

論文 アルミニウム合金と無収縮モルタルの摩擦性状に関する実験的研究

渡邊 高朗^{*1}・小澤 潤治^{*2}・大久保 昌治^{*3} 南 伊三男^{*4}

要旨：アルミニウム合金と無収縮モルタルの摩擦性状を、実験を行い検討した。変動要因は、アルミ合金の物理的状態（素地、グリットブラストRz100 μ 、ディンプル仕様）、被膜処理（処理なし、クロメート処理塗布量5~20および25~250mg/m²）、無収縮モルタルの種類（普通型、低発熱型）、圧着力である。実験と検討の結果、次の所見を得た。低発熱型無収縮モルタルを用いることで、打設時の水素発生を防止できる。摩擦力とすべり量の関係は、ラウンドハウス型を示した。圧着力と摩擦力の間には、比例関係が認められる。グリットブラストとディンプルでは、初期履歴の最大静止摩擦力を上昇させる効果が認められた。

キーワード：摩擦、アルミニウム合金、無収縮モルタル、最大静止摩擦力、摩擦係数

1. はじめに

軽量である利点を生かしたアルミ合金製ブレース圧着タイプの耐震補強工法は、大型揚重機が不要で敷地条件等に制約されず大変有効な工法といえる。この圧着工法は、アルミ合金製ベースプレート（以降、アルミ耐圧板）と既存躯体の梁を、目地モルタルを介しPC鋼棒の緊張により固定する。地震力は目地モルタルとアルミ耐圧板の摩擦力によりブレースへと伝達されるが、重要なことは、その際に摩擦力が想定される外力に対し安全に設計できる手法を確立することである。一方で、この分野の研究¹⁾は極めて少ない。本実験的研究は、アルミ合金と無収縮モルタルの摩擦実験を行い、摩擦接合の設計手法を検討する基本データを得ることを目的とする。

2. 実験計画

2.1 変動要因

表-1に試験体一覧を示す。変動要因を、以下に示す。

(1) アルミ耐圧板の物理的状態

圧延素地の状態、グリットブラストによりRz=100 μ （Rz：十点平均粗さJIS B 0601-1994）に凹凸を施した状態、直径20mm深さ5mmのディンプルを30mmピッチで千鳥状に設けた状態（写真-1参照）の3タイプ。

(2) アルミ耐圧板の被膜処理

処理を行わないもの、クロム酸塩系クロメート処理（塗布量5~20mg/m²）、同処理（塗布量50~250mg/m²）の3タイプ。

(3) 無収縮モルタルの種類

普通型と低発熱型の2タイプ。

以上の変動要因を組み合わせ、合計10体の試験体で実験と検討を行った。尚、各試験体の無収縮モルタルの材料試験結果を表-2に示す。

表-1 試験体一覧

No.	アルミ耐圧板		無収縮モルタル種類	圧着力 ^{*6}
	物理的状態	被膜処理		
1	素地 ^{*1}	無	普通型	A
2	素地	無	普通型	B
3	素地	Cr1 ^{*4}	普通型	B
4	素地	無	低発熱型	B
5	素地	Cr2 ^{*5}	低発熱型	B
6	Rz100 ^{*2}	無	普通型	A
7	Rz100	Cr1	普通型	B
8	Rz100	Cr2	低発熱型	B
9	ディンプル ^{*3}	Cr2	低発熱型	B
10	素地	Cr2	低発熱型	C

共通 アルミ合金製耐圧板 材質 A5083-O
^{*1} 圧延素地 ^{*2} グリットブラスト処理 Rz100 μ
^{*3} アルミ合金製耐圧板表面に、直径20mm深さ5mmのディンプルを30mmピッチで千鳥状に設けたもの。
^{*4} クロム酸塩系クロメート処理 塗布量5~20mg/m²
^{*5} クロム酸塩系クロメート処理 塗布量50~250mg/m²
^{*6} Aは圧着力P=75,225,450,675(kN)
 Bは圧着力P=675(kN) Cは圧着力P=675,450(kN)

表-2 材料試験結果一覧

No	物理状態 被膜処理	無収縮モルタル		
		種類	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)
1	素地-無	普通型	64.0	25.0
2	素地-無	普通型	69.9	26.8
3	素地-Cr1	普通型	69.9	26.8
4	素地-無	低発熱型	51.4	22.7
5	素地-Cr2	低発熱型	54.8	23.5
6	Rz100-無	普通型	64.1	25.6
7	Rz100-Cr1	普通型	69.9	26.8
8	Rz100-Cr2	低発熱型	56.5	24.2
9	Rz100-Cr2	低発熱型	61.1	24.6
10	素地-Cr2	低発熱型	63.1	26.1

*1 東急建設（株） 建築技術部 工修（正会員）

*2 東急建設（株） 技術研究所 工修

*3 （株）住軽日軽エンジニアリング 設計技術部 工修

*4 （株）建研 東京支店 工修

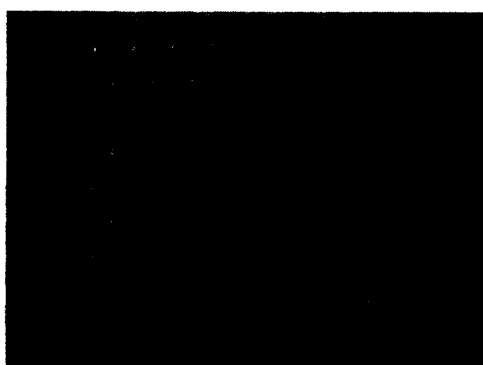


写真-1 ディンプル仕様のアルミ耐圧板

2.2 載荷計画

図-1に載荷フレームを、図-2に載荷詳細を示す。

試験体は、既存梁を想定した鉄筋コンクリート部、目地モルタルを想定した無収縮モルタル（以降、モルタル）、アルミ耐圧板から構成される。鉄筋コンクリート部は、タテヨコが800mmで高さは350mmとした。モルタル部分は、タテヨコが250mmで厚さは20mmとした。アルミ耐圧板は、タテヨコが250mmで厚さは40mmとした。

載荷は、圧着力とせん断力（摩擦力）ともに1000kN串形ジャッキを用いた。設定した圧着力は、一定となるように制御している。アルミ耐圧板固定治具は、アルミ耐圧板に密着させ、載荷ビームに高力ボルト接合した。せん断力の作用線は、アルミ耐圧板とモルタルの境界面に一致させ、パンタグラフによりこの作用線方向以外にせん断力が作用することを防止している。

計測は、圧着力と摩擦力を1000kNロードセルで、アルミ耐圧板と鉄筋コンクリート部の相対変位（以降、すべり量）を25mm変位計で行った。

図-3に、載荷履歴計画を示す。

圧着力Pは75、225、450、675kNの4段階用意し、既存躯体のコンクリート圧縮強度を $18(\text{N}/\text{mm}^2)$ と想定した許容支圧応力度($f_n=10.8\text{N}/\text{mm}^2$)に、耐圧板の断面積を乗じた値(675kN)の1/9、1/3、2/3、1倍に対応している。

載荷履歴は、以下に示す3タイプとした（各試験体の載荷履歴計画は表1の圧着力欄を参照）。

(1) 履歴計画A 圧着力を $P=75, 225, 450, 675(\text{kN})$ とし、それぞれ正方向に3回、負方向に2回、すべり量 $\pm 2\text{mm}$ を目安の正負交番載荷を行う。

(2) 履歴計画B 圧着力を $P=675(\text{kN})$ とし、正方向に3回、負方向に2回、すべり量 $\pm 2\text{mm}$ を目安の正負交番載荷を行う。

(3) 履歴計画C 圧着力は $P=675, 450(\text{kN})$ とする。No.5実験結果による摩擦係数 μ の0.7倍を設計摩擦係数とし、想定最大静止摩擦力($0.7 \times \mu \times P$)の1/2、2/3倍した摩擦力を、 ± 3 回正負交番載荷する。

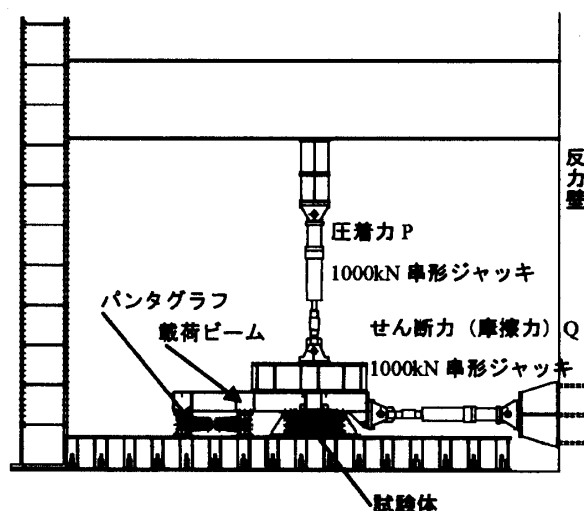


図-1 載荷フレーム

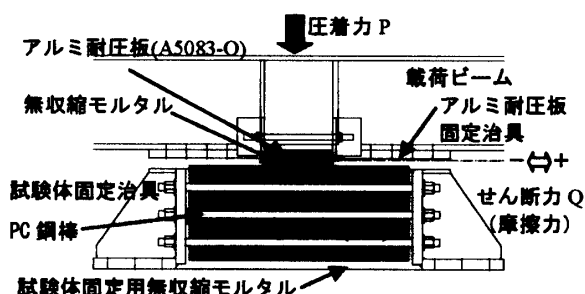


図-2 載荷詳細

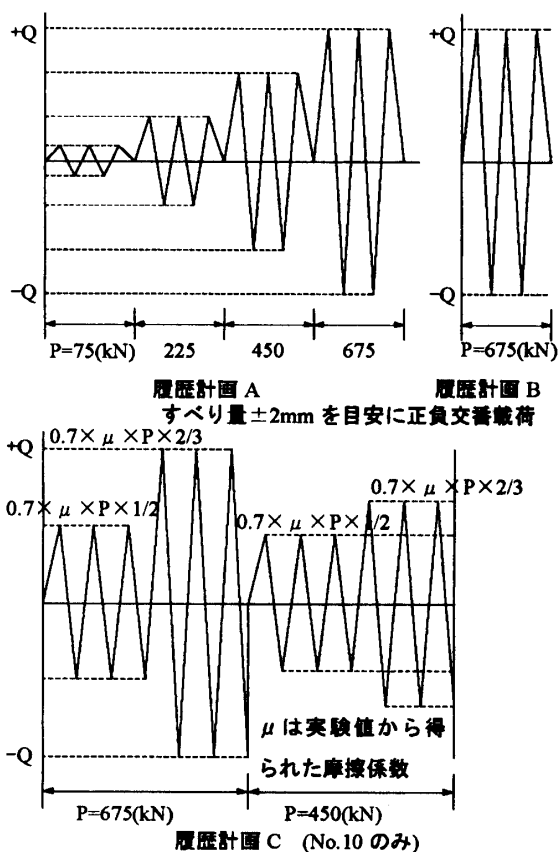


図-3 載荷履歴計画



写真-2 水素の発生状況 (試験体 No. 1)

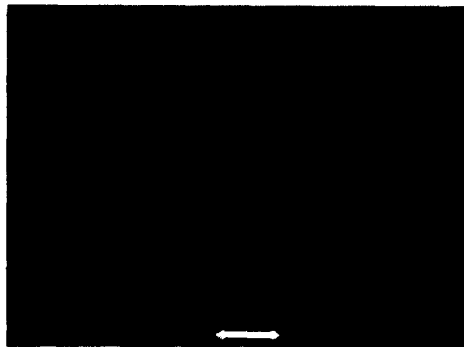
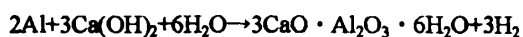


写真-3 実験後の状況 (No. 5)

3. 実験結果と考察

3.1 無収縮モルタルの打設

写真-2 に、No.1 の試験体におけるモルタル打設時の状況を示す。打設直後から、アルミ耐圧板とモルタルの界面より水素と水の発生が観察された。この現象は、普通型無収縮モルタルを用いた試験体で確認された。アルミニウムは、両性金属で酸にもアルカリにも溶解する。まだ固まらないモルタルのアルカリ性水溶液中では、以下の反応によって水と水素が発生する。



時間の経過と共にモルタルの硬化が進むと、モルタル中の水分（つまりアルカリ水溶液）が減少し、また上記化学反応でアルミ耐圧板表面に生成される酸化アルミの増加により、反応が収束すると考えられる。

3.2 荷重履歴の性状

写真-3 に、No.5 の実験後の状況を示す。写真は、向かって左側がアルミ耐圧板、右側が無収縮モルタルとなっている。耐圧板は、モルタルと線対称になるように摩擦面を撮影している。アルミ耐圧板にはモルタルの移着と固着、アルミの摩耗が確認された。モルタル部分には、モルタルの摩耗とアルミの移着が確認された。これらの観察結果は、全ての試験体で確認された。

図-4 に、No.1, 2, 4, 5 の摩擦力とすべり量の関係を示す。各試験体の各圧着力時において、当初線形的に摩擦力とすべり量は増加し、その後 No.2, 4, 5 の第1サイクルを除き、摩擦力は一定のまますべり量だけが増加し

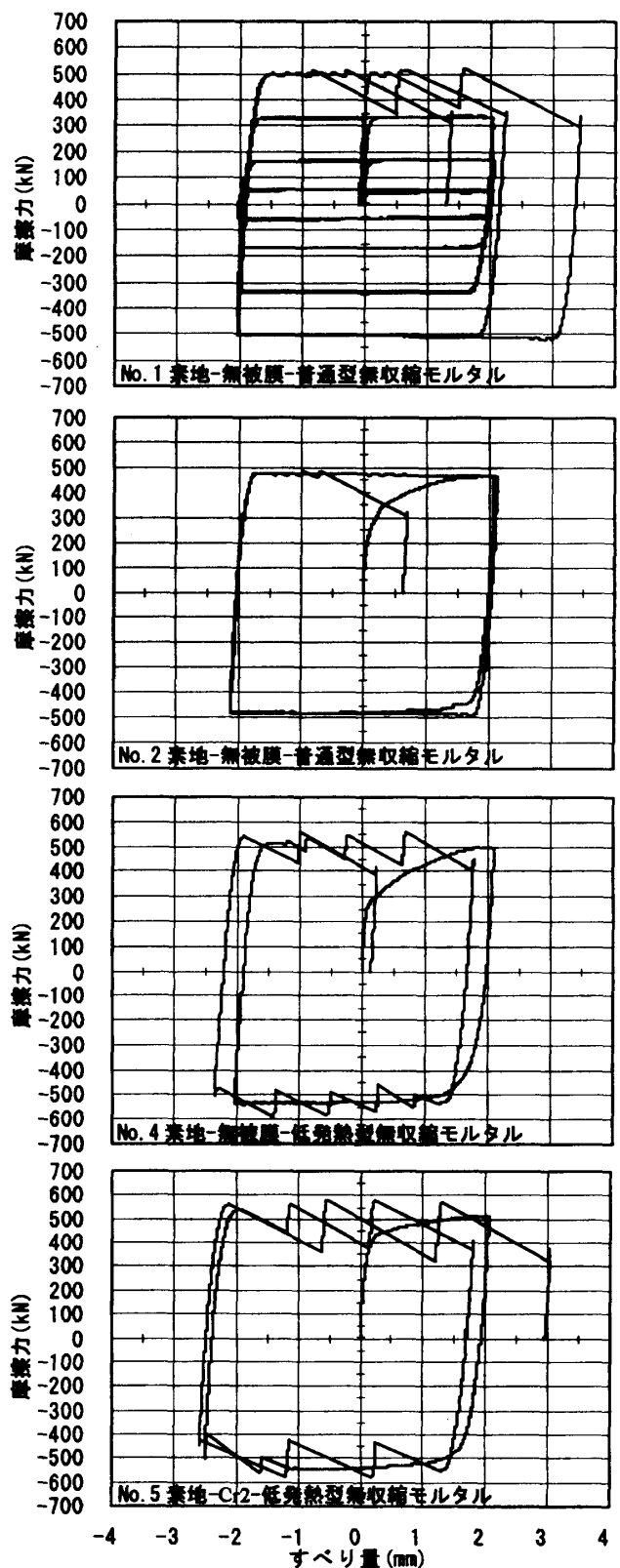


図-4 摩擦力とすべり量の関係 (No. 1, 2, 4, 5)

ている。また、明確な最大静止摩擦力の現れないラウンドハウス型を示した。尚、急激に摩擦力が低下している部分は、荷重フレームの剛性に一部不足があり、すべり量の増加とともにフレームの一部に変形が蓄積し、一気にフレーム変形が戻ったためと考えられる。

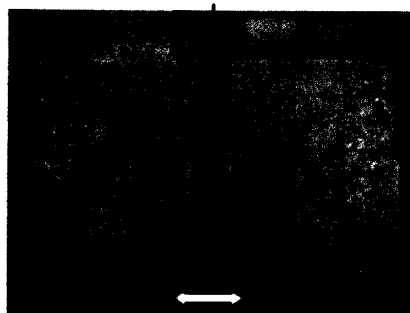


写真-4 実験後の状況 (No. 8)

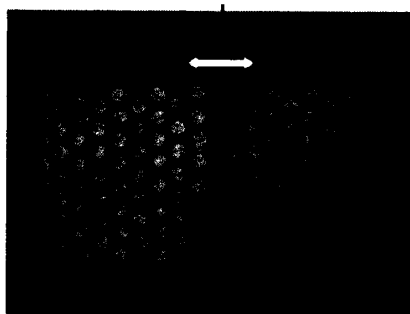


写真-5 実験後の状況 (No. 9)

写真-4, 5に, No.8 および No.9 の試験体における実験後の状況を示す。No.8 は, アルミ耐圧板にモルタルの固着が広く認められ, 部分的にアルミの摩耗が観察された。モルタル部分には, モルタルの摩耗と部分的なアルミの移着が観察された。No.9 は, アルミ耐圧板の凹部にあるモルタルがアルミ耐圧板とモルタルの界面で切れ, 支圧によるモルタルの破壊は見られなかった。また, 部分的にアルミの摩耗が観察された。モルタル側では, モルタルの摩耗と部分的なアルミの移着が観察された。

図-5に, No.6, 7, 8, 9 の摩擦力とすべり量の関係を示す。No.6 は, 各圧着力 ($P=75, 225, 450, 675\text{kN}$) において, 当初線形的に摩擦力とすべり量は増加し, その後 $P=675(\text{kN})$ の+1 サイクルを除き, 摩擦力は一定のまますべり量だけが増加している。また, 明確な最大静止摩擦力の現れないラウンドハウス型を示した。尚, 前述の通り, 急激に摩擦力が低下している部分は, 載荷フレームの一部に剛性が不足したためと考えられる。

No.7 では, +1 サイクルで摩擦力がおおよそ $200(\text{kN})$ まで線形的性状を呈し, 続いてラウンドハウス型の曲線を示した後, 摩擦力は一定のまますべり量だけが増加した。

No.8 では, 前述までの試験体と同様に, 当初線形的に摩擦力とすべり量が増加し, その後摩擦力が一定のまますべり量だけが増加している。また, 明確な最大静止摩擦力の現れないラウンドハウス型を示した。

No.9 は, アルミ耐圧板にディンプルを有している。前述までの試験体と同様に, 線形的に摩擦力とすべり量が増加し, 続いて摩擦力は一定のまますべり量だけが増加している。また, この試験体も明確な最大静止摩擦力の

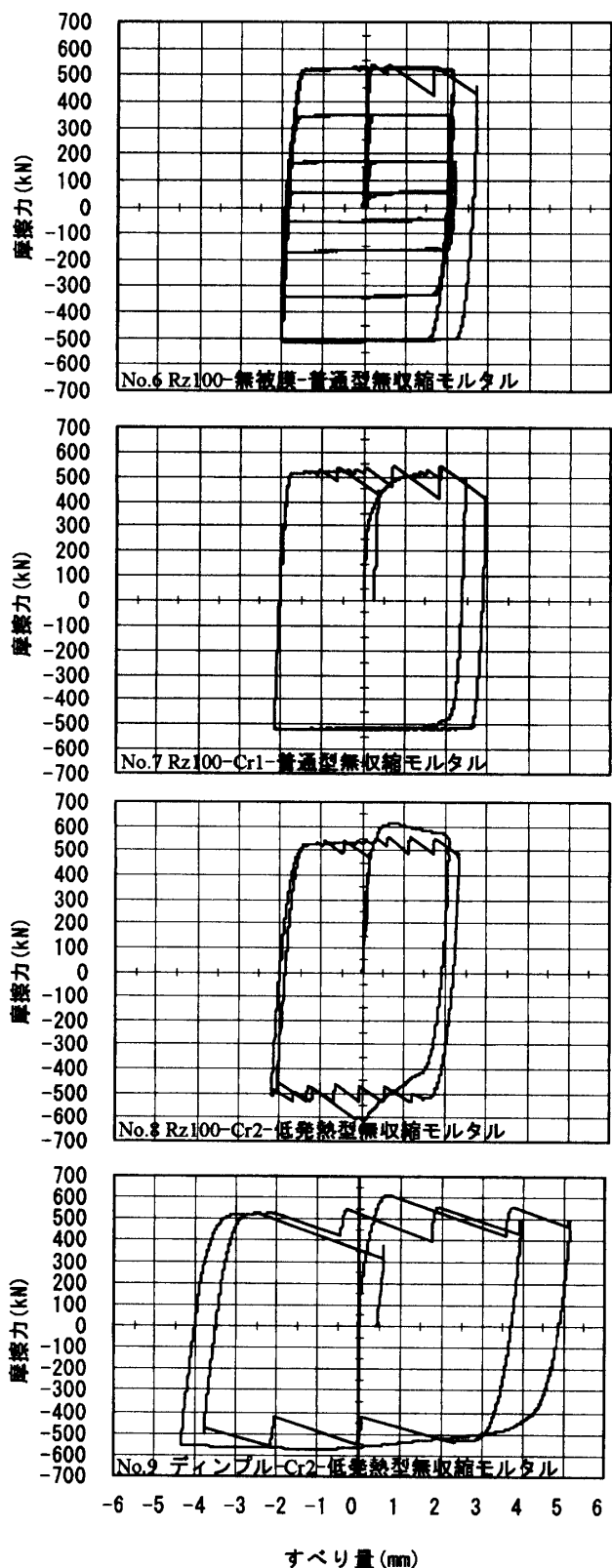


図-5 摩擦力とすべり量の関係 (No. 6, 7, 8, 9)

現れないラウンドハウス型を示した。

以上より, 当初の摩擦力とすべり量の線形的な増加部分は静摩擦状態, 摩擦力は一定ですべり量だけ増加する部分は動摩擦状態と考えられる。また, 明確な最大静止摩擦力の現れないラウンドハウス型を示した。

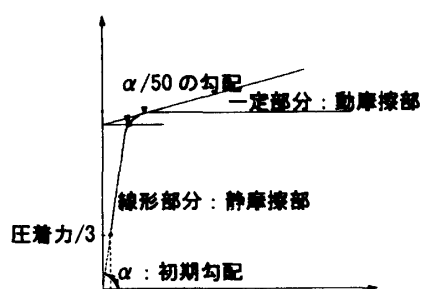


図-6 最大静止摩擦力の算定

3.3 最大静止摩擦力

前述までの摩擦性状により、全ての試験体において摩擦力とすべり量の関係はラウンドハウス型を示し、明確な最大静止摩擦力を確認することが出来なかった。

ラウンドハウス型の評価では、PC 鋼棒等で明確な降伏点の現れない鋼材のオフセット法による降伏応力度を求める方法や、鋼材の高力ボルト接合における摩擦係数の算定方法等がある。しかし、本論で扱う摩擦性状では、最大静止摩擦力時のすべり量のばらつき等が懸念され、材質に様性のある金属同士の評価手法をそのまま用いると妥当性が確保できないと思われる。

そこで本論では、図-6 に示す手法で最大静止摩擦力の評価を行った。

実験により得られた摩擦力とすべり量の関係から、各サイクルの摩擦力が0になる点を新原点とし、圧着力のおよそ 1/3 の値の摩擦力付近と新原点を結ぶ直線勾配を初期勾配 α とする。この α の 1/50 の勾配ラインと摩擦力とすべり量の曲線の接点を最大静止摩擦力とした。こうして得られた最大静止摩擦力は、実験時に確認されたすべり量が急激に増加した直前の摩擦力とよく一致していた。これより、代表的な試験体の検討結果を示す。

図-7, 8, 9 に、試験体 No.5, 8, 9 の新原点による摩擦力とすべり量の関係を示す。これらは全て低発熱型無収縮モルタルを用いた試験体である。図中に示す●印は、最大静止摩擦力を示す。

No.5 (素地・Cr2 被膜) における最大静止摩擦力は、 ± 1 サイクルで他のサイクルより低い値となっている。また、 $+2, 3$ のサイクルは、ほぼ同じ履歴を描いており、最大静止摩擦力もほぼ同じとなっている。No.8 (Rz100・Cr2 被膜) では、 $+1$ サイクルの最大静止摩擦力が最も高い値を示している。No.9 においても $+1$ サイクルの最大静止摩擦力が最も高い値を示し、 $+2, 3$ のサイクルは、ほぼ同じ履歴を描いており、最大静止摩擦力もほぼ同じとなっている。

図-10 に、No.1 および 6 の試験体における、最大静止摩擦力と圧着力の関係を示す。最大静止摩擦力と圧着力は、比例関係にあると考えられる。双方の摩擦係数の平均値は、共に 0.69 であった。

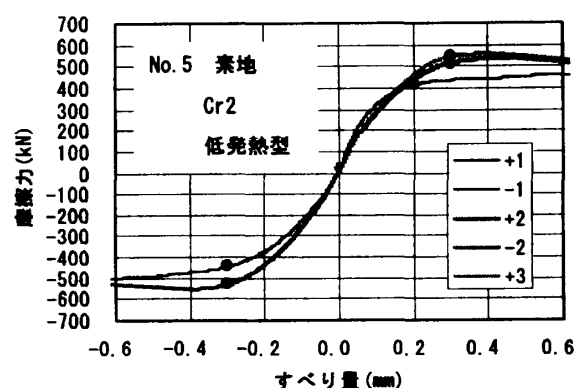


図-7 新原点による摩擦力とすべり量の関係

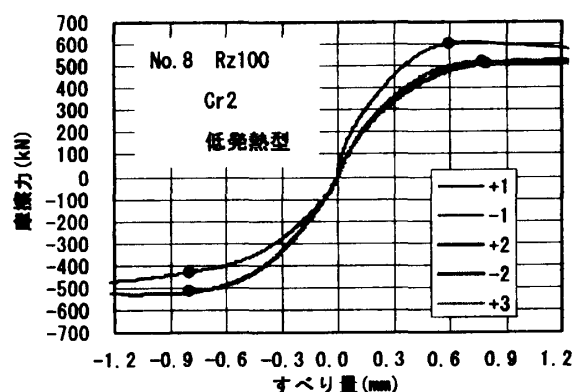


図-8 新原点による摩擦力とすべり量の関係

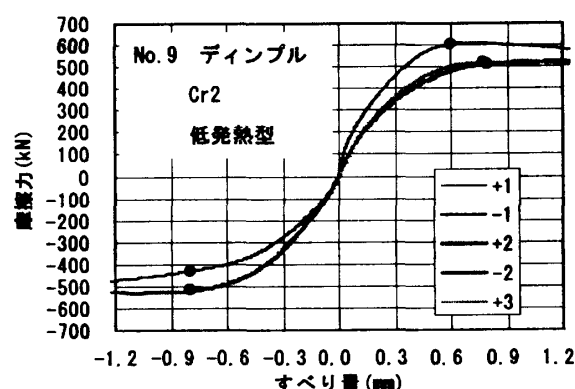


図-9 新原点による摩擦力とすべり量の関係

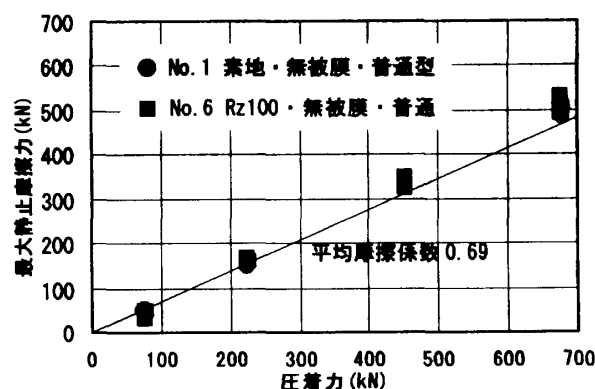


図-10 最大静止摩擦力と圧着力の関係

3.4 摩擦係数

図-11 に、No.1 における摩擦係数と载荷サイクルの関係を示す。圧着力 $P=75(\text{kN})$ の ± 1 の摩擦係数は、他のサイクルや圧着力の場合と比較して低い値を示すが、その他は载荷サイクルに関わらずほぼ安定した摩擦係数を示している。この摩擦係数の安定性は、繰り返しの摩擦作用により、ばらつきが小さくなったためと思われる。

図-12 に、No.6 における摩擦係数と载荷サイクルの関係を示す。圧着力 $P=75(\text{kN})$ ではサイクル増加で摩擦係数が上昇安定化し、その他の圧着力では载荷サイクルに関わらずほぼ安定した摩擦係数を示している。

図-13 に、No.7, 8, 9 の摩擦係数と载荷サイクルの関係を示す。No.7 はサイクル数によらず安定した摩擦係数を示すのに対し、No.8, 9 では $+1$ サイクルで高い摩擦係数を示し、 -1 サイクルで下降した後上昇安定する傾向が見られる。No.8, 9 のこの性状は、 $Rz100$ の凹凸面に固着したモルタルやディンプルの効果と考えられる。

図-14 に、No.10 の摩擦力とすべり量の関係を示す。この試験体は、No.5 の実験結果から得られた $+1$ サイクルの摩擦係数 μ に 0.7 倍した設計摩擦係数を定め、想定最大静止摩擦力 ($0.7 \times \mu \times P$) の $1/2$, $2/3$ の摩擦力をそれぞれ ± 3 回正負交番载荷している。図に示すとおり、摩擦力とすべり量の関係は、ほぼ線形性が認められる。このことから、最大静止摩擦力の設定方法と摩擦係数の妥当性が伺える。

4. まとめ

本実験と検討により、次の所見を得た。

- ・低発熱型無収縮モルタルの使用により水素の発生を防止できる。
- ・アルミ合金と無収縮モルタルの摩擦性状において、明瞭な最大静止摩擦力のないラウンドハウス型を示す。
- ・圧着力と最大静止摩擦力には、比例関係が認められる。
- ・Cr2 処理をした $Rz100$ と同処理のディンプル仕様は、モルタルのアルミ耐圧板への固着やモルタルコッターの効果により、 $+1$ サイクルの最大静止摩擦力を高めることができる。
- ・摩擦力とすべり量の関係から最大静止摩擦力を定義する手法を提案した。

参考文献

- 1) 庄司耕平, 山田文富ほか: アルミニウム合金を用いた建築構造に関する研究 (その 32) ベースプレートとモルタル間のすべり実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), C-1 分冊, pp.999-1000, 2000.9

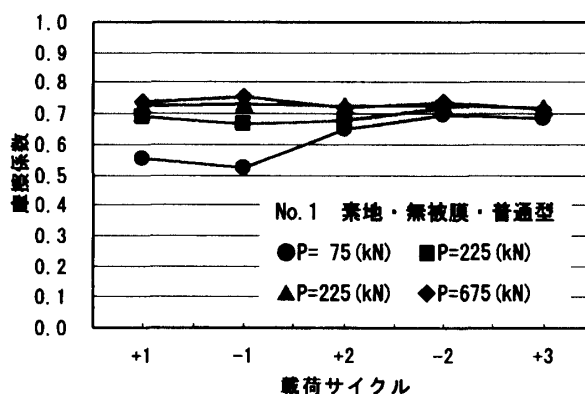


図-11 圧着力と最大静止摩擦力の関係

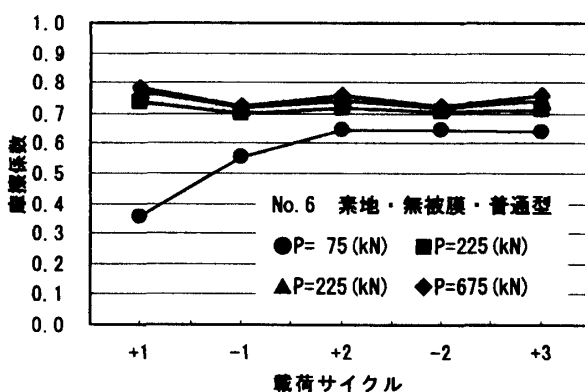


図-12 圧着力と最大静止摩擦力の関係

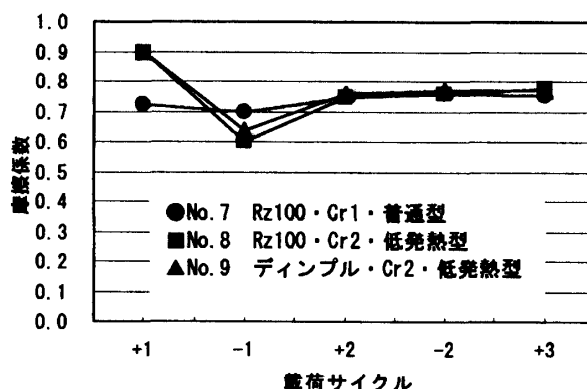


図-13 圧着力と最大静止摩擦力の関係

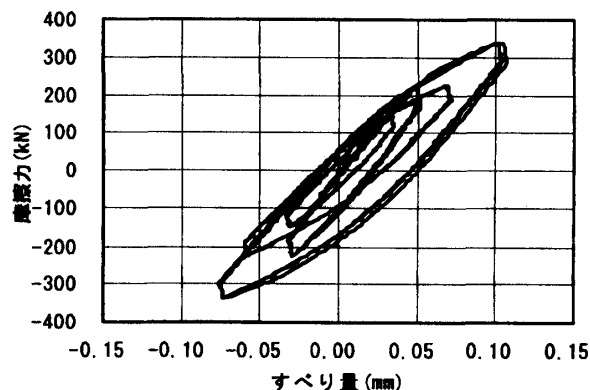


図-14 No. 10 摩擦力とすべり量の関係