第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

供用50年超のオイルダンパーの減衰力特性に関する検討

田原　徹也[1]・和田　新[2]・張　広鋒[3]・矢部　正明[3]・水谷　亮勝[4]

[1]非会員　修（工）　首都高速道路株式会社　東京西局土木保全設計課
（〒102-0093 東京都千代田区平河町2-16-3）
[2]正会員　修（工）　首都高速道路株式会社　東京西局土木保全設計課
（〒102-0093 東京都千代田区平河町2-16-3）
[3]正会員　博（工）　一般財団法人首都高速道路技術センター　構造技術研究所
（〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-10-11）
[4]正会員　一般財団法人首都高速道路技術センター　構造技術研究所
（〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-10-11）

1. はじめに

オイルダンパーは，車両の衝撃吸収や土木・建築構造物の免震・制震（制振）を図るためのディバイスとして，1940年代に自動車や鉄道などの車両に適用されて以来，現在に至るまで橋梁や建築物に広く用いられるようになっている．首都高速道路では，1962年に竣工した1号線に初めてオイルダンパーを採用し，その後，他の路線においても数橋にオイルダンパーを導入した[1)~3)]．

オイルダンパーは，金属製の部品，ゴムや樹脂などの材質のパッキン類およびオイルによって構成されている．長期間の供用において，パッキン類の劣化による密閉性の低下や，オイルの酸化による粘度の増加などの劣化が生じ，これらの劣化によって所定の減衰力特性が変化する懸念がある．橋梁や建築物の耐用年数は，一般に数十年程度であり，その間に構造部材だけではなく，免震・制震（制振）ディバイスとしてのダンパーも所要の性能を発揮することが求められている．長期間の供用におけるオイルダンパーの減衰力特性については，屋内環境下における竣工数年後を対象とした検討結果が報告されているが[4), 5)]，橋梁のような屋外環境において数十年間供用されてきたオイルダンパーに関する研究事例は見当たらない．

本研究では，首都高速道路の工事に伴って撤去された供用50年超のオイルタンパーを対象に，減衰力特性を把握するための実験的検討を行った．本論文では，オイルダンパーの概要，実験概要および実験結果に基づいた検討結果を報告する．

2. 対象橋梁とオイルダンパーの構造

(1) 対象橋梁の概要

オイルダンパーが設置されていた橋梁は，1968年に竣工した1号上野線における2連の3径間連続鋼箱桁橋である．**図-1**に橋梁の一般図，**写真-1**に橋梁およびダンパーの状況を示す．ダンパーの設置箇所と設置方向は，主に可動支承設置橋脚（以下，可動橋脚）の橋軸方向であった．ダンパーは，ブラケットを介して，両端がそれぞれ主桁下フランジ下面と橋脚横梁上面に固定されていた．

新設時に対象橋梁へオイルダンパーを設置した目的は，主に橋軸方向の水平地震力を固定支承設置橋脚（以下，固定橋脚）から可動橋脚に分散させるためであった[1)~3)]．可動橋脚にオイルダンパーを設置し，固定橋脚が負担する上部構造の慣性力の一部を可動橋脚にも負担させることによって，固定橋脚の設計地震力を低減させ，基礎を含めた橋梁全体の設計の合理化と工事費の節減を意図したものである．**表-1**に，設計計算書による各橋脚の橋軸方向水平地震力とオイルダンパーの本数を示す．固定橋脚P2とP5が負担する水平地震力は，それぞれ上部構造全体の慣性力の45.3%および52.2%である．免震・制震（制振）ディバイスが設置されていない橋梁は，一般に固定橋脚が上部構造の慣性力の全てを負担するように設計される．よって，本橋は，オイルダンパーを用いることによって，固定橋脚が負担する水平地震力が従来設計の半分程度に低減されている．

P1～P4およびP4～P7の橋長は，それぞれ144mと135m程度である．常時の温度変化による桁の伸縮

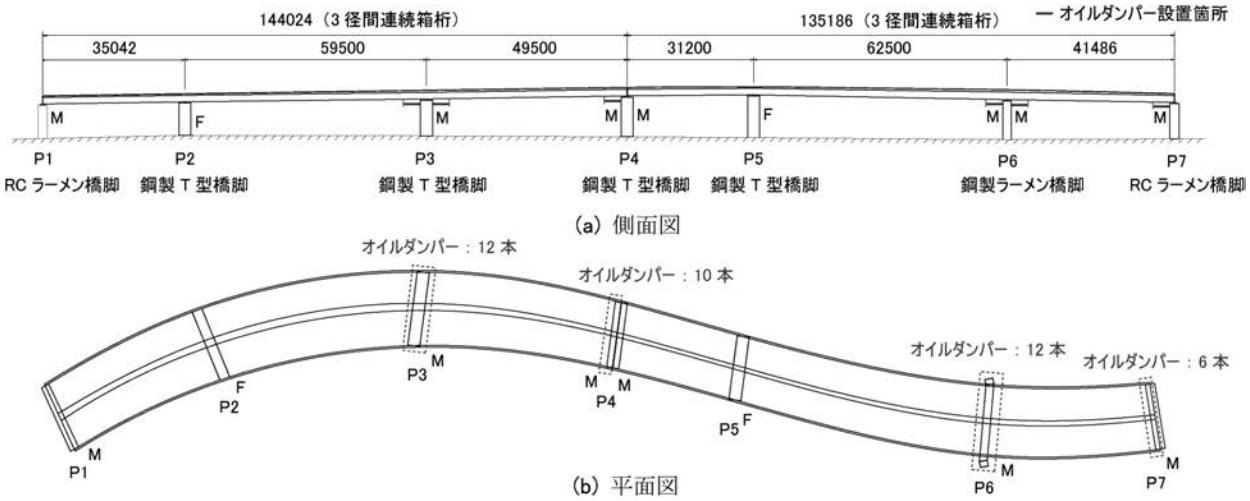


図-1　橋梁一般図



(a) 対象橋梁　　(b) ダンパー（撤去前）　　(c) ダンパー（撤去後）

写真-1　橋梁およびダンパーの設置状況

表-1　各橋脚の橋軸方向設計水平地震力とダンパーの設置本数

項目	P1～P4	P4～P7
上部構造重量	3010 t	2847 t
設計震度	0.3	0.3
上部構造慣性力	903 t	854.1 t
P2（固定）	421 t	-
P3（可動）	267.7 t，12 本	-
P4（可動）	214.4 t，10 本	-
P5（固定）	-	445.8 t
P6（可動）	-	258.2 t，12 本
P7（可動）	-	150.0 t*，6 本

*P7 の地震力：基礎の関係で 150t として設計されている

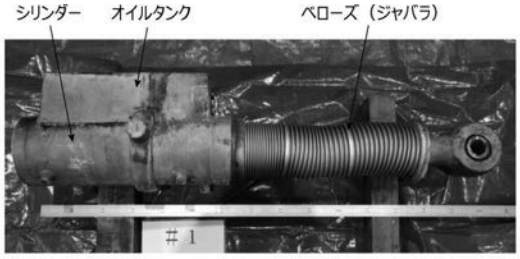
に伴うダンパーの概算変位は，固定橋脚から最も遠い可動橋脚P4（109m）での桁の伸縮量から，1日で11mm程度（1日の最大温度差を10℃とする），年間で44mm程度（年間の最大温度差を40℃とする）となる．検討対象のダンパーのストロークは±100mmであるため，桁の温度伸縮による年間の最大変位はストロークの20%程度である．また，中間橋脚での伸縮量はその半分程度である．よって，ダンパーは，稼働速度が非常に小さいが，桁の温度変化に伴って全ストロークの10～20%程度の変位が繰り返し生じていたと考えられる．

本橋が経験した最大の地震と想定される2011年東北地方太平洋沖地震において，当該区域の地震動はレベル1地震動に相当する震度5弱であった．建設時の設計地震動程度の地震であることから，オイルダンパーに一定の変位が生じたと考えられるが，ストロークの変位を記録する装置などが設置されていないため，ダンパーの変位を記録することができなかった．なお，当該地震において本橋に損傷は確認されていない．

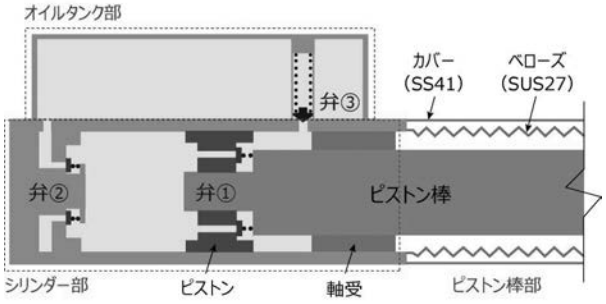
(2) オイルダンパーの構造と設計性能

図-2に，対象ダンパーの写真および構造概要を示す．ダンパーは，大まかに分類すると，シリンダー部，オイルタンク部およびピストン棒部によって構成されている．ピストン棒部は，ステンレス製のベローズ（ジャバラ）と鋼製カバーで二重に保護されている．

ダンパーは，3つの弁によりオイルの動きを制御する．ピストン部の往復摺動に伴って，オイルが3つの弁を通ってシリンダーとオイルタンク間に循環し，オイルの粘性抵抗により減衰力が発生する．今後，解体調査も含めさらなる検討を行う予定である．



(a) カバーを撤去した後のダンパー



(b) 構造概要図

図-2　ダンパーの構造概要

表-2　オイルダンパーの設計性能

ピストン速度	減衰力
5.0 cm/sec	20 t（196 kN）± 20%
20.0 cm/sec	25 t（245 kN）± 20%

表-2に，ダンパーの設計性能を示す．ピストン速度5.0cm/secと20.0cm/sec時の減衰力は，それぞれ20t±20%と25t±20%としている．

3. 実験概要

写真-2に，載荷実験の状況を示す．ダンパーを水平状態にして高速試験機に設置し，所定の速度と振幅で一連の載荷を行った．

撤去されたダンパーから任意に選定した3体（以下，ダンパーA，B，C）を実験対象とし，各ダンパーに対して**表-3**に示す載荷ケースを実施した．No.1は静的荷重作用下の挙動を確認するための載荷ケース，No.2～No.12は設計で考慮した最大速度20.0cm/secまでの設計性能を確認するための載荷ケース，No.13～No.17は設計性能より大きな速度の地震力が作用した場合の挙動を確認するための載荷ケースである．減衰力と速度の関係を求めるための載荷ケースであるNo.2～No.10では，載荷振幅をストロークの50%の±50mmとし，載荷サイクルを3とした．試験機の性能の関係上，大きな載荷速度を出すためにある程度の載荷振幅が必要であるため，載荷振幅を±50mmとした．No.11～No.17では，大変位時における減衰力の特性を把握するために，載荷振幅をストロークの90%である±90mmとし，載荷サイクルを5とした．また，大きな速度の荷重を経験した後の減衰力特性の変化の有無を確認するため，3日間に渡って同様な条件でNo.1～No.12の載荷を3回実施した．また2日目には上記に加えて，No.13～No.17の載荷も実施した．なお，後述の**図-4**に示すように，載荷速度70.0cm/secでは減衰力の変動が大きく挙動が不安定になったため，それ以上の速度の載荷を実施しないことにした．

載荷回数の増加に伴いオイルの温度が上昇する．温度が上昇するとオイルの粘度が低下し，それによって減衰力が低下する．オイルの粘度低下による減衰力への影響は実用上無視しても差し支えない程度と言われているが[6]，実験では，可能な限り温度による影響を小さくするために，載荷ケースの間隔などを調整し，目安としてオイルの温度が40℃以上に上昇しないように管理した．No.1～No.12の載荷時のオイル温度は12℃～20℃程度（載荷開始時：12℃程度）で，No.13～No.17の載荷時のオイル温度は20℃～30℃程度であった．

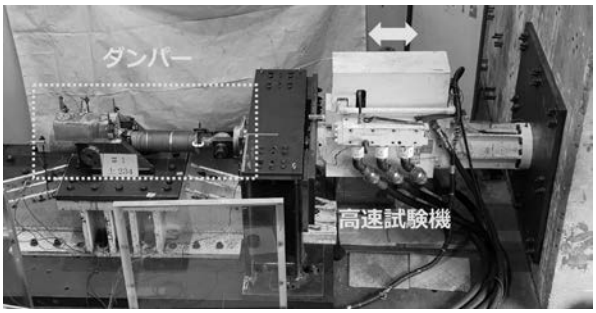
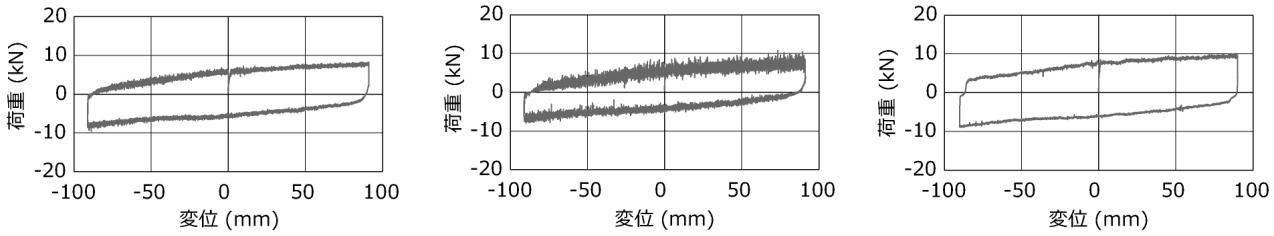


写真-2　載荷状況

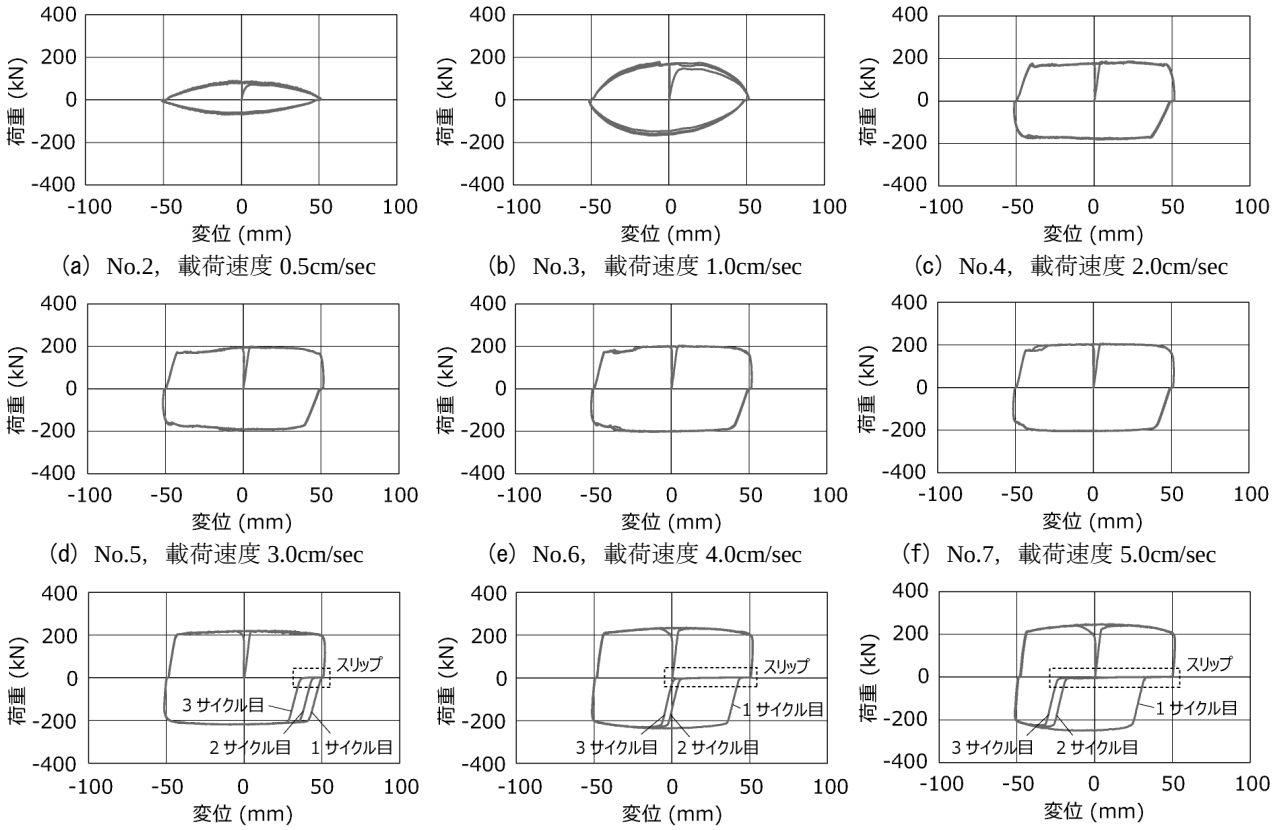
表-3　載荷ケース

No.	速度（cm/sec）	振幅（mm）	サイクル数	備考
1	0.05	±90	1	・3回実施
2	0.5	±50	3	
3	1.0	±50	3	
4	2.0	±50	3	
5	3.0	±50	3	・設計性能
6	4.0	±50	3	
7	5.0	±50	3	・3回実施（1日目，2日目，3日目）
8	10.0	±50	3	
9	15.0	±50	3	
10	20.0	±50	3	
11	5.0	±90	5	
12	20.0	±90	5	
13	30.0	±90	5	・設計以上の載荷速度
14	40.0	±90	5	
15	50.0	±90	5	
16	60.0	±90	5	・1回実施（2日目）
17	70.0	±90	5	



(a) ダンパーA　(b) ダンパーB　(c) ダンパーC

図-3　載荷ケース No.1（静的載荷）の荷重－変位関係（1 日目）



(a) No.2，載荷速度 0.5cm/sec　(b) No.3，載荷速度 1.0cm/sec　(c) No.4，載荷速度 2.0cm/sec

(d) No.5，載荷速度 3.0cm/sec　(e) No.6，載荷速度 4.0cm/sec　(f) No.7，載荷速度 5.0cm/sec

(g) No.8，載荷速度 10.0cm/sec　(h) No.9，載荷速度 15.0cm/sec　(i) No.10，載荷速度 20.0cm/sec

図-4　載荷ケース No.2～No.10 の荷重－変位関係（ダンパーA，1 日目）

4. 実験結果

(1) 静的載荷結果

図-3に，1日目に行った各ダンパーのケースNo.1（静的載荷）の荷重－変位関係を示す．いずれのダンパーも異常なループ形状は見られず，ダンパー間のループ形状に明確な差異は見られない．減衰力は最大10kN程度である．

(2) 減衰力－速度関係

載荷ケースNo.2～No.10の載荷結果より各ダンパーの減衰力－速度関係を求めた．**図-4**に，載荷結果の一部として，ダンパーAの1日目の荷重－変位関係を示す．**図-5**と**表-4**に，各ダンパーの減衰力－速度関係および減衰力の一覧を示す．

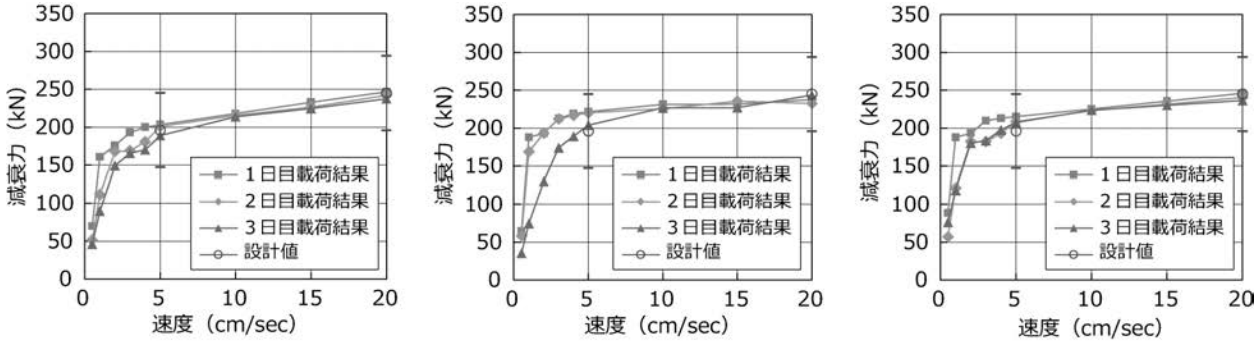
図-4に示す各載荷ケースの荷重－変位関係は，載荷速度2.0cm/secまでは速度依存型ダンパー特有の楕円形の形状を示し，載荷速度3.0cm/secからは徐々に平行四辺形に変化している．後述する**図-4(g)～図-4(i)**のスリップ現象を除き，いずれの実験ケースも概ね安定したループを示していることが分かる．ダンパーAの2，3日目の載荷結果や，ダンパーBとCの3日間の載荷結果においても同様な傾向が見られる．なお，載荷速度10.0cm/secからは，減衰力がほぼ0のままで変位だけが増加するスリップ現象が顕著に見られる．この点については「**(4) スリップ現象**」で述べる．

図-5と**表-4**に示す減衰力は，**図-6**に示す方法を用いて載荷結果から求めた．荷重の正側（引く方向）の2サイクル目と3サイクル目，荷重の負側（押す方向）は1～3サイクル目において，中立位置（載荷振幅：0mm）を通過した時点の荷重の絶対値の平均を

表-4　実験結果の減衰力

載荷速度 (cm/sec)	減衰力（kN）								
	ダンパー1			ダンパー2			ダンパー3		
	1日目	2日目	3日目	1日目	2日目	3日目	1日目	2日目	3日目
0.5	70.0	51.6	46.2	64.7	58.4	35.5	88.6	57.0	76.3
1.0	160.5	111.2	89.7	187.9	168.9	74.7	187.5	121.6	118.3
2.0	175.8	167.7	149.2	192.9	193.1	130.1	193.1	182.2	180.0
3.0	192.7	168.7	165.5	212.6	212.1	174.0	209.8	181.9	183.5
4.0	200.0	180.5	169.9	219.2	216.8	189.1	213.0	193.1	197.6
5.0	203.2 (104%)	200.9 (102%)	188.8 (96%)	221.7 (113%)	220.2 (112%)	203.9 (104%)	215.2 (110%)	208.4 (106%)	207.5 (106%)
10.0	218.0	215.5	213.5	231.2	225.5	226.6	225.1	223.2	223.8
15.0	232.8	226.3	224.5	231.7	235.7	227.2	235.7	231.6	230.1
20.0	246.6 (101%)	242.1 (99%)	237.4 (97%)	237.8 (97%)	232.5 (95%)	243.6 (99%)	246.0 (100%)	240.6 (98%)	236.5 (97%)

※5.0cm/sec と 20.0cm/sec の括弧内の数値は，設計値の 196kN と 245kN に対する比である



(a) ダンパーA　(b) ダンパーB　(c) ダンパーC

図-5　減衰力－速度関係

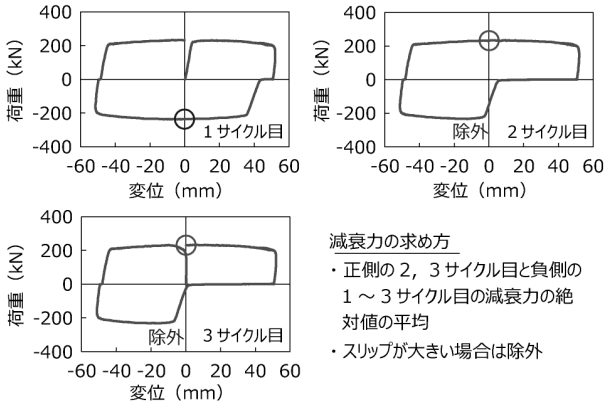


図-6　減衰力の求め方

減衰力とした．正側の1サイクル目は，載荷速度は所定の速度に達していないため除外した．スリップが大きく発生したサイクルの負側も除外した．**図-5**より，減衰力－速度関係はいずれのダンパーにおいても概ねバイリニアの形状を示していることが分かる．3日間の減衰力の差異に着目すると，3体のダンパーとも1日目の減衰力が高く，3日目の減衰力が低くなっている傾向が見られる．載荷速度5.0cm/secと20.0cm/secの減衰力は，それぞれ設計値196kNの96～113%および245kNの97～101%であり，設計で考慮した±20%以内に収まっており，50年以上供用した後も，設計時に考慮した減衰力を保っていることを確認した．

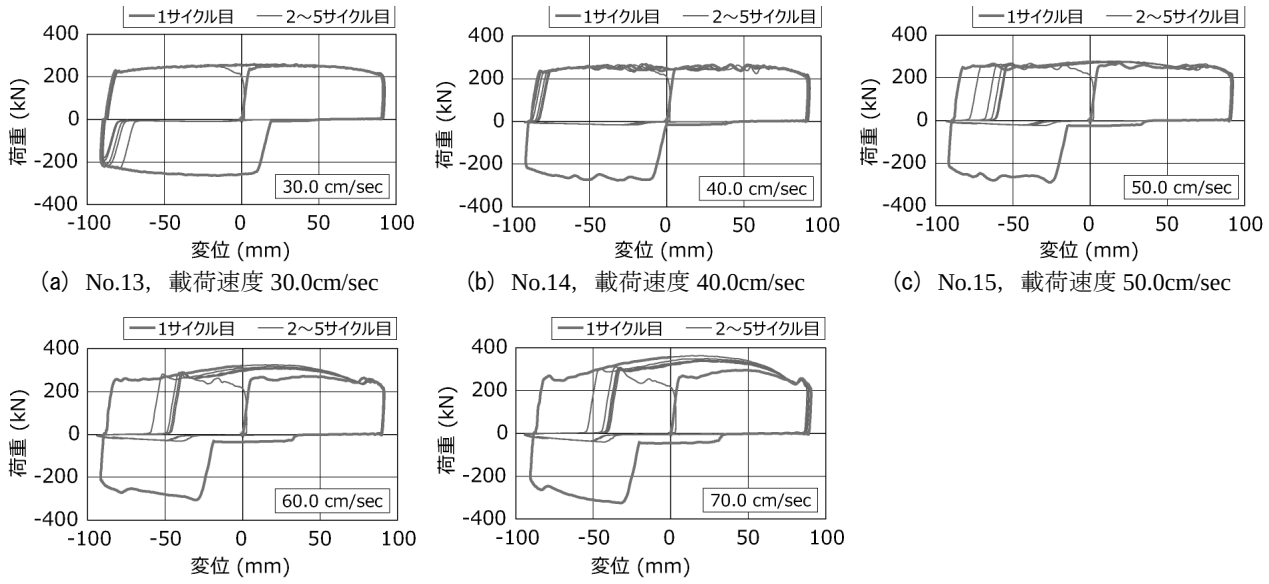
(3) 荷重－変位関係

図-7に，設計で考慮した載荷速度20.0cm/secを超えた速度の載荷ケースであるNo.13～No.17の荷重－変位関係を示す．載荷速度40.0cm/secからは，減衰力の変動が顕著となり，また，2サイクル目からは負側（押す）の減衰力が消失している．

図-8に，載荷速度が5.0cm/secと20.0cm/secである載荷ケースNo.11,12におけるダンパーAの3日間の荷重－変位関係を示す．3日目の載荷結果は，**図-7**に示す2日目の載荷を経験した後のものである．スリップ量の違いを除き，3日間の載荷結果に明確な違いが見られない．

(4) スリップ現象

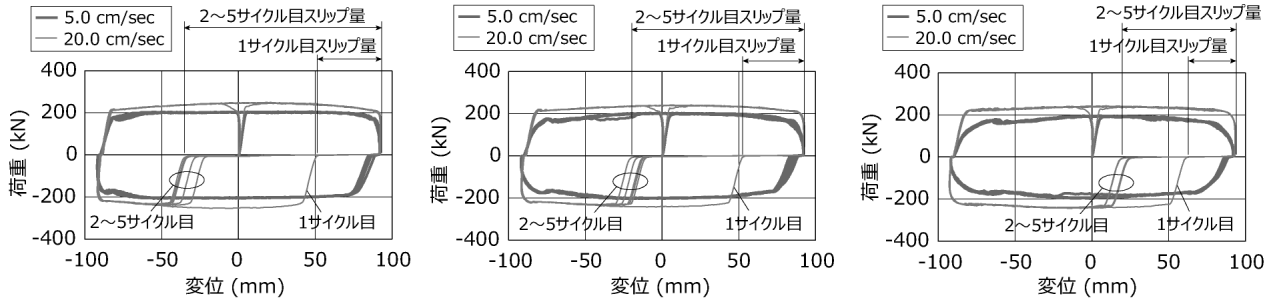
図-4，**図-7**，**図-8**より，本ダンパーのスリップ現象に以下のような特徴が見られる．1）載荷速度の増加に伴って押す方向（負側）のスリップ量が増大する．2）載荷速度が40.0cm/secからは押す方向の減衰力が完全になくなる．3）1サイクル目より，2サイクル目以降のスリップ量が大きくなる．文献7）



(a) No.13，載荷速度 30.0cm/sec　(b) No.14，載荷速度 40.0cm/sec　(c) No.15，載荷速度 50.0cm/sec

(d) No.16，載荷速度 60.0cm/sec　(e) No.17，載荷速度 70.0cm/sec

図-7　載荷ケース No.13～No.17 の荷重－変位関係（ダンパーA，2 日目の載荷結果）



(a) 1 日目の載荷結果　(b) 2 日目の載荷結果　(c) 3 日目の載荷結果

図-8　載荷ケース No.11～No.12 の荷重－変位関係（ダンパーA）

では，粘性ダンパーのシリンダー部に空気が入るとスリップ現象が生じることがあると報告されている．**図-2**に示すダンパーの構造より，荷重の正側（引く方向）に載荷される際に，オイルタンクに入っている空気の一部がオイルと共にシリンダー部に入ったことがスリップの原因の一つとして考えられ，この現象は載荷速度の増加に伴い発生しやすくなると考えられる．

5. まとめ

本研究では，首都高速道路において50年以上供用したオイルダンパーの減衰力特性に関する実験的検討を行った．スリップ現象が生じたものの，設計時に考慮した減衰力を保っていることを確認した．

参考文献

1) 上前行孝：連続桁などの温度・地震の影響の軽減について，第6回道路会議論文集，pp.406-409，1961.11.
2) 上前行孝：ダンパ方式による橋梁の耐震構造の提案，道路，1962.3.
3) 菊地貞博：橋梁耐震オイルダンパーの計画および性能実験，土木技術，Vol.17，pp.15-23，1962.3.
4) 松田和浩，葛西和彦：東北地方太平洋沖地震における観測記録を用いた超高層免震建物の動的挙動に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第79巻，第704号，pp.1445-1455，2014.10.
5) 金子直人，前田理沙，飛田潤，福和伸夫，中村悠太：実在免震建物の振動実験におけるオイルダンパー の減衰力計測，構造工学論文集，Vol.67B，pp.665-674，2021.3.
6) 五十幡直文：耐震用オイルダンパーの基本特性について，油空圧技術，pp.56-60，2005.11.
7) 姫野岳彦，濱田由記，吉田雅彦，比志島康久：内部調圧機構を有する粘性ダンパーの性能検証実験，土木学会地震工学論文集，pp.1238-1243，2007.8.