

論文 強震時における鉄筋コンクリート基礎底面の滑動に関する加振実験

高山 洋平^{*1}・壁谷澤 寿一^{*2}・壁谷澤 寿海^{*3}・福山 洋^{*4}

要旨：建築物における鉄筋コンクリート基礎を模した試験体に対して正弦波を入力とする加振実験を行い、マットスラブと基礎底面間での滑動に伴う摩擦係数について検討を行った。滑動面詳細を実験因子とし、基礎底面をコンクリート、鋼板、SRF シートで構成した試験体各々に対して、マットスラブとの間に潤滑剤として二硫化モリブテンを挿入した計 4 通りの実験を行った。二硫化モリブテンを用いることで基礎底面がコンクリートの試験体で平均摩擦係数が約 0.04 と良好な滑動性能が得られ、摩擦係数が滑動面相対速度に概ね比例する傾向が見られた。

キーワード：基礎、摩擦係数、動的実験、速度依存性、入力逸散

1. はじめに

1995 年に発生した兵庫県南部地震や 2007 年の新潟県中越沖地震では最大加速度が 1G 程度に迫る大きな地動加速度が観測され、一部の鉄筋コンクリート構造に甚大な被害が生じた。一方で他の多くの建物で観測された被害の程度と比較して、推定される規模より小さな被害に留まった建築物も存在した。その理由の一つとして、建築物への実際の入力地震動が、地表面で観測された地動と比較して低減した可能性がある」と指摘されており、余震観測等で実証されている。

入力が低減する原因として周波数に依存する相互作用や建物基礎周りでの非線形入力逸散などが考えられる。非線形入力逸散をもたらす現象としては基礎底面でのすべり、杭や周辺地盤の弾塑性変形などが考えられる。この基礎入力逸散現象は設計としては安全側の現象であり、とくにコンクリート基礎底面での滑り挙動に関しては定量化して利用されることはないのが現状である。しかし、大加速度地震動に対しては基礎滑りにより、入力および上部構造の応答と損傷は大幅に低減しうることがある^{1),2)}。以上を踏まえ、過大な地震動に対してコンクリート基礎底面を滑らせることで入力逸散効果を得ることを意図し、基礎底面の詳細に基づく滑動性能の検証を目的として一連の実験^{1),3),4)}及び解析的検証²⁾がなされてきた。

本研究では潤滑剤として工学的分野で長年使用されてきた二硫化モリブテン（以下 MoS_2 ）を用いることで、従来のコンクリート基礎底面と比較してより良好で安定した滑動性能を得ることを意図した動的加振実験を行い、得られた実験結果から基礎底面詳細の状態に基づく摩擦係数及び復元力特性の性状に関する検討を行うことを目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本実験で使用した試験体の寸法及び配筋詳細を図-1 に、加振装置等を含む試験体設置状況を図-2 に示す。試験体は実施工でのマットスラブに相当する均しコンクリート部と独立基礎のフーチングに相当する基礎部を一对として用いる。加振時は振動台に固定した基礎部と、ロードセルを介して固定床に水平方向の変動を支持された均しコンクリート部との接触面間が滑動することで、地震時の基礎底面滑動現象を模擬している。軸力は錘と均しコンクリート部の自重により合計 117.88kN（12.03ton）を載荷し、基礎部の面圧は 336.8kN/m^2 である。軸力載荷用錘やロードセル等の実験用治具の収まりを考慮した結果、基礎部と均しコンクリート部の位置関係が実建築物とは上下逆になっている点に注意されたい。また、図-2 に示すロードセル両端のピン接合部には楔を挿入し回転及び水平方向の変動を拘束している。

基礎部及び均しコンクリート部の形状は全ての試験体でそれぞれ共通であり、滑動面寸法は基礎部が $700 \times 500\text{mm}$ で均しコンクリート部は $900 \times 1300\text{mm}$ である。基礎部及び均しコンクリート部はそれぞれ個別に打設し滑動面は金ごて仕上げとした。滑動時のコンクリートの損傷を抑制する目的で基礎部断面端に、直径 50mm のアール状面取り処理を施した。コンクリートの設計基準強度は均しコンクリート部が $\text{Fc}24$ 、基礎部が $\text{Fc}36$ であり、実強度は基礎部で 34.6N/mm^2 、均しコンクリート部で 36.2N/mm^2 となった。また基礎部の主筋及びせん断補強筋には、それぞれ、14-D16(SD295)と D16@150(SD295)を使用した。一方、均しコンクリート部は主筋が 8-D25(SD345)、せん断補強筋が D13@150(SD295)である。

*1 東京大学大学院 工学系研究科 修士課程 (学生会員)

*2 国土技術政策総合研究所 研究官 博士(工学) (正会員)

*3 東京大学地震研究所 教授 博士(工学) (正会員)

*4 独立行政法人建築研究所 構造研究グループ長 工博 (正会員)

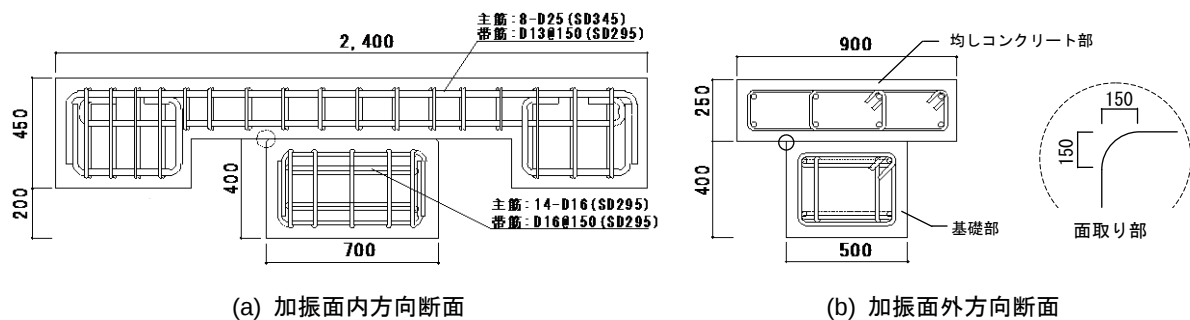


図-1 試験体寸法及び配筋図

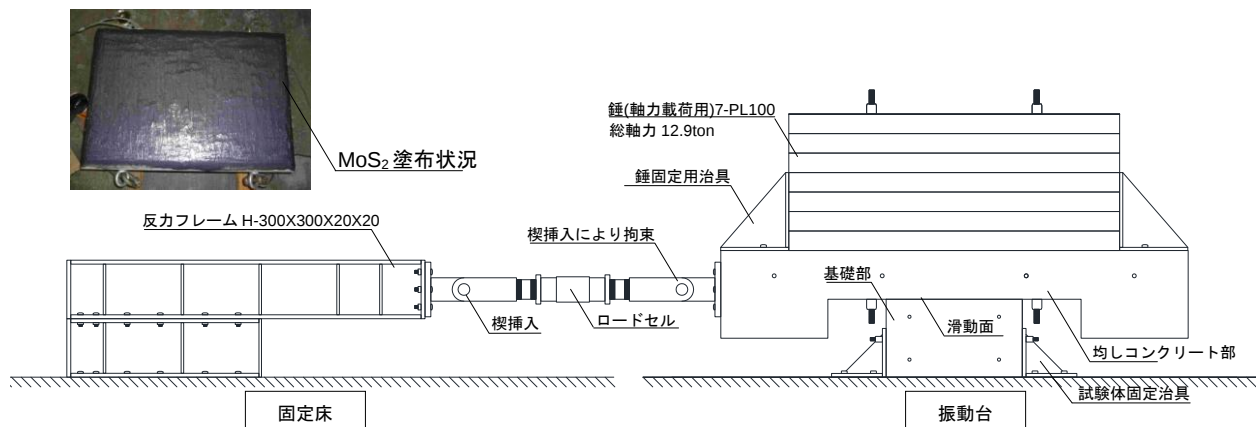


図-2 試験体設置概要図

表-1 試験体名と滑動面詳細一覧

試験体名	C-Mo	SRF-Mo	S-Mo	S
捨コン表面	コンクリート	コンクリート	コンクリート	コンクリート
基礎表面	コンクリート	SRF	鉄板	鉄板
滑動面処理	MoS ₂ 塗布	MoS ₂ 塗布	MoS ₂ 塗布	加工なし
概要				

表-2 コンクリート材料特性

	基礎部 (FC24)	捨コン部 (Fc36)
割裂強度	100kN	103kN
圧縮強度	34.6N/mm ²	36.2N/mm ²
歪み	1.78%	1.37%
ヤング係数	19.5kN/mm ²	26.5kN/mm ²

表-3 鋼板(SS400)材料特性

引張強度	降伏強度	伸び
456N/mm ²	329N/mm ²	28%

表-4 SRF シート材料特性

単位面積質量	894g/m ²
厚さ	1.21mm
縦破断強度	572N/mm ²
横破断強度	54N/mm ²
縦破断時伸び率	10.77%
横破断時伸び率	14.23%
縦1%伸長時の引張強さ	94N/mm ²
横1%伸長時の引張強さ	6.2N/mm ²

表-5 MoS₂ グリス材料特性

外観	灰黒色ペースト状
基油	鉱物油
固体潤滑剤	二硫化モリブデン
増ちょう剤	リチウム
ちょう度	312度
使用温度範囲	-10℃～120℃
離油度	4.10%
蒸発量	0.32%
沸点	198℃

本実験では滑動面詳細を実験因子とし、表－1 に示す 4 種類の試験体について加振実験を行った。SRF シートは大きな引張強度を有し耐震補強材として用いられており、また施工時の取り扱いが容易なことから滑動に伴う基礎部の損傷を抑制する効果を意図して用いた。二硫化モリブデンを潤滑成分とするグリスは主に機械潤滑剤として一般的に用いられており、潤滑性能及び耐久性能に実績がある。また安価で大量に入手可能である点と施工時の取り扱いが容易である点を考慮し本実験に採用した。MoS₂の物性及び性能一覧を表－5 に記載する。

C-Mo 試験体では基礎部コンクリート滑動面に直接 MoS₂を約 400g 塗布した試験体である。MoS₂を塗布し軸力を載荷した状態で 1 日養生し、加振を行った。

SRF-Mo 試験体は滑動時の基礎部コンクリート損傷を防ぐことを意図して基礎部滑動面に厚さ約 3mm のポリエステル繊維シート(以下 SRF)を貼り付け補強し、その上から滑動面にのみ MoS₂を約 400g 塗布した。SRF シート貼り付けには一液性ウレタン系接着剤を用い、基礎部底面全面と四周側面の滑動面から約 150mm の位置まで貼り付けた。接着剤の平均接着強度規格値は 1.0N/mm²である。SRF-Mo 試験体は SRF 貼り付け直後に MoS₂の塗布を開始し、軸力を載荷した状態で 1 日養生して加振を行った。

S-Mo 試験体は、基礎底面の補強材として厚さ 6mm の鋼板を用い、その上から滑動面に MoS₂を約 400g 塗布した。鋼板は滑動面端部で曲げ加工を施し、基礎部側面四周でコンクリートに定着したφ8.5 異形棒鋼へ溶接固定しており、滑動面は平滑な鏡面仕上げとなっている。S-Mo 試験体は MoS₂塗布後軸力を載荷した状態で 3 日間養生し加振を行った。

S 試験体は、同様に鋼板を滑動面に設置して MoS₂は塗布せず、基礎部底面の鋼板と均しコンクリート部のコンクリート面間で滑動する試験体である。

2.2 加振スケジュール

表－6 に本実験での加振スケジュールを示す。Run1～Run8 では振幅(5～40mm)及び加振周期(0.3～1.4sec)をパラメータとする正弦波を入力した。

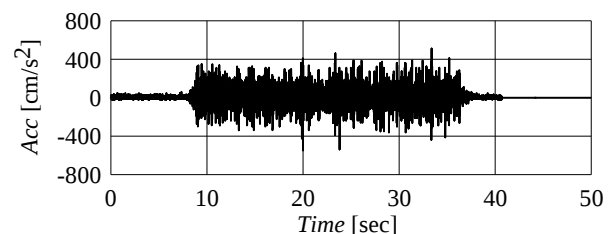
摩擦係数 μ の算定は下記式(1)によって行った。すなわち均しコンクリート部に生じた水平力を、滑動面に生じる鉛直力で除した値を摩擦係数とし、水平力と鉛直力には均しコンクリート部に生じる加速度による慣性力を考慮している。

$$\mu = \frac{Q - m\ddot{x}}{mg - m\ddot{y}} \quad (1)$$

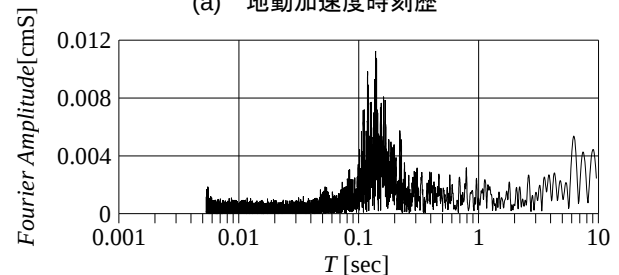
ここに Q : 水平力, m : 質量(12.09ton), $\ddot{x}$: 水平方向加速度, $\ddot{y}$: 鉛直方向加速度, g : 重力加速度である。実験から得られる μ には固定床に設置した反力フレームの固

表－6 加振スケジュール

	周期	振幅	最大速度	最大加速度	継続時間
	sec	mm	cm / s	cm / s ²	sec
ホワイトノイズ	0.1～1.0	5	8	213	30
Run1	0.6	20	21	219	30
Run2	1.3	40	19	93	30
Run3	0.7	10	9	81	60
Run4	1.4	20	9	40	60
Run5	0.5	20	25	316	30
Run6	0.3	20	42	877	20
Run7	0.25	20	50	1263	15
Run8	0.13	10	48	2336	15

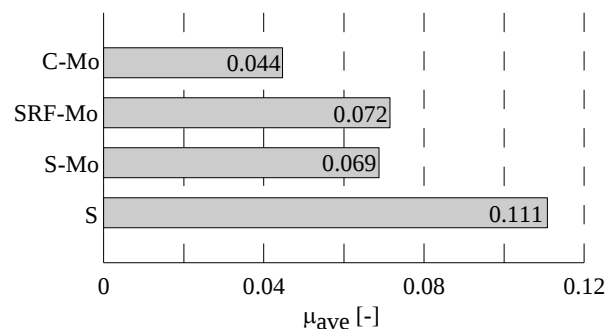


(a) 地動加速度時刻歴



(b) 反力フレーム変位のフーリエ振幅スペクトル

図－3 ホワイトノイズ加振



図－4 平均摩擦係数の比較

有振動により、加振周期と異なるノイズが混入する。図－3(b)に示す、ホワイトノイズ入力時の反力フレーム変位フーリエ振幅スペクトルより、周期 $T=0.1\sim0.2$ が卓越していることが分かる。そのため式(1)で算定した μ から加振周期の 85%以下の短周期成分を除くフィルター処理を行った。

3. 実験結果

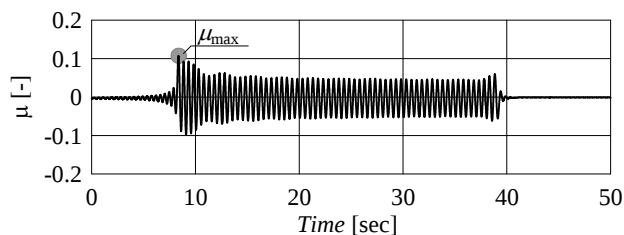
3.1 試験体ごとの平均摩擦係数の比較

図-4に各試験体におけるRun1~Run8での平均摩擦係数 μ_{ave} を示す。 μ_{ave} は各加振サイクル中の最大値をRunごとに平均することで算定している。MoS₂を用いた3体はMoS₂を用いなかったS試験体と比較して μ_{ave} が40%程度以上低減し、C-Mo試験体はS試験体より60%低減する結果となった。さらにS-Mo試験体はS試験体と比較して μ_{ave} が約38%低減されていることから、滑動面の平面形状が同一の条件であってもMoS₂を用いることで μ_{ave} を大幅に低減できることが確認できた。また、MoS₂を用いた3体のうちC-Mo試験体が μ_{ave} の最低値を示し、滑動面が最も滑らかな鏡面仕上げであるS-Mo試験体はSRF-Mo試験体と同程度の μ_{ave} を示す結果となった。これは、滑動面相対変位の累積値である累積相対変位 D_{cum} の増加に伴う μ の上昇性状(3.3後述)の違いによるものであると言える。

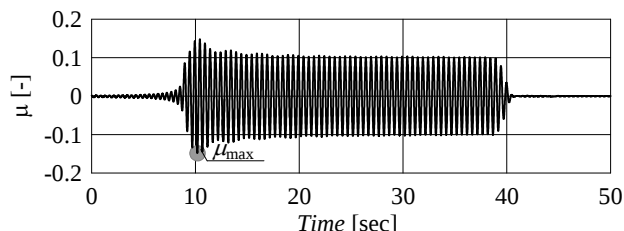
3.2 摩擦係数の時刻歴推移

図-5にRun5における μ の時刻歴波形を示し、図-6にRun2及びRun5における滑動面相対変位 D と μ の関係を示す。図-5(a)より、C-Mo試験体では加振開始後に μ が急激に増大し、極大値 μ_{max} に達した後に減少し一定値に収束する傾向が見られ、加振開始直後に μ が極大値を示す傾向は全ての試験体で同様に確認できる。また、図-6(b)(i)より μ_{max} は $D=0$ 前後で発生しており、 μ - D 関係は概ね μ_{max} 発生後に定常的な非線形ループ形状となることが分かる。

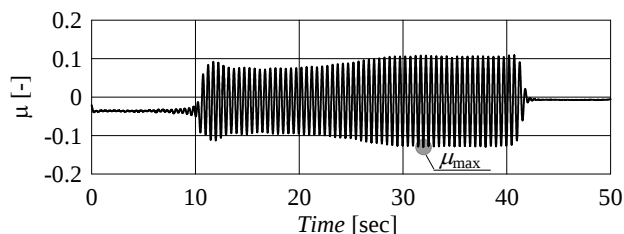
また、図-5(c),(d)よりS-Mo及びS試験体では極大値を経て一旦 μ が減少した後に、再び μ が増大し加振後半に μ_{max} を示している。この傾向は基礎底面に鋼板を用いた試験体のみに確認できることから、滑動面の平面形状に



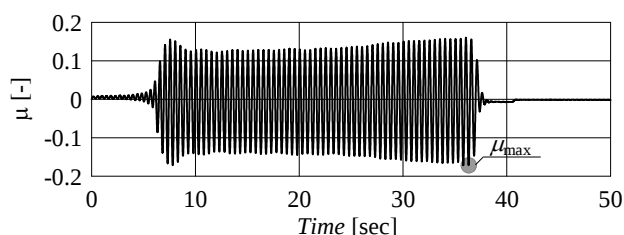
(a) C-Mo



(b) SRF-Mo

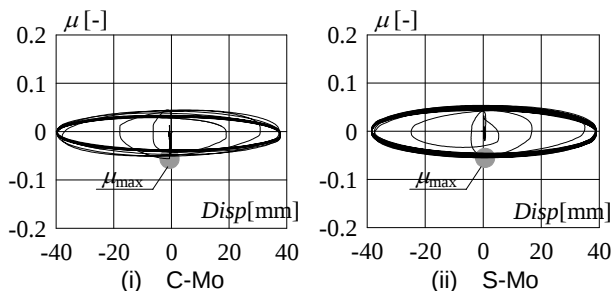


(c) S-Mo

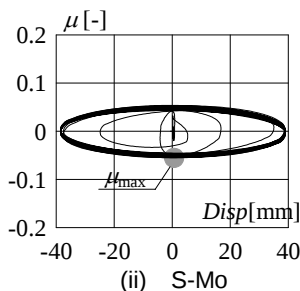


(d) S

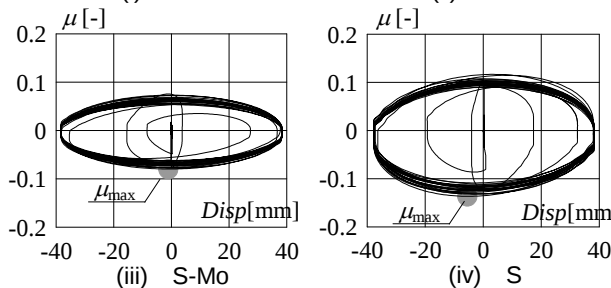
図-5 摩擦係数の時刻歴推移 (Run5)



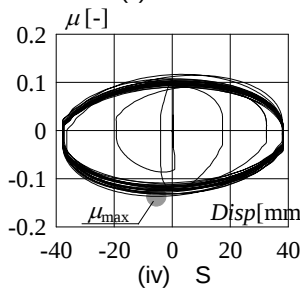
(i) C-Mo



(ii) S-Mo

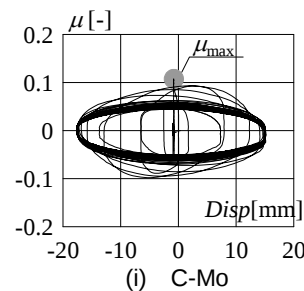


(iii) S-Mo

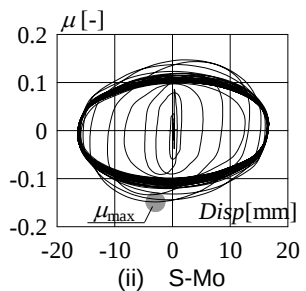


(iv) S

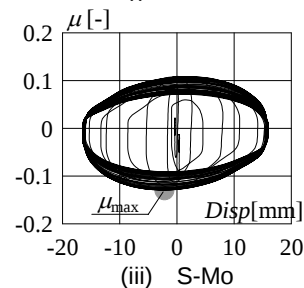
(a) Run2



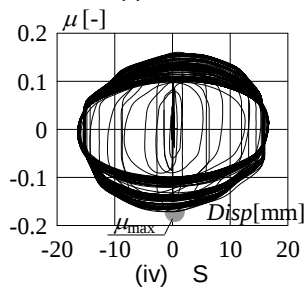
(i) C-Mo



(ii) S-Mo



(iii) S-Mo



(iv) S

(b) Run5

図-6 相対変位-摩擦係数関係

依存するものと考えられる。

3.3 累積変位の増大に伴う摩擦係数の変動

図-7 に滑動面相対変位の絶対値を累積した累積相対変位 D_{cum} と μ の関係を示す。図中の μ はサイクルでの最大値を代表値として採用している。全ての試験体で、 D_{cum} の増大に伴い μ が上昇する傾向がみられるが、 MoS_2 を塗布した 3 体のうち、C-Mo 試験体が最も上昇傾向が小さく S-Mo 試験体はその傾向強いことが分かる。これは、滑動面が鏡面である S-Mo 試験体では加振を繰り返すことで MoS_2 が滑動面外へ排出されたことが要因と考えられる。また、 MoS_2 を塗布した 3 体は初動時にいずれも同程度の μ を示していることから、滑動面の平面状態に応じた μ の差異は MoS_2 を塗布することで初動時には同程度となるが、 D_{cum} の増大に伴う μ の上昇傾向は滑動面の平面状態に大きく依存すると言える。さらに図-7 より、加振を重ねることで連続的に μ が増大しており、 μ が Run ごとに不連続に変動する振幅に直接依存する傾向は確認できない。

また、図-8 に Run ごとの μ_{max} と μ_{ave} の推移を示す。図-8 より全ての試験体で加振を重ねるにつれて μ_{ave} の上昇と比較して μ_{max} が大きく増大する傾向が確認できる。特に SRF-Mo 試験体ではこの傾向が顕著であり、S-Mo および S は SRF-Mo と比較して上昇傾向が緩やかであることが分かる。

3.4 摩擦係数の速度依存性

図-9 に滑動面での基礎部と均しコンクリート部の相対速度 V と μ の関係を示す。 V は滑動面相対変位 D を時間微分することで算定している。図-9(a),(b)より、 MoS_2 を塗布した 3 体では μ が V に概ね比例した値を示しており、この傾向は実験終了まで一貫して確認できた。一方、S 試験体は加振を重ねるに従い図-9(b)に示すような非線形関係を強く示すようになる傾向を確認できた。

また、図-9 に計測値を最小 2 乗法により 1 次近似した近似直線を示している。近似直線の傾きに相当する μ/V に着目すると、各 Run において μ/V は試験体ごとにそれぞれ固有の値を示しており、 μ/V が滑動面の平面形状に依存することが確認できる。さらに、図-9(a)(i),(ii)及び図-9(b)(i),(ii)より、 MoS_2 を用いた試験体では加振を重ねても $V=0$ 付近の低速度域と $V=15$ 付近の高速度域ともに μ/V が概ね同程度の線形関係を示し、最小 2 乗法近似直線と一致する傾向を示す。一方図-9(a)(iii)及び図-9(b)(iii)より、S-Mo は加振を重ねることで $V=0$ 付近での μ/V が増大し、非線形の $\mu-V$ 関係を示す傾向が確認できる。

次に、加振周期 T と μ_{ave} の関係を図-10 に示す。すべての試験体で概ね T の増大に伴い μ_{ave} が減少する傾向が確認できる。これは、 μ の速度依存性に起因するものであり、最大速度 V_{max} の小さな長周期域で短周期域と比較

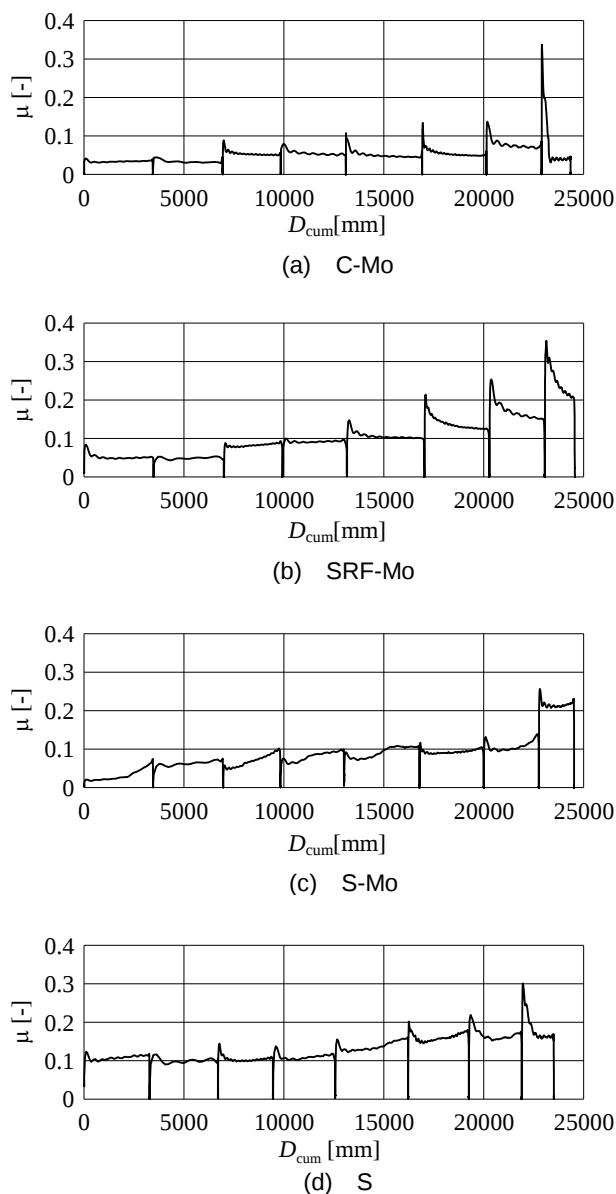


図-7 累積相対変位-摩擦係数の関係

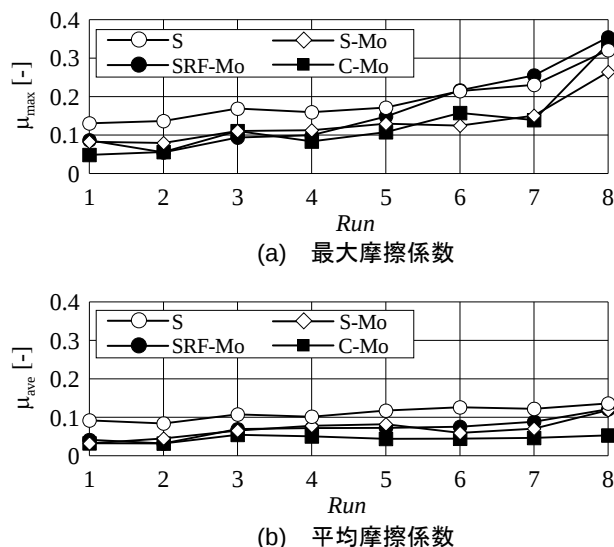


図-8 加振 Run ごとの摩擦係数

して小さな μ_{ave} を示す結果となった。また、 $T=0.6$ (Run1)では前後の値と比較して μ_{ave} が低下している。これは、Run1では前後の点と比べ D_{cum} が最小であることが要因として考えられる。以上の点から、 μ が T に依存する傾向は μ の速度依存性及び D_{cum} の増大に伴う μ の上昇によるものであり、直接的な関係は確認できなかった。

4. おわりに

強震下での鉄筋コンクリート基礎底面とマットスラブ間の滑動を模擬した加振実験を行い以下の知見を得た。

- (1) 二硫化モリブテン MoS_2 を潤滑剤として用いた S-Mo 試験体では、 MoS_2 を使用しなかった S 試験体と比較して平均摩擦係数 μ_{ave} が約 38%低減し、滑動面が同一の平面形状であっても MoS_2 を用いることで μ_{ave} を大幅に低減できることが確認できた。
- (2) 摩擦係数 μ の時刻歴推移に着目すると、加振開始直後に μ は単調に増加し、極大値を示した後一旦減少して概ね μ_{ave} 程度に収束する傾向が、滑動面の詳細に依らず全ての試験体で確認できた。また、滑動面に鋼板を用いた S-Mo 及び S 試験体では加振後半に μ が再び上昇する傾向が確認できた。
- (3) 滑動面における基礎部と均しコンクリート部の相対変位 D と μ の関係に着目すると、 μ の極大値が生じる時刻以前では概ね線形関係を示し、極大値の発生以降では定常的な非線形挙動を示すことがすべての試験体で確認できた。
- (4) 滑動面相対変位の累積値 D_{cum} と μ の関係に着目すると全ての試験体で D_{cum} の増大に伴い μ が上昇する傾向が見られたが、特に S-Mo 及び SRF-Mo 試験体でこの傾向が顕著に表れた。S-Mo 試験体においては加振を重ねる度に MoS_2 が滑動面の外へ排出されたことが要因として考えられ、SRF-Mo 試験体では滑動に伴い SRF のよれが生じたことが μ の上昇傾向を強くした原因と考えられる。
- (5) 滑動面における基礎部と均しコンクリート部の相対速度 V に対する μ の依存傾向が確認できた。特に MoS_2 を用いた 3 体では μ - V 間に比例関係が生じる傾向が確認でき、最小 2 乗法による線形補完により概ね精度良く μ - V 関係が近似できることが分かった。

参考文献

- 1) 壁谷澤寿一,壁谷澤寿海,松森泰造,壁谷澤寿成,金裕錫：実大 3 層鉄筋コンクリート建物の振動実験, 日本建築学会構造系論文集 73(632), 1833-1840, 2008-10-30
- 2) 壁谷澤寿一,壁谷澤寿海:基礎滑り挙動を伴う直接基礎建物の地震応答推定手法, 日本建築学会構造系論文集 73(634), 2151-2158, 2008-12-30
- 3) BUI Quang Hieu, Toshimi Kabeyasawa, Toshikazu

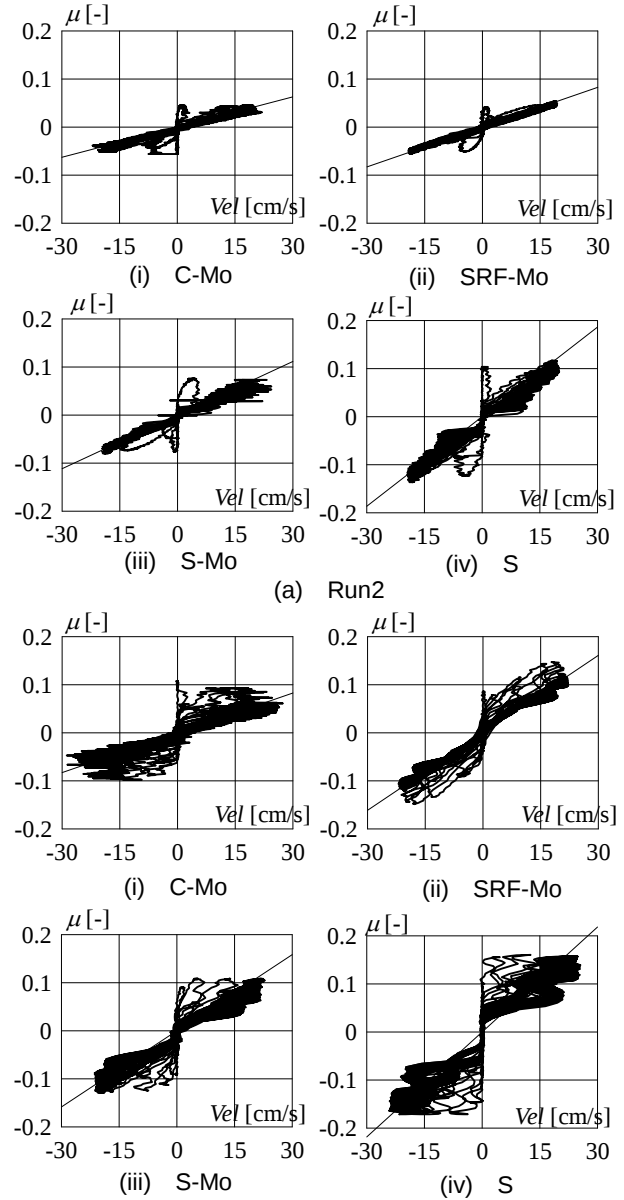


図 - 9 相対速度－摩擦係数関係

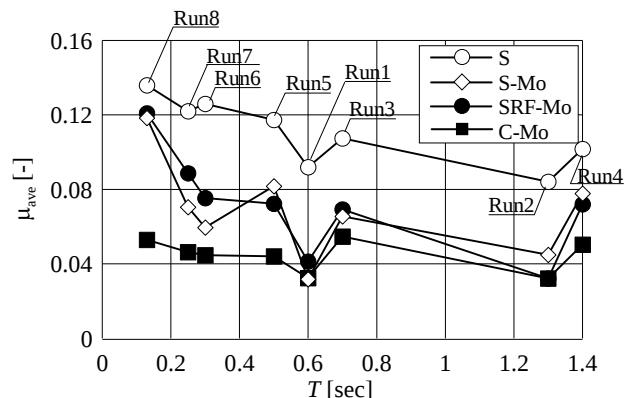


図 - 10 加振周期－摩擦係数関係

Kabeyasawa : An Experimental Study on Shear Friction between Concrete Foundation and Bedding, 日本建築学会学術講演梗概集 2012(構造 I), 587-588, 2012-09-12