

論文 廃棄資源のみからなるコンクリートの強度発現性と竹筋の利用に関する検討

堀井 克章^{*1}・栗飯原 典央^{*2}・橋本 詩穂^{*3}・多田 孝^{*4}

要旨：フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、脱硫石こう、高炉スラグ骨材、再生骨材などの産業廃棄資源のみで製造するコンクリートでは、初期強度発現性の悪さや補強用鋼材の腐食が問題となる¹⁾。本研究では、このコンクリートの強度発現性に及ぼす練混ぜ水や養生温度の影響、鋼材や竹材の劣化状況、小型はりの曲げ載荷試験における補強材の効果などを検討した。その結果、このコンクリートでは、加熱養生が初期強度発現に有効で、回収水や海水を使用しても流動性や強度は低下せず、鉄筋は早期材齢から腐食するがその後の進展は小さく、竹材は湿潤下で強度低下するものの、はりの補強効果があることなどが確認できた。

キーワード：産業廃棄資源、フライアッシュ、高炉スラグ、脱硫石こう、回収水、竹筋

1. はじめに

コンクリートの生産量は、先進国で頭打ちの傾向があるものの、世界的には増加しており、その量は膨大である。コンクリートは、製造時に大量の炭酸ガスを排出するセメント、採取時に周辺の生態系を破壊する天然骨材などを大量に消費する環境負荷の高い建設材料である。

また、世界的にコンクリート構造物の老朽化などに伴う解体で生じるコンクリート塊、石炭火力発電所などから出る石炭灰、金属精錬所などから出る各種スラグなどが増加しており、これらの有効な再資源化技術が求められている。

一方、熱帯林の破壊が国際的な環境問題となっているが、わが国では里山の荒廃が深刻化している。その要因の一つに、かつては様々な用途に使われた竹林の管理不足が挙げられており、その有効利用が各地で問題となっている。

筆者らは¹⁾、熱帯材の合板型枠に代わる繊維補強セメントモルタル製の永久埋設型枠の開発、セメントや天然骨材を全く使わず、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、脱硫石こう、高炉ス

ラグ骨材、再生骨材などの産業廃棄資源のみからなるコンクリート（以下、廃棄資源コンクリートと略す）の開発などを行っている。その成果として、通常のセメントコンクリートと同じ方法で同様な流動性や強度を有する廃棄資源コンクリートを製造し、永久型枠との複合化に成功した。しかし、廃棄資源コンクリートでは初期強度発現性が悪く、これと接する鋼製型枠などが腐食する問題なども確認している。

そこで、本研究では、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、脱硫石こう、高炉スラグ骨材、再生骨材、回収水などからなる廃棄資源コンクリートの初期強度発現性に及ぼす養生温度や練混ぜ水の影響を調査するとともに、その補強材として鋼材やその代替材とする竹材の劣化状況を観察し、これらを鉄筋や竹筋とした廃棄資源コンクリートはりを作製して曲げ性状を調査し、竹の有効利用を検討することにした。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

本実験は、廃棄資源コンクリートの初期強度

*1 阿南工業高等専門学校 建設システム工学科助教授 工博 (正会員)

*2 高知工科大学 工学部社会システム工学科4年生

*3 長岡技術科学大学 工学部建設工学課程3年生

*4 阿南工業高等専門学校 技術室

発現性、廃棄資源コンクリートにおける鋼材・竹材の劣化状況および鉄筋・竹筋廃棄資源コンクリートはりの曲げ性状に関する3種からなる。

3種の実験におけるコンクリートの使用材料を表-1に示す。フライアッシュはII種、高炉スラグは石こうを含有しない4000および脱硫石こうはフライアッシュと同様に石炭火力発電所から排出される二水タイプである。初期強度発現性に関する実験では、一般的な上水道水以外に5種の水を練混ぜ水として使用した。酸性水と還元水は、NaClを質量で1%添加した蒸留水を電気分解し(pHは前者が2.3で後者が11.8)、回収水はこの実験で製造した廃棄資源コンクリートと比較用普通コンクリートを各々質量で9倍の上水道水に混ぜて翌日上澄み水を回収し、人工海水は市販品を通常の海水濃度で製造した。

これらの材料を用いて製造したコンクリートの示方配合を表-2に示す。過去の研究成果を参考に¹⁾、廃棄資源コンクリートの結合材としたフライアッシュ、高炉スラグ微粉末および脱

硫石こうを質量比で1:1:0.3とし、廃棄資源コンクリートの水結合材比を40~45%として、単位水量を190~195kg/m³とし、目標スランプは18cmと普通コンクリートと比べてやや大きく設定した。これは、廃棄資源コンクリートが、粉体を多く使うために粘性が高く、締固め成形に配慮したものである。

なお、廃棄資源コンクリートでは初期強度発現性が悪いため、設備などの都合で加熱養生を採用しない鉄筋・竹筋廃棄資源コンクリートでは、刺激剤として水酸化カルシウムを結合材(フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、脱硫石こう)に対して質量で1%外割添加した。

鋼材・竹材の劣化に関する実験では、φ20mmの磨き棒鋼と寸法形状が安定した中国産孟宗竹の串(皮有;9mm幅×3mm厚、皮無;15mm幅×3mm厚)を使用し、鉄筋・竹筋コンクリートはりに関する実験では、D6(SD390)の異形鉄筋と阿南市産の孟宗竹を加工した竹筋(皮付;7mm厚×9mm幅)を使用した。これらの竹は、

表-1 コンクリートの使用材料

実験	種類	諸性状
初期強度・竹筋コンクリートはり	フライアッシュII種:F	密度2.34g/cm ³ 、粉末度3700cm ² /g、SiO ₂ 56.7%、強熱減量1.5%
	高炉スラグ微粉末4000:B	密度2.91g/cm ³ 、粉末度4000cm ² /g、塩基度1.85、強熱減量0.1%、石こう含有せず
	脱硫石こう:G	密度2.29g/cm ³ 、粉末度830cm ² /g、強熱減量20.5%
	高炉スラグ細骨材:BS	最大寸法5mm、表乾密度2.69g/cm ³ 、吸水率2.46%、粗粒率3.01
	高炉スラグ粗骨材1505:BG	最大寸法15mm、表乾密度2.49g/cm ³ 、吸水率3.43%
	高炉スラグ粗骨材2005:BG	最大寸法20mm、表乾密度2.63g/cm ³ 、吸水率3.51%
	普通ポルトランドセメント:C	密度3.15g/cm ³ 、粉末度3480cm ² /g
	川砂:NS	最大寸法5mm、表乾密度2.62g/cm ³ 、吸水率2.29%、粗粒率2.83
	砕石:NG	最大寸法15mm、表乾密度2.62g/cm ³ 、吸水率1.40%
	水:W	上水道水、電解水(酸性水、還元水)、人工海水、回収水(普通コンクリート、廃棄資源コンクリート)
鋼材・竹材の劣化状況	フライアッシュII種:F	密度2.36g/cm ³ 、粉末度4080cm ² /g、SiO ₂ 56.3%、強熱減量1.3%
	高炉スラグ微粉末4000:B	密度2.91g/cm ³ 、粉末度3940cm ² /g、塩基度1.85、石こう含有せず
	脱硫石こう:G	密度2.29g/cm ³ 、粉末度830cm ² /g、強熱減量20.5%
	高炉スラグ細骨材:BS	最大寸法5mm、表乾密度2.78g/cm ³ 、吸水率0.60%、粗粒率3.12
	高炉スラグ粗骨材:BG	最大寸法20mm、表乾密度2.63g/cm ³ 、吸水率3.51%
	再生粗骨材:RG	最大寸法20mm、表乾密度2.52g/cm ³ 、吸水率4.72%、路盤用
	普通ポルトランドセメント:C	密度3.16g/cm ³ 、粉末度3280cm ² /g
	川砂:NS	最大寸法5mm、表乾密度2.62g/cm ³ 、吸水率2.29%、粗粒率2.83
	砕石:NG	最大寸法20mm、表乾密度2.62g/cm ³ 、吸水率1.40%
	水:W	上水道水

表-2 コンクリートの示方配合

実験	配合名	粗骨材最大寸法(mm)	目標スランプ(cm)	水結合材比(%)	目標空気量(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)										
							W	C	B	F	G	NS	BS	NG	BG	RG	CH
初期強度発現性	スラグ	20	18	40	2	50	190	0	206	206	62	0	805	0	760	0	0
鋼材・竹材の劣化状況	スラグ	20	18	45	2	50	190	0	192	192	38	0	898	0	848	0	0
	再生		8	55		50	190	345	0	0	0	918	0	918	0	0	0
	普通		8	55		52	195	0	188	188	57	0	853	0	729	0	4
鉄筋・竹筋コンクリートはり	スラグ	15	18	45	2	52	195	0	188	188	57	0	853	0	729	0	4
	普通	15	8	55		52	195	355	0	0	0	909	0	820	0	0	0

注) スラグ:高炉スラグ粗骨材使用廃棄コンクリート、再生:再生粗骨材使用廃棄コンクリート、普通:普通コンクリート
W:水、C:セメント、B:高炉スラグ微粉末、F:フライアッシュ、G:脱硫石こう、NS:川砂、BS:高炉スラグ細骨材
NG:砕石、BG:高炉スラグ粗骨材、RG:再生粗骨材、CH:Ca(OH)₂

使用前に 100℃ 炉乾燥を行い、しみ出た油分などをウエスで拭き取った。

2.2 製造と試験

3 種の実験全てで、コンクリートは、一般的なパン型強制練りミキサを用い、水以外の材料を 30 秒間空練り後、水を投入して 2 分間攪拌して練り混ぜた。練り混ぜ後、直ちに練り上がり温度測定やスランプ試験を行った。

強度発現性に関する実験では、漏水対策を施したプラスチック製軽量型枠で $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱供試体を作製し、型枠のまま 20, 30 および 40℃ の温水に材齢 3 日まで浸した後、脱型して 20℃ 水中養生に移し、所定材齢で圧縮強度試験を行った（供試体数；各条件 3 本）。

鋼材の劣化に関する実験では、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱型枠の中央に $\phi 20\text{mm}$ みがき棒鋼を固定して打設したコンクリート（かぶり 40mm）を材齢 3 日で脱型し、材齢 7 日までの 20℃ 水中養生後、水中湿潤（養生水は 1 ヶ月ごとに交換）と乾湿繰返し（1 日間水に浸けて 6 日間自然乾燥を繰返す）で養生した。この供試体は、鋼材の自然電位（飽和カロメル照合電極）や割裂して取り出した鋼材の腐食面積率を測定した（供試体数；各条件 2 本）。

竹材の劣化に関する実験では、10cm 長に切断した竹試料をコンクリート 50あたり 30とした養生水に浸漬（養生水は 2 週間ごとに交換）、曲げ強度や表面色を測定した（皮有は皮面と裏面の両方で曲げ載荷や表面色測定を実施、供試体数；各条件 8 本以上）。

なお、コンクリートに使用した材料を浸漬した水（材料に対する水の質量は 2 倍）やコンクリート養生水の pH 測定も行った。

はりに関する実験では、竹筋の本数（2・3・4 本）や表皮の位置（下・横・上）、せん断スパン比（2.5・1.5）、試験体の状態（乾燥・湿潤）を要因として 8cm 高×10cm 幅×40cm 長の小型はり（有効高さ 5cm、せん断補強筋なし）を作製し、材齢 28 日で曲げ載荷試験を行った（**図-1** 参照、供試体数；各条件 3 本）。なお、比較用に、

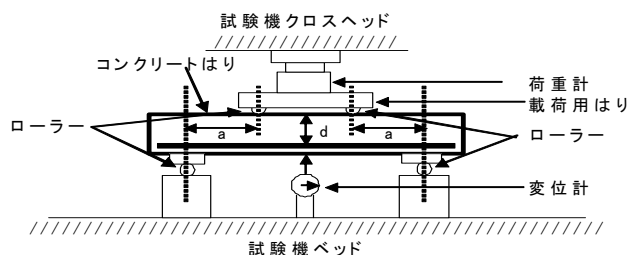


図-1 はりの曲げ載荷状況

鉄筋を用いたはり（2@D6）も作製し、コンクリートの圧縮試験や竹筋の引張試験も行った。

3. 実験結果と考察

3.1 廃棄資源コンクリートの強度発現性

廃棄資源コンクリートに使用した材料を 1 週間浸した上水道水（材料と水の質量比は 1：2）の pH を**図-2** に示す。この結果より、いずれの材料もアルカリ性を示しており、高炉スラグの潜在水硬性やフライアッシュのポズラン活性が促される可能性を示唆している。

各種の練混ぜ水を使った廃棄資源コンクリートの圧縮強度とスランプを**図-3** に示す（スランプ；□内の数値）。活性水は、モルタルの流動性改善に効果があると過去に報告しているが²⁾、本実験では練混ぜ水の違いによるスランプの差

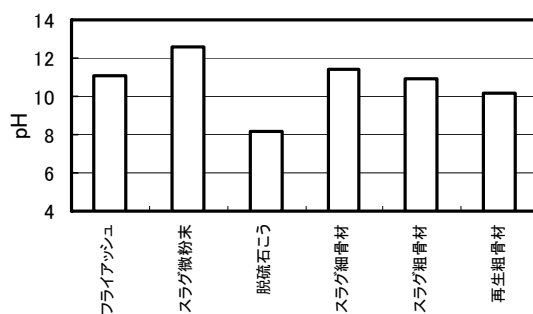


図-2 コンクリート用材料の pH

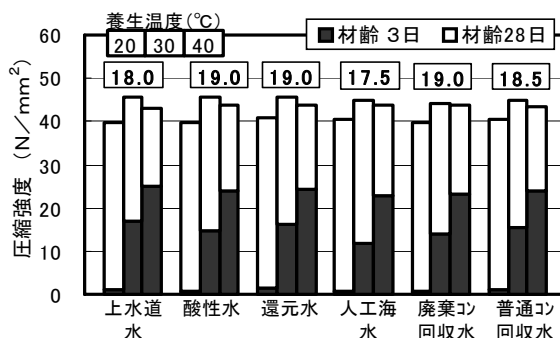


図-3 コンクリートの圧縮強度とスランプ

異はほとんどみられず、いずれの配合でも 18cm 程度の値を得ている。これは、モルタルに粗骨材を混入することで、水や微粒分が少なくなったことの影響と思われる。

圧縮強度は、いずれの練混ぜ水を用いたコンクリートも、20℃養生の材齢 3 日強度が 1N/mm² 程度で、初期強度発現性が非常に悪いといえる。しかし、30℃養生では 15 N/mm² 程度、40℃養生では 25 N/mm² 程度の強度が得られている。これは、養生温度が高くなり、高炉スラグの潜在水硬性やフライアッシュのポゾラン反応などが促進されたものと思われる。一方、20℃養生の材齢 28 日強度は、いずれの練混ぜ水でも 40 N/mm² 程度と高い値となる。また、材齢に伴う強度の伸びは、養生温度が高くなるとやや頭打ちとなり、28 日で 30℃と 40℃とが逆転するが、いずれも 40N/mm² を超える高い値を有しており、廃棄資源コンクリートの強度発現には、養生温度をやや高くするのが良いといえる。

また、練混ぜ水の違いが及ぼす圧縮強度への影響は、スランプと同様に差異がほとんどみられない。したがって、流動性や強度の面で、製造に手間や経費を要する電解水を利用する意義はなく、逆に海水や回収水を用いることの悪影響がみられないため、資源を有効利用する観点から、これらの水に利用価値があるといえる。

なお、養生温度が高くなるほど、材齢に伴う強度の増進が低くなるのは、コンクリートを構成する各材料が膨張した状態で硬化が進むことなどによるものと思われる。

3.2 鋼材と竹材の劣化状況

スラグ粗骨材と再生粗骨材を用いた廃棄資源コンクリートおよび普通コンクリートの養生水の pH を示した図-4 より、初期材齢では、普通コンクリートで約 13 だが、スラグ粗骨材や再生粗骨材を用いた廃棄資源コンクリートでも約 12 の高いアルカリ性を有することがわかる。これは、各材料を浸漬した水の pH がいずれもアルカリ性を示したことからも裏付けられる。しかし、材齢の進行に伴っていずれのコンクリー

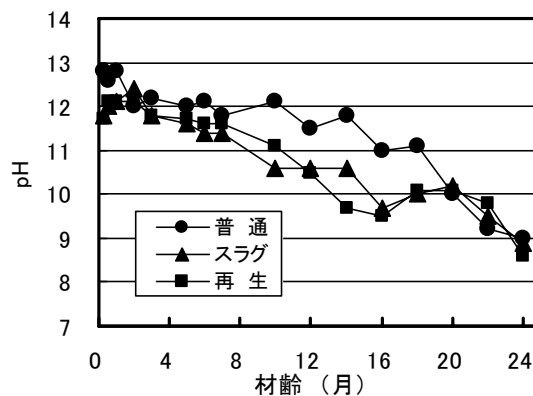


図-4 養生水の pH (湿潤)

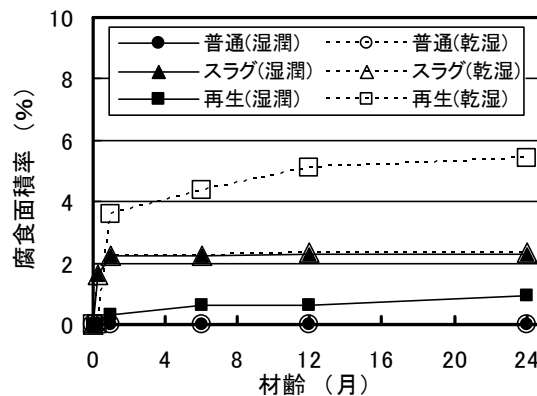


図-5 鋼材の腐食面積率

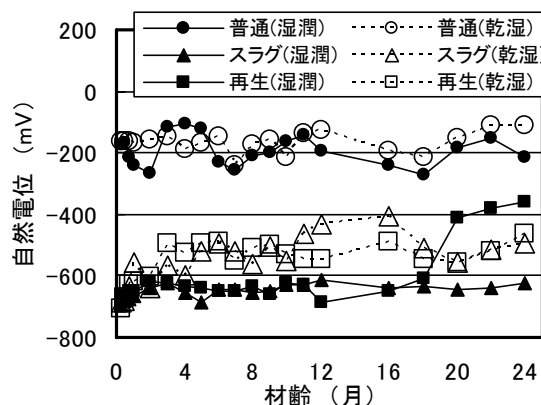


図-6 鋼材の自然電位

トもアルカリ性が弱まる傾向がみられた。これは、アルカリが養生水に溶出したり、高炉スラグの潜在水硬性やフライアッシュのポゾラン反応に関与することなどによるものと考えられる。

図-5 は、これらのコンクリートに埋め込んだ鋼材の腐食面積率を示したものである。これより、廃棄資源コンクリート中の鋼材は、早期から腐食が生じるものの、材齢に伴う進行は遅いことがわかる。これは、スラグや石こうに含まれる硫黄分が初期に鋼材を腐食させるもの、養生水に溶出したり、高炉スラグの潜在水硬性

などの反応で固定化されることなどによるもの
と考える。なお、再生粗骨材使用の廃棄資源コン
クリートの乾湿養生で腐食がやや大きいのは、
再生粗骨材が吸水率の高いセメント分を有して
おり、アルカリ分、硫黄分、酸素、水などの移
動が起こり易いことによるものと思われる。

また、鋼材の自然電位を示した図-6より、
廃棄資源コンクリート中の鋼材は、初期材齢か
らかなり低い電位を示しており、腐食の発生を
自然電位で推知することが可能といえる。しか
し、廃棄資源コンクリートでは鋼材の自然電位
が材齢とともに高くなる傾向があるので、腐食
の観察とともに長期の検討が必要といえる。

竹材を浸漬したコンクリート養生水の pH を
示した図-7より、初期材齢では4~6程度の弱
酸性から、材齢2~3ヶ月で8~9程度の弱アル
カリ性となり、その後7~8程度のほぼ中性を
示すことがわかる。竹材を浸漬後数週間は養生
水が褐色化しており、竹材の成分の溶出が影響
するものと思われる。

スラグ粗骨材を用いた廃棄資源コンクリート
の養生水に浸漬した竹材の曲げ強度を示した図
-8からは、竹材の強度は皮無より皮有が高い
ことがわかる。これは、竹繊維の密度が皮近く
で高いことによるものと思われる。なお、強度
は材齢6ヶ月程度まで徐々に低下し、早期材齢
では強度試験前に乾燥すると湿潤状態のものよ
りも高い値を示すが、浸漬期間が長くなると両
者の差がほとんどなくなることがわかる。

表-3は、3種のコンクリートの養生水や水
道水に浸漬した竹材を1日乾燥させ、L*a*b*表
色系の色彩計で測定した表面色である。この表
より、竹材は全般にL*やb*が大きく黄白色系
だが、水に浸漬すると、身の部分はL*やb*が
低下するので黄色が薄れて黒くなり、皮の部分
はa*が負から正となるので緑色がなくなること
がわかる。これらの傾向は、4種の水とも同様
で、いずれも竹材を水に漬けると半年程度は
強度の低下傾向があるため、養生水のpHや竹
材の色が変わることと併せ、湿潤下で竹材を補

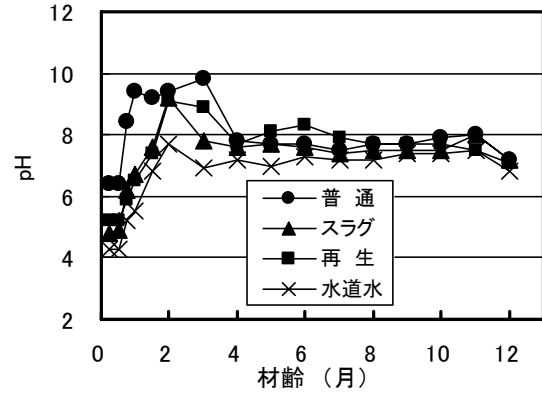


図-7 養生水の pH (竹材浸漬)

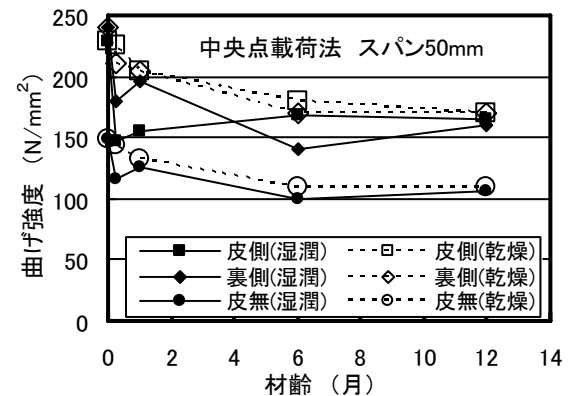


図-8 竹材の曲げ強度 (スラグ, 養生水浸漬)

表-3 竹材の表面色 (L*a*b*表色系)

種類	材齢	L*			a*			b*		
		0月	3ヶ月	2ヶ月	0月	3ヶ月	2ヶ月	0月	3ヶ月	2ヶ月
普通	皮付・皮側	56	52	56	-3	1	2	23	25	27
	皮付・裏側	73	68	56	6	7	5	25	22	18
	皮無	81	66	61	4	6	6	24	21	20
スラグ	皮付・皮側	56	51	53	-3	1	2	24	22	25
	皮付・裏側	73	65	57	6	6	4	25	22	16
	皮無	81	66	59	4	7	5	24	23	17
再生	皮付・皮側	56	50	55	-3	1	2	24	22	25
	皮付・裏側	73	66	54	5	7	4	25	22	14
	皮無	81	66	54	4	6	5	24	20	15
水	皮付・皮側	55	50	56	-3	1	2	23	22	24
	皮付・裏側	73	67	54	6	6	5	25	20	14
	皮無	81	70	61	4	5	4	24	21	18

強材として利用する場合は注意が必要といえる。

3.3 鉄筋と竹筋を用いたコンクリートはり

材齢28日で、竹筋を配する廃棄資源コンクリ
ートの圧縮強度は29N/mm² (弾性係数
23kN/mm²)で、普通コンクリートの圧縮強度は
39N/mm² (弾性係数25kN/mm²)となつた。阿
南市産孟宗竹の竹筋は、乾燥・湿潤を問わず
260N/mm²の引張強度と20kN/mm²の弾性係
数を有するが(図-9参照、両端に節を有する試
料の中央部断面を薄く加工して載荷)、リグニン
などからなる木質部は湿潤下でカビが生じやす
く、その対策が必要といえる。

基準とした竹筋廃棄資源コンクリートはりの

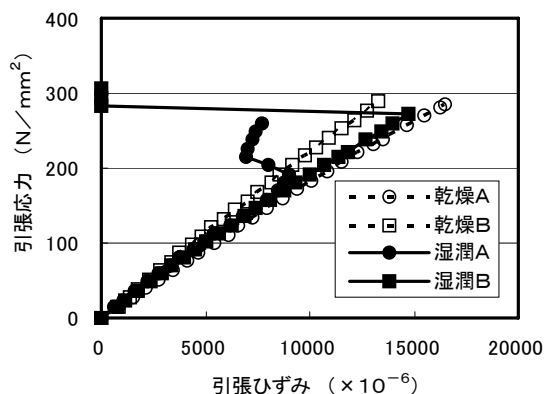


図-9 竹筋の応力ひずみ関係 (一例)

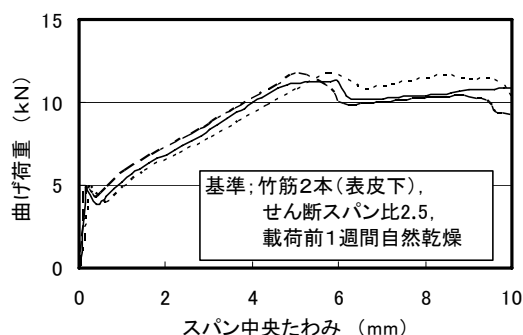


図-10 はりの荷重たわみ曲線 (一例)

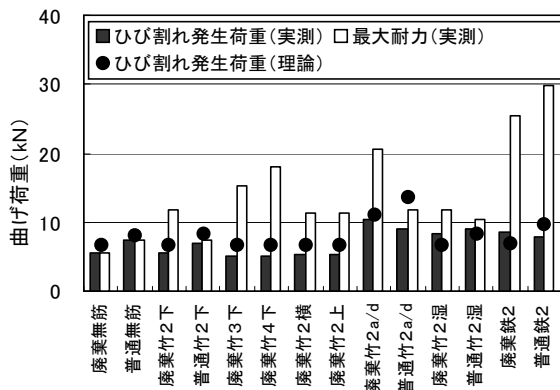


図-11 はりの曲げ試験結果

荷重たわみ曲線および全てのはりの曲げ試験結果を示した図-10および図-11より、竹筋は、コンクリートのひび割れ発生後の耐力を高めるが、その効果は鉄筋よりも低いといえる。これは、竹筋の付着性が悪いことによるものと思われる。また、耐力は、竹筋の本数を増すと高まるが、繊維密度の高い表皮位置(上・下・横)の影響がみられないこと、ひび割れ発生荷重や耐力は、せん断スパン比が小さい方が高く、試験前に乾燥させるよりも湿潤養生を続けた方が高いこと、耐力は、竹筋の場合に普通より廃棄コンクリートの方が高いことなども確認できる。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に要約する。

フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、脱硫酸こう、高炉スラグ骨材、再生骨材などからなる廃棄資源コンクリートは、比較的高いアルカリ性を示すが、これに埋め込んだ鋼材は劣化の進行が遅いものの早期材齢で腐食し、自然電位もかなり低い。廃棄資源コンクリートの養生水に浸漬した竹材は、強度の低下や色の変化がみられ、養生水のpHも変化する。

廃棄資源コンクリートは、養生温度を高くすると初期強度発現性が改善し、海水や回収水を利用しても流動性や強度の低下はみられない。竹材は、強度が高く、竹筋として用いた廃棄資源コンクリートはりの耐力が向上するが、付着性の改善やカビの抑制が望まれる。

したがって、廃棄資源コンクリートに鋼材や竹材を利用するには、これらの劣化抑制策や、より長期の耐久性試験が必要といえる。

謝辞

本研究では、科学研究費補助金(基盤研究C一般 14550875)やワークスタッフ冠教育研究助成金を一部で使用し、徳島大学、新日鐵高炉セメント、四国電力、太平工業、セイアおよび住金鉱化から材料の提供と阿南工業高等専門学校卒業研究生の実験協力をいただきました。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 堀井克章ほか: 産業廃棄資源のみからなる現場打ちコンクリートと繊維補強セメントモルタル製永久型枠との複合化, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1495-1500, 2005
- 堀井克章, 栗田工: 活性水やビニロン繊維を用いた永久型枠用フライアッシュ多量使用モルタルの諸性状, 「廃棄資源のコンクリート材料への有効利用に関するシンポジウム」論文集, JCI 中国四国支部, pp.90-96, 2001