

柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉審査資料	
資料番号	KK67-0112
提出年月日	平成28年8月15日

柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉

側面回転ばねの妥当性検討に関する
摩擦特性試験について

平成28年8月

東京電力ホールディングス株式会社

目 次

1. 試験の目的	1
2. 試験計画	5
2.1 試験計画概要	5
2.2 建屋側面構造の室内試験へのモデル化.....	7
2.3 試験装置	10
3. 一方向載荷および繰返し載荷試験.....	15
3.1 目的	15
3.2 試験ケース	15
3.3 供試体	16
3.5 試験結果の評価.....	32
4. スケール影響試験.....	35
4.1 目的	35
4.2 試験ケース	35
4.3 供試体	36
4.4 試験結果	38
5. 考察	40

1. 試験の目的

「側面回転ばねの妥当性検討方針書」で述べたように、柏崎刈羽原子力発電所 6, 7 号炉の原子炉建屋の地震応答解析に用いる埋込み SR モデルに適用した側面回転ばねについて、その適用に関する妥当性を検討するための論点として、以下の論点を挙げた。本試験は、下記論点のうちの論点①に関するものである。

論点① 建屋側面に防水層が存在する場合に防水層と地盤間で摩擦力が伝達可能か

論点② 地震時の側面地盤の剥離や土圧変動を考慮しても摩擦伝達効果が得られるか。

論点③ 隣接建屋や建屋周辺の詳細な地盤状況が側面回転ばねの適用性に影響しないか

論点④ 詳細評価モデルの検討結果を踏まえて埋込み SR モデルへ側面回転ばねを適用することが妥当か

論点①は、図-1.1 及び図-1.2 に示すように原子炉建屋の地下外壁が防水層を介して概ねマンメイドロック（西山モルタル）と接する状況にあり、側面回転ばねの妥当性の検討にあたっては、防水層が介在することを踏まえた上で建屋と地盤間で摩擦力が伝達可能かを確認する必要があるとの考えに基づくものである。また、建屋側面に防水層がある場合の建屋-側面地盤の境界部で保持できる摩擦力（以下、摩擦耐力と呼ぶ）を適切に設定した上で、論点②～論点④についての検討を進める必要がある。

ここでは、防水層が存在する場合の建屋-側面地盤の境界部の摩擦特性について、実機防水仕様と同製品もしくは同等品を用いた地盤摩擦試験（屋内試験）により確認する。また、試験より得られた摩擦特性については、論点②および論点③として行う側面回転ばねの妥当性確認に用いる FEM モデルに反映する。

実施した地盤摩擦試験は、以下の 3 試験である。

- ① 一方向載荷試験・・・防水層を介した基本的な摩擦特性の確認
- ② 繰返し載荷試験・・・地震時の繰返し条件下での摩擦特性の確認
- ③ スケール影響試験・・・摩擦面積の寸法影響確認

また、上記試験より得られた試験結果に基づき、建屋側面に防水層がある場合の建屋-側面地盤の境界部で保持できる平均的な摩擦特性（摩擦ばね定数および動摩擦耐力）を設定し、論点②～論点④の検討に用いる FEM モデルの地下外壁と地盤間のジョイント要素条件として用いる。図-1.3 に試験から評価に至る一連の検討の流れを示す。

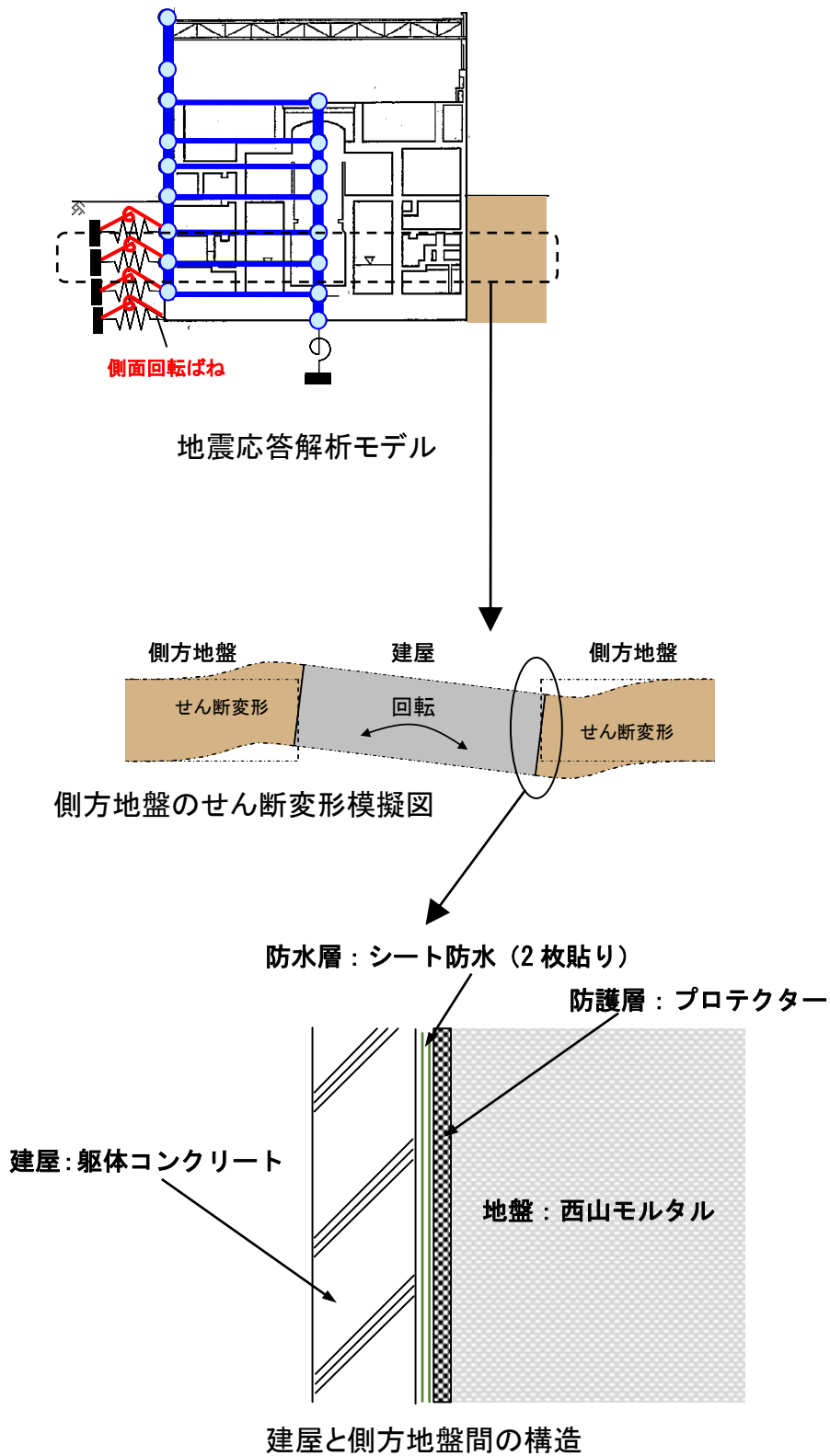


図-1.1 原子炉建屋の埋込みSRモデルに適用した側面回転ばねと地下外壁の防水仕様

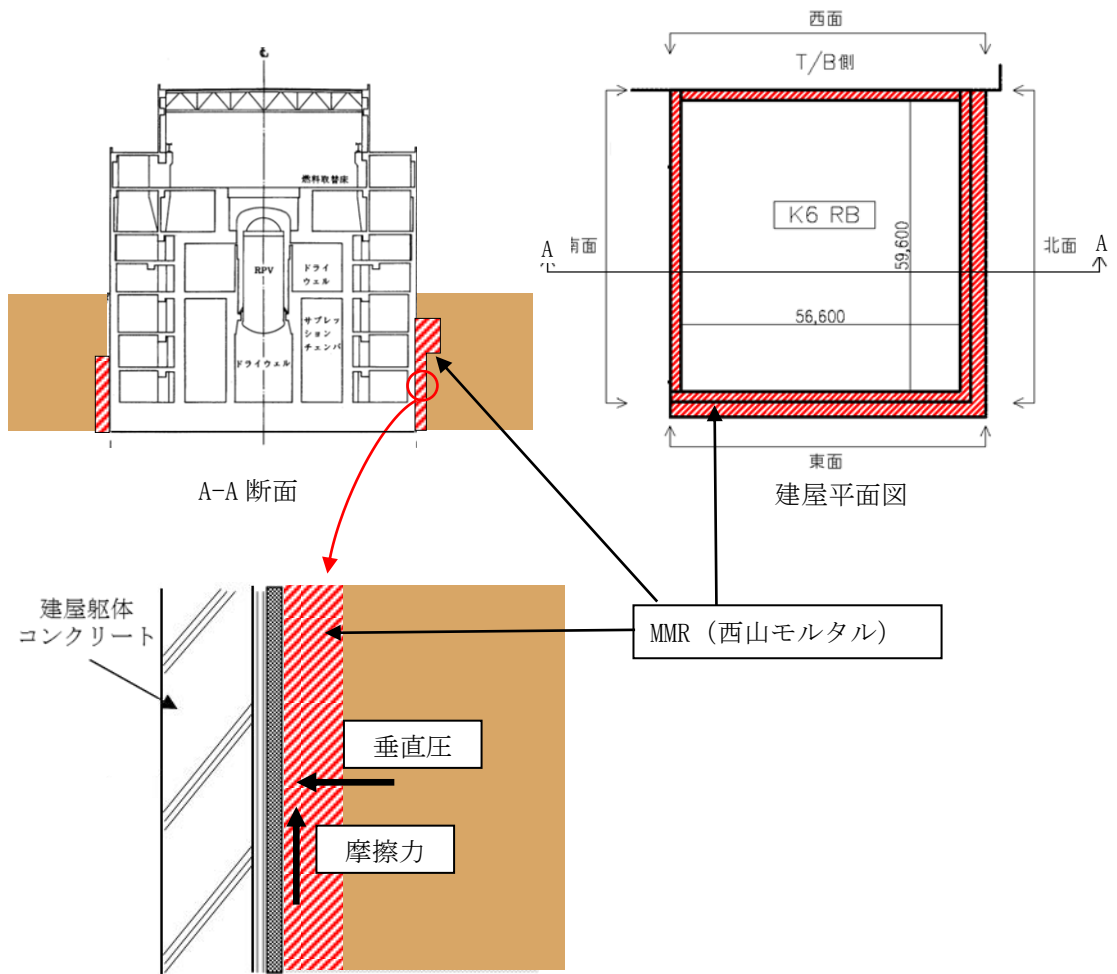


図-1.2 建屋外壁部の防水層と MMR の位置関係

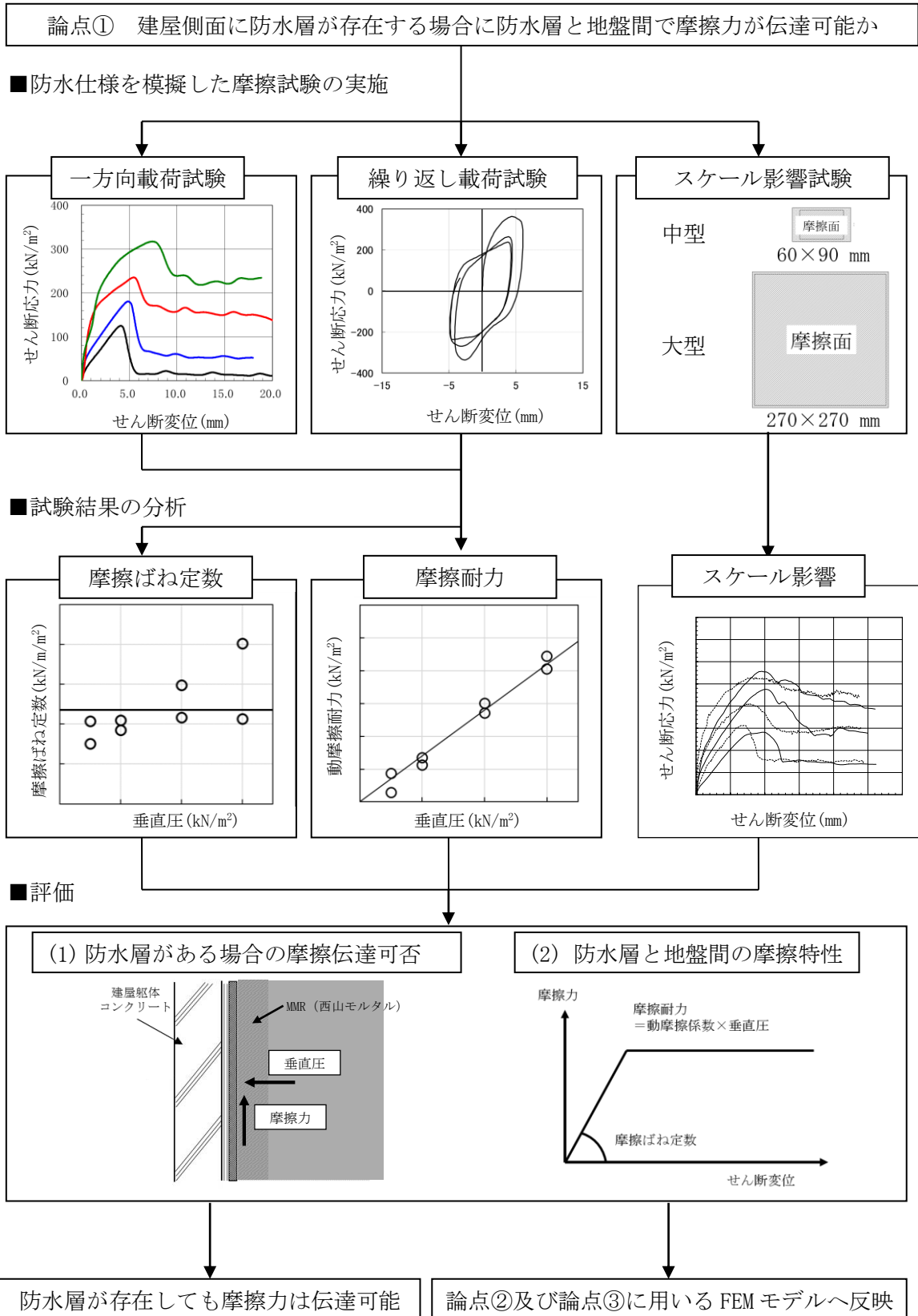


図-1.3 試験から摩擦特性の設定に至る一連の検討フロー

2. 試験計画

柏崎刈羽原子力発電所の原子炉建屋等で使用されている防水層および保護層を考慮し、これらを挟むように地盤と躯体からなる供試体を製作する。この供試体に対して、せん断加力試験を行い、摩擦特性を把握する。

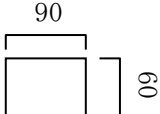
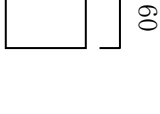
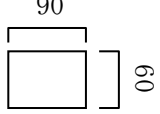
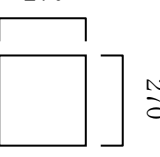
2.1 試験計画概要

試験は、以下に示す一方向載荷および繰返し載荷試験とスケール影響試験を実施する。表-2.1.1に試験計画概要を示す。

一方向載荷および繰返し載荷試験では、一方向載荷や繰返し載荷が可能な試験装置を用いて、せん断加力試験を実施し、摩擦特性データを取得する。

スケール影響試験では、摩擦面寸法の影響を把握するため、大型供試体および中型供試体を作成し、せん断試験を実施する。なお、一方向載荷および繰返し載荷試験結果より滑り面が保護層と西山モルタルの間であることが確認されたことより、スケール影響試験の供試体は、西山モルタルと保護層のみを模擬した供試体とする。

表-2.1.1 試験計画概要

試験	目的	概要	摩擦面の試験寸法(mm)	使用試験装置
①一方向載荷試験	防水層の基本的な摩擦抵抗特性を把握する。	建屋側面の構造を模擬した供試体を作成し、一方向載荷による一面せん断試験を実施する。	 <p>90 60</p>	一面せん断試験装置
②繰返し載荷試験	防水層への動摩擦特性を把握する。	建屋側面の構造を模擬した供試体を作成し、繰返し載荷による一面せん断試験を実施する。	 <p>90 60</p>	一面せん断試験装置
③スケール影響試験	摩擦面寸法の違いによるスケール影響を確認する。	西山モルタルと保護層を模擬した中型供試体を作成し、一方向載荷試験を実施する。	 <p>90 60</p>	一面せん断試験装置
		西山モルタルと保護層を模擬した大型供試体を作成し、一方向載荷試験を実施する。	 <p>270 270</p>	大型一面せん断試験装置

2.2 建屋側面構造の室内試験へのモデル化

実際に施工された建屋側面の構造は、図-2.2.1 に示すとおり、躯体（コンクリート）、防水シート、保護層、地盤（西山モルタル）からなる。

一方向載荷および繰返し載荷試験では上記の建屋側面の構造を模擬するため、図-2.2.2 に示すような供試体を製作する。

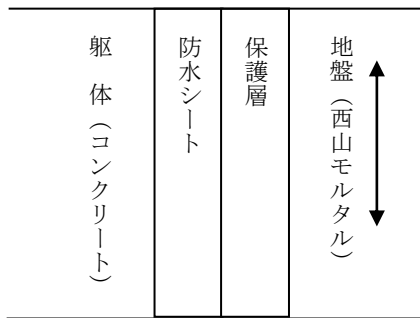


図-2.2.1 躯体～地盤間の構造

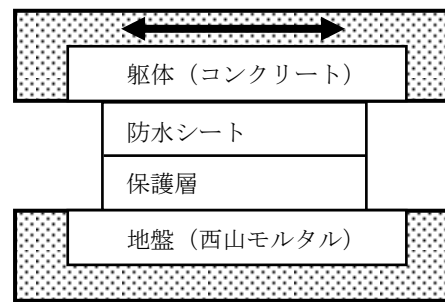


図-2.2.2 供試体（標準）

また、前述のとおりスケール影響試験の供試体は、西山モルタルと保護層のみを模擬した供試体とする。各試験に用いる供試体について、図-2.2.3 に示す。

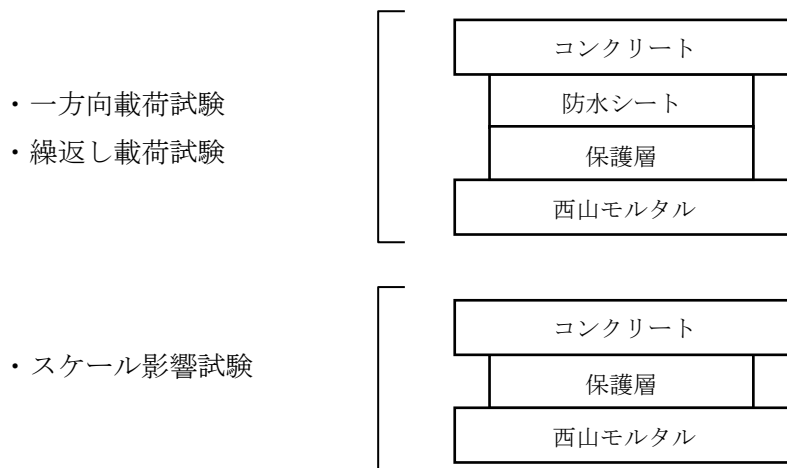


図-2.2.3 各試験に用いる供試体

保護層および防水シートは基本的には実機で用いられた材料を用いることとし、柏崎刈羽原子力発電所 6 号機で用いられた材料を調査した。調査した結果、対象となる材料が製造されていない場合は、同等品を用いた。

実機の調査結果および試験で用いることとした材料を整理して表-2.2.1 に示す。

表-2.2.1 実機材料の調査結果および試験に用いる材料

使用材料	6号機	試験に用いる材料	備考
1 プライマー	サンタックプライマー SR-200 〈早川ゴム(株)〉	サンタックプライマー SR-200 〈早川ゴム(株)〉	—
2 接着剤	サンタックボンド T 〈早川ゴム(株)〉	サンタックボンド PB-50 〈早川ゴム(株)〉	実機と同製品は製造していないので同等品を使用
3 1層目シート	サンタックルーフ R-400 t=1.5mm 〈早川ゴム(株)〉	サンタックルーフ TY-400 t=2.0mm 〈早川ゴム(株)〉	—
4 接着剤	サンタックボンド T 〈早川ゴム(株)〉	サンタックボンド PB-50 〈早川ゴム(株)〉	実機と同製品は製造していないので同等品を使用
5 2層目シート	サンタックルーフ TY-400 t=1.5mm 〈早川ゴム(株)〉	サンタックルーフ TY-400 t=1.5mm 〈早川ゴム(株)〉	—
6 接着剤	水性ボンド 〈(株)エイ・アール・センター〉	水性ボンド 〈化研マテリアル株)〉	実機と同製品は製造していないので他メーカーの同等品を使用
7 保護層	テラタイトプロテクター+ホリエチレンフォーム t=7mm 〈奥山化工業(株)〉	テラタイトプロテクター+ホリエチレンフォーム t=6mm 〈奥山化工業(株)〉	t=7mm は製造していないので t=6mm を使用

2.3 試験装置

試験装置の仕様を表-2.3.1 に、試験装置を図-2.3.1～図-2.3.4、写真-2.3.1～写真-2.3.2 に示す。

表-2.3.1 試験装置の仕様

試験装置名称	最大供試体寸法 (mm)	加力方法	最大変位 (mm)
一面せん断 試験装置	縦 70×横 120	静的加力 動的加力（繰返し加力）	20
大型一面せん断 試験装置	縦 300×横 300	静的加力	50

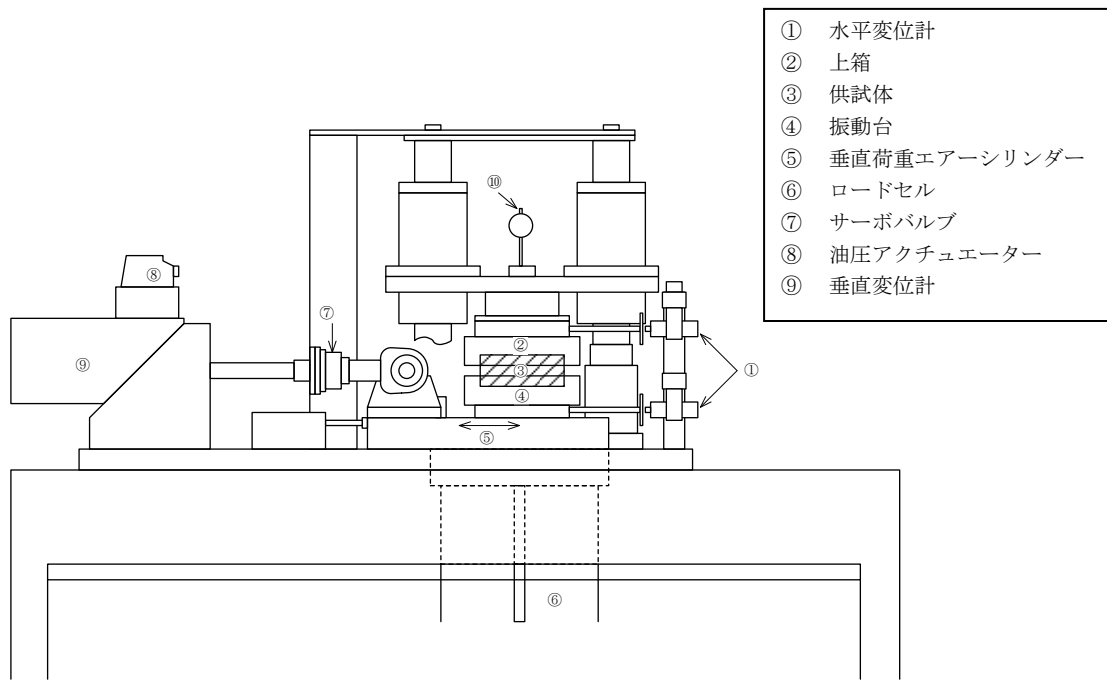


図-2.3.1 一面せん断試験装置

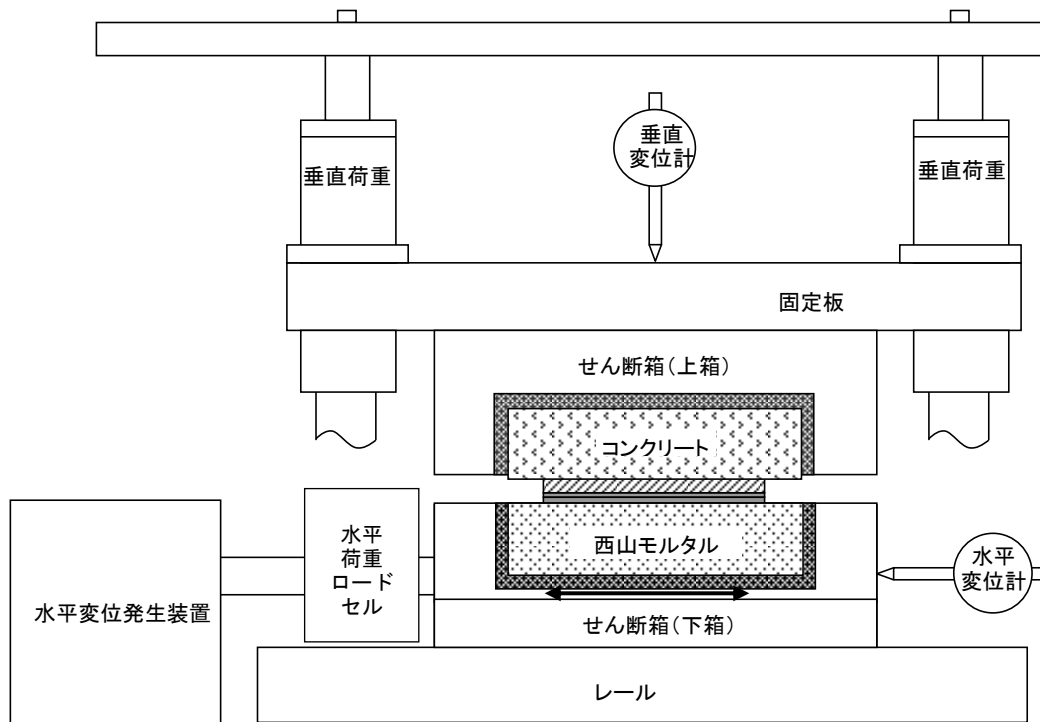
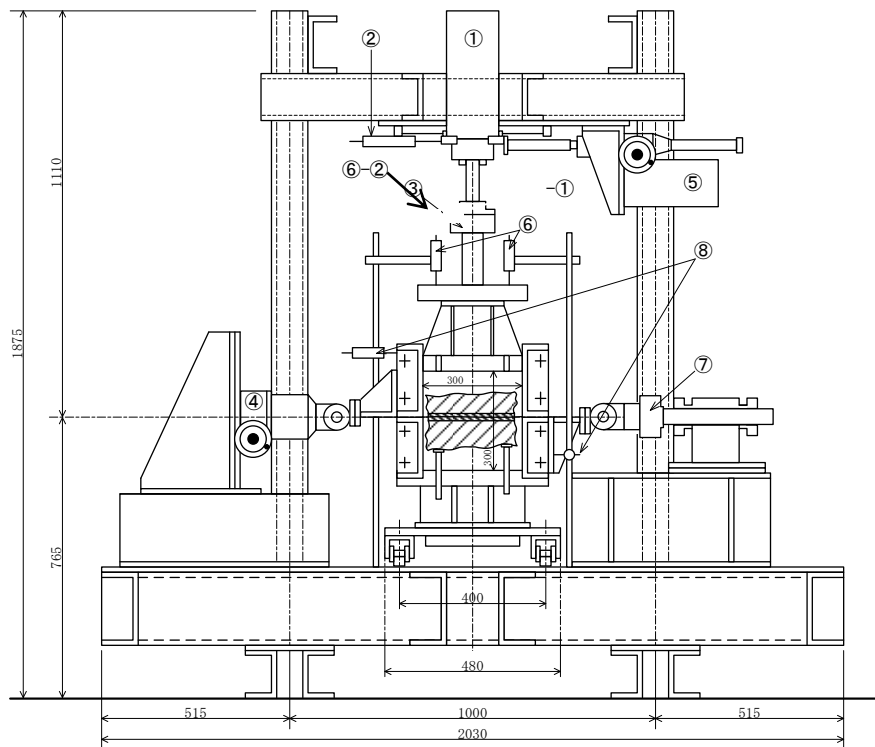


図-2.3.2 一面せん断試験装置 (詳細図)



写真-2.3.1 一面せん断試験装置全景



- | | | |
|--------------|--------------|--------------|
| ①垂直载荷油圧シリンダー | ③垂直荷重ロードセル | ⑤垂直荷重点移動ジャッキ |
| ②力点水平変位計 | ④水平载荷サーボジャッキ | ⑥垂直変位計 |
| ⑦水平荷重検出器 | ⑧水平方向変位計 | |

図-2.3.3 大型一面せん断試験装置

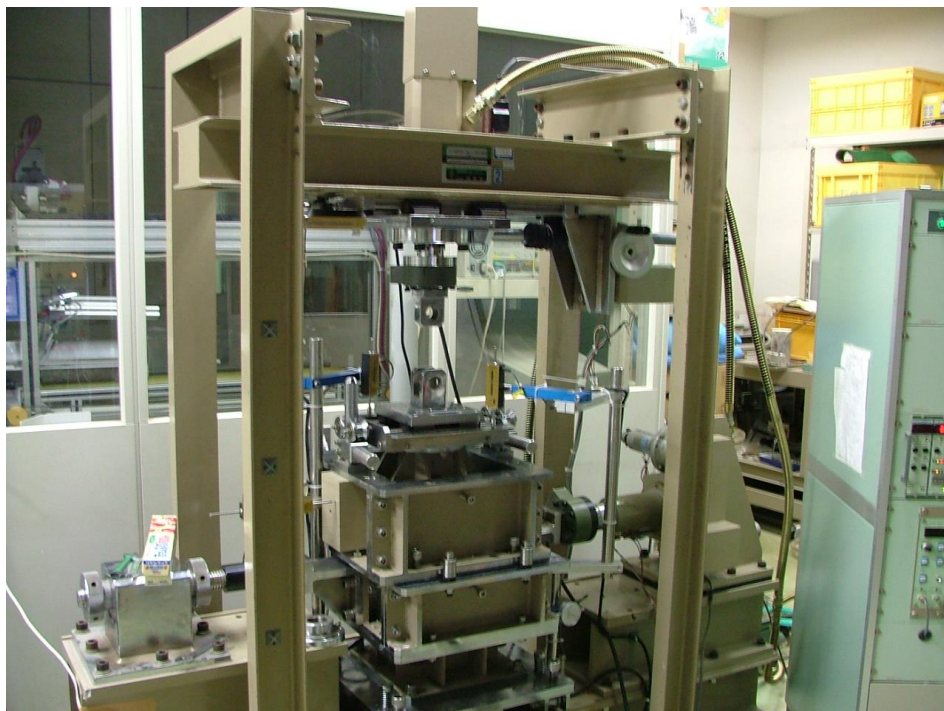


写真-2.3.2 大型一面せん断試験装置全景

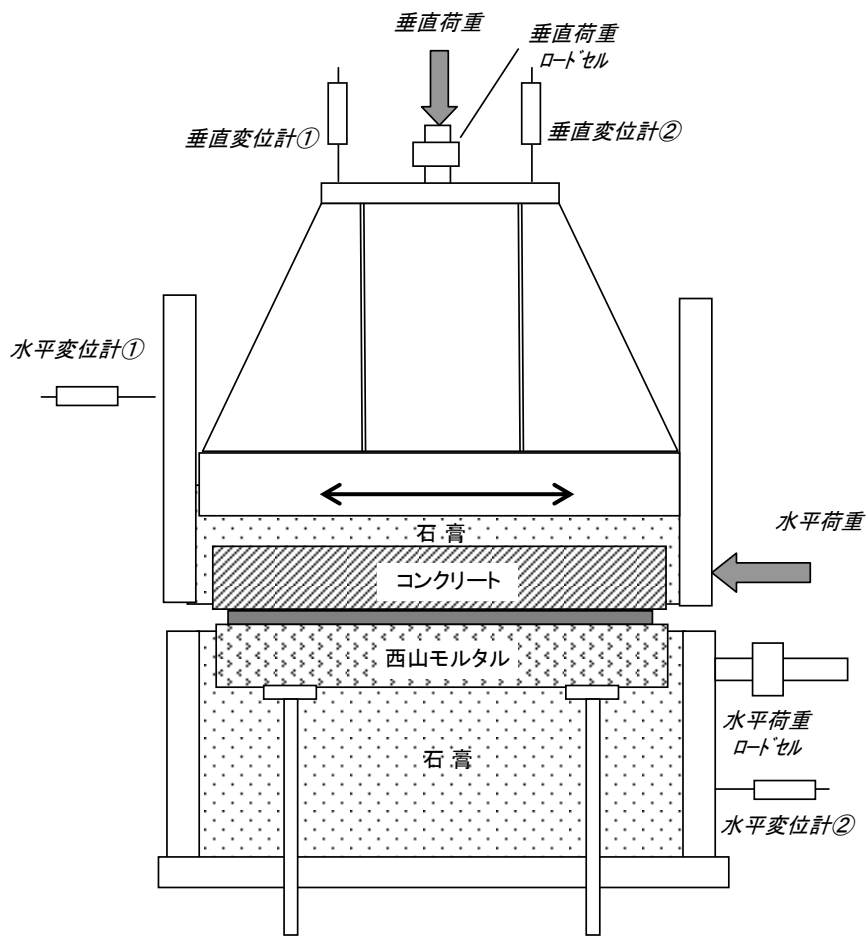


図-2.3.4 大型一面せん断試験装置概念図

3. 一方向載荷および繰返し載荷試験

3.1 目的

一方向載荷および繰返し載荷試験の2種類の動的試験を行うことで、建屋-側面地盤の境界部に防水層が存在する場合の静止摩擦抵抗～動摩擦抵抗状態に至る一連の基本的な摩擦特性および地震時の繰返し条件を想定した場合の動摩擦特性の確認を目的とする。

3.2 試験ケース

一方向載荷および繰返し載荷試験の試験ケースを表-3.2.1に示す。

なお、原子炉建屋の埋込み深さは約25mであり、常時土圧は～250kN/m²程度である。この常時土圧を参考に、地震時の動土圧による増分を考慮して試験に用いる垂直圧を、100kN/m²～600kN/m²と設定した。

表-3.2.1 一方向載荷および繰返し載荷試験ケース

ケース	加力方法	供試体サイズ (mm)	垂直圧 (kN/m ²)
1-1	一方向載荷	幅 60× 加力方向 90	100
1-2			200
1-3			400
1-4			600
1-5	繰返し載荷		100
1-6			200
1-7			400
1-8			600

3.3 供試体

供試体は、実機の状態を模擬できるように実機の方法仕様あるいは同等品を用い、さらに保護層に西山モルタルを打設して製作する。

供試体を図-3.3.1に示す。

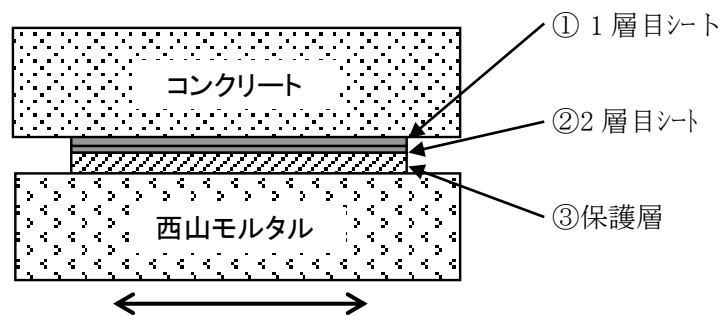


図-3.3.1 一方向荷重および繰返し荷重試験供試体

3.4 試験結果

3.4.1 一方向載荷試験結果

(1) せん断応力-せん断変位関係

試験結果一覧を表-3.4.1.1に、せん断応力-せん断変位関係を図-3.4.1.1に示す。

- ① 静止摩擦耐力に相当する最大せん断応力は 125~317kN/m²で、垂直圧に概ね比例した値を示した。
- ② いずれの試験においても最大せん断応力を過ぎると摩擦すべりが発生し、荷重が低下し、動摩擦抵抗状態に移行した。
- ③ 動摩擦耐力は、変位量約 15mm 以上まで安定的に保持された。

表-3.4.1.1 一方向載荷試験 試験結果一覧

試験 No.	垂直圧 (kN/m ²)	最大せん断応力 (kN/m ²)	せん断変位 (mm)
1-1	100	125	4.1
1-2	200	181	4.9
1-3	400	236	5.4
1-4	600	317	7.4

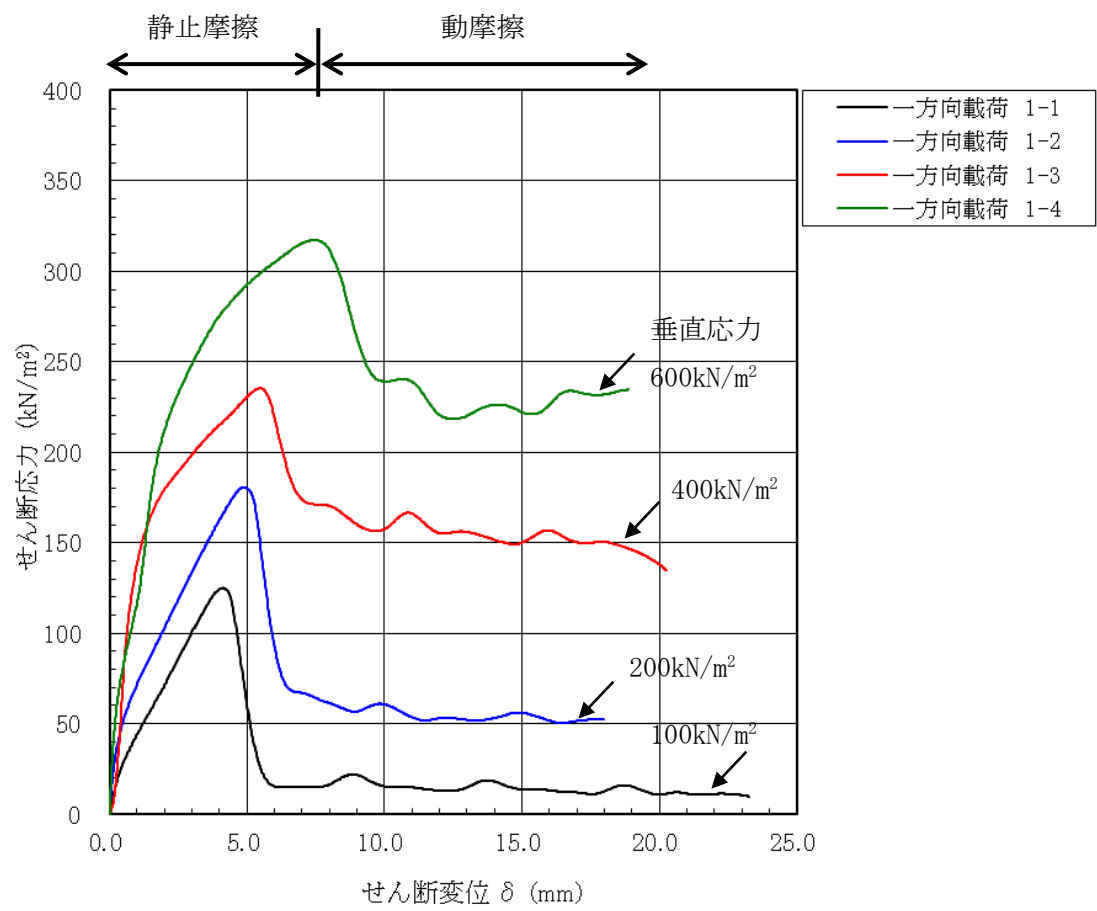


図-3.4.1.1 一方向載荷試験 せん断応力—せん断変位関係

(2) 試験後の状況

試験後の供試体の状況を写真-3.4.1.1～写真-3.4.1.8に示す。

摩擦すべりは、全試験において保護層と西山モルタルの間で生じており、保護層と防水シート間および防水シートとコンクリート間の接着部でのすべりや損傷は認められなかった。

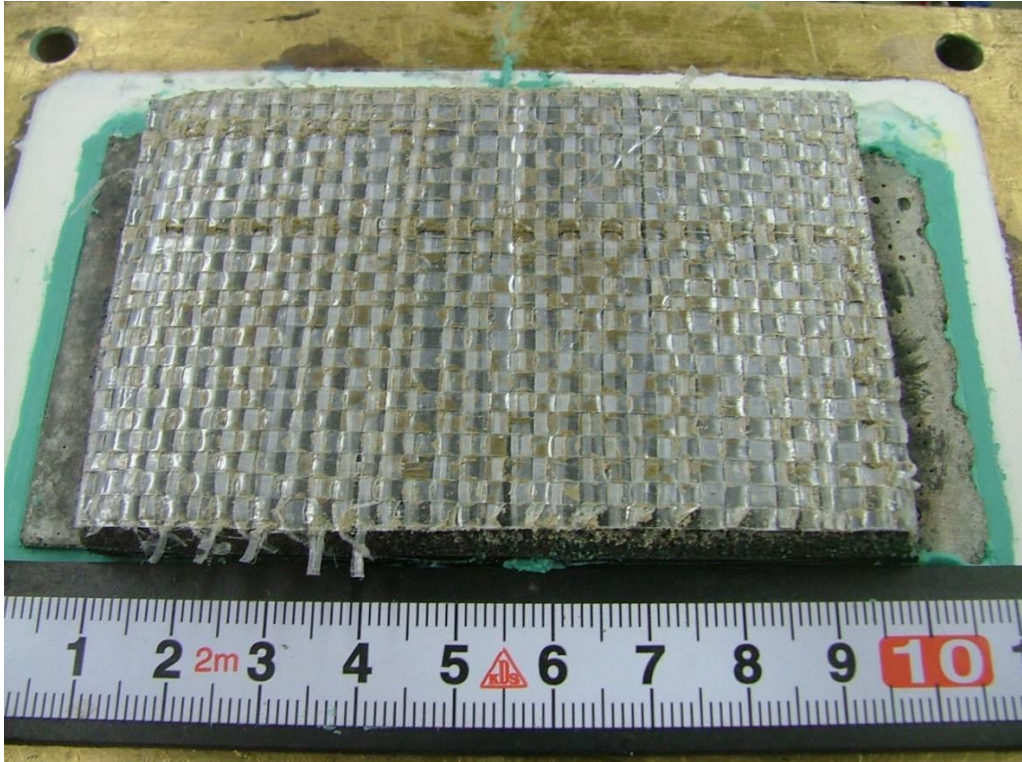


写真-3.4.1.1 一方向載荷試験 一方向載荷試験後の供試体状況
ケース 1-1 (保護層表面)

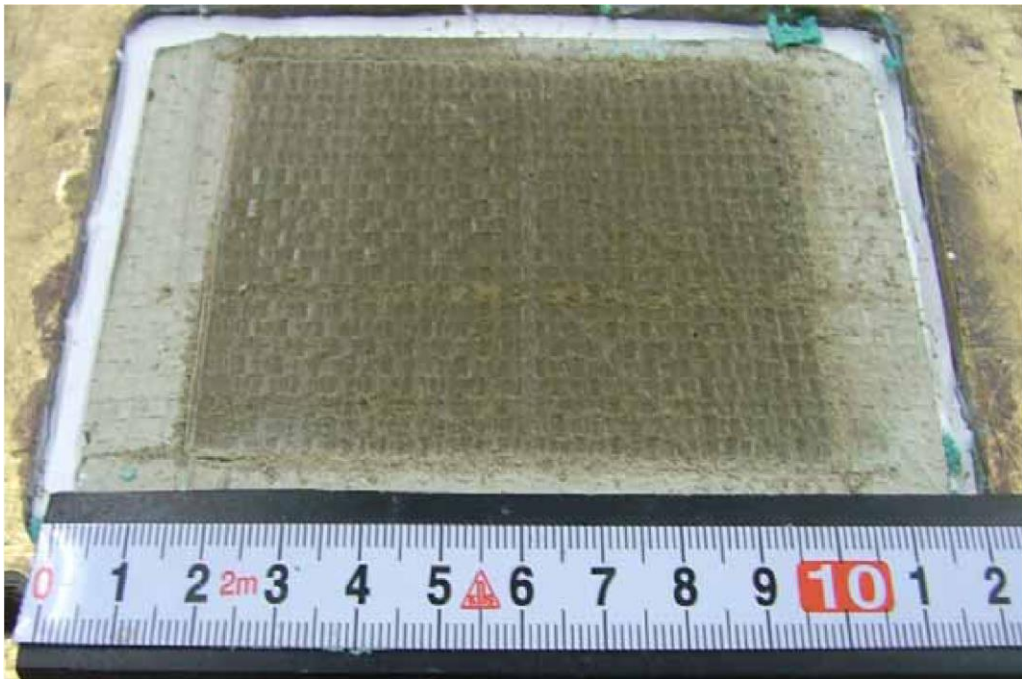


写真-3.4.1.2 一方向載荷試験 一方向載荷試験後の供試体状況
ケース 1-1 (西山モルタル表面)

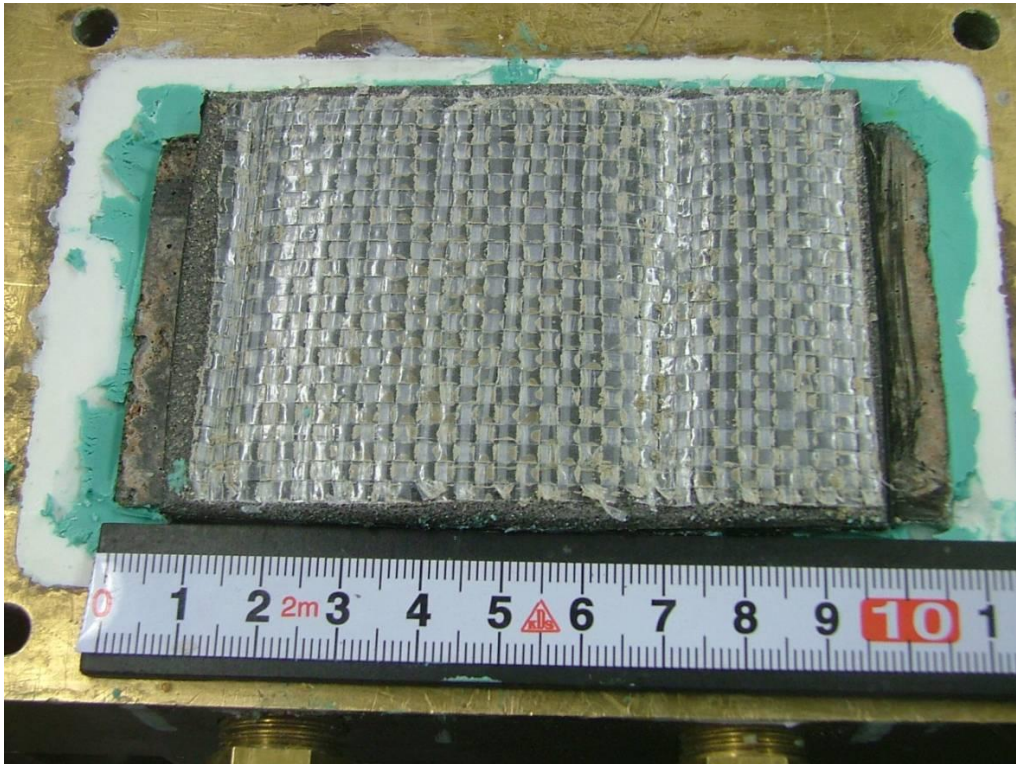


写真-3.4.1.3 一方向載荷試験 一方向載荷試験後の供試体状況
ケース 1-2 (保護層表面)

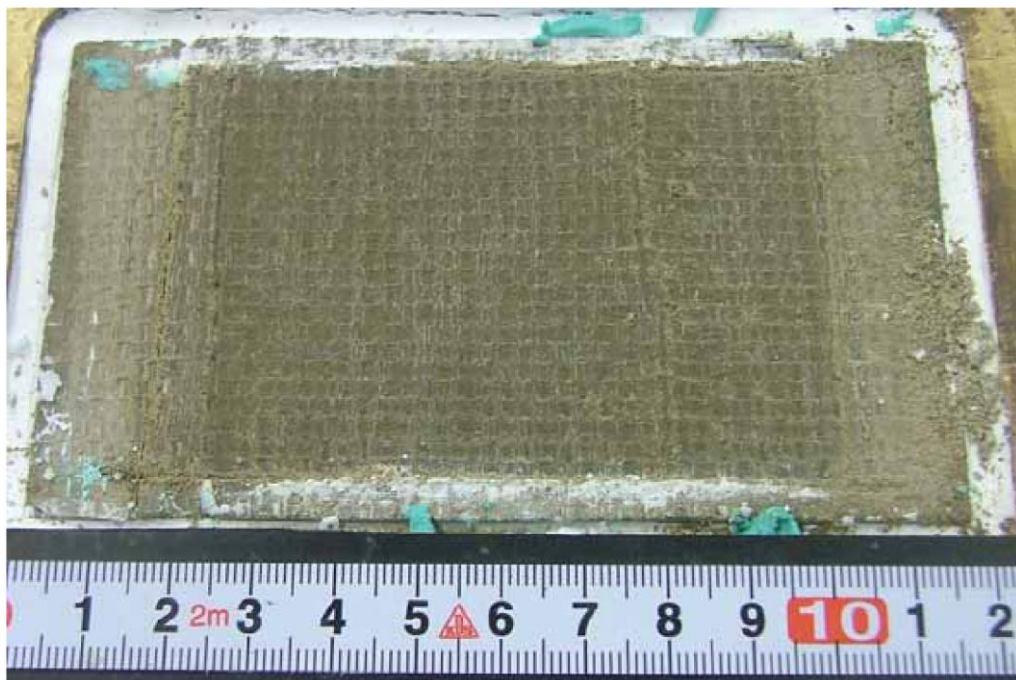


写真-3.4.1.4 一方向載荷試験 一方向載荷試験後の供試体状況
ケース 1-2 (西山モルタル表面)

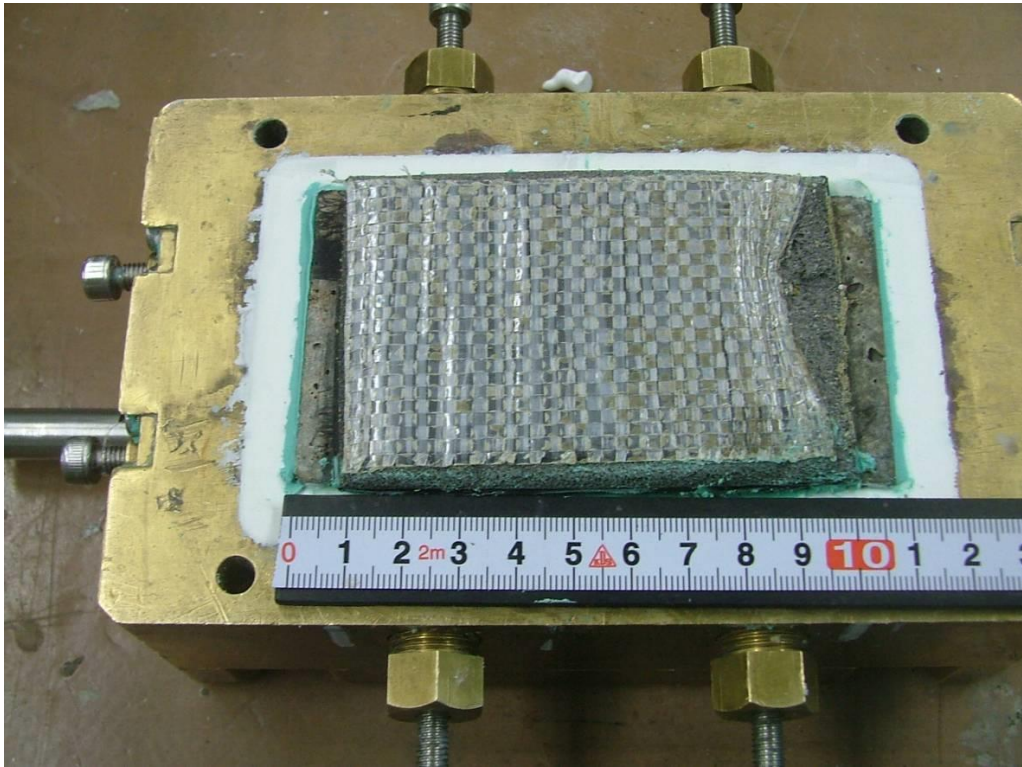


写真-3.4.1.5 一方向載荷試験 一方向載荷試験後の供試体状況
ケース 1-3 (保護層表面)

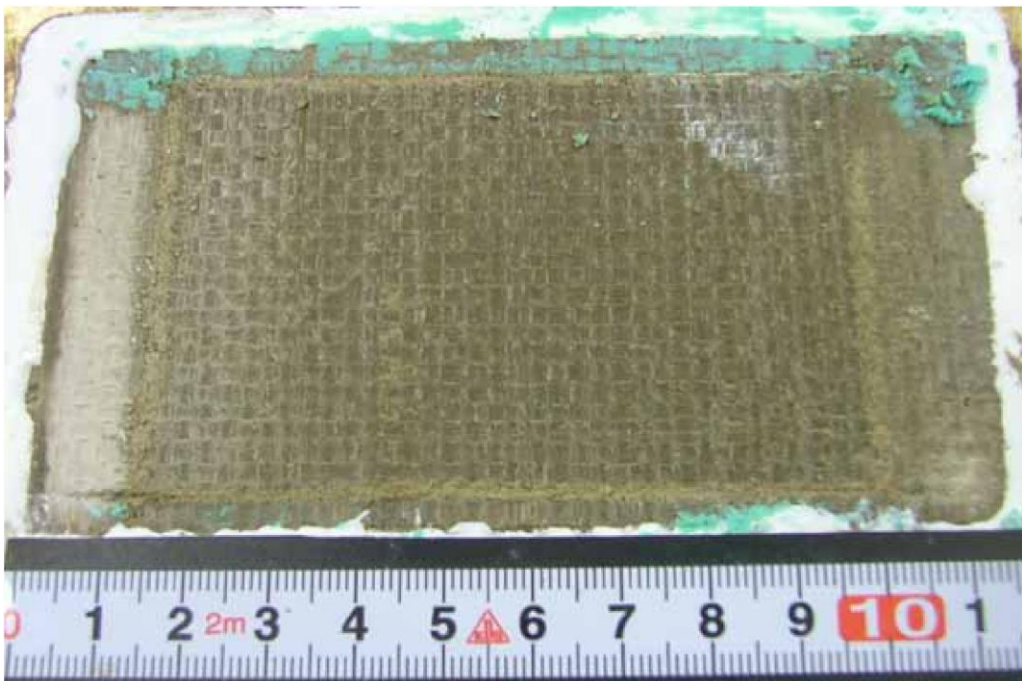


写真-3.4.1.6 一方向載荷試験 一方向載荷試験後の供試体状況
ケース 1-3 (西山モルタル表面)

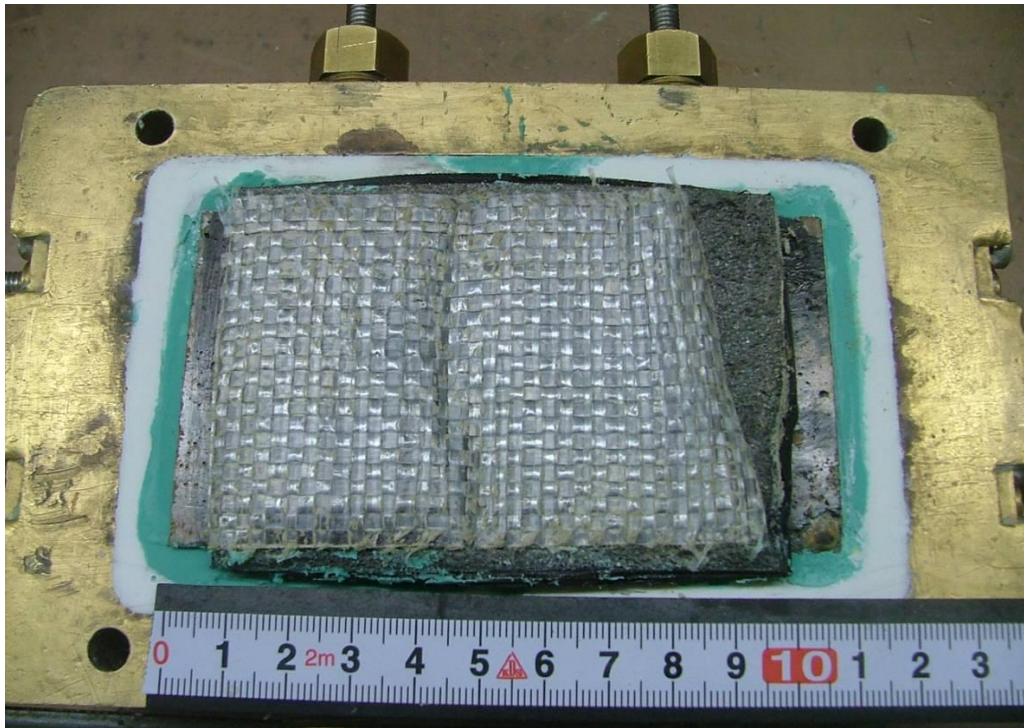


写真-3.4.1.7 一方向載荷試験 一方向載荷試験後の供試体状況
ケース 1-4 (保護層表面)

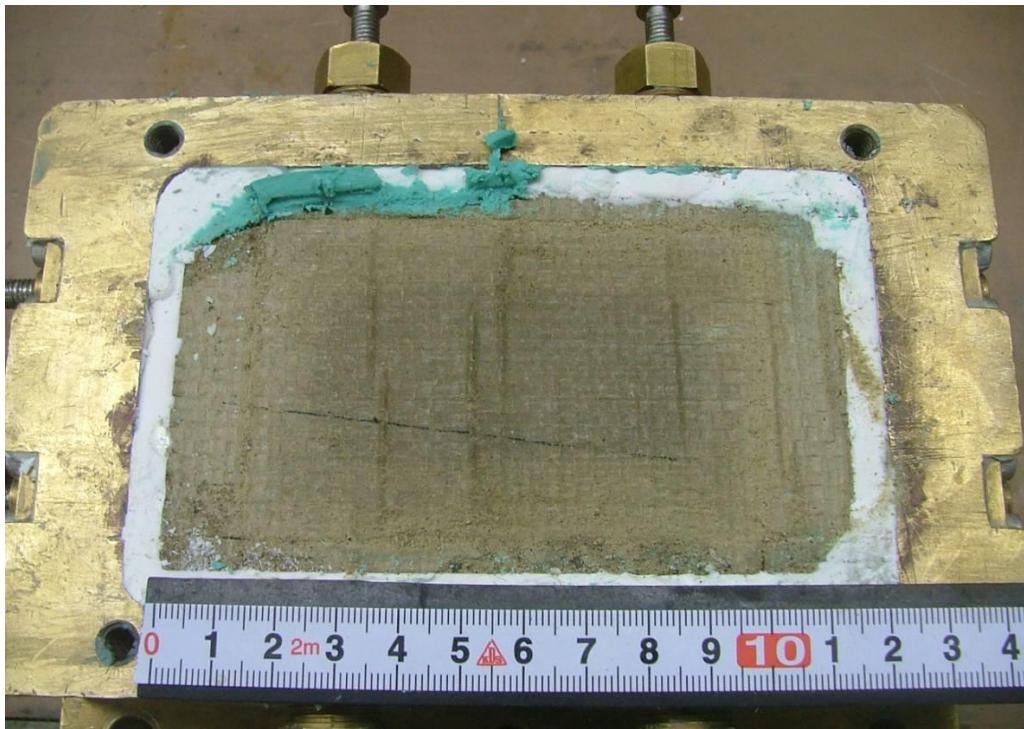


写真-3.4.1.8 一方向載荷試験 一方向載荷試験後の供試体状況
ケース 1-4 (西山モルタル表面)

3.4.2 繰返し載荷試験結果

(1) せん断応力-せん断変位関係

試験結果一覧を表3.4.2.1に、せん断応力-せん断変位関係を図-3.4.2.1に示す。

なお、繰返し載荷試験におけるせん断応力については、ピーク値を記録する段階までを静摩擦が働く領域と定義し、ピーク値以降でせん断応力が低下した段階を動摩擦が働く領域と定義した。したがって、最大せん断応力を評価する場合は静止摩擦による値として試験結果を整理し、残留せん断応力を評価する場合は動摩擦による値として試験結果を整理した。

- ① 静止摩擦領域，静止摩擦→動摩擦移行領域，動摩擦領域のいずれの領域においても，安定した荷重変形ループを示した。
- ② 図-3.4.1.1 に示した一方向載荷試験のせん断応力-せん断変位関係と比較すると，静止摩擦耐力に相当する最大せん断応力および動摩擦耐力は若干向上する傾向が見られた。

表-3.4.2.1 繰返し載荷試験 試験結果一覧

試験 No.	垂直圧 (kN/m ²)	最大せん断応力 (kN/m ²)	せん断変位*1 (mm)
1-5	100	136	3.3
1-6	200	164	3.9
1-7	400	236	4.2
1-8	600	363	4.5

*1 最大せん断応力を示した時のせん断変位

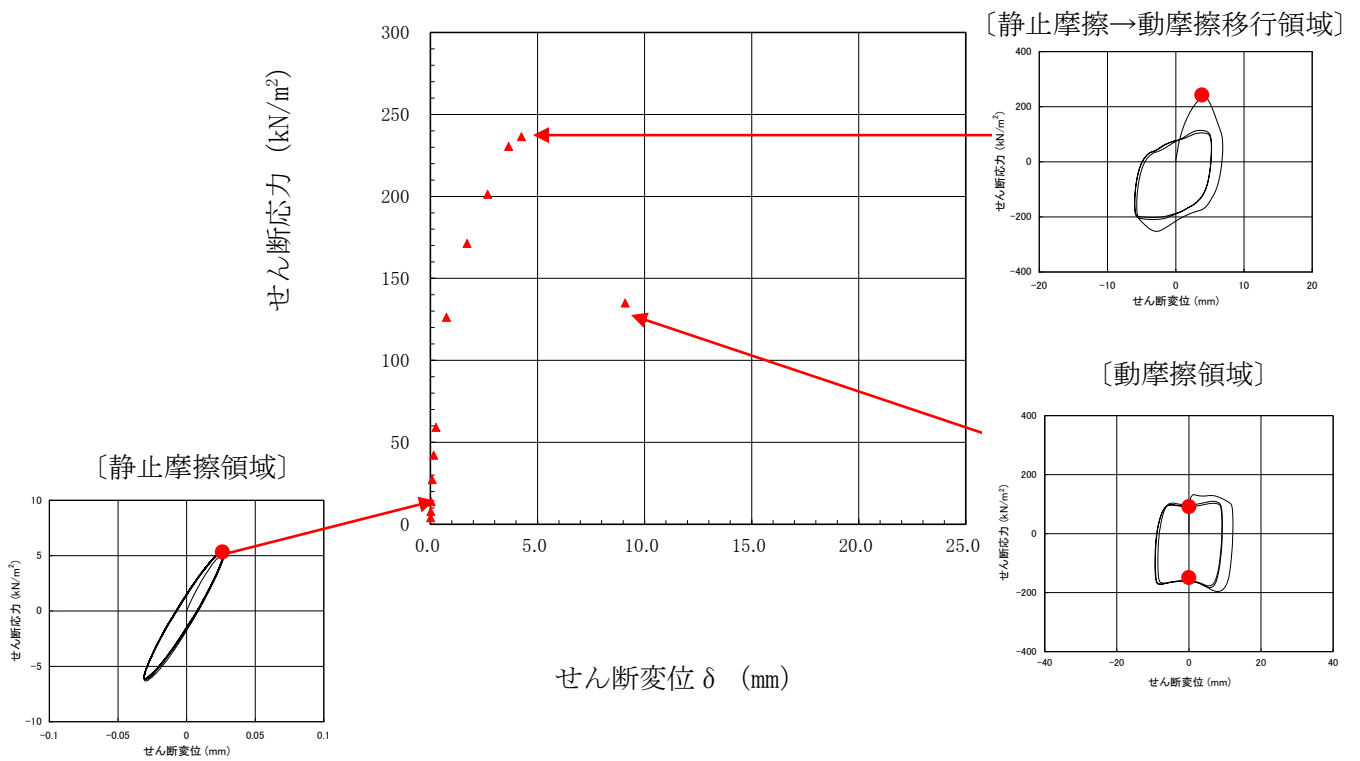


図-3.4.2.1 繰返し載荷試験 せん断応力-せん断変位関係 (試験ケース 1-7 の例)

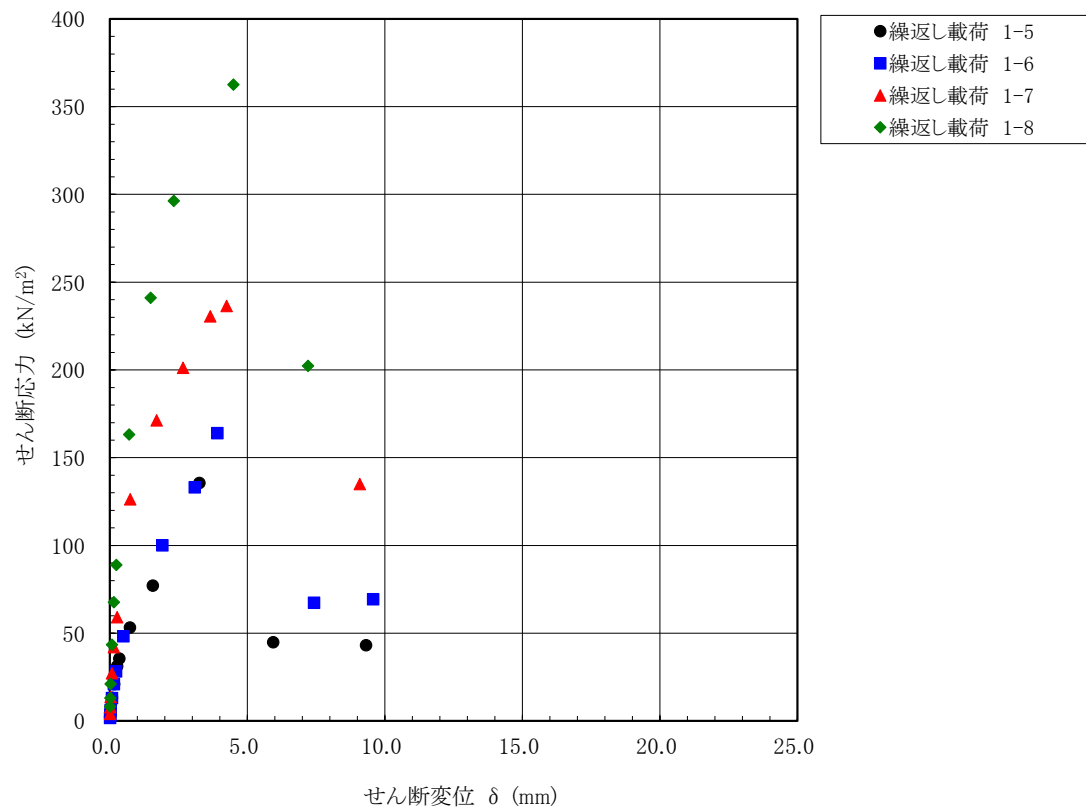


図-3.4.2.2 繰返し载荷試験 せん断応力-せん断変位関係 (全試験ケース 1-5~1-8)

(4) 試験後の状況

試験後の供試体の状況を写真-3.4.2.1～写真-3.4.2.8に示す。

一方向載荷試験と同様、繰返し載荷試験の摩擦すべりは、全試験において保護層と西山モルタルの間で生じており、保護層と防水シート間および防水シートとコンクリート間の接着部でのすべりや損傷は認められなかった。

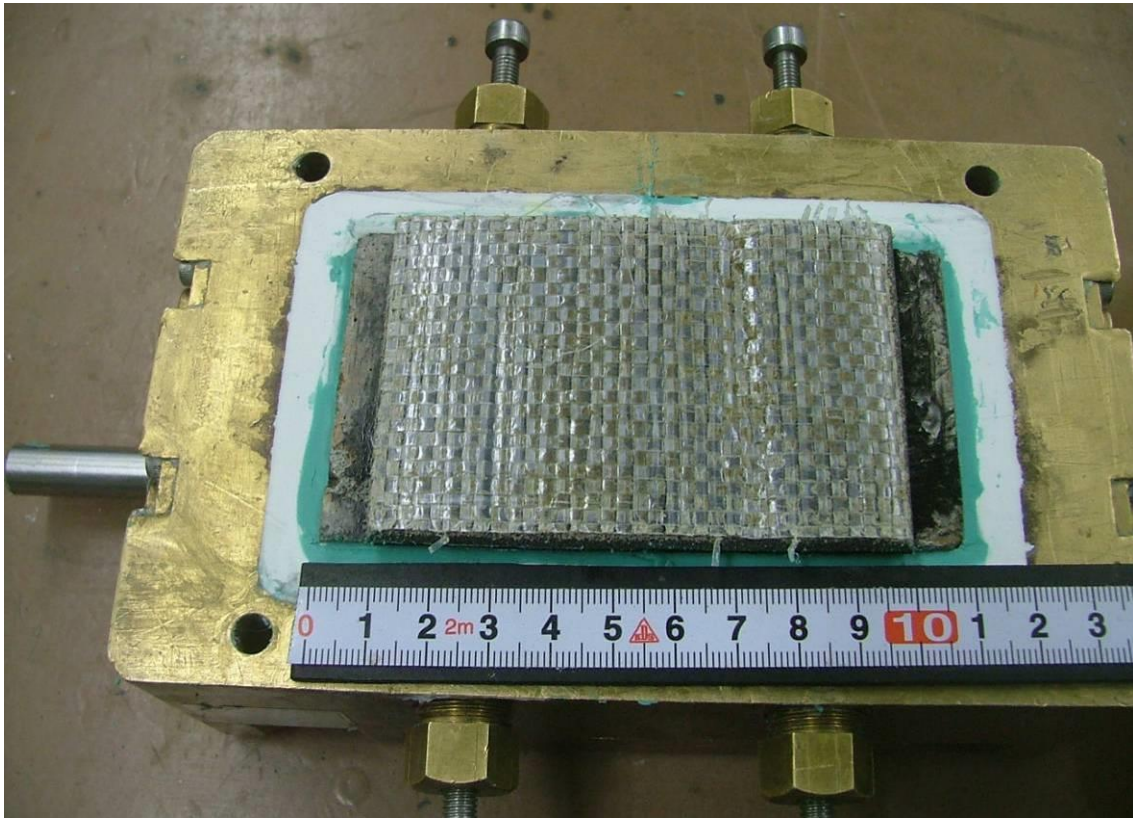


写真-3.4.2.1 繰返し荷重試験 試験後の供試体状況 ケース 1-5 (保護層表面)

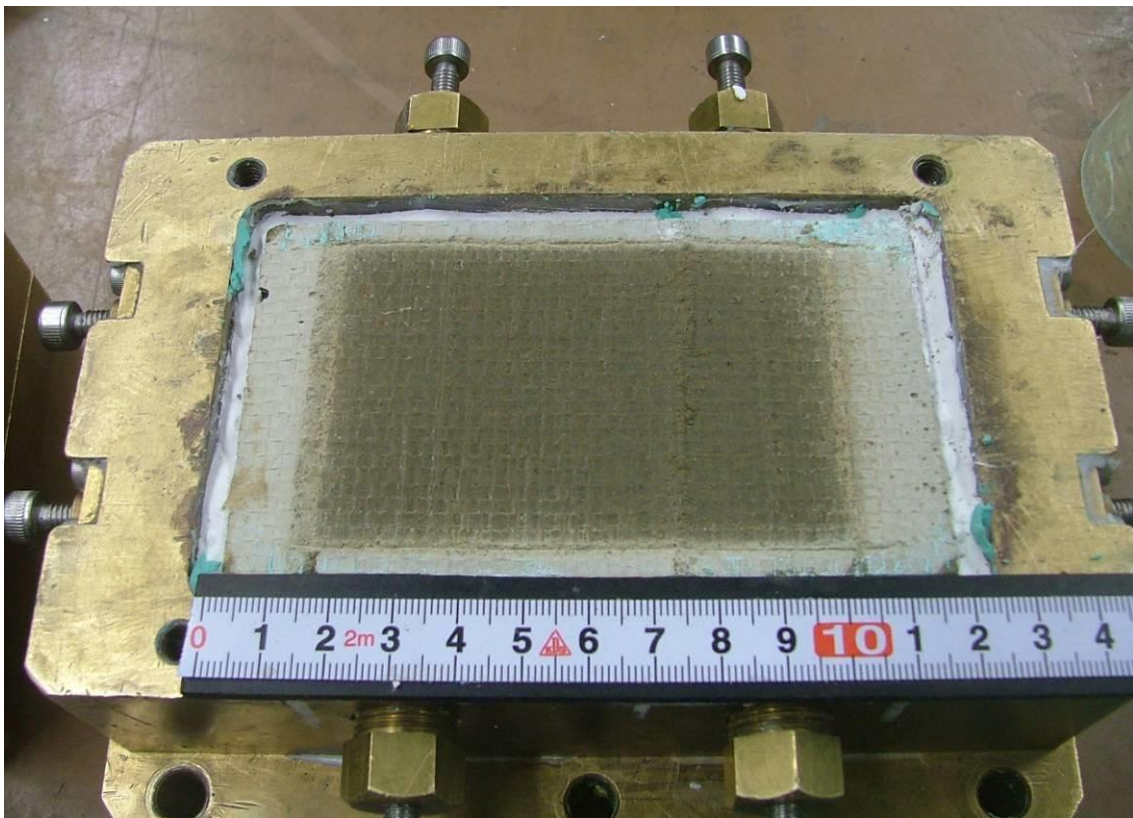


写真-3.4.2.2 繰返し荷重試験 試験後の供試体状況 ケース 1-5 (西山モルタル表面)

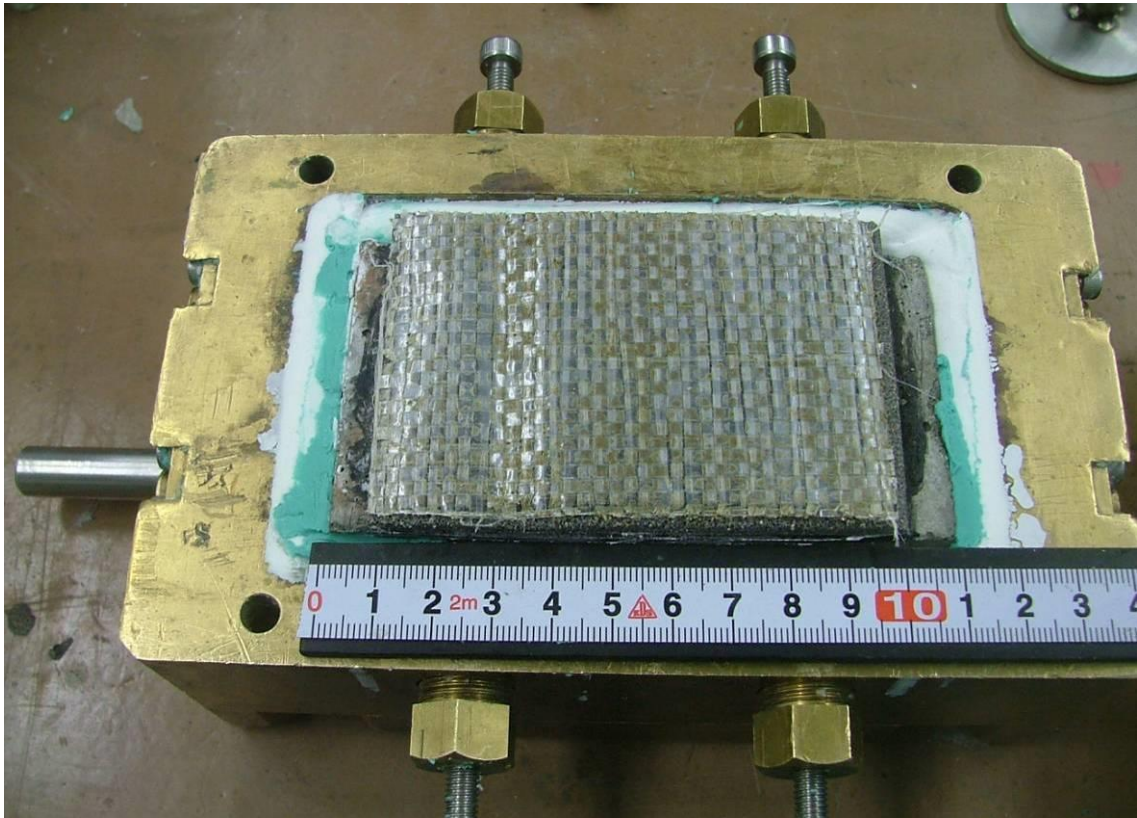


写真-3.4.2.3 繰返し载荷試験 試験後の供試体状況 ケース 1-6 (保護層表面)

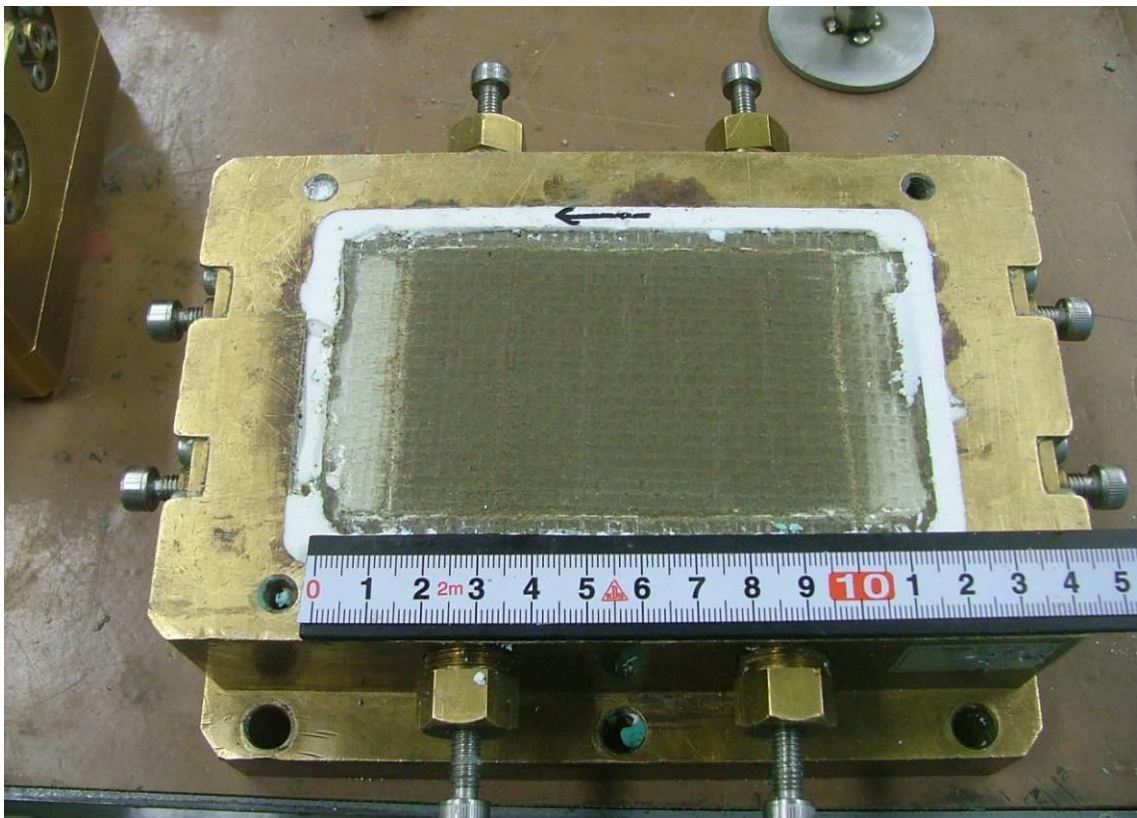


写真-3.4.2.4 繰返し载荷試験 試験後の供試体状況 ケース 1-6 (西山モルタル表面)

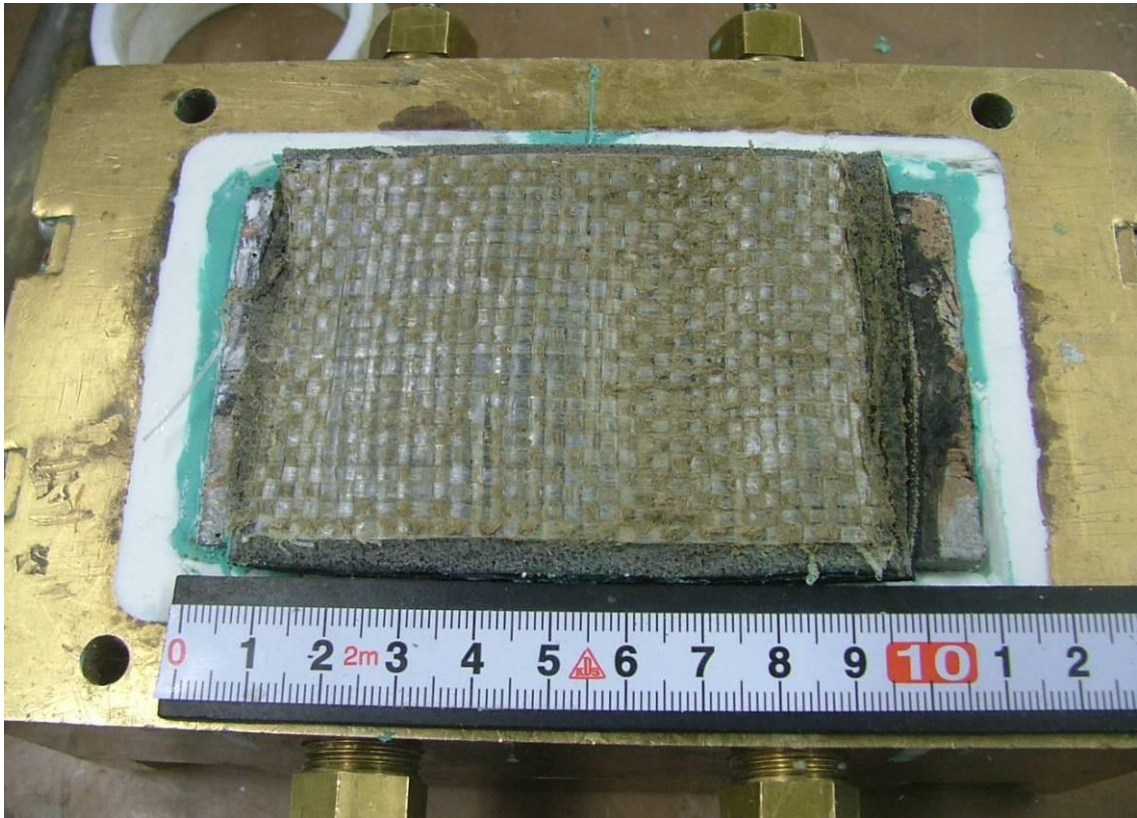


写真-3.4.2.5 繰返し載荷試験 試験後の供試体状況 ケース 1-7 (保護層表面)

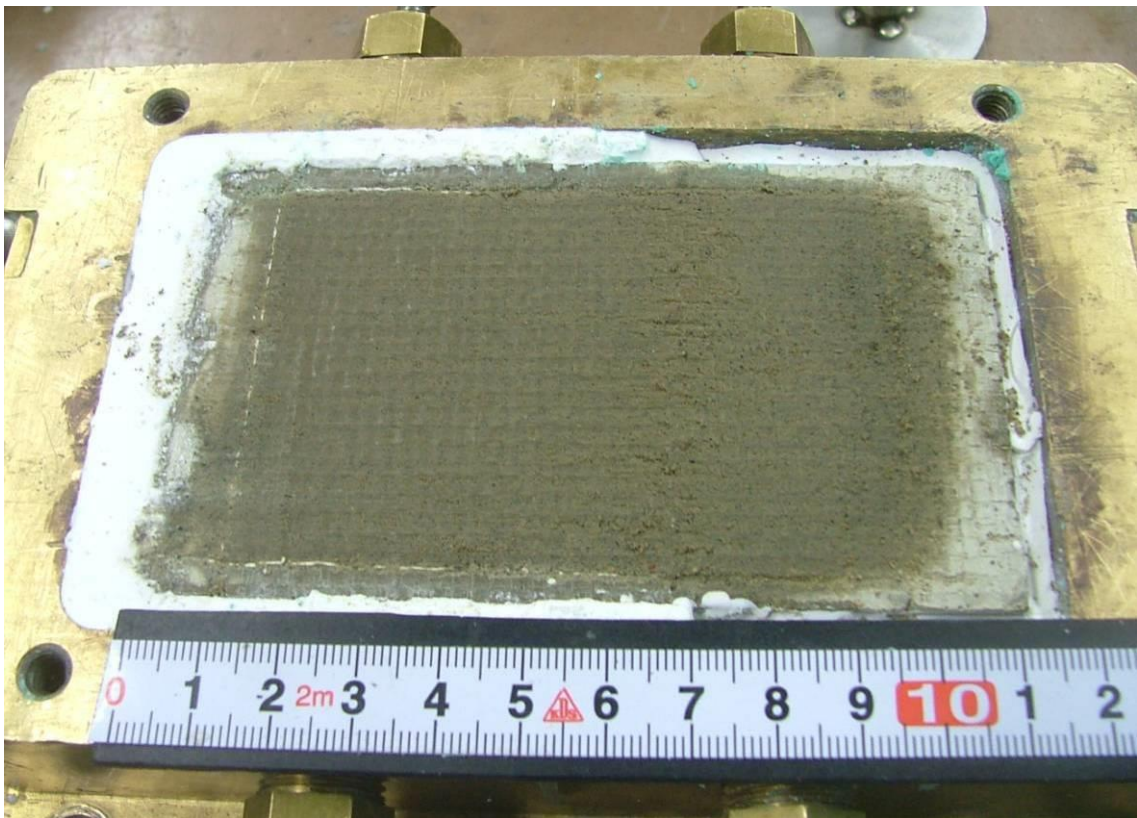


写真-3.4.2.6 繰返し載荷試験 試験後の供試体状況 ケース 1-7 (西山モルタル表面)

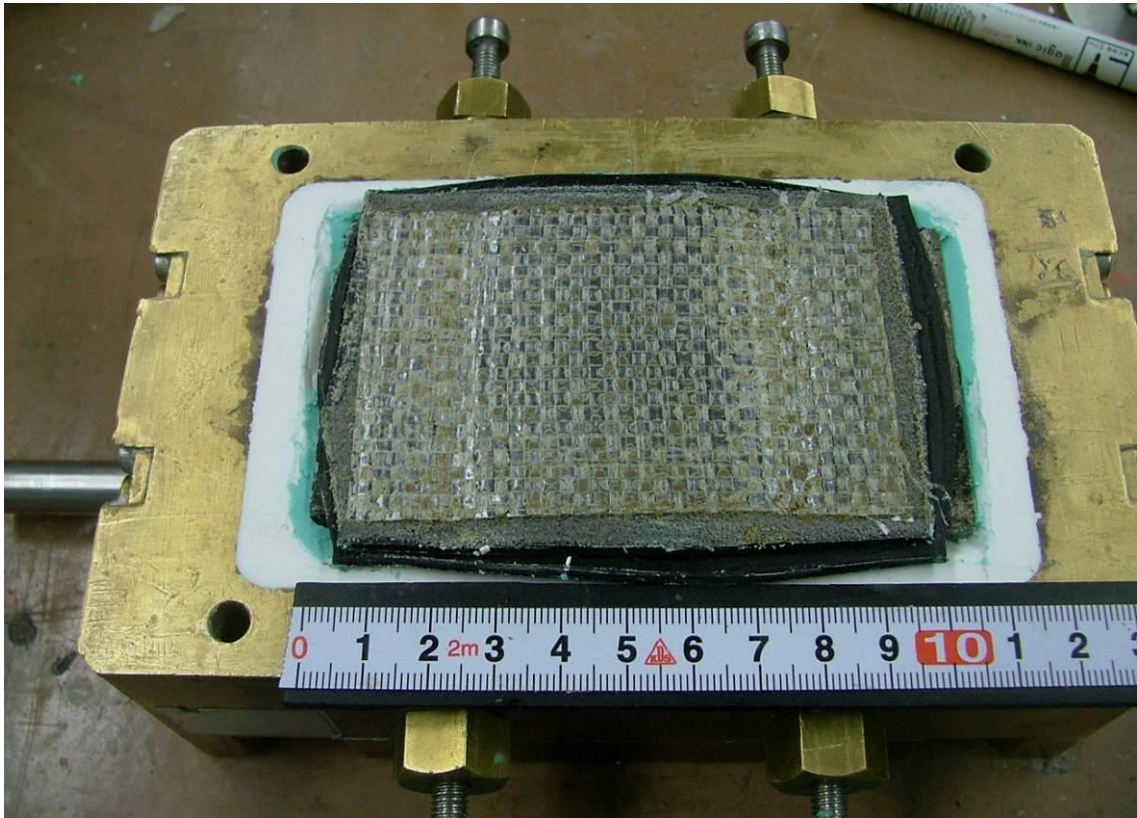


写真-3.4.2.7 繰返し荷重試験 試験後の供試体状況 ケース 1-8 (保護層表面)

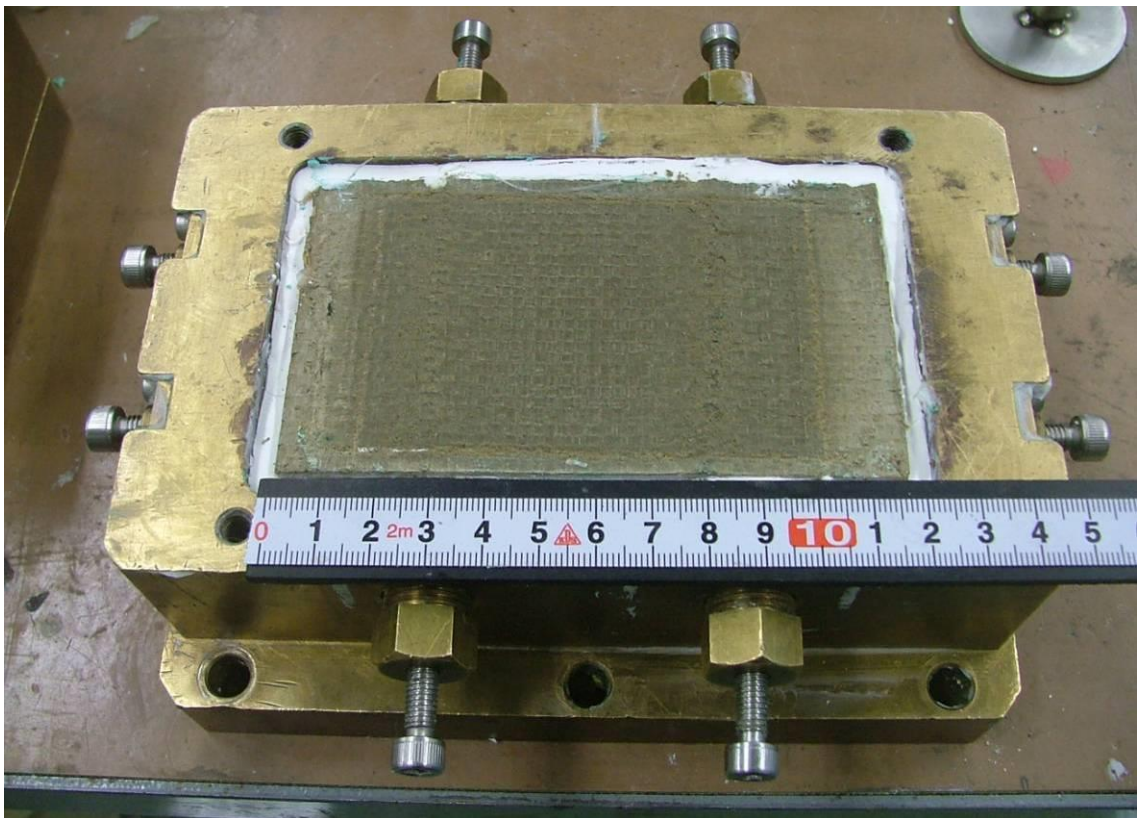


写真-3.4.2.8 繰返し荷重試験 試験後の供試体状況 ケース 1-8 (西山モルタル表面)

3.5 試験結果の評価

図-3.5.1 に、一方向載荷試験 4 ケースおよび繰返し試験 4 ケースのせん断応力とせん断変位の関係を重ね描いたものを示す。

平均的な摩擦特性（摩擦ばね定数および動摩擦係数）を分析するために、下記の評価点を設定し（図-3.5.2 参照）、摩擦ばね定数（＝評価点のせん断応力／評価点のせん断変位）および動摩擦係数（＝評価点のせん断応力／垂直圧）を求めた結果を表-3.5.1 に示す。

- ・摩擦ばね定数の評価点

一方向載荷試験及び繰返し載荷試験結果における最大せん断応力を示す点で評価した。

- ・動摩擦係数の評価点

一方向載荷試験及び繰返し載荷試験結果におけるせん断応力がピーク後に安定化（残留せん断応力）した時点で評価した。ただし、一方向載荷試験においては残留せん断応力を与える変位を 15mm と定義し、繰返し載荷試験においては、安定化したループ上で、変位=0mm における点の平均値で評価した。

摩擦ばね定数と垂直圧の相関関係を図-3.5.3 に示す。摩擦ばね定数は、これらの結果の平均値として評価して、以下の値を採用する。

$$\text{(摩擦ばね定数)} \quad K_s = 4.67 \times 10^4 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

ただし、垂直圧の変動に対して、摩擦ばね定数は最大 8.06×10^4 (kN/m²) ～最小 3.03×10^4 (kN/m²) とばらついていることから、摩擦ばね定数のばらつきの影響について解析により確認する。

動摩擦耐力と垂直圧の相関関係を図-3.5.4 に示す。垂直圧が増加すると動摩擦耐力は概ね比例して増加する。動摩擦耐力を垂直圧で除した動摩擦係数は概ね一定値と見なせると考え、最小二乗法により動摩擦係数の近似値を求めると以下となる。

$$\text{(動摩擦係数)} \quad \mu_d = 0.35$$

$$\text{(動摩擦耐力)} \quad \tau_d = \text{動摩擦係数 } \mu_d \times \text{垂直圧 } \sigma_v \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

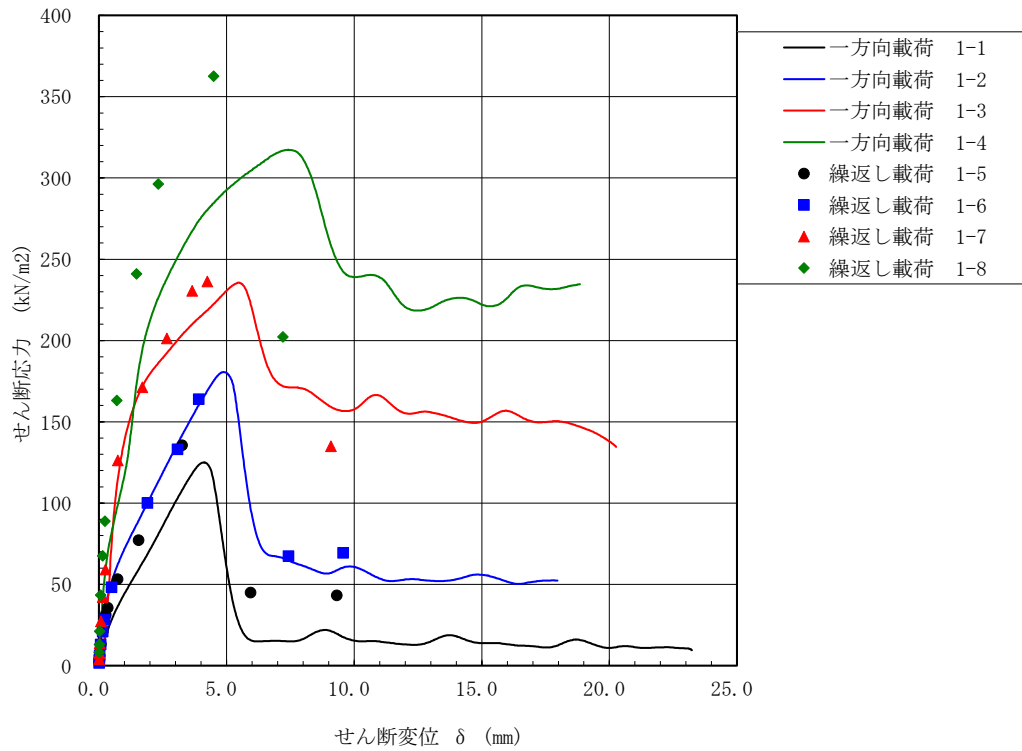


図-3.5.1 一方向載荷および繰返し載荷試験によるせん断応力-せん断変位関係

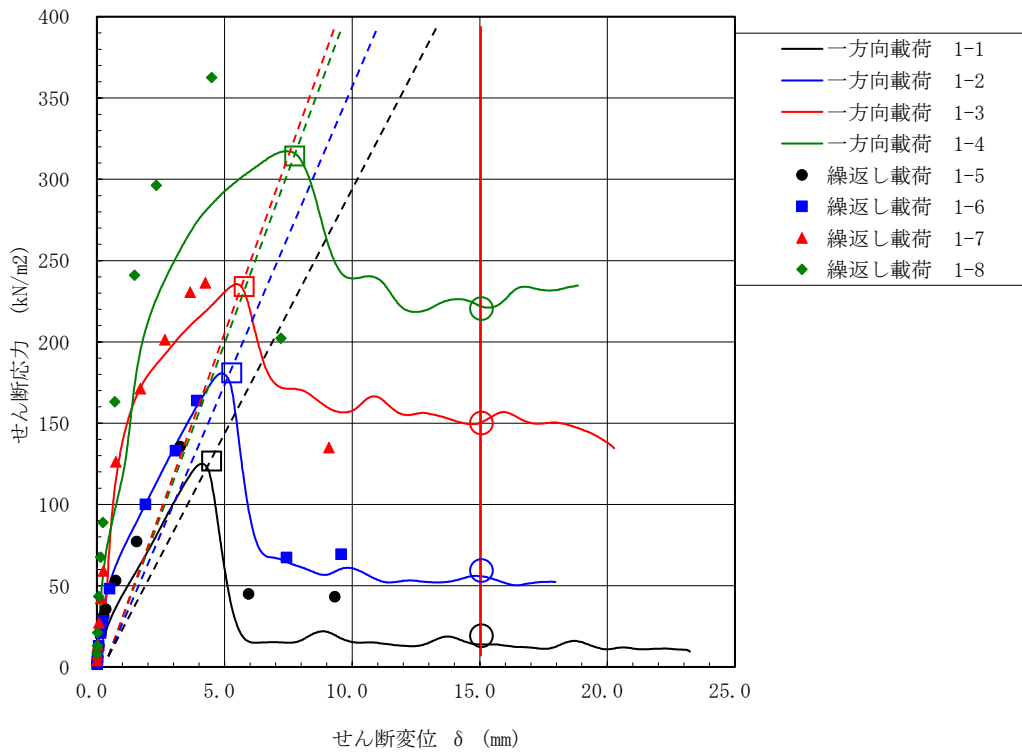


図-3.5.2 摩擦ばね定数および動摩擦係数の評価点

表-3.5.1 試験結果による摩擦ばね定数と動摩擦係数

試験ケース	垂直圧 A kN/m ²	最大 せん断応力 B kN/m ²	最大せん断応力時の 最大せん断変位 C mm	最大せん断応力/ せん断変位 B/C kN/m	残留 せん断応力 D kN/m ²	動摩擦係数 B/A	
一方向載荷	1-1	100	125	4.1	3.03.E+04	14	0.14
	1-2	200	181	4.9	3.71.E+04	56	0.28
	1-3	400	236	5.4	4.33.E+04	150	0.38
	1-4	600	317	7.4	4.28.E+04	222	0.37
繰返し載荷	1-5	100	136	3.3	4.16.E+04	43	0.43
	1-6	200	164	3.9	4.20.E+04	67	0.34
	1-7	400	236	4.2	5.57.E+04	135	0.34
	1-8	600	363	4.5	8.06.E+04	202	0.34

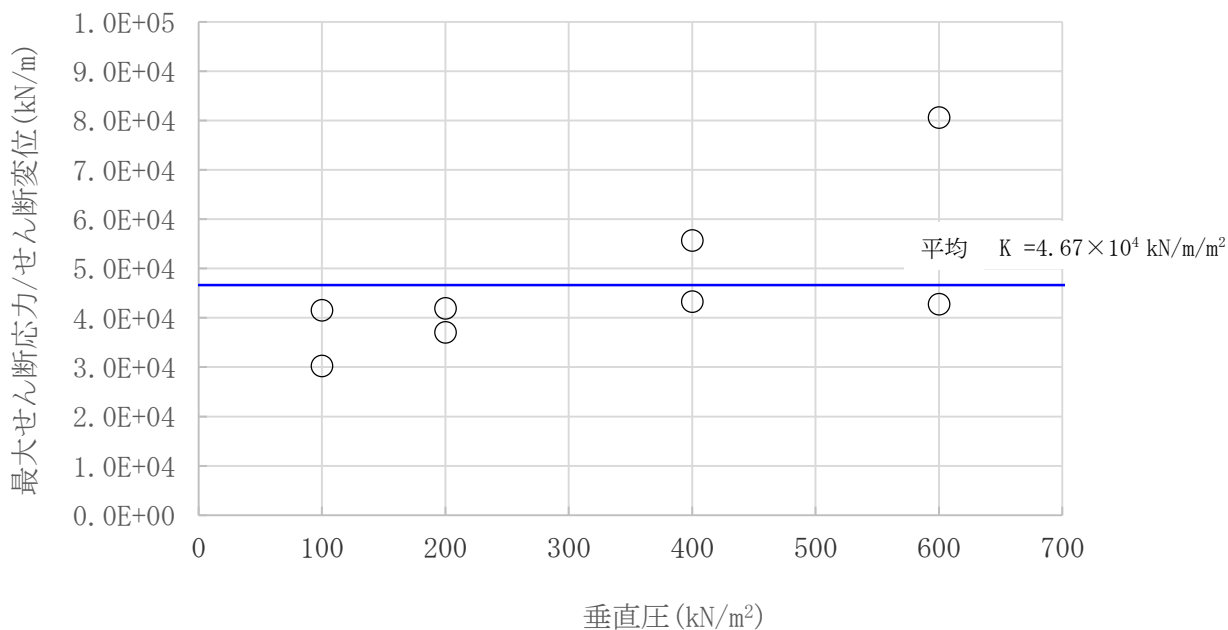


図-3.5.3 摩擦ばね定数と垂直圧の関係（一方向載荷および繰返し載荷試験）

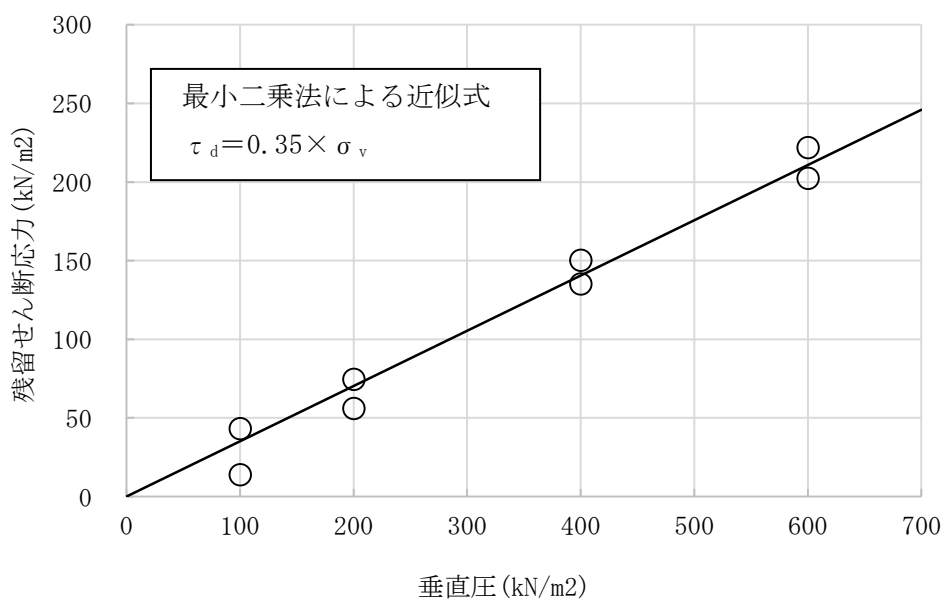


図-3.5.4 動摩擦耐力と垂直圧の関係（一方向載荷および繰返し載荷試験）

4. スケール影響試験

4.1 目的

大型一面せん断試験装置の可能な範囲で、摩擦面積が大きい供試体（中型：幅 60mm×加力方向 90mm，大型：幅 270mm×加力方向 270mm）による試験を行い、スケール影響を確認する。なお、試験装置の制約より前述の一方向載荷試験および繰返し載荷試験で行った動的載荷が行えないため、ここでは静的な一方向載荷によりスケール影響を確認した。

4.2 試験ケース

スケール影響試験ケースを表-4.2.1 に示す。

表-4.2.1 スケール影響試験ケース

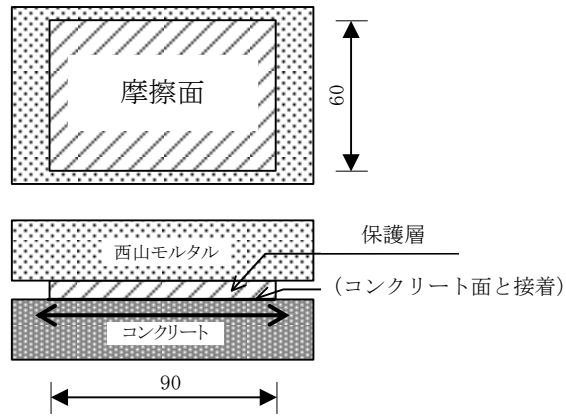
ケース	加力	供試体サイズ	垂直圧 (kN/m²)
2-1	一方向 載荷	幅 60mm× 加力方向 90mm	200
2-2			400
2-3			600
2-4		幅 270mm× 加力方向 270mm	200
2-5			400
2-6			600

4.3 供試体

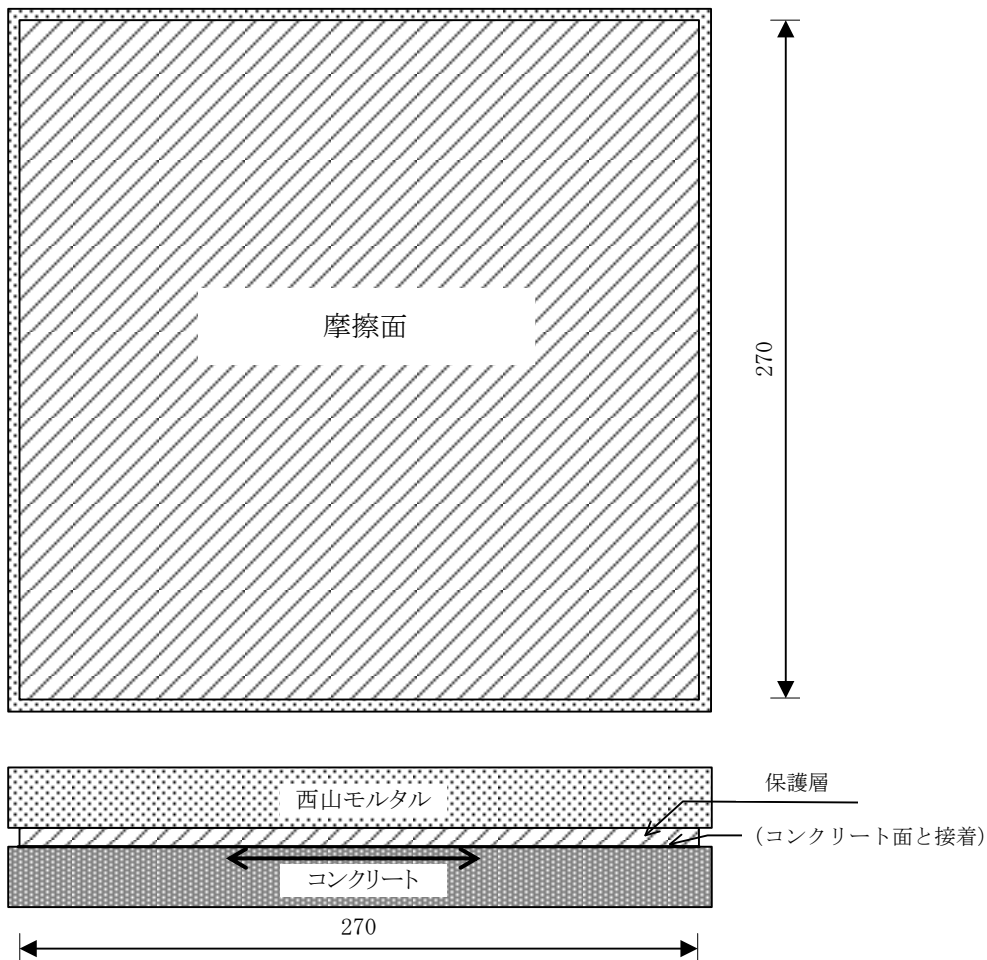
(1) 供試体

前述の一方方向荷重および繰返し荷重試験結果で滑り面が保護層と西山モルタルの間であることが確認されたことより、スケール影響試験試験の供試体は、西山モルタルと保護層のみを模擬した供試体とした。

供試体を図-4.3.1に示す。



(中型供試体)



(大型供試体)

図-4.3.1 スケール影響試験供試体

4.4 試験結果

せん断応力－せん断変位関係を図-4.4.1 に、試験結果一覧を表-4.4.1 に示す。同じ垂直圧条件での中型供試体と大型供試体の結果を比較すると、動摩擦状態に至るまでのせん断応力－せん断変位関係には多少差異が見られるものの、動摩擦耐力は概ね一致することが確認でき、顕著なスケール影響は認められなかった。

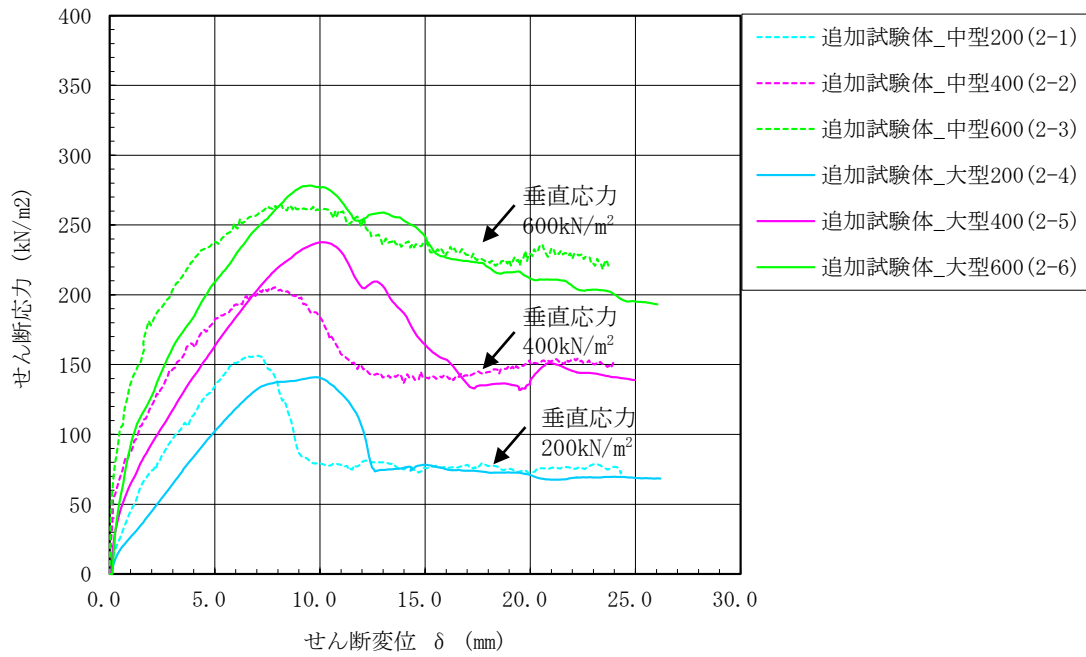


図-4.4.1 スケール影響試験 せん断応力ーせん断変位関係

表-4.4.1 スケール影響試験 試験結果一覧表

試験ケース		垂直圧 A (kN/m ²)	最大 せん断応力 B (kN/m ²)	最大せん断応力 時のせん断変位 C (mm)
中型 試験	2-1	200	156	7.0
	2-2	400	206	7.9
	2-3	600	265	8.2
大型 試験	2-4	200	141	9.8
	2-5	400	238	10.1
	2-6	600	278	9.5

5. 考察

実機地下外壁の防水仕様を模擬した各種摩擦試験（一方向載荷，繰返し載荷，スケール影響試験）を行い，防水層が存在する場合の建屋-側面地盤間の摩擦特性を確認した。その結果，以下の結論を得た。

(1) 防水層がある場合の防水層と地盤間の摩擦力伝達の可否

実験結果に基づき得られた以下の検討結果より，防水層が存在する場合の防水層と地盤間は安定した摩擦力伝達が可能と判断する。

- ① 防水層が存在する建屋-側面地盤間の摩擦力とせん断変位の関係（摩擦ばねの剛性）は，摩擦すべりが生じるまで安定した特性を有する。
- ② 摩擦すべりが生じると摩擦力は一旦低下するが，動摩擦状態にスムーズに移行し，安定した動摩擦耐力を維持する。
- ③ 地震時の繰返し条件を想定した場合においても安定した動摩擦耐力を保持する。
- ④ 摩擦面積の違いにより顕著な摩擦特性へのスケール影響は認められない。

(2) 防水層が存在する場合の防水層と地盤間の摩擦特性

論点②～論点④の検討に用いる FEM モデルにおいて予定する地下外壁と地盤間の摩擦を模擬したジョイント要素の条件として，実験結果より得られた以下の摩擦特性（図-5.1 参照）を用いることで，より実情に近い解析結果を得ることが可能と判断する。

- ① 摩擦ばね定数 $K_s = 4.67 \times 10^4$ (kN/m/m²)
- ② 動摩擦係数 $\mu_d = 0.35$
- ③ 動摩擦耐力 $\tau_d = \text{動摩擦係数 } \mu_d \times \text{垂直圧 } \sigma_v$ (kN/m²)

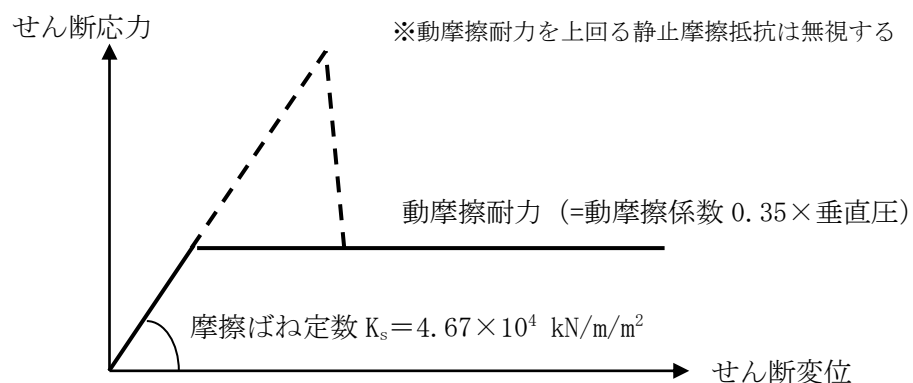


図-5.1 2次元 FEM 解析モデルで用いる地下外壁と地盤間の摩擦特性