

破碎瓦の利活用技術資料

平成 29 年 3 月

国土交通省 中部地方整備局

目 次

1. はじめに	1
1.1. 適用の範囲	1
1.2. 用語の定義	1
2. 物理特性	2
2.1. 粒度分布	2
2.2. 土粒子密度	4
2.3. 最小・最大間隙比	5
2.4. 液性限界・塑性限界	5
2.5. すり減り減量	5
2.6. スレーキング率	6
2.7. 乾燥密度および湿潤密度	6
3. 力学特性	7
3.1. 締固め特性	7
3.2. 透水性	7
3.3. せん断強度定数	8
3.4. 設計 CBR	8
3.5. 水中安息角	9
3.6. 実験による計測土圧と理論土圧との比較	10
3.6.1. 実験施設の計測土圧との比較	10
3.6.2. 模型載荷実験の計測土圧との比較	14
4. 動的特性	17
4.1. 液状化特性	17
4.2. 沈下特性	18
5. 環境特性	20
5.1. 化学物質等による環境への影響	20
5.2. 海域の濁りに関する影響	25
6. 破碎瓦の材料特性を踏まえた破碎瓦の利活用方策	26
6.1. 主な施工方法と施工時の留意点	30
6.2. 水中施工時の課題と対応策	32
6.3. 標準材料との材料価格の比較	34
6.4. 適用性が高い用途	35
6.5. 標準的な材料との優位性	36
6.6. 破碎瓦の材料特性参考値	37
7. 建設材料としての活用事例	38

参考資料	40
1. 現地実証実験	40
1.1. 計測および観測の概要	40
1.1.1. 計測	40
1.1.2. 観測	40
1.1.3. 設置概要	45
1.1.4. 計測器の設置方法	47
1.1.5. データロガー設置・計測	51
1.1.6. 観測	53
1.2. 実験施設建設時の施工記録	59
1.2.1. 使用材料の物性	59
1.2.2. 施工管理記録	60
1.3. 計測および観測データ	61
1.3.1. 計測	62
1.3.2. 測量	72
1.4. 等分布荷重載荷	75
1.5. 車両通行	83
1.6. 実験施設撤去時の観察	89
1.7. 計測・観測結果に対する考察	90
2. 水中落下試験、振動試験の実施	103
2.1. 水中落下試験	106
2.1.1. 試験概要	106
2.1.2. 試験結果	108
2.2. 振動試験	121
2.2.1. 試験概要	121
2.2.2. 試験結果	121
3. 水中安息角計測試験	127
3.1. 試験概要	127
3.2. 試験結果	129
3.3. 堆積した破砕瓦の重量	132
4. 破砕瓦の濁水に対する簡易ジャーテスト	133
4.1. 試験方法	133
4.2. 試験結果	134
5. 模型載荷実験	136
5.1. 実験概要	136
5.2. 実験結果	142
5.2.1. 破砕瓦①：Case1(全面載荷)、締固め無し	152
5.2.2. 破砕瓦②：Case1(全面載荷)、締固め有り	155

5.2.3. 破碎瓦③ : Case2(部分載荷)、締固め無し.....	158
5.2.4. 山砂① : Case1(全面載荷)、締固め無し.....	161
5.2.5. 山砂② : Case1(全面載荷)、締固め有り.....	164
5.2.6. 山砂③ : Case2(部分載荷)、締固め無し.....	167
5.2.7. 珪砂7号② : Case1(全面載荷)、締固め有り.....	170
5.2.8. 【参考】サイロ効果の検討.....	172
6. その他.....	179
6.1. 主な締固め工法一覧.....	179
6.2. 標準材料と破碎瓦の材料費の概算比較.....	183
6.3. 土留矢板に作用する主働土圧の低減効果.....	185
6.3.1. 雑石を想定した場合の土圧・残留水圧分布図.....	187
6.3.2. 破碎瓦を想定した場合の土圧・残留水圧分布図.....	188
参考文献.....	189

<添付資料>

- ① 森河由紀弘、前田健一、張鋒：リサイクル材料である破碎瓦の有効利用～第1回～
「地盤材料として見た破碎瓦の物理特性や力学特性」、2014.
- ② 森河由紀弘、前田健一、張鋒：リサイクル材料である破碎瓦の有効利用～第2回～
「破碎瓦を用いた液状化対策」、2014.

1. はじめに

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、規格外瓦を破砕機で粉砕した材料(以下、破砕瓦と表記)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。

これまでの破砕瓦の活用実績としては、破砕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。

そこで、破砕瓦の利活用用途のさらなる拡大を図ることを目的として、破砕瓦の材料特性を把握し、港湾工事等への利活用を踏まえた利活用技術資料の取りまとめを行った。

1.1. 適用の範囲

本技術資料では、破砕瓦を有効活用する用途先は「港湾工事の用途」に主眼を置いた整理を行っている。港湾工事では、港湾施設の種類や工事用途によってその施工方法が異なるが、主に陸上工事と海上工事に大別することが可能である。これまでに活用実績が無い用途に対しての適用を考える場合には、本技術資料に示した工事用途の施工方法と同様との判断が可能な場合に、本技術資料の適用ができるものとする。

また、本技術資料では、愛知県の西三河地域で生産される三州瓦の規格外品を用いて加工した破砕瓦を対象としているが、その他産地の瓦材料を用いた場合にも適用できる。ただし、本技術資料は粒径が 0-20mm の材料のみを対象として取りまとめたものであるため、粒径が 0-20mm 以外の破砕瓦を使用する場合には適用外とする。

1.2. 用語の定義

本技術資料では、以下に示すように用語を定義する。

ここでは、破砕瓦の特徴的な製品に関する内容および性質に関連する用語のみを示す。

破砕瓦	: 規格外瓦を有効活用するために粉砕加工した材料の総称。本技術資料では愛知県陶器瓦組合で生産された粒径 0-20mm の破砕瓦のみを対象としている。
シャモット	: 規格外瓦を有効活用するために粉砕加工した材料のうち、粒径が 0.5mm 以下の破砕瓦。瓦用原材料粘土に還元するための材料名称。
安息角	: 地盤材料を一定の高さから落下させ、円錐形に堆積した材料が滑り出さない底面の角度。特に水中部へ落下させて評価した安息角を水中安息角と呼ぶ。
分級	: 材料を水中投入した場合に、粒径が大、中、小などの特徴的なグループに分かれて堆積する現象。

2. 物理特性

2.1. 粒度分布

破碎瓦の粒度加積曲線を図 2.1 に示す。破碎瓦(0-20mm)は概ね礫質土と同等の粒径であり、港湾の施設の技術上の基準に従った均等係数 $U_c \geq 3.5$ の粒度分布の観点による液状化の判定予測では、液状化の可能性は低いものと考えられる。また、破碎瓦(0-20mm)は、図 2.2 に示すように粒度分布に関する品質のばらつきはほとんど無いことが確認できる。

なお、図 2.2 に示す粒度加積曲線は、愛知県陶器瓦工業組合[※])にて実施された H24～H27 の粒度試験結果を記載したものである。

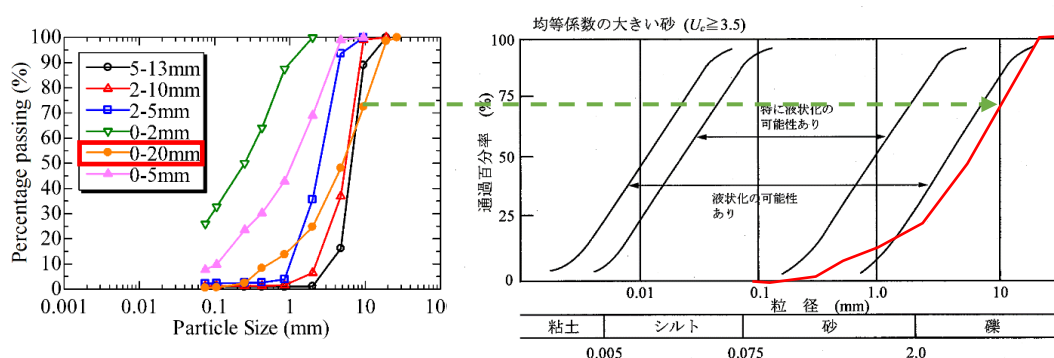
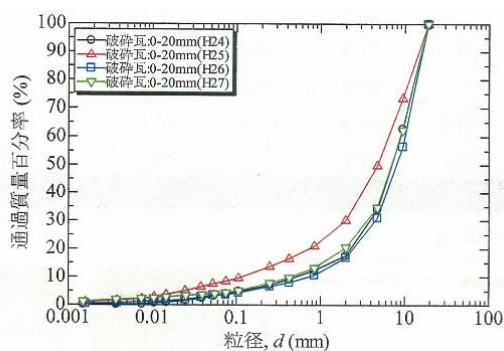


図 2.1 破碎瓦の粒度加積曲線(左図)と液状化の可能性範囲^{1), 2)}



項目	H24	H25	H26	H27
最大粒径	19.0	19.0	19.0	19.0
60%粒径 D_{60}	8.98	6.56	10.17	90.3
50%粒径 D_{50}	7.22	4.80	8.27	7.22
30%粒径 D_{30}	4.09	1.97	4.53	3.84
10%粒径 D_{10}	0.51	0.11	0.73	0.45
均等係数 U_c	17.46	57.91	13.99	20.22
曲率係数 U_c'	3.6	5.2	2.8	3.7

図 2.2 三州破碎瓦【0-20mm】の品質(粒度分布)³⁾

※)愛知県陶器瓦工業組合：本技術資料で対象とする破碎瓦(0-20mm)の生産を担っている組合。三州瓦の製造・販売している会社で構成されている。

図 2.3 に示すように現地の実験施設(p.40 参照)で用いた破碎瓦の表層部分の試料を採取し、気中まき出しによる粒度分布の変化の有無を確認することを目的とした粒度試験を行った結果を図 2.4(1)に示す。図 2.4(1)から確認できる通り、気中捲出し前後での粒度分布に大きな変化が生じないといえる。

また、破碎瓦を水中投入した場合には分級が生じる材料であることが水中落下試験から確認されており、図 2.4(2)に示すように粒度分布の異なる層が堆積することが分かっている(水中落下試験については参考資料 p.103 以降に詳述)。

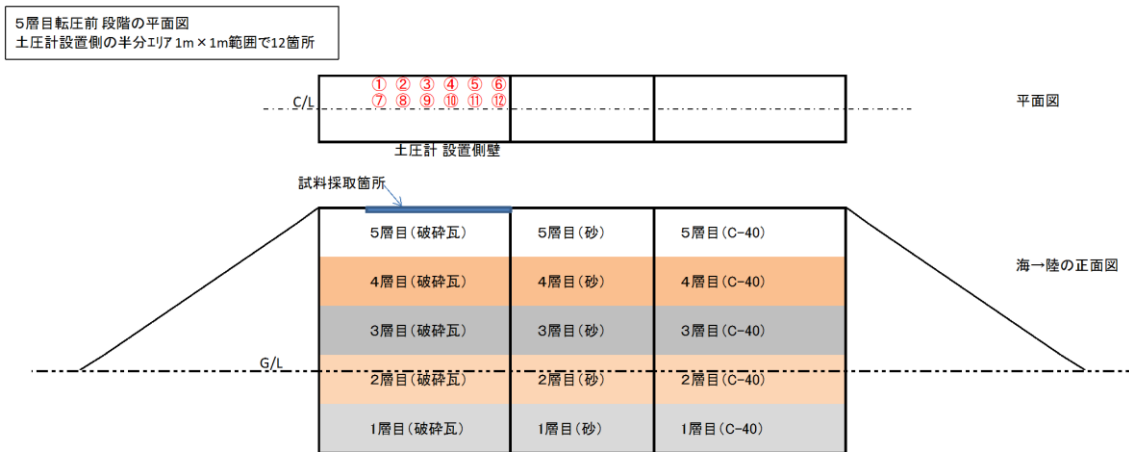


図 2.3 実験施設の試料採取位置

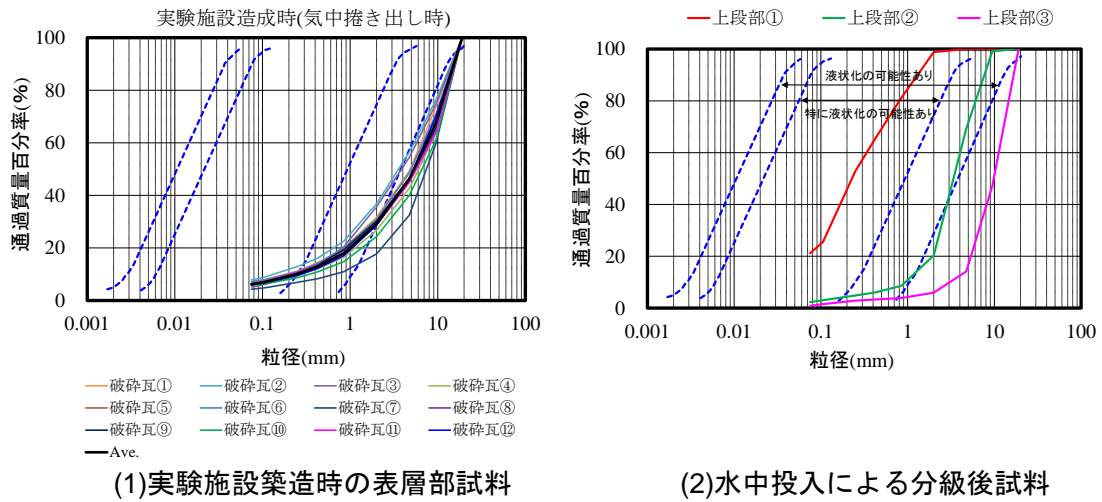


図 2.4 破碎瓦(0-20mm)の粒径加積曲線

2.2. 土粒子密度

破碎瓦は、**図 2.5** に示すように不規則な空隙を有した層状の構造となっている。このような多孔質の構造により、吸水性や保水性を高める効果がある。また、**図 2.6** より、破碎瓦の密度は、一般的な土に比べて小さく(ρ_s :2.579g/cm³程度)であり、土圧軽減材料として有用であることが分かる。

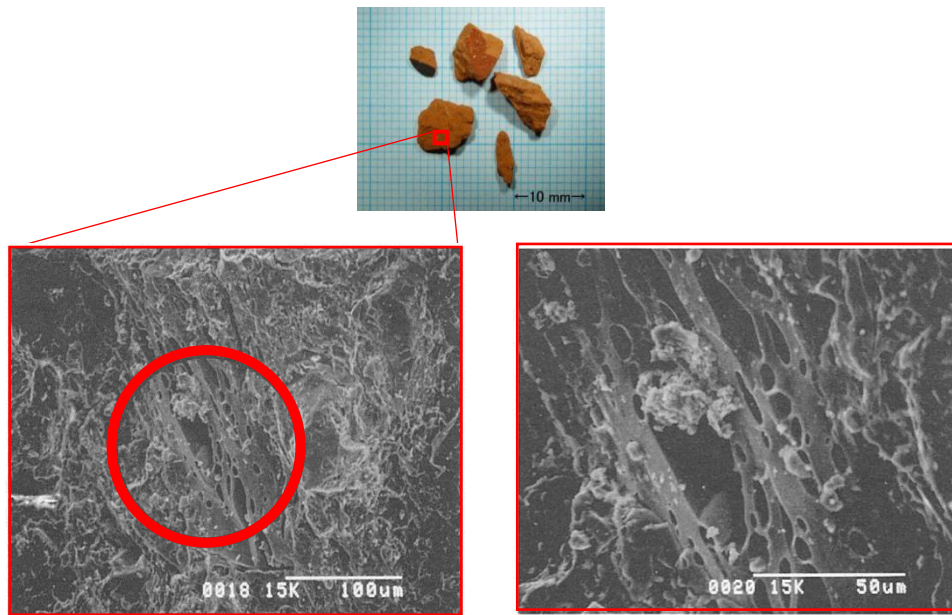


図 2.5 破碎瓦の構造(電子顕微鏡による写真)⁴⁾

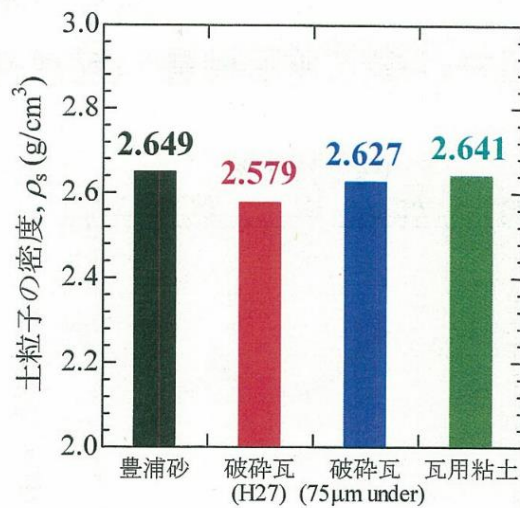


図 2.6 土粒子の密度試験³⁾

2.3. 最小・最大間隙比

破碎瓦(0-20mm)を対象に実施された礫の最小密度・最大密度試験の結果を図 2.7 に示す。試験結果より、破碎瓦の最小間隙比は、 $e_{min} \doteq 0.611$ 、最大間隙比 $e_{max} \doteq 1.049$ である。参考までに他の材料との比較として、砂の最小密度・最大密度試験の結果豊浦砂、珪砂の最小・最大間隙比も図 2.7 に示す。

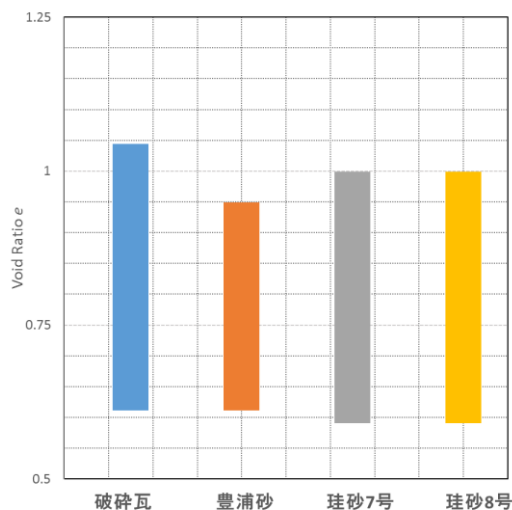


図 2.7 最小・最大密度試験(間隙比)¹⁾

2.4. 液性限界・塑性限界

液性限界試験では、流動曲線を求めるために必要な所定の黄銅皿落下回数 of 測定が出来ず、塑性限界試験においても直径 3mm のひも状に整形出来なかった実験結果を踏まえ、破碎瓦は N.P.(非塑性)と判定される⁵⁾。

2.5. すり減り減量

アスファルト及びコンクリート用骨材は堅固かつ強靱であることが必要とされ、この評価方法としてロサンゼルス試験方法(JIS A 1121)が一般に採用されている。舗装施工便覧(平成 18 年版)によると、一般的な舗装材や路盤材で想定される碎石のすり減り減量は、上層路盤が 50%以下、表層・基層が 30%以下とされている。この目標値を基準(案)として考えた場合、表 2.1 の試験結果より、破碎瓦のすり減り減量は 28%程度であるため、基準以下であることが確認できる。

表 2.1 すり減り試験¹⁾

項目	基準(案)	調査結果	判定
すり減り減量	上層路盤：50%以下 表層・基層：30%以下 [試験方法：JISA1121]	28%程度	○

2.6. スレーキング率

スレーキングとは粘土鉱物の粒子の間に水が入り、骨格の空気が圧縮され、その圧力で粒子間の結合が弱くなり細片化する現象である。スレーキング試験は、路床材料の適否の判定や破碎試験の結果と併せて路体材料の圧縮性の評価などに利用される。表 2.2 に破碎瓦(10-30mm)の試験結果を記載する。

表 2.2 スレーキング率試験¹⁾

項目	基準(案)	調査結果	判定
スレーキング率	1%以下 [試験方法：JHS110]	0.1% (10-30mm の値)	○

2.7. 乾燥密度および湿潤密度

破碎瓦の各種調査方法による乾燥密度および湿潤密度を表 2.3 に示す。なお、これらの試験値は現地実験施設の破碎瓦を用いて測定したものである。なお、金属製パイプを用いた密度測定位置と方法については図 2.8 に示す通りである。

表 2.3 破碎瓦の各種密度

調査方法	乾燥密度	湿潤密度
金属パイプを用いた採取試料による試験結果	1.444(g/cm ³)	1.495(g/cm ³)
砂置換法による現場密度試験結果	1.635(g/cm ³)	1.700(g/cm ³)

* 金属パイプの直径は 160mm であり、粒径に対して十分に大きいとは言えず、小さめの値となった可能性がある。

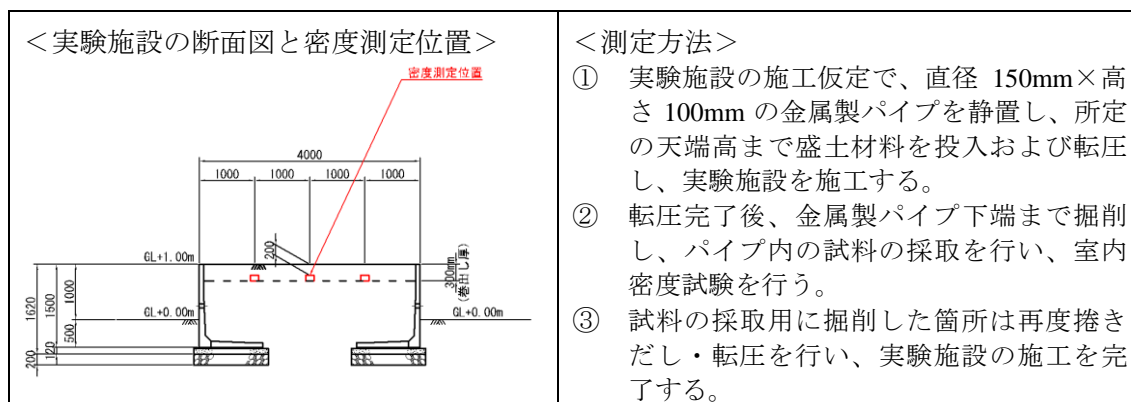


図 2.8 密度測定位置と方法

3. 力学特性

3.1. 締固め特性

図 3.1 によると、「0-20mm」の最大乾燥密度は $1.663(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、最適含水比は 13.9%である。

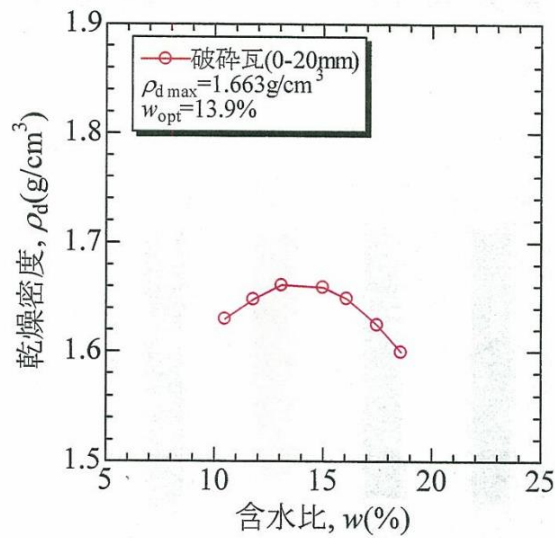


図 3.1 土の締固め試験³⁾

3.2. 透水性

「0-20mm」の透水係数は概ね $1.0 \times 10^{-4}(\text{m}/\text{s})$ である。透水性の観点からでは、液状化発生の可能性は低い材料と考えられるが、詳細には別途検討を行うことが望ましい。

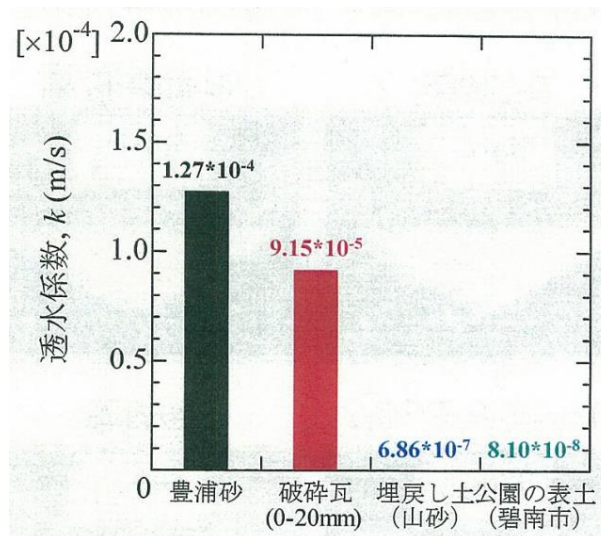


図 3.2 土の透水試験³⁾

3.3. せん断強度定数

破碎瓦 0-20mm を用いた直径 10cm×高さ 20cm の中型供試体で、相対密度 $D_r=95\%$ 程度で排水三軸圧縮試験(CD 試験)を行った結果を図 3.3 に示す。

図 3.3 の結果より、粘着力 $C_d=55\text{kN/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi_d=44.6$ 度であり、大きな内部摩擦角を有することが確認できる。

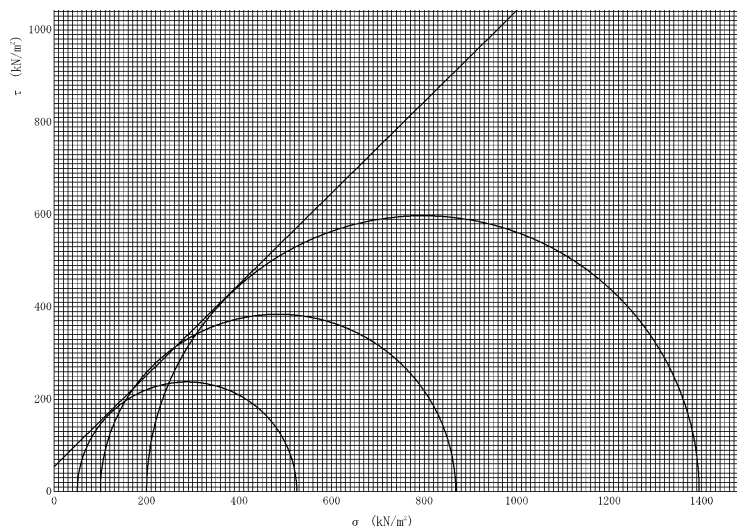


図 3.3 排水三軸試験(CD 試験)

3.4. 設計 CBR

設計 CBR 試験(JIS A 1211)では、路床土としての適否を判断するための指標である設計 CBR を求める。表 3.1 に示すように破碎瓦の設計 CBR は、上限値の 20%以上を満足していることが確認できる。

表 3.1 設計 CBR ³⁾

項目		H24	H25	H26	H27
CBR試験(JIS A 1211)	設計CBR(%) : 舗装用	75.2	78.8	56.8	81.1

表 3.9 T_A の目標値

設計 CBR	設計期間 10 年				設計期間 20 年		
	信頼性 90%						
	N1 (簡易舗装)	N2 (L交通)	N3 (A交通)	N4 (B交通)	N5 (C交通)	N6 (D交通)	N7
(2)	(11)	(13)	(17)	(21)	(29)	(44)	(57)
3	9	12	15	19	26	39	50
4	9	11	14	18	24	36	46
6	8	10	12	16	21	32	41
8	7	9	11	14	19	29	38
12	6	8	10	13	17	26	33
20	6	7	9	11	15	22	29

上限値

愛知県：道路構造の手引き (2014), P120

3.5. 水中安息角

水中安息角計測試験により評価した破碎瓦の水中投入時の安息角は、表 3.2 に示す通り平均で 35° ～37° 程度であることから、安全側に 35° 程度と見なすことができる。なお、水中安息角計測試験の詳細については、参考資料(p.127 以降)にて後述。

また、参考として気中部での安息角を図 3.4 に示す。これらの結果から以下のことがいえる。

- ・ 破碎瓦は砂などの材料と比較して、安息角が大きく、自立性が高い。
- ・ 水中投入時では、気中安息角よりも小さくなる。

表 3.2 水中安息角計測試験の結果

水中安息角の算出方法	水中安息角の平均値
出来高計測①	37.40°
出来高計測②	35.24°
傾斜計による計測	36.78°



図 3.4 気中安息角³⁾

3.6. 実験による計測土圧と理論土圧との比較

これまでの既往検討で明らかになっている破碎瓦の材料特性を検証することを目的として、破碎瓦、山砂、C40の3種の材料を用いた実験施設(道路盛土地盤)を建設し、各材料の土圧、変位等を10分計測し、等分布荷重載荷時や車両通行時といったイベント毎の経時変化の確認を行う実証実験が実施されている。

また、実証実験から得られた計測土圧の挙動確認を行う目的として、室内にて模型地盤を作成し、荷重載荷時の水平土圧および鉛直土圧の挙動確認が実施されている。

ここでは、各実験結果から得られた計測土圧と、理論的に導出される理論土圧との比較を行った。

なお、現地実証実験および模型載荷実験の詳細については参考資料(p.40以降およびp.136以降)に後述。

3.6.1. 実験施設の計測土圧との比較

実験施設を用いて等分布荷重載荷時に得られた計測土圧と理論土圧(式 3.1より算出)の比較を行い、港湾基準に示されている一般的な土圧論の適用が可能か確認を行うことを目的として実施した。

$$p_{ai} = K_{ai} \left(\sum \gamma_i h_i + \omega \right)$$
$$K_{ai} = \frac{\cos^2(\phi_i)}{\cos(\delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin^2(\phi_i)}{\cos(\delta)}} \right]^2} \quad \text{式 3.1}$$

ここに、

p_{ai} : i層下面の壁面に作用する主働土圧(kN/m²)

K_{ai} : i層の主働土圧係数

γ_i : i層の単位体積重量(kN/m³)

h_i : i層の厚さ(m)

ϕ_i : i層の土の内部摩擦角(°)

δ : 壁面摩擦角(°)

ω : 地表面の単位面積当たりの載荷重(kN/m²)

理論式から算出した主働土圧と実験施設の土圧計の計測データとの比較を行う。

表 3.3 に示す主働土圧の理論値の算出に必要な各種設定条件により、理論式により算出した主働土圧を表 3.4 に示す。

表 3.3 理論土圧算定の主な条件

項目	設定値	備考
上載荷重 ω	全材料： $\omega=8.5 \text{ kN/m}^2$	土嚢設置時の載荷荷重
湿潤単位体積重量 γ	破砕瓦： $14.66 \text{ kN/m}^3 (=1.495 \times 9.807)$ 山砂： $17.18 \text{ kN/m}^3 (=1.752 \times 9.807)$ C40： $18.83 \text{ kN/m}^3 (=1.920 \times 9.807)$	名古屋工業大学で実施された土の湿潤密度試験結果より設定
内部摩擦角 ϕ	破砕瓦： 44.6° 山砂： 30° を仮定。 C40： 40° (一般値)	破砕瓦は名古屋工業大学で実施された CD 試験結果より設定
壁面摩擦角 δ	全材料： $\delta=2/3\phi$	土木構造物標準設計第 2 巻解説書より設定。
層厚 h	全材料： $h=1.0 \text{ m}$	実験施設の盛土地表面から土圧計設置深度を設定。

表 3.4 理論式から算出した主働土圧等

破砕瓦			
地表面の単位面積当りの載荷重(kPa)	ω	0.00	8.50
単位体積重量(kN/m ³)	γ	14.66	14.66
土のせん断抵抗角($^\circ$)	ϕ	44.60	44.60
壁面摩擦角($^\circ$)	δ	29.73	29.73
層厚(m)	h	1.00	1.00
主働土圧係数	K_a	0.16	0.16
理論値: 崩壊面が水平となす角($^\circ$)	ξ	64.58	64.58
理論値: 主働土圧(kPa)	P_a	2.41	3.81
理論値: 荷重載荷後の増分値(kPa)		—	1.40

山砂			
地表面の単位面積当りの載荷重(kPa)	ω	0.00	8.50
単位体積重量(kN/m ³)	γ	17.18	17.18
土のせん断抵抗角($^\circ$)	ϕ	30.00	30.00
壁面摩擦角($^\circ$)	δ	20.00	20.00
層厚(m)	h	1.00	1.00
主働土圧係数	K_a	0.30	0.30
理論値: 崩壊面が水平となす角($^\circ$)	ξ	55.98	55.98
理論値: 主働土圧(kPa)	P_a	5.10	7.63
理論値: 荷重載荷後の増分値(kPa)		—	2.53

C-40			
地表面の単位面積当りの載荷重(kPa)	ω	0.00	8.50
単位体積重量(kN/m ³)	γ	18.83	18.83
土のせん断抵抗角($^\circ$)	ϕ	40.00	40.00
壁面摩擦角($^\circ$)	δ	26.67	26.67
層厚(m)	h	1.00	1.00
主働土圧係数	K_a	0.20	0.20
理論値: 崩壊面が水平となす角($^\circ$)	ξ	61.88	61.88
理論値: 主働土圧(kPa)	P_a	3.76	5.46
理論値: 荷重載荷後の増分値(kPa)		—	1.70

次に、以下に示す計測期間の計測土圧の平均値を表 3.5 に示す。表 3.5 の平均土圧は、
 図 3.5～図 3.6 に示す実験施設の土圧計の記録から算出している。

- ① 土砂投入後、土圧が概ね安定した 2016/2/5 から土のうを設置する直前までの期間(常時の平均的な計測土圧の把握するため。表 3.5(1)および図 3.5 参照。)
- ② 土のうを設置する直前の 1 時間(載荷前後の計測値の増分を把握するため。表 3.5(2)および図 3.6 参照。)
- ③ 土のう設置完了後から 1 時間(図 3.5 参照。))

表 3.5 計測土圧の平均値

(1)上記①と③の平均土圧

■ 破砕瓦				
状態	計測期間	平均土圧(kPa)	増分(kPa)	
常時	2016/2/5 0:00 ~ 2016/9/20 9:40	2.49	—	
載荷時	2016/9/20 10:20 ~ 2016/9/20 11:20	1.13	-1.37	

■ 山砂				
状態	計測期間	平均土圧(kPa)	増分(kPa)	
常時	2016/2/5 0:00 ~ 2016/9/21 8:10	11.00	—	
載荷時	2016/9/21 8:25 ~ 2016/9/21 9:25	14.58	3.58	

■ C40				
状態	計測期間	平均土圧(kPa)	増分(kPa)	
常時	2016/2/5 0:00 ~ 2016/9/21 9:25	6.65	—	
載荷時	2016/9/21 9:40 ~ 2016/9/21 10:45	6.84	0.19	

(2)上記②と③の平均土圧

■ 破砕瓦				
状態	計測期間	平均土圧(kPa)	増分(kPa)	
常時	2016/9/20 8:40 ~ 2016/9/20 9:40	1.16	—	
載荷時	2016/9/20 10:20 ~ 2016/9/20 11:20	1.13	-0.03	

※載荷前(1時間)と載荷時(1時間)の比較

■ 山砂				
状態	計測期間	平均土圧(kPa)	増分(kPa)	
常時	2016/9/21 7:10 ~ 2016/9/21 8:10	11.36	—	
載荷時	2016/9/21 8:25 ~ 2016/9/21 9:25	14.58	3.23	

※載荷前(1時間)と載荷時(1時間)の比較

■ C40				
状態	計測期間	平均土圧(kPa)	増分(kPa)	
常時	2016/9/21 8:25 ~ 2016/9/21 9:25	5.51	—	
載荷時	2016/9/21 9:40 ~ 2016/9/21 10:45	6.84	1.34	

※載荷前(1時間)と載荷時(1時間)の比較

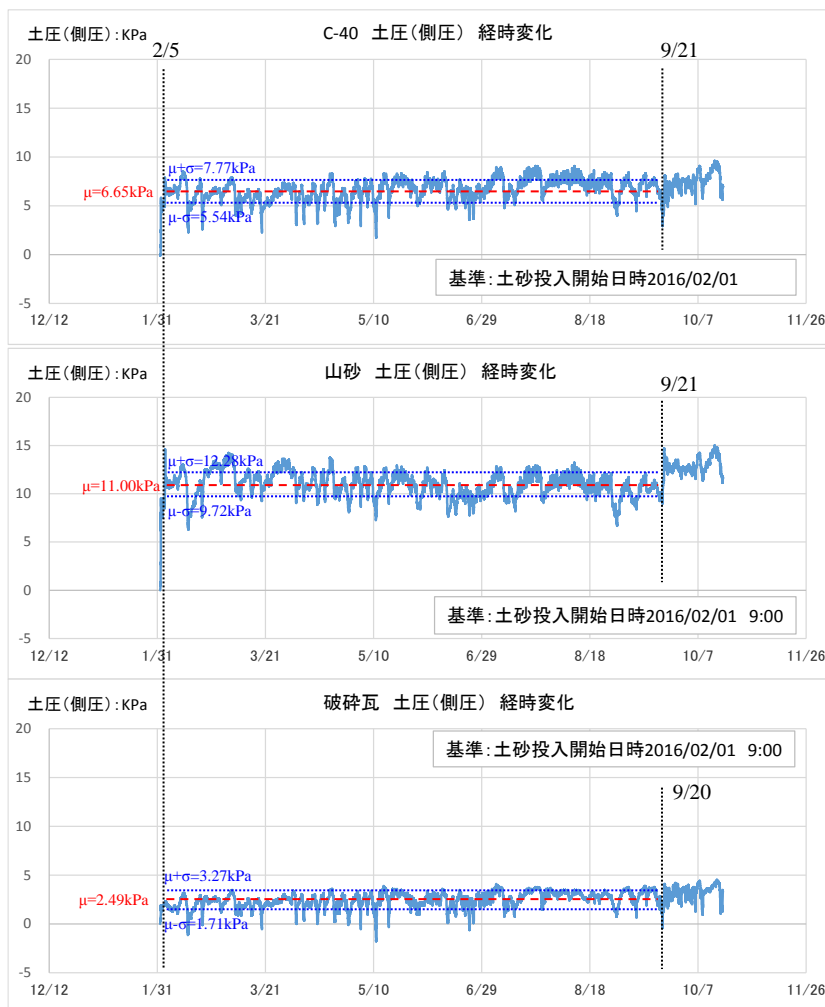


図 3.5 土圧計の経時変化(10分単位の挙動)

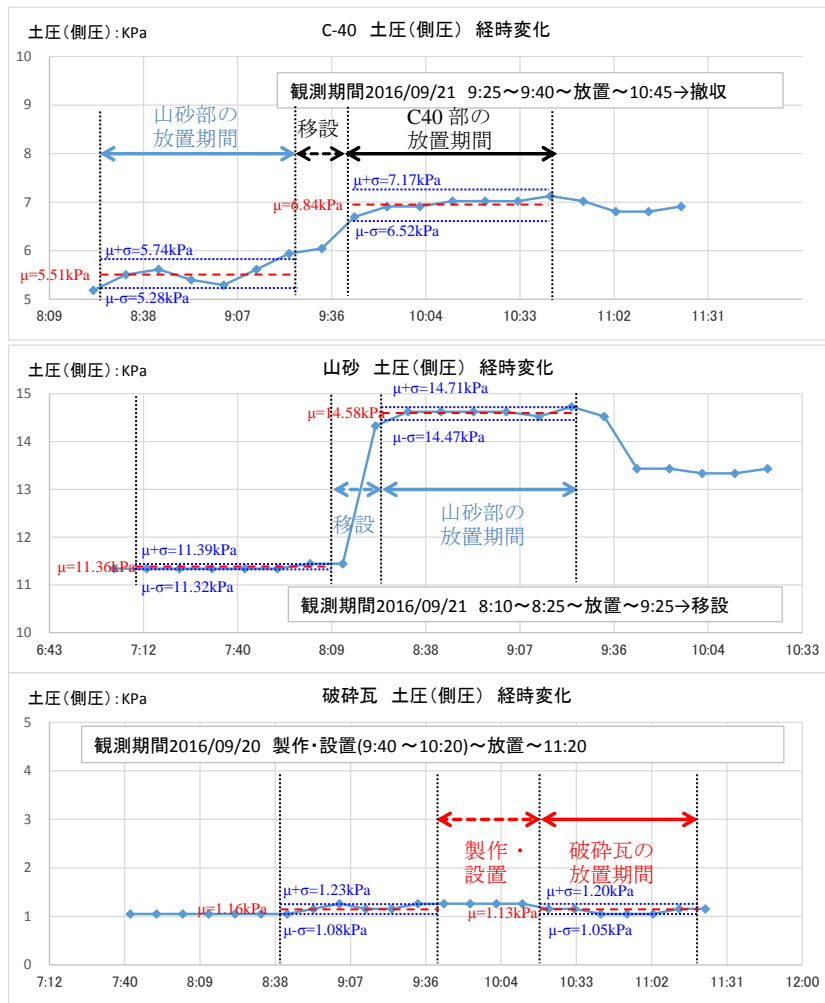


図 3.6 等分布荷重載荷前後の土圧計の経時変化(10分単位の挙動)

理論土圧と計測土圧の比較を図 3.7 に示す。常時(荷重載荷前)の状態では、破碎瓦の理論土圧と計測土圧は概ね同等の値を示しているが、山砂と C40 は理論土圧が過小に評価する傾向にある。荷重載荷前後の比較では、破碎瓦の計測土圧の変化は確認できないが、山砂と C40 は理論的な土圧増分値と計測土圧の増分値が概ね同等の値を示している。

理論土圧と計測土圧の相違については、実験施設による土圧計測状況(自然条件、各材料の骨格構造等の影響)によることが要因(詳細は参考資料を参照)と考えられるが、破碎瓦は土圧低減材料として有効であることや、理論土圧と計測土圧ともに「破碎瓦<C40<山砂」と同様のトレンドを示すことを再検証することができた。

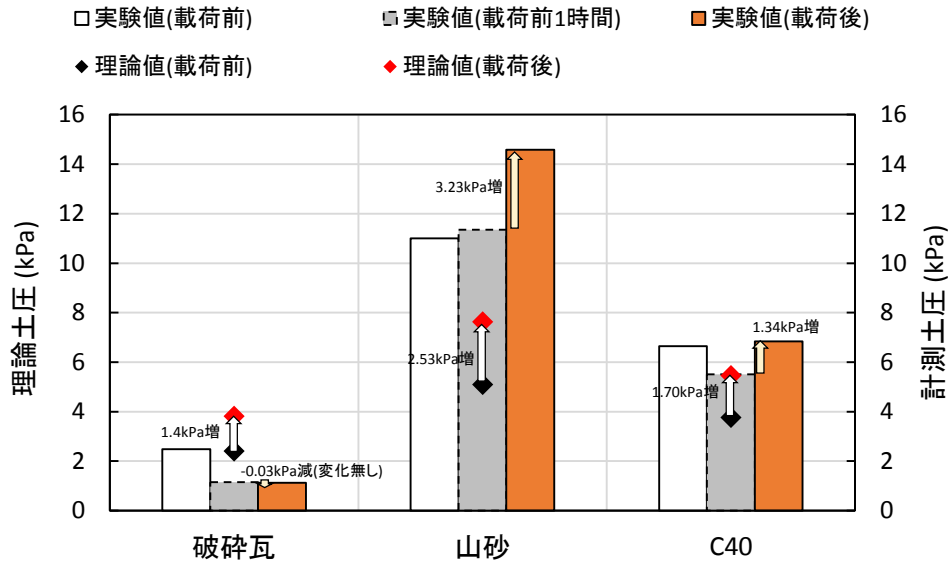


図 3.7 理論土圧と計測土圧の比較

3.6.2. 模型載荷実験の計測土圧との比較

模型載荷実験での計測土圧と理論土圧の比較を行う。なお、模型載荷実験の詳細については参考資料(p.136 以降)に後述するが、実施した実験ケースのうち、模型の固定された側壁による影響（サイロ効果の影響）が無く、壁面に作用する水平土圧分布の形状がきれいに得られた部分載荷ケース(Case2)の計測土圧と理論値土圧の比較を行う。理論土圧は前述した式 3.1 に示す算定方法とし、土圧算定条件は表 3.6 に示す通りである。鉛直方向の土圧分布については、図 3.9 に示すようにブシネスクの弾性応力解に基づく方法を用いて推定を行った。

表 3.6 理論土圧算定の主な条件

項目	設定値	備考
上載荷重 ω	全材料： $\omega=10 \text{ kN/m}^2$	
湿潤単位体積重量 γ	破碎瓦： $14.15 \text{ kN/m}^3 (=1.445 \cdot 9.807)$ 山砂： $15.89 \text{ kN/m}^3 (=1.620 \cdot 9.807)$	名古屋工業大学で実施された土の乾燥密度試験結果より設定
内部摩擦角 ϕ	破碎瓦： 44.6° 山砂： 30° を仮定。	破碎瓦は名古屋工業大学で実施された CD 試験結果より設定
壁面摩擦角 δ	破碎瓦： 28.24° 山砂： 24.60°	模型載荷実験の鋼製土槽の壁面摩擦角を想定

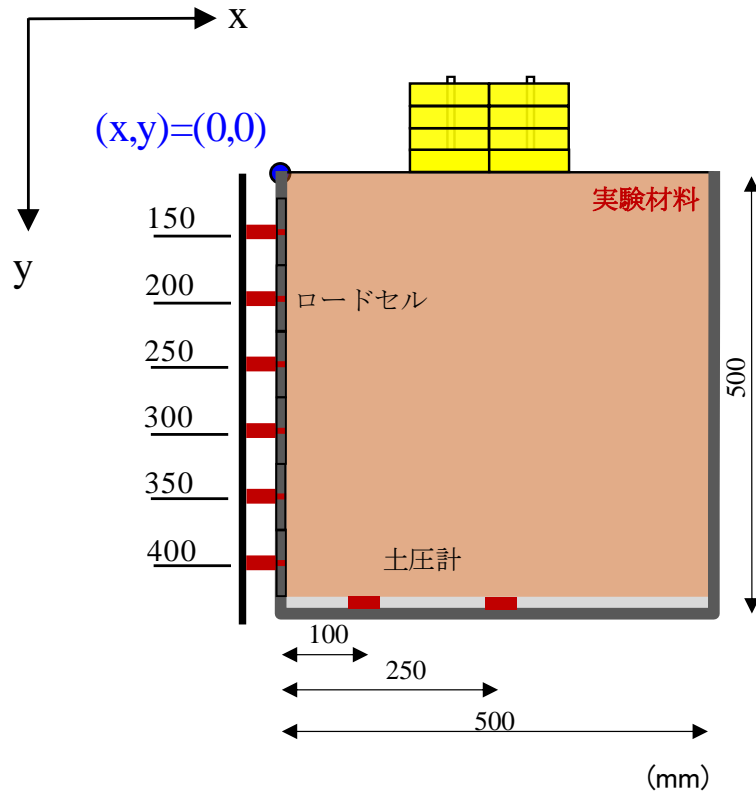


図 3.8 荷重載荷実験のイメージ図

$$\Delta\sigma_y = \frac{q}{\pi} (2\theta + \sin 2\theta \cos 2\varphi)$$

$$\Delta\sigma_x = \frac{q}{\pi} (2\theta - \sin 2\theta \cos 2\varphi)$$

$$2\varphi = \alpha_2 + \alpha_1$$

$$2\theta = \alpha_2 - \alpha_1$$

ここに、

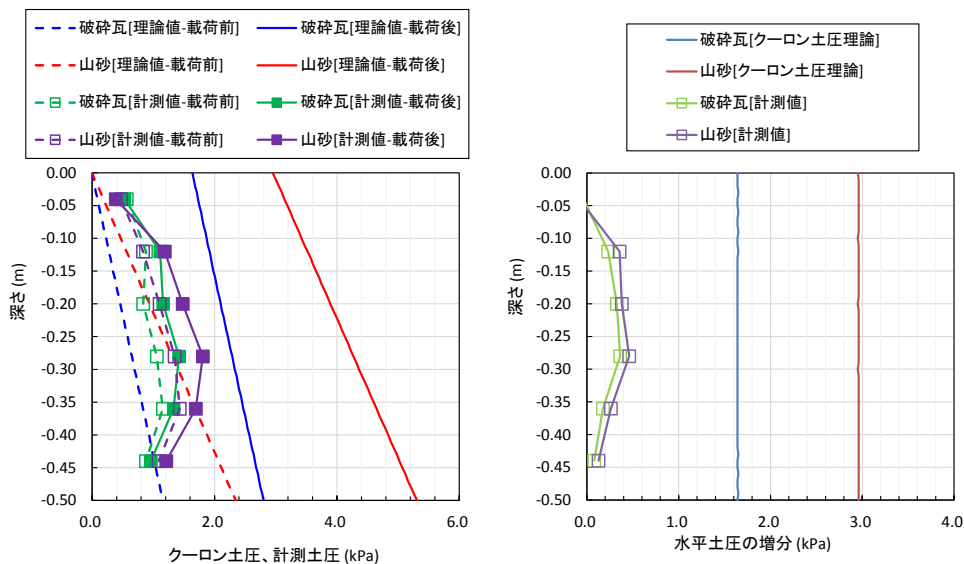
- $\Delta\sigma_y$: 鉛直荷重の増分値(kN/m²)、
- $\Delta\sigma_x$: 水平荷重の増分値(kN/m²)、
- q : 等分布荷重(kN/m²)、
- α_1 : 荷重載荷終了地点と任意座標地点を結ぶ直線と $x=0$ の直線とのなす角度(°)、
- α_2 : 荷重載荷開始地点と任意座標地点を結ぶ直線と $x=0$ の直線とのなす角度(°)

図 3.9 ブシネスクの弾性応力解に基づく方法

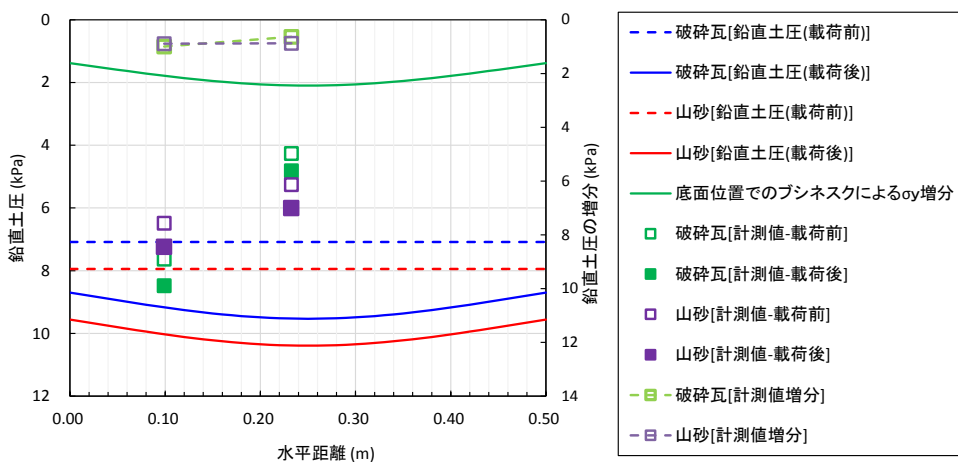
土圧分布の理論値と計測値の深度分布を図 3.10 に示す。水平土圧分布の理論値と計測値の比較では、理論土圧と計測土圧ともに「破碎瓦<山砂」となる大小関係の傾向をとらえているものの、理論土圧の方が過大に評価する傾向にある。

鉛直土圧分布の理論値と計測値の比較では、理論値では中央部の作用土圧および増分が大きく推定されるが、計測値では側面部の土圧および増分が大きく生じる結果となり、両者の結果に乖離が確認される結果となった。中央部よりも比較的精度良く計測が実施されていると考えられる側面部の計測値に着目すると、理論値での傾向(山砂>破碎瓦)と異なる傾向を示している。これは、模型载荷実験結果から推測された通り、破碎瓦の応力分散角が山砂よりもやや小さくなる可能性があるためと考えられる。

模型载荷実験の計測値と理論土圧の比較では、両者の間で必ずしも整合が図れていないが、設計で用いる理論値は全体的に計測値を包絡しているため、設計上は安全側の検討が可能であることがいえる。



(1)水平土圧の深度分布



(2)鉛直土圧の深度分布

図 3.10 破碎瓦および山砂の理論土圧と計測土圧の深度分布比較

4. 動的特性

4.1. 液状化特性

繰返し非排水三軸試験は、地震等による動的繰返し応力を非排水条件のもとで受ける土の液状化強度特性や各種地盤の変形挙動を求めるものである。ここでは、4つの供試体(破碎瓦 0-20mm)を用いて試験を実施し、繰返し応力比($\sigma_d/2\sigma'_0$)と繰返し载荷回数 N_c の関係図を図 4.1 に示す。なお、この排水三軸圧縮試験結果は、愛知県陶器瓦工業組合にて実施されたものである。

図 4.1 の液状化強度曲線より、軸ひずみ両振幅 DA5%のひずみ領域において、繰返し载荷回数 $N_c 20$ 回に対する液状化応力比 RL20 が 0.58 と大きな値が得られている。液状化強度が高いことから、L1 地震動では液状化の可能性は低いものと考えられる。但し、マグニチュードの大きな海溝型の巨大地震(例えば平成 23 年東北地方太平洋地震や、発生確率が高まりつつある南海トラフを震源とする地震)においては、継続時間の長い地震動が発生する。このような規模の大きな地震を想定する場合には、繰返し回数 60 回程度を越える領域での液状化特性の把握を行っておくことが望ましい。

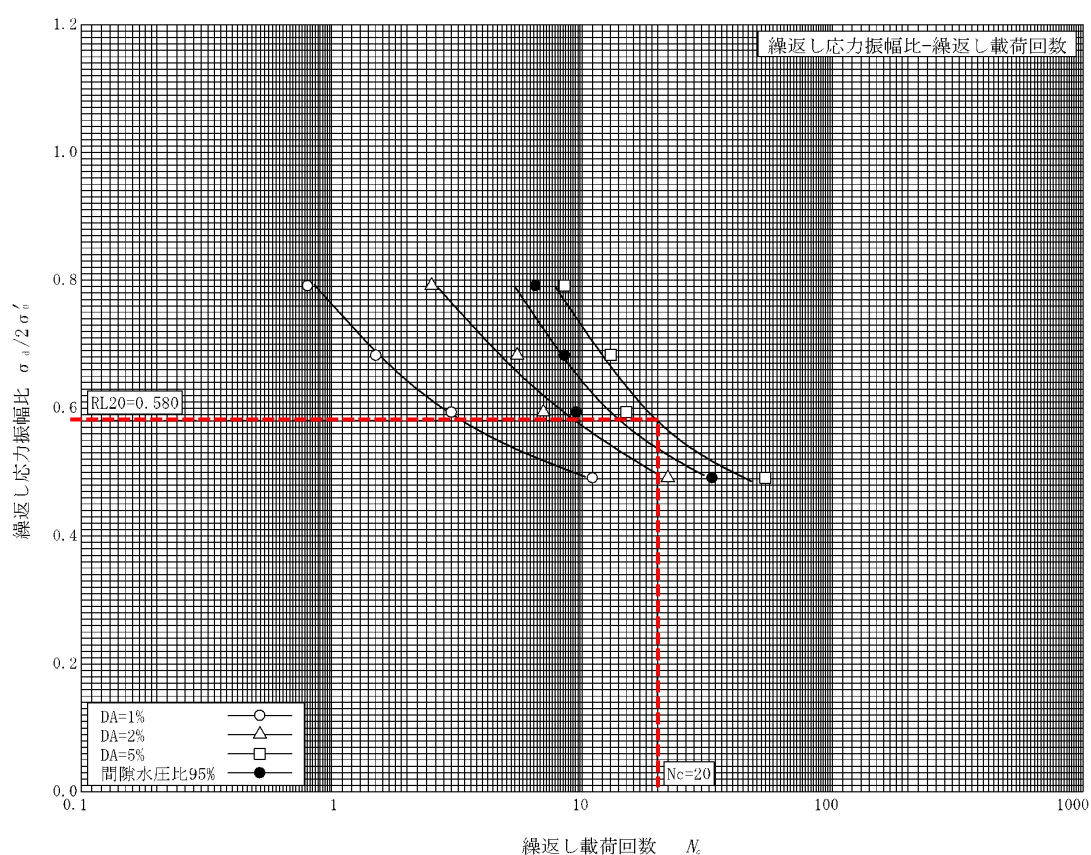


図 4.1 繰返し非排水三軸試験

4.2. 沈下特性

破砕瓦の沈下特性は、気中施工のように締固めが可能な場合には沈下の影響は少なく、水中施工のように締固めができず、緩く堆積した状態を想定した場合には、振動等の作用により沈下の生じる可能性がある材料であることがいえる。

<気中施工時の検討例>

実験施設を用いた観測結果うち、各材料毎の走行路中央部における水準測量(横断測量)の結果を図 4.2 に示す。この結果より、常時(H28/2/10~H28/11/10)では全ての材料で沈下量進展の相違は確認できないが、10ton ダンプトラックを集中的に通行させた車両通行実験後の測定(H28/12/1)では、破砕瓦は他の材料と比較して轍掘れの影響が小さいことが確認できた。このことから、破砕瓦は、沈下の小さい材料であることが確認できる。なお、実験施設での観測データの詳細については、参考資料(p.61 以降)に後述する。

轍掘れが他の材料よりも小さかった要因としては、破砕瓦の内部摩擦角が 44.6° と高く、繰返し荷重によるせん断抵抗力が高いことに起因しているものと考えられる。

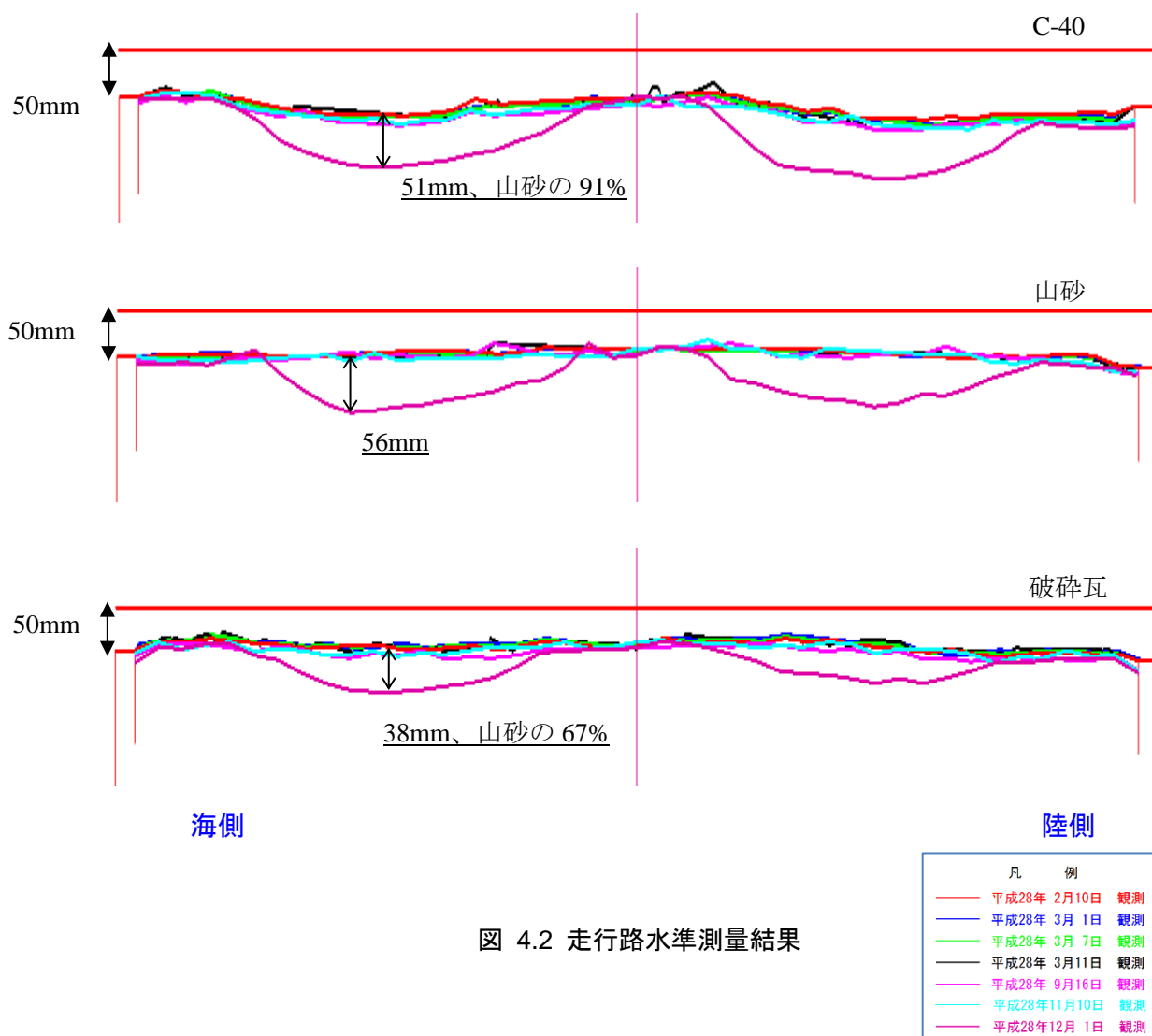


図 4.2 走行路水準測量結果

＜水中施工時の検討例＞

水中施工時を想定して実施した水中落下試験後の堆積試料を用いて、振動試験が実施されている。振動を作用させた場合、破碎瓦の堆積層を構成する骨格構造にはそれほど変化が生じないものの、比較的を細かな粒径の材料が骨格間の間隙中に浮遊して抜ける挙動を示し、全体的に 4.5%程度の体積収縮が生じる材料であることが確認されている(表 4.1 及び写真 4.1 参照)。振動試験の詳細については参考資料(p.121 以降)に後述。

したがって、水中施工時のように締固めが困難で緩く堆積することを想定する場合には、振動作用による沈下の発生を考慮しておく必要がある。ただし、水中施工時の沈下特性は、砂質土等の一般的な材料に対しても同様のことがいえるため、破碎瓦に限った特性では無い。

表 4.1 振動試験による加振後の境界面マーカの沈下量と体積ひずみ

供試体	測定数	1	2	3	4	5	平均 (mm)	マーカ- 高さ(mm)	体積ひずみ $\epsilon(\%)$
No.4	上	24.0	25.0	25.5	27.0	23.0	24.90	680	3.66
	下	14.5	15.5	15.5	13.0	15.5	14.80	330	4.48
No.5	上	24.0	20.0	25.0	24.0	--	23.25	600	3.88
	下	11.5	11.5	18.0	--	--	13.67	300	4.56
No.6	上	37.5	38.0	37.0	33.0	30.0	35.10	620	5.66
	下	15.0	15.0	16.0	13.0	--	14.75	300	4.92

全供試体の ϵ_{Ave} = 4.53

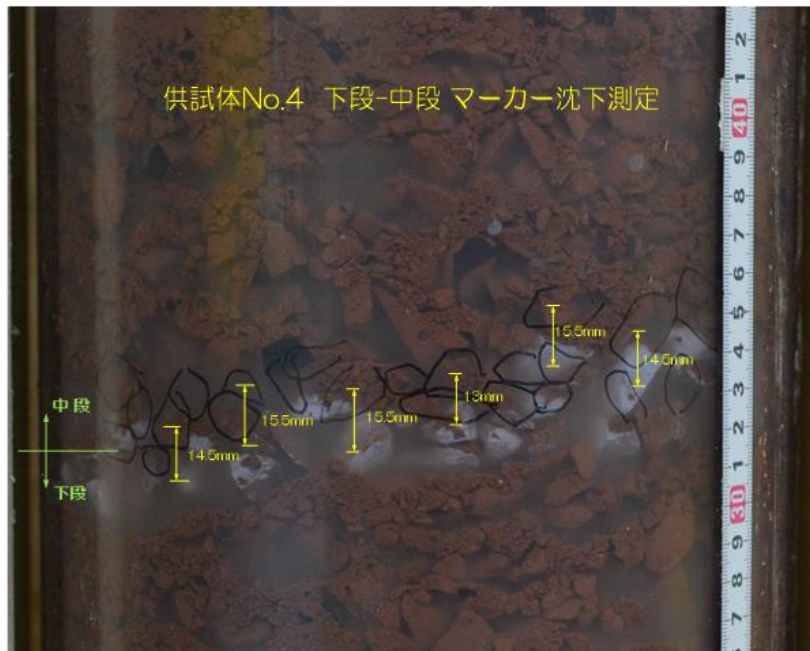


写真 4.1 No.4 供試体マーカの沈下量の一例

5. 環境特性

5.1. 化学物質等による環境への影響

図 5.1 に示すようにリサイクル材料の利用時における科学的な安全性の検討として、下記基準の評価等が実施されている。各種試験に基づいた評価の結果、破碎瓦は陸上および海上での利用において、環境汚染に関する影響は無い材料であることがいえる。

- ① 土壌の汚染に係る環境基準及び農地基準(環告 46 号溶出試験)
- ② 農用地における土壌中の重金属等の蓄積防止に係る管理基準について(昭和 59 年環水土第 149 号)
- ③ 土壌汚染対策法に定める含水量調査(環告 19 号成分試験)
- ④ 産業廃棄物に係る海洋投入処分に係る判定基準の調査(環告 13 号溶出試験)

土壌の汚染に係る環境基準(環境省告示第46号)-1					土壌の汚染に係る環境基準(環境省告示第46号)-2				
分析項目	単位	調査結果	基準値	判定	分析項目	単位	調査結果	基準値	判定
カドミウム	mg/L	0.001未満	0.01mg/L 以下	○	1, 1, 1-トリクロロエタン	mg/L	0.001未満	1mg/L 以下	○
全シアン	mg/L	検出されず	未検出	○	1, 1, 2-トリクロロエタン	mg/L	0.0006未満	0.006mg/L 以下	○
有機燐(りん)	mg/L	検出されず	未検出	○	トリクロロエチレン	mg/L	0.002未満	0.03mg/L 以下	○
鉛	mg/L	0.005未満	0.01mg/L 以下	○	テトラクロロエチレン	mg/L	0.0005未満	0.01mg/L 以下	○
六価クロム	mg/L	0.01未満	0.05mg/L 以下	○	1, 3-ジクロロプロペン	mg/L	0.0002未満	0.002mg/L 以下	○
砒(ひ)素	mg/kg	0.4未満	15mg/土壌1kg 未満	○	チウラム	mg/L	0.0006未満	0.006mg/L 以下	○
総水銀	mg/L	0.0005未満	0.0005mg/L 以下	○	シマジソ	mg/L	0.0003未満	0.003mg/L 以下	○
アルキル水銀	mg/L	検出されず	未検出	○	チオベンカルブ	mg/L	0.002未満	0.02mg/L 以下	○
PCB	mg/L	検出されず	未検出	○	ベンゼン	mg/L	0.001未満	0.01mg/L 以下	○
銅	mg/kg	1.8	125mg/土壌1kg 未満	○	セレン	mg/L	0.002未満	0.01mg/L 以下	○
ジクロロメタン	mg/L	0.002未満	0.02mg/L 以下	○	ふっ素	mg/L	0.11	0.8mg/L 以下	○
四塩化炭素	mg/L	0.0002未満	0.002mg/L 以下	○	ほう素	mg/L	0.02未満	1mg/L 以下	○
1, 2-ジクロロエタン	mg/L	0.0004未満	0.004mg/L 以下	○					
1, 1-ジクロロエチレン	mg/L	0.002未満	0.02mg/L 以下	○					
シス-1, 2-ジクロロエチレン	mg/L	0.004未満	0.04mg/L 以下	○					

農用地における土壌中の重金属等の蓄積防止に係る管理基準 (昭和59年環水土第149号)				
分析項目	単位	調査結果	基準値	判定
亜鉛	mg/kg	49	120mg/kg	○

土壌汚染対策法に基づく含有量基準(環境省告示第19号)				
分析項目	単位	調査結果	基準値	判定
カドミウム及びその化合物	mg/kg	5未満	150mg/L	○
六価クロム化合物	mg/kg	2未満	250mg/kg 以下	○
シアン化合物	mg/kg	1未満	50mg/kg以下 (遊離シアン)	○
水銀及びその化合物	mg/kg	0.05未満	15mg/kg 以下	○
セレン及びその化合物	mg/kg	0.5未満	150mg/kg 以下	○
鉛及びその化合物	mg/kg	5未満	150mg/kg 以下	○
砒素及びその化合物	mg/kg	0.5未満	150mg/kg 以下	○
ふっ素及びその化合物	mg/kg	10未満	4,000mg/kg 以下	○
ほう素及びその化合物	mg/kg	5未満	4,000mg/kg 以下	○

産業廃棄物の最終処分(海洋投入処分)に係る基準(環境省告示第13号)-1				
分析項目	単位	調査結果	基準値	判定
アルキル水銀化合物	mg/L	検出されず	未検出	○
水銀又はその化合物	mg/L	0.0005未満	0.0005mg/L 以下	○
カドミウム又はその化合物	mg/L	0.005未満	0.01mg/L 以下	○
鉛又はその化合物	mg/L	0.01未満	0.01mg/L 以下	○
有機燐(りん)化合物	mg/L	検出されず	未検出	○
六価クロム化合物	mg/L	0.04未満	0.05mg/L 以下	○
砒(ひ)素又はその化合物	mg/L	0.0005未満	0.01mg/L 以下	○
シアン化合物	mg/L	検出されず	未検出	○
PCB	mg/L	検出されず	未検出	○
トリクロロエチレン	mg/L	0.002未満	0.03mg/L 以下	○
テトラクロロエチレン	mg/L	0.001未満	0.01mg/L 以下	○
ジクロロメタン	mg/L	0.002未満	0.02mg/L 以下	○
四塩化炭素	mg/L	0.001未満	0.002mg/L 以下	○
1, 2-ジクロロエタン	mg/L	0.001未満	0.004mg/L 以下	○
1, 1-ジクロロエチレン	mg/L	0.002未満	0.02mg/L 以下	○

図 5.1 破碎瓦の安全性 1), 4)

港湾工事への適用を想定する場合、材料のライフサイクルの中で最も配慮すべき暴露環境に着目し、その暴露環境における土壌および海水等の環境媒体が、環境基準等を満足できるように、スラグ骨材を参考にして環境安全品質が規定されている⁶⁾。中でも、港湾用途の環境安全品質基準では、港湾施設は大量の海水と接していることにより溶出成分が希釈されることを勘案して、**表 5.1** に示すようにカドミウム、鉛、六価クロム、砒素、水銀およびセレンについては、一般用途の 3 倍の基準が設けられている。ただし、海水と接する港湾の施設又はそれに関する施設で半永久的に使用され、解体・再利用されることのない場合のみ適用される。港湾に使用する場合であっても再利用を予定する場合は、一般用途として取り扱わなければならない。本資料では、将来当該施設を掘り返すことも視野に入れた上、一般用途で判定を行った。

破砕瓦をリサイクル材料として利用するに際しては、科学的な安全性の検討として、下記の基準評価等が実施されている。その基準評価を**表 5.2**～**表 5.4** に示す。また、「港湾・海岸等整備におけるリサイクル技術指針 平成 16 年 3 月港湾・空港等リサイクル推進協議会」では、埋立工事に利用する土砂は「海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律」の水底土砂判定基準を満足しなければならないとされている。**表 5.5** に水底土砂に係る判定基準(水砕スラグの溶出量基準と同様)を示す。ここで、「水底土砂に係る判定基準」と**表 5.4** の「産業廃棄物の海洋投入処分に係る判定基準」を比べると、後者の基準の方が厳しくなっており、破砕瓦はその厳しい基準を満足しているため、「水底土砂に係る判定基準」も満たしていることが確認できた。これより、海洋に流出しても環境面での問題はないものと考えられる。実例として、**図 5.2** に示す通り、平成 22 年度に愛知県農林水産部水産課により浅場干潟造成材として大規模な海洋実証試験が実施され、破砕瓦の海中巻き出しによる海域の濁りが発生しているが、環境への影響はないことが確認されている。

以上より、破砕瓦の環境特性に関する判定基準は、利用時における科学的な安全性を検討した上、溶出水による海水への影響を十分配慮し、以下に示す 3 つの環境判定基準を対象とした。

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">① 土壌の汚染に係る環境基準(環告 46 号溶出試験)【表 5.2】② 土壌汚染対策法に定める含水量調査(環告 19 号成分試験)【表 5.3】③ 産業廃棄物に係る海洋投入処分に係る判定基準の調査(環告 13 号溶出試験)【表 5.4】 |
|---|

表 5.1 環境安全品質基準⁶⁾

(a) 一般用途			(b) 港湾用途 [*]	
項目	溶出量 (mg/L)	含有量 (mg/kg)	項目	溶出量 (mg/L)
カドミウム	0.01以下	150以下	カドミウム	0.03以下
鉛	0.01以下	150以下	鉛	0.03以下
六価クロム	0.05以下	250以下	六価クロム	0.15以下
砒素	0.01以下	150以下	砒素	0.03以下
水銀	0.0005以下	15以下	水銀	0.0015以下
セレン	0.01以下	150以下	セレン	0.03以下
フッ素	0.8以下	4000以下	フッ素	15以下
ホウ素	1以下	4000以下	ホウ素	20以下

注¹⁾ 港湾用途の材料が備えるべき環境安全品質に関する科学的知見が十分ではないため、当面の間、この規定としている。

^{*} 港湾用途は一般用途の3倍の環境安全品質基準

表 5.2 土壌の汚染に係る環境基準(46号溶出試験)の調査結果⁷⁾

分析項目	単位	調査結果	環境基準 (環境上の条件)
カドミウム	mg/L	0.001未満	検液1Lにつき0.01mg以下であること。
全シアン	mg/L	検出されず	検液中に検出されないこと。
有機燐	mg/L	検出されず	検液中に検出されないこと。
鉛	mg/L	0.005未満	検液1Lにつき0.01mg以下であること。
六価クロム	mg/L	0.01未満	検液1Lにつき0.05mg以下であること。
砒素	mg/L	0.005未満	検液1Lにつき0.01mg以下であること。
総水銀	mg/L	0.0005未満	検液1Lにつき0.0005mg以下であること。
アルキル水銀	mg/L	検出されず	検液中に検出されないこと。
ポリ塩化ビフェニル	mg/L	検出されず	検液中に検出されないこと。
ジクロロメタン	mg/L	0.002未満	検液1Lにつき0.02mg以下であること。
四塩化炭素	mg/L	0.0002未満	検液1Lにつき0.002mg以下であること。
1,2-ジクロロエタン	mg/L	0.0004未満	検液1Lにつき0.004mg以下であること。
1,1-ジクロロエチレン	mg/L	0.002未満	検液1Lにつき0.02mg以下であること。
シス-1,2-ジクロロエチレン	mg/L	0.004未満	検液1Lにつき0.04mg以下であること。
1,1,1-トリクロロエタン	mg/L	0.001未満	検液1Lにつき1mg以下であること。
1,1,2-トリクロロエタン	mg/L	0.0006未満	検液1Lにつき0.006mg以下であること。
トリクロロエチレン	mg/L	0.002未満	検液1Lにつき0.03mg以下であること。
テトラクロロエチレン	mg/L	0.0005未満	検液1Lにつき0.01mg以下であること。
1,3-ジクロロプロペン	mg/L	0.0002未満	検液1Lにつき0.002mg以下であること。
チウラム	mg/L	0.0006未満	検液1Lにつき0.006mg以下であること。
シマジン	mg/L	0.0003未満	検液1Lにつき0.003mg以下であること。
チオベンカルブ	mg/L	0.002未満	検液1Lにつき0.02mg以下であること。
ベンゼン	mg/L	0.001未満	検液1Lにつき0.01mg以下であること。
セレン	mg/L	0.002未満	検液1Lにつき0.01mg以下であること。
フッ素	mg/L	0.11	検液1Lにつき0.8mg以下であること。
ホウ素	mg/L	0.02未満	検液1Lにつき1mg以下であること。
砒素	mg/kg	0.4未満	土壌1kgにつき15mg未満であること。
銅	mg/kg	1.8	土壌1kgにつき125mg未満であること。

注) 「検出されず」とは、定められた方法により分析した場合において、その結果が当該方法の定量下限値 (全シアン : 0.1mg/L、有機燐 : 0.1mg/L、アルキル水銀 : 0.0005mg/L、PCB : 0.0005mg/L) を下回ることをいう。

表 5.3 土壌汚染対策法に基づく含有基準の調査結果⁷⁾

(平成15年3月6日環境省告示第19号)

分析項目	単位	調査結果	指定基準
カドミウム及びその化合物	mg/kg	5未満	150mg/kg以下
シアン化合物	mg/kg	1未満	50mg/kg以下 (遊離シアンとして)
鉛及びその化合物	mg/kg	5未満	150mg/kg以下
六価クロム化合物	mg/kg	2未満	250mg/kg以下
砒素及びその化合物	mg/kg	0.5未満	150mg/kg以下
水銀及びその化合物	mg/kg	0.05未満	15mg/kg以下
セレン及びその化合物	mg/kg	0.5未満	150mg/kg以下
フッ素及びその化合物	mg/kg	10未満	4000mg/kg以下
ホウ素及びその化合物	mg/kg	5未満	4000mg/kg以下

表 5.4 産業廃棄物の海洋投入処分に係る判定基準の調査結果⁷⁾

分析項目	単位	調査結果	判定基準
アルキル水銀化合物	mg/L	検出されず	検出されないこと
水銀又はその化合物	mg/L	0.0005未満	0.0005以下
カドミウム又はその化合物	mg/L	0.005未満	0.01以下
鉛又はその化合物	mg/L	0.01未満	0.01以下
有機燐化合物	mg/L	検出されず	検出されないこと
六価クロム化合物	mg/L	0.04未満	0.05以下
砒素又はその化合物	mg/L	0.005未満	0.01以下
シアン化合物	mg/L	検出されず	検出されないこと
PCB	mg/L	検出されず	検出されないこと
トリクロロエチレン	mg/L	0.002未満	0.03以下
テトラクロロエチレン	mg/L	0.001未満	0.01以下
ジクロロメタン	mg/L	0.002未満	0.02以下
四塩化炭素	mg/L	0.001未満	0.002以下
1,2-ジクロロエタン	mg/L	0.001未満	0.004以下
1,1-ジクロロエチレン	mg/L	0.002未満	0.02以下
シス-1,2-ジクロロエチレン	mg/L	0.004未満	0.04以下
1,1,1-トリクロロエタン	mg/L	0.001未満	1以下
1,1,2-トリクロロエタン	mg/L	0.001未満	0.006以下
1,3-ジクロロプロペン	mg/L	0.001未満	0.002以下
チウラム	mg/L	0.006未満	0.006以下
シマジン	mg/L	0.003未満	0.003以下
チオベンカルブ	mg/L	0.02未満	0.02以下
ベンゼン	mg/L	0.001未満	0.01以下
セレン又はその化合物	mg/L	0.005未満	0.01以下
有機塩素化合物	mg/L	0.8未満	1以下
銅又はその化合物	mg/L	0.01未満	0.14以下
亜鉛又はその化合物	mg/L	0.01	0.8以下
フッ化物	mg/L	0.2	3以下
ベリリウム又はその化合物	mg/L	0.02未満	0.25以下
クロム又はその化合物	mg/L	0.02未満	0.2以下
ニッケル又はその化合物	mg/L	0.03未満	0.12以下
バナジウム又はその化合物	mg/L	0.10	0.15以下
フェノール類	mg/L	0.025未満	0.2以下
ホウ素及びその化合物	mg/L	0.02未満	基準なし

注) 「検出されず」とは、定められた方法により分析した場合において、その結果が当該方法の定量下限値 (アルキル水銀化合物: 0.0005mg/L、有機燐化合物: 0.1mg/L、シアン化合物: 0.1mg/L、PCB: 0.0005mg/L) を下回ることをいう。

表 5.5 水底土砂に係る判定基準(水砕スラグの溶出量基準)⁸⁾

項目	判定基準
アルキル水銀化合物	アルキル水銀化合物につき検出されないこと。
水銀又はその化合物	検液 1Lにつき水銀0.005mg以下
カドミウム又はその化合物	検液 1Lにつきカドミウム0.1mg以下
鉛又はその化合物	検液 1Lにつき鉛0.1mg以下
有機燐化合物	検液 1Lにつき有機燐化合物1mg以下
六価クロム化合物	検液 1Lにつき六価クロム0.5mg以下
砒素又はその化合物	検液 1Lにつき砒素0.1mg以下
シアン化合物	検液 1Lにつきシアン1mg以下
PCB	検液 1LにつきPCB0.003mg以下
銅又はその化合物	検液 1Lにつき銅3mg以下
亜鉛又はその化合物	検液 1Lにつき亜鉛5mg以下
フッ化物	検液 1Lにつきフッ素15mg以下
トリクロロエチレン	検液 1Lにつきトリクロロエチレン0.3mg以下
テトラクロロエチレン	検液 1Lにつきテトラクロロエチレン0.1mg以下
ベリリウム又はその化合物	検液 1Lにつきベリリウム2.5mg以下
クロム又はその化合物	検液 1Lにつきクロム2mg以下
ニッケル又はその化合物	検液 1Lにつきニッケル1.2mg以下
バナジウム又はその化合物	検液 1Lにつきバナジウム1.5mg以下
有機塩素化合物	試料 1kgにつき塩素40mg以下
ジクロロメタン	検液 1Lにつきジクロロメタン0.2mg以下
四塩化炭素	検液 1Lにつき四塩化炭素0.02mg以下
1,2-ジクロロエタン	検液 1Lにつき1,2-ジクロロエタン0.04mg以下
1,1-ジクロロエチレン	検液 1Lにつき1,1-ジクロロエチレン0.2mg以下
シス-1,2-ジクロロエチレン	検液 1Lにつきシス-1,2-ジクロロエチレン0.4mg以下
1,1,1-トリクロロエタン	検液 1Lにつき1,1,1-トリクロロエタン3mg以下
1,1,2-トリクロロエタン	検液 1Lにつき1,1,2-トリクロロエタン0.06mg以下
1,3-ジクロロプロペン	検液 1Lにつき1,3-ジクロロプロペン0.02mg以下
チウラム	検液 1Lにつきチウラム0.06mg以下
シマジン	検液 1Lにつきシマジン0.03mg以下
チオベンカルブ	検液 1Lにつきチオベンカルブ0.2mg以下
ベンゼン	検液 1Lにつきベンゼン0.1mg以下
セレン又はその化合物	検液 1Lにつきセレン0.1mg以下
ダイオキシン類	検液 1Lにつきダイオキシン類10pg-TEQ以下

注) ダイオキシン類の基準値の「TEQ」とは、2,3,7,8-四塩化ジベンゾ-パラ-ジオキシンの毒性に換算した値であることを示す。

出典: 「海洋汚染防止及び海上災害の防止に関する法律施行令第5条第1項に規定する埋立場所等に排出しようとする金属等を含む廃棄物に係る判定基準を定める省令」(昭和48年総理府令第6号)

土粒子の密度が小さいため、海中捲きだしにより細粒分の沈降が遅く、海水の濁りが発生しているが、化学的な環境汚染はないことが確認されている。



図 5.2 海洋土木資材としての実証実験

※水深約 5m の海底(30m×80m 程度の区画)に瓦資材を 3000m³ 敷き均して施工

5.2. 海域の濁りに関する影響

破砕瓦を水中投入する場合、図 5.2 にも示す通り、土粒子の密度が小さいため細粒分の沈降速度が遅く、海域の濁りが生じることが報告されている。そこで、海域の濁りが解消するまでに要する時間について、水中落下試験から確認した(水中落下試験の概要については p.106 参照)。

水中落下試験による濁度計測の結果、破砕瓦を水中投入した際には、濁りの原因となる浮遊した細粒分が沈降しないため、濁りが解消されることは無い。そのため、必要に応じて濁り対策を別途行う必要があることに留意する必要がある。

6. 破碎瓦の材料特性を踏まえた破碎瓦の利活用方策

第 1 章から第 5 章までの内容を踏まえ、港湾工事等への利活用の観点から整理した破碎瓦の材料特性を以下に示す。

表 6.1 港湾工事を想定した破碎瓦の主な材料特性

項目	内容
土圧特性	・他の一般的な材料よりも軽量で、内部摩擦角が大きいため土圧低減材料として有効。
沈下特性	・締め固めが可能な気中施工の場合は沈下しないものと考えられる。 ・水中施工時の緩詰めの状態を想定した場合は、振動等の作用によって体積収縮による沈下が生じる可能性がある。
環境特性	・各種基準値を下回る試験結果が得られており、環境への影響はない。
液状化特性	・気中で締め固めた場合の液状化強度比 R_{L20} は 0.58 と大きいですが、水中投入時のゆるく堆積した状態を想定した場合、粒度の観点からは「液状化の可能性はある」層が堆積する。
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>海域の濁り</u> 環境への影響は無いが、水中捲き出し時には海域の濁りが発生するため、必要に応じて対応が必要。 ・<u>材料分離性</u> 水中投入時には分級が発生し、材料分離する。 ・<u>轍掘れの有無</u> 他の材料と比較して、車両通行による表層部分の轍掘れの影響は少ない。 ・<u>粒子破碎の有無</u> 車両通行等による繰返し荷重が作用した場合でも、「粒子破碎はしない」ものと考えられる。 ・<u>荷重作用時の応力伝達</u> 標準的な材料と比較すると水平土圧は比較的小さい。一方、鉛直土圧は他の材料と比較して荷重分散角が小さいために、やや大きくなる可能性がある。

また、明らかとなった破碎瓦の材料特性を踏まえ、**図 6.1** に示す用途を想定した適用性を整理した結果を**表 6.2**に示す。なお、各用途で想定する標準材料は以下の通りである。

・裏込材	：裏込石、栗石
・裏埋材・埋立柱、盛土材	：砂質土、礫質土等

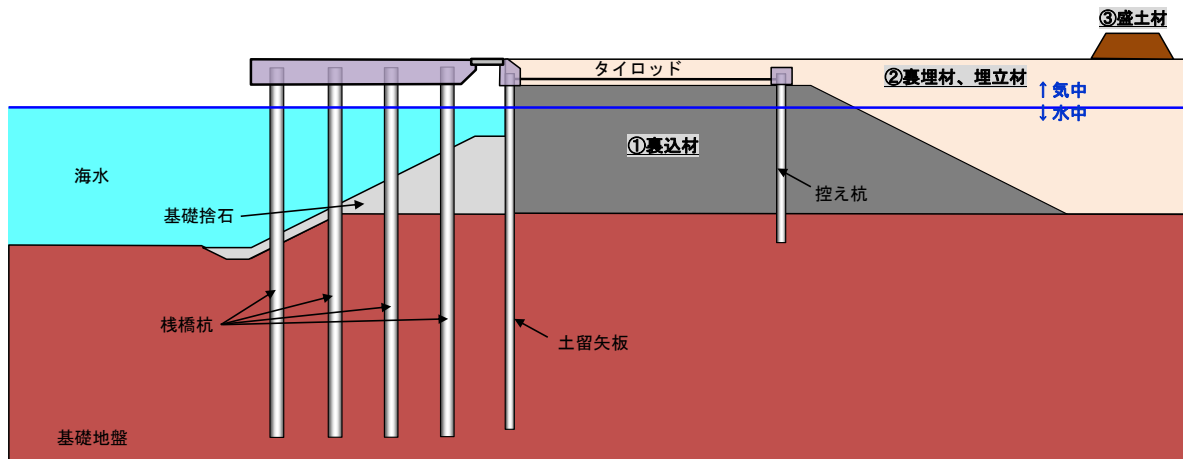


図 6.1 港湾工事の想定用途

表 6.2 破碎瓦の適用性検討

項目		内容および留意事項
品質	安定性	・物理的特性や力学的特性の経年的変化 ^{※)} の有無について、適用箇所の追跡調査等で把握しておくことが望ましい。 ・水中施工時の材料分離性や濁りに対しては必要に応じて対応を図る必要がある。
	安全性	有害物質の溶出や、それによる環境汚染は無い。
	環境配慮	リサイクル材料であるため、環境負荷低減効果がある。
	品質改善	予め細粒分の除去(水洗いや粒度調整等)を行うことで、水中施工を想定した用途へ適用できる可能性がある。
経済性	初期コスト	材料費(運搬費込み)の観点からは、0-20mmを使用する際は、標準材料と比較して有利となる可能性があるが、細粒分の除去等を行うと経済的に不利となる場合がある。
	維持管理上の留意点	経年的劣化 ^{※)} の可能性がある場合、定期的な点検等が必要となる可能性がある。
施工性	施工条件	地域特性等による施工性の制限は無い。
	工法	標準材料で想定される工法と同様に施工可能である。
	工期	施工時における工期の変動は生じない。
供給可能性		工事に必要な材料が多くなると、予め材料の貯蔵計画が必要となる。

※)材料の経年的変化については、適用事例の積み重ねで解明される内容であるため、適用開始から一定間隔で粒度分布の変化や、透水性や内部摩擦角などの変化の有無を確認しておくことが望ましい。その他、スレーキング率については破碎瓦 0-20mm の試験データが無い場合、評価しておくことが望ましいと考えられる。

表 6.3 裏込材の適用評価

用途	標準材料	材料特性 (標準材料)	材料特性 (破碎瓦)	内容
裏込材	裏込石、 栗石	単位体積重量(気中)：18kN/m ³ 単位体積重量(水中)：20kN/m ³	14.66 kN/m ³ 13.29 kN/m ³	土圧低減材料として有効である。
		内部摩擦角：35～40°	44.6 (水中安息角 35°程度)	既往検討(名古屋工業大学)より、破碎瓦は「内部摩擦角>安息角」となることが確認されているため、標準材料に準ずる材料特性を有していると考えられる。
		海域の濁り：発生しない	発生する	<u>土粒子の密度が小さく細粒分の沈降が遅いため、濁りが発生する。そのため、必要に応じて海域への濁りの発生を防ぐ対策が必要である。</u>
		沈下特性：沈下しない	沈下しない (気中部) 沈下する (水中投入部)	気中部については締固め施工が可能であるため、振動等の作用による大きな体積ひずみは発生しないものと推測される。 <u>水中投入を想定した締固めを実施しない場合は、振動等の作用により約4.5%の体積ひずみが生じる。必要に応じてSCP工法等の対策を行う必要がある。</u>
		液状化特性：液状化しない	R _{L20} =0.58	<u>L1地震については液状化は発生しないと考えられるが、必要に応じて水中部の分級時における液状化強度の変化についても確認しておく必要がある。</u>

※「 」は留意点を表す。

表 6.4 埋立材、裏埋土の適用評価

用途	標準材料	材料特性 (標準材料)	材料特性 (破碎瓦)	内容
裏埋材、 埋立土	砂質土、 礫質土	単位体積重量(気中)：18kN/m ³ 単位体積重量(水中)：20kN/m ³	14.66 kN/m ³ 13.29 kN/m ³	土圧低減材料として有効である。
		内部摩擦角：30° 程度	44.6 (水中安息角 35° 程度)	既往検討(名古屋工業大学)より、破碎瓦は「内部摩擦角>安息角」となることが確認されているため、標準材料に準ずる材料特性を有していると考えられる。
		沈下特性：沈下しない	沈下しない (気中部) 沈下する (水中投入部)	気中部については締固め施工が可能であるため、振動等の作用による大きな体積ひずみは発生しないものと推測される。 <u>水中投入を想定した締固めを実施しない場合は、振動等の作用により約4.5%の体積ひずみが生じる。必要に応じて SCP 工法等の対策を行う必要がある。</u>
		液状化特性：液状化しないことが望ましい。	R _{L20} =0.58	<u>LI 地震については液状化は発生しないと考えられるが、必要に応じて水中部の分級時における液状化強度の変化についても確認しておく必要がある。</u>

※「 」は留意点を表す。

表 6.5 盛土材の適用評価

用途	標準材料	材料特性 (標準材料)	材料特性 (破碎瓦)	内容
盛土材	砂質土、 礫質土	単位体積重量(気中)：18kN/m ³ 単位体積重量(水中)：—	14.66 kN/m ³	土圧低減材料として有効である。
		内部摩擦角：30° 程度	44.6°	既往検討(名古屋工業大学)より、破碎瓦は「内部摩擦角>安息角」となることが確認されているため、標準材料に準ずる材料特性を有していると考えられる。
		沈下特性：沈下しない	沈下しない (気中部)	気中部については締固め施工が可能であるため、振動等の作用による大きな体積ひずみは発生しないものと推測される。
		締固め特性：締固め易い	締固め易い	標準的な材料として比較して締固め前後の地盤に大きな差が生じず、締固め管理が容易である。

※「 」は留意点を表す。

6.1. 主な施工方法と施工時の留意点

港湾工事での主な施工方法は表 6.6 および図 6.2 に示す通りである。破碎瓦を用いた場合でも同様の施工方法となる。

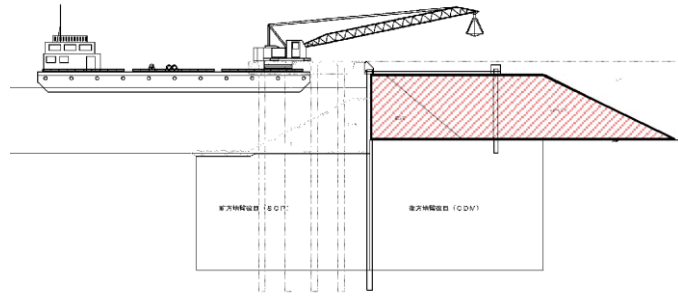
表 6.6 港湾工事の主な施工方法

海上工事	① ガット船による水中投入。【裏込材】
	② 揚土船を用いた土砂投入。【裏埋材・埋立材、】
陸上工事	③ 上からの揚土あるいは陸上から運搬して仮置きした土砂を、ホイールローダーやブルドーザー等によって二次運搬し、埋立工事を行う。【裏埋材・埋立材】
	④ 敷き均しおよび転圧して締固める。【裏埋材・埋立材、盛土材】

前節で整理した破碎瓦の材料特性を踏まえ、海上工事および陸上工事の留意点を表 6.7 に示す。水中投入による海上施工を想定した用途に対しては、いくつかの留意事項に対する対応を行うことで適用が可能であるが、陸上施工を想定した用途に対しては、水中投入時に想定されるような懸念事項がなく、海上施工よりも適用性が高いといえる。

表 6.7 各施工時の留意点

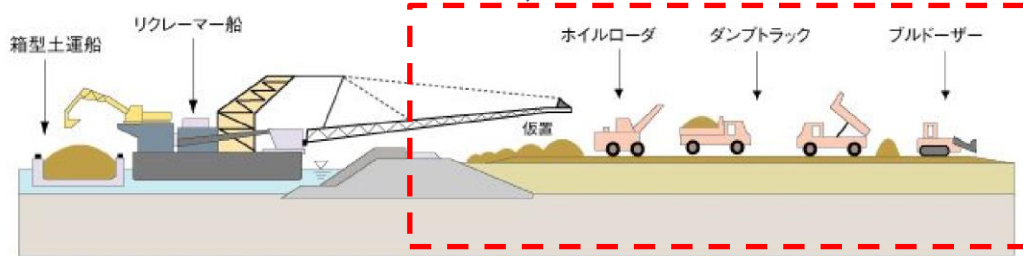
施工方法	適用用途	留意点
海上施工	<ul style="list-style-type: none"> ・裏込材 ・裏埋材、埋立材 	<p><濁りの発生> 濁りが発生するため、必要に応じて海域への濁り発生を防ぐ対策が必要である。</p>
		<p><分級の発生> 液状化特性および力学特性の変化が懸念され、適用に際して予め把握しておくことが望ましい。</p>
		<p><沈下の可能性> 水中投入による緩く堆積した状態を想定した場合(締固めをしない場合)、振動等で沈下が生じる可能性があるため、必要に応じて対策が必要となる。</p>
陸上施工	<ul style="list-style-type: none"> ・裏埋材、埋立材 ・盛土材 	<p>材料分離が生じず、締固め施工が可能であることから、品質確保のための特別な対策は不要である。</p>



①ガット船による水中投入



②揚土船を用いた土砂投入



③陸上運搬



④敷き均しおよび転圧

図 6.2 港湾施設の埋立工事の施工工程

6.2. 水中施工時の課題と対応策

これまでの検討で明らかとなった破碎瓦の材料特性を踏まえ、表 6.8 に水中施工時における課題と対応策(案)を示す。各対応策に関する概要を次頁に示す。

表 6.8 想定される水中施工時の課題と対応策(案)

施工方法	適用用途	課題	対応策
海上施工	<ul style="list-style-type: none"> ・裏込材 ・裏埋材、埋立柱 	濁りの発生	①汚濁防止膜の使用
			②水洗いによる細粒分の除去
		分級の発生	③粒度調整による細粒分等の除去
		沈下の可能性	④SCP 等による締固め

上記対応策のうち、海上施工時の緩い堆積層の締固め工法の採用は、対象施設の要求性能によって表 6.9 のように考えることができる。

表 6.9 施設の要求性能と締固め工法の実施レベル(案)

施設の要求性能	内容	締固め工法の実施レベル
使用性	使用上の不都合を生じずに施設等を使用できる性能のことであり、作用に対して想定される施設の構造的な応答においては、損傷の可能性が十分に低いこと、又はわずかな修復により速やかに所要の機能が発揮できる程度の損傷に留まることである。	必須
修復性	技術的に可能で経済的に妥当な範囲の修繕で継続的に使用できる性能のことであり、作用に対して想定される施設の構造的な応答においては、軽微な修復により短期間のうちに所要の機能が発揮できる程度の損傷に留まることである。	実施しておくことが望ましい
安全性	人命の安全等を確保できる性能のことであり、作用に対して想定される施設の構造的な応答においては、ある程度の損傷が発生するものの施設の構造安定上において致命的な状態には至らず、人命の安全確保に重大な影響が生じない程度の損傷に留めること。	必ずしも必要とはならない

表 6.10 水中施工時の課題の対応案

対応案	①汚濁防止膜の使用	②水洗いによる細粒分の除去	③粒度調整による細粒分の除去	④SCP等による締固め
<p>イメージ 図</p> 		<p>※工場でのふるい分け実施状況写真</p> 		
<p>内容</p>	<p>汚濁防止膜は、土砂の水中投入や浚渫時における海域汚濁の拡散を防止する目的で使用される。そのため、汚濁の原因となる投入土砂あるいは浚渫土砂の細粒分は、時間経過とともに沈降し、濁りは解消されることが前提として用いられる。</p> <p>破碎瓦の水中投入時の濁りは時間経過によって解消できないため、濁水の汲み取り除去等の処理を行う必要があり、適用には課題が残る。</p>	<p>工場出荷される破碎瓦 0-20mm を水洗いし、細粒分の除去を図る。</p> <p>洗浄後の濁水については凝集剤を用いて細粒分と水を分離させて処理する方法が考えられるが、工場内の設備整備(貯水槽の設置等)を行う必要があることから、供給に至るまでには課題が残る。</p>	<p>破碎瓦の生産過程で調整したい粒度に合わせたふるいめに交換し、ふるい分け工程を追加することで細粒分の除去を図る。</p> <p>細粒分を分けるために細かい篩目を使用すると目詰まりする可能性があることや、設備上、篩目の交換に時間を要するため、安定した供給量の確保には課題が残る。</p> <p>現在の工業設備では、破碎瓦 5-20mm の製品出荷が可能である。</p>	<p>水中投入後に緩く堆積した破碎瓦を対象に、サンドコンパクションパイル工法(SCP工法)等を用いて締固めを行う。</p> <p>なお、地盤の締固め工法にはSCP工法の他にも各種工法があるため、施工条件等を考慮して選定する必要がある(主な締固め工法は参考資料 p.179 参照)。</p>

※「~~~~~」は留意点を表す。

6.3. 標準材料との材料価格の比較

港湾工事の用途に破砕瓦を適用する場合、予め以下の項目を詳細に計画し、破砕瓦の発生量(供給可能量)を把握して総合的に検討する必要がある。

- ① 港湾工事の目的(例：岸壁の新設工事、岸壁を供用しながらの改良工事)
- ② ①に応じた破砕瓦を適用する土工に係る工期を適切に設定
- ③ 破砕瓦の年間発生量から算出した、工事必要材料の確保

ここでは、表 6.11 に示す港湾工事の用途で標準的に使用される材料と、破砕瓦の運搬費を加味した材料費の概算比較を行い、運搬距離に応じた経済性の感度分析を行った。

表 6.11 想定する各用途の標準材料

用途	標準材料
裏埋材や埋立柱	砂
裏込材	裏込石

分析結果より以下の傾向にあることがいえる。詳細な試算内容については参考資料に示す(参考資料 p.183 参照)。

- ① 標準材料との比較より、破砕瓦 0-20mm を用いると経済的に有利となる場合がある。
- ② 裏埋材や埋立柱として使用する場合は、工場からの運搬距離が近距離圏内の地域であれば、標準材料に比較して経済的に有利となる可能性がある。
- ③ 裏込材(気中部への適用を想定)として用いる場合は、陸上運搬および海上運搬ともに中距離圏内の地域であれば、標準材料に比較して経済的に有利となる可能性がある。

6.4. 適用性が高い用途

標準材料との材料費の比較より、破碎瓦 0-20mm で用いることが経済性で有利となる可能性があるため、経済性の観点ではにがりや分級への対策を行う必要のない気中部の用途への適用性が高いと考えられる。

そこで、供給可能量を設定した上で、モデルケース(延長 300m の港湾施設)を用いて適用可能箇所の検討を実施した。その結果、表 6.12 に示すように延長 1m あたり供給量は 46m³/m 程度となり、経済性および供給量の観点より、図 6.3 に示す箇所への適用が有効であると推察された。

特に、気中部への用途としては、破碎瓦が土圧低減材料であることの特徴を活かし、矢板式岸壁の増深改良時における土留矢板への作用土圧の低減を図る必要がある場合などの工事で、土留矢板の背後に裏埋材として適用することが効果的であると考えられる。

土留矢板背後の気中部の裏埋材としての適用を想定した概略的な試算の結果、作用土圧の低減により、一般的な材料を使用した場合と比較して、鋼材をより経済的な諸元に設定することができ、全体鋼材量を数%程度低減できる可能性がある。

詳細な試算内容については参考資料(p.185 参照)に示す。

表 6.12 港湾工事への供給量の試算(概算)

港湾施設への供給可能量の試算		備考
供給可能量(t)	7,667	リサイクル資材・土木資材の月別発生量*4ヶ月分
貯蔵可能量(t)	13,000	
工期内の供給可能量(t)	20,667	供給可能量+貯蔵可能量
破碎瓦の湿潤密度(t/m ³)	1.49	湿潤密度試験結果より
工事現場への供給量(m ³)	13,870	工期内の供給可能量/湿潤密度
バース延長(m)	300	
1mあたりの供給量(m ³ /m)	46	

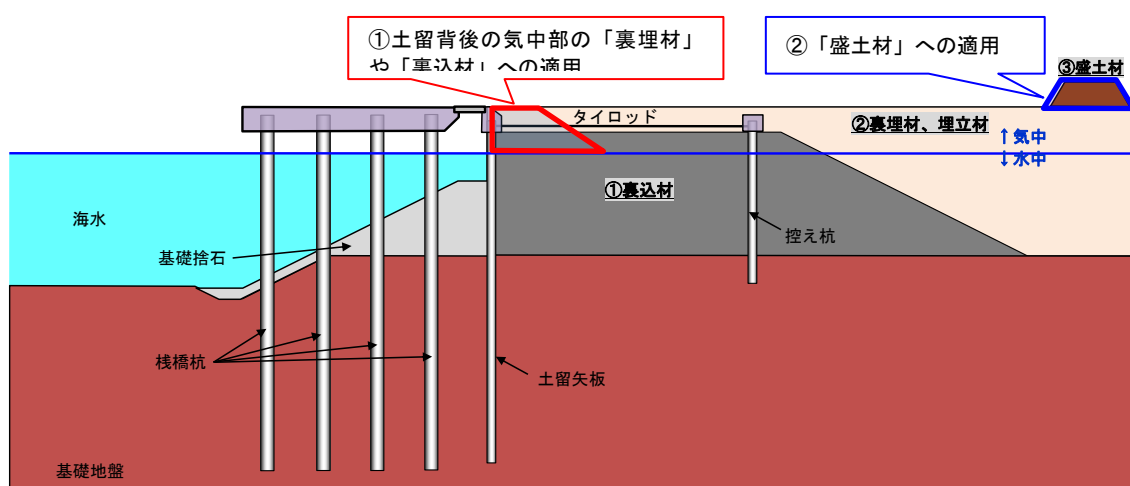


図 6.3 適用性が高い用途

6.5. 標準的な材料との優位性

破碎瓦は他の一般的な材料に比較して“土圧軽減効果が高いこと”と“圧縮性が低い”性質があるため、下記の点についても経済的に有利となる要素が挙げられる。

- ① 設計段階において、土留矢板に作用する主働土圧が低減されることで、より経済的な鋼材諸元を設定できる可能性があること。
- ② 一般的な材料と比較して体積変化率を低く見込むことが可能であること。

実験施設の盛土材は、各 3 種類の材料を 1 層あたり仕上げ厚さ 30cm、5 層転圧で施工されている。実験施設の構築時の破碎瓦と他の材料(山砂と C40)の転圧時の施工記録を表 6.13 に示す。表 6.13 より、破碎瓦は 1 層あたりの仕上げ厚 30cm にするために他の材料の約 0.87 倍 $\{=(\text{破碎瓦の捲き出し厚} : 33\text{cm}) / (\text{C40 と山砂の捲き出し厚} : 38\text{cm})\}$ の材料で転圧を完了することが可能であることが分かる。

表 6.13 破碎瓦と他の材料(山砂と C40)の転圧時の施工記録

材料	各層の仕上げ厚 (cm)	1層目		2～5層目			
		捲き出し時の層厚 (cm)	転圧後の層厚 (cm)		捲き出し時の層厚 (cm)	転圧後の層厚 (cm)	
C40	30	35	25 ~ 26	Ave.26	38	28 ~ 32	Ave.30
山砂							
破碎瓦			32 ~ 33	Ave.33		29 ~ 31	

このように破碎瓦は、工事に必要な材料(容量)の検討時に、体積変化率を低く見込むことが可能である。

6.6. 破碎瓦の材料特性参考値

破碎瓦の材料特性の参考値一覧を表 6.14 に示す。

なお、ここで示す破碎瓦の材料特性は、前述した各種材料試験の結果を取りまとめた参考値である。

表 6.14 破碎瓦の材料特性一覧(参考値)

項目	内容	
物理特性	粒度分布	礫質土と同様の粒度分布を示し、粒度分布の観点からは液状化の可能性は低い。 < H27の粒度試験結果 > ・最大粒径：19mm、・60%粒径(D ₆₀)：9.03mm、・50%粒径(D ₅₀)：7.22mm、 ・30%粒径(D ₃₀)：3.84mm、・10%粒径(D ₁₀)：0.45mm、・均等係数(U _c)：20.22、・曲率係数(U _c)：3.7
	土粒子密度 ρ _s (g/cm ³)	ρ _s =2.579(g/cm ³)程度
	最小・最大間隙比 e _{min} 、e _{max}	e _{min} =0.611程度 e _{max} =1.049程度
	液性限界・塑性限界	非塑性(NP)
	すり減り減量(%)	28%程度
	スレーキング率(%)	0.1%程度(破碎瓦(10-30mm)の値) ※必要に応じて、破碎瓦(0-20mm)のスレーキング率を今後評価する必要がある。
	乾燥密度 ρ _d (g/cm ³)	室内試験：ρ _d =1.444(g/cm ³)程度、現場試験(締固め)：ρ _d =1.635(g/cm ³)程度
	湿潤密度 ρ _w (g/cm ³)	程度
力学特性	締固め特性	最大乾燥密度：ρ _{dmax} =1.663(g/cm ³)程度、最適含水比w _{opt} =13.9%程度
	透水係数k(m/s)	k=9.15×10 ⁻⁵ (m/s)程度
	せん断強度定数	内部摩擦角φ=44.6(°)程度、粘着力c=55(kN/m ²)程度 ※礫質土の性状であることから、設計では粘着力は考慮しないことが多い。
	設計CBR	設計CBR=72.98%程度 ※H24～H27の4カ年データの平均値
	安息角	気中安息角=41(°)程度 水中安息角=35(°)程度
動的特性	液状化特性	軸ひずみ両振幅DA=5%時における液状化強度比RL ₂₀ =0.580程度
	沈下特性	・気中部：締固めを実施できるため沈下の影響は少ない。また、繰返し車両通行による輻振れの影響も少ない。 ・水中部：水中投入による緩詰め状態では、振動等の作用により沈下が生じる可能性がある。
環境特性	化学物質等による環境への影響	各種環境基準値を満足しており、環境への影響は無い。
	海域の濁りの影響	環境への影響は無いが、水中捲き出し時には土粒子の密度が小さく、細粒分の沈降が遅いため海域の濁りが発生可能性がある。よって、必要に応じて対応を行う必要がある。

7. 建設材料としての活用事例

愛知県では、リサイクル材料「破碎瓦」の有効利用に積極的に取り組んできた。破碎瓦を含むリサイクル材料について予め評価基準を公表し、製造業者からの申請を受けて、評価基準に適合するもの(あいくる材)として認定し、県の公共工事で率先利用する制度「あいくる(愛知県リサイクル資源評価制度)」を平成14年4月から実施している。あいくる材は、アスファルト混合物や路盤材等に使用されており、平成22年度～26年度のあいくる材利用実績データを表7.1に示す。

図7.1の写真に示すように本資料で対象とする破碎瓦(0-20mm)は、暗渠材や透水材、舗装材等にも使用できることが報告されている。

その他、港湾工事等の用途では、破碎瓦(0-40mm)ではあるが、表7.2および図7.2に示すように裏埋材としての活用実績がある。

表 7.1 あいくる材利用量⁹⁾

資材名	単位	あいくる材利用量				
		平成22年	平成23年	平成24年	平成25年	平成26年
アスファルト混合物	t	136,938	161,277	209,845	218,001	176,099
路盤材	m ³	210,126	191,698	209,095	214,186	242,694
プレキャストコンクリート製品						
側溝、U字溝	m	67,054	79,214	80,309	75,195	69,130
境界ブロック、縁石	m	41,732	42,499	46,121	40,113	39,433
L型擁壁	m	5,964	4,593	4,559	5,483	3,819
積みブロック	m ²	19,617	13,309	24,331	19,846	19,275
間伐材利用工事看板	箇所	2,856	2,966	3,029	3,187	3,089
堆肥・植栽基盤材	t	1,768	1,538	1,203	1,311	1,417



図 7.1 破碎瓦(0-20mm)の利用実績²⁾

表 7.2 港湾工事の用途への活用実績 4)

時期	使用量	工事名	粒径 (mm)	用途
平成 13 年 2~3 月	19,248t	港湾施設整備護岸工事(東浦町)：愛知県衣浦港務所 (護岸工事裏込め材)	0~40	港湾 工事材
平成 13 年 6 月,12 月	15,643t	港湾施設整備護岸工事(東浦町)：愛知県衣浦港務所 (護岸工事裏込め材) H13.6 3,490t (護岸工事裏込め材) H13.12 12,153t	0~40	港湾 工事材

※資料では「護岸工事裏込め材」と表記されているが、資料確認の結果「護岸工事裏埋材」であると判断された。

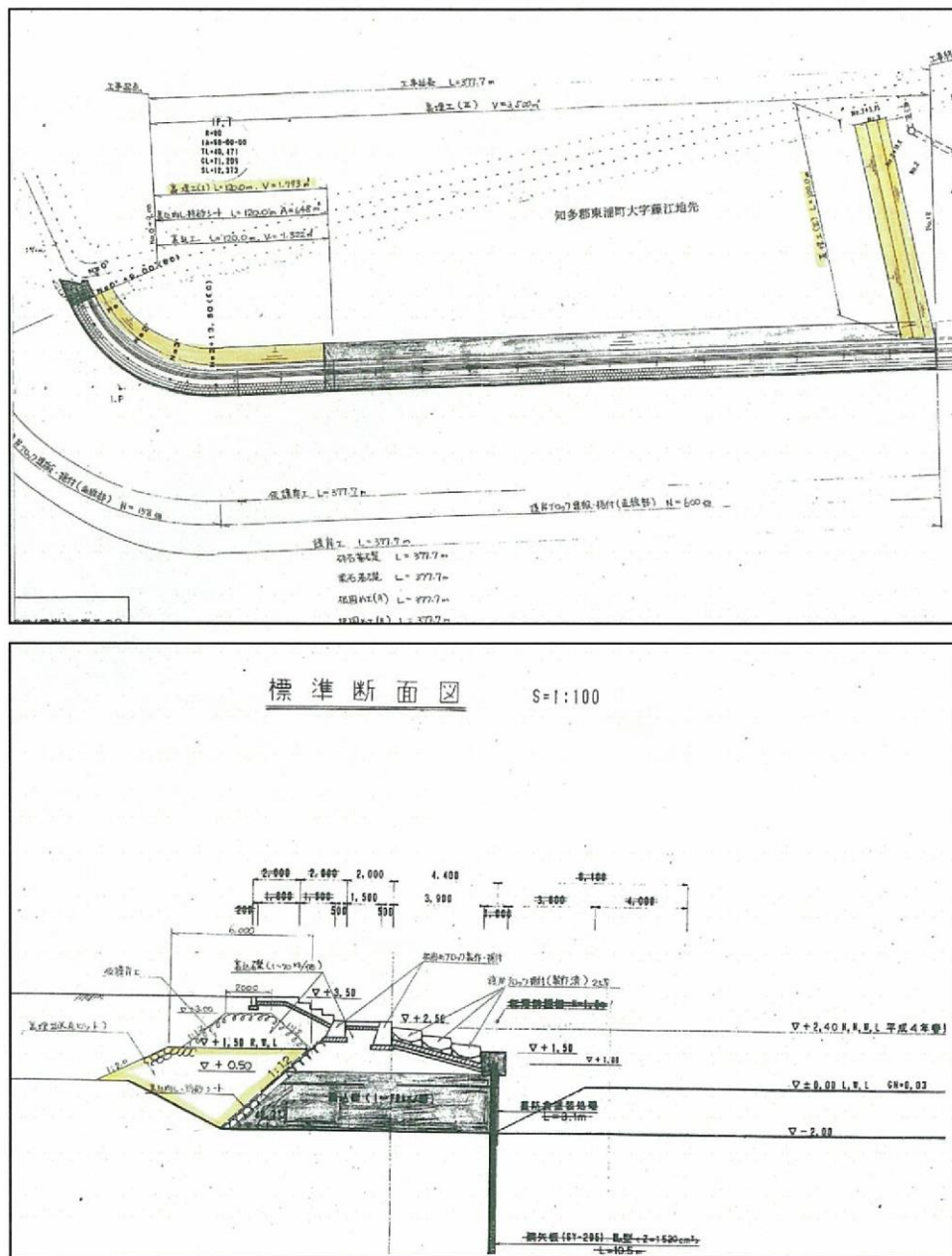


図 7.2 裏埋材としての活用事例 4)