

黒鉛潤滑を用いたすべり機構を有する 構造物の耐震性能に関する研究

Research on the Seismic Performance of Structures with Graphite-Lubricated Sliding Mechanisms

洲鎌 星* 小山慶樹** 山上 聡* 安井健治*

要 旨

近年、鋼・コンクリート・黒鉛などの安価で一般的な材料を用いて、経済性と高い耐震性能を両立した構造物の実現が目指されている¹⁾など。黒鉛潤滑を用いたすべり機構を有する構造物は、数値解析などの理論的検討によって十分な地震応答低減効果を発揮し得ることが示されている。しかし、その実地震時の応答性状やすべり面の経年変化などに関しては実験的な検証が進んでおらず、未解明な点が多い。本研究では、黒鉛で潤滑されたすべり面を有する試験体を用いた振動実験によって、上下動の有無が試験体のすべり挙動に及ぼす影響は小さいこと、すべり層に取り付ける復元ゴムが十分な残留すべり変位抑制効果を有すること、ならびに水平二軸加振における上部構造の応答が一軸加振のときよりも概ね小さくなることを確認した。

キーワード：直置き型構造物、振動実験、黒鉛潤滑

1. まえがき

免震構造物は、地震時の人的・物的被害の軽減に対して優れた性能を有する。2011 年の東北地方太平洋沖地震や 2024 年の能登半島地震といった過去の大地震においても免震構造物の効果は実証されており、病院や市庁舎などの様々な重要施設に免震構造が採用されている。しかしながら、戸建て住宅のような比較的小規模の建物については、経済的な観点から免震構造が採用されるケースは少ない。

一方、経済性と高い耐震性能を両立した構造物を実現する技術として、黒鉛潤滑を用いたすべり機構を有する構造物（以下、直置き型構造物）の開発が進んでいる¹⁾。直置き型構造物は、鋼・コンクリート・黒鉛といった一般的な材料を用いて構造物に免震効果を持たせたものであり、積層ゴムなどの免震材料を使用する既存の免震構造物と比較して、安価に免震効果を実現できる。

直置き型構造物は、小地震に対しては耐震構造物として機能する一方、大地震時には黒鉛で潤滑されたすべり面上を滑动することで地震応答低減効果を発揮する¹⁾。また、数値解析などの理論的検討によって、極めて稀に（数百年に一度程度）発生する地震動（以下、L2 地震動）の 2 倍以上の強さの地震動に対しても十分な応答低減効果を発揮し得ることが示されているが²⁾、実地震時

の応答性状やすべり面の経年変化に関しては実験的な検証が進んでいない。そこで本研究では、直置き型構造物の実用化に向けて、黒鉛で潤滑されたすべり面を有する試験体を用いた振動実験を行い、その地震応答性状や応答低減効果などを確認した。本報では、実施した振動実験の概要とその結果について報告する。

2. 直置き型構造物の概要

直置き型構造物は、鋼柱脚を有する上部構造とモルタルによるすべり面の間に黒鉛による皮膜を形成し、流体潤滑状態を実現することで、その摩擦係数を低減したものである。黒鉛は低摩擦を実現する固体潤滑剤として様々な分野で利用されており、高温・高荷重の環境でも化学的に安定で、入手も容易かつ安価な材料である。通常、鋼とモルタルによる接触面の最大静止摩擦係数は 0.80 程度であるが³⁾、黒鉛潤滑を施すことによってその値が 0.20 程度にまで低下し⁴⁾、地震時の応答低減効果が大きくなる。

本研究で実験に使用したすべり面は、図-1 に示すように表面が滑らかに仕上げられたコンクリート床板の上に黒鉛を散布し、試験体を床板上に積載して、黒鉛粒子がコンクリート表面に定着するよう床板上を数度摺動させたものである。

* 技術本部技術研究所建築研究グループ ** 技術本部技術戦略部

3. 振動実験

3.1 実験の概要

本研究では、図-2に示す鋼製の床フレームと柱、および柱脚部分を組み合わせて様々な試験体を作製し、a.～c.の三種類の振動実験を行った。それぞれの試験体を用いた実験について、その概要と目的を下記に示す。

a. 剛試験体による実験

すべり面の面圧依存性を確認するため、試験体に剛接合する鋼製床フレームの数を変化させ、異なる面圧に対する直置き型構造物のすべり挙動の違いを確認した。

b. 1層試験体による実験

1層直置き型構造物の応答低減効果、および上下動の有無による応答の違いを確認するため、X方向の一軸加振とX・Z方向の二軸加振をそれぞれ行い、加振軸ごとの実験結果を比較した。

c. 3層試験体による実験

多層直置き型構造物の応答低減効果、試験体すべり層に取り付ける復元ゴムの残留変位抑制効果、異なる剛性の復元ゴムに対する上部構造応答の違いについて確認するため、実大3層建物の動特性を模擬した試験体を用いて、X・Y方向それぞれの一軸加振とX・Y方向の二軸加振を行った。また、既往の研究⁹⁾では、水平二方向にすべりを伴う構造物は、一方向のみにすべる構造物よりも上部構造の応答が低下することが示されている。直置き型構造物においても同様の効果が期待されることから、この効果を確認するため、一方向加振と二方向加振の結果を加振方向ごとに比較した。

3.2 剛試験体による実験とその結果

a. 試験体の概要と加振条件

鋼製床フレームを剛接合により積み上げた図-3の剛試験体を用いて、すべり面の摩擦係数の面圧依存性を確認した。試験体は鋼製床フレームを積み上げた4層構造となっており、X方向とY方向の長さがそれぞれ2000mmと1000mm、各階床の質量は下側から順に431kg、472kg、517kg、518kgである。また、すべり層の柱脚は図-4に示すように6箇所あり、すべり面との接触面積は1箇所あたり400mm²で計2400mm²である。積層する床フレームの数を1層から4層にすることで試験体の質量を変化させ、すべり面に接する柱脚の平均面圧を1.8～8.1MPaの範囲で調節することができる。

試験体の加振には、周波数1.0Hz、最大加速度300cm/s²、最大速度（以下、PGV）85cm/sの正弦波を用いた。過大なすべり層の変位（以下、すべり変位）を抑制するため、加振方向（X軸）には図-4に示す配置で復元ゴムを取り付けた。図-5にその取り付け状況を示す。試験体には、最も下側にある床フレームの対角2箇所に加速度計を、すべり層の4隅に変位計を2台ずつ、復元ゴムの取り付け箇所（X方向2箇所・Y方向4箇所）

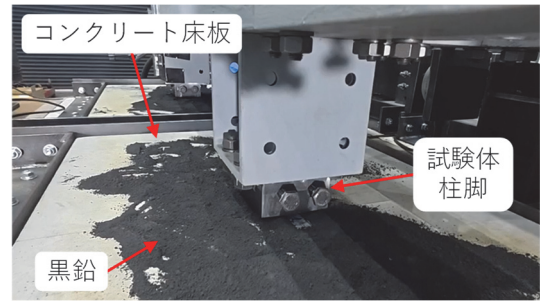


図-1 直置き型構造物のすべり面

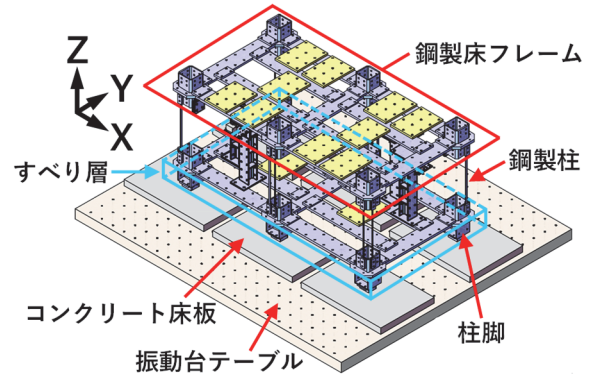


図-2 試験体外観図

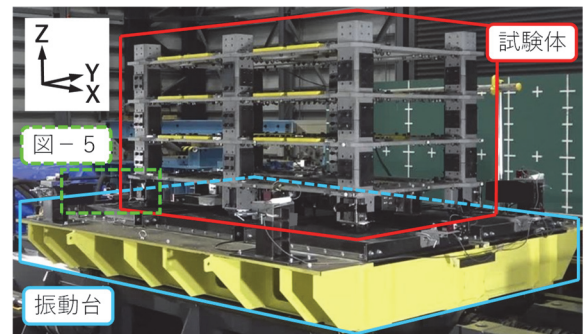


図-3 剛試験体の外観

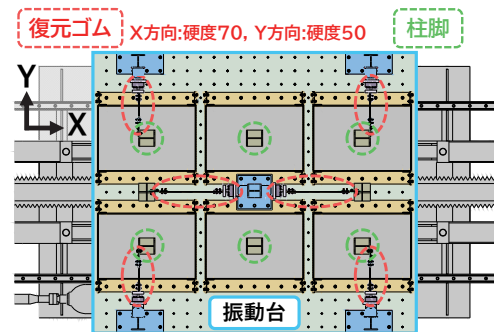


図-4 試験体すべり層平面図



図-5 すべり層に取り付けた復元ゴム

に復元力計測用のロードセルを配置して計測を行った。
すべり面の摩擦係数は、試験体各層の加速度と質量および復元ゴムの負担する復元力から、また、すべり層の速度（以下、すべり速度）は変位計によって計測したすべり変位から算出した。

b. 実験結果

実験で得られたすべり面の摩擦係数－すべり速度関係を図－6に示す。平均面圧 1.8～8.1MPa の範囲では、最大静止摩擦係数は 0.14～0.16 程度、動摩擦係数は 0.09～0.10 程度となり、摩擦係数の面圧依存性が一般的なすべり系支承材に比べて小さく、面圧が小さい場合でも安定したすべり挙動を取ることが確認できた。

3.3 1 層試験体による実験とその結果

a. 試験体の概要と加振条件

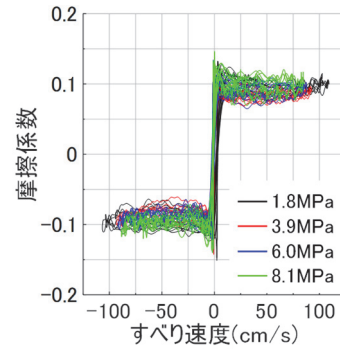
3.2 節の実験で使用した鋼製床フレームの一部を鋼製の柱によって接続し、図－7に示す 1 層の試験体を準備した。1 層試験体は剛試験体と同じ平面形状を有し、すべり層と 1 層目の質量はそれぞれ 502kg、494kg である。0.1～20.0Hz までのランダム波加振を行い、X 方向の 1 次固有振動数が 4.6Hz（一次固有周期 $T=0.22\text{s}$ ）、減衰定数が 0.3%であることを確認した。

すべり層には、図－4に示すように硬度 70 および硬度 50 の復元ゴスを X 方向と Y 方向にそれぞれ取り付けた。取り付け本数は X 方向が 2 本、Y 方向が 4 本である。復元ゴスは、既往の研究²⁾の手順に従って、PGV が 75cm/s の地震動に対して、等価摩擦係数 μ_e で表される最大復元力が 0.10 となるように設計した。この等価摩擦係数は、実験前に想定されていたすべり面の最大静止摩擦係数の 1/2 程度の値である。また、図－7に示すとおり、試験体には加速度計を各層対角 2 箇所、変位計をすべり層の 4 隅と 1 層の対角に 2 台ずつ、復元ゴムの復元力計測用のロードセルを復元ゴム取り付け箇所（X 方向 2 箇所・Y 方向 4 箇所）に配置して計測を行った。

1 層試験体を用いた実験では、X 方向のみの一軸加振と X・Z 方向の二軸加振をそれぞれ行った。入力波には、1995 年の兵庫県南部地震において神戸海洋気象台と JR 鷹取駅で観測された地震波、および 2016 年の熊本地震本震において KiK-net 益城で観測された地震波（以下、神戸波、鷹取波、益城町波と呼ぶ）を用いた^{6) 7)}。それぞれの波について、主軸方向となる X 方向以外は長周期成分を一部カットしている。入力波の詳細と加振方向との対応については表－1に示すとおりである。各入力波の加速度応答スペクトル ($h=5.0\%$) を、第二種地盤における L2 地震動による加速度応答スペクトルと合わせて図－8に示す。

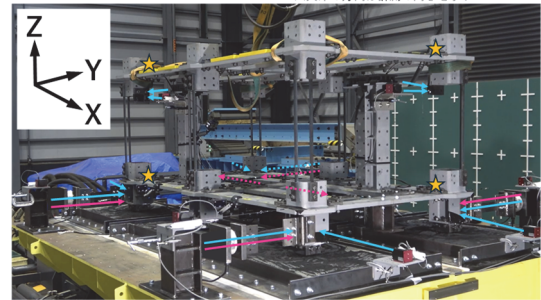
b. 実験結果

神戸波による加振時の上下動の有無による摩擦係数－すべり速度関係の比較を図－9に、1 層試験体と耐震構造物の最大層せん断力係数の比較を表－2に、各加振ケ



図－6 摩擦係数－すべり速度関係

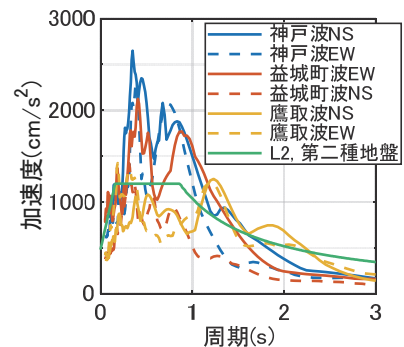
★加速度計3方向 ▲ワイヤ式変位計 ◆ロードセル
※矢印の方向は計測の向きを示す



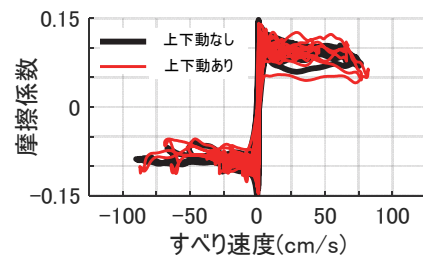
図－7 1 層試験体の外観

表－1 実験に使用した入力波

加振波	振幅倍率	PGV(cm/s)
神戸波 (X:NS)	100%	91
〃 (Y:EW)	100%	65
〃 (Z:UD)	100%	40
益城町波 (X:EW)	68%	92
〃 (Y:NS)	54%	45
〃 (Z:UD)	54%	25
鷹取波 (X:NS)	60%	74
〃 (Y:EW)	60%	31
〃 (Z:UD)	60%	10



図－8 入力波の加速度応答スペクトル ($h=5.0\%$)



図－9 摩擦係数－すべり速度関係の比較
(神戸波 100%)

表－2 1 層試験体と耐震構造物の最大層せん断力係数の比較

加振ケース	加振方向	直置き型構造物			耐震構造物 (X軸成分の加速度応答スペクトルより算出)		
		神戸波100%	益城町波68%	鷹取波60%	神戸波100%	益城町波68%	鷹取波60%
最大層せん断力係数 C_0	X	0.74	0.61	0.41	1.54	1.88	1.82
	X・Z	0.77	0.60	0.43			

ースの実験結果の一覧を表－3に示す。なお、実験結果は全て 30.0Hz のローパスフィルタ（以下、LPF）によって高周波成分をカットしている。表－2より、上下動なしの加振において、直置き型構造物の最大層せん断力係数が耐震構造物の値と比較して、神戸波・益城町波・鷹取波のそれぞれで 52%、68%、78%低減されている。ここで、耐震構造物の最大層せん断力係数は、各入力波の加速度応答スペクトル ($h=0.3\%$) における $T=0.22s$ の値から算出した。この結果から、直置き型構造物の応答低減効果が確認できた。また、上下動による最大層せん断力係数の差は、上下動がない場合に対して、神戸波・益城町波・鷹取波のそれぞれで+4.0%、-0.4%、+4.4%となり、概ね同程度の値であった。

上下動の有無によるすべり挙動への影響については、表－3に示すとおり、最大すべり変位の差が 10mm 以内、最大すべり速度の差が 3cm/s 以内、最大静止摩擦係数はほぼ同程度となり、残留すべり変位の差は 10mm 以内で、全ての加振ケースで設計許容値である 50mm を下回る 20mm 以下となった。なお、残留すべり変位の設計許容値は、免震建物において地震後の残留変位の許容値として設定されることが多い値と同程度に設定している⁸⁾。これらの結果は、3.2 節で示した摩擦係数の面圧依存性の低さと整合するものである。

3.4 3 層試験体による実験とその結果

a. 試験体の概要と加振条件

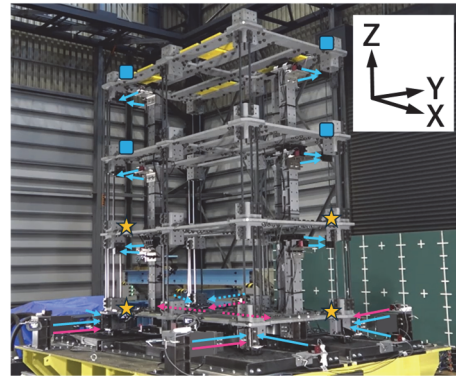
3.3 節の 1 層試験体に鋼製床フレームを 2 層分積層し、図－10 に示す 3 層試験体とした。平面形状は剛試験体と同じで、各階床の質量は下側から順に 502kg、506kg、506kg、494kg、各層の剛性は下層から順に 574 N/mm、494 N/mm、389 N/mm である。また、0.1～20.0Hz までのランダム波加振を行い、試験体の固有振動数は X・Y 方向ともに 1 次から 3 次でそれぞれ 2.2Hz（一次固有周期 $T=0.45s$ ）、6.2Hz、9.5Hz、減衰定数は X 方向が 0.5%、0.3%、0.3%、Y 方向が 0.8%、0.3%、0.3%であることを確認した。

すべり層に取り付ける復元ゴムは、異なる剛性の復元ゴムに対する上部構造応答の違いを確認するため、1 層試験体の場合と同様の方法²⁾で、等価摩擦係数 μ_e がそれぞれ 0.10 と 0.07 になる 2 種類を設計し、使用した。これらの値は、実験前に想定されていたすべり面の最大静止摩擦係数および実験中に計測された最大静止摩擦係数の 1/2 程度となるよう設定している。また、計測については、図－10 に示すように加速度計を各層の対角 2 箇所に、変位計をすべり層の 4 隅と 1～3 層の対角に 2 台

表－3 1 層試験体の実験結果一覧 ($\mu_e=0.10$)

加振ケース	加振方向	神戸波100%	益城町波68%	鷹取波60%
残留すべり変位 (mm)	X	6	7	12
	X・Z	10	16	16
最大すべり変位 (mm)	X	153	253	292
	X・Z	152	259	296
最大すべり速度 (cm/s)	X	91	114	89
	X・Z	88	114	89
最大静止摩擦係数	X	0.15	0.15	0.14
	X・Z	0.15	0.15	0.14

★ 加速度計3方向 ■ 加速度計2方向
 〰️ ワイヤ式変位計 〰️ ロードセル
 ※矢印の方向は計測の向きを示す



図－10 3 層試験体の外観

ずつ、さらに、復元ゴムの復元力計測用のロードセルをすべり層の X 方向 2 箇所と Y 方向 4 箇所に配置した。

3 層試験体を用いた実験では、X・Y 方向それぞれの一軸加振と X・Y 方向の二軸加振を行った。入力波には、表－1 の 3 つの地震波を用いている。

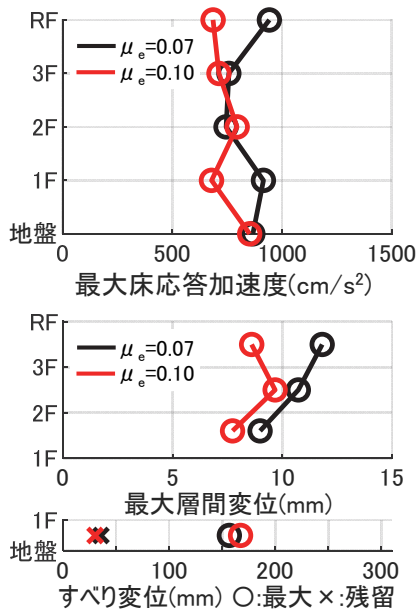
b. 実験結果（水平一軸加振）

$\mu_e = 0.07$ と $\mu_e = 0.10$ それぞれの復元ゴムを取り付けたときの、3 層試験体の神戸波による X 方向一軸加振における最大床応答加速度および最大層間変位、すべり変位を図－11 に、各加振ケースの最大層間変位、最大ベースシア係数、最大および残留すべり変位の一覧を表－4 に示す。なお、実験結果は全て 30.0Hz の LPF によって高周波成分をカットしている。

図－11 に示すとおり、神戸波による加振では各層の最大床応答加速度は 1000cm/s^2 を超えず、屋上床部分の応答加速度は入力加速度の 1.2 倍程度に収まった。他の加振ケースにおいても、各層の最大床応答加速度は 1000cm/s^2 を超えず、屋上床部分の応答加速度は最大で入力加速度の 1.7 倍程度に収まった。また、全ての加振ケースにおいて、上部構造の最大層間変形角が階高 3000mm を想定した場合で 1/200 より小さい値に収まり、表－4 に示すように、最大ベースシア係数は 0.30～0.37 程度となった。L2 地震動を上回る強さの地震動に対し

表－4 3 層試験体の実験結果の比較(X 方向一軸加振、 $\mu_e=0.07, 0.10$)

加振ケース	$\mu_e=0.07$			$\mu_e=0.10$		
	神戸波100%	益城町波68%	鷹取波60%	神戸波100%	益城町波68%	鷹取波60%
最大層間変位 (mm)	12.0 (3層目)	9.9 (3層目)	8.3 (3層目)	9.7 (2層目)	9.9 (2層目)	12.0 (2層目)
最大ベースシア係数 C_0	0.36	0.36	0.30	0.30	0.32	0.37
最大すべり変位 (mm)	157	224	256	168	220	309
残留すべり変位 (mm)	36	8	1	30	5	10

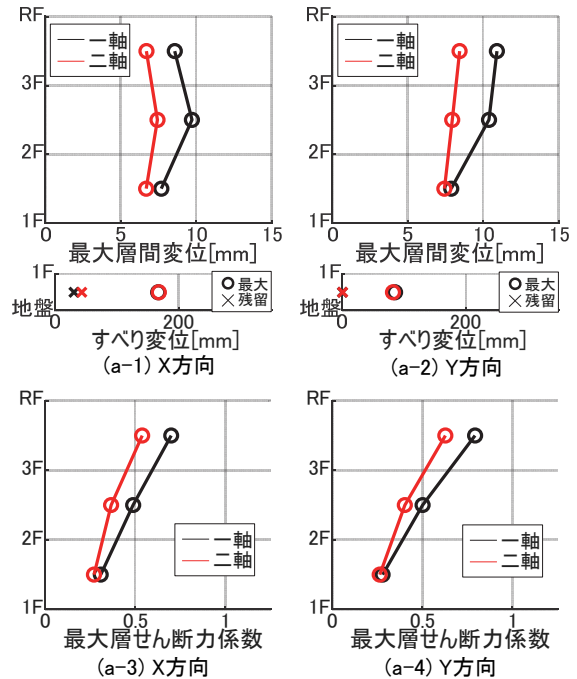
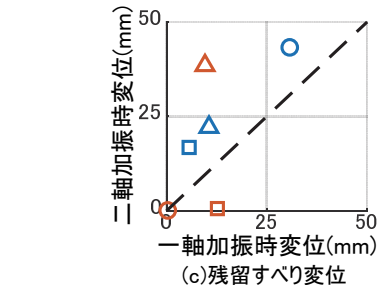
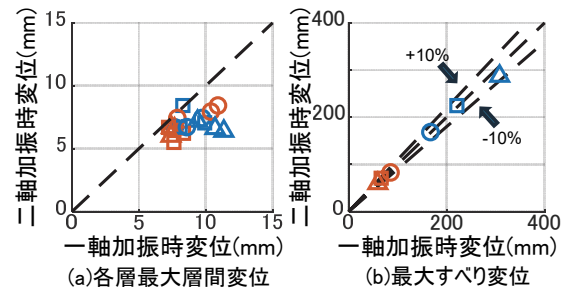
図－11 3 層試験体の実験結果
(X 方向一軸加振、神戸波 100%)

て、実建物の階高を想定した場合に各層の最大層間変形角が 1/200 に満たない値となったことから、3 層試験体においても直置き型構造物の応答低減効果が確認できた。すべり変位については、最大すべり変位・残留すべり変位ともに入力波ごとのばらつきが大きかったものの、全加振ケースで残留すべり変位が設計許容値である 50mm 以下となり、復元ゴムが十分な残留すべり変位抑制効果を有することが確認できた。一方で、復元ゴムの等価摩擦係数 μ_e の違いによる上部構造応答の明確な傾向の差は見られなかった。

c. 実験結果 (水平二軸加振)

X・Y 方向単独一軸加振の結果と水平二軸加振の結果を比較する。各加振は、すべり層に $\mu_e = 0.10$ の復元ゴムを取り付けて行った。神戸波による加振における各軸方向の最大層間変位、最大すべり変位、残留すべり変位および最大層せん断力係数を図－12 に示す。また、図－13 は、3 つの入力波による一軸加振時の最大応答を X 軸に、二軸加振時の最大応答を Y 軸に示したものであり、破線で示した対角線より下側の領域は、二軸加振時の応答が一軸加振時の応答を下回ることを示す。

図－12、図－13 より、最大層間変位と最大層せん断力係数に関しては、二軸加振時の値が一軸加振時の値と比べて概ね小さく、最大で約 4 割程度小さくなった。た

図－12 3 層試験体の実験結果の比較
(X・Y 各方向一軸加振、X・Y 二軸加振、神戸波 100%)図－13 一軸加振と二軸加振の最大変位の比較
○: 神戸波100%(X, Y) □: 益城町波68%(X, Y)
△: 鷹取波60%(X, Y)

だし、その差が小さい場合もあり、二軸加振による応答が一軸加振による応答を必ずしも下回るわけではない。このことは、一軸加振による実験時の上部構造の応答評

価が実地震時に対して概ね安全側になることに加え、二軸加振による効果を考慮しない解析的検討の結果に対して、実地震時の上部構造の応答が小さくなることを示している。また、最大すべり変位に関しては、神戸波、益城町波、鷹取波の全てにおいて、図-13(b)に示すとおり、一軸加振時と二軸加振時の値の差が±10%以内に収まった。一方で、残留すべり変位については図-13(c)に示すように一軸加振と二軸加振の差が顕著に表れたが、復元ゴムを取り付けることで全加振ケースの残留すべり変位が 50mm 以内に収まった。

次に、加振時に計測した復元ゴムの復元力と各層の加速度に基づいて、試験体の摩擦係数を算出した。神戸波による加振時の摩擦係数—すべり速度関係を図-14 に示す。二軸加振時の摩擦係数は、一軸加振時の値と比較して各方向とも 1～2 割程度減少した。二軸加振においては、X 方向と Y 方向の両方に地震力 F_x と F_y が作用し、静止摩擦力はその合力 $|F| = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ となる。そのため、すべり出す摩擦係数が一定であっても、得られた摩擦係数を両方向に分解すると、相対的に摩擦係数が低下することになる。この効果により、二軸加振時の上部構造の応答は一軸加振時より小さくなったと考えられる。

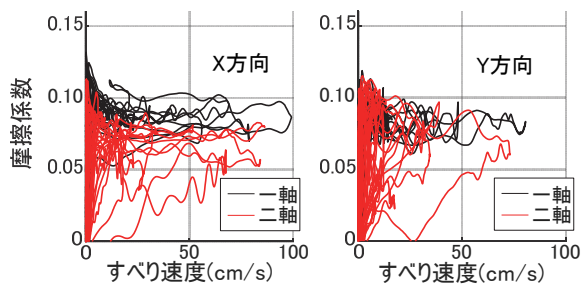


図-14 一軸加振と二軸加振における
摩擦係数—すべり速度関係(神戸波 100%)

4. まとめ

本報では、直置き型構造物の実用化に向けて、剛試験体、1 層試験体、および 3 層試験体を用いた振動実験を行った。実験により得られた、直置き型構造物の地震応答性状と応答低減効果に関する知見を以下に示す。

- i. すべり面に接する試験体柱脚部の平均面圧が 1.8 ～8.1MPa となる範囲では、最大静止摩擦係数および動摩擦係数の面圧依存性は小さい
- ii. 上下動の有無が、直置き型構造物の最大すべり変位、最大すべり速度、すべり面の摩擦係数および上部構造の最大層せん断力係数に及ぼす影響は小さい
- iii. 直置き型構造物は、国内で観測された極めて稀に発生するレベルの地震動に対しても十分な応答低減効果を有する
- iv. 直置き型構造物のすべり層に取り付けた復元ゴム

は、十分な残留変位抑制効果を有する

- v. 水平二軸加振時の 3 層直置き型構造物の応答は、一軸加振時と比較して、上部構造の最大層間変位と最大層せん断力係数が最大で約 4 割小さくなり、最大すべり変位は同程度、すべり面の摩擦係数は一軸加振時と比べて 1～2 割程度小さくなる
- vi. v. の結果は、一軸加振による実験時の上部構造の応答や二軸加振による効果を考慮しない解析的検討の結果と比較して、実地震時の直置き型構造物の応答が小さくなることを示す

【謝辞】

本報の内容は、科学研究費助成事業基盤研究 (A) (24H00344、代表者：榎田竜太) に基づく、(国) 東北大学との共同研究の成果の一部であり、2025 年度および 2026 年度日本建築学会大会学術講演会で発表した「直置き型構造物の強震動に対する地震応答低減効果の実験的検証 (その 1～その 4)」を再構成・加筆したものである。本研究の遂行にあたり、ご協力いただいた関係各位に深く感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) Enokida R., Nagae T., Seismic Damage Reduction of Structural System based on Nontraditional Sliding Interfaces with Graphite Lubrication, *Journal of Earthquake Engineering* 2018, 22(4), 666-686, 2018
- 2) Enokida R., Suppression of residual sliding displacement of flat-sliding structures by cushion stoppers, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 150(2021), 106905, 2021
- 3) 榎田竜太、池永晶容、長江拓也、中島正愛、「鋼とモルタルのすべり面をもつ柔・剛構造物の動摩擦特性と地震応答特性」、日本建築学会構造系論文集、No661, pp.527-534, 2011.3
- 4) 榎田竜太、長江拓也、池永晶容、稲美充顕、中島正愛、「黒鉛潤滑を応用した直置き型鋼構造建物柱脚の摩擦低減」、日本建築学会構造系論文集、No685, pp.435-444, 2013.3
- 5) S. Mokha et al., Verification of friction model of Teflon bearings under triaxial load, *Journal of Structural Engineering*, 119(1), pp.240-261, 1993
- 6) 防災科学技術研究所 (2019) 防災科研 K-NET・KiK-net, 防災科学技術研究所, <https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>
- 7) 気象庁、強震波形 (平成 7 年 (1995 年) 兵庫県南部地震), https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/hyogo_nanbu/index.html
- 8) 一般社団法人日本免震構造協会、「免震建物の維持管理基準 2022」、2022