瓦エアモルタルの硬化物性

湯川圭悟 *1　上原匠 *2　中田康平 *2　亀井則幸 *3

*1　日本工営株式会社　交通運輸事業部道路橋梁部橋梁・構造グループ（〒102-8539 東京都千代田区九段北 1-14-6）
*2　名古屋工業大学　大学院工学研究科社会工学専攻（〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町）
*3　一般社団法人瓦チップ研究会（〒501-3306 岐阜県加茂郡富加町大山 1000）

要旨：粉体を多く含む瓦細骨材の有効利用を目的とした瓦エアモルタルの用途に、高い強度を必要としない飛砂防止などの「被覆材」を想定し、硬化物性の把握を行った。エアモルタルの圧縮強度は、水セメント比に加え空気量、砂セメント比が影響することから、瓦エアモルタルに対してこれらをパラメータに54 配合を設定し、それぞれが圧縮強度に及ぼす影響について考察した。次に、被覆材に適用可能な配合に対して、各種強度試験、弾性係数試験、透水係数試験を実施した。その結果、瓦エアモルタルの圧縮強度への影響因子とその度合い、間隙比から圧縮強度と透水性能を、圧縮強度からは静弾性係数、曲げ強度、引張強度が推定できることを明らかにした。

キーワード：瓦資源、細骨材、エアモルタル、空隙率、圧縮強度、産業廃棄物

1.　はじめに

家屋解体等により発生する使用済み屋根瓦の量は、年間 150 万トン程度であり、現状では約 9 割が埋め立て処分されていると推計される。ところで、全国各地で発生する使用済み屋根瓦を再資源化するには、細かく破砕して篩に掛けて粒度調整し、用途に応じて、例えばコンクリート用骨材程度の粒径に整粒する必要がある。しかし、破砕・整粒する工程中に発生する粉体の取り扱いが困難であり、利用を妨げる一因となっている。Fig. 1 に使用済み屋根瓦を用途に応じて破砕・整粒した再生資源（以下、瓦骨材と称する）の粒度曲線を示す。図中の破線は土木学会標準示方書 施工編の「骨材の粒度の標準」である。15-5mm および 10-5mm 相当の瓦骨材は標準粒度の範囲内に収まるが、細骨材相当の 5-0mm の瓦骨材（以下瓦チップと称する）は、1.2mm 以上と 0.15mm 以下が多いことがわかる。本研究室では、使用済み屋根瓦のゼロエミッションを目標に、瓦チップの軽量・多孔質構造に着目し、粉体を多く含んだ排出時の状態での合理的な利用先としてエアモルタルを対象に研究を進めており、これまでにフレッシュ性状の制御方法に加え、細骨材として瓦チップを用いたエアモルタル（以下、瓦エアモルタルと称する）が高い透水性を有することを提示した[1)]。

そこで本研究では、瓦チップならびに瓦エアモルタルの用途拡大を目的に、先ず、物性制御の観点からモルタルの硬化物性の把握を行った。瓦エアモルタルの用途には、高い強度を必要としない飛砂防止などの「被覆材」を想定した。エアモルタルの圧縮強度は、水セメント比に加え空気量、砂セメント比が影響することから、これらをパラメータに配合を設定し、それぞれが圧縮強度に及ぼす影響について考察した。次に被覆材に適用可能な配合を選定して、各種強度試験、弾性係数試験、透水係数試験を実施した。

2.　圧縮強度

2.1　実験概要

先ず、瓦エアモルタルの圧縮強度への影響因子とその影響度合いを把握するため、一般的なモルタルからエアモルタルに至る異なる空気量での圧縮強度試験を行った。Table 1 に使用材料を示す。セメントに普通ポルトランドセメント、細骨材には全量瓦チップを用いた。表中の ACV は、BS 812「骨材破砕値試験方法：British Standards の BS812 Testing aggregates Part 110（Methods for determination of aggregate cushy value：ACV」による「破砕値」を示す。破砕試験は粗骨材を対象にしていることから、小径シリンダを用いて試料自体の相対的な強度差を参考値として記載した。Table 1 の砕砂は後述する試験において用いたものである。表から瓦チップの吸水率が砕砂の 10 倍程度であることがわかる。流動性（フロー値）の制御には高性能 AE 減水剤、空気量の制御には起泡剤を用いた。先ず、圧縮強度と空気量の関係を把握するため、配合は砂セメント比 2.0、2.5、3.0 の 3 水準、水セメント比 30 %、40 %、50 % の 3 水準、空気量 0 %、10 %、20 %、30 %、40 %、50 % の 6 水準の計 54 配合とした。Table 2 に配合表を示す。起泡剤の添加量は予備実験から得られた近似曲線を基に決定した。フレッシュモルタルのフロー値は一律 180 ± 20mm、目標空気量は ± 5 % の許容範囲を設けたが、圧縮強度と空気量の関係把握の観点から許容範囲を超え

たデータも採用した。

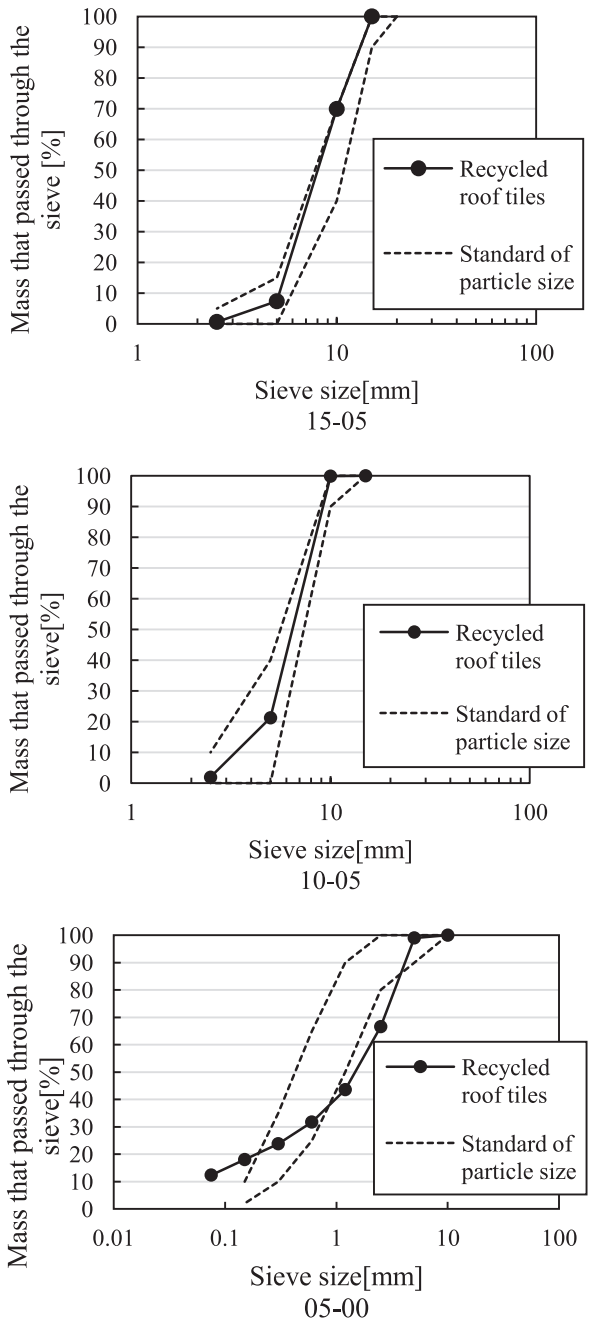


Fig. 1　Grading curve of crushed roof tiles

Table 1　Used materials for this study

Materials	Type	Symbol	Physical property of materials
Cement	Normal portland cement	C	Density：3.16g/cm^3
Fine aggregate	Recycled roof tiles	T	Saturated surface-dry density：2.21g/cm^3, Maximum dry density：1.99g/cm^3, Absorption：11.24 %, F.M.：3.17, Solid content：77.9 %, ACV：22.52 %
	Crushed sand	S	Saturated surface-dry density：2.68g/cm^3, Maximum dry density：2.65g/cm^3, Absorption：1.22 %, F.M.：2.74, ACV：2.86 %
Chemical admixture	High performance AE water reducing agent	SP	Polycarboxylic acid type, Non-air entrained type
	Foaming agent	Fa	Alkyl allyl sulfonate type

エアモルタルの練混ぜはミックスホーム式(通常のJIS に準拠)、フレッシュ試験は NEXCO 試験方法「エアモルタルおよびエアミルクの試験方法：JHS A 313」に準拠し、空気量試験とフロー試験を行った。さらに、供試体ごとの空気量は、打設時の供試体の質量から個々に算出した。圧縮強度試験は「コンクリートの圧縮強度試験方法 JIS A 1108」に準拠した。供試体は ϕ50×100mm の円柱供試体を 3 本ずつ作製し、水分が逸散しないように打設面をビニールで封緘し、20±2.5 ℃、60±20 %の環境下で 28 日間密封養生した。脱型は所定の圧縮強度試験の前日に行った。

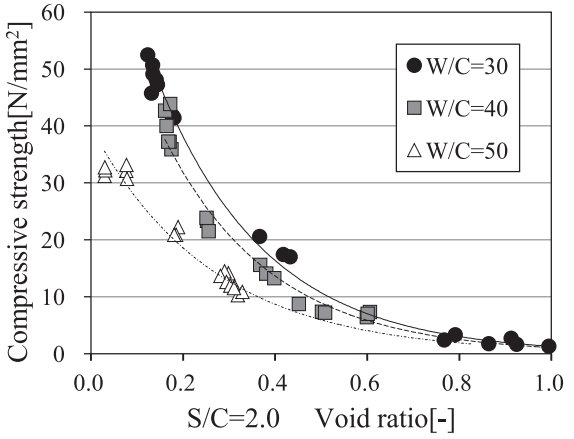
2. 2　試験結果および考察

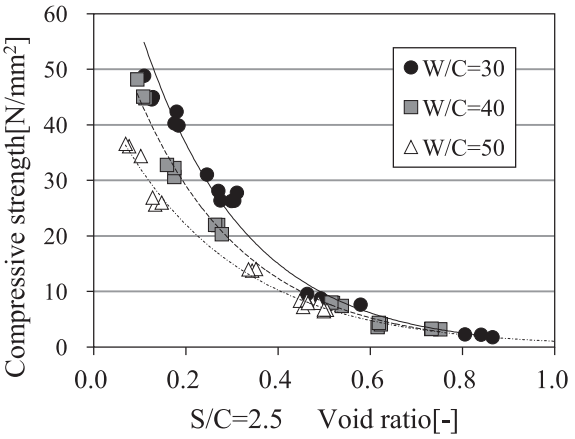
Fig. 2 に砂セメント比ごとの間隙比と圧縮強度の関係

Table 2　Unit weight

Combination	Sand cement ratio (S/C) [-]	Water cement ratio (W/C) [%]	Air content [%]	Unit weight [kg/m^3]			SP C×[%]	Fa C×[%]
				Water W	Cement C	Roof tiles T		
2.0-30-0	2.0	30	0	197	657	1315	1.75	0
2.0-30-10	2.0	30	10	177	592	1183	1.75	0.05
2.0-30-20	2.0	30	20	158	526	1052	1.75	0.1
2.0-30-30	2.0	30	30	138	460	920	3.5	0.2
2.0-30-40	2.0	30	40	118	394	789	3.5	0.5
2.0-30-50	2.0	30	50	99	329	657	3.7	1
2.0-40-0	2.0	40	0	247	617	1233	0.5	0
2.0-40-10	2.0	40	10	222	555	1110	0.5	0.01
2.0-40-20	2.0	40	20	197	493	987	0.5	0.03
2.0-40-30	2.0	40	30	173	432	863	0.8	0.16
2.0-40-40	2.0	40	40	148	370	740	0.8	0.4
2.0-40-50	2.0	40	50	123	308	617	0.6	1.2
2.0-50-0	2.0	50	0	290	581	1162	0.1	0
2.0-50-10	2.0	50	10	261	523	1046	0.09	0.01
2.0-50-20	2.0	50	20	232	465	929	0.11	0.1
2.0-50-30	2.0	50	30	203	407	813	0.3	0.5
2.0-50-40	2.0	50	40	174	349	697	0.3	0.8
2.0-50-50	2.0	50	50	145	290	581	0.4	1.2
2.5-30-0	2.5	30	0	172	572	1430	4.5	0
2.5-30-10	2.5	30	10	154	515	1287	4.25	0.2
2.5-30-20	2.5	30	20	137	458	1144	5	0.27
2.5-30-30	2.5	30	30	120	401	1001	5	0.3
2.5-30-40	2.5	30	40	103	343	858	4	0.5
2.5-30-50	2.5	30	50	86	286	715	4	1
2.5-40-0	2.5	40	0	216	541	1353	0.8	0
2.5-40-10	2.5	40	10	195	487	1218	0.8	0.01
2.5-40-20	2.5	40	20	173	433	1082	0.8	0.04
2.5-40-30	2.5	40	30	152	379	947	1.4	0.2
2.5-40-40	2.5	40	40	130	325	812	1.2	0.5
2.5-40-50	2.5	40	50	108	271	677	1.5	1.5
2.5-50-0	2.5	50	0	257	513	1284	0.5	0
2.5-50-10	2.5	50	10	231	462	1155	0.5	0.01
2.5-50-20	2.5	50	20	205	411	1027	0.8	0.1
2.5-50-30	2.5	50	30	180	359	899	0.8	0.5
2.5-50-40	2.5	50	40	154	308	770	0.6	1
2.5-50-50	2.5	50	50	128	257	642	0.6	1.5
3.0-30-0	3.0	30	0	152	507	1520	5	0
3.0-30-10	3.0	30	10	137	456	1368	5	0.1
3.0-30-20	3.0	30	20	122	405	1216	5	0.24
3.0-30-30	3.0	30	30	106	355	1064	5	0.3
3.0-30-40	3.0	30	40	91	304	912	5	0.8
3.0-30-50	3.0	30	50	76	253	760	5	1.5
3.0-40-0	3.0	40	0	193	482	1447	1.2	0
3.0-40-10	3.0	40	10	174	434	1302	1.5	0.01
3.0-40-20	3.0	40	20	154	386	1157	1.5	0.1
3.0-40-30	3.0	40	30	135	338	1013	1.8	0.15
3.0-40-40	3.0	40	40	116	289	868	1.8	0.5
3.0-40-50	3.0	40	50	96	241	723	2	1.2
3.0-50-0	3.0	50	0	230	460	1380	0.6	0
3.0-50-10	3.0	50	10	207	414	1242	0.8	0.003
3.0-50-20	3.0	50	20	184	368	1104	0.7	0.025
3.0-50-30	3.0	50	30	161	322	966	0.7	0.1
3.0-50-40	3.0	50	40	138	276	828	1.2	1
3.0-50-50	3.0	50	50	115	230	690	1.1	1.5

＊T is saturated.
＊The amounts of SP and Fa were determined one by one while mixing.





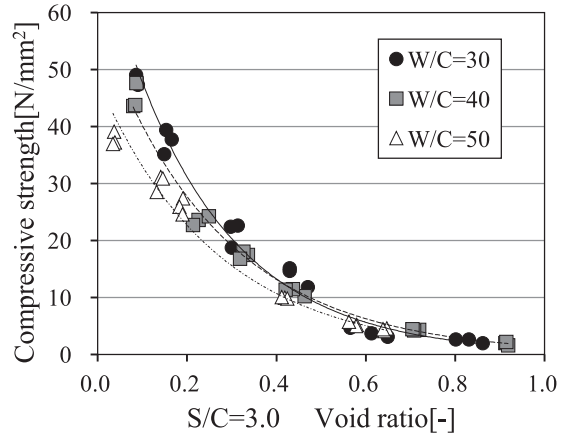


Fig. 2 Relationship between Void ratio and Compressive strength

を示す。間隙比は、「間隙の体積：cm^3」を「固相の体積：cm^3」で割った値であり、空気量が 0 および 50 %の場合、間隙比は 0.00 および 1.00 となる。配合条件により、目標空気量を満たすことができない配合があることがわかる。特に砂セメント比が小さく、水セメント比が大きい場合は、起泡を拘束することが困難と言えよう。砂セメント比に着目すると、一般に、砂セメント比が大きくなると単位セメントペースト量が少なくなり、強度が低下する同様な結果となった。また、今回採用した配合では、砂セメント比が大きくなるに従って、水セメント比の違いによる強度差が小さくなる結果となった。同

Table 3 Unit weight

Combination	Sand cement ratio (S/C) [-]	Water cement ratio (W/C) [%]	Air content [%]	Unit weight [kg/m³]			
				Water W	Cement C	Roof tiles T	Sand S
T-2.5-40-0	2.5	40	0	216	541	1353	0
T-2.5-40-20			20	173	433	1082	0
T-2.5-40-40			40	130	325	812	0
S-2.5-40-0	2.5	40	0	243	606	0	1516
S-2.5-40-20			20	194	485	0	1213
S-2.5-40-40			40	146	364	0	909

じ砂セメント比の配合で水セメント比の影響を比べると、空気量が大きくなると水セメントの差がさらに小さくなる結果となった。この結果から、瓦エアモルタルの強度への影響も水セメント比ではなく、空気量であることがわかる。骨材自体が多孔質な瓦エアモルタルでは、骨材内部の空隙に含まれる水分が水和反応に使用されると考えられる。今回の試験結果からは、砂セメント比が大きくなるにしたがって瓦チップ内の空隙の影響も顕著になり、水セメント比の違いによる強度差が小さくなる結果となったと考察した。また、間隙比 0.70(空気量約 42 %)以上の瓦エアモルタルの圧縮強度は、水セメント比による差が小さいことがわかった。すなわち、空気量の影響が大きくなることが明らかとなった。圧縮強度試験の結果から、全ての配合で圧縮強度は $1N/mm^2$ を上回る結果となった。用途である被覆材は構造的な強度を必要としないと考え、$1N/mm^2$ あれば十分利用可能と判断した。なお、間隙比と圧縮強度には指数関数的な関係が存在し、間隙比から圧縮強度が推定できることが明らかとなった。

3. 静弾性係数および養生条件と強度発現

3.1 実験概要

硬化後の変形性能を把握する目的で静弾性係数試験を行うとともに、併せて材齢と養生条件の違いによる強度発現の把握を行った。Table 3 に配合表を示す。空気量は透水性舗装の規格を参考に既報[1]から、空気量が 40 %を超えると透水性舗装の透水係数の下限値 0.01cm/s を満たすことから 40 %を採用した。また強度に関与する砂セメントと水セメント比は、飛散防止被覆材として用いる場合は、低い強度でも十分機能するとの考えと、空気量が増えることでの強度低下を勘案し、砂セメント比を 2.5、水セメント比 40 %の配合とした。比較対象として空気量 0 %、20 %、そして同配合に砕砂を用いたもの(以下、砕砂エアモルタル)を準備した。供試体は圧縮強度試験と同様に作製し、密封養生と水中養生を行った。材齢 7 日、28 日、91 日において静弾性係数試験および圧縮強度試験(水中養生は圧縮強度試験のみ)を行った。

3.2 試験結果および考察

Fig. 3 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。瓦エアモルタルの近似直線の傾きは砕砂エアモルタルの傾きよりやや小さいがほぼ同程度の値となった。圧縮強度と静

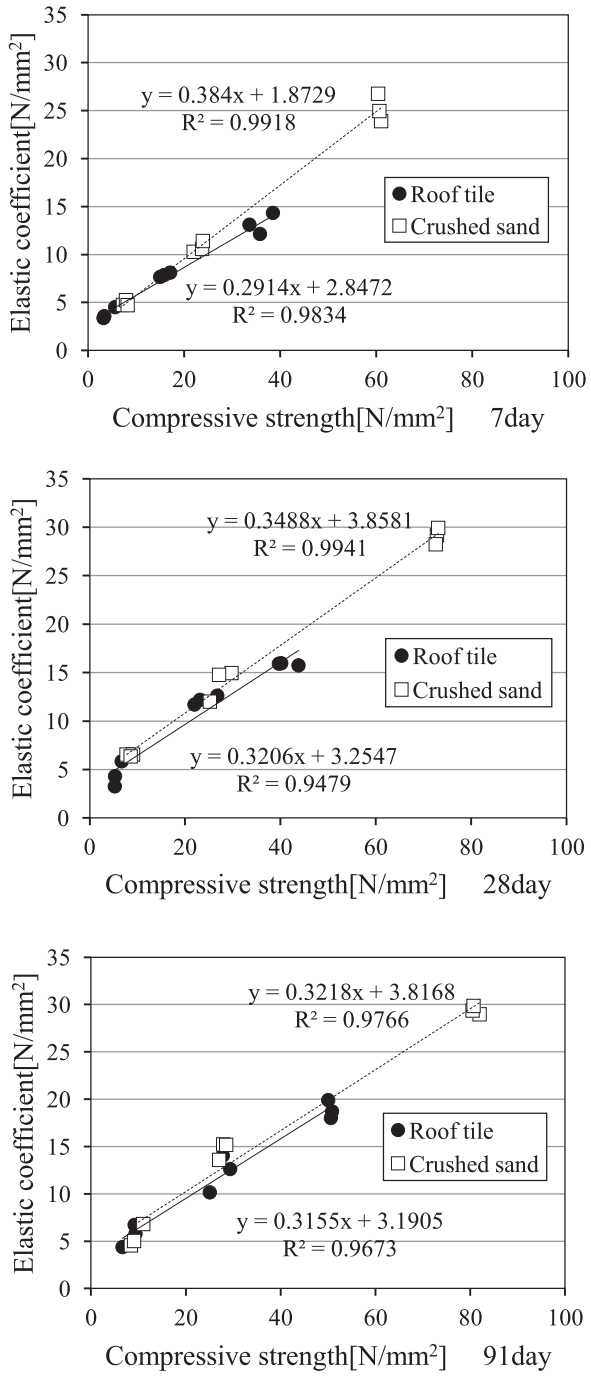


Fig. 3 Relationship between Compressive strength and Elastic coefficient

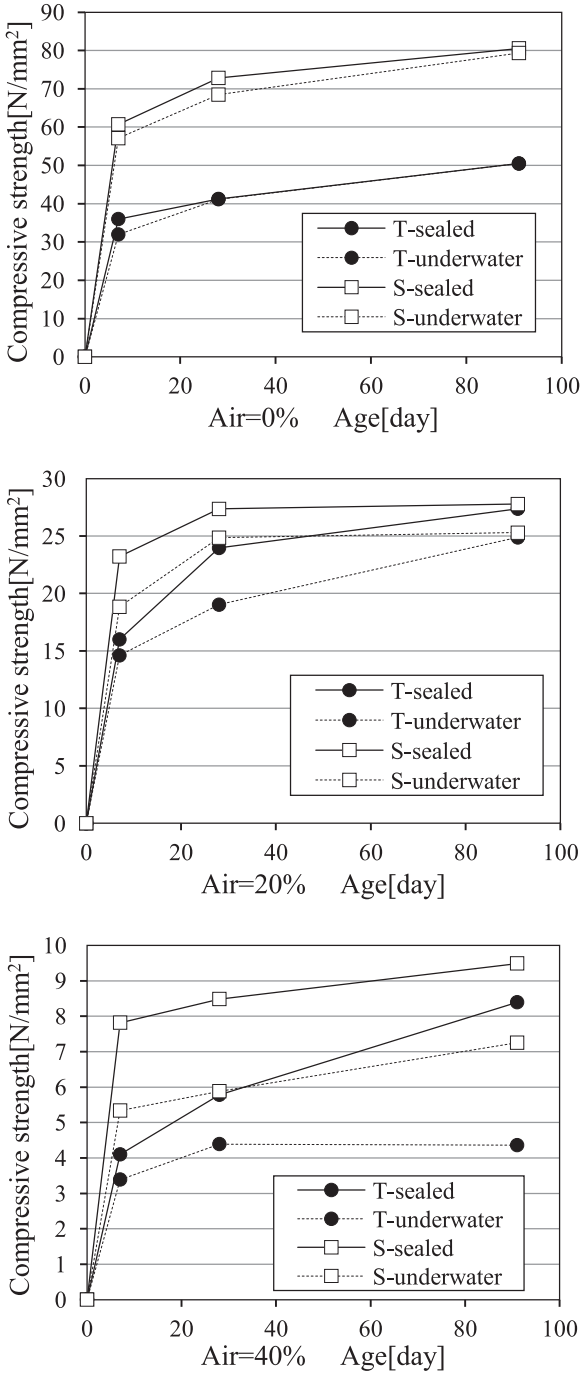


Fig. 4 Compressive strength development

弾性係数には比例関係が存在し、圧縮強度から静弾性係数を推定可能である。

Fig. 4 に目標空気量ごとの材齢と圧縮強度の関係を示す。実際の供試体の平均空気量は、目標空気量 0 %、20 %、40 %に対して、瓦モルタルの場合は 8.5 %、19.9 %、37 %、砕砂モルタルの場合は 2.6 %、22.8 %、38 %であった。瓦チップを用いたモルタルでは空気量を低く抑えることは困難であり、空気を巻き込みやすい結果となった。図から、空気量が同程度となった目標空気量 20 %、40 %の瓦エアモルタルの強度発現は、密封養生では材齢が大きくなると圧縮強度が砕砂エアモルタルに漸近していることがわかる。ただし、空気量 0 %では、砕砂エアモルタル供試体の空気量が 2.6 %であるのに対して、瓦エアモルタル供試体の空気量が 8.5 %となり、空気量による強度への影響が大きく同様な結果とはならなかった。ところで、空気量が多いと、材齢 91 日の水中養生下では砕砂エアモルタルよりも強度低下を起こしているのがわかる。これは瓦エアモルタルの単位ペースト量が少なく空隙が多くなったことに加え、水中養生下では水和反応が進んだのちの空隙が再び水で満たされることにより、低い応力でもひび割れの発

生・進展に至ったと考えられる[2)]。また、空気量が多いと材料による差が小さい結果となった。

4. 透水性能

瓦エアモルタルは、飛散防止被覆材への適用が現実的であるが、雨水などが表面に溜まること無く、下層に浸透することが望ましい。そこで、透水性舗装の規格を参考に、透水係数の下限値 0.01cm/s を満たす空気量として目標空気量を 40 %とし、Table 4 に示す配合で透水試験を実施した。細骨材の差異による影響を比較するため、単位水量と単位セメント量を同量にするように、単位細骨材量を決めた。したがって、砂セメント比は瓦エアモルタルが 2.5、砕砂エアモルタルが約 3.0 となった。透水試験は「ポーラスコンクリートの透水試験方法(案) JCI-SPO3-1」に準じた。

Fig. 5 に空気量と透水係数の関係を示す。透水係数は砕砂エアモルタルの方が大きく、黒木らの研究[1)]とは逆の結果となった。ただし、図から瓦エアモルタルと砕砂エアモルタルのデータを合わせて回帰直線を求めると、決定係数は 0.9779 となったことから、瓦エアモルタルも砕砂エアモルタルと同じ空気量まで増やせば、同様の透水係数が得られる可能性があるといえる。ところで、目標空気量が同じ 40 %でも、瓦エアモルタルの砂セメント比が 2.0、水セメント比が 30 %の黒木らの試験結果[1)]では、空気量 43 %程度の瓦エアモルタルの透水係数は 0.20cm/s であることから、空気量が同程度でも配合条件が異なると透水係数にも差が出る結果となった。すなわち、空気量と透水係数は比例関係にあるが、配合条件によっては比例係数が変わることが示唆され、相関関係については今後の課題とした。

Table 4 Unit weight

Combination	S/C [-]	W/C [%]	Air content [%]	Unit amount [kg/m³]			
				Water W	Cement C	Roof tiles T	Sand S
T-2.5-40-40	2.5	40	40	130	325	812	0
S-3.0-40-40	3	40	40	130	325	0	984

今回のデータでは、回帰直線の決定係数からはエアモルタルの透水係数への骨材の影響は小さく、空気量の影響が大きいと考察したが、透水性能への影響に関しては、実験データが少なく今後の課題とした。

5. 圧縮強度と割裂引張強度及び曲げ強度の関係

5.1 実験概要

圧縮強度との相関性を把握するため、割裂引張強度試験と曲げ強度試験を行った。使用材料は Table 1、配合は Table 3 である。割裂引張強度試験の供試体は ϕ150mm×300mm の鋼製型枠を用い、供試体の高さが型枠の高さのおよそ 2/3 となるように作製した。曲げ強度試験の供試体は 100mm×100mm×400mm の鋼製型枠を用いた。どちらの試験もそれぞれの配合につき 3 本ずつ供試体を作製し、水中で 28 日間養生した。

5.2 結果および考察

Fig. 6 に圧縮強度と引張強度の関係、Fig. 7 に圧縮強度と曲げ強度の関係を示す。引張強度も曲げ強度も圧縮強度とは対数関数的な関係が存在し、圧縮強度から引張強度および曲げ強度を推定できるといえる。また圧縮強

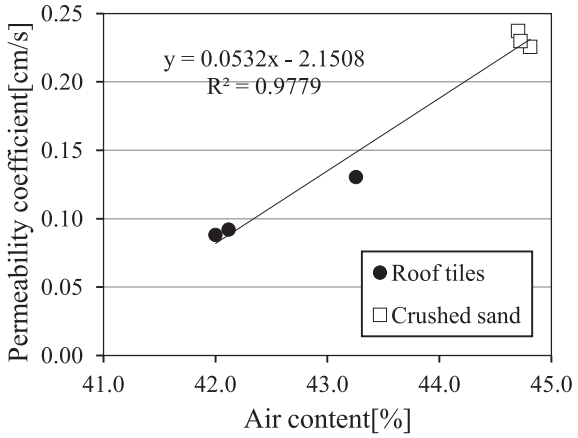


Fig. 5 Relationship between Porosity and Permeability coefficient

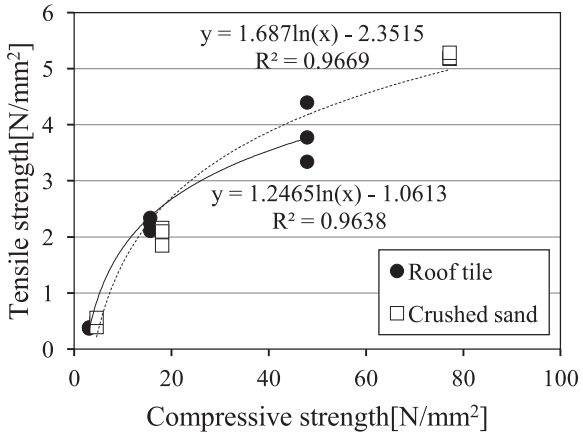


Fig. 6 Relationship between Compressive strength and Tensile strength

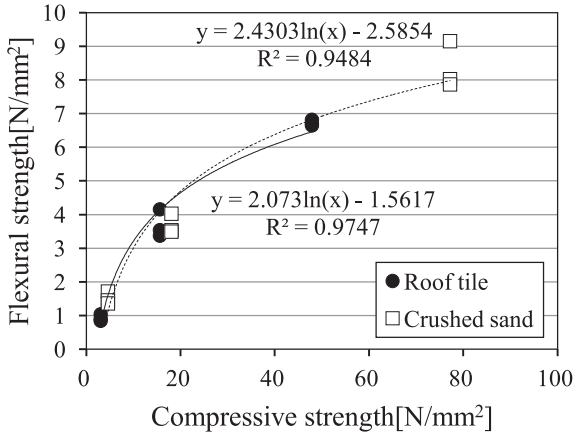


Fig. 7 Relationship between Compressive strength and Bending strength

度と曲げ強度および引張強度の関係に関しては使用骨材による明確な差はないことが認められた。

6. まとめ

(1) 瓦エアモルタルの圧縮強度への空気量、砂セメント比、水セメント比の影響とその影響度合いが、実験から明らかとなった。
(2) 強度試験の結果より間隙比から圧縮強度と透水性能を推定でき、圧縮強度からは静弾性係数、曲げ強度、引張強度が推定できることが実験から明らかとなった。

謝辞：

本研究を進めるにあたり、竹本油脂株式会社よりご協力を頂きました。また、試験を実施するにあたり、尾澤敏行氏(名古屋工業大学　技術部)、山田梢氏(名古屋工業大学卒業生、現、五洋建設株式会社)に多大なご協力をいただきました。ここに記して深く感謝申し上げます。

参考文献：

1) 黒木善生ほか：廃瓦細骨材を用いたエアモルタルに関する基礎実験、セメント・コンクリート論文集、Vol. 69、pp. 687-694（2015）
2) 尾上幸造、松下博通：液体浸漬によるコンクリートの静的圧縮強度低下に関するエネルギー的考察、土木学会論文集 E、Vol. 64、No. 4、pp. 515-525（2008）

PROPERTIES OF AIR MORTAR USING RECYCLED ROOF TILES

Keigo YUKAWA[*1], Takumi UEHARA[*2], Kohei NAKATA[*2] and Noriyuki KAMEI[*3]

*1 NIPPON KOEI Co., Ltd., Highway & Bridges Department, Transportation Division, Domestic Consulting Administration（1-14-6, Kudan-kita Chiyoda-ku, Tokyo 102-8539, Japan）
*2 NAGOYA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Graduate School of Engineering in Department of Civil-Engineering（Gokiso-Cho, Nagoya-shi, Aichi 466-8555, Japan）
*3 GENERAL INCORPORATED ASSOCIATION KAWARA-TIP STUDY GROUP（1000, Ooyama, Tomika-machi, Kamo-gun, Gifu 501-3306, Japan）

ABSTRACT：It is necessary to be crushed and downsized to recycle the used roof tiles. The crushed roof tiles are including a large quantity of powders. This is called “the recycled roof tiles fine aggregate”. Characteristics of the crushed roof tiles are lightweight and porous structure.

The ultimate aim of this study is the Application development of air mortar using the recycled roof tiles fine aggregate. In addition, it is the zero-emission of the used roof tiles. For the application of the tiled air mortar, cured physical properties were ascertained assuming “coating material” such as sand-scattering prevention which does not require high strength. In this study, we clarify the relationship between the void ratio and various strengths and further clarify the relation with the water permeability.

From experiments, when the sand cement ratio is small and the water cement ratio is large, air-mortal is difficult to constrain foaming. Compressive strength of the air-mortal using the recycled roof tiles fine aggregate can be estimated from void ratio. Furthermore, the static elastic modulus, bending strength, tensile strength can be estimated from compressive strength. When the air quantity of the air-mortar is about 40 %, it has high water permeability. The recommended mixing proportion of the air mortar is that the sand cement ratio is 2.5, the water cement ratio is 40 % and the target air quantity is 40 %.

KEY WORDS：Recycled roof tiles, Fine aggregate, Air mortar, Void percentage, Compressive strength, Industrial by-product