

破碎瓦の港湾工事等への利活用に向けての材料特性の把握について

森 晴夫*・菅野 高弘**・東野 隆之***・曾根 照人****・山本 龍*****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** (一財) 沿岸技術研究センター 審議役

***国土交通省 中部地方整備局 港湾空港部 海洋環境・技術課長

**** (株) ニュージェック 港湾・海岸グループ グループマネージャー

***** (株) ニュージェック 港湾・海岸グループ 沿岸防災チーム 主任

愛知県の西三河地域は、粘土瓦の三大産地の一つであり、この地域で生産される三州瓦の生産量は、他の二大産地(石州、淡路)と比べ、圧倒的に多い。このため、三州瓦の生産過程で発生する規格外品も多く、その有効活用が求められている。有効活用する方法としては、規格外瓦を破碎機で粉碎した材料(以下、破碎瓦と呼ぶ)に加工したのち、リサイクル材や土木用資材として活用される。これまでの破碎瓦の活用実績としては、破碎瓦特有の材料特性である軽量で排水性が高いという特徴を活かした路盤材、透水材、舗装材等の陸上工事での用途があるものの、港湾工事での利用が進んでいないのが現状である。

本報告では、土木資材として加工される粒度分布 0~20mm の破碎瓦を対象として、港湾工事等への利活用を目的に実施した実証実験及び模型実験等から把握した材料特性について報告する。

キーワード：破碎瓦，リサイクル材，土木用資材，港湾工事，材料特性，実証実験

1. はじめに

平成 27 年度の愛知県の三河地域での破碎瓦は、年間約 6 万トン発生し、その 6 割が原材料に 4 割がリサイクル材料に利用されている。有効活用の方法としては、図-1 に示すように規格外瓦を破碎機で粉碎加工し、瓦用原材料粘土への還元、リサイクル資材や土木資材へと活用されている^{1),2)}。土木資材への活用事例について着目すると、路盤材や舗装材等への適用事例が数多く報告されているが、埋立柱や裏埋材等の用途への適用はほとんどないのが現状である。

そこで、一般的に土木資材用として加工される粒径分布 0~20mm の破碎瓦を対象として、港湾工事等への



図-1 破碎瓦

利活用を目的に各種材料試験や現地実証実験から材料特性を把握した。本報告では、今回実施した各種試験結果について報告する。

2. 材料試験

破碎瓦の出荷年度毎の粒度分布の変化を図-2 に、主な材料特性を表-1 に示す。出荷年度毎の破碎瓦の粒度

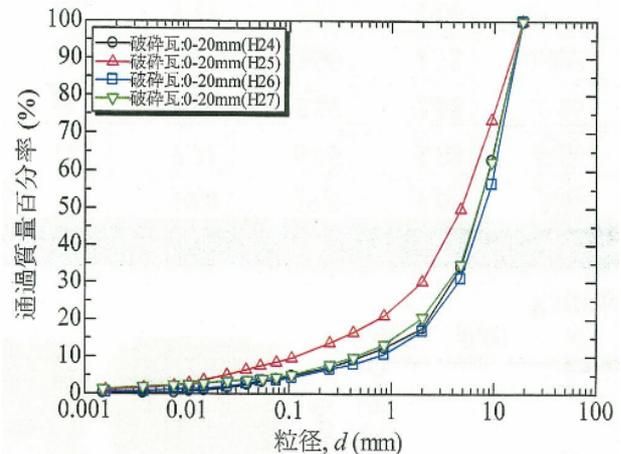


図-2 粒度分布

分布より品質のばらつきはほとんど無いと思われる。また、破碎瓦の材料特性を山砂と比較すると、透水係数は $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ と大きく、土粒子密度は小さく、湿潤密度も 1.700g/cm^3 と小さい。このため透水材や軽量材として有効に利用できると考えられるが、港湾工事で水中投入した場合に細粒分の沈降速度が遅く、材料分離やゆるく堆積し沈下が生じることが懸念された。このため水中落下試験等を実施し確認を行った。

表-1 材料特性

項目	単位	破碎瓦	山砂	クラッシュン
		(0-20mm)	(良質土)	(C-40)
土粒子の密度	g/cm^3	2.605	2.693	-
粒度	礫分	%	69.7	42.5
	砂分	%	21.7	37.2
	シルト分	%	6.8	20.3
	粘土分	%	1.8	16.1
最大粒径	mm	20.0	37.5	40.0
含水比	%	4.0	9.8	2.8
湿潤密度	g/cm^3	1.700	2.088	2.401
乾燥密度	g/cm^3	1.635	1.901	2.335
透水係数	m/s	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-6}	-
内部摩擦角*	°	44.6	30.0	40.0

*破碎瓦はCD試験により評価、山砂とC-40は一般値を仮定

2.1 水中落下試験

(1) 試験概要

破碎瓦の水中投入方法は、図-3に示すような投入器を作製し水面から15cm上から落とし込み、破碎瓦の堆積高さと水位の間隔(10cm程度)を一定に保ちながら3試験を行った。また、試料取り出しのため、100cmのパイプを2本連結し長さ200cmとした。投入後は濁度計を用いて濁り具合を測定し、5～7日程、様子を見ながら細粒分の沈降と水の濁り具合を観察し、その後パイプ内の水を排水し、パイプの試料を3分割に分けそれぞれを採取しふるいにかけた。試料は6試料作成した。その内、3試料については、バイブレータ(12000～15500Hz)で30秒間振動を加え沈下を観測した。

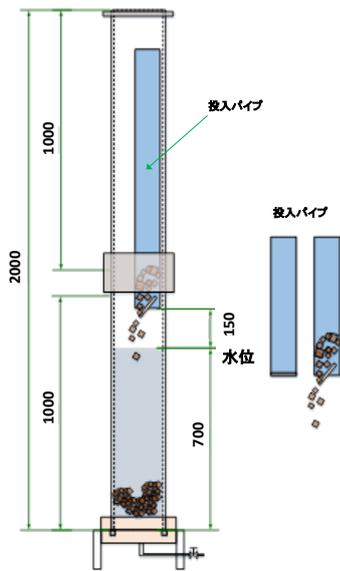


図-3 試験装置

(2) 試験結果

パイプ内の堆積状況を写真-1に示す。投入毎に下側から大きな瓦～細粒分の順に堆積していることが観察でき水中投入時に分級する材料であると考えられる。

排水後の3試料について写真-1に示すように上段、中段、下段に3分割し、ふるい分け試験を行った。試料1の粒度加積曲線を図-3に示す。概ね各試料とも同様の傾向を示し、粒度の観点からは液状化し難い材料であった。

さらに、上段、中段、下段部のそれぞれについて目視で大きな瓦、小さな瓦、細粒分が堆積している箇所についてふるい分け試験を行った。図-4に中段部のふるい分け試験結果を示す。粒度分布から細粒分、小さな瓦は、液状化の可能性ありの範囲³⁾にあることがわかる。

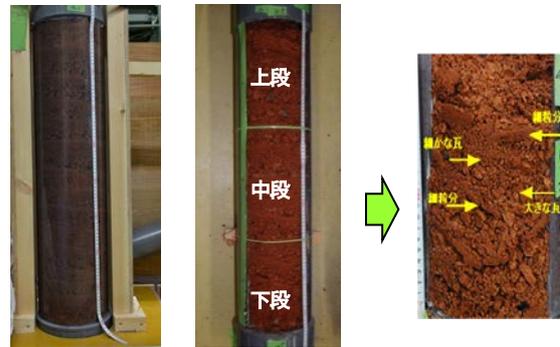


写真-1 堆積状況

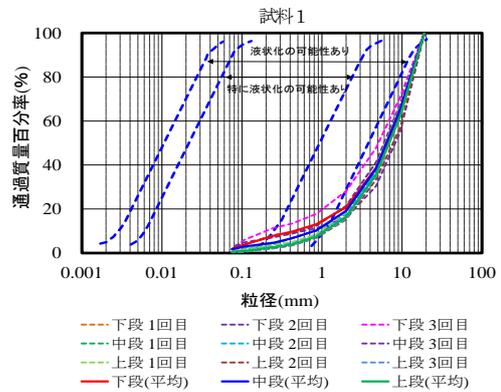


図-3 水中投入後の粒度加積曲線

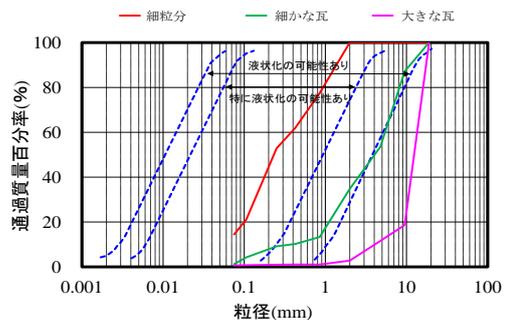


図-4 分級後の粒度加積曲線

投入終了直後から濁度計(TD-M500)を用いて水の濁り具合を測定したが、投入直後は、測定器のレンジをオーバーしたため計ることが出来なかった。投入後4時間経過後も測定できなかった。投入後4日目によくパイプ上部(水面から10cm)のみ測定値が表示されたが濁度400程度を示し、水面から15cmを過ぎると測定は出来なくなった。投入直後と6日後の濁りの状況を写真-2示す。



投入後 投入6日目撮影

写真-2 濁りの状況

他の3試料について行った加振後の沈下状況の写真-3に示す。結果より堆積した破碎瓦に振動を加えることで平均4.5%体積収縮が生じた。振動前の破碎瓦の相対密度は平均30%で、既往の研究⁴⁾での相対密度と体積ひずみの関係から緩い状態の相対密度30%時の体積ひずみ4.0%とほぼ同等であった。

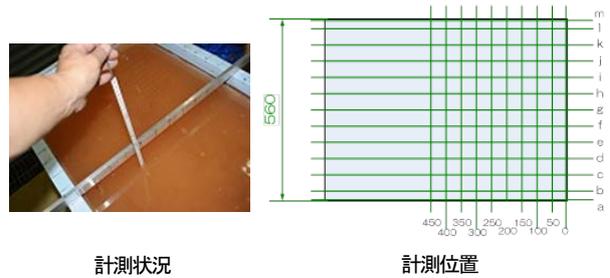


写真-3 水中投入後の振動による沈下状況

2.1 水中安息角試験

(1) 試験概要

試験はコンテナボックスに高さ15cmの水を張り、破碎瓦を投入板で側面を這わせるように落下高さ約0cmで破碎瓦をおくように落とし込んだ。また、堆積した破碎瓦の高さと水位の高さが15cmを保つように水位を調整しながら投入した。写真-4に示すように投入終了後堆積した破碎瓦の出来高を測定し、排水後、傾斜計で斜面の傾きを測定した。投入時の重量、排水に含まれる細粒分を採取し重量を測定した。試験は3ケース行った。

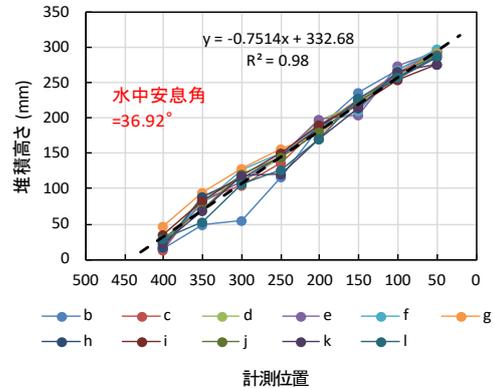


計測状況 計測位置

写真-4 出来高計測

(2) 試験結果

出来高計測による水中安息角の結果の一例を図-5に示す。水中安息角は、破碎瓦とコンテナボックスの接触面の影響を考慮して端部は除いて計測した。平均で35°~37°程度の水中安息角であった。また、流出した破碎瓦は全投入量の3%~5%の細粒分が流出した。



(計測位置は写真-4のb~lラインの端部から50~400mmの範囲)

図-5 出来高計測による水中安息角(Case-1)

3. 現地実証実験

現地実証実験は図-6に示すように盛土構造体を作成し、側面をL型擁壁とした。本体部は幅4.2m、長さ22.0m、高さ1.82mである。盛土構造体に用いた材料は、破碎瓦とその比較材料として山砂とクラッシャーラン(以下、C-40)の3材料とした。事前試験および現場試験によって評価した主な物性は表-1に示したとおりである。各材料の経時変化を把握するため、盛土構造体に土圧

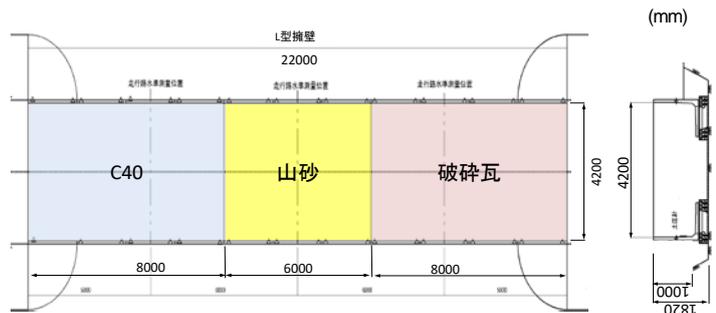


図-6 盛土構造体

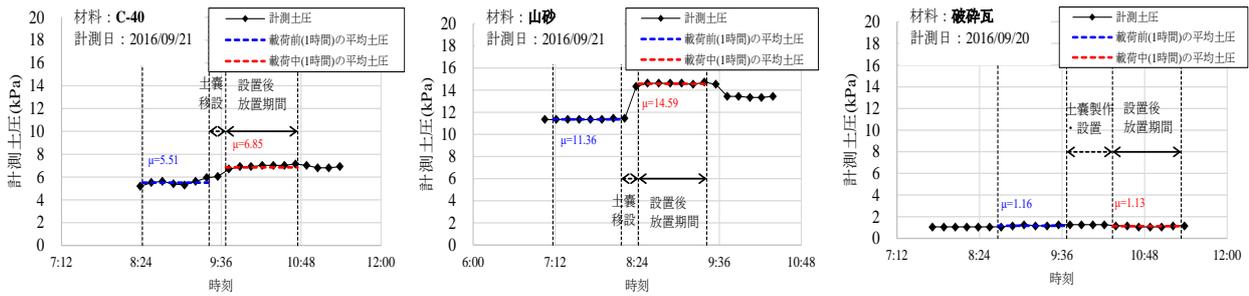


図-7 等分布荷重による土圧の変化

計等の計器を設置し、10分間隔毎に計測した。

試験は、各材料の土圧特性を把握するため実証実験施設を用いて等分布荷重試験を行い、作用土圧の変化を確認した。さらに盛土上で車両通行を行い土圧の変化、材料の変化について確認した。

3.1 等分布荷重試験

(1) 試験概要

盛土の表面に等分布荷重をかけるために、材料毎に大型土のうを盛土表面のなじむように直接設置して主に土圧計測およびL型擁壁の挙動観測を実施した。荷重する等分布荷重は $w=8.5 \text{ kN/m}^2$ とした。

(2) 試験結果

試験結果を図-7に示す。等分布荷重試験は、荷重荷試験前後の作用土圧の挙動変化を確認することを目的としているため、荷重荷試験前後1時間の平均土圧で比較を行った。荷重前の計測土圧は「山砂(11.36kPa) > C-40(5.51kPa) > 破砕瓦(1.16kPa)」となり、破砕瓦は、他の材料と比較して作用土圧が小さい結果となった。これは破砕瓦が、他の材料と比較して密度が小さく、内部摩擦角が大きいことによる効果であるものと考えられる。荷重後の各材料の土圧の増加量に着目すると「山砂(4kPa) > C-40(1kPa) > 破砕瓦(0.5kPa 未満)」となり、破砕瓦の土圧の変化はほぼ生じていない結果が得られた。この原因としては、土圧計設置箇所が1箇所であったため詳細な考察は困難であるが、破砕瓦の骨格構造に起因するアーチ効果が作用したため、土圧計に反応が得られなかったものと推察される。さらに破砕瓦による作用土圧の挙動を確認するため次項の3.3に示す模型実験を追加で実施した。

3.2 車両通行荷重試験

(1) 試験概要

盛土上をダンプトラック(10t 積)で通行する通行荷重試験を延べ3日実施し、その後、破砕瓦部の試料を

採取し、破砕瓦の粒径の変化(通行に伴う粒子破碎の有無)を確認するとともに、土圧の変化などを確認した。車両通行の際には、通行するダンプトラックの重量を計測した。ダンプトラックの総重量は95.92kNで、車両の通行量は、1日で12回/h×5h=60回として行った。

(2) 試験結果

車両通行前後の粒径加積曲線を図-8に示す。車両通行後の試料を用いた粒度試験の結果、粒子破碎が比較的進行すると予想していた表層付近の採取箇所①の粒度分布と、さらに深部の採取箇所②と③の粒度分布は明確な違いが確認できず、車両通行試験実施前の粒度分布のはらつきの範囲内にほぼ収まっている。

以上より、今回の車両通行試験では、車両通行後の粒度は深度ごとに着目した場合でも変化がほとんど見られなく、粒子破碎の影響は認められなかった。

また、車両通行後の盛土の沈下(軋み)は、C-40、山砂については最大5cm程度生じ、破砕瓦は3cm程度であった。

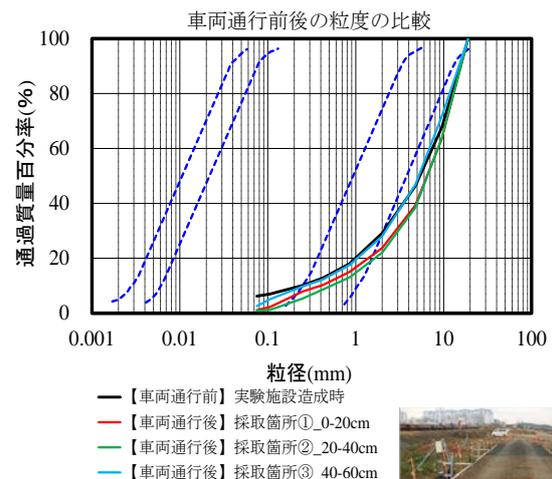


図-8 車両通行前後の粒度分布

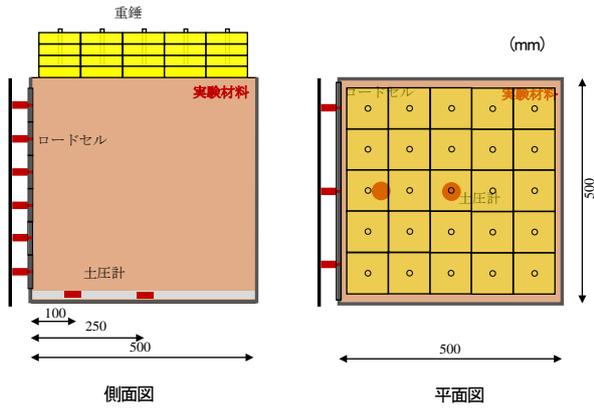


図-9 模型試験装置

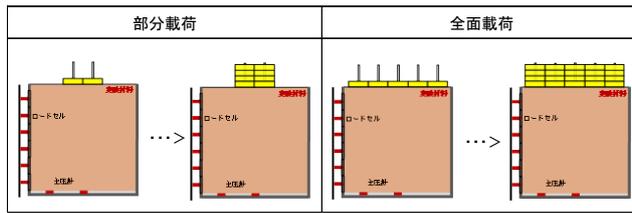


図-10 載荷方法

表-2 試験ケース

ケース	締固め	載荷方法 [*]	材料	模型地盤の乾燥密度	模型地盤の締固め度
				$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	$D_c(\%)$
①	なし	部分載荷	破砕瓦	1.442	90.1
			山砂	1.603	84.7
②	なし	全面載荷	破砕瓦	1.445	90.3
			山砂	1.614	85.2
③	あり	全面載荷	破砕瓦	1.588	99.2
			山砂	1.855	97.9

^{*}締固めなし: 材料投入後式均しのみ、締固めあり: 10kg投入毎に200回突き固め



鋼製土槽

土圧計・ロードセルの設置状況



地盤材料の投入 地盤材料の締固め状況



地盤材料の作成 重錘の設置状況



部分載荷状況 全面載荷状況

写真-4 模型実験状況

3.3 模型実験

(1) 実験概要

模型実験は、図-9に示すように鋼製土槽内に6面の側面受圧版を介したロードセル、及び底面2箇所土圧計を設置し、材料投入後、図-10に示すように重錘(1セット1~4段までの荷重調整が可能で、最大 $q=10\text{kN/m}^2$)を使用して部分載荷と全面載荷の荷重を作用させ、水平土圧及び鉛直土圧を計測した。実験の対象とした材料は、現地実証実験で使用した破砕瓦と山砂の2材料とし、実験ケースは表-2に示す通りである。模型実験状況を写真-4に示す。

(2) 実験結果

試験結果を図-11に示す。ケース①(締固めなし+部分載荷)の水平土圧の比較では、破砕瓦は山砂よりも土圧が小さく生じることが確認できた。ケース②(締固めなし+全面載荷)の水平土圧比較では、破砕瓦は載荷荷重の増加に伴い、表層付近で土圧が大きくなるが、土中部では山砂よりも小さくなった。これは、破

砕瓦は内部摩擦角が大きいことに起因して壁面摩擦力が大きく作用し、模型地盤内でサイロ効果により土圧が伝達され難かったことが原因と推察される。ケース③(締固めあり+全面載荷)の比較では、両材料ともに明瞭な差が生じていない。これは両材料ともに締固めを実施しているため、サイロ効果の影響が顕著に生じたためと考えられる。

サイロ効果の影響が生じていないと考えられるケース①に着目して鉛直土圧を比較すると材料に関係なく壁面部より中央部が小さくなる傾向を示した。今回用いた鋼製土槽サイズが小さいことが影響したため、計測精度が低いことが考えられた。このため、鉛直土圧の増分については、破砕瓦が大きく生じる結果となった。

水平方向の土圧増分は、締固めなし場合で部分載荷では微少であるが破砕瓦の方が小さくなり、全面載荷ではかなり小さい傾向が見られた。

以上のことから破砕瓦の鉛直方向の応力球根は、山砂と比較してやや水平方向に狭くなり、鉛直方向にやや延びる形状となることが考えられ、これにより破砕

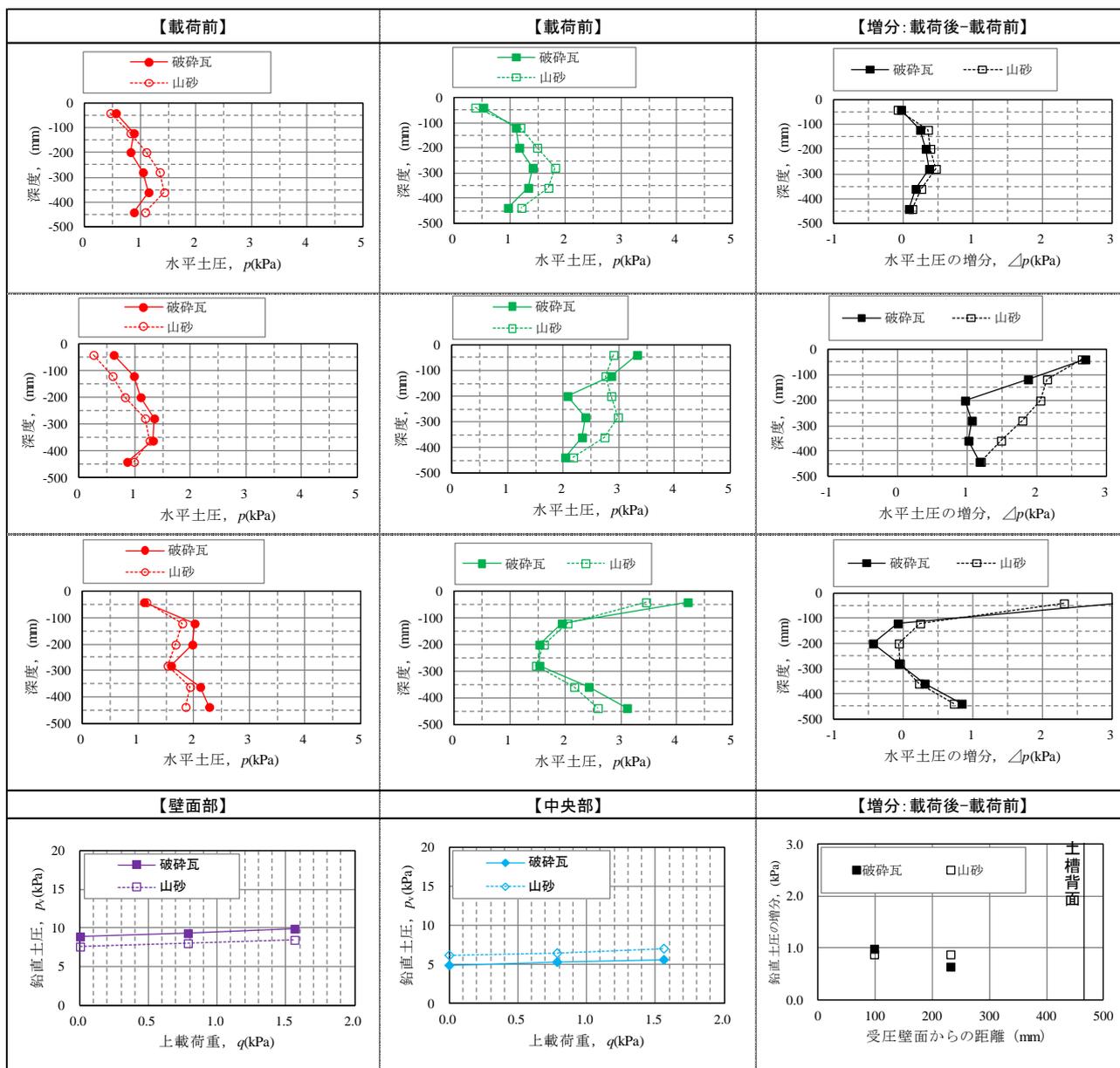


図-11 模型実験結果

瓦は山砂と比較して荷重分散角がやや小さくなる特性を有しているものと推測される。

4. おわりに

現地実証実験および模型載荷実験により、破砕瓦は一般的な他の材料と比較して水平土圧が小さくなることから、水平方向の土圧低減材料とした適用に効果的であることが考えられる。また、鉛直方向の上載荷重作用時の挙動としては、破砕瓦は山砂と比較して荷重分散角がやや小さくなる特性にあることが推測された。謝辞：本検討の実施にあたり、名古屋工業大学大学院前田教授を委員長とした検討委員会においてご指導頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 堀智之, 張鋒, 前田健一: 規格外瓦破砕材シャモットの地盤材料としての物理・力学特性, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011.
- 国土交通省港湾局: 港湾空港等におけるリサイクルガイドライン(改訂), 平成27年12月.
- 埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版): (財)沿岸開発技術研究センター, 平成9年8月
- 梅寿康, 仙頭紀明, 小野大和, 林健太郎: 繰返しせん断ひずみ履歴を用いた砂質土の液状化に伴う体積ひずみの評価法, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.68, No.4, pp680-694, 2014.