

4. 現場発生土を使用して製造した「還土ブロック」の改修工事への実装

Implementation of "Renewable Soil Block" manufactured using on-site soil for renewal construction

山崎 順二^{*1}・加藤 猛^{*2}・荒木 朗^{*2}
森 浩二^{*3}・古東 秀文^{*3}・山内 豊英^{*3}

要 旨

版築は日本古来の施工工法であり、古くは法隆寺の参道の両側にもみられる。版築壁は、土材料造り、型枠組立て、土の突固め、脱型を何度も繰り返すことによって施工されるため、施工には多大な時間と作業スペースを要する。今回、工期の短縮、他業者の作業スペースの確保のため、版築をブロック状にプレキャスト化（還土ブロック）し、名古屋支店の屋内壁に適用した。本報では、還土ブロックの材料や調合、表面保護、さらに構造性能について実大実験により検証した結果を示す。

各種の実験の結果、ふるい目 15mm を通過した土を用いて、土に対し石灰砕砂を 30% 程度混合させると性能が向上すること、また、汚れの付着を防止する意味での表面保護にはシラン系の表面含浸材が適していることが分かった。構造性能については、1.5G までの面外荷重に対して脆性的な損傷はなく、十分な構造安全性を有していることが確認できた。

キーワード：現場発生土／版築／含水比／調湿性能／構造安全性

1. はじめに

近年、SDGs が謳われる中、建築業界においても、建設に係る環境負荷の低減を意識した建築や枯渇する資源を補うために、資源を有効活用した建築が求められている。当社では、リニューアル事業コンセプトである「ReQuality」のもと、「Good Cycle Project」を立ち上げ、自然とのより良い循環を目指した取組みを推進している。

このような中、自然素材のみを使用した日本古来の版築は、コンクリートと比較して製造エネルギーの負荷や LCCO₂ の排出量が少なく¹⁾、調湿機能や熱容量が大きい²⁾ことから、建物の供用中の空調にかかる電力の削減などが期待でき、供用中においても環境負荷低減に寄与すると考えられる。さらに、建築現場で発生する残土を版築の材料として建材化して活用できることに加え、天然素材のみで構成されるため、後に自然に還すことも可能となる。このように、版築の技術を現在の建築物に適用することで、産業廃棄物として処理されるだけであった現場発生土により良い循環が生まれることになる。

今回、版築の環境配慮性や建材の循環などについて検証する機会として、名古屋支店の改修工事において版築による室内壁の構築を実装した。通常の施工法における版築は、型枠の組立て、突固め、脱型を繰り返すことによって施工されるため、施工には多大な時間と作業スペース

を要する。そこで本工事においては、施工期間の短縮や他業者の作業スペース確保などのため、版築をプレキャスト化（版築は後に自然に還することができることを意図して「還土ブロック」（特許出願中）と称す）することを考案した。

実施工までの事前調査として、土の産地の違い、固化材料の種類、細骨材の有無を要因とした強度特性や色彩の変化に関する検討³⁾に続き、本報では、還土ブロックに使用する土材料の乾燥による収縮ひずみに着目し、土に含まれる礫の最大径、細骨材の必要性について検討した。また、還土ブロックの調湿性能の評価、耐久性向上を目的とした表面保護剤の検討、さらに、還土ブロックを室内壁として組積した場合の構造性能について、面外方向への載荷による耐震性の確認を行った結果について述べる。

2. 名古屋支店での還土ブロックの室内壁への適用

名古屋支店に適用した還土ブロック壁の施工途中の組積状況を写真-1 に示す。組積方法は 2 種類であり、転倒防止対策として、馬目地では垂直方向の鉄筋に加えて水平方向に鋼材プレートを組み込み、また、芋目地では鉛直方向の鉄骨により、それぞれ転倒防止策を講じている。

還土ブロックを用いた室内壁の構成について芋目地を例に述べる。芋目地壁に適用する還土ブロックの斜視図

*1 技術研究所 建築材料研究グループ 兼 大阪本店建築部 品質管理室

*2 技術研究所 建築材料研究グループ

*3 技術研究所 建築構造研究グループ



(馬目地壁への還土ブロックの組積状況)



(芋地壁への還土ブロックの組積状況)

写真-1 還土ブロック壁の施工状況

を図-1 (a)に示す。還土ブロックの大きさは、W300mm×H150mm×D250mmである。還土ブロックの内部には、曲げ応力や引張応力、ブロック端部の欠けなどに対する補強材として、長手方向に荒縄を2段に配している。還土ブロックの素材や荒縄は自然素材であるため、環境配慮性において好ましく、ブロックとしての用途の終焉ののちには粉碎して自然に還することが可能である。壁の転倒防止のために、図-1 (b)示すように鉄骨を垂直方向に等間隔に配置し、図-1 (c)の平面図のように組積し、還土ブロックと鉄骨の隙間には、5mmふるいを通過する粒度の土(還土ブロックで用いた土と同様)と酸化マグネシウム系土壌硬化剤を1:1の容積割合で配合したものを充てんすることにより一体性を確保しつつ組積・充てんを繰り返すことで、図-1 (d)の立面図に示す芋目地の還土ブロックによる屋内壁が構築される。

3. 実験目的および概要

3.1 還土ブロックに使用する土の物性に関する実験

ヨーロッパにおける版築の指針⁴⁾によると、原材料の土に含まれる礫の最大径が大きいと打込み欠陥が生じやすくなるため、礫の最大粒径は10~20mmが適しているとされている。名古屋支店に適用する還土ブロックの制作に用いる現場発生土である瀬戸市産の土には最大粒径が20mm以上の礫が多く含まれていたため、土の粒度調整のためのふるい分け処理を事前に施す必要があった。そこで、土の粒度の違いに対する物性の違いや還土ブロッ

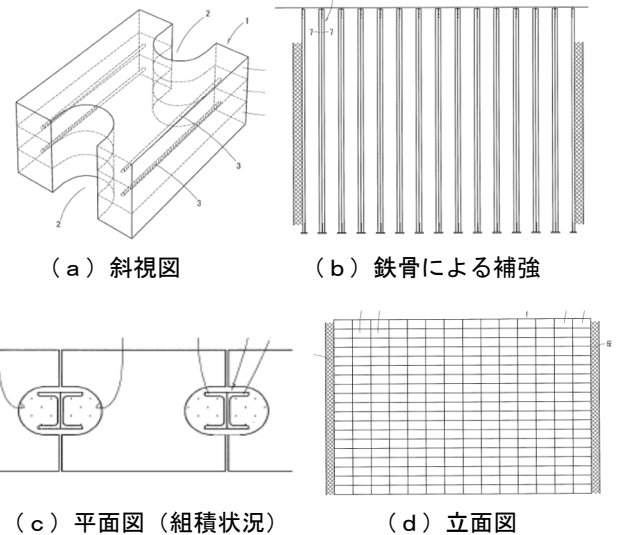


図-1 芋目地壁に適用する還土ブロックの詳細

クに成形した後のひび割れ発生のしやすさについて検討するため、5mmふるいおよび15mmふるいを通過した土に対して、粒度分布および長さ変化試験を行うこととした。また、コンクリート用細骨材を土の質量に対して30wt%混合することが、長さ変化率と締固め性状に及ぼす影響について検証した。

(1) 粒度分布

現場発生土を75μmのふるいで水洗いして残留した土粒子に対しては、JIS A 1102「骨材のふるい分け試験方法」に準じて、各ふるいに残留する土粒子の質量と75μmのふるいを通過した土粒子の質量を測定し、各ふるいの透過質量百分率を算出した。

(2) 土の締固め試験

還土ブロックの制作に使用する土を混練する際の水の量は、JISA 1210「突固めによる土の締固め試験」において最大乾燥密度を示す含水比(最適含水比)に基づいて設定する。そこで、土のみと土に細骨材を土の質量に対して30wt%混合したものに対して、土の締固め試験を行った。

(3) 土の収縮率

還土ブロックに使用する土の長さ変化については、JIS A 1129-2「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法・第2部：コンタクトゲージ方法」に準じて測定した。試験体寸法は100×100×400mmで打込み後1日封緘養生した後に脱型し、長さ変化率の測定に供した。なお、測定材齢は7, 28, 63, 91および306日とした。

3.2 還土ブロックの品質確認実験

RC建築物の見映えを維持し、コンクリート表面の劣化予防保全に資する材料として、表面含浸材が用いられる。表面含浸材には、主に撥水層を形成するシラン系含浸

材と、コンクリート中のアルカリ成分と反応することで固化物を生成して表層を緻密化するけい酸塩系含浸材がある。これに加え、無機質ポリマーを形成して硬化するコーティング材があり、この3種類の表面含浸材を還土ブロックの表面塗布に用いて経年による表面劣化を抑制し耐久性を高めることを考案した。

そこで、還土ブロックへの表面含浸材塗布後の耐久性に関して、劣化因子である水分の浸透抑制効果に着目し、吸水率試験を行った。また、調湿実験による還土ブロックの調湿性能の検証、さらに表面含浸材を塗布したことによる調湿性能への影響について検討を加えた。

(1) 吸水率試験

JSCE-K571-2004「表面含浸材の試験方法」に準じて試験体を7日間浸漬し、経過時間による質量の変化を測定することで、還土ブロックの吸水率を求めた。

(2) 調湿実験

JISA 1470-1「調湿建材の吸放湿試験方法」のうち中湿域（相対湿度範囲50%～75%）において調湿実験を行った。試験体を温度20℃相対湿度50%RHの高温恒湿環境下に静置した状態で質量変化が生じなくなるまで養生した後、温度20℃相対湿度75%RHの環境下で24時間静置した時の吸湿量を計測した。その後、連続して温度20℃相対湿度50%の環境下に24時間静置することで放湿量を計測した。

4. 実験結果および考察

4.1 土の物性に関する実験結果

(1) 土の粒度分布

5mmふるいおよび15mmふるいを通過した土と細骨材（石灰砕砂）の粒度分布の結果を図-2に示す。図中には、指針⁴⁾に示される版築用の土として示されている粒度分布の適用範囲を併せて破線で示す。

今回使用する愛知県瀬戸市産の現場発生土において、5mmふるいを通過した土の粒度分布曲線は、適用範囲内ではあるが上限に近い位置にあるが、15mmふるいを通過したやや粗粒を含んだ土にすることで、適用範囲の中央部に分布する粒度構成となることが伺える。さらに、0.3～2.5mmの粒径を多く含む石灰砕砂を、品質改善を目的として混合（30wt%）することを考慮すると、全粒子の15～20%の割合で粗粒を含有する15mmふるいを通過した土を使用することが、適正な粒度分布に調整することに対して適正であると考えられる。

(2) 土の締固め試験

愛知県瀬戸市産の土を用いた土の締固め試験の結果を

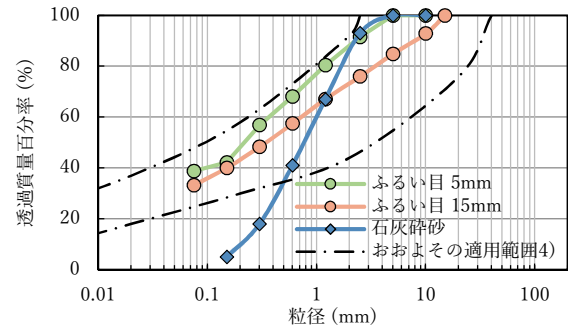


図-2 土および細骨材の粒度分布

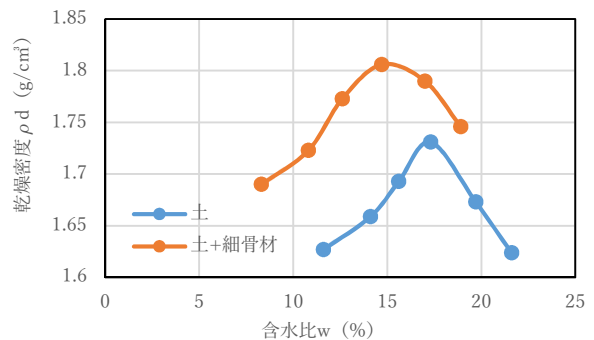


図-3 土の締固め試験結果

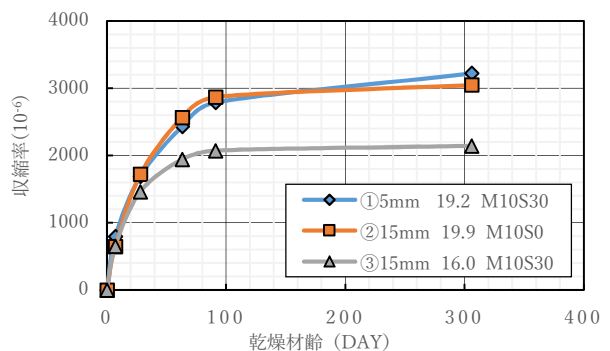


図-4 長さ変化率（収縮率）試験結果

図-3に示す。土のみの最適含水比が約17.5%であるが、石灰砕砂を混合することで最適含水比が約15%まで低減した。これは、吸水率13.0%の土に、吸水率1.4%の石灰砕砂が混合されたこと起因すると考えられる。土の混練に使用する水が少なくなることは、突き固めた後の還土ブロックの収縮量が小さくなることが想定されるため、石灰砕砂を混合し、最低含水比を低減させることは有効な品質改善の手法となる。さらに、石灰砕砂を混合することによって乾燥密度が高くなっていることから、突き固め性能が向上したことによってより密実な還土ブロックの制作が可能になると考えられる。

(3) 土の長さ変化率

長さ変化率（収縮率）の測定結果を図-4に示す。凡例の表記は〔番号, ふるい目の大きさ, 含水比, 酸化マグネ

シウム系土壌硬化剤 (M) の土の質量に対する混合率および石灰砕砂 (S) の土の質量に対する混合割合] を示している。番号①と③ではふるい目の大きさによる収縮率の違いを、また番号②と③では石灰砕砂の有無による収縮率の違いを評価できる。

測定の結果、ふるい目を大きくすることに加えて石灰砕砂を混合することで、土の収縮率を低減させることが可能となる。しかし、収縮率が最も小さい番号③であっても収縮率は 2000μ 程度であり、土の収縮率は一般的なコンクリートの乾燥収縮率 (一般に 800μ 以下) と比べて約 3 倍程度大きいことがわかる。

以上の検討により、還土ブロックの制作に適正な土として、原材料となる現場発生土を 15mm ふるいで分球して粗大粒を除去したのち、生コン用細骨材 (石灰砕砂を 30wt% 程度混合することで、粒度分布、締固め性能、収縮率に対して優位な状態に調合できると考えられる。

4.2 還土ブロックの品質確認に関する実験結果

(1) 目視状況

写真-2 に、還土ブロックへの表面含浸材塗布前後の状態を示す。シラン系およびけい酸塩系の表面含浸材は、無塗布と比較しても目視では大きな変化は認められなかったが、コーティング材については濡れ色を呈した。

(2) 吸水率試験

吸水率試験の結果を **図-5** に示す。コーティング材およびけい酸塩系の表面含浸材を塗布した還土ブロックの吸水率は無塗布のものと概ね同程度であった。これらの含浸材では、吸水開始後の 5 分間に全吸水量の 80% 程度まで急激に吸水し、その後長期間を要して緩やかに増加している。けい酸塩系およびコーティング材のように表層を緻密化する表面含浸材であっても、還土ブロック自体が吸水率 12% 程度と高く (W/C65% のコンクリートで 3% 程度) マトリックス自体が比較的ポーラスかつ粗であるために、従来の表面含浸材による吸水抑制効果が小さくなったと考えられる。

一方、シラン系表面含浸材では、無塗布と比較して吸水開始後約 30 分までは吸水が抑えられているものの、給水開始 60 分後には全吸水量の 60% 程度までの水を吸水し、その後は無塗布の吸水性状に漸近する様相を呈している。シラン系表面含浸材は、塗布後の還土ブロック表面において **写真-3** のような撥水性状を示しており吸水開始後 30 分程度までの吸水は抑制できているものの、組織が粗なマトリックス表面に形成される撥水層は、長時間の水の浸透には耐えられない可能性があると考えられる。し

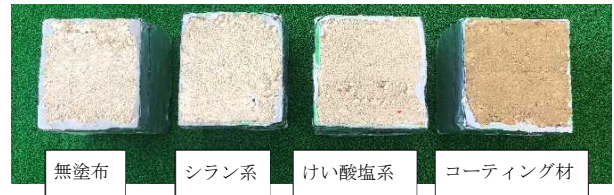


写真-2 表面含浸材塗布前後での状態



写真-3 シラン系の撥水状況

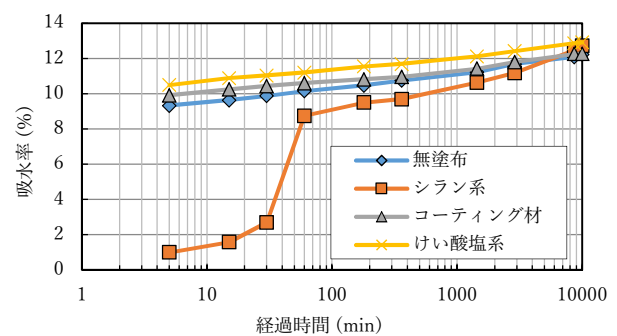


図-5 吸水率試験結果

表-1 調質建材の判定基準

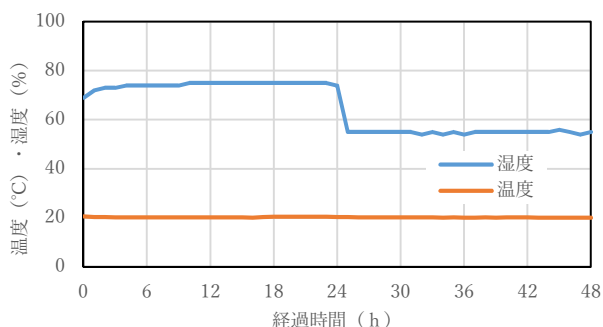
	3 時間後	6 時間後	12 時間後
吸湿量 (g/m ²)	15 以上	20 以上	29 以上
放湿量 (g/m ²)	-	-	* 1

* 1 吸湿過程 12 時間後の吸湿量の 70%

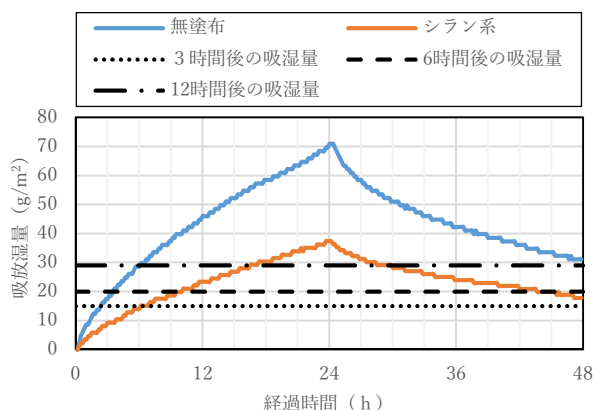
かし、シラン系表面含浸材には、上記のようにその他の含浸材とは異なる吸水性状、つまり表面改質効果が確認されたため、例えば雨がかりのない屋内に使用する還土ブロックの表面にシラン系表面含浸材を塗布することによって、汚れや表面劣化の抑制には有効と考えられる。

(3) 調湿性能の確認実験

還土ブロックの調湿性の有無の判定基準には、**表-1** に日本建材・住宅設備産業協会の調湿建材判定基準を適用した。調湿実験に使用した環境チャンバー内の温湿度のモニタリング結果を **図-6** に示す。調湿実験中の環境チャンバー内の温湿度は、吸湿過程では相対湿度 75%RH、放湿過程では相対湿度 55%RH、温度は 20℃一定としている。調湿実験の結果を **図-7** に示す。図中には**表-1** の調湿建材の基準を併記した。無塗布では調湿建材の基準を十分に満足しており、還土ブロックは調質建材である



図－6 環境チャンバー内の温湿度



図－7 還土ブロックの調湿性能の測定結果



写真－4 屋外暴露1ヶ月後の状況



写真－5 屋外暴露3ヶ月後の状況



写真－6 暴露3ヶ月後（けい酸塩系含浸材塗布）

と表現することができる。また、シラン系の表面含浸材を塗布することで表面に撥水層が形成されるために吸放湿量がやや減少し調湿建材の基準は満たさなくなるが、シ

ラン系の表面含浸材を塗布しても一定量の水分を吸放湿していることが確認できた。

写真－4～6に、表面含浸材塗布後に雨がかりある屋外に暴露した状態を示す。けい酸塩系表面含浸材と塗布した面には、暴露期間3か月程度の時点までの乾湿が繰り返されることによって、表面含浸材の含有成分である白色物質の析出が確認された。また、コーティング材は塗布後に濡れ色を呈し、還土ブロック自体の色味と異なった様相となり、シラン系の表面含浸材では還土ブロックの特性と考えられる調湿性をやや損なうことになる。

つまり、実験にした各種の表面含浸材はそれぞれ特徴を有するが、還土ブロックの目視状況を変化させずに表面の汚れ防止やテクスチャーを維持すること、さらに表面に接触した際に土が付かないようにするなどという観点から総合的に判断すると、還土ブロックに表面塗布材を塗布する場合は、シラン系の表面含浸材を選定することがより適していると考えられる。

5. 還土ブロックで構築した室内壁の構造安全性

5.1 実験目的

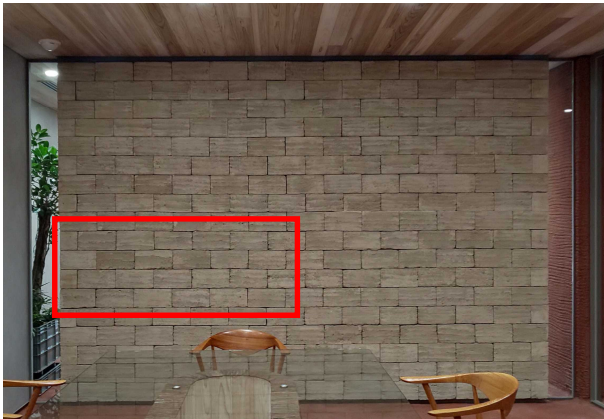
写真－7に示すように、馬目地と芋目地からなる2種類の還土ブロック壁の基本要素となる枠内の部分を取り出した形状の実大壁試験体をそれぞれ作製し、耐震性を主とした構造安全性を検証することを目的として実験を行った。

5.2 実験概要

写真－8に示す試験体を用いて、還土ブロック壁に作用する地震荷重を想定し、面外方向に水平荷重を載荷した際の還土ブロック壁の変形の程度と還土ブロック自体の損傷の有無を確認するための実験を行った。実大試験体の組積構成および寸法は、馬目地壁試験体が4段×6列であり $W1.8m \times H0.6m \times D0.25m$ 、芋目地壁試験体が18段×2列であり $W2.7m \times H0.3m \times D0.25m$ の大きさである。

面外方向への載荷によって耐震性を確認するために、還土ブロックを組積した実大壁を型枠で支持した状態で実大壁が水平となるように試験体を転倒させて実験に供した。壁を水平に転倒させたことにより、還土ブロックを支持している型枠を除去した時点で還土ブロック壁には面外荷重1.0Gが作用することになる。

まず、馬目地壁においては、水平荷重1.25G（壁重量の0.25倍）および1.50G（壁重量の0.5倍）に相当するだけの錘を積載した状態で、試験体下面中央の鉛直変位を計測した。なお、各載荷に対する変位の計測は積載後5分とした。その後さらに500kg（1.85G相当）まで荷重を



(馬目地壁全景)



(芋目地壁全景)

写真－７ 名古屋支店に適用した還土ブロック壁

増加して 10 分間保持し、錘を取り除いた後の残留変位を計測した。また芋目地壁においては、1.25G および 1.50G に相当する錘を積載した後に錘を取り除き、残留変位を計測した。その後、両試験体ともさらに 500kg の錘（馬目地では水平荷重 1.85G、芋目地では 1.58G に相当）を再載荷し、鉛直変位の増加の程度を確認した。なお、壁の自重を超える水平荷重の載荷には、セメント袋 (25kg, 40×50cm) と錘を使用した。写真－９に重りの積載状況を示す。

5.3 実験結果および考察

自重に加えて最大 500kg の荷重を壁試験体の面外方向に負荷した結果、馬目地壁および芋目地壁とも、還土ブロック自体の脆性的な破壊や壁の損傷は認められなかった。

積載重量による鉛直変位の推移を図－８に示す。馬目地壁への水平荷重 1.5G 相当の載荷（錘重量 270kg）による壁の変位が 1.7mm であるのに対し、芋目地壁では 1.5G 載荷（錘重量 420kg）による変位が 0.7mm であり、面外方向への水平荷重に関しては、芋目地壁の方が壁内部の鉄骨の影響も付加されて剛性が高くなることが確認できた。また、馬目地壁への水平荷重 1.85G 相当（錘重量



(馬目地壁試験体)



(芋目地壁試験体 (90°回転))

写真－８ 還土ブロック実大壁試験体

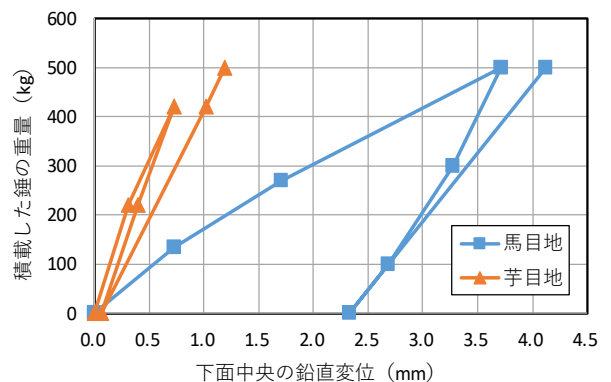


(馬目地壁試験体)



(芋目地壁試験体)

写真－９ 還土ブロック壁試験体への錘積載状況



図－８ 実大壁に積載した重量と鉛直変位の関係

500kg) までの載荷による変位が 3.7mm となり、除荷後に 2.3mm の残留変形が生じている。その後、500kg (1.85G) の錘を再度積載した際には最大変位が 4.1mm となり、繰返し載荷によって 0.4mm 程度変形が進行していることが分かる。また、芋目地においても 1.5G (錘重量 420kg) の繰返し載荷によって 0.3mm 程度変形が進行し、繰返し載荷による変形の進行の程度は、目地形式によらず同等であることが確認できた。以上の結果から、還土ブロックを使用して構築した高さ 2.5m 程度の室内壁については、1.5G 程度の地震力に対する構造安全性が確保されていることが確認できた。

6. まとめ

版築技術をプレキャスト化した還土ブロックを、名古屋支店の室内壁として実装した。還土ブロック適用のため、還土ブロックの物性および品質確認の検討および実大部材における構造安全性を実験的に検証した結果、以下のことが確認できた。

- (1) 土の調合において、収縮率低減の観点から、土のふるい目の大きさは 15mm かつ、土の質量に対し石灰砕砂を 30% 混合させるとよいことがわかった。
- (2) 各種表面含浸材には特徴があり、目視状況を変化させずに表面の汚れ防止やテクスチャーを維持すること、表面に接触した際の土微粉の付着の観点から総合的に判断すると、表面保護にはシラン系の表面含浸材が適している。
- (3) 構造安全性の確認実験の結果、馬目地壁および芋目地壁とも、1.5G 程度(最大それぞれ 1.85G および 1.58G) の地震力に対する構造安全性が確保されており、最大荷重時においても還土ブロック自体の脆性的な破壊や壁の損傷は認められなかった。

今後、還土ブロックのコンセプトである供用後の再利用の手法などについても検討を加えることにより、自然素材の資源循環に基づく脱炭素化技術として構築したい。

【参考文献】

- 1) 竹中徹, 石川恒夫, 遠野未来, 永井和幸, 堤洋樹, 三田村 輝章: 版築シェルターのライフサイクル評価について前橋工科大学における分野横断型建築教育の実践(その 5), 日本建築学会学術講演梗概集(関東), pp.19-20, 2015.9
- 2) 永井和幸, 石川恒夫, 遠野未来, 堤洋樹, 竹中徹, 三田村 輝章: 版築シェルターの温熱環境測定について前橋工科大学における分野横断型建築教育の実践(その 3), 日本建築学会学術講演梗概集(関東), pp.15-16, 2015.9
- 3) 新田稔, 加藤猛: N 支店改修に向けた版築の実施工適用のための検討「調合に関する検討」, 浅沼組, 技術発表会, 2020
- 4) Peter Walker Rowland Keable, Joe Martin, Vasilios Maniatidis.: RAMMED EARTH Design and construction guidelines, BRE Bookshop 2005