

論文 構造物における鉄筋コンクリート基礎の滑り正弦波加振実験

渡邊 公美*¹・壁谷澤 寿一*²・壁谷澤 寿海*³・福山 洋*⁴

要旨：コンクリート基礎試験体に対して、正弦波を入力した加振実験を行い、摩擦係数についての検討を行った。実験因子は滑り面としており、滑り面がコンクリート同士、鋼板同士、鋼板間に潤滑剤として黒鉛粉末を挿入したもの計 3 体となっている。黒鉛粉末を挟んだ試験体は滑り面がコンクリートの試験体の平均摩擦係数である 0.61 から 0.45 まで低減することができた。3 体の試験体に対し、滑り面で相対速度が高くなれば摩擦係数が減少する現象が見られた。また入力波の速度が大きくなると、摩擦係数が減少した。

キーワード：基礎、摩擦係数、動的実験、速度依存性

1. はじめに

兵庫県南部地震や新潟県中越地震等では非常に大きな加速度が観測されたが、一部の鉄筋コンクリート建物では深刻な被害がみられた一方で、そのほかの多くの建物で被害の程度が記録された地震動から推定されるよりも小さかったとされている。

その理由の一つとして、実際の建物への入力地震動が地表面で観測された地震動よりも低減した可能性がある」と指摘されており、余震観測などによっても実証されている。入力が低減する原因としては周波数に依存する相互作用のほか、基礎まわ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¹⁾、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可能性がある²⁾。

そこで本実験では、コンクリート底版(マットスラブ)とフーチング部を別々に打設し、滑り面をコンクリート同士とした試験体と、マットスラブ部とフーチング部両方の滑り面に鋼板を取り付け、滑り面を鋼板同士とした試験体と、その鋼板間に固体潤滑剤として黒鉛粉末を挟んだ試験体の計 3 体を作製し、正弦波を入力波とした動的すべり試験を行った。極大地震動時にコンクリート基礎底面を意図的に滑らせることで、入力低減および上部構造の損傷制御を図り、また、安価で簡単に行うことができる工法を念頭に置いて、摩擦係数の速度依存性や加振回数(累積エネルギー)による摩擦係数の挙動や性質を検証することを目的としている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本実験において作製した 3 体の試験体の一覧を表 1 に、寸法および配筋詳細を図 1 に示す。共通条件はフーチング部において、長方形断面 700×500mm、高さ 400mm としている。フーチング部におけるコンクリートの設計基準強度は $F_c36\text{N/mm}^2$ (以下 MPa)、マットスラブ部の設計基準強度は F_c24 としている。またフーチング部の主筋およびせん断補強筋には、それぞれ、14-D16(SD295)および D16@150(SD295)を使用した。一方、マットスラブ部には主筋に 8-D25(SD345)、せん断補強筋に D13@150(SD295)を用いた。また実験因子はマットスラブ部とフーチング部間の施工法となっている。本実験で用いたコンクリートおよび鋼板の材料特性を表 2,3 に示す。

CCP 試験体は、滑り材がコンクリート同士の試験体である。マットスラブ部の打設後、滑り面において丁寧に金ごて仕上げを行った。そしてフーチング部においては、プレキャストコンクリートを想定して滑り面が型枠面となるようにマットスラブ部とは別々に打設した。そしてフーチング部断面端には円滑に滑らせ、またフーチング部コンクリートの損傷を低減させるために底辺 50mm、高さ 20mm の三角形に面取りを行った。

一方、SS 試験体は滑り面が鋼板同士の試験体である。マットスラブ部およびフーチング部のコンクリートに 3.2mm の黒皮付き鋼板を固定金具(ビス)を用いて固定した試験体となっている。

SGS 試験体では SS 試験体同様、マットスラブ部およびフーチング部のコンクリートに鋼板を固定した試験体となっており、鋼板間に厚さ 1mm になるように平均粒径 $19\mu\text{m}$ の固体潤滑剤である黒鉛粉末を挟んでいる。黒

*1 東京大学大学院 工学系研究科 修士課程 (正会員)

*2 国土交通省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 工博 (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)

表-1 試験体一覧

試験体	マットスラブ部とフーチング部間	
CCP	フーチング	マットスラブ・フーチング部別々に打設
	マットスラブ	
SS	フーチング	鋼板(厚さ:3.2mm)
	マットスラブ	鋼板(厚さ:3.2mm)
SGS	フーチング	鋼板(厚さ:3.2mm)
	マットスラブ	黒鉛(厚さ約 1mm) 鋼板(厚さ:3.2mm)

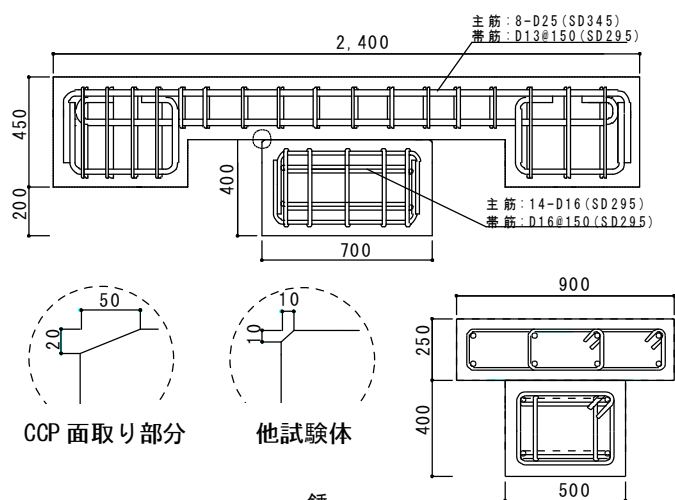


図-1 試験体図

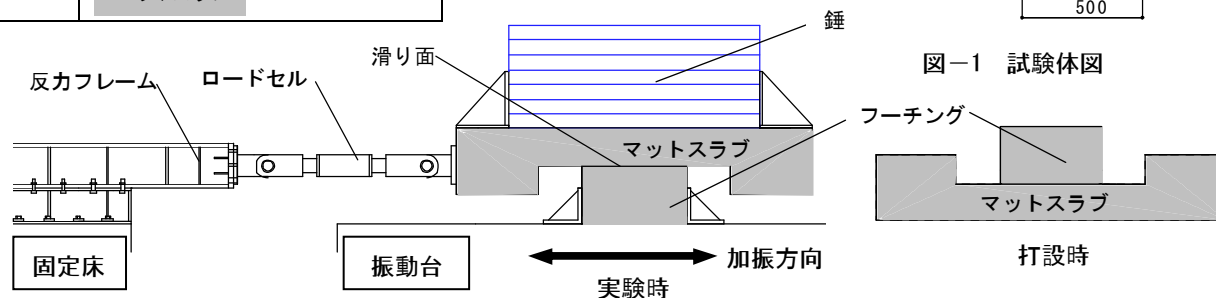


図-2 実験装置

表-2 コンクリート材料特性

	圧縮強度 (MPa)	圧縮強度時歪 (μ)	弾性係数 (GPa)
フーチング	37.4	1907	32.7
マットスラブ	23.6	1662	30.7

表-3 鋼板材料特性

降伏強度 (MPa)	降伏歪 (μ)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
288.4	1509	191.2	396.6

表-4 黒鉛粉末

炭素分 (%)	灰分 (%)	揮発分 (%)	平均粒径 (μ m)	見掛け密度 (g/cm ³)
97	2	1	19	0.2

鉛粉末は経年劣化しづらく、機械分野の潤滑材としてよく用いられる。本実験で用いた黒鉛粉末の成分を表-4に示す。なお、黒鉛を挟んで軸力を作用させてから1週間後に実験を行った。

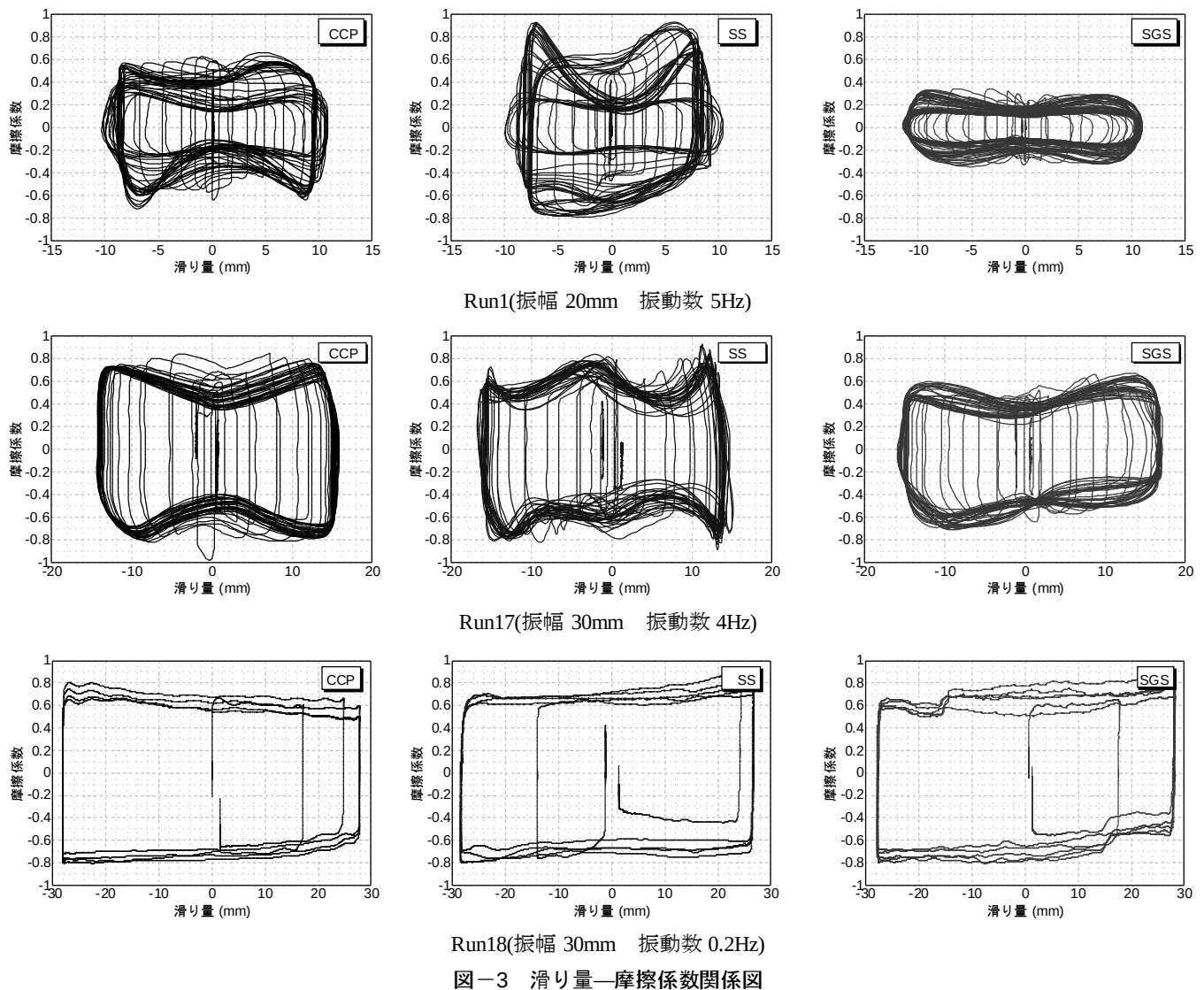
また通常の建築物では図-2中の打設時のようにマットスラブ部が下部で、フーチング部が上部に位置するが、本実験時では、フーチング部を下部にマットスラブ部を上部とし、上下を反転して実験を行った。

表-5 加振プログラム

Run	振幅 (mm)	振動数 (Hz)	Run	振幅 (mm)	振動数 (Hz)
1	20	5	11	40	1
2	20	4	12	5	5
3	20	3	13	10	5
4	20	2	14	10	10
5	20	1	15	30	0.5
6	40	1	16	30	0.2
7	20	5	17	30	4
8	15	5	18	30	0.2
9	10	5	19	40	3
10	5	5			

2.2 加振方法

実験装置を図-2に示す。軸力は錘とマットスラブ部の自重により12.03ton(117.88kN)となっている。また、錘およびマットスラブ部はロードセルを介して反力フレームに固定し、振動台を用いて加振することで、強制的にフーチング部とマットスラブ部間を滑らせた。その際に、ロードセルに付随するピンにくさびを挿入し、ピンでの隙間間で水平方向に動くことを防いでいる。なお加振波は正弦波とし、計19回の加振を行った。その際の加振プログラムを表-5に示す。摩擦係数の振動数による影響等を検討するために各加振において振幅(5mm~40mm)お



よび振動数(0.2Hz~10Hz)を変動させて加振を行い、ロードセルで観測された荷重と加速度計で観測された錘の慣性力の和に垂直抗力を除した式(1)を用いて摩擦係数を算出した。なお、式(1)中の分母は垂直抗力を示しており、本実験で生じた微小な上下動により生じる鉛直方向の慣性力を加味し、垂直抗力を算出している。

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

μ : 摩擦係数 Q : 荷重
 m : 質量(=12ton) $\ddot{x}$: 水平方向加速度
 g : 重力加速度 $\ddot{y}$: 鉛直方向加速度

3. 実験結果

3.1 滑り量—摩擦係数関係

図-3に Run1, Run17, Run18 加振時におけるマットスラブ部とフーチング部間の相対変位である滑り量と摩擦係数の関係図を、図-4に各加振の滑り時の平均摩擦係数の値と加振番号とをプロットした加振順序による摩擦係数の推移図を示す。なお、平均摩擦係数の値はマットスラブ部とフーチング部間の相対速度が 0.8cm/s 以上

になった際の摩擦係数を平均した値となっている。図に示す通り、長周期波加振時(図-3中 Run18)では完全剛塑性体の応力—ひずみ関係における骨格曲線図に近い形状となっている。一方、短周期波加振時(図-3中 Run1, Run17)では滑り量がおおよそ 0 となる付近で摩擦係数が減少し、また滑り量がピークとなる付近で摩擦係数が増加する傾向を示している。この原因として、後述する摩擦係数の速度依存性が挙げられる。また、計 19 回の加振において算出した最大摩擦係数と平均摩擦係数を平均すると CCP 試験体の最大摩擦係数の平均値は 0.81, 平均摩擦係数の平均値は 0.61 となった。一方、SS 試験体においては、最大摩擦係数の平均値は 0.85, 平均摩擦係数の平均値は 0.58 であった。また SGS 試験体では最大摩擦係数の平均値は 0.69, 平均摩擦係数の平均値は 0.45 となっていた。

SS 試験体の摩擦係数は Run1 加振開始から 8 サイクルまで摩擦係数の平均値が 0.2 を下回っていたが、加振時間の増加とともに摩擦係数が上昇していた。そして CCP

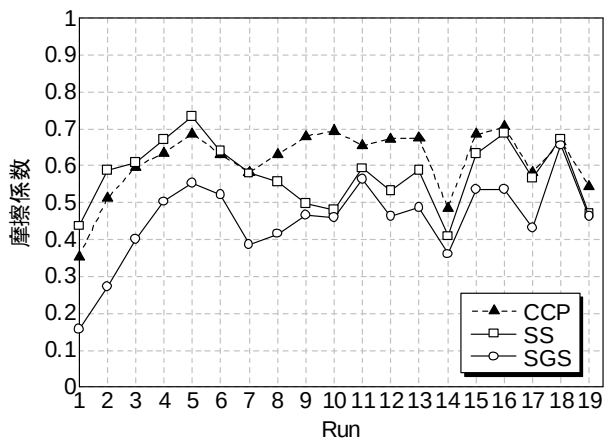


図-4 加振順序による摩擦係数の推移

試験体の摩擦係数と比較し、あまり差異のない結果となっている。この原因として、鋼板間で滑りが生じず、フーチング部でのコンクリートと鋼板で滑っていたため摩擦係数が高くなったことが考えられる。また SS 試験体ではマットスラブ部がロッキングをおこし、フーチング



図-5 剥落写真

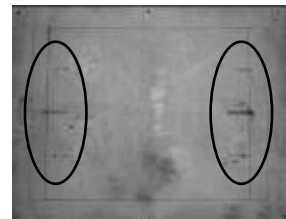
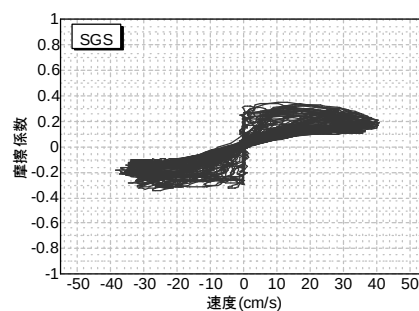
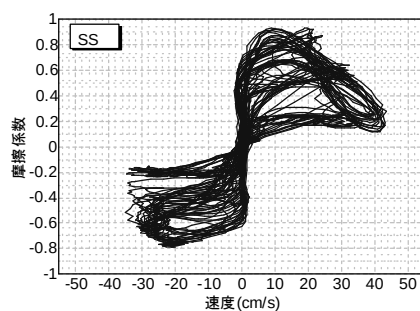
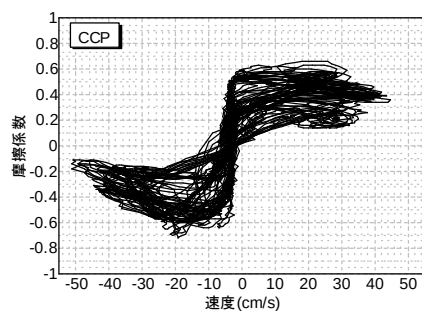


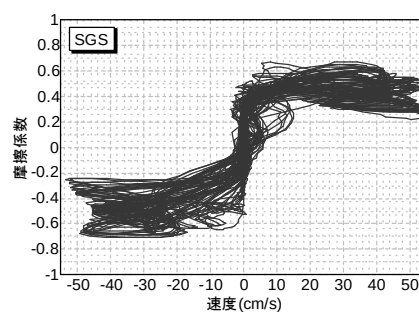
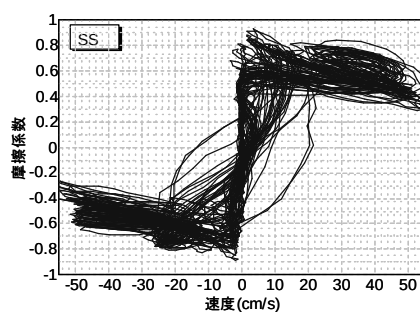
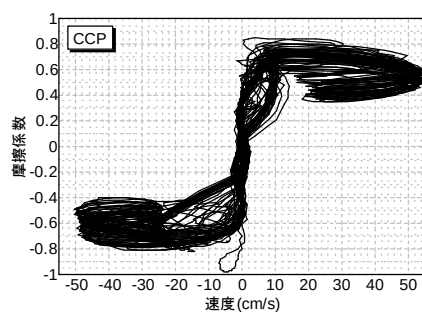
図-6 痕跡写真

部かぶりコンクリートの剥落が生じた。その際のコンクリートの剥落写真を図-5 に示す。

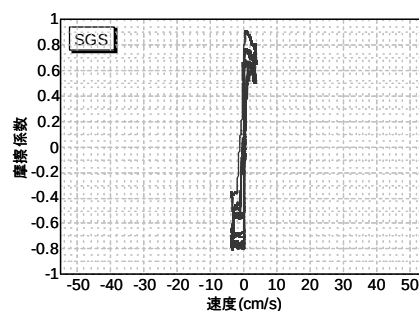
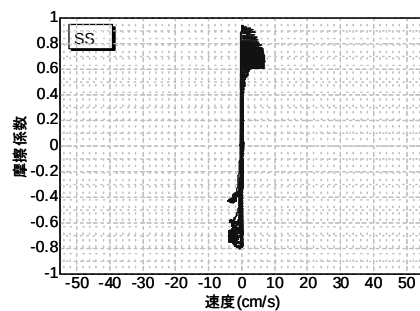
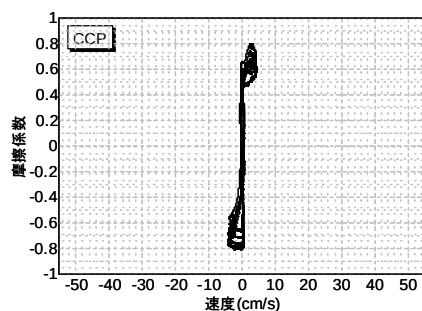
SGS 試験体においては、鋼板間に黒鉛粉末を挟むことで、滑り面がコンクリート同士の試験体の CCP 試験体の摩擦係数より約 0.16 低減していた。また SGS 試験体では平均摩擦係数が Run1 では 0.16, Run2 では 0.27 と平均摩擦係数が 0.3 を下回っており比較的小さな値を記録している。しかし図-4 から Run3 以降の加振では鋼板間の黒鉛粉末が試験体外に排出されることで黒鉛粉末が少なくなり、摩擦係数は次第に大きくなっている。最終的に



Run1(振幅 20mm 振動数 5Hz)



Run17(振幅 30mm 振動数 4Hz)



Run18(振幅 30mm 振動数 0.2Hz)

図-7 相対速度—摩擦係数関係

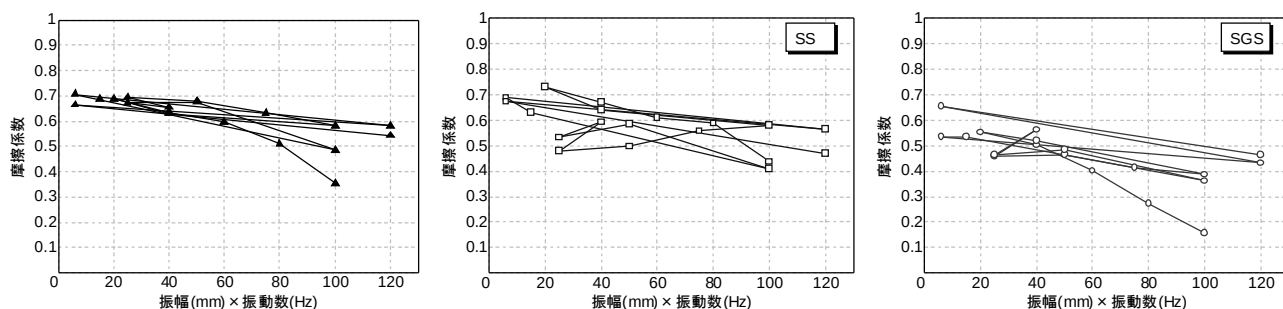


図-8 振幅×振動数－摩擦係数関係図

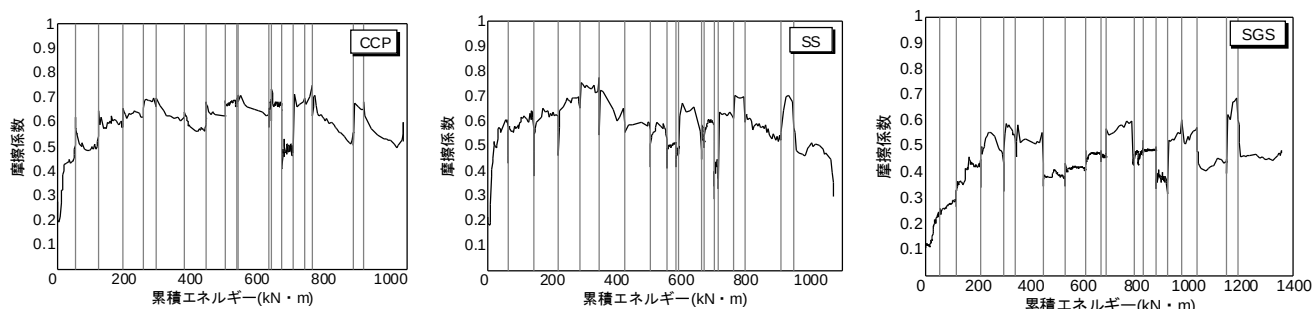


図-9 累積エネルギー－摩擦係数関係

は他の試験体の摩擦係数と大きな差異は見られない結果となっている。実験終了後に鋼板の様子を見るとフーチングコンクリートと鋼板を固定していたネジが破壊していた。また、マットスラブ部とマットスラブ部に固定していた鋼板には、フーチング部に取り付けていて破壊されていたネジ部の頭をひきずったような痕跡が見られた。そのことも加わったことで、摩擦係数の増加につながったと考えられる。接触面で見られた傷痕の写真を図-6に示す。図-6中の丸印は傷跡を示してある。

3.2 速度依存性

各加振時におけるマットスラブ部とフーチング部間の相対速度と摩擦係数の関係図を図-7に示す。なお相対速度はフーチング部とマットスラブ部で計測した相対変位の値を微分した値を用いている。

Run1 加振時の CCP 試験体において、相対速度が上昇するにつれ摩擦係数の減少、いわゆる摩擦係数の速度依存性³⁾が見受けられる。本実験では入力波は正弦波となっているため、滑り量が最大となる際に速度は0となり、滑り量が0の際に速度が最大となる。よって図-3の滑り量－摩擦係数図は、低振動数加振時で見られる完全剛塑性体における骨格曲線のような形状ではなく、滑り量が0付近で摩擦係数が減少している、くびれが現れた形状となっている。また Run18 加振時のような遅い速度の場合では、どの試験体においても摩擦係数は相対速度に左右されていないので滑り量－摩擦係数関係図は完全剛塑性体における骨格曲線に近似した形を描いている。

SS 試験体においては、CCP 試験体と同様に図-7から

Run17 加振時に摩擦係数の速度依存性が顕著に確認できる。Run1 加振時において、負方向ではあまり速度依存性が見られないのに対し、正方向では摩擦係数が1付近まで上昇し、相対速度の増加とともに摩擦係数は0.2ほどまでに減少している。このことから正方向加振時でフーチング部のコンクリートと鋼板の固定金具が破壊し、その破壊された固定金具が滑りを妨げたことにより摩擦係数上昇の起因になったことが考えられる。

SGS 試験体では Run1, Run17 加振時では、ともに相対速度の増加による摩擦係数の多少の減少は見られるものの、他の試験体のような大きな摩擦係数の減少は見られない。

3.3 振幅×振動数－摩擦係数関係

各加振時における入力波の速度を評価した振幅と振動数の積と平均摩擦係数値の関係図を図-8に示す。CCP 試験体においては、振幅と振動数の積が最も小さい値6の Run16 加振時に平均摩擦係数0.71となっており他の加振時と比べ最も高い値となった。また既往の鉛直荷重が120kN時の静的実験³⁾では滑り面がコンクリート同士での摩擦係数の平均値は0.74となっており、本実験の Run16 加振時の平均摩擦係数の方が若干小さい値となっているものの、Run16 加振時の摩擦係数の平均値と近い値になっている。

また、SGS 試験体も同様に振幅と振動数の積が最も小さい値の Run18 加振時に平均摩擦係数の最大値0.65を記録した。一方、SS 試験体において、平均摩擦係数の最大値は、振幅と振動数の積が20である Run5 加振時に摩擦

係数は 0.73 であった。

どの試験体においても振幅と振動数の積が大きくなる、つまり入力波の速度が大きくなるにしたがって、摩擦係数の平均値は減少する傾向にあった。

3.4 累積エネルギー—摩擦係数関係

各試験体の加振時の 1 サイクルにおける摩擦係数と軸力の積と滑り量の積分であるエネルギーをサイクル毎に累積した累積エネルギーと 1 サイクル毎の平均摩擦係数の関係を図-9 に示す。グラフ中の縦線は各加振の境目を示している。どの試験体においても Run1 加振時からサイクルを重ねるごとに摩擦係数の増加が生じていた。特に SS 試験体において顕著に見られ、約 $8\text{kN}\cdot\text{m}$ 以前(8 サイクル以前)では摩擦係数の平均値は 0.2 を下回っており、それ以降では摩擦係数が約 0.6 まで増加していた。8 サイクルまでは鋼板間で滑りが生じ、それ以降では鋼板とコンクリートが滑ったことで摩擦係数が上昇したのではないかと推測できる。

CCP 試験体も同様に約 $9\text{kN}\cdot\text{m}$ まで 1 サイクルでの摩擦係数の平均値が約 0.21 を推移していた。また、Run5 まで摩擦係数が 0.35 から 0.68 まで増加していたが、それ以降の加振では、おおそ 0.7~0.6 の値を推移している。SGS 試験体においては、Run4 加振時までサイクルを重ねるごとに摩擦係数が約 0.1 から 0.4 まで増加していた。Run5 加振時以降の加振では以前のような大きな摩擦係数は増加せず、概ね一定の値を示している。このことから、Run4 加振時、 $210\text{kN}\cdot\text{m}$ (約 150 サイクル) までに鋼板間の黒鉛粉末がほとんど失われたことが考えられる。今後、黒鉛粉末のように試験体外に排出することなく、また経年劣化しにくい潤滑剤および材料の検討が必要である。

4. まとめ

コンクリート基礎底面を模擬した試験体に対して、正弦波を入力した動的加振実験を行い、接合面の材料や詳細あるいは加力条件が摩擦係数に与える影響を実験的に検討し、以下の結論を得た。

- (1) コンクリート打ち継ぎ面を滑り面とした CCP 試験体の各加振時の最大摩擦係数の平均値はコンクリート 0.81、平均摩擦係数は 0.61 であった。
- (2) 滑り面を鋼板とした SS 試験体の最大摩擦係数 0.85、平均摩擦係数は 0.58 となっており、CCP 試験体の結果とほぼ同程度の結果となった。
- (3) 鋼板の間に黒鉛を入れた SGS 試験体では、最大摩擦係数の平均値は 0.69、平均摩擦係数の平均値は 0.45 に明らかに低減した。しかし加振を重ねるにつれ CCP 試験体と同等な摩擦係数に上昇した。
- (4) 入力波の振幅と振動数の積が小さい、すなわち、入

力波の速度が小さければ、摩擦係数は大きくなり、逆に速度が大きければ摩擦係数は小さくなった。

- (5) フーチング部とマットスラブ部間の相対速度が小さければ、摩擦係数の減少は見られず、相対速度が大きくなれば、摩擦係数は減少した。

本実験の基礎底面詳細でも、上部構造との関係により基礎入力逸散に応用することが可能であると考えられる。しかし、本実験の施工法による滑り面がコンクリート同士および鋼板同士の場合では早い段階で摩擦係数が上昇するため基礎入力逸散による大きな恩恵は得ることができないが、鋼板間に黒鉛粉末を挿入したものでは、短周期地震動のようなエネルギー量が小さい地震動には対応できる。ただし、長周期地震動のようなエネルギー量が大きい場合には摩擦係数が上昇する可能性が考えられる。今後、さらに安定的に摩擦係数を低減する詳細、鋼板とコンクリートの固定方法、経年劣化の検討などの開発や検証に関する研究が望まれる。

謝辞

本研究は科学研究費補助金基盤研究(B)「基礎底面の滑動による地震入力逸散機構に関する研究」(代表者: 壁谷澤寿海)により実施された。

参考文献

- (1) 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海, 他: 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, 第 632 号, pp1833-1840, 2008.10
- (2) 榎田竜太, 中島正愛, 他: 基礎モルタル上をすべる鋼構造建物の地震応答特性, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 構造系第 51 号, pp89-92, 2011.5
- (3) Bui Quang Hieu, Toshimi Kabeyasawa, Toshikazu Kabeyasawa, "An experimental study on shear friction coefficient between concrete foundation and bedding", Japan Architecture Conference, 2012.9