

摺動部にアルミ座金を用いた乾式組積コンクリート ブロック造制振壁の繰り返し水平載荷実験

吉田, 真央
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻 : 修士課程

山口, 謙太郎
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門 : 教授

窪川, 祐輔
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻 : 修士課程

川瀬, 博
京都大学防災研究所 : 特定教授

他

<https://doi.org/10.15017/2232335>

出版情報 : 都市・建築学研究. 35, pp.49-57, 2019-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン :
権利関係 :

摺動部にアルミ座金を用いた乾式組積コンクリートブロック造 制振壁の繰り返し水平載荷実験

Horizontal Cyclic Loading Test of Dry-Masonry Concrete Block Damping Wall using Aluminum Washers for the Sliding Part

吉田真央*, 山口謙太郎**, 窪川祐輔*, 川瀬 博***, 佐藤孝典****
Mao YOSHIDA*, Kentaro YAMAGUCHI**, Yusuke KUBOKAWA*,
Hiroshi KAWASE*** and Takanori SATO****

The authors have been conducting a study to develop and propose a sustainable friction damping system which consists of the concrete block wall assembled by dry construction method and the connecting part to the main structure. In this system, concrete blocks are not bonded to each other at their joint parts of the wall, making it possible to be disassembled once assembled. So the components of this system can be easily reused or recycled.

In this study, the authors conducted a horizontal dynamic cyclic loading test of positive and negative alternations in the in-plane direction of a dry-masonry concrete block damping wall using aluminum washers for the sliding part in order to develop the friction damping system, and investigated the mechanical characteristics such as horizontal strength and energy absorbing capacity. As a result of the test, it is found that the higher damping effect could be acquired in case where sliding parts are distributed to some, and where the stroke of the part which is fixing the aluminum washer is larger.

Keywords : Masonry, Dry Construction Method, Concrete Block, Damping Wall, Reuse
組積造, 乾式工法, コンクリートブロック, 制振壁, リユース

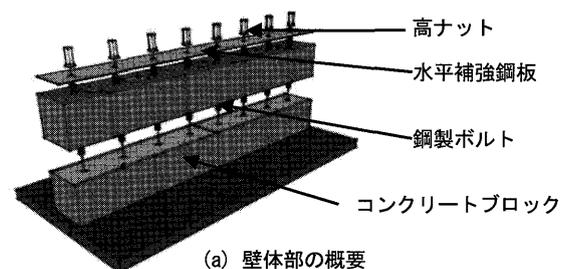
1. 序論

筆者らは、資源循環に寄与する建築構造体として、コンクリートブロックを乾式工法で組積した壁体を鉄骨ラーメン構造などの比較的剛性の低い建築物の制振壁として利用する方法の開発研究を行っている。コンクリートブロックを乾式工法で組積した壁体は、モルタルなどの接着剤を用いずに組積するため、分別解体が容易で、解体で得られた材料をリユースやリサイクルすることが可能である。

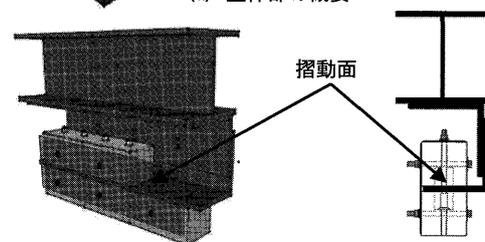
本論文では、筆者らがこれまでに提案した乾式ブロック造制振壁¹⁾を改良し、アルミニウム (A1050-H24) 製の座金 (以下、アルミ座金と記す) を摺動部に用いて作製した試験体に繰り返し水平載荷実験を行ってその基本的な力学性状を調べた結果を述べる。

2. 摩擦抵抗型乾式ブロック造制振壁

提案する制振壁は摺動部と壁体部 (乾式ブロック壁) で構成される。既報¹⁾で提案した摩擦抵抗型乾式ブロッ



(a) 壁体部の概要



(b) 摺動部の概要

図1 既報¹⁾で提案した摩擦抵抗型乾式ブロック造制振壁の壁体部と摺動部の概要

* 空間システム専攻 修士課程
** 都市・建築学部門
*** 京都大学 防災研究所
**** アイディールブレン(株)

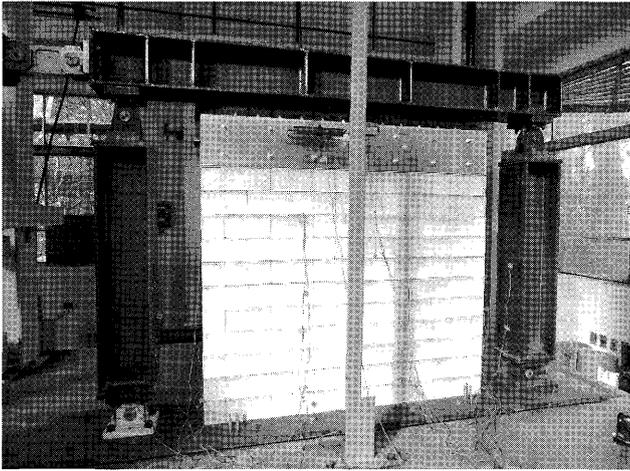


写真1 載荷試験時の制振壁¹⁾の状態

ク造制振壁の壁体部と摺動部の概要を図1に、載荷実験時の制振壁の状態を写真1に示す。この制振壁は基本的に摩擦摺動部の繰り返し変形でエネルギーを吸収する摩擦ダンパーとして働くが、想定を超える大変形時には乾式ブロック壁の積層間の滑りやブロックのひび割れにより更に大きな減衰効果が期待できる。加えて面外変形能力が高いことも特徴である。

2.1 乾式ブロック壁の概要

乾式ブロック造制振壁に用いるブロック壁は、水平方向に厚さ1~2mm程度の補強鋼板を配し、鉛直方向にコンクリートブロックを組積しながら縦筋に相当する鋼製のボルトを等間隔に挿入して、補強コンクリートブロッ

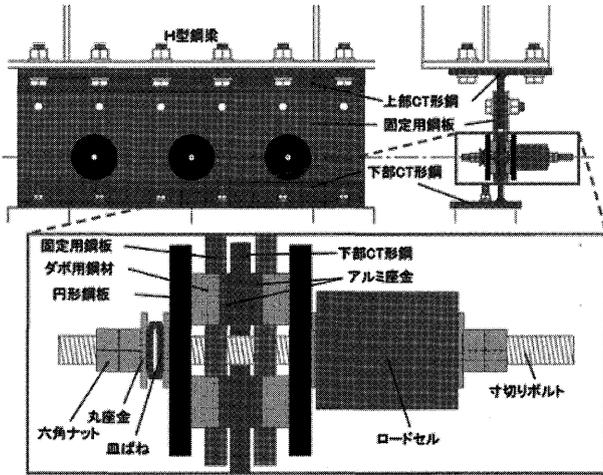


図2 提案する摺動部の概要

表1 摺動部構成要素

種類	概要	
アルミ座金	材料	アルミニウム (A1050-H24)
	表面処理	生地
	内径 d	12.0
	外径 D	22.0
	板厚 t	5.0
皿ばね	材料	ばね用冷間圧延鋼帯(S60C)
	表面処理	ジオメット処理
	内径 d	12.6
	外径 D	24.0
	板厚 t	1.4
	自由長 H ₀	2.3

ク造壁体の横筋に近い間隔で挿入された補強鋼板の位置で高ナットを締め付け、その上部に次のボルトを接合して構築していく²⁾。この壁体は乾式工法により作製されるため、解体により発生した材料の分別がしやすく、リユースやリサイクルが容易である。また、プレス成形によるコンクリートブロックを利用することにより、ブロック内に高ナットを収めるスペースを確保している。

2.2 摺動部の改良

既報¹⁾で提案した乾式ブロック造制振壁(図1, 写真1)では乾式ブロック造の最上部2層の間に長穴を開けた山形鋼を挟み上下のブロックで押さえつけた状態で山形鋼を滑らせる方式の摺動部を構成していたため、ブロックの高さ寸法の精度が摺動面の不陸の程度を左右していた。そこで、本研究では乾式ブロック壁の積み上がり面を制振壁の摺動部に直接利用しない形態となるよう構成の見直しを行った。本研究で提案する摺動部の構成を図2に示す。摺動部は、ブロック壁と接合された下部CT形鋼と柱梁フレームに接合された上部CT形鋼を、固定用鋼板を介してアルミ座金、ダボ用鋼材(t12×D22)、丸形鋼(t9×D90)、丸座金、皿ばねで挟み込み、M12の寸切りボルトと六角ナットで締め付け一体化する。用いるアルミ座金と皿ばねの仕様を表1に示す。

摺動部におけるボルトの導入張力は、皿ばねの変形量

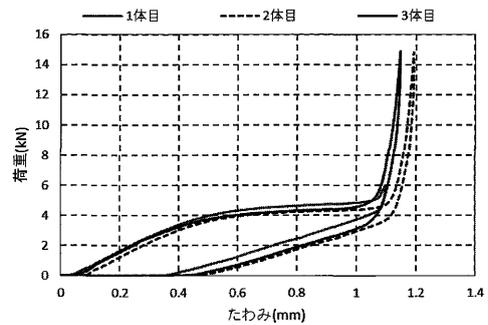


図3 荷重-たわみ関係 (皿ばね1枚)

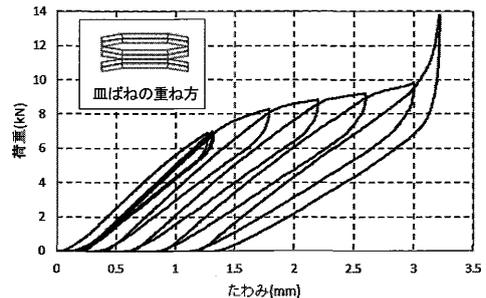


図4 荷重-たわみ関係 (皿ばね2枚並列を3組直列)

表2 皿ばねの剛性

サイクル数	1	2	3	4	5	6	7	8	平均
加力時剛性(kN/mm)	6.6	6.6	6.6	6.4	6.2	5.8	5.5	5.2	6.1
除荷時剛性(kN/mm)	5.6	5.6	5.5	5.1	4.9	4.5	4.4	4.4	5.0
除荷時/加力時(%)	85.1	84.9	83.4	78.8	80.1	78.4	79.7	85.4	82.0

をシクネスゲージやノギスで測定することによって管理する。適切な導入張力を検討するために皿ばねの圧縮荷重実験を行った。荷重と皿ばねのたわみの関係について、図3に皿ばね1枚に対して、図4に皿ばね2枚を並列に重ねたものを3組直列に組み合わせたものに対して荷重と除荷を繰り返した結果を示す。

図3より、たわみが0.5mm程度になるところを境に皿ばねの剛性が低下し、たわみが1mmを超えると、急激に荷重が増大することが分かる。皿ばね単体に与えた荷重と生じるたわみや応力の関係はAlmenらによって近似式が提案されている³⁾。この近似式やFEM解析によれば、皿ばねには円周方向に上面圧縮、下面引張の主応力が生じ、中でも内周上縁に最大の圧縮主応力が生じるため、その近傍から材が徐々に塑性化する。上記の剛性低下はこの塑性化によるもので、除荷時にはまだ塑性化していない部分の弾性復元力によってたわみが減少する。図4には各サイクルの除荷開始時にたわみが減少せずに荷重が増加する挙動が見られるが、これは重ねた皿ばね間の摩擦抵抗によるものと考察される。たわみが大きくなったときの急激な荷重の増大は、皿ばねが閉じて内周の下部にも支点が生じることによるものである。

また、皿ばねは一般に、直列方向に重ねると同じ荷重で生じるたわみが重ねた枚数倍に、並列方向に重ねると同じたわみを生じさせるのに必要な荷重が重ねた枚数倍になるという性質がある。図4は図3に比べて、棚降伏（ほぼ一定の荷重でたわみが増大するとき）の荷重は約2倍となり、降伏時や荷重が急増し始める時のたわみは約3倍となった。表2に皿ばね2枚を並列に重ねたものを3組直列に組み合わせたものを与えた荷重の各サイクルについて、加力時と除荷時の荷重が2.0kN~4.0kNの範囲の剛性を示す。加力時に対する除荷時の剛性の比はどのサイクルでも約80%となった。これらの結果を踏まえ、本研究では、摺動に伴ってアルミ座金の厚さに増減が生じて、なるべく剛塑性型に近い荷重履歴特性が得られる摺動部のボルトへの張力導入方法と導入値を検討するために、次章に述べる摺動部予備実験を行った。

3. 摺動部予備実験

繰り返し荷重に対する摺動部の力学性状を把握することを目的として、壁体部の高さを低くした試験体を作製し、摺動部に水平力を繰り返し荷重する予備実験を行った。

3.1 実験概要

試験体の構成要素のうち、コンクリートブロックを図5に、ブロック壁に挿入する水平補強鋼板を図6に、接合用鋼材（上部CT形鋼、下部CT形鋼、固定用鋼板）を図7に示す。使用するコンクリートブロックの全面圧縮強度は42.0N/mm²であることを圧縮試験で確認した。

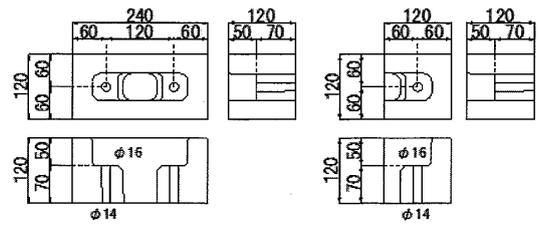


図5 コンクリートブロック (単位: mm)

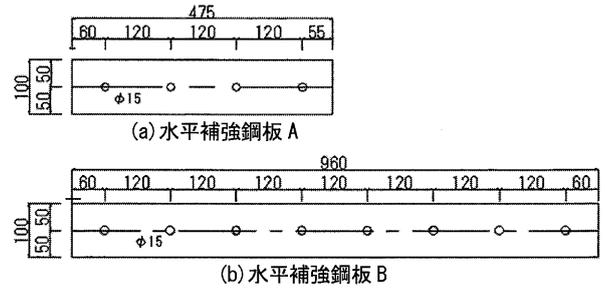


図6 水平補強鋼板 (単位: mm)

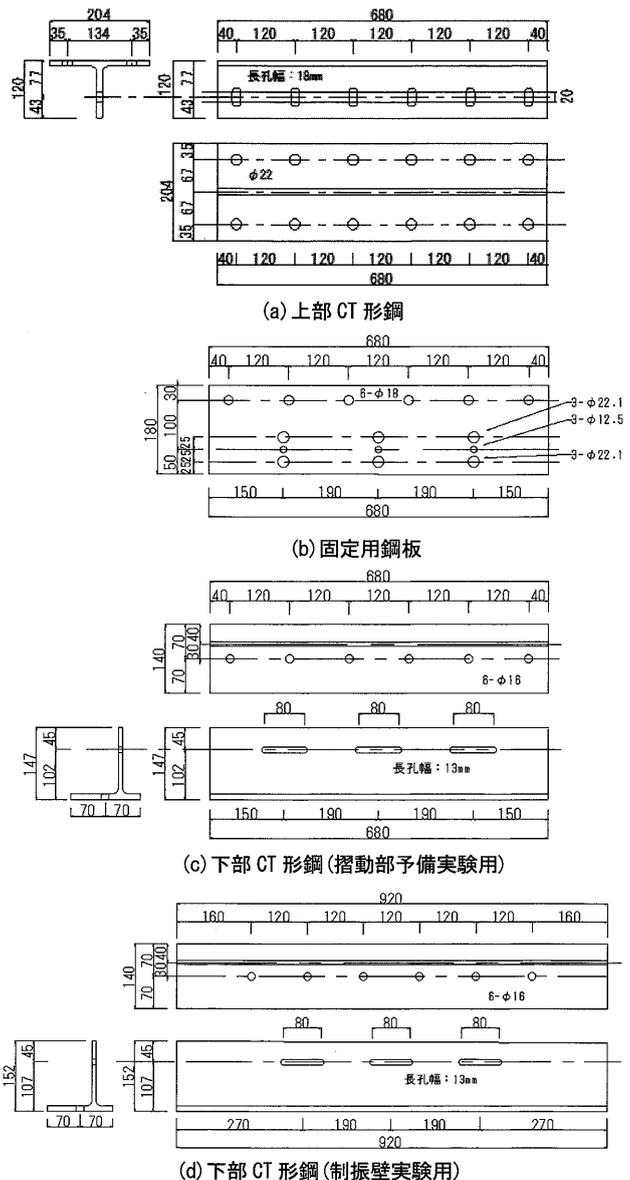


図7 接合用鋼材 (単位: mm)

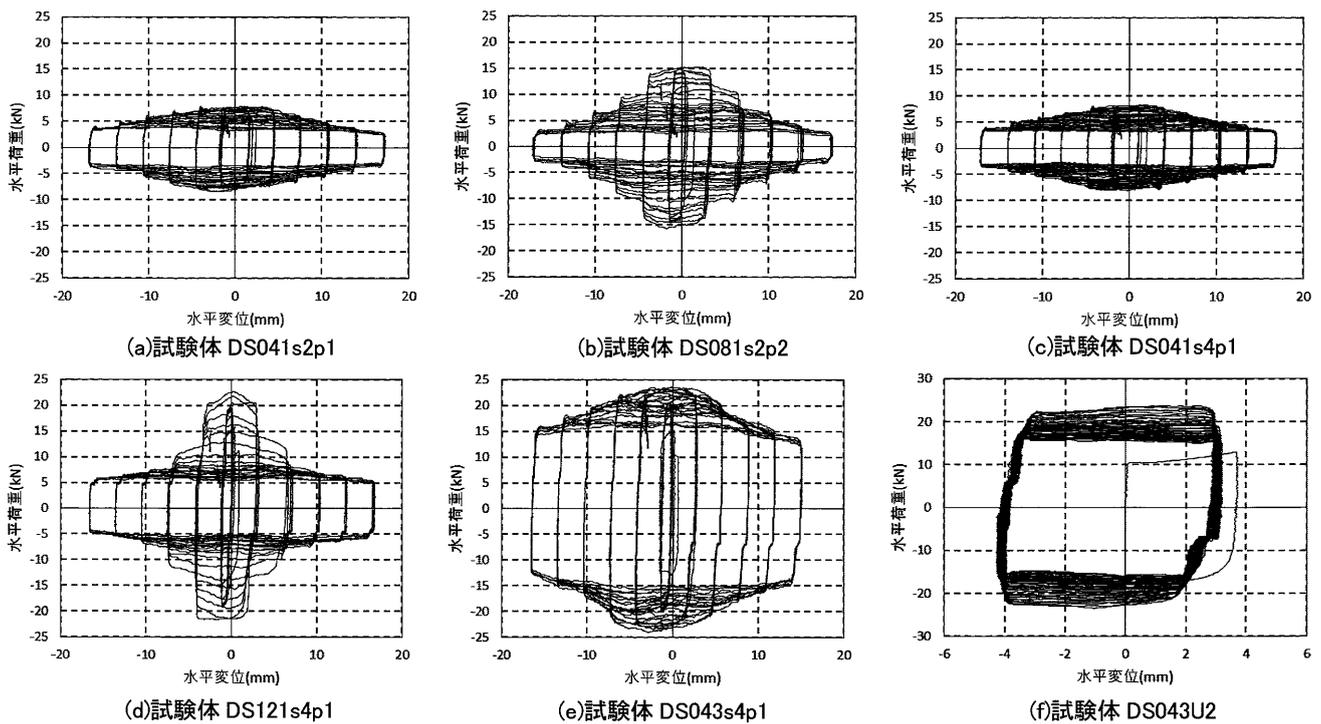


図 12 水平荷重—水平変位関係

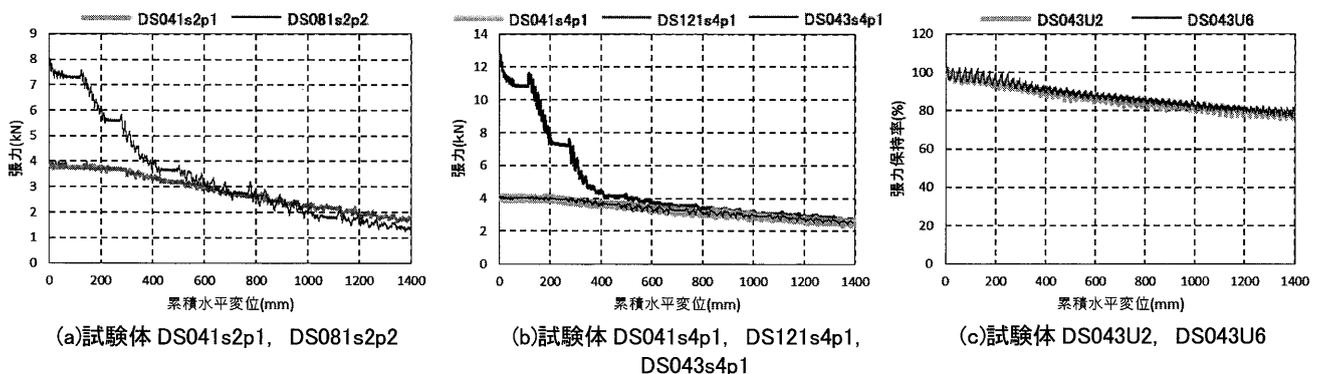


図 13 摺動部ボルト 1 本あたりの張力または張力保持率と累積水平変位の関係

も緩やかに低下した。また、1 カ所当たりの導入張力が大きい試験体は、荷重の初期段階から摺動部の張力が大きく低下し、張力の低下に伴い水平荷重も低下したが、荷重の片振幅が大きくなるにつれて剛塑性型の履歴に移行した。

図 13(a), (b)より、1 カ所当たりの導入張力を 8 kN や 12 kN まで大きくしても、4 kN あたりまで張力が低下した後は、皿ばねの直列方向の組み合わせ枚数に応じて、1 カ所当たりの導入張力を 4.0 kN にした試験体と同じような張力の低下の仕方をしていることが分かる。皿ばねを 2 組直列に挿入して作製した試験体(図 13(a)参照)と、4 組直列に挿入して作製した試験体(図 13(b)参照)とでは、2 組直列のものが累積水平変位 1400mm の時点で摺動部ボルトの張力が 2 kN を下回ったのに対し、4 組直列のものは 2.5 kN 程度となった。皿ばねを直列方向に多く重ね、ストロークを大きくすることが導入張力の低下防止に有効と考えられる。

図 13(a)より、張力を 8.0 kN 導入した試験体 DS082s2p2

は皿ばねを 2 枚並列に重ねたものを 2 組直列に挿入したものであるが、累積水平変位が約 400mm の時点で DS041s2p1 と同程度まで張力が低下しており、皿ばねを並列組み合わせた効果はそれまでに失われたといえる。

図 13(c)は 100 サイクル与えた場合の張力保持率と累積水平変位の関係を示したものである。0.2 Hz と 0.6 Hz では張力の低下の状況に大きな差は生じなかった。同種のアルミ座金を用いた既往の研究⁴⁾では 0.4Hz と 0.8Hz の正弦波加振が行われているが、同研究でもその振動数の違いが荷重実験結果に及ぼす影響は見られないことが報告されている。今回作製した摺動部にも、実験で荷重を行った振動数 0.2Hz と 0.6Hz の違いによる影響はほとんど見られなかったといえる。

3.3 摺動部予備実験結果のまとめ

摺動部のボルトの 1 本あたりの導入張力は小さいほうが張力の低下が小さい安定した挙動を示すことと、皿ばねを直列方向に重ね、ストロークを大きくすることが張力の保持に有効であることが分かった。これらのことを

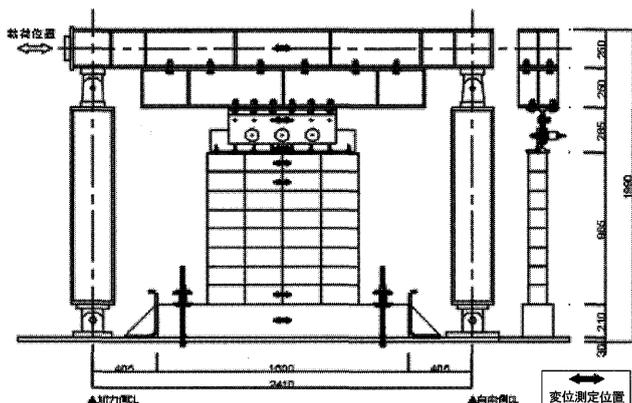


図 14 試験体概要 (単位: mm)

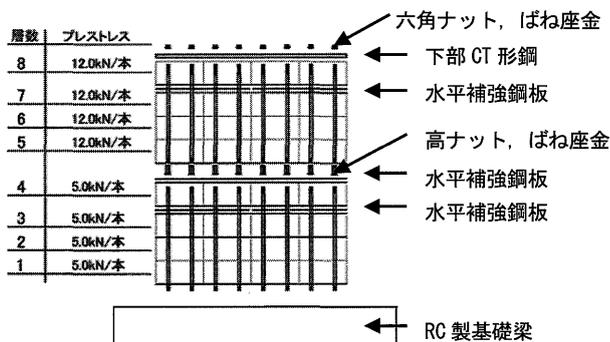


図 15 試験体壁体部の構成

踏まえ、続く制振壁実験では、摺動部ボルト 1 本あたりの導入張力は 4.0kN 程度とし、皿ばねは摺動部周りのスペースのことも考慮し 4 枚を直列に重ねて使用することにした。

4. 制振壁実験

4.1 実験概要

試験体の形状、荷重位置及び変位測定位置を図 14 に示す。試験体の構成要素には図 5～図 7 に示したものを利用した。試験体は実際の施工を想定し、RC 基礎梁上にコンクリートブロックを長手方向に 4 個並べた長さで、高さ方向に 8 層、芋目地状に組積した。芋目地状に組積することにより、コンクリートブロックの寸法誤差による組積 (ボルト締め付け) 時のひび割れを低減することが出来る²⁾。この壁体と、柱梁接合部がピンの鋼製門形フ

表 4 試験体の種類

試験体名	皿ばね組合せ		摺動部寸切りボルト		プレストレスの総和 (kN)	振幅
	直列組数	並列枚数	本数 (本)	導入張力 (kN/本)		
DW0402	4	1	2	4.0	8.0	片振幅 3.6, 9, 12, 15, 18, 15, 12, 9, 6, 3mm 各 5 サイクル 0.2Hz
DW0452	4	1	2	4.5	9.0	
DW0403	4	1	3	4.3	12.9	
DW0402U6	4	1	2	4.0	8.0	片振幅 6mm 100 サイクル 0.6Hz
DW0452U6	4	1	2	4.6	9.2	

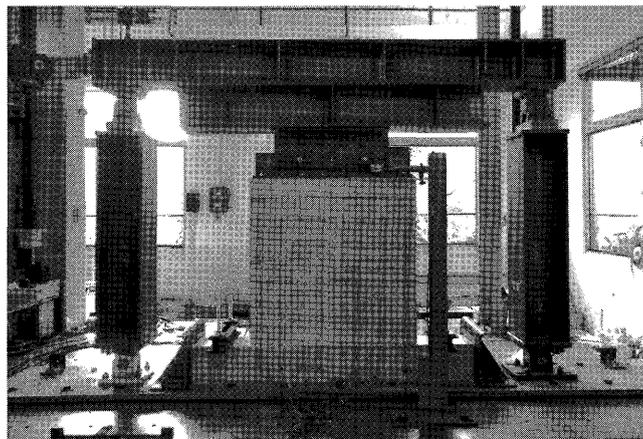


写真 2 試験体外観

レームを図 2 に示した制振壁摺動部を介して接合した。実験は、試験体の梁端部 (図 14 の白矢印位置) に 2 つのピンジョイントを介して動的アクチュエーターを接合し、繰り返し水平荷重を行った。加力は、振動数 0.2Hz で片振幅 3mm, 6mm, 9mm, 12mm, 15mm, 18mm, 15mm, 12mm, 9mm, 6mm, 3mm の正弦波形の強制変位を各 5 サイクルずつ、もしくは振動数 0.6Hz で片振幅 6mm の正弦波形の強制変位を 100 サイクル与えた。

試験体壁体部の構成を図 15 に、試験体の種類を表 4 に示す。ブロック壁を構成するボルトには、下から 1～3 層目に 1 本あたり 5.0kN, 4～6 層目に 1 本あたり 12.0kN の張力 (プレストレス) を与えた。試験体壁体部の各層のボルトにはひずみゲージを貼り付け、同種・同径のボルトの引張試験結果から得られたボルト張力とひずみの関係に基づき、組積時に各ボルトに与える張力の管理と載

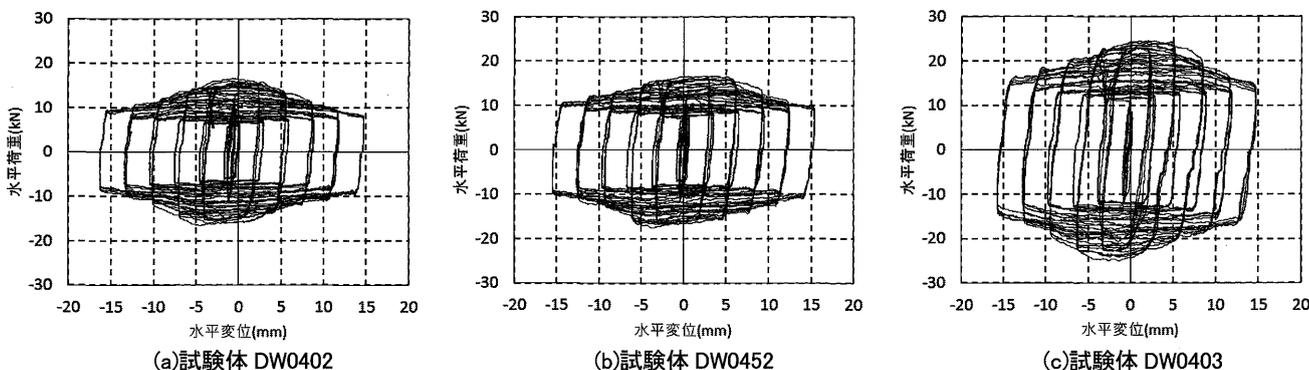
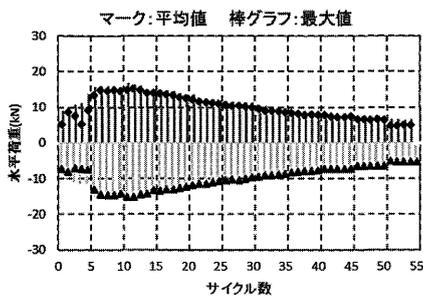
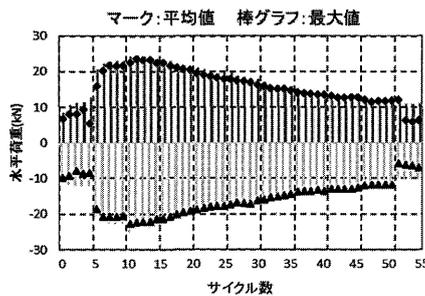


図 16 水平荷重—水平変位関係



(a)試験体 DW0402



(b)試験体 DW0403

図 17 各サイクル時の水平力の最大値と平均値

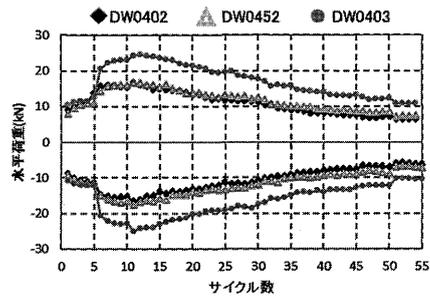
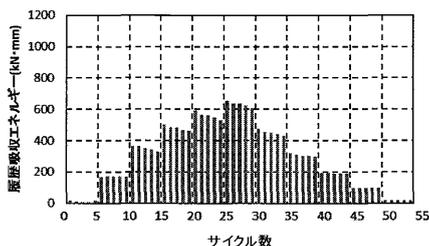
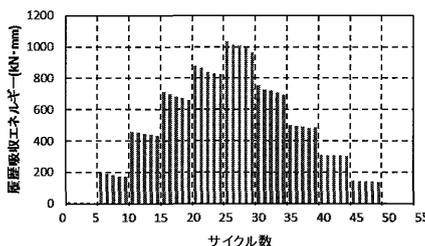


図 18 各サイクル時の水平荷重の最大値



(a)試験体 DW0402



(b)試験体 DW0403

図 19 各サイクルの履歴吸収エネルギー

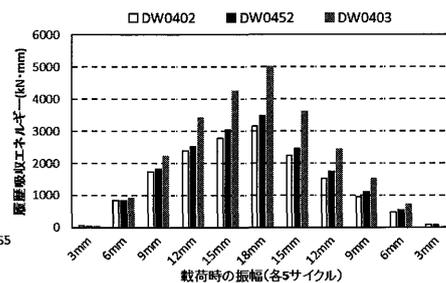


図 20 各振幅における履歴吸収エネルギーの合計値

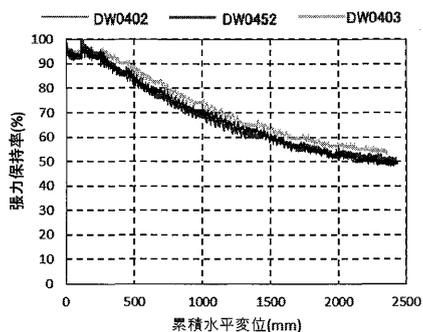
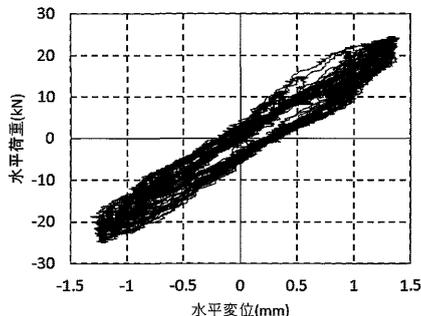
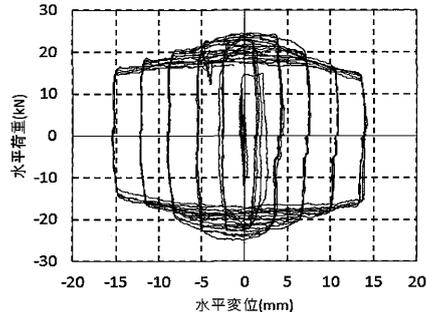


図 21 張力保持率—累積水平変位関係



(a)水平荷重—壁体部水平変位関係



(b)水平荷重—摺動部水平変位関係 (片振幅 18mm のサイクルまで)

図 22 試験体 DW0403 の壁体部の変形

荷中の張力測定を行った。なお、図 15 中にも示したこれらのプレストレスは導入目標値で、実際にはボルトの締め付け時に 1 本あたり 10~20%増しの張力を与え、その後組積体のなじみによる応力緩和が生じても試験体の載荷直前に導入目標値を若干上回るプレストレスが与えられた状態になるようにした。摺動部に与えるプレストレスはロードセルで管理し、与えるプレストレスの大きさと摺動部のボルト締め付け本数を実験変数とした。各試験体は、プレストレスが小さい試験体の載荷が終了した後、摺動部のボルト、アルミ座金、皿ばね等を交換して次の試験体の作製を行った。

4.2 制振壁実験の結果及び考察

<試験体 DW0403, 試験体 DW0402, 試験体 DW0452>

図 16 に各試験体の水平荷重 - 水平変位関係を、図 17 に各サイクル時の水平荷重の平均値及び最大値を、図 18 に各サイクル時の水平荷重の最大値の比較を示す。また、図 16, 図 17, 図 18 における水平荷重は引張時を正、圧縮時を負として示している。

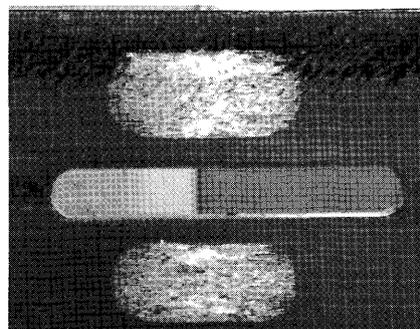


写真 3 載荷終了後の下部 CT 鋼の表面

今回、上記の 3 つの試験体は想定した摩擦面で滑りを生じさせることができた。図 16 よりいずれの試験体も概ね剛塑性型の履歴を示し、試験体 DW0402 や DW0452 は DW0403 に比べて摺動時の変動が小さい安定した履歴を示した。図 17, 図 18 より、片振幅 6mm までの載荷サイクルの範囲においては水平荷重の増大が見られる。このような水平荷重の増大は同種のアルミ座金を用いた既往の研究³⁾でも報告されている。載荷中の摩擦面でアル

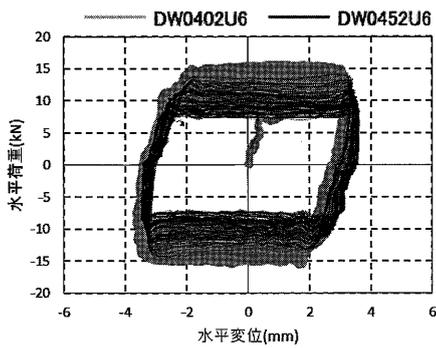


図 23 水平荷重—水平変位関係
(DW0402U6, DW0452U6)

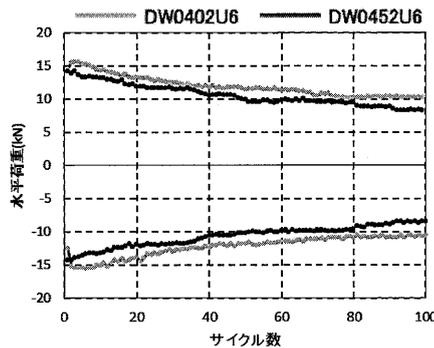


図 24 各サイクル時の水平荷重の最大値
(DW0402U6, DW0452U6)

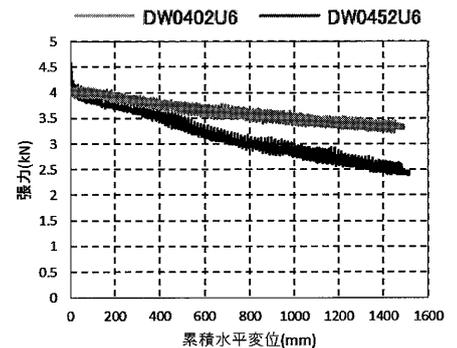


図 25 張力保持率—累積水平変位関係
(DW0402U6, DW0452U6)

ミ座金がどのような状態になっているのかを確認する方法はないが、荷重後の下部 CT 形鋼の表面の状況（写真 3）を見ると、アルミ座金が擦れた部分のうち荷重初期 15 サイクル程度の範囲に該当する中央部（幅 10～20 mm 程度の範囲）にはアルミが溶けたような形跡がみられる。このことから、荷重の初期段階において下部 CT 形鋼とアルミ座金には焼き付きが生じ、下部 CT 形鋼に付着したアルミと溶解した厚座金表面のアルミの間で摺動する際に、せん断抵抗力が付加されることで水平荷重が増大したと考えられる。上記「中央部」の両側部分にはアルミが薄く付着している程度であり、荷重後には削れたアルミの破片が摺動部の下に落ちていた。このことはアルミ座金の削れや擦り減りが生じたことを示しているが、一方で、荷重中盤以降の張力や水平荷重の低下が生じたことも確認されており、この両側部分では上記の「中央部」のようなアルミ座金の焼き付き後の摺動によるせん断抵抗力の増加は生じなかったと考えられる。

図 19 に各サイクル時の履歴吸収エネルギーを、図 20 に各振幅における履歴吸収エネルギーの合計値の比較を示す。図 19 に見られるように各試験体は与える変位が大きくなるにつれて履歴吸収エネルギーが増大した。図 20 より、片振幅 9mm 以降のサイクルでは合計導入プレストレスが大きいほど履歴吸収エネルギーがそれに比例するように大きくなった。

図 21 に各試験体の摺動部ボルトの張力保持率と累積水平変位の関係を示す。いずれの試験体も荷重が進むにつれて摺動部ボルトの張力が低下していったが、片振幅 6mm の荷重までは張力の維持が見られる。片振幅 9mm の荷重サイクル時における試験体 DW0403 の張力低下は他の試験体よりも緩やかであるが、片振幅 12mm 以降の荷重サイクルでは 3 試験体とも同様な張力低下が見られた。

実際の施工では事前に予備実験を行って、所定のボルト張力が与えられるときの皿ばね部分の全体の厚さをノギス等で測定し、同じ厚さとなるように締め付けていくことを想定しているが、ボルト張力を正確に与えていくのは難しい。少し張力を与えすぎた場合を想定し、試験

体 DW0452 では図 3 の降伏棚の右端付近の張力を与えてみたが、試験体 DW0402 と比べて水平力やボルト張力が低下する挙動に大きな差は生じなかった。

図 22(a)に試験体 DW0403 の壁体部分の水平荷重—水平変位関係を、図 22(b)に壁体部分の変形を除いた水平荷重—水平変位関係を示す。摺動部実験（図 12(e)）と同様な履歴特性が得られている。

<試験体 DW0402U6, 試験体 DW0452U6>

図 23 に水平荷重—水平変位関係を、図 24 に各サイクル時の水平荷重の最大値の試験体ごとの比較を、図 25 に各試験体の張力保持率と累積水平変位の関係を示す。

図 24 より、サイクルごとの最大水平荷重は両試験体とも同程度となったが、試験体 DW0402U6 の方が最大水平荷重が若干大きくなった。また、図 25 より張力の低下は試験体 DW0402U6 の方が緩やかである。このことが最大水平荷重の差に影響していると考えられる。摺動部のボルト 1 本あたり 4.6 kN の張力を与えた試験体は、1 本あたり 4.0 kN の張力を与えた試験体より荷重の初期段階でアルミ座金のすり減りが過度に生じ、張力の低下が大きかったものと考察される。これより、過大な張力の導入は摺動部の性能に悪影響を及ぼす場合もあることが確認された。

なお、今回の実験では実際の施工を想定し、RC 製の基礎梁の上に壁体を芋目地状に組積し試験体を作製したが、荷重による埋め込みボルトの引き抜けや基礎梁の破損、芋目地状に組積したことによるコンクリートブロックの施工時の割れは生じなかった。

5. 結論

本研究では、アルミ厚座金を用いた乾式ブロック造り振壁の繰り返し水平荷重実験を行い、以下の知見を得ることができた。

- (1) 滑りが生じた試験体は振幅の増大に伴って水平荷重が徐々に減少したが概ね剛塑性型の履歴を示した。
- (2) 片振幅 6mm の荷重時（累積水平変位約 200mm）までは水平荷重の増大と、アルミ厚座金を固定

するボルトの張力の維持が見られた。

- (3) 実験結果の比較により、提案する制振壁は適切な張力を与えた摺動部を分散配置し、皿ばねでアルミ座金を固定している部分のストロークを大きくすることが摺動部のボルト張力や水平耐力の維持に有効であることが分かった。
- (4) 本研究で提案する制振壁を実際に施工する場合に利用できる RC 梁への定着方法を検討し、載荷実験に適用した結果、提案する構成で施工したものに破損等の不具合は生じなかった。

謝辞

本研究の遂行にあたり、文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（A）, 課題番号：26242034, 研究者代表：川瀬 博）の助成を受けた。末尾ながら記して謝意を示す。

参考文献

1) 大久保徳洋, 吉永哲大, 山口謙太郎, 小山智幸, 川瀬

博, 吉田雅穂: 乾式工法によるコンクリートブロック摩擦制振壁の開発研究 —制振壁の概要と壁—フレーム試験体の繰り返し水平載荷実験—, 都市・建築学研究 九州大学大学院人間環境学研究院紀要, 25, pp.87-93, 2014.1

- 2) 吉田真央, 山口謙太郎, 石倉大暉, 川瀬 博: 乾式工法で組積したコンクリートブロック壁体の力学特性 —芋目地状または破れ目地状に組積した壁体の面内繰り返し水平載荷実験—, 都市・建築学研究 九州大学大学院人間環境学研究院紀要, 33, pp.63-70, 2018.1
- 3) 日本ばね学会編: ばね 第4版, 丸善出版, 2008.5
- 4) 寺井雅和, 佐藤孝典, 吉岡智和, 南 宏一: ゴムワッシャーを用いた高力ボルト摩擦すべりダンパーに関する研究 アルミニウム合金板を摺動材に利用した動的加振実験, 日本建築学会構造系論文集, 72 巻, 614 号, 2007.4

(受理：平成30年10月29日)