

微少粉体とオイルを混合したビンガムダンパーの耐震性能実験

The Seismic Performance Experiment of Bingham Damper

水野千里† Chisato MIZUNO 青木徹彦†† Tetsuhiko AOKI 鈴木森晶†† Moriaki SUZUKI

Abstract Since Hyougoken-nanbu Earthquake in 1995, improvement of the seismic performance of the structures comes to significant issues and installing dampers to the structure is recognized to be effective decreasing seismic damage of essential structures. Recently bingham type damper has noticed because of its predominant characteristics, in which no dependence on both velocity and temperature. In this paper, the bingham dampers with newly composed materials are examined experimentally and preferable combination between silicon oil and some filler is found after the dynamic test changing the frequency from one to five Herz.

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以来、構造物のさまざまな耐震性能の向上が検討されてきた。特に地震のエネルギーを吸収する部材を構造物に取り入れる方法は耐震性能の向上に非常に有効と言える。高速道路の高架橋などでは一般的に橋脚と上部構造物の間にダンパーを設置すると効果的と考えられるが、地震による振動を吸収するオイルダンパーはまだ十分に活用されているとは言えない¹⁾²⁾。

従来のオイルダンパーでは、速度依存性と温度依存があり、耐震性能が安定しないという問題がある。それらの影響を緩和でき、安定した履歴曲線を得られ、特殊オイルと極小の粉末体を混ぜ合わせた半固体のビンガムダンパーが近年注目されはじめた³⁾⁴⁾⁵⁾。

ビンガムダンパーは、地震波の繰り返しに対して減衰性能を持ち、減衰力の設計精度が高く、信頼性の高い耐震設計を実現することができるという利点がある。しかしながら、現在わが国で用いられているビンガムダンパーはフランスからの輸入品でありコストが高く、耐震対策をさらに普及させるためには経済性に優れた国産製ダンパーの開発が必要である。また、小型で高性能ダンパーが開発されればその大きさや取り付けの数により設計の幅を広く取ることができ、既存の構造物にも取り付け可能であり、耐震補強としても有効であると考えられる。

本研究では、新素材のビンガムダンパーを開発し、繰り返し

載荷を行い、エネルギー吸収性能などの基本的性能について実験的に明らかにする。

2. 実験計画および方法

2.1 実験装置とダンパー供試体

本研究で用いる実験載荷装置を図-1に示す。ダンパーの性能を調べるため、リニアレールにより水平方向にのみ移動する実験装置を製作した。25tの動的アクチュエーターを1基用いて水平方向に動的荷重を載荷する。

使用したダンパー供試体は全長833mm、最大ストローク±100、外径φ60(内径φ40)、内部ピストン外径φ39、隙間1mmの供試体(図-2,3)とし、ダンパーとしての基本的な性能を調べる。また、ビンガム材を充填する鋼管の材質をSS400より強度の高いSCM415を使用した。

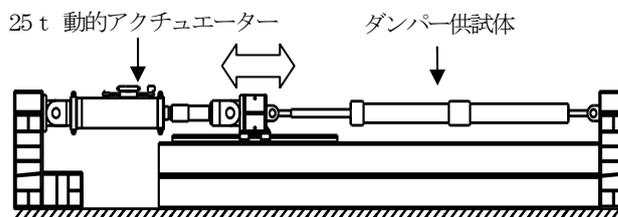


図-1 実験装置概略図



図-2 ダンパー供試体

† 愛知工業大学 工学研究科 建設システム工学専攻

†† 愛知工業大学 工学部 都市環境学科土木工学専攻(豊田市)

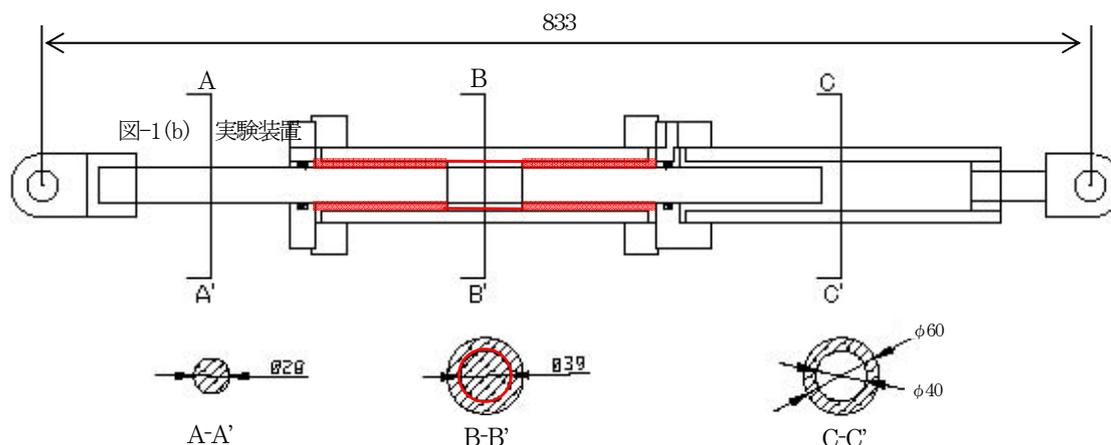


図-3 供試体断面図

2.2 ビンガムとは

従来のオイルや水, 空気などの天然に存在する流体の抵抗力は, $F=CV$ に示すように速度 V の影響 (ニュートン流体) に左右される。それらの粘性流体よりも粘度が強く, その流れと異なった特性を示す物質がビンガム流体 (=非ニュートン流体) である⁶⁾ (図-4)。

土木関連でビンガム流体を扱う分野は, 下水道の汚水・汚泥の輸送であり, 湖沼・河川・海岸の浚渫土砂の管路輸送, 生コンクリートの管路輸送, 火山の溶岩流等がある。しかしながら, 水理公式集⁷⁾ を見ても, 下水道部門で少し記述されているが, その流れの理論の組み立ては容易に理解できる内容ではない。

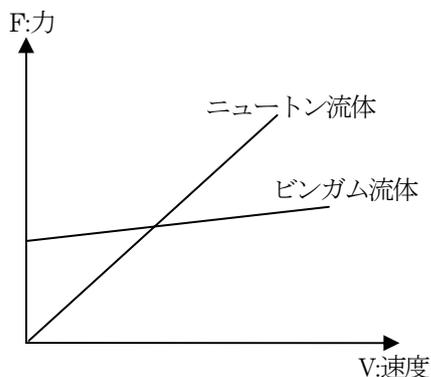


図-4 ニュートン流体とビンガム流体

2.3 ビンガム材

本研究で用いるダンパーの中の充填材は海外製品を参考にし, ガム状で半固体状のものとし, オイルや粉末状の充填材 (フィラー) の添加量を変えたサンプル材を用意した。

オイルダンパーで一般的に使用されているシリコンオイルを主剤として, フィラーとの組み合わせで5種類8つのビンガム材を用意し, 最適な組み合わせを見出すことを目的として実験を行う。オイルとフィラーの組み合わせを表-1に示す。なお,

表-1 ビンガム材の配合表

No.	オイル	フィラー種類	重量配合比	特性値 (N)
SC-01	シリコン (300g)	炭酸カルシウム	1:1.5	92
SC-02C		炭酸カルシウム (カップリング処理)	1:2	191
SB-03		ベントナイト	1:1.6	325
SB-04C		ベントナイト (カップリング処理)	1:1.7	356
ST-05		酸化チタン	1:1.6	27
SBL-06		球状黒鉛	1:1.5	261
SBL-07C		球状黒鉛 (カップリング処理)	1:1.7	258
SS-08		シリカ	1:1	83

※カップリング処理: 有機物と無機物の混合促進させる処理

主剤とフィラーの特徴は以下に示すようである。

1. シリコンオイル (主剤)

粘性が低い。耐熱性・耐寒性に優れ, 広い温度範囲で粘性変化が少ない。

2. 炭酸カルシウム

粒子が大きく, 二酸化炭素を酸化カルシウムと反応させたもの。水に溶けにくい性質を持つ。

3. ベントナイト

水に対して極めて親和性が高く、水を吸収して容積を増す性質を持つ。

4. 酸化チタン

天然に産出する無色・固体の金属酸化物

5. 球状黒鉛

潤滑性、導電性、耐熱性、耐酸体アルカリ性に優れており、軟らかい。

6. シリカ

ケイ素の酸化物で、地殻を形成する物質のひとつであり、圧力・温度の条件により、多様な形が存在する。

2.4 カップリング処理

本来、無機物と有機物は交わりにくい性質がある。カップリング処理とは、フィラーのような無機材料と有機樹脂（オイルなど）との間で作用する界面活性剤のようなものであり、無機材料（フィラー）の表面をカップリング剤が覆うように付加される（図-5）。このカップリング剤は有機樹脂（オイルなど）と相性がよく、結果的にフィラーとオイルをなじみやすくさせる効果がある。また、酸化チタンとシリカはなじみやすい性質があるのでカップリング処理を行っていない。

カップリング処理後は、粘性が低下する。処理前と同等の粘性を得るためにフィラーを追加している。

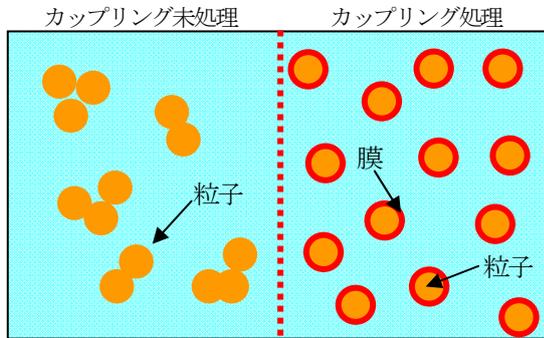
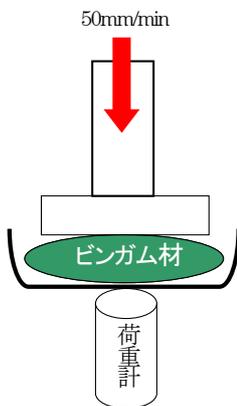


図-5 カップリング作用のイメージ図



図-6 特性試験の概略図



2.4 特性値の評価方法（粘性の数値化）

本実験で使用しているビンガム材は粘性が高く粘度計で測れなかったため、それに代わる方法で粘度計測を行った。評価方法は、受け皿に適量のビンガム材を充填し、垂直に方向にピストンを一定速度(50mm/sec)で押し込んだ際の荷重を測定する。このときの最大値を各ビンガム材の粘性を表す特性値として記録した（図-6）。

2.5 载荷計画と方法

図-7は道路橋示方書⁶⁾に示された地震波加速度応答スペクトルである。同図より周期0.2~2秒に着目し振動数1~5Hzの正弦波を入力する。今回は地震時において最もエネルギーを発生させる1.0Hz以上のダンパーとしての基本的な性能を調べることとし、さらに他の研究事例のない5.0Hzまでの高い振動数でのビンガムダンパーの载荷試験を試みる。実験では温度一定の条件下で振幅と繰り返し回数を固定した。実験計画の詳細を表-2にまとめる。

表-2 実験方法

水平加振周波数(Hz)	1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0
振幅(mm)	50
水平加振回数	11回
測定温度(°C)	一定
測定	ロードセル レーザー変位計

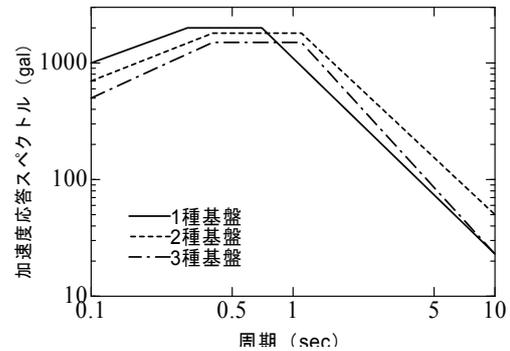


図-7 加速度応答スペクトル

3. 実験結果

3.1 繰り返し载荷による履歴曲線

表-1に示す試験体No. S0-01~08までの荷重-変位履歴曲線を図-8に示す。なお、データ数が多いため、荷重が大きめに発生した5Hzを代表例として載せた。

すべての実験データは繰り返し载荷により外側から内側へと荷重の値がある下限値まで収束した。また、左上右下に窪みが発生しているものがあるが、これはダンパー内に空気が入ったのが原因と考えられる。

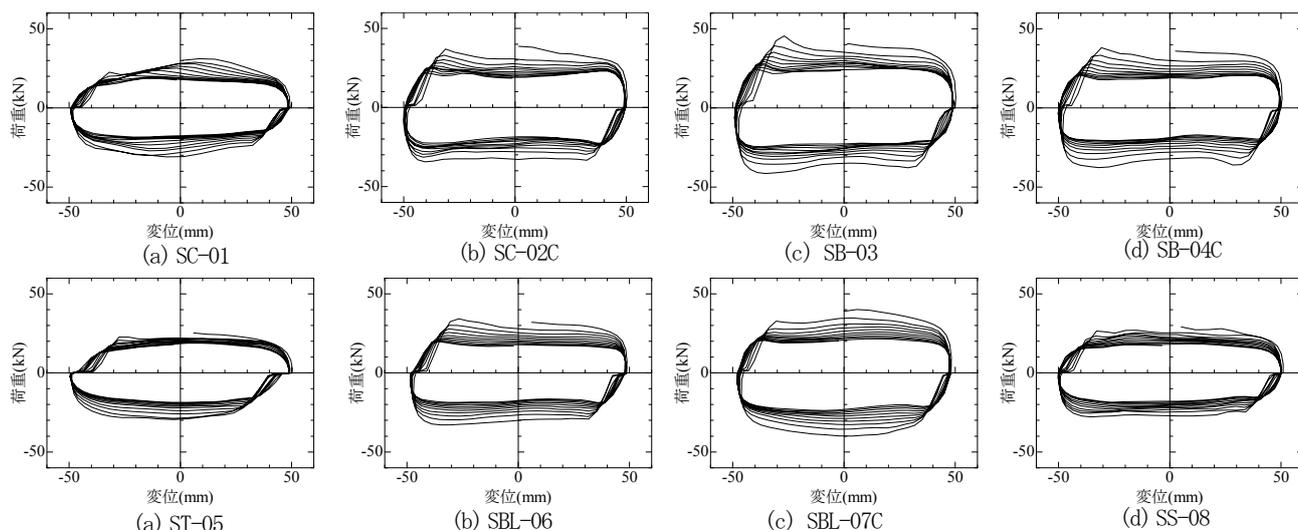


図-8 繰り返し载荷による履歴曲線(5Hz)

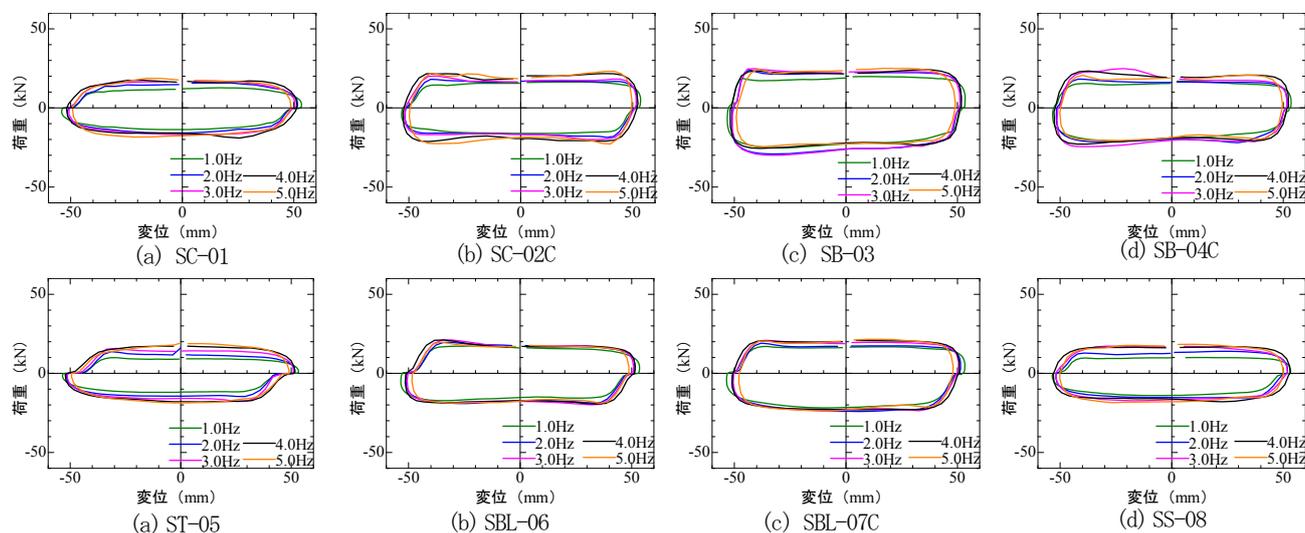


図-9 振動数変化による履歴曲線

3.2 振動数変化による履歴曲線

1~5Hz までの履歴曲線を図-9 に示す. 試験体 No. ST-05 (酸化チタン)・SS-08 (シリカ) においては, 振動数の増加に伴い, 荷重が若干上昇しているが, それら以外のものは振動数による影響は少ない.

3.3 カップリングによる影響

図-10 より, カップリング処理後はエネルギー吸収量が大きくなる傾向にあるが, ベントナイトだけが小さくなった.

図-11 は特性値の増減によるエネルギー吸収量の変化を示しており, 各ビンガム材の振動数による変化が少なかったため 1Hz を代表例とした. 同図より, 特性値とエネルギー吸収量は比例的な関係にある. しかし, カップリング処理後におけるエネルギー吸収量変化はサンプル数が少ないこともあり規則性が見出せない. 炭酸カルシウムをフィラーに用いた場合, カップリング処理後, エネルギー吸収量は増大した. その原因は特性値の上昇か, カップリングによるものか判断できない.

3.4 エネルギー吸収量

図-12 に履歴曲線の面積から求めたエネルギー吸収量を示す. 炭酸カルシウム, 酸化チタン, シリカは振動数の増加に伴いエネルギー吸収量も増加傾向にある. ベントナイト, 球状黒鉛においては安定したエネルギー吸収量を得た. また, もっとも多くエネルギーを吸収したのは SB-03 のカップリング未処理のベントナイトであった.

3.5 速度依存性

図-10 より ST-05 (酸化チタン) と SS-08 (シリカ) は振動数が大きくなるにつれエネルギー吸収量も大きくなっている. これは速度の影響を受けており, SC-01, 02C (炭酸カルシウム) も若干の影響がある. また, オイルダンパーは 2.2 で述べたように速度と荷重がほぼ比例関係にある.

ビンガムダンパー性能実験

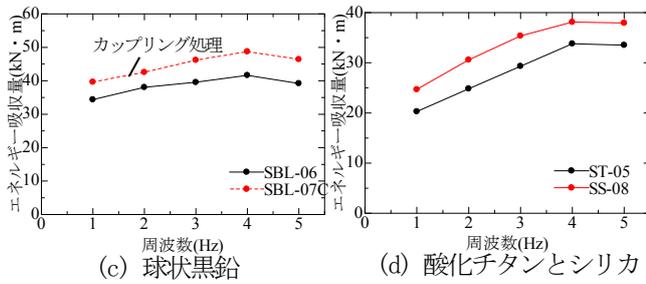
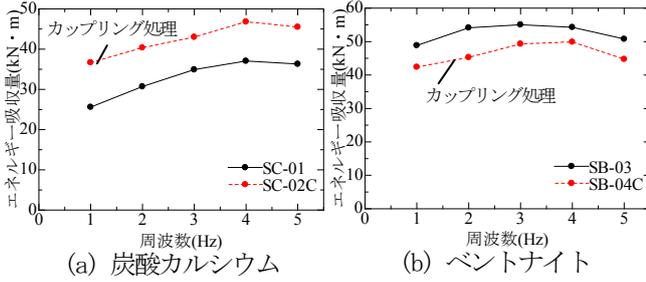


図-10 カップリングによる影響

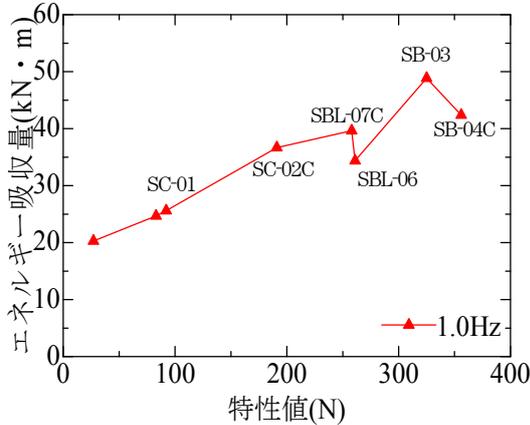


図-11 特性値の影響

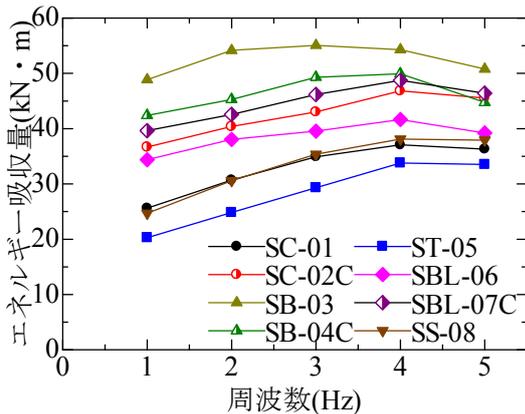
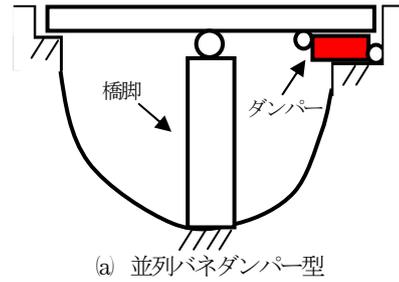


図-12 エネルギー吸収量

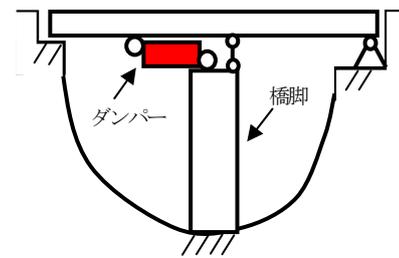
4. ビンガムダンパーを用いた橋梁の動的解析

4.1 橋脚のモデル化

ビンガムダンパーを支承部に導入した橋脚システムの応答を解析により求める。例として文献6)を利用し2種類の橋脚(直列, 並列)(図-13)を対象とする。それを図-14に示す1自由度系にモデル化した。橋桁の質量 $m=3622(t)$, パネは橋脚の剛性 $k=1648(kN/m)$, 減衰係数 $c=1648(kN \cdot s/m)$ を設定した。



(a) 並列バネダンパー型



(b) 直列バネダンパー型

図-13 ダンパー配置方法

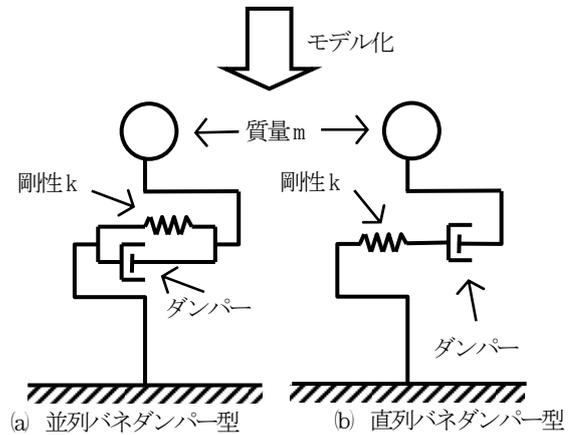


図-14 橋脚の1自由度系へのモデル化

4.2 ビンガムダンパーのモデル化

実験結果から表-1のビンガム材の中で、速度依存性が少なく、エネルギー吸収量が最大値を示したSB-03(シリコンベントナイト)を選び、その履歴曲線を長方形でモデル化した(図-15)。ビンガムダンパーは内部の粒子同士が摩擦を発生させてエネルギーを吸収すると考えられることから、摩擦型に属すると仮定できる。また、ダンパーの形状や数により抵抗力 R の変更が可能である。

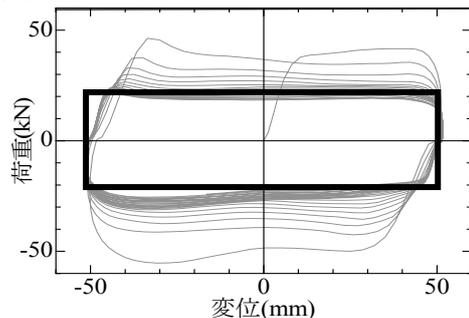


図-15 ビンガムダンパーのモデル化

4.3 入力地震波

解析で使用する地震波は, 図-16 に示す道路橋示方書に定められているタイプⅡの9波のうち, JR 西日本鷹取駅構内地盤上N-Sで観測された地盤Ⅱ-1の波形を代表例として選ぶ。

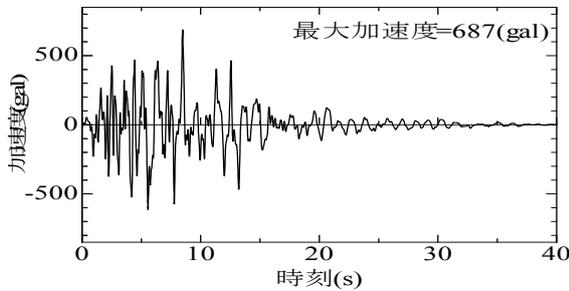
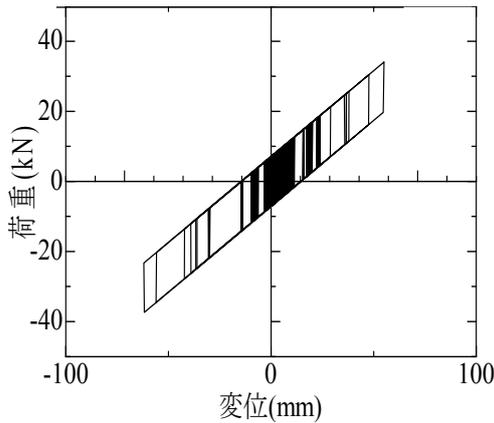


図-16 タイプⅡ-地盤Ⅱ-1 波形

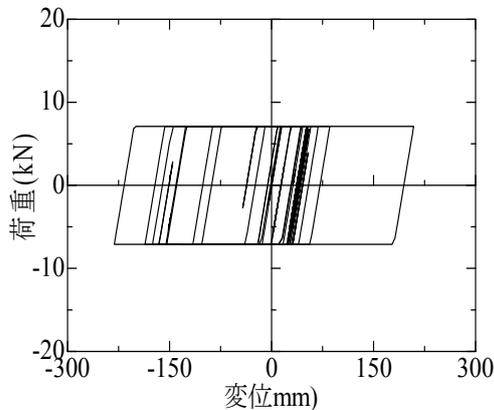
4.4 解析結果

(1) 荷重-変位履歴曲線

並列バネダンパー型の荷重-変位履歴曲線を図-17(a), 直列バネダンパー型を同図(b)に示す。



(a) 並列バネダンパー型

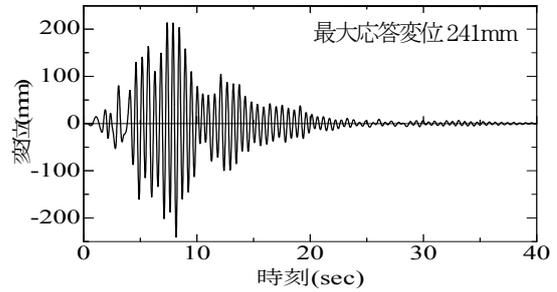


(b) 直列バネダンパー型

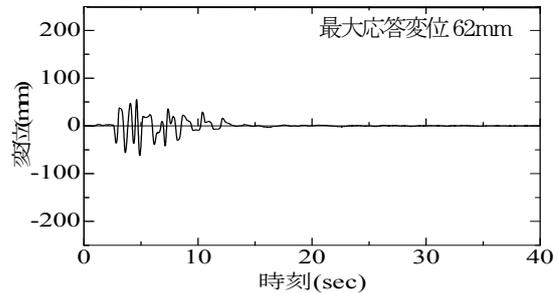
図-17 荷重-変位履歴曲線

(2) 変位-時刻歴曲線

図-18 に並列バネダンパー型の変位-時刻歴曲線, 図-19 に直列バネダンパー型を示す。

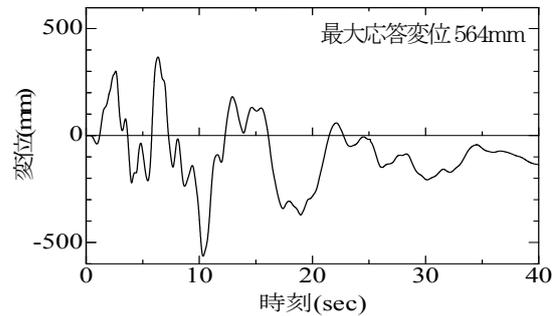


(a) ダンパーなし

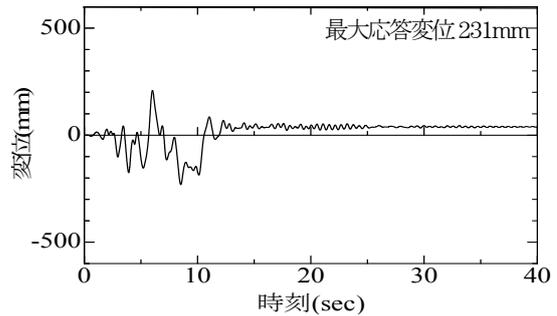


(b) ダンパーあり

図-18 並列バネダンパー型の変位-時刻歴



(a) ダンパーなし



(b) ダンパーあり

図-19 直列バネダンパー型の変位-時刻歴

(3) 降伏震度-最大応答変位比

縦軸にはビンガムダンパーの降伏震度 ($=R/W$, R: ダンパー抵抗力, W: 重量), 横軸にはその時の最大応答変位をダンパーなしの最大応答変位で無次元化したものである。抵抗力Rを変化させた時, 最大応答変位の変化を示したものが降伏震度-最大応答変位比 (図-20) である。

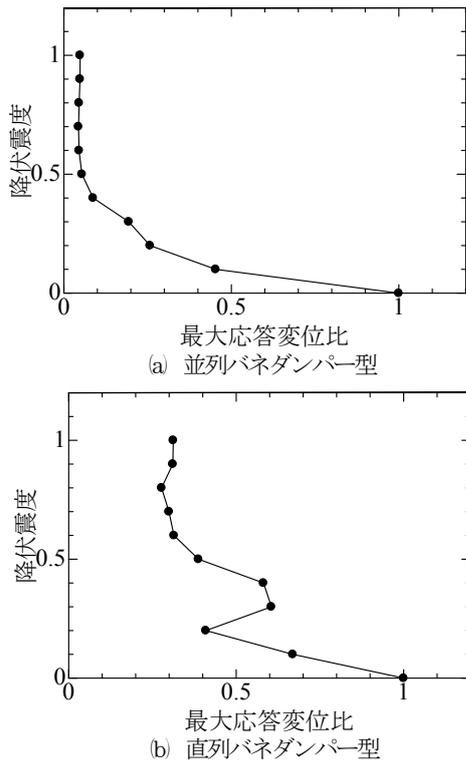


図-20 降伏震度-最大応答変位比

5. まとめ

5.1 ビンガム材について

本年度行った実験より、速度依存性がほとんどなくエネルギー吸収量をもっとも高かったSB-03（ベントナイト）が優れた性能を発揮した。

(1) 履歴曲線が収束する理由

本年度の実験から得られた履歴曲線は、すべて繰り返し载荷により荷重値がある下限値に収束した。これは、温度上昇によるものと考えられる。試験後、供試体表面温度は100度近くまで上昇したのもあった。また、図-9 振動数変化により結果をみてもわかるように、荷重の低下がないためビンガム材の温度による変化は考えにくい。

(2) カップリングの影響

カップリングを行った3種類のうち、2つは処理を行うことで、荷重値が上昇した。また、上昇しなかったベントナイト（SB-04C）は粒子の隙間が大きくカップリング材がその内部に吸収され、粒子表面を滑らかにできなかったことが原因と考えられる。

(3) 特性値

図-11より特性値が大きいほど、荷重も大きくなることがわかった。しかし、フィラーに酸化チタン及びシリカを用いた場合のような粘性特性値の小さいサンプル材は荷重が小さく、速度依存の影響が大きい結果となった。これは液体の性能が表われたためと思われる。

5.2 動的解析による橋梁への適応性検討

図-20より、降伏震度0はダンパーなしであり、1に近づくにつれ、ダンパーの抵抗力は大きくなっていき、応答変位は緩やかに減少していく。この図は、降伏条件や、要求変位に対して適切な抵抗力を求めることができ、最適なダンパーを設計することが可能になる。新設橋に対しては、コストダウンにも繋がると思われる。

参考文献

- 1) 橋りょうの耐震設計, 沼田しょう一郎 基礎工 Vol.2, No.12, Page87-91 1974
- 2) 構造物用油圧緩衝器について, 磯浪隆一 油空圧 Vol.8, No.4, Page63-68 1994.10
- 3) ビンガムダンパー速度特性試験, 竹下学, 池永雅良 日本建築学会学術講演梗概集 B-2 構造 2 Vol. 2000, pp. 861-862 2000. 7
- 4) ビンガムダンパーを用いた実大フレーム実験, 藤生重雄 日本建築学会学術講演梗概集 B-2 構造 2 Vol. 2001, Page363-364 2001. 07. 31.
- 5) ビンガム特性ダンパー, 下田郁夫 日本機械学会関東支部総会講演会講演論文集 Vol. 8th, Page69-70 2002. 03. 14
- 6) 高減衰ゴムダンパーを用いた高橋脚桁橋と斜張橋のハイブリット実験, 五十嵐晃 2007 年度全国大会
- 7) 鶴巻有一郎: ビンガム流体と粘性流体, 2006.9.4
- 8) 土木学会編: 水理公式集, 平成11年
- 9) (社) 日本道路協会.; 道路橋示方書・同解説, v 耐震設計編, 2002, 3月

(受理 平成20年3月19日)