やフライアッシュと併用することである程度の曲げじん性向上は可能となるものと考えられる。

4.4 付着強度

吹付けモルタルと岩石片またはコンクリート平板との付着強度測定結果を図-11に示す。岩石片はコンクリート平板よりも付着面が平滑であったため、付着界面の剥離破壊となり、付着強度も 1.0 N/mm^2 程度と比較的小さかった。これに対して、コンクリート平板の場合には基盤コンクリートか吹付けモルタルの破壊となり、 2.0 N/mm^2 を超える十分な値を示した。また、配合種類に関しては、基盤種類によらず、複合繊維を用いたB+V配合の値が最も大きかった。吹付けモルタルの付着試験方法は規格が存在しないことから、実施工の状況を想定した適切な試験方法について、今後さらに検討が必要である。

5. まとめ

本研究結果をまとめると次のようになる。

- (1) 室内実験で吹付けを行わずに吹付け用モルタルの基礎物性を確認したところ、吹付けを行った場合と同程度の圧縮強度が得られたが、曲げ強度は吹付けを行った場合より大きな値となった。
- (2) 竹繊維やビニロン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た。竹繊維を用いる場合は、ビニロン繊維との混合使用やフライアッシュとの併用がリバウンド率低減に有効であった。
- (3) 竹繊維を0.75%混入することで、吹付けモルタルの曲げじん性が向上した。また、竹繊維とビニロン繊維の混合使用や、竹繊維とフライアッシュの併用により、曲げじん性がさらに向上する傾向が見られた。
- (4) 本実験で採用したすべての配合条件で、コンクリート平板と吹付けモルタルとの付着強度は 2.0 N/mm^2 を超える十分大きな値が得られた。

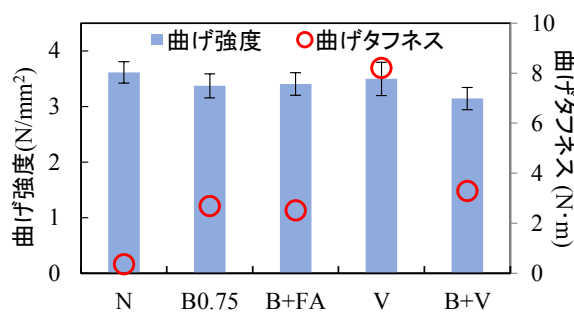


図-9 曲げ強度 (吹付け実験)

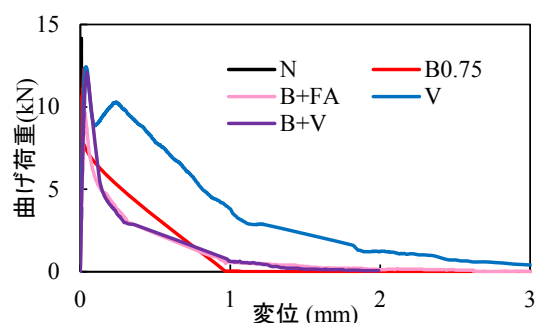


図-10 曲げ荷重-中央変位曲線 (吹付け実験)

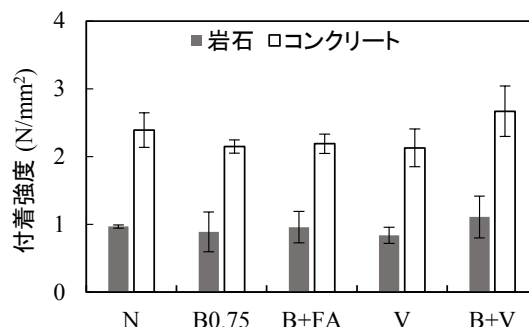


図-11 付着強度 (吹付け実験)

謝辞：本研究を遂行するに当たり、(株)グリーンシステム、(有)杉本商店から竹繊維のご提供や吹付け実験にご協力をいただいた。また、四国電力(株)からフライアッシュのご提供をいただいた。ここに記して謝意を表する。

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