

2023年度（第15回）免震構造・制振構造に関わる研究助成の成果報告

パラレルリンク機構を用いた鉛直免震システムの開発

富澤徹弥（明治大学） 山田学（日立プラントコンストラクション）

佐藤栄児，福井弘久（防災科学技術研究所） 矢部隆太郎（明治大学）

1. 研究背景および目的

兵庫県南部地震など、大地震による被害を契機として、耐震技術は目覚ましい発展を見せている。その代表的手法のひとつである免震技術は様々な建物に広く普及し、盛んな研究・開発が進められている。建物における現在の免震システムは主に水平動のみを免震対象としており、鉛直動は免震対象とされていない場合がほとんどである。しかしながら、近年では新潟県中越地震や熊本地震などの大きな鉛直動の観測に加え、鉛直動による医療設備や精密機器等の被害等も懸念されている¹⁾。今後の発生が確実視されている首都直下地震等では大きな鉛直動の発生が予測され、従来の水平動に加え、鉛直動への対策もより重要になる。

既往の鉛直免震システムとしては、空気ばねやコイルばねを利用したものが挙げられる。これらの多くは、精密装置や美術工芸品を対象としており、免震対象が軽量であることから小規模な装置となっている上、用途が限られている。建物全体での3次元免震としては、国内の集合住宅²⁾のほか、国外の大学病院³⁾での事例のみである。集合住宅の事例では、水平免震として積層ゴムを、鉛直免震として空気ばねを使用している。大学病院の事例では、水平免震として3重摩擦式振り子支承を、鉛直免震としてコイルばねと粘性ダンパーを組み合わせたシステムを使用している。建物全体での3次元免震の事例が少ない要因として、大荷重を支持し、鉛直方向に長周期化を図ることで生じる大きな静的たわみやロッキング現象の発生が挙げられる。

これらの問題に対して、様々な研究・開発が行われているが、多くは水平免震と鉛直免震が独立した構成となっている。よって、鉛直免震機構部にせん断力を直接作用させないための、鉛直変位に追従可能なせん断力抵抗要素が必要となることが課題として挙げられる。これらの静的たわみ、せん断力抵抗要素に関する課題に対して、筆者らは非線形のばね特性やあらゆる方向に復元力を有するパラレルリンク機構を提案している^{4),5)}。

このパラレルリンク機構に対し、筆者らは、摩擦係数の低減とともに支持荷重の増大を狙いとし、シ



図1 本研究の縮小装置



図2 アクキュレータ

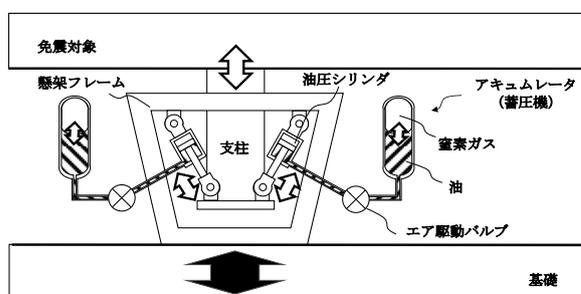


図3 懸架型パラレルリンク機構の動作原理模式図

リンダの圧力方式を空圧から油圧へと改良した懸架型パラレルリンク機構を開発している。その縮小装置を図1に示す。本機構は油圧シリンダと図2に示すアクキュレータ（以下、「ACC」と呼ぶ）を連結することで構成される。ACCに充填する窒素ガスの圧力を、支持荷重によって一意に決まる油圧の1/4～9/10の範囲内で変化させることでシリンダ剛性を任意に調節でき、鉛直変位に対するシリンダの傾きの変化により非線形の荷重変位関係が得られる。これらにより、静的たわみを発生させずに大荷重支持と低剛性化を両立することができる。また、回転に追従可能な接合のみを用いて全体を構成しているため、シリンダの軸変位のみで機構に生じる様々な変位に対応が可能であり、水平方向の復元力も有する。これにより、本機構はせん断力抵抗要素の省略が期待でき、シリンダには引張軸力のみが生じるため、座屈の心配もない。本機構の動作原理の模式図を図3に示す。ACC内に充填された窒素ガスが油により圧縮され、膨張・収縮を繰り返すことで油圧シリンダが空気ばねのような働きをし、免震を行う。本研究では機構の免震装置としての性能、実用性を把握することを目的とする。

2. 油圧シリンダ単体の要素試験

縮小装置について物性値の把握および解析モデルを構築することを目的に、油圧シリンダ単体の要素試験を行った。試験の様子を図4に示す。本試験では動的アクチュエータにより正弦波の強制変位を入力し、試験機により変位を、ロードセルにより出力荷重を、圧力センサによりシリンダ圧をそれぞれ測定する。シリンダとACCを接続し、油圧は2.0 [MPa]で一定の下、ACCの初期ガス圧を調節し、シリンダ剛性を変化させる。初期ガス圧は0.40, 0.92, 1.44 [MPa]、加振振動数は0.1, 1.0, 5.0, 10.0 [Hz]とする。また、各加振振動数における加振振幅はそれぞれ80, 50, 5, 1 [mm]とする。

試験により得られた荷重-変位関係の例として、初期ガス圧1.44 [MPa]、加振振動数0.1 [Hz]の結果を図5に示す。一般に、油圧シリンダの動特性は、ばね要素、減衰要素、摩擦力要素を並列配置することでモデル化できる。空気圧縮をばね力とする際のシリンダ剛性 k は中立位置でのACCガス容量 V 、絶対油圧 P 、シリンダ断面積 A を用いて次式で表される⁶⁾。

$$k = \frac{\gamma PA^2}{V} \quad (1)$$

係数 γ は系の圧力と容積間の関係式 $PV^\gamma = \text{const.}$ （ポアソンの法則）にて規定される定数であり、理想的な断熱変化であるならば $\gamma = 1.4$ である。試験結果から求めた係数 γ 、減衰係数 c 、摩擦力 f 、摩擦係数を表1に示す。ここで、5.0, 10.0 [Hz]加振ではシリンダロッドと加振機の可動部の質量に起因する慣性力により荷重変位関係が負剛性となったため、物性値の算出には主に0.1, 1.0 [Hz]の試験データを使用した。構築したシリンダ単体モデルに関し、試験と同条件の正弦波変位を入力した荷重変位関係と試験値の比較を図6に示す。パラメータによっては試験値とずれが生じる解析ケースもあるが、解析値は試験値を大よそ再現しており、油圧シリンダ単体の解析モデルには十分な妥当性があると判断できる。

3. 縮小装置の鉛直地震動に対する地震応答解析

3.1 解析概要

前章でその妥当性を確認した油圧シリンダ単体の解析モデル6本を幾何学的に組み合わせた、図7(b)に示す縮小装置全体の解析モデルに対して地震応答解析を行う。動的出力に摩擦力を含む系において、地動入力に対する応答解析を行う際の運動方程式は、

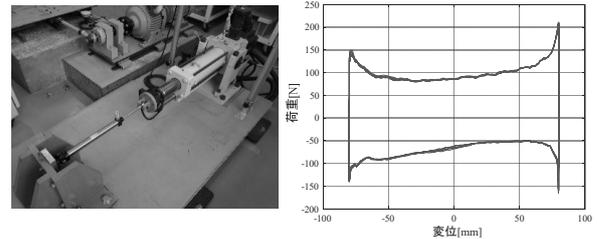
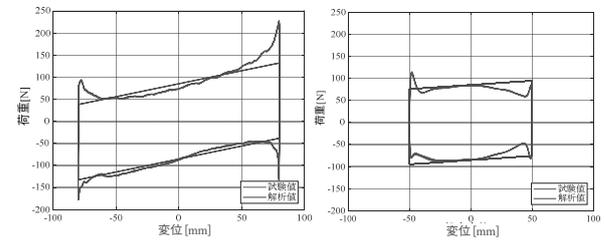


図4 要素試験の様子 図5 1.44MPa, 0.1Hz加振

表1 各物性値の算出方法及と算出値

物性値	算出方法	算出値
γ	$PV^\gamma = \text{const.}$ より、離散二点のデータを比較	1.4342
c	荷重速度関係の勾配	引張方向 0.1489, 0 [N/mm/s]
		圧縮方向 0.1823, 0 [N/mm/s]
f	荷重変位関係における荷重差	摩擦力 85.341 [N]
		摩擦係数 0.1811



(a) 0.40MPa, 0.1Hz (b) 1.44MPa, 1.0Hz

図6 試験値と解析結果の比較

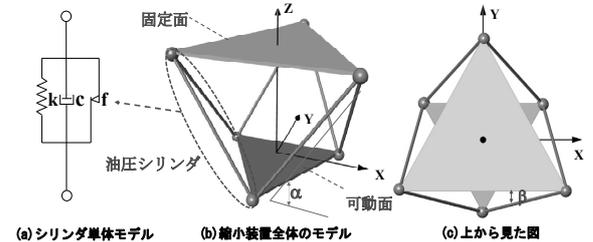


図7 懸架型平行リンク機構の動的解析モデル

地動加速度 \ddot{z}_0 、ばね力 f_k 、減衰力 f_c 、摩擦力 f_f として以下のように表される⁷⁾。

$$\text{停止時} \quad \dot{z} = 0, \quad z = \text{const.} \quad (2)$$

$$\text{運動時} \quad m(\ddot{z} + \ddot{z}_0) + f_k + f_c + f_f \text{sign}(\dot{z}) = 0 \quad (3)$$

$$\text{切替え条件} \quad |m\ddot{z}_0 + f_c + f_k| > f_f \quad (4)$$

解析手法には線形加速度法を用い、各出力要素について幾何学的関係から次ステップにおける変位量や速度の関数系として導出する。入力地震動および解析パラメータを表2に示す。入力地震動は直下地震の鉛直動を中心にその原波とした。解析パラメータは要素試験による試験値を含み、応答性状を把握するための設定値として剛性 k を $k_1 \sim k_4$ の4種類、摩擦係数 μ を $\mu_1 \sim \mu_3$ の3種類、減衰係数 c を

c1～c3 の 3 種類に設定する。

荷重支持を考慮すると、ある形状においてばね力の鉛直成分と鉛直荷重が釣合った状態が初期状態となる。このとき、ばね要素自体が傾いていく本機構では各可動面位置において荷重に対する必要軸力が変動する問題がある。そこで、各時刻での地表面とシリンダの傾き角 α を可動面の鉛直変位量 z の関数として表すことで、変位後の必要軸力が算出される。そこから、初期状態での必要軸力を差し引いたものが必要軸力の変動分となる。本解析では、シリンダの伸縮変位に剛性を乗じ、必要軸力の変動分を差し引くことで機構の復元力を算出している。

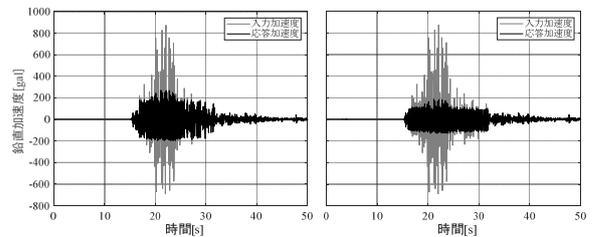
3.2 地震応答解析結果

表 2 に示した各地震波に対する、縮小装置全体の解析モデルの動的応答性状に関し、得られた結果を述べる。ここでは、機構の応答評価指標として最大加速度応答倍率に加え、最大相対変位量、残留変位量も算出している。

解析結果の例として剛性 k_1 、減衰係数 c_2 における摩擦係数 μ_1, μ_2 での KMMH16 2016 UD 波の加速度応答波形を図 8 に示す。図 8(a)の結果では、最大応答加速度を 30%程度にまで低減できていることから、十分な低減効果を得られている。さらに、(b)から、摩擦係数が小さい場合にはさらなる応答の低減効果が見込め、ここでは最大応答加速度を 20%程度にまで低減できている。また、同地震波での摩擦係数 μ_1 、減衰係数 c_2 における各剛性での各応答値を表 3 に示す。表から、シリンダ剛性が最大加速度応答倍率に与える影響は非常に小さいことがわかる。加えて、剛性が小さいと最大相対変位量が非常に大きくなっている上に、可動面が変位した後に復元せず、最大相対変位量と残留変位量が一致する結果となった。一方で、剛性が大きいと真逆の傾向が見られ、最大相対変位量が抑えられている上に、残留変位量も非常に小さな値となっている。また、表 4 に減衰が c_1, c_2 の際の、各摩擦係数での JMA Kobe 1995 UD 波における各応答値を示す。摩擦係数が μ_1, μ_2 の際に、入力加速度を 60%程度に低減しているが、前述した図 8 および表 3 の結果と比べて低減効果が小さい。JMA Kobe 1995 UD 波は、KMMH16 2016 UD 波に比べて最大加速度が 1/3 程度の入力であることから、本機構の入力地震波に対する応答低減率には入力波の最大加速度が関係していると考えられる。ただし、いずれの地震波においても摩擦係数が

表 2 入力地震動および解析パラメータ

入力地震波	最大加速度 [gal]	剛性 k [N/mm]	摩擦係数	減衰係数 [N/mm/s]	
				引張	圧縮
El Centro 1940 UD	206.30	$k_1=1.1333$ $k_2=0.5262$ $k_3=0.3508$ $k_4=2.0$	$\mu_1=0.1811$ $\mu_2=0.1$ $\mu_3=0.01$	$c_1=0, 0$ $c_2=0.1489, 0.1823$ $c_3=1.489, 1.823$	
JMA Kobe 1995 UD	332.24				
KMMH16 2016 UD	873.41				
NIG019 2004 UD	820.17				
random	456.54				



(a) μ_1 (摩擦係数 0.1811) (b) μ_2 (摩擦係数 0.1)

図 8 加速度応答波形 (KMMH16 2016 UD, k_1, c_2)

表 3 各剛性における応答値 (μ_1, c_2)

入力地震波	剛性 [N/mm]	k_1	k_2	k_3	k_4
		(1.1333)	(0.5262)	(0.3508)	(2.0)
KMMH16 2016 UD	最大加速度応答倍率	0.3083	0.3040	0.3036	0.3224
	最大相対変位量 [mm]	35.9	46.1	61.8	32.3
	残留変位量 [mm]	14.9	42.6	61.8	6.20

表 4 各摩擦係数における応答値

(a) k_1, c_1 (JMA Kobe 1995 UD)

入力地震波	摩擦係数	μ_1	μ_2	μ_3
		(0.1811)	(0.1)	(0.01)
JMA Kobe 1995 UD	最大加速度応答倍率	0.5378	0.3400	0.0918
	最大相対変位量 [mm]	-23.12	-50.72	61.85
	残留変位量 [mm]	7.56	-3.22	-2.43

(b) k_1, c_2 (JMA Kobe 1995 UD)

入力地震波	摩擦係数	μ_1	μ_2	μ_3
		(0.1811)	(0.1)	(0.01)
JMA Kobe 1995 UD	最大加速度応答倍率	0.6894	0.6198	0.2809
	最大相対変位量 [mm]	18.32	34.84	66.67
	残留変位量 [mm]	13.11	6.12	0.18

μ_1, μ_2 の際に、低減後の最大加速度はそれぞれ 180, 100 [gal] 程度となっている。これは油圧シリンダの摩擦係数 0.1811, 0.10 に由来するものと考えられ、本機構の応答の低減効果の限界値は摩擦成分により規定されると考えられる。また、表 4 の結果から、減衰成分により最大相対変位量および残留変位量が低減される一方で最大加速度応答倍率が增大することがわかる。加速度応答の増大に関しては、大きな速度が入力されたことにより生じた反力で、シリンダの伸縮に急ブレーキがかかるような現象が生じたことが要因であると考えられる。

以上の結果から、本機構では概ね、摩擦成分により加速度応答が、ばね成分と減衰成分により可動面の変位量および復元性能がそれぞれ規定されると言える。実用性を考慮すると、シリンダのストローク

には限界があるため、機構の過大な変位は避ける必要がある。また、表3から明らかなように、シリンダ剛性が加速度応答に与える影響は小さいため、当該ケースにおいては、いずれも、シリンダ剛性を大きめに設定しておくことが望ましいと考える。

4. 縮小装置を用いた動的加振試験

4.1 試験概要

本機構の免震性能の確認を目的に、図1に示す縮小装置を用いた動的加振試験を行った。入力地震波としてNIG019 2004 UD波を用い、振動台の最大出力の関係から入力加速度は原波の75%とした。また、搭載するウェイトは574 [kg]、油圧は4.6 [MPa]のもと、ACC初期ガス圧を4.1, 2.7, 1.2 [MPa]として剛性を調節し、鉛直方向の想定固有周期はそれぞれ2.2, 2.0, 1.6 [s]の条件で試験を実施した。

4.2 試験結果

図9に、ACC初期ガス圧1.2 [MPa]、想定鉛直固有周期1.6 [s]の時刻歴応答波形を示す。図より、入力加速度を30%程度にまで低減できており、十分な免震効果が得られていることが確認できる。続いて、図10に加振試験と同様の条件を再現したパラメータ(k1, mu2, c2)を用いた応答解析結果と、前述した加振試験結果における加速度応答波形、相対変位応答波形の比較を示す。また、表5に、各固有周期における応答値の比較を示す。性能に対しては摩擦成分が支配的で、固有周期の長周期化の影響はほぼなく、加速度応答はわずかに過大評価であるものの、試験値と解析値に十分な整合性が確認された。

以上から、前章で構築した解析モデルは縮小装置の実挙動を高い精度で再現でき、本研究の縮小装置には高い免震性能があることが明らかとなった。

5. 結論

本機構の鉛直動的力学特性に関して、得られた知見を以下に示す。

- 要素試験により得られた物性値から構築した、油圧シリンダ単体および縮小装置全体の動的解析モデルは、実現象を高い精度で再現できることを確認した。
- 本機構は、概ね摩擦成分により加速度応答の低減効果が、ばね成分と減衰成分により可動面の変位量および復元性能がそれぞれ規定される。
- 縮小装置を用いた加振試験では、入力加速度を

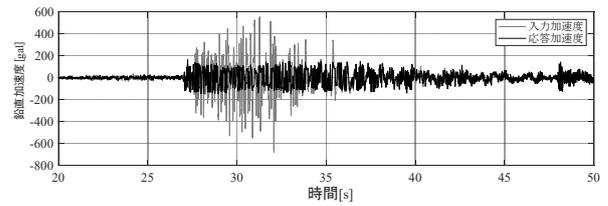
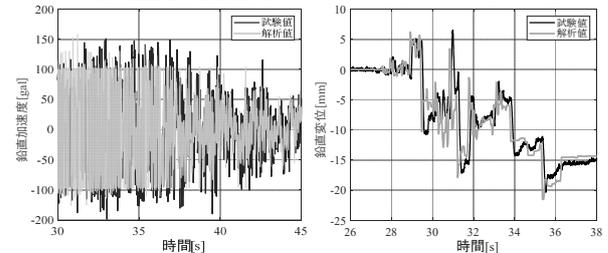


図9 時刻歴応答波形 (NIG019 75%, 1.2MPa, 1.6s)



(a) 加速度応答波形 (b) 相対変位応答波形

図10 試験値と解析値の応答波形比較

表5 各固有周期での応答評価指標の比較

	固有周期[s]	1.6	2.0	2.2
最大加速度応答倍率	試験値	0.2990	0.2803	0.3151
	解析値	0.2765	0.2699	0.2664
最大相対変位量[mm]	試験値	-20.41	-24.44	-27.63
	解析値	-21.50	-30.22	-32.37
残留変位量[mm]	試験値	-14.70	-25.63	-29.93
	解析値	-14.27	-28.28	-34.58

30%程度にまで低減できており、高い免震性能が確認された。

- 本機構における免震性能は摩擦成分が支配的であり、固有周期の長周期化による影響はほとんどないと考えられる。

参考文献

- 古川幸, 佐藤栄児, 中島正愛: 鉛直動下における免震建物内部に設置した機器の挙動, 日本建築学会構造工学論文集 Vol.58B, pp.169-177, 2012.3
- 富澤徹弥, 高橋治, 須原淳二, 岡田敬一, 露木保男, 藤田隆史: 3次元免震システムを適用した建築物の地震観測記録に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第77巻, 第679号, pp.1393-1402, 2012.9
- Donghun Lee, Michel C. Constantinou: Combined horizontal-vertical seismic isolation system for high-voltage-power transformers: development, testing and validation, Bull Earthquake Eng(2018) 16:4273-4296, 2018.1
- 富澤徹弥, 松本樹, 小川航矢, 山田学, 佐藤栄児, 福井弘久: パラレルリンク機構を用いた鉛直免震システムの静的力学特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第87巻, 第802号, pp.1164-1174, 2022.12
- 矢部隆太郎, 富澤徹弥, 小川航矢, 山田学, 福井弘久, 佐藤栄児: パラレルリンク機構を用いた鉛直免震システムに関する研究 その4 懸架型パラレルリンク機構を用いた場合の静的力学特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.491-492, 2023.7
- 柏崎昭宏, 三田倫也, 榎本孝雄, 秋元将男: 油圧を用いた建物の3次元免震システムの開発(上下免震機構の実験的検討), 日本建築学会論文集, 66巻, 648号, 2000.8
- 高橋亜佑美, 内田基城, 境孝祐, 柴田耕一: 滑り摩擦型振動の応答解析手法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第77巻, 第674号, pp.657-664, 2012.4