

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：37401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420471

研究課題名(和文) 磁気復元力式免震支承の実用化に資する研究

研究課題名(英文) Study contributing to practical application of the seismic isolator with magnetic restoring force

研究代表者

片山 拓朗 (KATAYAMA, Takuro)

崇城大学・工学部・教授

研究者番号：80310027

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、磁石間に発生する磁力を復元力として用いる免震支承の試作機を製作した。提案支承では、支承内部に磁石を起磁力部とする磁気回路が形成され、効率的に磁気復元力が発生する。緩速往復載荷試験により、提案支承の磁気復元力は小変位では変位に比例し、中変位では概一定であり、大変位では変位の増加に連れて単調に減少することが確認された。自由振動試験により、提案支承の固有周期は、振幅が増加するにつれて単調に増加することが確認された。例えば、振幅が小変位より大きい場合、振幅が約4倍になると、固有周期は約2倍になる。また、振幅低減に有効な摩擦減衰と粘性減衰が発生することが確認された。

研究成果の概要(英文)：Prototypes of the seismic isolator which uses magnetic force generating between magnets as restoring force were made in this study. In the isolator, a magnetic circuit with magnets as a magnetomotive force part is formed inside the isolator, and a magnetic restoring force is generated efficiently.

By slow reciprocating loading tests, it was confirmed that the magnetic restoring force of the isolator is proportional to the displacement in small displacement, is substantially constant in medium displacement, and decreases monotonously in large displacement. By free vibration tests, it was confirmed that natural period of the isolator monotonically increases as the amplitude increases. For example, if the amplitudes are larger than the small displacement, the natural period will be approximately doubled when the amplitude is about 4 times. In addition, it was confirmed that frictional damping and viscous damping, which are effective for reducing the amplitude, respectively occur.

研究分野：振動工学，耐震工学，数値計算

キーワード：免震支承 磁石 復元力 転がり すべり

1. 研究開始当初の背景

2011年3月の東北地方太平洋沖地震では、大きな加速度が長時間継続する地震動とこれに伴う長周期地震動により、住宅、高層建築物、橋梁及びプラントなどの被害は広範囲に及んだ。南海トラフにおいては、東海・東南海・南海3連動の宝永地震(1707年)を上回る領域を震源域とする巨大地震の発生が予想されている。さらに、活断層型地震の発生が予想される活断層が日本の各地に存在する。

構造物の地震時安全性を確保する方法としては構造物の耐震化が一般的である。構造物に発生する変位や加速度を小さくする必要がある場合は、制震化や免震化が有効になる場合がある。特に、大規模災害時の救急救命の拠点となる医療施設や避難・救助及び物資供給のための緊急輸送道路の橋梁などのように高い地震時安全性を必要とする場合は、上部構造と下部構造と間に免震支承とダンパーを備える免震化が有効である。

大型建築物や長径間橋梁の免震化などでは積層ゴム支承が広く使われている。積層ゴム支承は、反力が大きな重量構造物では固有周期の伸長が容易であるが、反力が小さな軽量構造物では固有周期の伸長は容易でない。大きな加速度が長時間継続するような地震動や長周期地震動などでは応答変位が大きくなる場合がある。

一方、半導体などの製造装置や住宅などの軽量構造物の免震化では転がり支承、復元装置及びダンパーを併用する方法などがある。復元装置としてはコイルスプリングや積層ゴム支承が用いられる。この方法では多種の装置を併用するため設置費用が高くなるなどの課題がある。

2. 研究の目的

復元力が変位に比例する積層ゴム支承を使用する免震構造は、振幅に拘わらず固有周期が一定である線形振動系である。そのような線形振動系の共振条件は固有周期と外乱の周期の一致のみである。ただし、積層ゴム支承では変位が大きくなるとゴムのひずみ硬化により固有周期が僅かに減少する場合がある。

変位の増加に連れて復元力の接線剛性が単調に減少するような振動系は、振幅の増加に連れて固有周期が単調に増加する非線形振動系と考えられる。そのような非線形振動系の共振条件は、固有周期と固有周期に対応する固有振幅がそれぞれ同時に外乱の周期と振幅に一致することである。地震動に限れば、このような共振条件になることは極稀であると考えられる。

免震理論が説明するように、一般的な地震動に限れば、約2秒以上の固有周期においては、固有周期が長くなるほど応答加速度は小さくなる。振幅の増加に連れて固有周期が単調に増加する非線形振動系では、固有周期の

長周期化によって大振幅の地震動における応答加速度が小さくなると考えられる。

このように、変位の増加に連れて復元力の接線剛性が単調に減少し、振幅の増加に連れて固有周期が単調に増加する非線形振動系は、共振が起こり難く、大振幅の地震動において加速度応答が小さくなるなどの免震上の利点を有すると考えられる。本研究では、そのような非線形振動系の免震構造を実現するために、永久磁石間の磁気吸引力を利用して変位の増加に連れて復元力の接線剛性が単調に減少する免震支承の基本構造、復元力特性、自由振動特性について研究を行った。

3. 研究の方法

永久磁石間の磁気吸引力を復元力として利用する免震支承の基本構造を検討するため、転がり免震支承、一方向すべり免震支承及び全方向すべり免震支承を製作し、それらの磁気特性、復元力特性及び自由振動特性を調べた。以下に各免震支承の基本構造を示す。

(1) 転がり免震支承の基本構造

図1は転がり免震支承の基本構造及び水平方向の外力 H が作用し変位 u が生じた状態を表す。図(a)と図(b)はそれぞれ平面図と中央断面図である。以下、本文中の数字1~8は図中の符号を示す。転がり免震支承は円板状の保持器4に収められた多数の鋼球2及び鋼球と保持器を上下に挟む円板状の上支承板1と下支承板3で構成する。保持器4は保持器本体4A、上カバー4B及び下カバー4Cで構成する。平面図の上側は上支承板の上面が見える状態を示し、下側は上支承板を省略した保持器と鋼球の上面が見える状態を示す。

上支承板と下支承板の中央にはそれぞれ円板状の上磁石5と下磁石8を配置し、保持器

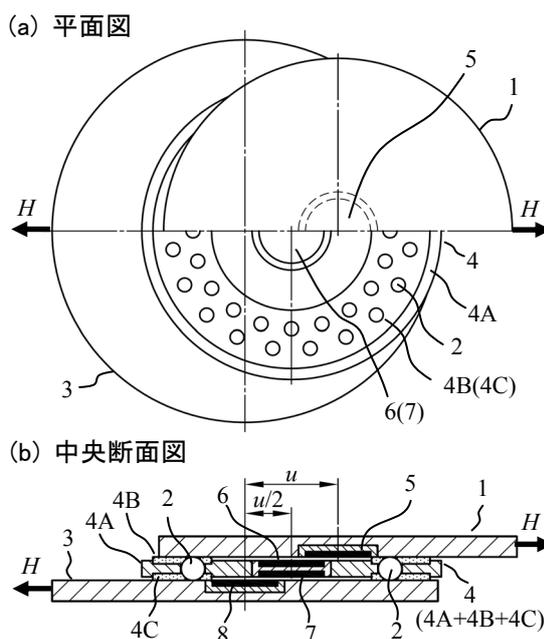


図1 転がり免震支承

本体の中央には円板状の中間上磁石 6 と中間下磁石 7 を上下方向に並べて配置する。変位が生じない状態において、4 個の磁石 5~8 は互いに鉛直方向に吸引する向きに取り付けられる。例えば上側の磁石の下面が S 極とすると下側の磁石の上面が N 極となるように、磁石は配置される。

鋼球は保持器本体の孔の中で滑らかに回転できるように且つ鋼球の上端と下端がそれぞれ上支承板の下面の軌道面（以下、上軌道面と略す。）と下支承板の上面の軌道面（以下、下軌道面と略す。）に接触するように格納される。図のように上支承板と下支承板に一对の水平方向の外力 H が作用すると、鋼球は上軌道面上及び下軌道面上を転がり、上カバーと上軌道面及び下カバーと下軌道面は摺動し、上支承板と下支承板の間に水平方向の変位 u が生じる。

(2) 一方向すべり免震支承

図 2 は一方向すべり免震支承の基本構造を示す変位直角方向の断面図である。以下、本文中の数字 1~9 は図中の符号を示す。一方向すべり免震支承は、上沓 1、中間沓 2、下沓 3 を隣り合う沓が互いに水平に摺動できるように、鉛直方向に重ねて構成する。上沓は上沓本体 1、第一磁石 4、第二磁石 5、上継鉄 6 及び上側摺動板 8 で構成する。中間沓は中間沓本体 2、第一磁石 4、第二磁石 5、上側摺動板 8 及び下側摺動板 9 で構成する。下沓は下沓本体 3、第一磁石 4、第二磁石 5、下継鉄 7、下側摺動板 9 で構成する。図は各沓を重ねる前の状態を示し、重ねた状態では上側摺動板と下側摺動板が接触し、上下に隣り合う磁石は隙間を持って対面する。

各沓の第一磁石 4 の上面と下面はそれぞれ S 極と N 極であり、各沓の第二磁石 5 の上面と下面はそれぞれ N 極と S 極である。上沓の上継鉄 6 と下沓の下継鉄 7 はそれぞれ第一磁石 4 と第二磁石 5 を繋ぎ、各第一磁石と各第二磁石を起磁力部とする磁気回路を形成する。各沓本体の材質は非磁性体である。上沓と中間沓及び中間沓と下沓が互いに摺動する点並びに継鉄で磁石同士を繋いで磁気回路を形成

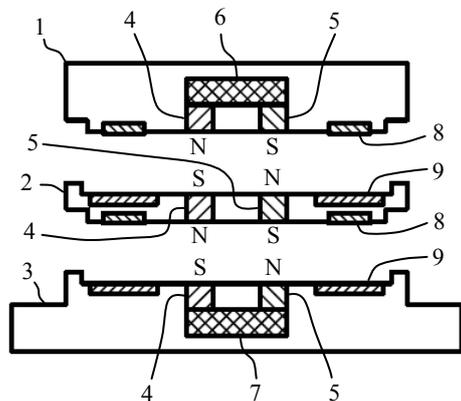


図 2 一方向すべり免震支承

する点において、一方向すべり免震支承は前述の転がり免震支承と異なる。

(3) 全方向すべり免震支承の基本構造

図 3 は、全方向すべり免震支承の基本構造及び水平方向の外力 H が作用し変位 u が生じた状態を表す。図(a)と図(b)はそれぞれ平面図と中央断面図である。以下、本文中の数字 1~12 は図中の符号を示す。全方向すべり免震支承はそれぞれ円板状の上沓(1+2+3+4)、2 個の中間沓(5+6+7+8)及び下沓(9+10+11+12)を、隣り合う沓が互いに任意の水平方向に摺動できるように、鉛直方向に重ねて構成する。よって、支承は任意の水平方向に変位できる。

上沓は上部磁石 1、上部磁石を囲む上部非磁性体 2、上部磁性体 3 及び上部凸側摺動体 4 で構成する。上沓の下面は下に凸の形状であり、上部凸側摺動体 4 は凸の形状の先端にある。

中間沓は中間磁石 5、中間磁石を囲む中間非磁性体 6、中間凹側摺動体 7 及び中間凸側摺動体 8 で構成する。中間沓の上面は上に凹の形状であり、中間凹側摺動体は凹の形状の窪みの底にある。中間沓の下面は下に凸の形状であり、中間凸側摺動体は凸の形状の先端にある。

下沓は下部磁石 9、下部磁石を囲む下部非磁性体 10、下部凹側摺動体 11 及び下部磁性体 12 で構成する。下沓の上面は上に凹の形状であり、下部凹側摺動体は凹の形状の窪みの底にある。

上部磁石、中間磁石、下部磁石の磁極面の形は円形であり、各磁石は鉛直方向に互いに吸引するように配置される。隣り合う磁石の水平面内の投影形状は、中立時においては重なり、変位時においては部分的に重なる。磁石が部分的に重なる状態では隣り合う磁石間に磁気吸引力が発生し、磁気吸引力の水平分力が支承の変位 u を元に戻す復元力となる。

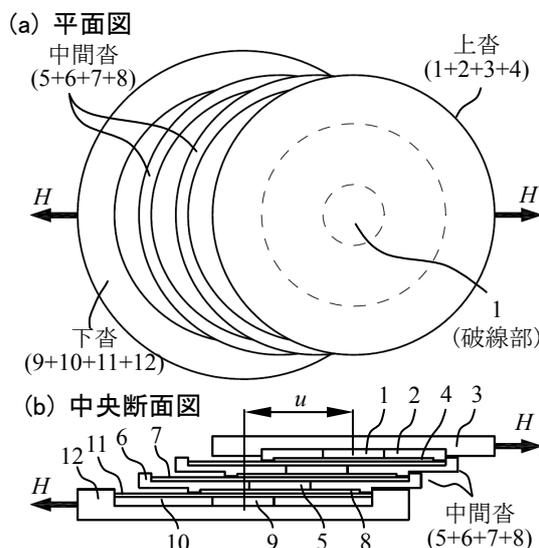


図 3 全方向すべり免震支承

4. 研究成果

(1) 転がり免震支承

最大搭載質量 8000 kg・終局変位 250mm の転がり免震支承を製作し、試作機の復元力特性を緩速往復载荷試験で調べ、自由振動特性を自由振動試験で調べ、自由振動試験で得られた自由振動特性を自由振動解析で検証した。

表1と写真1に転がり免震支承の諸元と外観を示す。写真では上支承板1、下支承板3、リテーナ4が確認される。磁石は直径140mm×厚15mmのネオジム磁石である。上支承板と下支承板は耐摩耗性鋼板であり、鋼球は鋼炭素クロム軸受鋼の転がり軸受鋼球である。保持器本体はアルミニウム合金とした。

図4は付加質量1092kgを搭載した試作機の外力—変位曲線である。図中の記号A、Y、B、C、Z及びDは曲線の特徴を説明するための代表点を示し、これらの記号に付けた下付き添え字 + は速度 $\dot{u} = du/dt$ が正の場合の曲線上の位置を示し、下付き添え字 - は速度 \dot{u} が負の場合の曲線上の位置を示す。

速度の正負に拘わらず、変位が約±10mmを超えない範囲では変位の増加に比例して外力は増加し、変位が約±10mmを超えると変位が約±10mmを越えない場合に比べて変位の増加に対する外力の増加の割合は減少し、外力は点B₊又は点C₋で極大となる。変位が点B₊又は点C₋を超えて増加すると、外力は僅かに減少した後再び増加し、点Y₊又は点Z₋で外力は最大となる。変位が点Y₊又は点Z₋を超えて増加すると、外力は徐々に減少し、変位が終局変位に近づくほど変位の増加に対する外力の減少の割合が大きくなる。

図5は、図4の履歴曲線から摩擦力 $F=68\text{N}$ を取り除いた復元力—変位曲線である。図中の

表1 転がり免震支承の諸元

名称・符号	寸法 (mm)	質量 (kg)	材料
上支承板・1	φ770×t35	128	耐摩耗鋼板
下支承板・3	φ830×t35	140	耐摩耗鋼板
鋼球・2	s φ50.8	0.535/個	SUJ2
保持器本体・4A	φ644×t45	20.6	A5052P
上カバー・4B	φ596×t10	2.3	POM
下カバー・4C	φ596×t10	2.3	POM
磁石・5~8	φ140×t15	-	ネオジム磁石

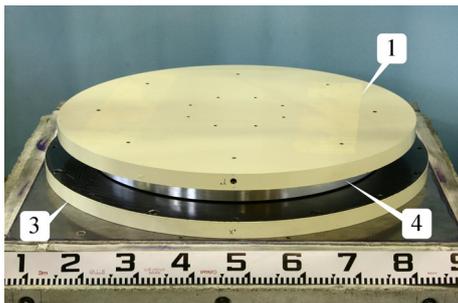


写真1 転がり免震支承の外観

点A、点Y、点B、点C、点Z及び点Dは図4で示した代表点と同じである。図では、速度の正負の違いによって、復元力の大きさに違いは見られない。変位が約±10mmを超えない範囲では復元力は変位に比例し、変位が±10mmを超えると変位の増加に対する復元力の増加の割合は変位が約±10mmを超えない場合に比べて減少し、変位約±32mmで復元力は極大となる。変位が約±32mmを超えて増加すると、復元力は一旦僅かに減少した後増加し、変位約±100mmで復元力は最大となる。変位が約±100mmを超えて増加すると復元力は減少し、変位が終局変位に近づくほど変位の増加に対する復元力の減少の割合が大きくなる。

図5の破線の折れ線(Eq. (1))は次式で示す近似復元力—変位式である。

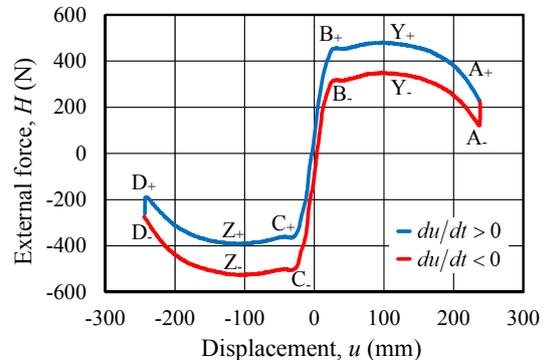


図4 転がり免震支承の外力—変位曲線

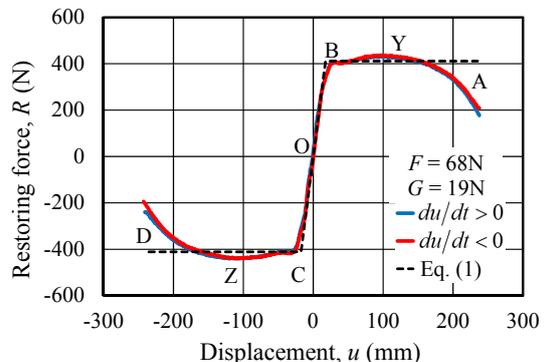


図5 転がり免震支承の復元力—変位曲線

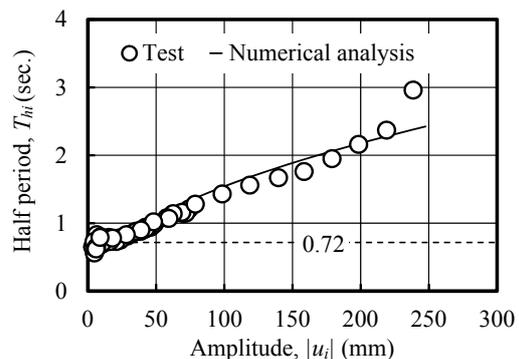


図6 転がり免震支承の半固有周期

$$R = \begin{cases} R_0, & u < u_0 \\ k_0 u, & -u_0 \leq u \leq u_0 \\ -R_0, & u < -u_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$u_0 = \frac{R_0}{k_0} \quad (2)$$

ここに R_0 、 k_0 及び u_0 はそれぞれB点とC点に相当する極大復元力、初期接線剛性及び線形限界変位である。図では、 R_0 と k_0 の値はそれぞれ411Nと23.5N/mmである。

式(1)の近似復元力—変位式を用いると、試作機で支持された質量 m の非減衰振動系の半固有周期 T_h と振幅 u_A の関係は次式で表される。

$$T_h = \sqrt{\frac{m}{k_0}} \left\{ 2\lambda + \pi - 2 \tan^{-1}(\lambda) \right\} \quad (3)$$

$$\lambda = \sqrt{2 \left(\frac{u_A}{u_0} - 1 \right)}, \quad u_0 < u_A \quad (4)$$

ここに、 λ は無次元振幅 u_A/u_0 を変数とする振幅関数である。

図6は付加質量1092kgを搭載した試作機の自由振動試験で得られた半固有周期 T_{hi} と振幅 $|u_i|$ の関係である。式(3)の近似半固有周期を併記する。式(3)の質量は $m=1220\text{kg}$ である。図より、付加質量を搭載した試作機の固有周期は、振幅が増加するに連れて単調に増加することが確認される。振幅50mmと振幅200mmの半固有周期はそれぞれ約1sと約2sであり、振幅が4倍になると半固有周期が2倍に

表2 一方向すべり免震支承の諸元

名称・符号	寸法 (mm)	質量 (kg)	材料
上沓本体・1	326×75×830	55	A5052P
中間沓本体・2	326×35×830	26	A5052P
下沓本体・3	430×75×830	73	A5052P
磁石・4,5	15×15×150	-	ネオジム磁石
継鉄・6,7	100×15×150	1.8	SS400
上側摺動板・8	40×10×440	-	PTFE
下側摺動板・9	65×4.5×730	1.7	SUS304

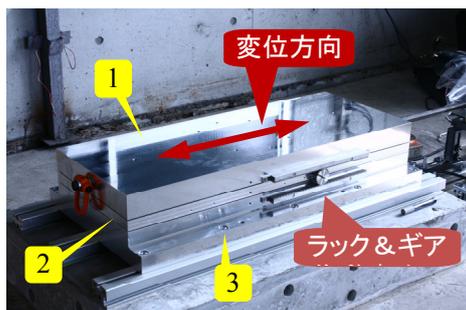


写真2 一方向すべり免震支承の外観

なることが確認される。また、式(3)の近似半固有周期は自由振動試験の結果と良く対応していることが確認される。

以上より、振幅の増加に連れて固有周期が単調に増加する非線形振動系を実現するためには、図5の破線の折れ線で示すような復元力特性又はこれに似た復元力特性を持つ免震支承を実現すればよく、試作機はそのような免震支承の一つであることが確認された。ただし、国内で調達できるネオジム磁石の最大直径は200mmであり、実用的な終局変位に対応できる直径300mm程度のネオジム磁石を製造するためには、大口徑の磁石の着磁装置の開発が課題である。

(2) 一方向すべり免震支承

最大搭載質量 8000kg・終局変位 250mm の一方向すべり免震支承を製作し、復元力特性を緩速往復載荷試験で調べた。

表2と写真2に一方向すべり免震支承の諸元と外観を示す。各沓本体の材料はアルミニウム合金である。磁石は四角形断面の棒状ネオジム磁石とした。上側摺動板はフッ素樹脂板 (PTFE) とし、下側摺動板は磨きステンレス鋼板 (SUS304) とした。摺動部はシリコンオイルで潤滑した。写真では上沓1、中間沓2及び下沓3が確認される。上沓と下沓にラックを取り付け、中間沓にギアを取り付け、ラックとギアを噛み合わせることで上沓、中間沓及び下沓の変位を同調させる。

図7は、負荷質量を搭載していない状態の外力—変位曲線である。変位が小さい場合は、変位の増加に連れて外力が増加すると共に接線剛性が減少し、外力は変位が約100mmで最大となる。変位が約100mmを超えると、変位の増加と共に外力が徐々に減少することが確認できる。初期接線剛性は約20.6N/mmである。

速度が正の場合 ($du/dt > 0$) と速度が負の場合 ($du/dt < 0$) の外力の差は約100Nであり、上沓の自重と吸引力の合計は約5000Nであることから、摩擦係数は約0.01と考えられる。図7より摩擦力を取り除いた復元力—変位曲線では、速度が正の場合と負の場合の曲線は重なった。

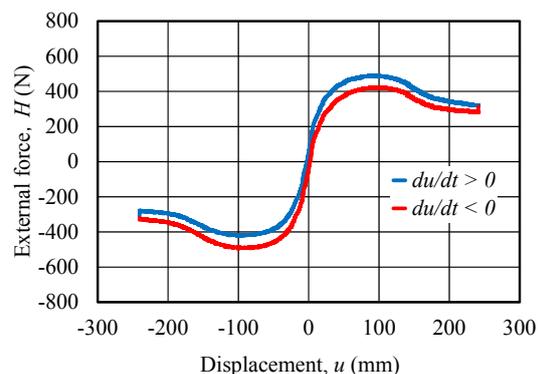


図7 一方向すべり免震支承の外力—変位曲線

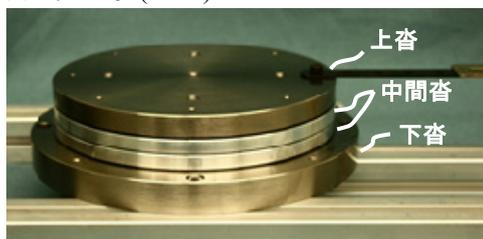
(3) 全方向すべり免震支承

最大搭載質量 500kg・終局変位 120mm の全方向すべり免震支承を製作し、水平反力特性を緩速復元荷実験で調べた。

写真3は全方向すべり免震支承の中立時及び終局変位時の外観である。使用した磁石は直径 50mm×厚 10mm のネオジウム磁石である。凸側摺動体は厚 1.5mm のフッ素樹脂シートであり、凹側摺動体は厚 1mm の磨きオーステナイト系ステンレス鋼板とした。各沓本体はアルミニウム合金である。

図8は付加質量を搭載しない状態の外力—変位曲線である。図には、中間沓を1個とするすべり2層の試作機の履歴曲線及び中間沓を省略するすべり1層の試作機の履歴曲線を併記する。すべり1層、すべり2層及びすべり3層(写真3)の各試作機の限界変位はそれぞれ30mm、60mm、90mmであり、試験時の各試作機の最大変位(最大変位/磁石直径)はそれぞれ25mm(0.5)、50mm(1.0)、75mm(1.5)とした。磁石の直径は $D=50\text{mm}$ である。図8より、すべり層数を増加させることにより、外力すなわち復元力を大きく減少させることなく最大変位を増加できることが確認される。

(a) 中立時 ($u = 0$)



(b) 終局変位時 ($u = 90\text{mm}$)

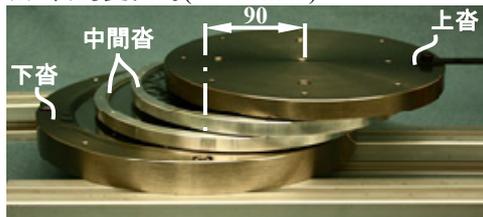


写真3 全方向すべり免震支承の外観と変形

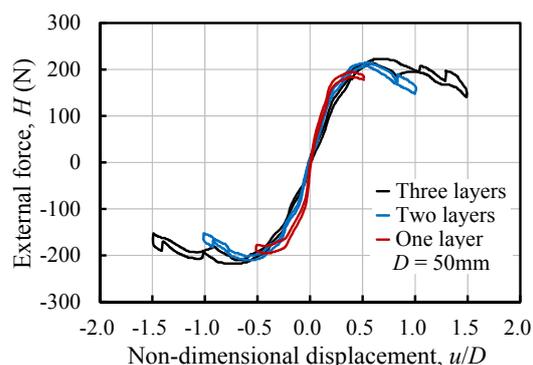


図8 全方向すべり免震支承の外力—変位曲線

(4) まとめ

転がり免震支承では、復元力が小変位では変位に比例し、中変位では概ね一定であり、大変位では減少すること及び振幅の増加に連れて固有周期が単調に増加することが確認された。一方方向すべり免震支承及び全方向すべり支承では、共に転がり免震支承と類似の復元力特性を持つことが確認された。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 6件)

- ① 片山拓朗、片山花、磁石式多層すべり免震支承の水平反力特性、土木学会、2017年9月11-13日、九州大学(福岡県、福岡市)(予定)
- ② 片山拓朗、磁石を備えるすべり免震支承の水平力—変位履歴曲線、日本建築学会、2017年9月1日、広島工業大学(広島県、広島市)(予定)
- ③ 片山拓朗、大型ネオジウム磁石を備える転がり免震支承の自由振動特性、土木学会、2016年9月8日、東北大学(宮城県、仙台市)
- ④ 片山拓朗、大型ネオジウム磁石を備える転がり免震支承の自由振動、日本建築学会、2016年8月25日、福岡大学(福岡県、福岡市)
- ⑤ 片山拓朗、大型ネオジウム磁石を備えた転がり免震支承の磁気復元力、日本建築学会、2015年9月4日、東海大学(神奈川県、湘南市)
- ⑥ 片山拓朗、3個の磁石を備える転がり免震支承に関する実験的研究、日本建築学会、2014年9月12日、神戸大学(兵庫県、神戸市)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1件)

名称：支承装置及び支承システム

発明者：片山拓朗

権利者：学校法人君が淵学園

種類：特許

番号：特願 2016-243552

出願年月日：平成 28 年 12 月 15 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

研究代表者

片山拓朗 (KATAYAMA, Takuro)

崇城大学・工学部・教授

研究者番号：80310027