

《様式B》

研究テーマ	「環境にやさしいリサイクル材料「破碎瓦」を用いた埋設物の長寿命化」		
研究責任者	所属機関名	名古屋工業大学	
	官職又は役職	助教	
	氏名	森河 由紀弘	メールアドレス morikawa.yukihiro@
共同研究者	所属機関名		nitech.ac.jp
	官職又は役職		
	氏名		

(令和元年度募集) 第32回 助成研究 完了報告書

1. 実施内容および成果ならびに今後予想される効果の概要

愛知県では、毎年約3億枚の粘土瓦が生産され、その内ヒビなどが生じた不良品瓦が約7%（約4万トン）発生する。また、高度経済成長期（1973年～1995年）には、日本全国で毎年約16.5億枚（約45億トン）の粘土瓦が生産されており、近い将来に毎年大量の廃棄瓦が発生する。そのため、不良品瓦や廃棄瓦のリサイクル化は社会的に非常に重要であり、期待されている。このような中、破碎瓦は摩擦性や透水性、軽量性などが優れた環境にやさしい地盤材料であることが明らかとされてきた。そこで、本検討では室内模型実験によって、破碎瓦の埋設管埋戻し材としての検討を行った。

実験土槽にはステンレス製の幅500mm×奥行500mm×高さ500mmの剛土槽を用いており、模型埋設管には近似内径が100mmの塩ビ管を用いた。埋戻し材には、乾燥した破碎瓦（0-5mm）および一般的な砂材料である豊浦砂（0-0.5mm）を用いた。ここで、日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針によれば、埋設管の最小土被り厚さは枝線で0.6m、本線では1.0mと規定されているが、本検討においては埋戻し材料による差を明確にするため、模型埋設管の土被り厚さ（設置深度）は $z=100\text{mm}$ 、 200mm 、 300mm 、 400mm とした。模型埋設管への載荷方法は、 $100\text{mm}\times 100\text{mm}$ の剛な正方形載荷板を用いて、埋設管の中心部直上の地表面に約 $7.8\text{mm}/\text{min}$ で変位制御による静的な載荷を行った。模型埋設管には上下左右4か所にひずみゲージを張り付けてあり、載荷板の沈下量、地盤反力、模型埋設管に発生するひずみを計測した。

検討の結果、破碎瓦の地盤支持力は土被り厚さ比に応じて豊浦砂（一般的な砂材料）の2倍～3.5倍もあることが分かった。そのため、舗装部に大型車両などによる大きな外力が作用した場合に、一般的な砂質土で埋め戻した埋設管に比べ、破碎瓦で埋め戻した埋設管の方が安全を確保できる可能性が高いことが分かった。さらに、土被り厚さ比が4程度以上あれば、埋設管にはほとんど上載荷重による影響が発生しないことが分かった。

本研究内容は、埋設管の保護や長寿命化につながる上、愛知県の地場産業にとっても非常に有意義な結果であり、実用化の可能性は高いと考えられる。一方で、本研究はリサイクル材料を用いた社会インフラに関する検討内容であるため、製品化などに関する検討内容とは異なるため、産業技術としての特許出願などの予定は現時点ではない。

2. 実施内容および成果の説明

2.1. はじめに

愛知県（三州瓦）は粘土瓦の生産量が日本一であり、毎年約 3 億枚（全国シェアの 7 割）の粘土瓦が生産される。そのうち、ヒビなどが入った不良品瓦が約 7%（約 6 万トン）発生する。そこで、愛知県の三州瓦では規格外瓦を細かく砕いた「破碎瓦」について、粒径が 0.5mm 以下の微粉末状のものについては粘土瓦の再生原料として利用する一方で、それより大きな粒径のものについては有効利用するために様々な検討¹⁾を行ってきた。ここで、粒径が 30mm 以下の破碎瓦は「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン（平成 27 年 12 月）／国土交通省 港湾局，航空局」で新しいリサイクル材料として認定されたものの、破碎瓦は鉄鋼スラグなど他のリサイクル材料に比べると、十分に検討されてきたとは言い難い。一方で、1973 年～1995 年には日本全国で毎年約 16.5 億枚（約 45 億トン）の粘土瓦が生産されてきたが、粘土瓦の耐用年数は約 60 年であり、近い将来には毎年大量の廃棄瓦が発生し、その処分方法や有効的な利活用方法が懸念されている。

そこで、著者らは粘土瓦の厚みとほぼ同様である粒径が 20 mm 以下の破碎瓦について、再生土木資材（地盤材料）としての利活用に関する研究を長年継続し、破碎瓦は環境にやさしい、軽量である、摩擦性が高いため土としての強度が強い、透水性が高い、などの特徴を見出した。さらに、著者らは室内模型実験などを通じて軽くて摩擦性の高い破碎瓦を擁壁背面の裏込め材として用いることで、一般的な砂材料に比べて擁壁などの土木構造物に作用する外力「土圧」を最大で 8 割近くも低減可能である。また、埋設物を破碎瓦で埋め戻すことによって地震時における液状化被害を大幅に低減できることを確認した²⁾。

このような背景の中、近年我が国では埋設管の老朽化が深刻化しており、アスファルト舗装の下では埋設管の破損等に伴う見えない地盤浸食が徐々に進行し、名古屋市内においても年間 300 件以上の陥没災害が発生している。そこで、本研究では「破碎瓦を用いた埋設物の長寿命化」を目的とした室内模型実験を行い、破碎瓦の埋設物の埋戻し材としての性能を評価した。

2.2. 実験条件

図-1 に実験概要図，図-2，表-1 に埋戻し材の粒度分布と土質試験結果，表-2 に実験ケースを示す。本検討では、幅 500mm×奥行 500mm×高さ 500mm の剛土槽を用いて検討を行い、模型埋設管には近似内径が $d=100\text{mm}$ の塩ビ管（VU100）を用いた。

本検討では室内模型実験用の埋戻し材として、最大粒径が 5mm 以下の破碎瓦、および一般的な砂材料である豊浦砂を用いた。ここで、本検討では破碎瓦も豊浦砂も乾燥状態とし、地盤の相対密度は両者共に中密となる 70%とした。豊浦砂の内部摩擦角が $\phi=39.1\text{deg}$ であるのに対し、破碎瓦は $\phi=45.1\text{deg}$ であるため、破碎瓦には高い支持力が期待できるのが特徴的である。

ここで、日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説（2019 年版）によれば、下水管の最小土被り厚さは本線では 1.0m、枝線では車道部で 0.6m、歩道部で 0.5m と規定されている。また、名古屋市上下水道局：工事共通仕様書によれば、「埋設管の土被りは、特記仕様書に明示されている場合を除き、施設構内等で、重量物の圧力を受けるおそれのある場所では、口径 350mm 以上は 1.2m 以上、口径 300mm 以下は 1.0m 以上、車両道路では 0.6m 以上、それ以外の場所では 0.3m 以上とする」と記載されている。そこで、本検討においては埋戻し材料の差を明確にするため、模型埋設管の土被り厚さを $z=100\text{mm}\sim 400\text{mm}$ とした。ここで、埋設管の近似内径と土被り厚さの比である土被り厚さ比は $z/d=1.0\sim 4.0$ となる。

埋設管に作用させる外力には、100mm×100mm の載荷板を埋設管の中心部に約 7.8mm/min の速度で変位制御による静的な載荷を行った。模型埋設管には上下左右の 4 か所にひずみゲージを張り付け、載荷板の沈下量、地盤反力（地盤への載荷荷重）、模型埋設管に発生するひずみを計測し、そこから埋設管に発生する応力を計測した。

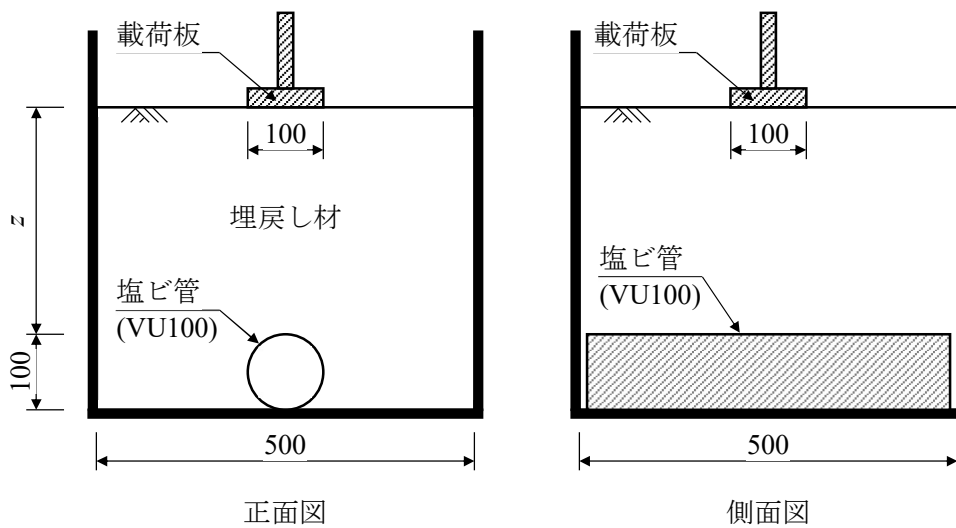


図-1 実験概要図

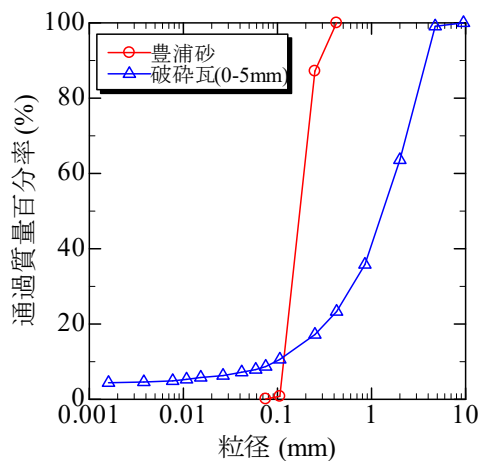


図-2 粒度分布

表-1 埋戻し材の土質試験結果

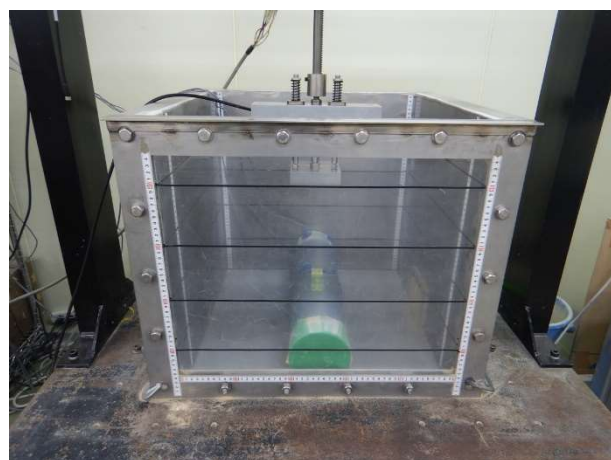
土質試験結果一覧				豊浦砂	破碎瓦
土粒子密度試験	土粒子の密度	ρ_s	g/cm ³	2.649	2.579
土の粒度試験	礫分(2-75mm)		%	0.0	36.5
	砂分(0.075-2mm)		%	99.9	54.9
	シルト分(0.005-0.075mm)		%	0.1	4.0
	粘土分(0.005mm未満)		%	0.0	4.7
	最大粒径		mm	0.425	9.5
	均等係数	U_c		1.6	19.0
	50%粒径	D_{50}	mm	0.1728	1.4417
20%粒径	D_{20}	mm	0.1283	0.3282	
土の液性限界・ 塑性限界試験	液性限界	w_L	%	NP	NP
	塑性限界	w_P	%	NP	NP
	塑性指数	I_p		—	—
三軸圧縮試験 (CD試験)	粘着力	c_{cd}	kN/m ²	0.6	20
	内部摩擦角	ϕ_{cd}	°	39.1	45.1
透水試験	透水係数	k_{15}	m/s	1.30×10^{-4}	1.20×10^{-5}
最少密度・ 最大密度試験	最小密度	$\rho_{d \min}$	g/cm ³	1.368	1.204
	最大密度	$\rho_{d \max}$	g/cm ³	1.642	1.583

表-2 実験ケース

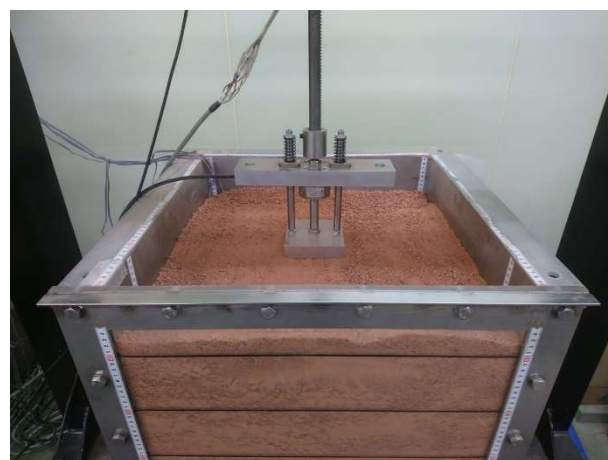
Case	地盤条件		模型埋設管の条件		
	埋戻し材種類	相対密度 D_r (%)	近似内径 d (mm)	土被り厚さ z (mm)	土被り厚さ比 d/z
T-1.0	豊浦砂 (乾燥状態)	70%	100	100	1.0
T-2.0				200	2.0
T-3.0				300	3.0
T-4.0				400	4.0
C-1.0	破碎瓦 (乾燥状態)	70%	100	100	1.0
C-2.0				200	2.0
C-3.0				300	3.0
C-4.0				400	4.0

2.3. 実験結果

図-3 に実験状況，図-4 に载荷板の沈下量（横軸）と地盤反力（縦軸）を示す．実験結果より，両者ともに模型埋設管の土被り厚さに応じて地盤支持力は高くなり，土被り厚さ比が約 4.0 で地盤反力は概ね一定になることが分かる．これは，上载荷重により模型埋設管が変形したためである．また，一般的な砂材料である豊浦砂に比べて，内部摩擦角が高い破碎瓦の地盤反力は 2 倍以上も大きく，一般的な砂質土よりも破碎瓦地盤の安全性は非常に高く，地盤に想定よりも大きな外力が作用しても破碎瓦地盤ならば安全性が確保できる可能性を示したと言える．



(a) 埋設管設置状況



(b) 载荷実験 (Case C-4.0)

図-3 実験状況

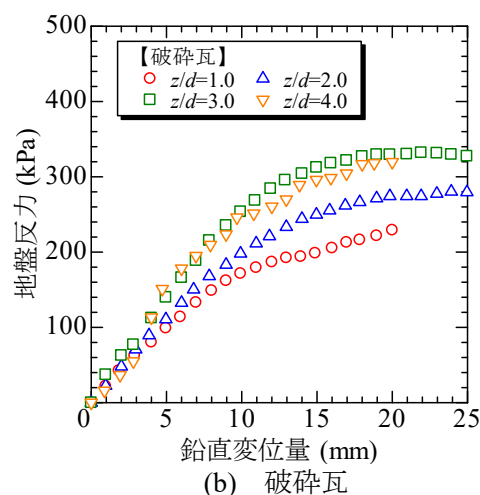
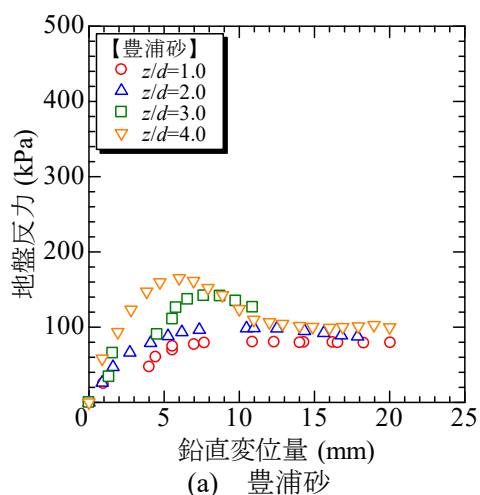
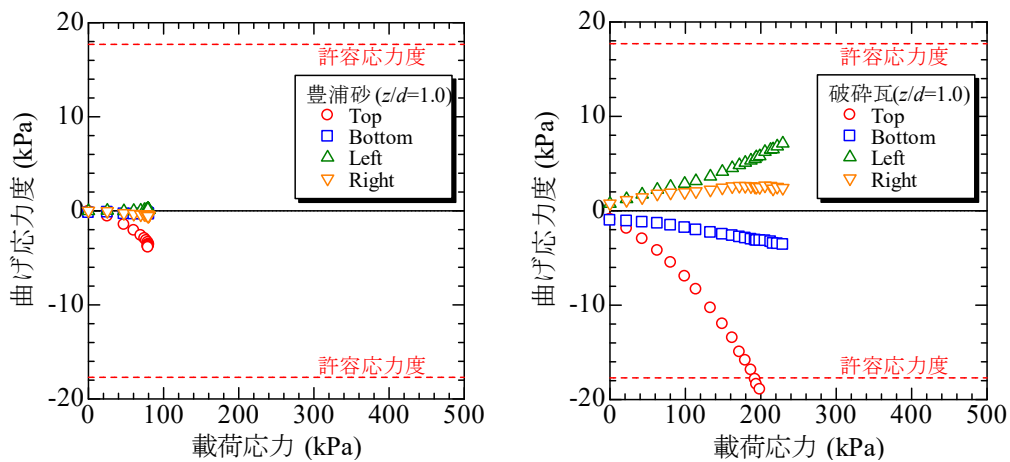


図-4 地盤反力

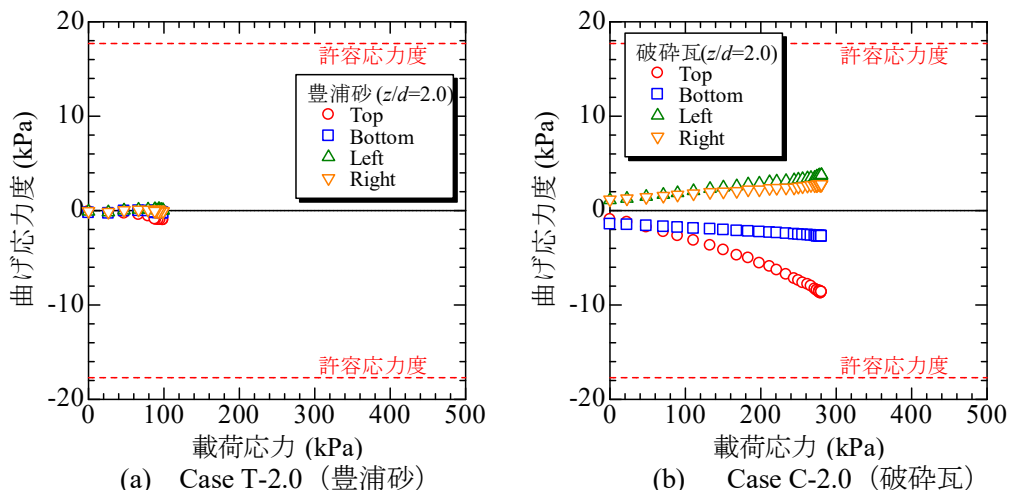
図-5～8に土被り厚さごとの載荷荷重（地盤反力，横軸）と模型埋設管に発生した応力（縦軸）を示す。本検討において，豊浦砂のケースでは約 80kPa ($z/d=1.0$)～170kPa ($z/d=4.0$)の上載荷重（地盤反力）だったのに対し，地盤支持力が高い破碎瓦では約 230kPa ($z/d=1.0$)～330kPa ($z/d=4.0$)の上載荷重となった。破碎瓦のケースでは，埋設管に発生する初期応力が豊浦砂のケースよりも大きく，その傾向は土被り厚さが大きいほど顕著である。これは，破碎瓦の内部摩擦角は豊浦砂よりもかなり高いため，模型埋設管を埋め戻して締固める際（地盤を圧縮）に，破碎瓦と埋設管の間で発生する摩擦力で管を引張りやすいためだと考えられる。しかし，この初期応力は許容応力度に比べると非常に小さいため大きな問題はないと言える。また，別検討で行った湿潤状態の山砂および破碎瓦を用いた実物大の同様の検討結果でも，破碎瓦を用いたケースと山砂を用いたケースでは初期応力に大きな差がないことを確認している。

埋設管に発生する応力に関して，土被り厚さが浅いほど外力によって埋設管に発生する応力は大きくなり，土被り厚さ比が 4.0 以上になると，ほとんど埋設管には外力に伴う応力は発生しない傾向が得られた。また，本検討条件において 200kPa 程度の大きな外力が地表面に作用することを想定した場合，豊浦砂で埋戻したケースでは地盤支持力を超えてしまう。そのため，豊浦砂で埋め戻した埋設管は危険な状態になりうるが，破碎瓦の地盤支持力は豊浦砂に比べて 2 倍～3.5 倍程度あるため，土被り厚さが極端に浅い $z/d=1.0$ 以外の全てのケースにおいては，300kPa を超える上載荷重においても埋設管に発生する応力は許容応力度以内に収まっている。

以上より，本検討条件においては初期応力こそ破碎瓦を用いたケースの方が豊浦砂を用いたケースよりも大きい傾向にあったが，破碎瓦の方が一般的な砂地盤よりも地盤支持力が大きいため，埋設物を破碎瓦で埋戻すの方が砂質土で埋戻すよりも安全である可能性を示した。



(a) Case T-1.0 (豊浦砂) (b) Case C-1.0 (破碎瓦)
図-5 実験結果：埋設管の応力度 ($z/d=1.0$)



(a) Case T-2.0 (豊浦砂) (b) Case C-2.0 (破碎瓦)
図-6 実験結果：埋設管の応力度 ($z/d=2.0$)

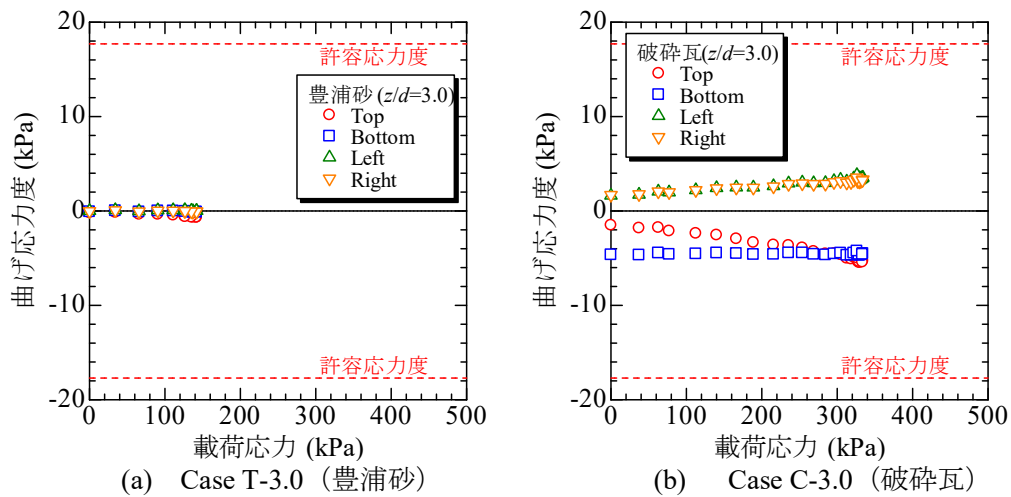


図-7 実験結果：埋設管の応力度 ($z/d=3.0$)

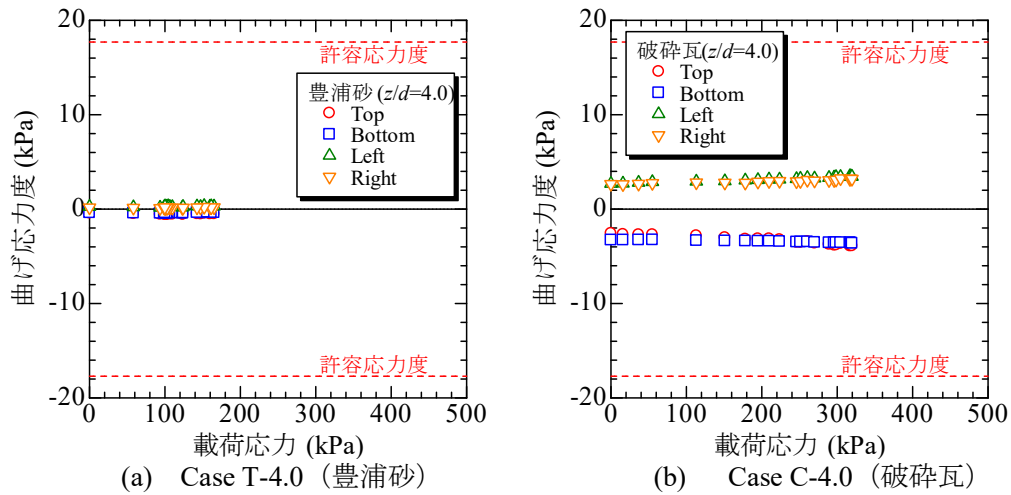


図-8 実験結果：埋設管の応力度 ($z/d=4.0$)

2.4. まとめ

本検討では破碎瓦の埋戻し材としての性能を評価するために室内模型試験を行った。以下に本検討によって得られた知見を示す。

- 1) 破碎瓦は内部摩擦角が高いため、地盤支持力が一般的な砂材料よりも高い。
- 2) 乾燥資料を用いた本検討条件においては、破碎瓦の方が豊浦砂に比べて若干初期応力が高くなるものの、許容応力度に比べれば十分に小さいため問題はないと言える。
- 3) 砂地盤では埋設物に重大な影響を与えるほど地表面に大きな外力が作用した場合でも、支持力の高い破碎瓦地盤では安全性が確保できる可能性がある。
- 4) 埋設管の内径と土被り厚さの比が4程度以上になると、埋設管は地表面に作用する荷重の影響をほとんど受けなくなる。

【参考文献】

- 1) 愛知県陶器瓦工業組合：瓦の生産過程で発生する規格外瓦の有効利用に関する調査研究報告書，2009.
- 2) 森河由紀弘，佐藤智範，武田祐輔，田中雄也，神谷彦二，前田健一：無害で軽量性，摩擦性，排水性が高い破碎瓦の有用性に関する検討，第29回中部地盤工学シンポジウム，pp. 52-59，2017.08.