

免震構造用別置型鉛ダンパーの
復元力特性に関する研究

森田 慶子

免震構造用別置型鉛ダンパーの復元力特性に関する研究

第1章 序論	1
1.1 序文	1
1.2 本論文の構成	4
1.3 鉛ダンパーに関する既往の研究	6
1.4 別置型鉛ダンパー研究開発の経緯	8
1.5 研究の目的と方法	10
1.5.1 研究目的	10
1.5.2 研究対象と問題点	10
a) 素材	
b) 接合	
c) 復元力特性（履歴特性）	
d) ひずみ速度の影響	
e) クリープ・疲れ	
f) 鉛ダンパーの限界性能・形状保持	
g) 温度の影響	
h) 実大試験体と縮小試験体による復元力特性の把握	
i) 復元力特性のモデル化の違いが免震構造物の地震時応答に与える影響	
1.5.3 研究方法	12
a) 実験による鉛ダンパーの復元力特性の把握	
b) 振動応答解析による免震構造物の地震時挙動の把握	
1.6 用語の定義	15
1.7 参考文献	18
第2章 鉛の基本特性	21
2.1 緒言	21
2.2 鉛の基本特性	22
2.2.1 物理的性質	22
2.2.2 機械的性質	23
a) 引張試験による諸性質	
b) 応力度－ひずみ曲線の形	
c) 圧縮強さ	
2.2.3 その他の性質	26
a) 再結晶	
b) せん断応力を受けた場合の鉛の塑性変形	
c) クリープと疲れ	
d) 超塑性について	
e) 鉛の化学的性質	
2.2.4 鉛合金	29

2.3	鉄と鉛の接合	30
2.3.1	ホモゲン溶着法	30
2.3.2	ホモゲン溶着の合金層の引張強度	31
2.3.3	鉛ダンパーのホモゲン溶着部の引張強度	31
2.4	鉛ダンパーへの適用を想定した鉛の特性に関する試験	32
2.4.1	単調引張試験	32
	a) 試験概要	
	b) 試験結果	
2.4.2	動的繰り返し試験	33
	a) 試験概要	
	b) 軸方向試験の結果	
	c) せん断試験の結果	
2.5	まとめ	37
2.6	参考文献	38
第3章	鉛ダンパーの復元力特性	39
3.1	緒言	39
3.2	鉛ダンパーの概要と試験概要	40
3.2.1	鉛ダンパーの概要	40
3.2.2	試験概要	41
3.2.3	繰り返し試験における振幅の設定	44
3.3	縮小試験体と実大試験体の復元力特性の比較	45
3.4	正弦波による定常波入力時の試験結果と考察	47
3.4.1	試験結果と復元力特性の概要	47
	a) I型試験体	
	b) U型試験体	
	c) 共通する特徴	
	d) 復元力特性の違い	
3.4.2	変形状態の観察	53
3.4.3	復元力特性の荷重値の概要と降伏耐力の推定	56
3.4.4	弾性剛性	67
3.4.5	塑性域の剛性	68
3.4.6	最大変形能力	69
3.4.7	鉛ダンパーの累積エネルギー吸収能力	71
	a) 部材角と破断までの繰り返し回数	
	b) 累積塑性変形能力	
	c) 累積エネルギー吸収能力	
3.4.8	繰り返しによる温度の変化と復元力特性の温度依存性について	75
3.5	地震波入力時の試験結果と考察	77
3.6	まとめ	79
3.7	参考文献	82

第4章	別置型鉛ダンパーを有する免震構造物の地震応答解析	83
4.1	緒言	83
4.2	解析概要	84
4.2.1	構造概要	84
4.2.2	解析モデル	84
4.2.3	アイソレータの復元力特性のモデル化	85
a)	アイソレータの概要	
b)	アイソレータの復元力特性の概要	
4.2.4	ダンパーの復元力特性のモデル化	86
a)	U型鉛ダンパーの概要	
b)	U型鉛ダンパーの復元力特性の概要	
c)	完全弾塑性型 bi-linear (単純 bi-linear)	
d)	降伏点の振幅依存性を考慮した復元力特性 (振幅依存 bi-linear)	
e)	降伏後の復元力特性にハードニングを考慮した復元力特性 (tri-linear)	
f)	動的試験の代表値として取り扱う定常波入力 of 復元力特性	
4.2.5	アイソレータと組み合わせることによるダンパーの力学緩和	89
4.2.6	入力地震動	89
4.3	解析結果	91
4.3.1	免震層の復元力特性	91
4.3.2	復元力特性の違いが最大応答加速度に与える影響	92
4.3.3	復元力特性の違いが免震層の応答変位に与える影響	95
4.4	実免震建物における小外乱時の観測記録との比較	102
4.4.1	建物概要	102
4.4.2	解析モデル	102
4.4.3	観測記録との比較	104
4.5	まとめ	105
4.6	参考文献	106
第5章	結論	107
付録	FEM 解析による鉛ダンパーの内部ひずみ分布の把握	113
1.	解析方法	113
1.1	解析モデル	113
1.2	解析条件	115
1.3	材料特性	115
1.4	モデルの精度による比較	116
2.	解析結果	117
2.1	復元力特性	117
2.2	変形状態	119

2.3 可撓部の塑性ひずみ度分布	119
2.4 可撓部と補強部の境界面における塑性ひずみ度分布	121
3. まとめ	122
4. 参考文献	122

第1章 序論

1.1 序文

免震構造は、建築物を地盤から絶縁することにより、構造体のみならず、建物の中の居住者や内容物までも含めて大地震の被害から免れようとする構造システムである。建物を地盤から絶縁する方法としては古くからいくつかの提案がなされてきている。絶縁システムは、J.A. Calantari¹⁾が1909年に最初に提案したとされている。彼の提案は、構造体を滑石(雲母)の層を介して基礎から隔離するという方法であった。我が国では、1933年の岡隆一²⁾による免震柱、1969年の松下、和泉らによるRocking Bearing Ball³⁾システムなどの提案があった。しかし、本格的に免震建物が建設され始めたのは積層ゴムアイソレータが用いられ始めた1970年後半の事である。我が国では、1979年から福岡大学多田英之研究室において積層ゴムの研究開発に着手し始め、積層ゴムを用いた最初の免震構造物である八千代台住宅が1982年に竣工した。

地震が発生した際には、免震構造の応答変形を設計範囲内とし、振動を早期に収束させるために、適切な減衰能力を付与する必要がある。付与する減衰量には入力レベルに応じた適切な量が存在する。減衰量を適切に付与することで応答変位・応答加速度を充分低減することができる。建物の全重量を支え、その荷重を安定的に支えたまま水平方向に大きく変形し、地震動から上部構造を遮断する機構をアイソレータ、減衰を付与する機構をダンパーと呼ぶ。

ダンパーには、種々の形状、機構、材質を持つものが考案され、使用されている。免震構造の初期には金属の塑性変形を利用したダンパーが考案され、その後、摩擦や粘弾性体を用いたダンパーも考案された。現在では、ダンパー機能が付与されたアイソレータも利用されている。このダンパー機能付与型アイソレータには荷重支持能力が求められるが、アイソレータと独立させ別に設置するタイプのダンパーには基本的に荷重支持能力は必要ない。

アイソレータと組み合わせて用いるダンパーを作動原理で分類すると概ね次の通りとなる。

- 1) 粘性減衰型：粘弾性ダンパー、オイルダンパーなど
- 2) 摩擦減衰型：摩擦ダンパー
- 3) 履歴減衰型：鋼棒ダンパー、鉛ダンパーなど

粘性減衰型にはピストンシリンダー構造を持ち、流体の乱流抵抗を利用するオイルダンパーや粘性体のせん断変形を利用する粘性体ダンパーなどがある。このタイプでは、速度のべき乗にほぼ比例した減衰力が得られ、その復元力特性は滑らかな楕円形を示す。しかし、実際の使用に際しては、使用している粘性材料の経年変化やメンテナンスの問題、抵抗力の温度依存性、速度依存性などに注意する必要がある。

摩擦ダンパーは、皿バネなどを用いて摩擦面同士を一定の力で接触させるタイプと、弾性滑り支承のように建物の荷重を支持しながら摩擦によりエネルギー吸収を行うタイプがある。摩擦ダンパーの復元力特性は完全剛塑性型に近い形状を示すが、使用に際して摩擦面の耐久

性や摩擦力、摩擦係数の荷重依存性などに留意する必要がある。

履歴減衰型は鋼材や鉛材等の塑性変形を利用したものであり、簡単な機構により必要な減衰力を得ることができる。また、一般に流通しているだけでなく、比較的安価な材料を用いるため、多用されている。部材の断面性能を変化させることで、容易に大容量化が可能であり、設計の自由度も高い。

ダンパーと積層ゴムアイソレータを組み合わす場合、粘性減衰型ダンパーでは変形が大きくなるに従って、その抵抗力も増大するので、等価粘性減衰定数は変形量によらず一定を保つ。これに対して摩擦減衰型、履歴減衰型ダンパーは、抵抗力が変形の増大に比例しない。しかし、ダンパーの耐久性、維持管理の容易さや施工上の観点から見ると、粘性減衰型の場合は粘性材料のメンテナンスに注意を要し、摩擦減衰型の場合には摩擦面や摺動部分の維持などに注意を要する。履歴減衰型に用いられる素材は、古くから建築で使用されてきた鋼材や、自然界でもっとも安定した金属である鉛などである。これらの金属は優れた耐久性を持ち、メンテナンスも簡単である。従って、現在のところ、履歴減衰型ダンパーが対地震用のダンパーとして最も信頼性があると考えられる。

軟鋼を利用したダンパーは、1970年代前半に R.I. Skinner^{4) 5)}、R.G. Tyler⁶⁾らにより提案されている。これらのダンパーは、地盤と建築物の相対変位を鋼材ダンパーのねじれ変形、曲げ変形に変換することで、地震エネルギーの吸収を実現している。復元力特性は素材の特性により変化するが、軟鋼を用いたダンパーでは滑らかな紡錘型を示す。

鉛材を用いたダンパーとしては、1971年に W.H. Robinson により発明された鉛押出型ダンパー⁷⁾ (Lead Extrusion Damper: 略称 LED)がある。LED は、絞りを付けた鋼管の中に鉛を充填し、これを前後に押し引きさせることでエネルギー吸収をさせようとするものである。このダンパーの復元力特性はほぼ剛塑性型に近いものとなる。1980年代になると積層ゴムの中に鉛プラグを埋め込んでエネルギー吸収を行わせるアイソレータ⁸⁾ (鉛プラグ入り積層ゴムアイソレータ: 略称 LRB)が W.H. Robinson によって開発された。

純度の高い鉛は、大変形域で優れた繰返し塑性変形能力を所有している。鉛材はエネルギー吸収能力に優れ、塑性変形を受けるに従い、回復、再結晶という過程を通り、よりきめの細かい結晶となり、変形能力が上昇するという特性⁹⁾を有する。極めて延性に富んだ特性を示すため、大変形領域で用いるのに適している。また、微小な変形から降伏を示すので、比較的小変形時から減衰性能を発揮することも期待できる。

ダンパーの地震エネルギー吸収能力を確保するためには、ダンパーの素材にエネルギー吸収能力の高いものを用いることが望まれる。加えて、ダンパーの形状は応力集中が極端にならないよう配慮されるべきである。履歴減衰型ダンパーの大部分は bi-linear 型にモデル化することができ、このような復元力特性は、剛性と降伏耐力により特徴づけられる。特に降伏耐力は減衰量を示す一つの指標となるため、免震層の最大変位に及ぼす影響が大きい。免震層の減衰量は、大きすぎると高次振動モードの影響により床応答加速度が大きくなり、上部構造の応答低減効果が薄れる。反対に、減衰量が小さすぎると地震時の応答変位が大きくなったり、風によって建物が動いてしまったりすることもある。使用するダンパーの個数を単に増やすだけでは免震層へ配置する部材の関係もあり、問題の解決とはならない。よって、

ダンパーの降伏耐力をある程度自由に調整でき、減衰量を自由に変更できることが望ましい。この条件を十分に満たすことができるのが鉛を用いたダンパーである。

従来、鉛は LED や LRB の様に鋼管や積層ゴムの中に閉じこめられて利用されてきた。これは、鉛を鋼板などに接着する技術が普及していなかったためと考えられる。どのようにして鉛を捕まえておいて、どのようにして地震のエネルギーを鉛に吸収させるかが問題である。フランジとなる鋼板に鉛を溶接によって直接接合しようとした場合、十分な引張強度が得られない。本論で示す鉛ダンパーでは、フランジと鉛軸部の間に必要な引張強度を持たせるために、補充材を用いて溶接する方法であるホモゲン溶着法を用いて鉄と鉛の接合を行っている。また、変形を許容する鉛部(可撓部)は、大変形時にもその変形に追従でき、過大な塑性変形が局部に繰返し集中しないような形状となっている。

鉛ダンパーの形状としては、円柱型と湾曲型がある。円柱型は鉛の円柱であり、湾曲型は、円柱型にたるみを付けた形となっている。円柱型は曲げせん断変形に加えて、水平変形の増大に伴って軸方向変形が卓越してくる。湾曲型は、軸方向変形をできるだけ生じさせないで、曲げせん断変形が卓越するように設計されたものである。円柱型の復元力特性は、この軸方向変形の影響により、変形と共に抵抗力も増大する蝶型を示し、湾曲型の復元力特性は、ある変形領域までは、ほぼ剛塑性に近い特性を示す。

履歴減衰型ダンパーの設計で重要な点は、変形能力と地震エネルギー吸収能力の確保と復元力特性の形状、耐久性である。ダンパーの性能を把握する試験においては、変形速度や変形レベルを実挙動にあわせて実施することが望まれる。ダンパーは、地震により建物に投入されたエネルギーを全て吸収する必要があり、免震層の最大変形を所定限度内に収めるための減衰能力と変形能力が要求される。また、地震によって入力されるエネルギーは、ダンパーが繰返し変形することによって熱に変換される。ダンパーの温度が上昇した場合でも、安定した減衰能力と変形能力を示す必要がある。加えてダンパーの限界性能を把握しておくことも重要である。

免震層の復元力特性が上部構造の応答に与える影響については、地震応答解析を用いて検討する。免震建物の設計では、設計用入力地震動に対してダンパー量が最適化されることが多い。この場合、想定している地震動の大きさによっては、それより小さなレベルの地震動に対して応答を増幅させることもある。逆の場合には、強風などで免震層の変形が大きくなり、居住性を低下させることもあり得る。従って、設計されたダンパーの減衰能力が強風時の様な中小地震時にどの様な応答性状を示すのかの検討も必要である。

以上より、本論では、免震用ダンパーとして、鉛を封緘することなく独立させた別置型鉛ダンパーに着目し、現在までの知見を集約する。別置型鉛ダンパーは、免震構造用ダンパーとしての機能を充分有しており、ダンパーの設計の自由度も大きいことを示す。加えて、鉛ダンパーの復元力特性の明確化を計ることを目的とする。

1.2 本論文の構成

本論文は、5章で構成する。

第1章は序論であり、本論文の目的、既往の研究について述べ、研究の対象と問題点について述べる。あわせて、鉛ダンパーの実験及び解析について、それぞれの目的と方法について述べる。

第2章は、鉛の基本特性について示す。

鉛は遮音材や防振材として使用されることが多く、建築の構造部材として使用されることは、鋼材に比べると非常に少ない。このため、本章前半では既往の研究結果を参考に鉛の基本特性を示し、鉛と鉄の接合方法とその強度について紹介する。

文献調査によって得られた既知の基本的な材料試験結果のみでは、鉛ダンパーへの適用は不十分であると判断した。鉛ダンパーへの適用を想定した材料試験として、引張速度を変化させた単調引張試験を実施した。文献に示される通り、ひずみ速度によって引張強さが変化することを確認し、それぞれのひずみ速度に対応した引張強さを示す。

動的繰り返しに対する特性を把握しておくことも必要であるため、軸方向及びせん断方向の繰り返し特性を把握するための部材試験を実施した。軸方向試験から得られた応力度と、せん断試験から得られた応力度は相当応力度として概ね関連づけられることを示す。

また、動的繰り返しせん断試験により、鉛ダンパーの復元力特性のモデル化に必要な初期降伏変位を定義するためのせん断ひずみを部材試験より定義する。

第3章は、鉛ダンパーの基本的な復元力特性を示す。

実建物に使用されているダンパーはU型鉛ダンパーであるが、基本的な形状であるI型鉛ダンパーの復元力特性からU型鉛ダンパーの特性についても推定できることを示す。これらの基本特性をふまえて、U型鉛ダンパーを特殊な条件下で行った実験の結果を考察し、一般化を行った結果について述べる。鉛ダンパーの復元力特性についてその特徴を示し、応答解析に必要なパラメータのモデル化を行う。

第2章の部材試験より得た動的せん断変形時のひずみに基づき、鉛ダンパーの降伏変位及び、降伏応力度を定義する。定常波加振から得られる結果においても、鉛材は小振幅の範囲から降伏を示すことが分かった。また、ある範囲までは加振振幅が大きくなるに従って降伏耐力が上昇してゆくことを実験により確認し、降伏耐力の予測式となる回帰曲線を示す。

大変形時の剛性については、部材試験では定義する事が出来なかったために、鉛ダンパーの復元力特性から定義する。

実大試験を原則としているが、試験内容によっては、試験機の制約を受けることもある。この場合には、縮小試験体を用いた試験も実施した。縮小試験体を用いた試験の適用範囲と有効性を示し、実大試験の結果と照らし合わせながら、鉛ダンパーの変形限界を定義する。

温度の影響やエネルギー吸収量についても考察する。温度の違いが復元力特性、特に降伏

耐力にどのような影響を与えるかを示す。繰り返し変形を受けた場合の温度変化も示し、併せて鉛ダンパーのエネルギー吸収能力についても評価する。

第4章は、U型鉛ダンパーの復元力特性のモデル化が、応答解析の際にどのような影響を与えるかについて述べる。

免震構造は基礎部に免震層を配することで、地震動の上部構造への伝搬を妨げる一種のフィルターを有した構造となっている。構造物の地震時応答予測を行う場合、構造部材のモデル化が重要となる。フロアレスポンスを問題とする場合には、実際の履歴形状とエネルギー吸収量を忠実に反映したモデル化とする必要がある。この点、免震構造においては、アイソレータやダンパー等の免震部材の性能が事前に確認できるために、精度の高い応答予測が可能となる。逆に言えば、将来起きるであろう地震動がどのようなものであるかが予測できれば、適切に免震部材を設計することで、性能の高い免震建物が容易に設計できる。

既往の研究では、履歴減衰型ダンパーの復元力特性として完全弾塑性型 **bi-linear** が多く用いられている。しかし、これは実際のダンパーの復元力特性とは多少の差異がある。鋼材ダンパーに比べて、鉛ダンパーは早期に降伏を促すことができ、微小な振幅から減衰効果を発揮する。また、鉛ダンパーの復元力特性は小変形領域において完全弾塑性型 **bi-linear** を示すが、ある変形領域を越えると、その復元力特性にハードニングが表れ始める。ここでは、この2点の特徴に着目し、ダンパーの復元力特性をモデル化し、その違いが免震構造の応答特性、特に免震層の応答変位に及ぼす影響について検討する。加えて、実際の地震観測記録との比較を行う。

第5章は、これらの一連の結果より得られた主な知見をまとめて示す。

最終章に付録を添付する。これは鉛ダンパーのひずみ分布を解析的に把握するために、有限要素解析により3次元弾塑性静的応力解析を行った結果である。地震時を想定した加力実験によって、鉛ダンパーの復元力特性を得ることができる。しかし、ダンパー内部のひずみ分布についてはひずみゲージがその変形に追従できないこともあり、実験的には確認されていない。内部のひずみ分布を把握することによって、過大な塑性変形が局部に集中しないように形状を決定することも可能である。解析に用いる鉛の材料特性のモデル化は、通常、静的単純引張試験の結果に基づいて行われる。しかし、鉛の場合にはひずみ速度依存性が顕著であるために、動的試験から得られた降伏応力度を用いることで動的な挙動を解析的に再現できることを示す。

1.3 鉛ダンパーに関する既往の研究

鉛は遮音材や防振材として多用されている。鉛は、振動の伝播を断絶遮断し、振動エネルギーを吸収減衰する能力を有しているためである。遮音材としては建築物の間仕切り等に施工されている。防振材としては、振動絶縁の目的で、鉄道やその他の振動源に近接して建てられる建築物の基礎として使用されている。また、振動の悪影響から防護するために精密機械の下に鉛塊を使用することもある。

地震エネルギーを鉛で吸収させるような使用方法は、1970年代にニュージーランドで最初に採用された。1971年4月に W.H. Robinson⁹⁾によって発明された鉛押し型ダンパー(Lead Extrusion Damper、略称LED)である。鉛押し型ダンパーの概要を図1.3.1に示す。LEDは、エネルギー吸収機能を有する免震支承である鉛プラグ入り積層ゴムアイソレータ(LRB)の開発の発端となった装置である。LEDの原理は、鉛を穴またはオリフィスを通して押し込むか押し出し、これによって鉛に塑性変形を与え、エネルギーを吸収する機構となっている。LEDダンパーは復元力特性がほぼ矩形を示し、地震時の応答振動数範囲では速度依存性が見られず、その抵抗力はストロークや変形に無関係である。また、鉛の特徴である再結晶、結晶粒成長のおかげで、LEDダンパーの鉛の抵抗力は永久に初期の状態に復帰する。しかし、LEDダンパーのストロークは構造上、シャフトの座屈に制限される。ストローク±200mmで、15tの抵抗力を持つLEDダンパーの寸法は外径150mm以下、全長1.5m以下、全重量は100kg以下である。

この機構自体は以前からあるものであり、おそらく1797年に特許を取得した Joseph Bramah の「鉛あるいは他の軟金属の全サイズに対応可能な継ぎ目なし管製造用プレス」が原型であろうとされている¹⁰⁾。

W.H. Robinson は、別置型鉛ダンパーの研究にも着手しており、1975年にニュージーランドにおいて特許^{11)~14)}を取得している。本論で取り扱う別置型鉛ダンパーと同様に、フランジに接合された鉛のブロックにせん断変形を与えることでエネルギー吸収させる機構となっている。曲げモーメントの影響を小さくするために、鉛ブロックは直径 D と高さ h の関係が、 $D/h=1/1\sim 10/1$ の扁平な形状となっている。このため、大変形には追従しにくい形状であった。目視で異常が確認でき、交換可能であることが望ましく、フランジと鉛ブロックを接合する場合には、鉛ブロックの端部にハンチを設

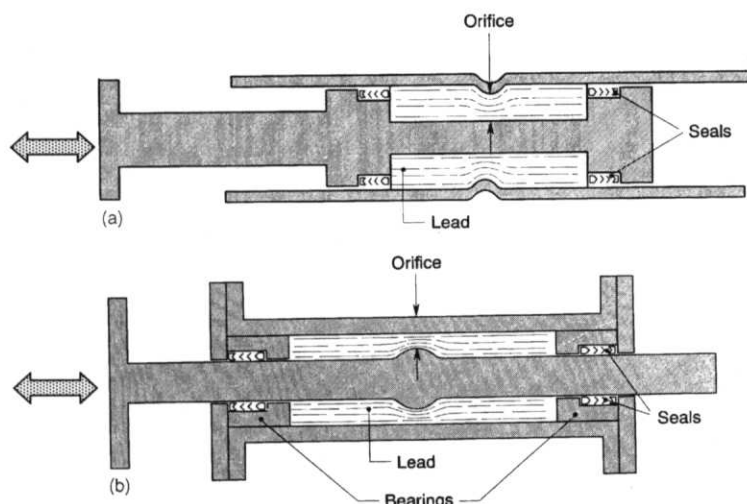


図 1.3.1 鉛押し型ダンパー

け、接合部端部の応力を緩和することが望ましいが、鉛を地震時の大変形に追随させるためには、積層ゴムアイソレータの中に設置して使用することが望ましいだろう、と示されている。W.H. Robinson によって考案された別置型の鉛ダンパーは実際に使用されることはなく、この試験結果は LRB に適用されることとなった。

我が国において、対地震用に鉛ダンパーの開発を始めたのは 1980 年代である。1981 年には、日本鋼管が球形タンクに適用するための耐震ダンパーを特許出願¹⁵⁾している。帯状の鉛板と防振ゴムとを接着した複合材を、ロールケーキのように渦巻き状に巻いたダンパーである。(図 1.3.2)

多田英之らと筆者は 1984 年に鉛に関する研究に着手し始め¹⁶⁾、1985 年から本格的に鉛を減衰材として採用したダンパー単体の開発を始めた。この別置型鉛ダンパーが本論文中で使用している鉛ダンパーである。対地震用として実建物に使用された別置型鉛ダンパーは、U 型鉛ダンパーが第 1 号である。なお、オイレス工業を中心として LRB が実建物に採用され始めたのもこの頃である。

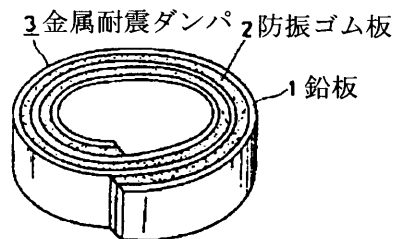


図 1.3.2 金属耐震ダンパ

1988 年からは制振構造用として、鉛を採用したダンパーの研究成果^{17)~18)}が発表され始めた。文献 17)では、W.H. Robinson の考案した鉛押しダンパーを小規模フレームに組み込み、振動台実験を行ってその挙動の有効性を確認している。その結果、フレームに組み込んだ鉛押しダンパーは単体で試験を行った場合と同じ結果を示すことが確認されている。文献 18)では、立方体の鉛を封緘せずフランジに直接接合することによって実験を行っている。試験結果より鉛の復元力特性はほぼ剛塑性型になるため、制震ダンパーとして好ましい特性を有していることが示されている。

2000 年からは、神奈川大学において 23 階建ての実免震建物における挙動観測が開始され^{22)~33)}、その観測データが Webpage 上で公開³⁴⁾されている。本論文で示す別置型鉛ダンパーが使用されており、常時微動測定、地震および風外乱に対する実挙動観測が実施されている。捩れ振動特性、固有振動数、減衰特性、振動モード、免震層の復元力特性等について検討が行われている。また、文献 35)~36)においても、別置型鉛ダンパーが使用された超高層免震建物の小地震時の挙動が評価されている。いずれの観測結果においても、別置型鉛ダンパーが実際の使用に際しても微小な振幅から降伏を示し、減衰効果を発揮することが確認されている。

1.4 別置型鉛ダンパー研究開発の経緯

鉛を減衰材として利用する場合に、どのようにして鉛を捕まえておいて、どのようにして地震のエネルギーを鉛に吸収させるかが問題になる。前述の鉛押しダンパー(LED)も鉛プラグ入り積層ゴムアイソレータ(LRB)も、地震時にその変形に追随させ、且つ、エネルギーを鉛に有効に吸収させるための工夫が凝らされている。

本論で使用している鉛ダンパーは、他の材料の中に鉛を封緘することなく単独で使用するものである。上下両端に接合されたフランジである鋼板を免震層の上下に固定し、地震時にはせん断方向に変形することによってそのエネルギーを吸収する機構となっている。このため、鋼板と鉛をいかに接合するかが重要な問題となる。そこで、従来、化学工業の諸機械、機器の腐食防止用として100年以上使用されてきているホモゲン溶着に着目した。ホモゲン溶着法は、硫酸の貯蔵や運搬を行う容器に施工されるもので、鉄鋼またはその他の金属に鉛を融着する方法である。広く一般に使用されているもので、必要な引張強度を得ることができた。

最も初期の段階においては、鉛ダンパーの基礎的な特性を把握するため、写真 1.4.1 に示すような円柱状の形状の鉛ダンパーを用いて予備試験を行い、鉛を独立させた状態でのダンパーとしての有効性を確認した。この段階においても鋼板と鉛の接合にはホモゲン溶着法を使用している。この形状の場合、ホモゲン溶着を施した合金層の強度が、純鉛の4倍以上の強度を保持¹⁹⁾しているにもかかわらず、せん断変形を与えた場合に鉛と鋼板の間の合金層から破断する結果となった。破断面の状況から、溶着面の外周部端部に応力集中が発生したことを確認している。そこで、写真 1.4.2 に示すようにハンチを付けた形状に変更を行い、鉛

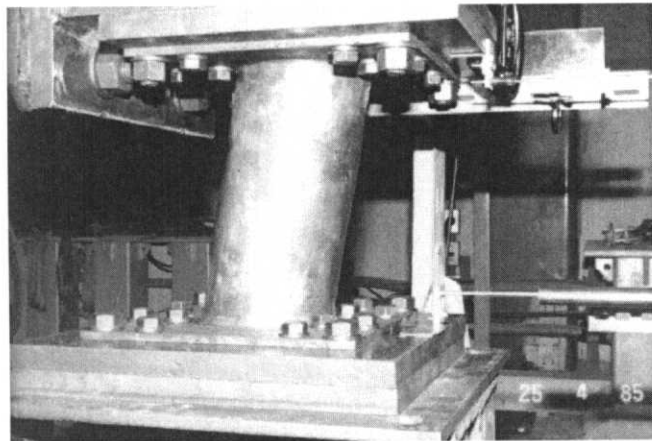


写真 1.4.1 開発初期段階の鉛ダンパー
(ハンチなし)

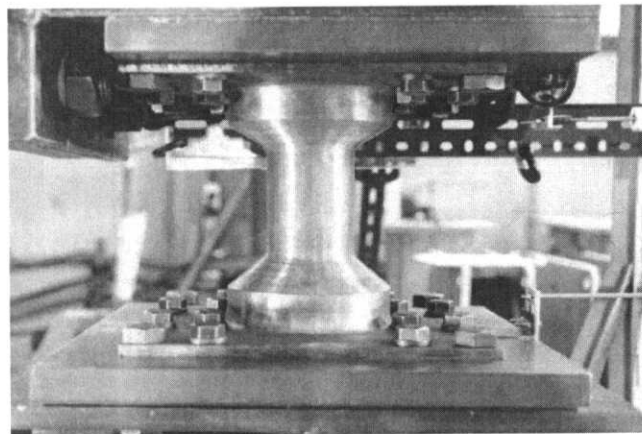


写真 1.4.2 開発初期段階の鉛ダンパー
(I型鉛ダンパー, 70mmφ)

部を補強部と可撓部の構成としたところ、境界面の応力緩和が計られた。この円柱型のダンパーがI型鉛ダンパーである。以後、湾曲型であるU型鉛ダンパーにおいても、鉛部は補強部と可撓部から構成されている。(写真1.4.3参照)

I型鉛ダンパーでは、小変形領域での復元力特性は剛塑性挙動を示すが、変形が大きくなるに従い軸方向変形の影響によってその抵抗力も大きくなり、蝶型の復元力特性を示す。大変形領域においても復元力特性を剛塑性に近づけるために、軸方向変形の影響を小さく抑え、曲げせん断変形が優先するように形状を変更したものが、図1.4.1に示すC型、J型、U型鉛ダンパーである。C型やJ型はその形状のため、単体では自立できず、2体組み合わせ取り扱う必要があった。また、加力方向の違いによる復元力特性の違いが顕著に示された。このため、実際の免震建物に採用したのはU型鉛ダンパーのみである。全ての鉛ダンパーは、水平変形を受けて自由に変形可能な部分(可撓部)とこの可撓部の変形能力を確保するための円錐状の補強部、更にダンパー取付けのための鋼製フランジにより構成されている。補強部の直径は可撓部直径の2倍である。鋼板と補強部との接合にはホモゲン溶着法を採用している。

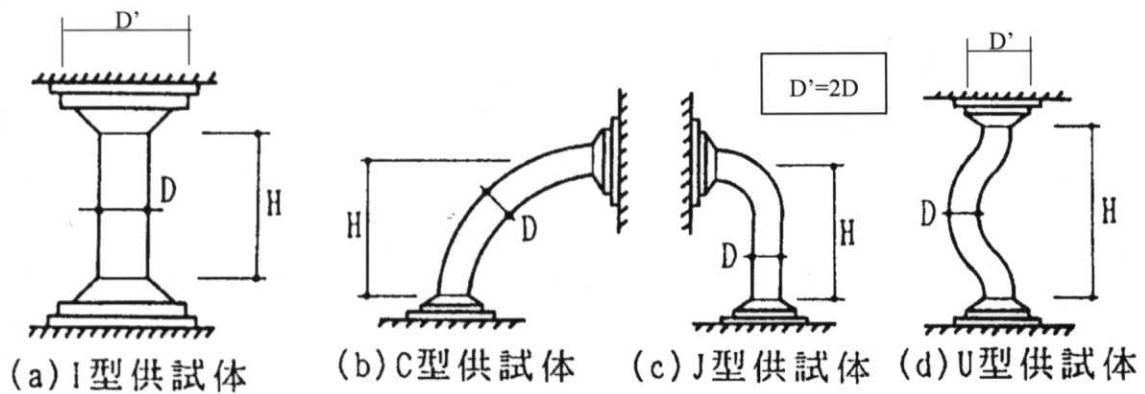


図 1.4.1 試験体概要

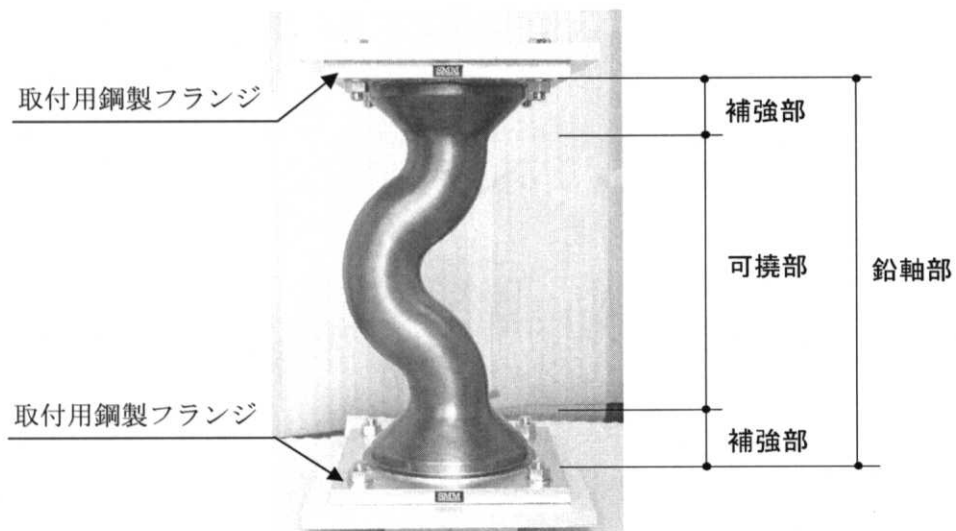


写真 1.4.3 U180 鉛ダンパー

1.5 研究の目的と方法

1.5.1 研究目的

本論で、対象とする鉛ダンパーは別置型鉛ダンパーである。別置型鉛ダンパーは取付け用の鋼製フランジと純度の高い鉛から構成されている。純度の高い鉛は、極めて延性に富んだ特性を示すのに加えて、大変形領域で用いるのに適している。大変形域で優れた繰返し塑性変形能力を所有している。復元力特性は、矩形に近い形状となり、大きな減衰性能を持つことが期待できる。鉛は塑性変形により生じた結晶格子の欠陥が、常温での再結晶により解消されるという性質を持つため、たとえ弾性範囲で残留変形があったとしても応力が解消される。また、鋼材ダンパーに比べて早期に降伏を促すことができ、比較的小変形時から減衰性能を発揮するという性質を持つ。常温で同じような性質を示す金属には、錫や金等があるが、建築部材として安価に供給できるものとしては鉛が最適である。

別置型の他に鉛に地震エネルギーを吸収させる方法としては、鉛を鋼管等に封じ込め、周囲が拘束された状態で塑性変形を与える鉛押しダンパー、鉛プラグをアイソレータの中央部に挿入し、アイソレータの変形によって塑性せん断変形を強制する鉛プラグ入りアイソレータ等がある。これらの方法では、意図した変形しか許容しないため、塑性変形中も鉛の形状がある程度保たれるという利点をもつ。その一方で、鉛の形状に制限があるため、自由にそのエネルギー吸収の容量も変更できない欠点がある。そこで、鉛を1つのダンパーとして独立させることで、任意の形状・寸法が選択可能であり、アイソレータとの組合せによって自由な設計が可能となるような別置型ダンパーを開発した。本論では現在までの知見を集約すると共に、このような別置型鉛ダンパーの設計式の提案、復元力特性の明確化を計り、免震構造の設計に関わる諸量の定量化を行うことを目的とする。

1.5.2 研究対象と問題点

a) 素材

現在一般的に使用されている主要な鉛製品は、純鉛としてよりもむしろ鉛合金として使用することが多い。鉛合金の利点は、純鉛と比較して機械的強度が増すこと、及び casting しやすくなることである。しかし、鉛素材のもつ優れた延性能力を低下させることも事実である。

変形を受けた鉛は発熱により回復および再結晶という過程をたどる。この回復、再結晶は試験体の不純物により強い影響を受ける。鉛合金を使った場合には降伏耐力が純鉛に比べて大きくなるが、その反面、鉛の優れた延性が低下し、大変形での変形追随性が低下する。純度 99.99%以上の純鉛であれば、そのような性能低下は見られない。別置型鉛ダンパーは、鋼板と鉛軸部の接合部の合金層を除いて純度 99.99%以上の鉛を使用している。この素材の鉛ダンパーの各種試験を実施し、その性能を検証した。現在、製錬技術も発達し高純度の鉛の供給は十分可能である。従って、本研究の成果は純度 99.99%以上の鉛ダンパーに対して適用できるものと考えられる。

b) 接合

従来、鉛は鋼管や積層ゴムの中に閉じこめられて利用されてきた。これは、地震時に単独の鉛の形状を維持させつつ捕まえておいて、エネルギーを吸収させるための方法として、鉛を鋼板に接着する技術が十分に普及していなかったためと考えられる。鉛の溶接には母材を直接溶接する方法と、補充材によって溶接する方法がある。フランジとなる鋼板に鉛を溶接によって接合しようとした場合、原子間距離が大きく異なるために十分な強度を持たせて接合することができない。鉛ダンパーのフランジと鉛軸部の間に必要な引張強度を持たせるために、補充材を用いて溶接する方法であるホモゲン溶着法を用いて鉄と鉛の接合を行っている。経年変化がその強度に及ぼす影響、微細振動が与える影響等いくつかの課題は残っているが、本論ではホモゲン溶着が基本的な性能を発揮するという前提のもとで議論を進めていく。

c) 復元力特性（履歴特性）

免震構造用ダンパーに要求される性能は、優れたエネルギー吸収能力、変形追随能力、および長期間にわたって初期の性能を維持する耐久性である。また、建物の用途によっては、フロアレスポンスを特に重要視する場合もあり、この場合にはダンパーの復元力特性の形状にも留意する必要がある。応答解析によって免震構造の地震時挙動を把握するためには、どのようにダンパーをモデル化するかが重要になってくる。降伏耐力、降伏変位、復元力特性の形状に着目し、モデル化について検討を行う。

なお、鉛は元に戻ろうとする復元力を有しない。本来、鉛に対して「復元力特性」という用語を用いることは、材料物理学的には相応しくないかもしれない。文献 39) に示された用語の意味は、下記のとおりである。

復元力：変形を受けた弾性体がもとの中立の位置に戻ろうとする力。

復元力特性：構造物または材料の変形と荷重、あるいは応力度とひずみ度の関係。

履歴特性とほぼ同じ意味に用いられる。振動解析においては、各部のバネの特性を表すもので、実際の履歴特性は単純な形状に理想化(モデル化)して用いられる。

「復元力特性」という用語は、構造工学的には履歴特性とほぼ同じ意味に用いられていると判断し、本論においては「バネの特性」という意味で使用する。

d) ひずみ速度の影響

鉛は鉄等と比較して、機械的性質がひずみ速度の影響を受けやすいという性質をもつ。動的試験より得られた降伏耐力は、静的試験より得られたものよりも大きな値を示すが、その関係は鉛ダンパーにおいても推定可能である。定常波加振による動的試験より得られた復元力特性を用いて、ひずみ速度が降伏耐力に与える影響を把握する。

e) クリープ・疲れ

文献 37)によれば、クリープによる伸長が年間 0.5%以下であれば、クリープ破断にいたることは無いと示されている。純鉛においては 58.5N/mm^2 の応力度が限界値である。U 型鉛ダンパーでは、そのユニークな形状ゆえに、U 型に突き出した湾曲部分のクリープによる形状変化が懸念されるかもしれない。クリープに対する強度を考察するために、現在免震構造に多用されている U180 鉛ダンパーを例に挙げる。その重量は約 500kgf である。この重量がすべて直径 18cm の可撓部に支えられていると仮定した場合、その断面に生じる応力度は 0.196N/mm^2 となる。これはクリープ限界強度の $1/298$ 以下であり、鉛の引張強度の僅か $1/80$ である。従って、U 型鉛ダンパーは自重によるクリープによって形状を変化させる事はなく、十分な強度を保有していると判断する。実際に 10 年以上設置されている U 型鉛ダンパーの形状にも変化は見られていない。

文献 9)に示されている鉛の疲れ強さはクリープ強さより大きく、純鉛の場合、室温で 286N/mm^2 とされている。これは、10,000,000 回の周期性応力によっても鉛が破損しない最大の応力度として定義されている。

従って、本論で対象としている鉛の使用範囲において素材として十分な強度を保有していると判断したため、クリープと疲労については省略している。

f) 鉛ダンパーの限界性能・形状保持

先にも述べたとおりダンパーには変形追随能力とエネルギー吸収能力が要求されるため、それぞれの限界値をどのように定義するかが問題となってくる。ダンパーが許容できる最大変形量と、復元力特性の履歴面積をエネルギー吸収量と評価して限界を把握する。

加えて、別置型は封緘型に比べて形状保持が成立するか否かが問題となる。言い換えれば、ダンパーのエネルギー吸収特性が形状変化の影響を受けにくいことが必要である。

g) 温度の影響

鉛の素材として、温度が変化すれば機械的性質も変わる。変形の繰り返しによって温度が上昇することもあれば、夏場と冬場では環境温度が変化するため、機械的性質に影響を与える。これらを把握しておくことも肝要である。変形の繰り返しによる温度上昇とヤング率の変化を実験により確認し、文献に示された値と比較する。また、環境温度が降伏耐力にどのような影響を与えるかを把握する。

h) 実大試験体と縮小試験体による復元力特性の把握

地震時の特性を把握するために、動的加力試験によってその特性を確認することは重要である。実大レベルでの動的試験を行う場合には試験機の加振能力の制約や試験体数、実験の困難さ等の問題が発生するため、縮小模型を用いて試験を行うこともある。模型試験を行う場合には、模型試験から得られた測定値と実大試験の測定値との間にはどのような関係があるか、また逆に相似則が成り立つためにはどのような条件が必要か把握し、検討を行う。

i) 復元力特性のモデル化の違いが免震構造物の地震時応答に与える影響

構造物の地震時応答予測を行う場合、構造部材の復元力特性のモデル化が重要となる。フロアレスポンスを問題とする場合には、実際の復元力特性の形状とエネルギー吸収量を忠実に反映してモデル化する必要がある。設計を行う際、履歴減衰型ダンパーの復元力特性として完全弾塑性型 bi-linear が多用されているが、実際のダンパーの復元力特性とは多少の差異がある。別置型鉛ダンパーは、小振幅から降伏を示し減衰能力を発揮する。また、変形がある程度の大きさに達してからは、剛性にハードニングが表れ始める。これらの復元力特性が、免震構造の地震時応答特性にどのような影響を与えるかを U 型鉛ダンパーに対して検討を行う。

1.5.3 研究方法

a) 実験による鉛ダンパーの復元力特性の把握

鉛ダンパーが耐地震用ダンパーとして要求される性能を有していることを確認するための試験を実施し、あわせてその復元力特性を把握する。

免震用ダンパーに要求される性能は、優れたエネルギー吸収能力、変形追随能力、および長期間にわたって初期の性能を維持する耐久性である。また、建物の用途によっては、フロアレスポンスを特に重要視する場合もある。この場合には、ダンパーの復元力特性の形状にも留意する必要がある。特に別置型では、封緘型に比べて形状保持が成立するか否かが問題で、言い換えれば、ダンパーのエネルギー吸収特性が形状変化の影響を受けにくいことが必要である。このような観点から、地震時におけるダンパーの復元力特性の安定性を確認する目的でダンパーに一連のせん断変形を与える試験を行った。

試験は、静的試験と動的試験を基本とした。鉛は、変形速度によって引張強さが変化し、一般に変形速度が小さくなると引張強さは低下する傾向を有する。このため、幾つかの sin 波による定常波加振を行うことにより変形速度に対する依存性を把握する。加振振幅および加振周波数はアクチュエータの能力を考慮して、加振振幅は $\pm 150\text{mm}$ 、加振周波数は 0.01Hz ~ 2Hz の範囲で変化させた。また、動的試験においては、鉛ダンパーの地震時応答特性を見るために、免震建物のモデルに実地震波を入力した場合の応答解析を行い、この解析から得られた応答変位波形をアクチュエータに入力して鉛ダンパーの応答履歴を観測した。

鉛ダンパーの復元力特性は、定常波加振における小変形領域、定常波加振における大変形領域、地震波入力を行った場合の 3 種類に分類して把握する。小変形領域と大変形領域の境目は、軸方向変形が顕著に現れ始めるせん断変形量と定義する。I 型鉛ダンパーは、変形が大きくなるに従いせん断力が大きくなる蝶型を示す。I 型鉛ダンパーの復元力特性は、小変形領域が U 型に比べて非常に小さいために大きく分けて 3 つの剛性と降伏耐力でモデル化する。一方、U 型鉛ダンパーは塑性後の勾配が小変形領域と大変形領域で異なる復元力特性を示す。これらの点に着目しながら、実験から得られた結果より復元力特性の把握を行う。

b) 振動応答解析による免震構造物の地震時挙動の把握

U型鉛ダンパーの復元力特性のモデル化が免震構造物の応答予測に与える影響について振動応答解析を用いて検討を行なう。

鉛ダンパーは比較的微小な振幅から降伏を示し、減衰能力を発揮する。振幅が大きくなってゆくに従って、ある程度の変形まで降伏点が上昇してゆく。大変形領域の範囲で決定した降伏耐力を使用して完全弾塑性型 **bi-linear** でモデル化した場合には、この現象を考慮しておらず、小変形領域の履歴減衰を過大に評価する可能性もある。降伏点の振幅依存性に考慮した鋼材の復元力特性をモデル化する手法³⁸⁾を参考にし、鉛ダンパーの降伏点の振幅依存性を考慮した復元力特性を用いた応答解析を行ない、その特徴を示す。

また、U型鉛ダンパーの復元力特性は、小変形領域において完全弾塑性型 **bi-linear** を示す。大変形領域に入ると、鉛ダンパーの可撓部に軸方向変形が現れ始めるために、引張力の影響が現れ、完全弾塑性型の復元力特性にハードニングが現れ始める。ハードニングの影響を考慮した復元力特性の応答解析を行ない、その特徴を示す。

降伏点の振幅依存性を考慮した場合の影響と、降伏後の復元力特性にハードニングを考慮した場合の影響について着目し、ダンパーの復元力特性を完全弾塑性型 **bi-linear** にモデル化した場合の応答特性との比較を行い、その特徴を明らかにする。

これらの復元力特性の違いが免震層の応答変位に与える影響については、エネルギー論の観点からほぼ説明することができる。完全弾塑性型 **bi-linear** から得られた結果を用いて推定した応答変位の予測式を提案する。

また、神奈川大学の免震棟³⁴⁾で観測された地震動を用いて、応答解析を行う。完全弾塑性型 **bi-linear** と比較して降伏耐力の振幅依存性を考慮したモデルが、小地震や強風時等の小外乱時の免震構造の応答評価に有効であることを示す。

1.6 用語の定義

封緘型(鉛ダンパー): 鉛押しダンパー(LED)の様に、鋼管など、他の材料の中に鉛を充填しエネルギーを吸収するような機構となっているものを封緘型と定義する。鉛プラグ入り積層ゴムアイソレータ(LRB)も鉛プラグを積層ゴムアイソレータに封緘し、エネルギーを吸収させる機構となっているので、封緘型として定義する。

別置型(鉛ダンパー): 封緘型と異なり、他の材料に鉛を封緘することなく単独でエネルギーを吸収させるような機構となっているものを別置型と定義する。本論で用いている I 型鉛ダンパー、U 型鉛ダンパーが別置型に該当する。

復元力: 変形を受けた弾性体がもとの中立の位置に戻ろうとする力。

復元力特性: 構造物または材料の変形と荷重、あるいは応力度とひずみ度の関係。履歴特性とほぼ同じ意味に用いられる。振動解析においては、各部のバネの特性を表すもので、実際の履歴特性は単純な形状に理想化(モデル化)して用いられる。³⁹⁾

鉛の再結晶という性質により、弾性範囲においても変形した鉛は、時間が経つと応力が解放され永久ひずみを残す。このため復元力を持たないが、構造工学的には履歴特性とほぼ同じ意味に用いられていると判断した。文献 40)においても、鉛ダンパーの項で復元力特性という用語が使用されているので、本論では「バネの特性」という意味で使用する。

耐力: 復元力特性において、せん断変形を与えたときの荷重値とする。

降伏耐力 P_y : 荷重-変形曲線の特性を検討するため、図 1.6.1 に示す各点の荷重値に着目する。A 点の荷重 P_A は試験体が剛体と見なせる範囲での最大耐力、B 点の荷重 P_B は 1 サイクル目の復元力特性での最大耐力、C 点の荷重 P_C は変位 0mm における最大耐力、D 点の荷重 P_D は 2 サイクル目以降の復元力特性での最大耐力とする。尚、本論で使用する鉛ダンパーの降伏耐力とは、復元力特性において、せん断変形 0mm における耐力(C 点における最大耐力 P_C)の正側と負側の絶対値の平均値とする。

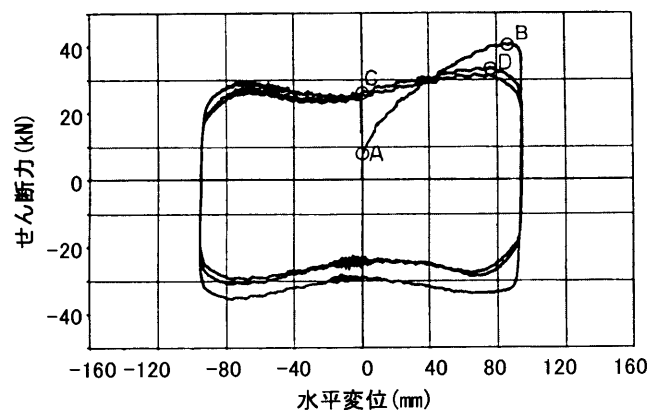


図 1.6.1 復元力特性での耐力

降伏応力度 σ_y : 鉛ダンパーの降伏耐力 P_y の評価については、鉛材が既に塑性領域に入っているために、厳密には弾性理論は適用できない。しかし、試験結果を理解する上で有効であると考えられるため、弾性論に基づいて鉛ダンパーを両端固定の曲げ部材と考え、(1.6.1)式により、前に定義した降伏耐力と降伏応力度を対応づける。

$$P_y = \frac{2Z_p \sigma_y}{H} = \frac{D^3 \sigma_y}{3 \cdot H} \quad (1.6.1)$$

ここで、 P_y : 降伏耐力(N), Z_p : 円形断面の塑性断面係数(mm^3) ($Z_p = D^3/6$),
 σ_y : 実験から得られる降伏応力度(N/mm^2), H : 可撓部高さ(mm),
 D : 可撓部直径(mm)

部材角 δ/H : 定常波加振の変形領域はせん断変形を与えた場合の部材角によって分類する。本論で用いる部材角 δ/H は、鉛ダンパーに与えられたせん断変形 δ と鉛ダンパーの可撓部高さ H で定義する。

限界変位 : 鉛ダンパーの復元力特性において、最大応力度(最大耐力)に達したときの変位を限界変位と定義する。

最大降伏変位 δ_e : 図 1.6.2 に示すように、U 型鉛ダンパーを正弦波で加振した場合、加振振幅が部材角 $\delta/H = 0.27$ ($\delta = 150\text{mm}$, $H = 560\text{mm}$)までの範囲では、剛塑性型に近い復元力特性を示す。部材角 $\delta/H \leq 0.27$ の範囲では部材角の増大に伴って降伏耐力が増加し、 $\delta/H = 0.27$ を越えると降伏耐力がほぼ一定になる傾向がある。部材角 $\delta/H = 0.27$ の変位を最大降伏変位と呼称する。

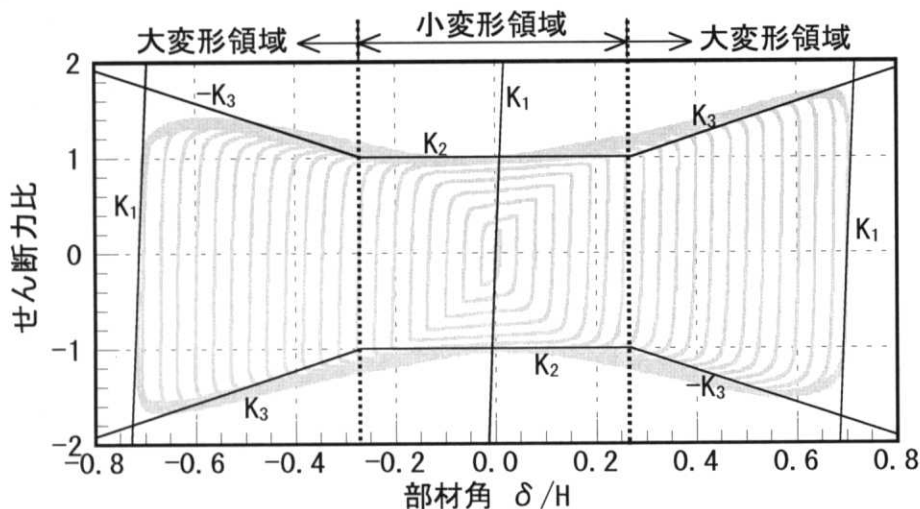


図 1.6.2 1/4 縮小試験体 (H18) のせん断力比と部材角の関係 (0.1Hz)

加工硬化および加工：加工硬化は、ひずみ硬化とも呼ばれる。一般に常温で塑性変形を受ける金属材料は、ひずみの増加に伴って変形抵抗を増し、応力-ひずみ曲線は降伏点（または耐力）以後漸次上昇する。加工という用語は、建築の分野においてなじみが薄いですが、ひずみを与えることを意味する。

加力方向：U型試験体の場合、加力方向により復元力特性の形状が若干異なる。加力方向の違いによる復元力特性の変化を検討するために、図 1.6.3 に示す様に試験体の屈曲部が加振方向に平行な場合(P方向、面内方向)と、直交している場合(O方向、面外方向)の2通りの加力を行なっている。復元力特性のモデル化の際には、方向性は無視できる範囲であると判断し、平均的な値を用いている。

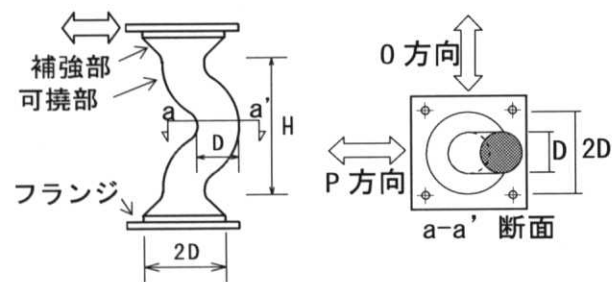


図 1.6.3 U型鉛ダンパー

1.7 参考文献

- 1) J.M. Kelly : Aseismic Base Isolation : Its History and Prospects, Joint Sealing and Bearing Systems for Concrete Structure, Vol.1, ACI, 1981
- 2) 岡隆一 : 免震構造に就て, 日本建築学会大会論文, 1933 年 4 月
- 3) K. Matsushita, M. Izumi : Studies on Mechanisms to Decrease Earthquake Forces Applied to Buildings, 4th Proceedings of WCEE, Vol.2, 1969, Santiago – Chile
- 4) R.I. Skinner, J.M. Kelly et al., : Hysteretic Dampers for Earthquake Resistant Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.3, 1975
- 5) R.I. Skinner, J.M. Kelly et al., : Energy Absorption Devices for Earthquake Resistant Structures, Proceedings of 5th WCEE, Vol.2, 1973
- 6) R.G. Tyler : A Tenacious Base Isolation System Using Round Steel Bars, Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol.11, No.4, 1978
- 7) W.H. Robinson and L.R. Greenbank : An Extrusion Energy Absorber Suitable for the Protection of Structures during an Earthquake, Earthquake Engineering and Structural Dynamics Vol.4, 1976
- 8) W.H. Robinson : Lead-Rubber Hysteretic Bearings Suitable for Protection Structures during Earthquakes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.10, 1982
- 9) 日本鉛垂鉛需要研究会 : 鉛ハンドブック 改訂版, 1992 年
- 10) C.E. Pearson : The Extrusion of Metals, John Wiley and Sons, New York, 1944
- 11) New Zealand Patent #178949, 1975
- 12) A.G. Tucker, W.H. Robinson : Shear energy absorbers, PEL Report, No.518, 1976
- 13) United States Patent #731453, 1976
- 14) 日本 公開特許公報 特開昭 52-49609, 1977(審査未請求)
- 15) 日本 公開特許公報 特公昭 62-16336, 1982
- 16) 多田英之他 : 免震用 Damper に関する研究(その 2)Lead Damper の実験, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 29 号, pp.137-140, 1986 年 3 月
- 17) 下田郁夫他 : 鉛押しダンパの制振効果に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B 構造 I, 1988 年 10 月
- 18) 三山剛史他 : 鉛による制振ダンパーの研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B 構造 I, 1988 年 10 月
- 19) 柏木栄介 : 鉛ダンパーのホモゲン溶着部強度確認試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造 II, 2001 年 9 月
- 20) 高山峯夫, 森田慶子 : 免震構造用 U180 型鉛ダンパーの限界性能, 日本建築学会技術報告集 第 3 号, pp.48-52, 1996 年 12 月
- 21) 日本建築学会 : 免震構造設計指針, 1993 年改訂版
- 22) 吉田和彦, 大熊武司, 常木康弘 : 神奈川大学 23 号館(免震棟)および新 1 号館の振動実験 その 1. 23 号館(免震棟)の構造設計概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造 II, 2001 年 9 月
- 23) 引田智樹, 安達直人, 内山正次, 大熊武司 : 神奈川大学 23 号館(免震棟)および新 1 号館の

- 振動実験 その 2. 23 号館(免震棟)の振動実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造Ⅱ, 2001 年 9 月
- 24) 安達直人, 引田智樹, 内山正次, 大熊武司 : 神奈川大学 23 号館(免震棟)および新 1 号館の振動実験 その 3. 23 号館(免震棟)免震層の復元力特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造Ⅱ, 2001 年 9 月
- 25) 内山晴夫, 梅野 岳, 大熊武司 : 神奈川大学 23 号館(免震棟)および新 1 号館の振動実験 その 4. 新 1 号館の振動実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造Ⅱ, 2001 年 9 月
- 26) 伊藤純子, 大熊武司, 丸川比佐夫, 岡田 創, 下村祥一, 軽部英生 : 神奈川大学 23 号館(免震棟)の風応答性状に関する研究 その 1 風力特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 構造Ⅰ, 2001 年 9 月
- 27) 軽部英生, 大熊武司, 丸川比佐夫, 片桐純治, 岡田 創, 下村祥一 : 神奈川大学 23 号館(免震棟)の風応答性状に関する研究 その 2 再現期間 1 年風速時の応答加速度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 構造Ⅰ, 2001 年 9 月
- 28) 下村祥一, 大熊武司, 安井八紀, 小賀伸一 : 神奈川大学 23 号館(免震棟)の風応答性状に関する研究 (その 3 地震風応答観測概要および常時微動測定), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 構造Ⅰ, 2002 年 8 月
- 29) 小賀伸一, 大熊武司, 安井八紀, 下村祥一 : 神奈川大学 23 号館(免震棟)の風応答性状に関する研究 (その 4 風応答観測結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 構造Ⅰ, 2002 年 8 月
- 30) 軽部英生, 大熊武司, 安井八紀, 下村祥一, 神奈川大学 23 号館(免震棟)の風応答性状に関する研究 (その 5 弾塑性応答解析による応答予測), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 構造Ⅰ, 2002 年 8 月
- 31) 荏本孝久, 山本俊雄, 栗山利男 : 神奈川大学 23 号館(免震棟)の地震時挙動 その 1. 地震観測システムおよび観測結果の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造Ⅱ, 2002 年 8 月
- 32) 内山正次, 安達直人, 引田智樹, 大熊武司 : 神奈川大学 23 号館(免震棟)の地震時挙動 その 2. 免震層の地震時復元力特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造Ⅱ, 2002 年 8 月
- 33) 栗山利男, 山本俊雄, 荏本孝久 : 神奈川大学 23 号館(免震棟)の地震時挙動 —その 3. 地震観測記録による動的解析結果—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造Ⅱ, 2002 年 8 月
- 34) 神奈川大学 TEDCOM プロジェクト Webpage :
<http://f0303176.yb12.kanagawa-u.ac.jp/TEDCOM/index.htm>, update 2007.03.27
- 35) 木本幸一郎, 伊藤嘉朗, 境茂樹, 加藤貴司 : 超高層免震集合住宅の地震観測と小地震時挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造Ⅱ, 2005 年 9 月
- 36) 木本幸一郎, 境茂樹, 加藤貴司 : 超高層免震集合住宅の小地震時における鉛ダンパー降伏耐力の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造Ⅱ, 2006 年 9 月

- 37) 米国鉛工業協会著，日本鉛垂鉛需要研究会訳：鉛及び鉛合金の諸特性，鉛と垂鉛，Vol.21，No.5，1984
- 38) 小野喜信，金子洋文：鋼材ダンパーの解析アルゴリズムとサブルーチン，パッシブ制震構造シンポジウム 2001，2001 年 12 月
- 39) 建築大辞典 第 2 版，彰国社，1993 年
- 40) 日本建築学会：免震構造設計指針，2001 年改訂版

第2章 鉛の基本特性

2.1 緒言

鉛は、免震構造や制震構造において減衰材として利用されている。純度の高い鉛は、降伏応力度が低く、極めて延性に富んだ特性を示し、大変形領域で優れた繰返し塑性変形能力を発揮する。履歴特性は、矩形に近い形状となり、大きな減衰性能を持つことが期待できる。鉛は塑性変形により生じた結晶格子の欠陥が、常温での再結晶により解消されるという性質を持っており、ひずみが蓄積されることがない。また、鋼材ダンパーに比べて早期に降伏を促すことができ、比較的小変形時からダンパーとして必要な減衰性能を発揮することも期待できる。常温で同じような性質を示す金属には、錫や金等があるが、建築部材として安価に供給できるものとしては鉛が最適である。

現在使用されている主要な鉛製品は、純鉛としてよりもむしろ他の金属を添加した鉛合金として使用することが多い。鉛合金の利点は、純鉛と比較して機械的強度が増すこと、及び casting しやすいことである。しかし、鉛素材の優れた延性能力を低下させることも事実である。このため、本論で取り扱う鉛ダンパーの素材は純度 99.99%以上の純鉛としている。

鉛ダンパーの取付け用の鋼製フランジと鉛軸部の接合には、その境界面にホモゲン溶着法による鉛合金を作ることによって接合を行っている。鉛ダンパーが地震時に変形する場合には、鉛ダンパーの可撓部が大きく変形し、鉛軸部と鋼製フランジの境界面に要求される変形能力は僅かなものとなる。しかし、その境界面には応力集中が発生するために強度が要求される。境界面においては、変形能力が要求されないため、鉛合金の使用により機械的強さを補うことで、鉛ダンパーの性能を向上させることができる。

以上、本章前半では鉛、特に純鉛の基本特性について示し、ホモゲン溶着部の強度について紹介する。

後半では、単純引張試験及び、動的繰返し特性を把握するための部材試験を実施し、その結果について示す。既往の研究結果は、対地震用の構造材料の特性を把握するために実施された試験ではない。そのまま鉛ダンパーへ適用するには不十分であると判断したためである。動的繰りかえしせん断試験の結果は、第3章において鉛ダンパーの復元力特性のモデル化に適用する。

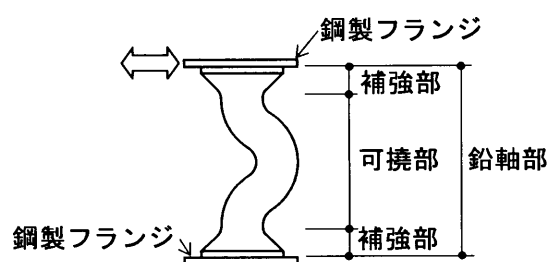


図 2.1.1 U型鉛ダンパー

2.2 鉛の基本特性

鉛は原子番号が高く、原子量が大きく、密度が大きく、比熱は小さく、融点は低く、熱膨張係数は大きく、ヤング率は小さく、極めて柔軟である。また、化学的特徴として、自然環境下での耐食性や、硫酸のような非酸化性の酸中での耐食性が極めて優れているという性質を持つ。表 2.2.1 に鉛と鉄の物理的性質及び機械的性質を示す。

機械的性質は合金成分によっても大きく左右される。鉛ダンパーの減衰能力と変形能力を安定的に利用するために、純度の高い鉛を用いる必要がある。

表 2.2.1 鉛と鉄の物理的性質及び機械的性質

	Pb	Fe
原子番号	82	26
原子量	207.19	55.84
密度(20°C)	11.34g/cm ³	7.86 g/cm ³
比熱(20°C)	0.031	0.11
融点	327.3°C	1536°C
融解熱	1.14kcal/mol	3.30kcal/mol
沸点	1740±10°C	2862.0°C
凝固収縮	3.44%	4.40%
線膨張係数(20~40°C)	29.3×10 ⁻⁶	11.76×10 ⁻⁶
ヤング係数(室温)	17,150N/mm ²	2.0×10 ⁵ N/mm ²
熱伝導率(20°C)	0.083cal/cm ² /cm/sec/°C	0.18cal/cm ² /cm/sec/°C
電気抵抗(0°C)	19.0 μ Ω cm	8.9 μ Ω cm
ポアソン比	0.44	0.3
せん断弾性率(室温)	5,954N/mm ²	7.7×10 ⁴ N/mm ²

2.2.1 物理的性質

鉛は周期表中IV族の金属元素であり、原子番号は 82 のきわめて原子量の大きい重金属である。もともと自然界に存在する自然放射同位体の鉛は全体のわずか 1.4%であるため、現在使用されている鉛の大部分が同位体元素の鉛である。中性子数が異なるが、機械的性質に差異は見られない。

弾性率の低い金属であり、温度依存性、ひずみ速度依存性が強いため、それを正確に求めることは非常に困難である。最も理想的な状態で求められた室温でのヤング率 E は 17,150N/mm² とされている。

体積弾性係数 K の値としては、20°C 常温下では 47,638N/mm² が与えられている。

剛性率 G は 5,954N/mm² がもっとも信頼のおける値とされており、ポアソン比 ν は 0.44 程度である。弾性限は非常に求めにくいだが、軟質の純鉛に対して約 0.9N/mm²、加工した鉛に対して約 3N/mm² という値が示されている。鉛は温度の上昇に伴い、ヤング率及び剛性率の低

下が認められる。表 2.2.2 に 1°C当たりのヤング率の低下量、図 2.2.1 にヤング率と温度の関係を示す。

表 2.2.2 1°C当たりのヤング率低下量²⁾

温度区間 (°C)	ヤング率低下量 (N/mm ²)
-180~0	18
0~100	19
100~200	22
200~300	28

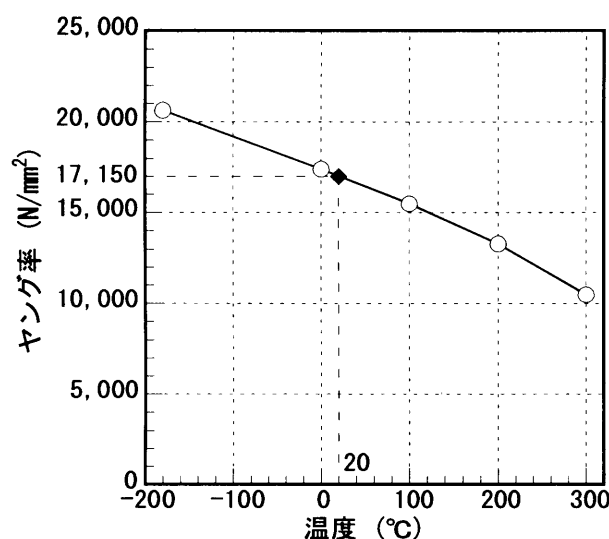


図 2.2.1 ヤング率と温度の関係²⁾

2.2.2 機械的性質

a) 引張試験による諸性質

鉛の引張試験結果は僅かな試験条件の変動によっても微妙に変化するため、正確には求めにくい。弾性範囲においても時間が経過すると鉛は永久変形を残す。変形速度によって鉛の引張強さは変化し、一般に変形速度が小さくなると低下する。従って、鉛の引張強さを決めるためには変形速度を一定にする必要がある。図 2.2.2 に引張強さと変形速度の関係を示す。純鉛の引張強さに及ぼす引張速度の影響を見た場合、引張速度が増加するにつれて、引張強さが増加し、伸びが減少する¹⁾。このようなひずみ速度依存性は鉄鋼材料では顕著には認められず、軟質材料において顕著に示される性質である。

また、温度の影響についても考慮する必要がある。引張強さの結果は、純度 99.99%の鉛では-183°Cでの引張強さは 20°Cの約 2 倍を示す。文献 2), 3)に示された引張強さと温度の関係を図 2.2.3 に示す。機械的性質は結晶粒度によっても変化し、結晶粒が粗大化するにつれて引張強さは低下する。

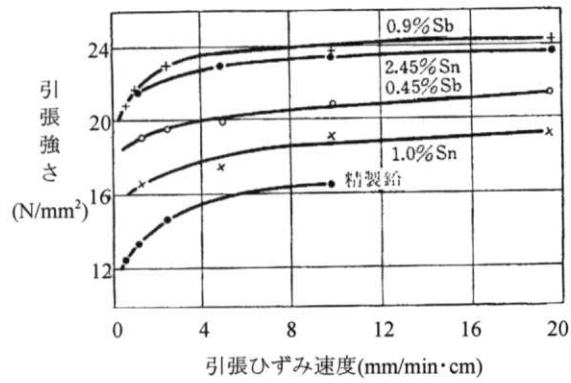


図 2.2.2 鉛及び鉛合金の引張強さに及ぼす引張ひずみ速度の影響 (Erdmann 他)²⁾

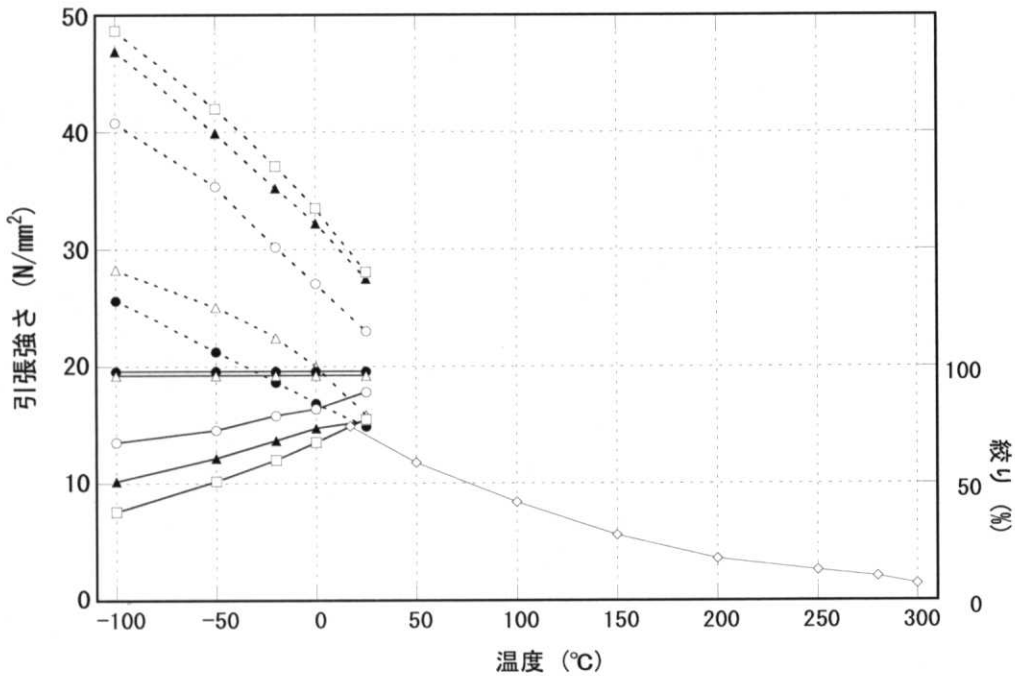
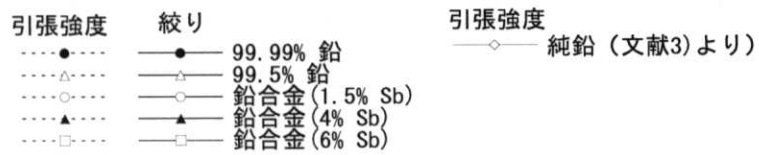
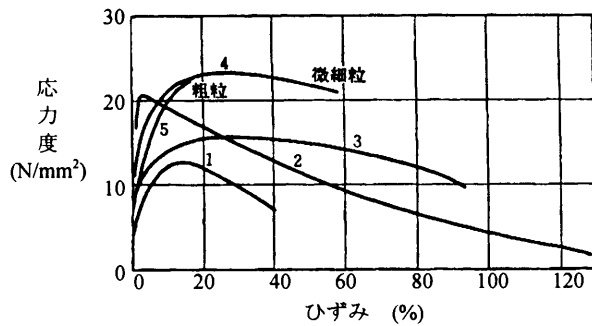


図 2.2.3 鉛及び鉛合金の引張強さ, 絞りと温度の関係 (Kolsch)²⁾

b) 応力度—ひずみ曲線の形

図 2.2.4 に引張試験における純鉛および鉛合金の応力度—ひずみ曲線を示す。図中の曲線 1 が純鉛の場合、2~5 は鉛合金の曲線である。純鉛の場合、応力の最高値をすぎて下り勾配となるのは、再結晶によって結晶粒が粗大化し、ひずみ軟化が生じているためと説明されている。



1:純鉛の場合

2-5 鉛合金

2:圧延された鉛合金

3:きわめて均一な伸びを示す場合

4:絞りが発生しているが、ある程度均一な伸びを示す場合

5:粒界破断が発生した場合

図 2.2.4 純鉛及び鉛合金の応力度—ひずみ曲線 (Haigh 他)²⁾

c) 圧縮強さ

圧縮降伏点は引張の場合と同様にクリープという現象があり、しかも種々の外部的・内部的条件に左右されるので、把握が難しいとされている。圧縮試験の結果⁴⁾を図 2.2.5 に示す。6 種類の一定ひずみ速度での圧縮試験結果であり、引張試験と同様に速度依存性が認められる。

また、 $0.4 \sim 311 \text{sec}^{-1}$ の圧縮ひずみ速度範囲で、 $22 \sim 300^\circ\text{C}$ の温度範囲において、降伏応力度 σ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の間には次の関係がある。

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \dot{\epsilon}^n$$

σ_0 及び n はひずみ量と温度に関する定数であって、 n の値は、 0.04 ($\dot{\epsilon} = 0.1$, 22°C) と 0.26 ($\dot{\epsilon} = 0.5$, 300°C) の間⁵⁾であるとされている。

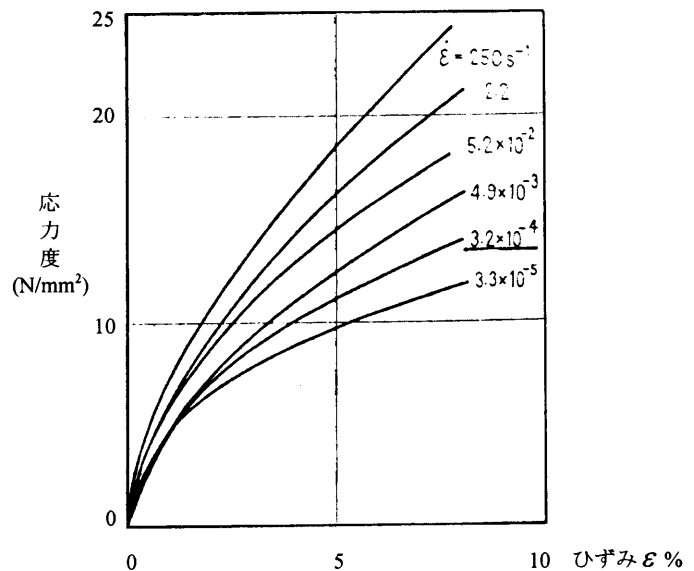


図 2.2.5 純鉛の一定ひずみ速度での圧縮試験結果⁴⁾

2.2.3 その他の性質

a) 再結晶

一般的に、金属の結晶が室温で外力による変形を受けるとき、結晶の内部には多数の転位等の欠陥を生じる。そのような結晶が加熱される、すなわち、焼きなましされた場合、原子拡散が起きるので結晶構造に変化が生じ、金属材料の性質が変化する。

再結晶は高温で溶けている状態とは異なる。高温で溶けている場合には、熱エネルギーによって内部欠陥が安定的な配列に変化してゆく。しかし、再結晶は、加工された金属が回復によって緩慢に復活する一方、ある温度に至った際に、加工された結晶粒の内部あるいは粒界にひずみのない新しい結晶粒の核ができ、成長してゆく過程である。この再結晶核の形成理由には諸説がありますが、まだ明らかにはなっていない。

冷間加工された金属が焼きなましされるときに生じる変化は、冷間加工された結晶粒がそのままの形でひずみを解放してゆく過程（回復）と、これに続いて、さらに新しいひずみのない結晶に変わってゆく過程（再結晶）の2段階である。冷間加工の量が少ない場合や、焼きなまし温度が低い場合に、再結晶しない回復が起きる場合がある。しかし、再結晶が起きる場合には、それに先行して必ず回復が起きる。

加工前の結晶粒の大きさは、再結晶に影響する。加工前の結晶粒が小さいほど、再結晶完了後の結晶粒は小さい。また、異種原子が存在すると再結晶核の変化が妨げられる。従って、高純度の金属ほど再結晶しやすく、低温の焼きなましでも再結晶が起きる。

冷間加工によってひずみを生じた結晶粒が、再結晶によってひずみのない結晶粒に全部置き換わった後もさらに焼きなましを続けると、結晶粒の形状や大きさが変化する。これを結晶粒成長という。このとき、粒界の直線化、微細な結晶粒の消滅、およびそれに隣り合う結晶粒の成長などの現象が確認されている。結晶粒の成長は、結晶粒度が小さい場合には成長率が大きく、結晶粒が成長するに従って成長率が小さくなっていく。

鉛は、再結晶の過程が常温で起きる金属である。常温での鉛の塑性変形は、一般の金属の熱間加工に相当する。変形中や変形した鉛は、回復、再結晶、組織形成を起こし、直ちに変形前の性質に戻る。従って、加工硬化や脆性を伴う材質の劣化が生じず、大変形域での繰返し塑性変形能力が極めて高いという特性を持つ。この挙動は、約 400°C 以上で鋼材に生じる状態とよく似ている。

鉛の再結晶は加工条件などにより極めて広い範囲に変動する。純鉛では、2.5%の圧延加工で 35°C では 5~10 分後に、12°C では 45~120 分後に再結晶が完了する。5%圧延では 5 分間で再結晶が完了する。他の種類の金属で一般に認められている様に、結晶粒が微細化すると粗粒に比べて再結晶は起こりやすくなるという傾向もある。

b) せん断応力を受けた場合の鉛の塑性変形

引張試験における変形特性は、図 2.2.4 に示した通りであるが、せん断応力を受けた場合の変形特性の概要を図 2.2.6 に示す。鉛のような面心立方金属単結晶の金属の加工硬化曲線は、同図の様な 3 つの領域に分けることができる。最初の領域(Stage I)では加工硬化がほとんど

認められないが、これを過ぎると急激に加工硬化が進行する領域(Stage II)となる。最後の領域(Stage III)では動的な回復が始まり、加工硬化傾向はやや緩やかになる。

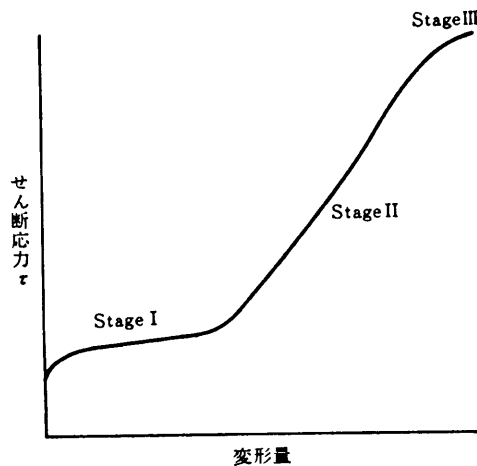


図 2.2.6 面心立方金属結晶の加工硬化曲線の模型図²⁾

c) クリープと疲れ

金属のクリープが生ずるのは、融点の絶対温度の 1/3 以上であり、特に問題となるのは 1/2 以上であると言われている。鉛の融点は 327℃と他の金属に比べて低い。絶対温度の 1/3 は -73℃、1/2 は 27℃であるため、室温においてもクリープを考慮する必要がある。引張荷重を与えたクリープ試験結果では、荷重が大きいが、クリープ変形の進行が早く、経年変化を考慮した場合、製造直後のクリープ特性とは異なる場合がある¹⁾とされている。

文献 6)によれば、クリープによる伸長が年間 0.5%以下であれば、クリープ破断にいたることは無いと示されている。純鉛においては 58.5N/mm²の応力度が限界値である。

U 型鉛ダンパーでは、そのユニークな形状ゆえに、U 型に突き出した湾曲部分のクリープによる形状変化が懸念されるかもしれない。クリープに対する強度を考察するために、現在免震構造に多用されている U180 鉛ダンパーを例に挙げる。その重量は約 500kgf である。この重量がすべて直径 18cm の可撓部に支えられていると仮定した場合、その断面に生じる応力度は 0.196N/mm²となる。これはクリープ限界強度の 1/298 以下であり、鉛の引張強度の僅か 1/80 である。従って、U型鉛ダンパーは自重によるクリープによって形状を変化させる事はなく、十分な強度を保有していると判断する。実際に 10 年以上設置されている U 型鉛ダンパーの形状にも変化は見られていない。

また鉛は、疲れの影響の小さい金属であるとされているが、組織変化による疲れ亀裂が発生する場合があることも認められている。一般に結晶粒が微細である方が疲れに対しては強いとされている。純鉛では、連続した繰り返し载荷を受けることによって次第に結晶粒が粗大化してゆく。その後、再結晶し、変形前の状態に戻る。

文献 2)に示されている鉛の疲れ強さはクリープ強さより大きく、純鉛の場合、室温で 286N/mm²とされている。これは、10,000,000 回の周期性応力によっても鉛が破損しない最大

の応力度として定義されている。

このため、本論で対象としている鉛の使用範囲において、素材として十分な強度を保有していると判断している。

d) 超塑性について

鉛は超塑性材料の一つとされている。超塑性とは、ある条件下で金属材料に非常に大きい延性流動が現れ、数 100%以上もの伸びが生ずる現象である。この異常な変形能力を示すときには材料強度が失われるので、非常に低荷重のもとで変形させることができる。

超塑性挙動にもっとも大きな影響を与える外的因子はひずみ速度と温度であり、内的因子は結晶組織である。超塑性材料は一般の金属に比べて非常にひずみ速度依存性が強い。また、引張試験において、最高荷重点をすぎて試験片のある部分にくびれが入り始めても、その部分のひずみ速度が高くなるために変形抵抗が増して変形しにくくなり、変形はひずみ速度の低い隣接部へ移ってゆき、変形を一様化させる傾向がある²⁾。

この現象は、鉛の引張試験⁷⁾や鉛ダンパーの加力試験においても確認することができる。ある部分に変形が進行し始めるとその部分のみならず、隣接部に変形が移行し、最終的には試験体の鉛表面全体に凹凸が確認される。写真 2.2.1 に引張試験終了後の試験体の写真を示す。

超塑性の性質を有し、繰返し変形が与えられたときに低い加工硬化率を示す材料は鉛だけではない。鉛以外の材料として、アルミニウム、氷、等がある。鉛、アルミニウム、氷は、繰返し変形が与えられた後に回復し、かつ再結晶する特性を有している。アルミニウムの場合には、常温より高い 200°Cにおいて再結晶し、氷は氷点温度より相当低い温度において再結晶する。鉛は常温において、塑性変形を行う際に連続的に再結晶し、かつ回復する能力を有している。

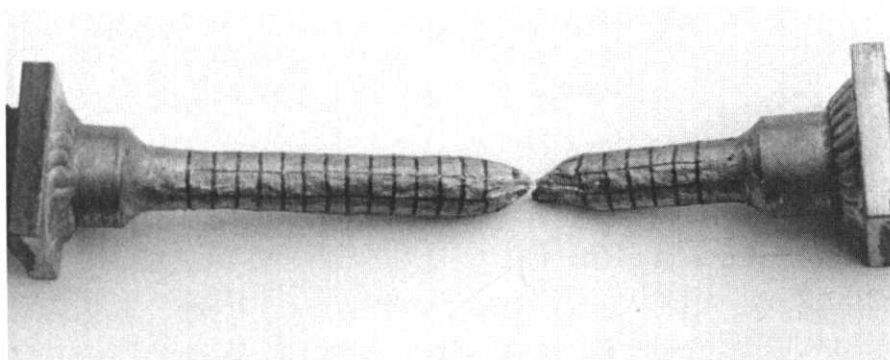


写真 2.2.1 引張試験終了後の試験片の様子
(鉛表面全体に凹凸が広がっている)

e) 鉛の化学的性質

鉛は化学的性質として、自然環境下や硫酸のような特殊な酸に対しては極めて優れた耐食性を示すという特徴を持つ。空気中では安定な酸化被膜が表面に形成され、あまり厚く成長

せず下地の鉛を保護する。湿気の存在下では二酸化炭素を吸収して炭酸鉛を形成するが、この炭酸鉛が侵されない環境下ではこれが鉛の保護の作用をする。

尚、鉛自体は PRTP (Pollutant Release and Transfer Register : 化学物質排出移動量届出制度) 法において、人の健康や生態系に有害な恐れのある「第一種指定化学物質」に指定されている。しかし、鉛ダンパーのような固形物については対象外である。鉛が粉末や気体、液体状にならない限り人体や環境に害を及ぼすことはなく、鉛ダンパーの通常の使用条件下では十分安全である。

2.2.4 鉛合金

現在使用されている主要な鉛製品は、純鉛としてよりもむしろ他の金属を添加した鉛合金として使用することが多い。鉛合金は、純鉛と比較して機械的強度が増し、鑄造しやすくなる。アンチモンを 10%含む鉛合金の引張強度は最高値を示し、純鉛の約 3 倍となる⁸⁾。しかし、鉛素材の優れた延性能力を低下させることも事実である。

鉛素材の延性能力を低下させることなく、機械的強度を上げることができれば、鉛ダンパーのエネルギー吸収能力を増加させることが可能となる。そこで、僅かにアンチモンを添加した鉛合金を用いて U180 鉛ダンパーの 1/4 縮小試験体を作成し、動的加振試験を実施し、履歴特性を確認した。その結果、純鉛を用いた試験体と比較して降伏耐力が上昇する傾向が認められた。降伏荷重は純鉛と比較して、アンチモン含有量 1.4%の場合で 1.2~1.3 倍、4%で 1.7~1.9 倍となった。しかし、鉛素材の延性能力に影響を与え、大変形時には脆性的な破断に至った。純鉛の場合、鉛ダンパーの部材角 $\delta/H = 0.71$ の繰返し正弦波加振に対しても十分な変形追随性を示した。アンチモン含有量 1.4%では $\delta/H = 0.71$ で可撓部軸部に亀裂が発生し、含有量 4%では $\delta/H = 0.27$ で可撓部軸部に亀裂が発生し破断に至った。純鉛であっても、加振振幅が大きくなれば破断に至るが、鉛合金のような脆性的な破断状況は純鉛を使用した場合には確認することができない。使用限界を規定することができれば、鉛合金を鉛ダンパーに使用することも有効である。しかし、地震時に鉛ダンパーが免震層の変形に柔軟に追随するために、エネルギー吸収を行う素材として純鉛を使用することが適切であると考えられる。

次節において詳しく述べるが、鉛ダンパーの取付け用の鋼製フランジと鉛ダンパー軸部の接合には、その境界面にホモゲン溶着法による鉛合金を作ることによって接合を行っている。鉛ダンパーが地震時に変形する場合には、鉛ダンパーの可撓部が大きく変形するため、鉛軸部とフランジの境界面に要求される変形能力は僅かなものとなる。しかし、境界面には応力集中が発生するために強度が要求される。接合部に鉛合金を使用し、境界面の鉛の機械的強さを補うことは鉛ダンパーの性能を向上させる方法として有効である。例えば、鉛ダンパー本体に使用するのは不相当と判断したアンチモン合金も、接合部であれば使用の可能性はある⁹⁾。

2.3 鉄と鉛の接合

本論で使用している鉛ダンパーは、他の材料の中に鉛を封緘することなく単独で使用するものである。上下両端に接合されたフランジである鋼板を免震層の上下に固定し、地震時にはせん断方向に変形することによってそのエネルギーを吸収する機構となっている。このため、鋼板と鉛をいかに接合するかが重要な問題となる。

鉛の溶接には母材を直接溶接する方法と、補充材によって溶接する方法があり、この補充剤を“ろう”と称している。鉛と鉄は直接溶接による接合では、十分な引張強度が得られない。鉛ダンパーの鋼製フランジと鉛軸部の間に必要な引張強度を持たせるために、補充材を用いて溶接する方法であるホモゲン溶着法を用いて鉄と鉛の接合を行っている。

本節ではホモゲン溶着の基本的な性質について述べる。経年変化がその強度に及ぼす影響、微細振動が与える影響等いくつかの課題は残っているが、本論ではホモゲン溶着が基本的な性能を発揮するという前提のもとで議論を進めていく。

2.3.1 ホモゲン溶着法

鉛ホモゲンは、化学工業の諸機械、機器の腐食防止用として 100 年以上前から使用されている。これは鉛が硫酸およびその化合物に対する優れた耐食性を持っているためで、硫酸や使用済核燃料の貯蔵、運搬する容器に施工されている。鉛と鉄の原子半径を比較すると、合金を作る限界とされている 15%以上の差があり、全く合金は作らない。この鉄と鉛を溶着するために、鉛とも鉄とも合金化する元素を持ってきて、鉄の表面に合金層を作り、この合金に鉛を溶着させる方法がホモゲン溶着である。

ホモゲン溶着法の施工方法は、下記の様な手順に従って行われる。

- 1) 被覆する鋼板の表面をよく磨く。
- 2) 塩化亜鉛と塩化第 1 錫の水溶液を 2~3 回塗布する。
- 3) 鉄面及び鉄面に溶着する鉛を暖める。鉄面の温度を 250~300°C、熔融鉛の温度を 350°C前後に保ちながら、熔融鉛を鉄面に滴下していくと、鉛は簡単に鉄面に溶着する。

このときに、鉄面の温度が高すぎると四酸化三鉄(Fe_3O_4)を生成し、表面が粗雑になり、鉛は鉄面に溶着せずにピンホールの原因となる。この場合には、酸化生成物をきれいにぬぐい取り、塩化亜鉛と塩化第 1 錫の水溶液を再度塗布し温度を下げ、適度の温度に再加熱すると鉛はよく溶着する。

現在、ホモゲン溶着に際しては、関西においては手順 2)に示した塩化亜鉛と塩化第一錫の水溶液を調合して使用しているが、関東ではソルダークリームという同様の主成分の工業製品が多く使用されている。

2.3.2 ホモゲン溶着の合金層の引張強度

宮崎らが文献 10) に示した鉛-鉄の合金層の引張強度を表 2.3.1 に示す。合金層の強度を評価するために、できるだけ鉛の層が薄くなるように溶着して引張強度を計測している。試片の破断部は鉛と鉄の溶着部が離れたのではなく、面についていた少量の鉛が破断しており、軟鋼と鉛の合金層の引張強度は 70N/mm^2 以上であると示されている。純鉛の引張強度は、ひずみ速度、温度、結晶粒度にも影響されるが、 $12\sim 16\text{N/mm}^2$ 程度⁷⁾ であるから、合金部は純鉛と比較して 4 倍以上の引張強度を有していることがわかる。

表 2.3.1 鉛-鉄溶着部(合金層)の引張強度¹⁰⁾

	溶着面積(mm ²)	荷重(N)	引張強度(N/mm ²)
軟鉄	707	49,500	70.0
鋳鉄	881	19,100	21.7

2.3.3 鉛ダンパーのホモゲン溶着部の引張強度

柏木は文献 11) において、実際に使用されている U180 鉛ダンパーのホモゲン溶着部を切り出し、合金層の引張強度と、鉛と合金層の組み合わせ部分(溶着部全体)の引張強度を示している。鉛ダンパーより切り出された試験片の合金層の引張強度は $65.1\sim 88.5\text{N/mm}^2$ である。溶着部全体の引張強度は $16.6\sim 17.8\text{N/mm}^2$ と純鉛の引張強度とほぼ同じ値を示しており、破断位置は鉛部であった。この試験からも、ホモゲン溶着の合金層は純鉛と比較して 4 倍以上の引張強度を示す結果が得られている。

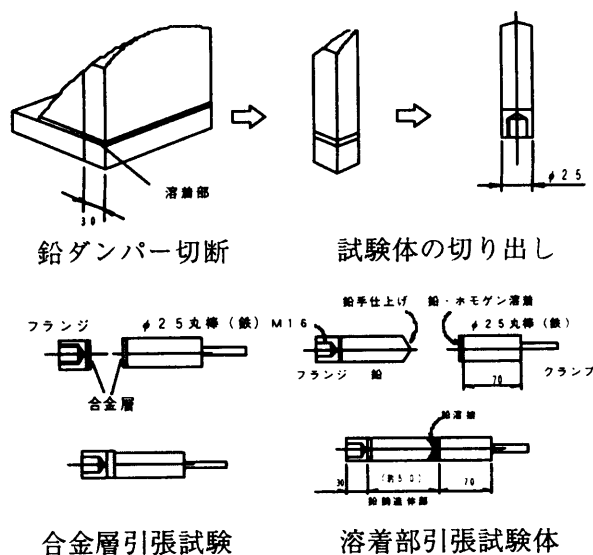


図 2.3.1 引張試験片¹¹⁾

2.4 鉛ダンパーへの適用を想定した鉛の特性に関する試験

2.4.1 単調引張試験

a) 試験概要

鉛の材料特性を把握するために、単調引張による材料試験を実施した。単調引張試験体は、純度 99.99%以上の純鉛で、JIS Z2241 14A 号試験片に準ずるものを用いた。5, 10, 50, 200mm/min の 4 種類の载荷速度で引張試験を行ない、応力度-ひずみの関係を得た。なお、本項で用いる応力度とひずみは、公称応力度と公称ひずみである。

b) 試験結果

表 2.4.1, 図 2.4.1 に、引張速度を 5~200mm/min (平均ひずみ速度 0.000775~0.03100sec⁻¹) の範囲で変化させた場合の単調引張試験結果を示す。

鉛は、ひずみ速度によって引張強さが変化する。一般にひずみ速度が大きくなると引張強さは大きくなる傾向を有する。局部収縮が始まると、その部分のひずみ速度が増加するため変形抵抗が増して変形しにくくなる。変形はひずみ速度の低い隣接部へ移ってゆき、変形を一様化させる傾向がある²⁾。この特徴により、局部収縮の進行が遅れるので、応力度-ひずみ曲線において引張速度が大きくなるほど最大応力度を示すひずみが大きくなる傾向を示す⁸⁾。本試験結果においても同様の傾向を示しており、ひずみ 20~40%の範囲で、12.0~15.4N/mm² の最大応力度が示されている。

表 2.4.1 载荷速度と最大応力度

载荷速度 (mm/min)	平均ひずみ 速度 (sec ⁻¹)	最大応力度 (N/mm ²)
5	0.000775	12.0
10	0.001550	12.9
50	0.00775	13.9
200	0.03100	15.4

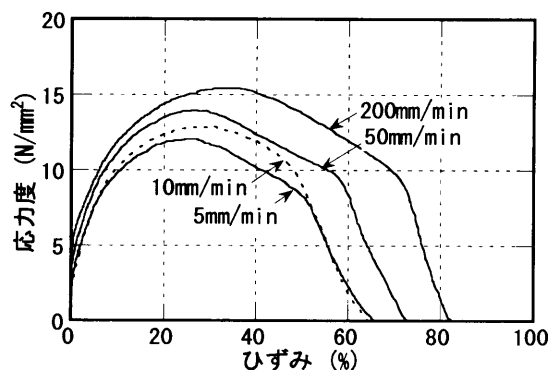


図 2.4.1 単調引張試験による応力度とひずみの関係

2.4.2 動的繰返し試験

a) 試験概要

材料試験の他に、鉛の軸方向の引張・圧縮に対する動的繰返し特性、及びせん断方向動的繰返し特性を確認する目的で、部材試験を実施した。図 2.4.2～図 2.4.3 に試験体概要を示す。直方体の鉛ブロック(鉛純度 99.99%以上)を加力用の鋼板にホモゲン溶着している。接合部は変形時の応力集中を緩和させるためにハンチを設けた形状となっている。

軸方向試験体は、一辺の長さが W の正方形断面で長さ L の形状を持った鉛ブロックである。 $W=75\text{mm}$, 100mm , 150mm の 3 種とし、 $L/W=1\sim 4$ の範囲で変化させた。±2～20%の引張・圧縮ひずみを 0.1Hz～2Hz の正弦波により繰返し加振を行い、応力度-ひずみの関係を得た。

せん断試験体は、 $t=25\text{mm}$, 50mm , 100mm の 3 種とし、 $L/t=2\sim 8$ の範囲で変化させた。奥行きは 100mm である。±4～40%のせん断ひずみを 0.1Hz～1Hz の正弦波により繰返し加振を行い、応力度-ひずみの関係を得た。

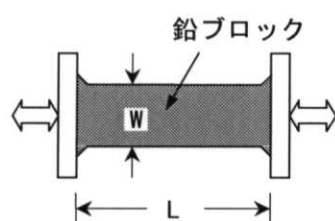


図 2.4.2 軸方向試験体

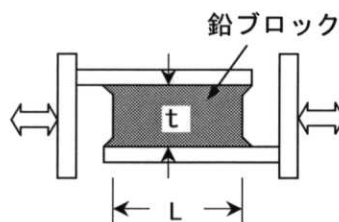


図 2.4.3 せん断試験体

表 2.4.1 軸方向試験体の試験体名と形状係数 (L/W)

幅 W	長さ L			
	100mm	150mm	200mm	300mm
75mm	—	N-75×150 (2)	—	N-75×300 (4)
100mm	N-100×100 (1)	—	N-100×200 (2)	N-100×300 (3)
150mm	—	N-150×150 (1)	—	N-150×300 (2)

※()内の数値は L/W を示す

表 2.4.2 せん断試験体の試験体名と形状係数 (L/t)

奥行き W	厚さ t	幅 L	
		100mm	200mm
100mm	25mm	—	SS-25×200 (8)
	50mm	SS-50×100 (2)	—
	100mm	—	SS-100×200 (2)

※()内の数値は L/t を示す

b) 軸方向試験の結果

試験体の形状係数 L/W が 1~4 の範囲では、応力度-ひずみ曲線は形状係数にかかわらず bi-linear 型の履歴を示す傾向が得られた。図 2.4.4 に $L/W=3$ の試験体の応力度-ひずみ曲線を示す。加振内容は 0.1Hz、0.5Hz、1Hz の加振振幅(ひずみ) $\pm 2\%$ 、0.5Hz 加振振幅(ひずみ) $\pm 5\%$ の場合である。(a)~(e)は、加振を行った順に示しており、それぞれの加振は 2~5 分程度の時間間隔がある。鉛は、再結晶が完了している状態から最初にひずみを与えた場合(加工前)の弾性限は、再結晶が完了せずに継続してひずみを与えた場合(加工後)の弾性限より低い値を示す性質を持つ。(a)図では、他の試験結果より低い弾性限が示されている。加振を繰り返す毎に応力度の値は上昇している。y切片での応力度に着目すると、3~5 サイクル目にほぼ同じ値を示すようになる。(b)~(d)では、再結晶が完了していないもののある程度再結晶がすすんでいるため、1 サイクル目に現れる降伏点の値は、y切片での応力度の値より低い値を示している。(a)~(c)は、加振振幅のひずみは同じで、加振周波数が異なるため、ひずみ速度が異なる場合の結果である。周波数(ひずみ速度)が大きくなるほど y切片での応力度が大きくなる傾向がみられる。繰り返し試験においても、ひずみ速度に比例して応力度が大きくなるのである。また、試験を行なった加振振幅 $\pm 20\%$ までのひずみの範囲では、y切片での応力度は引張、圧縮共にほぼ同じ値を示している。

図 2.4.5 に最大応力度と加振振幅の関係を示す。横軸は、正弦波加振の加振振幅をひずみで示し、縦軸は図 2.4.4(a)に示すように、応力度-ひずみ曲線の y切片での応力度の平均値 ($\bar{\sigma}_n = (|\sigma^+| + |\sigma^-|)/2$) とする。単調引張载荷と異なり、動的に繰返し载荷を与えたために、y切片での応力度は加振振幅が $\pm 5\sim 10\%$ の時に最大値を示している。形状係数 L/W が大きくなるほど、y切片の応力度は小さくなる傾向が見られる。加振ひずみ振幅 $\pm 10\%$ における応力度の平均値 $\bar{\sigma}_n$ は、 L/W が 2 以下の場合 19.1N/mm^2 、 L/W が 3 以上の場合 16.8N/mm^2 であった。単調引張試験結果と比較すると、応力度は大きめの値を示している。軸方向加振では正弦波により定常波加振を行っている。仮に正弦波の周期でひずみ量を割ることによってひずみ速度を略算した場合、0.1Hz の加振であっても単調引張試験の 20 倍以上のひずみ速度で加振を行なっていることになる。このため、ひずみ速度が大きくなったことによる影響で、単純引張試験の結果より大きめの応力度を示していると考えられる。

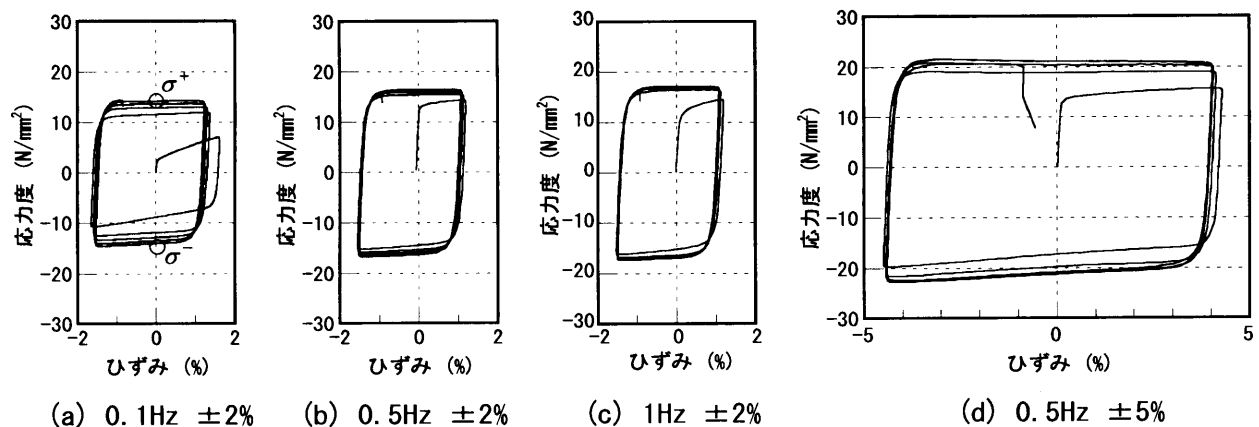


図 2.4.4 軸方向加力による応力度とひずみの関係 ($L/W=3$)

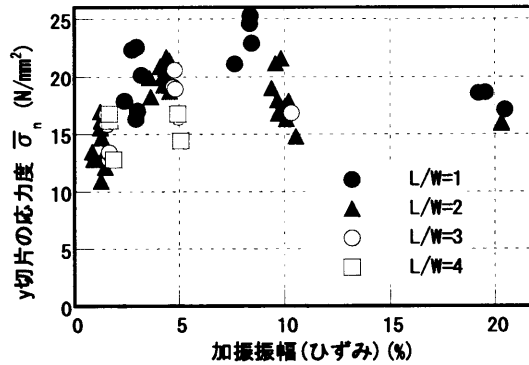


図 2.4.5 軸方向加力による応力度と加振振幅の関係

c) せん断試験の結果

図 2.4.6(a)に $L/t=2$ の試験体の 0.1Hz ひずみ振幅 $\pm 3\%$ 、 $\pm 8\%$ の場合の応力度-ひずみ曲線を示す。復元力特性は、せん断方向の繰返し载荷に対して bi-linear 型の安定した履歴を示している。軸方向試験の結果と同様に、最初にひずみを与えた場合の弾性限は、再結晶が完了せずに継続してひずみを与えた場合の弾性限より低い値を示している。加振ひずみ振幅 $\pm 3\%$ の応力度-ひずみ曲線には、加工前の降伏応力度が示されている。加振振幅にかかわらず、初期剛性は同じ傾きを示している。

図 2.4.6(b)は、(a)図の初期剛性の部分を拡大して示す。また、加振ひずみ振幅 $\pm 3\%$ の初期降伏の部分と $\pm 8\%$ の y 切片の応力度 τ_e (後述第 3 章の降伏耐力 Q_e から算出) を示す。試験結果より得られた初期勾配 E_{init} を τ_e まで延長し灰色線で示す。 $\pm 3\%$ 加振において、最初に降伏しているひずみは 0.35% で、この点を初期せん断降伏ひずみとする。初期勾配 E_{init} と $\pm 8\%$ ひずみの履歴曲線が交わる 0.85% をせん断降伏ひずみと定義する。これらの降伏ひずみは、第 3 章において、鉛ダンパーの復元力特性のモデル化に使用する。

図 2.4.7 に、0.1Hz 加振ひずみ振幅 $\pm 20\%$ の応力度-ひずみ曲線を示す。繰返しに伴い、せん断ひずみ $8\sim 10\%$ を超えたあたりから、塑性域の勾配がやや負の勾配を示し始めている。これは、実験中の目視による観察により試験体の断面が絞られ始めている影響と判断している。

図 2.4.8 に最大応力度と加振振幅の関係を示す。横軸は、正弦波加振の加振ひずみ振幅を示し、縦軸は図 2.4.6(a)に示す様に、応力度-ひずみ曲線の y 切片での応力度の平均値 ($\bar{\tau}_n = (|\tau^+| + |\tau^-|)/2$) とする。図中には回帰曲線も示す。回帰曲線から得られるせん断応力度は、せん断ひずみ 10% で 9.55N/mm^2 である。Von Mises の降伏条件を用いて、相当応力度を $\sqrt{3}$ 倍することで求めれば、 16.54N/mm^2 となり、低めの値であるが、軸方向試験の結果で示された程度の値を示している。

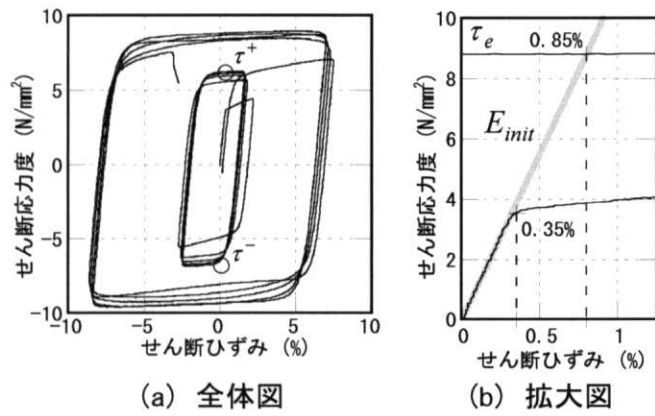


図 2.4.6 せん断応力度とせん断ひずみの関係 (0.1Hz $\pm 3\%$, $\pm 8\%$)

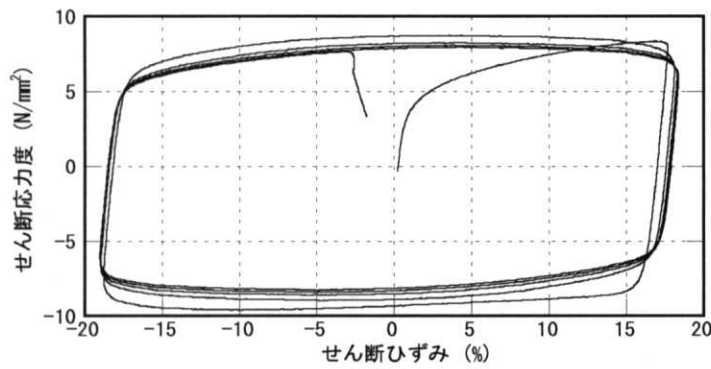


図 2.4.7 せん断応力度とせん断ひずみの関係 (0.1Hz $\pm 20\%$)

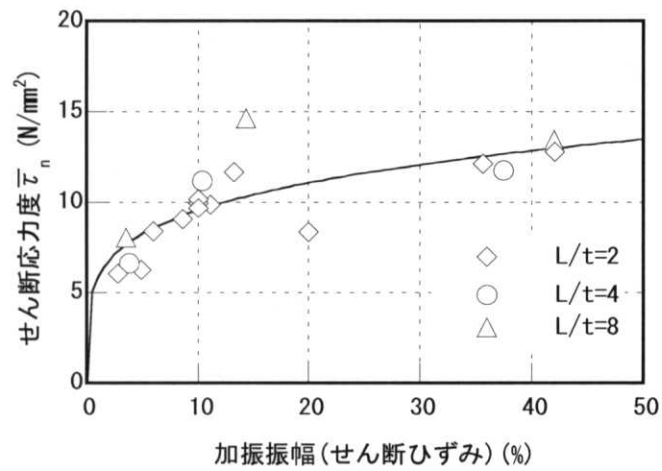


図 2.4.8 せん断応力度とせん断ひずみの関係

2.5 まとめ

本章では、既往の研究結果に基づいて鉛の基本特性を示した。鉛ダンパーに要求される鉛の特徴を以下にまとめる。

1. 純度の高い鉛は、降伏応力度が低く、極めて延性に富んだ特性を示し、大変形領域で優れた繰返し塑性変形能力を発揮する。履歴特性は、矩形に近い形状となり、大きな減衰性能を持つことが期待できる。鉛は塑性変形により生じた結晶格子の欠陥が、常温での再結晶により解消されたため、ひずみが蓄積されることがない。また、鋼材と比べて早期に降伏を促すことができ、比較的小変形時から減衰性能を発揮することも期待できる。
2. 鉛と鉛の接合は、この鉛合金の利点と欠点をうまく利用したホモゲン溶着が有効である。ホモゲン溶着の合金層は、純鉛の4倍以上の引張強度を持つ。鉛合金は、純鉛と比較して機械的強度が増し鑄造しやすくなるため、主要な鉛製品として多く用いられている。しかし、純鉛と比較すると延性能力は低下する。地震時、鉛ダンパーは、延性に富んだ純鉛の可撓部が大きく変形し、応力が集中する境界面は、純鉛と比較して4倍以上の引張強度をもった鉛合金によって鉛の機械的強度が補われる。

また、鉛ダンパーへの適用を想定した鉛の特性に関する試験として、正弦波による部材への動的繰返し試験を実施した。以下に試験より得られた知見を示す。

1. 動的繰返しせん断試験より、鉛ダンパーの復元力特性のモデル化に必要なひずみを定義した。加工前の弾性限である初期降伏ひずみを0.35%、加工後の弾性限であるせん断降伏ひずみを0.85%とする。
2. 動的繰返し試験において、軸方向試験から得られた応力度は、せん断試験から得られた相当応力度とほぼ対応することを確認した。軸方向試験から得られた加振ひずみ振幅±10%の応力度は16.8~19.1 N/mm²であった。図2.4.8から得られる回帰曲線より、10%ひずみのせん断応力度を Von Mises の降伏条件を用いて $\sqrt{3}$ 倍することで相当応力度を求めれば、16.54N/mm²となる。これは、低めの値であるが、軸方向試験の結果で示された程度の値を示している。
3. 鉛は、再結晶が完了している状態から最初にひずみを与えた場合(加工前)の弾性限は、再結晶が完了せずに継続してひずみを与えた場合(加工後)の弾性限より低い値を示す性質を持つ。軸方向及びせん断方向の動的繰返し試験においても、同様の傾向を確認した。

4. 加振振幅のひずみと同じ場合、加振周波数が大きくなるほど y 切片での応力度が大きくなる傾向があり、繰り返し試験においてもひずみ速度に比例して応力度が大きくなる傾向が認められる。

2.6 参考文献

- 1) 三谷進, 崎田栄一, 菱山光正, 西畑三樹男 : 鉛合金の機械的性質, 電気通信学会技術研究報告, Vol.82, No.119, 1982
- 2) 日本鉛亜鉛需要研究会, 鉛ハンドブック 改訂版, 1992 年
- 3) 榛葉久吉 : ケーブル被覆用鉛及其合金に就て, 電信電話学会雑誌, No.68, 1928 年
- 4) 田中吉之助, 黒川知明, 五十嵐昇, 岩橋嘉生 : 鉛棒を伝ばする塑性波, 日本機械学会論文集 第一部, 38 卷 309 号, 1972 年 5 月
- 5) J.A. Bailey, A.R.E. Singer : Effect of Strain Rate and Temperature on the Resistance to Deformation of Aluminium, Two Aluminium Alloys, and Lead, Journal of the institute of the metals, Vol.92, 1963-64
- 6) 米国鉛工業協会著, 日本鉛亜鉛需要研究会訳 : 鉛及び鉛合金の諸特性, 鉛と亜鉛, Vol.21, No.5, 1984
- 7) 森田慶子, 高山峯夫, 多田英之 : A practical study of lead damper for base isolation system Part 4 Tensile test of lead, 福岡大学工学集報, 第 49 号, 1992 年 9 月
- 8) 小野健二 : 鉛及鉛合金, 山海堂, 1942
- 9) 柏木栄介, 山口直之 : 鉛ダンパー合金接合法の開発 (その 1 基本概念の構築), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 構造 II, 2002 年 8 月
- 10) 宮崎義隆, 川端六郎 : 鉄鋼材に対する鉛溶着機構, 溶接学会誌, 第 29 号, 第 8 号, 1960 年 8 月
- 11) 柏木栄介 : 鉛ダンパーのホモゲン溶着部強度確認試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造 II, 2001 年 9 月

第3章 鉛ダンパーの復元力特性

3.1 緒言

鉛部分を露出させ、1つのダンパーとして独立させた鉛ダンパーは、任意の形状・寸法が選択可能であり、アイソレータとの組合せによって自由な設計が可能となる。鉛部分が露出していることによって、地震発生後に、外観と主要寸法の測定で性能をある程度把握することができる。また、ダンパーの取り替え作業は容易となり、取り替えた鉛は再利用することが可能となる。

鉛ダンパー開発初期における基本形状はI型（円柱型）である。I型の鉛ダンパーは小変形領域での復元力特性は剛塑性挙動を示すが、水平変形量が大きくなるに伴い、曲げせん断変形に加えて軸方向変形が大きな比重を占めてくるようになる。免震構造の上部構造は積層ゴムアイソレータにより支えられている。アイソレータは水平方向に変形した場合でも殆ど沈み込みが発生せず、高さが一定となる。このような状態で、鉛ダンパーにせん断変形が与えられた場合、材軸方向に引き延ばされることになる。復元力特性は、軸方向力の影響により、ちょうど蝶が羽を広げたような形状となる。この軸方向変形によって、復元力特性から得られるエネルギー吸収量が大きくなり、変位制御の面では効果が期待できるかもしれない。しかし、変形と共に抵抗力が増大する蝶型の復元力特性は、上部構造の応答加速度が大きくなることが予想される。一方、U型鉛ダンパーは大変形領域においても復元力特性を剛塑性に近づけるために、軸方向変形の影響を小さく抑え、曲げせん断変形が優先する様に形状を変更したものである。本章で取り扱う試験体は、基本的形状のI型鉛ダンパーとU型鉛ダンパーの2種類とする。

免震用ダンパーに要求される性能は、優れたエネルギー吸収能力、変形追随能力、および長期間にわたって初期の性能を維持する耐久性である。また、復元力特性の概要を把握する際に特に重要となるのが、降伏耐力である。

主に実大試験体を用いて、鉛ダンパーへのせん断方向への加力試験を行った。静的、動的に行った試験結果をもとに、ダンパーに要求される性能を定義し、U型鉛ダンパーが十分な変形能力と減衰能力を持つことを示す。また、降伏耐力を中心として鉛ダンパーの復元力特性のモデル化に必要なパラメータを定義する。

3.2 鉛ダンパーの概要と試験概要

3.2.1 鉛ダンパーの概要

鉛ダンパーの試験体は、図 3.2.1 に示す円柱状試験体(I 型試験体)と、この形状を発展させて、可撓部を U 字形に湾曲させた湾曲型試験体(U 型試験体)の 2 種類である。円柱型試験体は可撓部の高さ H と直径 D をパラメータとし、表 3.2.1 に示す組合せとした。湾曲型試験体については可撓部の大きさを変化させ、基本的には可撓部高さ 560mm で一定とした。可撓部の直径 D は 50, 75, 100, 140, 180mm の 5 種類である。U 型試験体の寸法概要を表 3.2.2 に示す。表中の可撓部長さとは、可撓部の中心軸に沿った長さである。

I 型試験体では、小変形領域での復元力特性は剛塑性挙動を示すが、変形が大きくなるに従い蝶型の復元力特性を示す。U 型試験体は大変形領域においても復元力特性を剛塑性に近づける様に形状を決定している。試験体の可撓部断面形状は大部分が円形であるが、湾曲型試験体では製作の都合上、八角形断面を採用したものもある。全ての試験体は、水平変形を受けて自由に変形可能な部分(可撓部)と、この可撓部の変形能力を確保するための円錐状の補強部、更にダンパー取り付けのための鋼製フランジにより構成されている。補強部の直径は可撓部直径の 2 倍である。鋼製フランジと補強部との接合にはホモゲン溶着法を採用している。

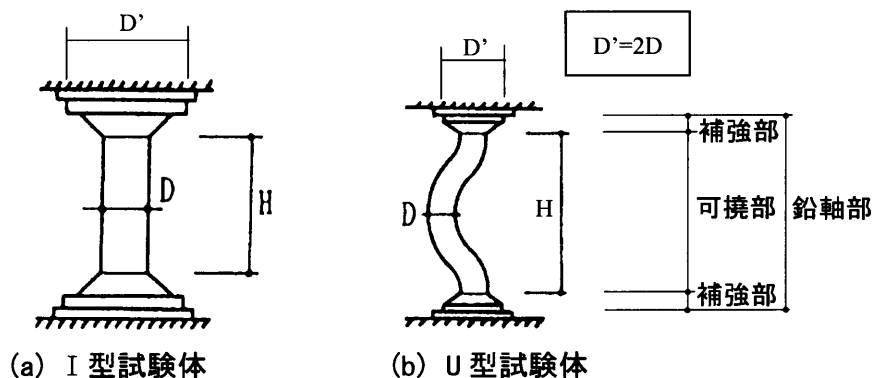


図 3.2.1 試験体概要

表 3.2.1 I 型試験体の直径と高さの組み合わせ

直径 D 高さ H	50 mm	70 mm	100 mm
70mm		○	
100mm		○	○
150mm		○	○
200mm		○	○
300mm	○	○	○

表 3.2.2 U 型試験体の主な寸法

	可撓部 直径 D	可撓部 高さ H	可撓部 長さ
U50	50mm	550mm	680mm
U75	75mm	560mm	730mm
U100	100mm	560mm	700mm
U140	140mm	560mm	638mm
U180	180mm	560mm	660mm

3.2.2 試験概要

試験を実施するにあたって、加力装置は2種類用いた。図3.2.2～図3.2.3に加力装置を示す。図3.2.2は小型の加力装置であり、主にI型試験体の加力試験に用いた。図3.2.3は大型の加力装置であり、U型試験体の加力試験に用いた。両加力装置の機構は基本的に同じである。可動H鋼は、アクチュエータと連動されており、プログラム発信器により正弦波加力、静的大変形加力、および解析地震応答波加力を行った。このアクチュエータの能力は最大加振力±500kN、最大変位±150mmである。可動H鋼のフランジ外面にはステンレス板が溶接されており、テフロン加工が施された支持面上を滑動するシステムである。これにより摩擦による抵抗を出来るだけ小さくすることができる。また、可動H鋼の浮き上がりを防止するために、2箇所支持部分において上から一定の鉛直荷重を与える機構を設けている。可動H鋼は2本の柱で支えられているために、免震層に設置されている場合と同様に沈み込みは生じない。この鉛直荷重は、小型加力装置では主に2kNに設定し、大型加力装置では10～30kNに設定して試験を行った。この部分は大型試験機ではテフロン・ステンレスによる摩擦であるが、小型試験機ではローラーを用いた機構となっている。

I型試験体およびU型試験体は1体を加力装置にセットし、実験を行った。又、U型試験体の場合、加力方向の違いによる復元力特性の変化を検討するために、試験体の屈曲部が加振方向に平行な場合(P方向、面内方向)と、直交している場合(O方向、面外方向)の2通りの加力を行なった。

試験は、地震時のダンパーの復元力特性を把握する目的で、ダンパーにせん断変形を与えている。クリープや疲れに対する試験は、既往の研究結果より、本報で対象としている鉛の使用範囲において、素材として十分な強度を保有していると判断したため、省略している。

加振内容は、静的試験と動的試験を基本とする。鉛は、変形速度によって引張強さが変化し、一般に変形速度が小さくなると引張強さは低下する傾向を有する。このため、正弦波を用いて幾つかの定常波加振を行うことにより変形速度に対する依存性を把握する。加振振幅および加振周波数はアクチュエータの能力を考慮して、加振振幅は±150mm、加振周波数は0.01Hz～2Hzの範囲で変化させた。

静的試験は、加振振幅±150mm迄の繰返し試験と+20mm～-280mmの大変形試験を行った。静的加力スピードは、0.01Hz以下の手動で加力を行った。

動的試験では、主に定常波加振とし、加振周波数を0.01Hz～2Hz、加振振幅を±5mm～±150mmの範囲で変化させた。加振振動数に対する降伏耐力の変化は非常に緩やかで、振動数0.1Hz以上では、平均的にほぼ一定値とみなすことができる。大部分の免震建物の固有周期は3sec以上である。0.1Hz以上(10sec以下)の範囲であれば、復元力特性はほぼ同じ傾向を示すため、復元力特性を評価するに当たって、0.33Hzを代表値として用いることとする。

また、鉛ダンパーの地震時応答特性を把握するために、免震建物のモデルに実地震波を入力した場合の応答解析を行い、この解析から得られた応答変位波形をアクチュエータに入力して鉛ダンパーの応答履歴を観測した。図3.2.4に振動モデルと免震層の復元力モデ

ルを示す。この様な解析モデルに、表 3.2.3 に示す 2 種類の入力地震波を最大速度 50cm/s に基準化して入力した。解析の結果、得られた最大応答値を表 3.2.4、応答変位波形を図 3.2.5～図 3.2.6 に示す。実験では、試験機の制約上、表 3.2.4 の変位波形の最大値を 150mm 以下に適宜調整してダンパーの加振波形に用いた。

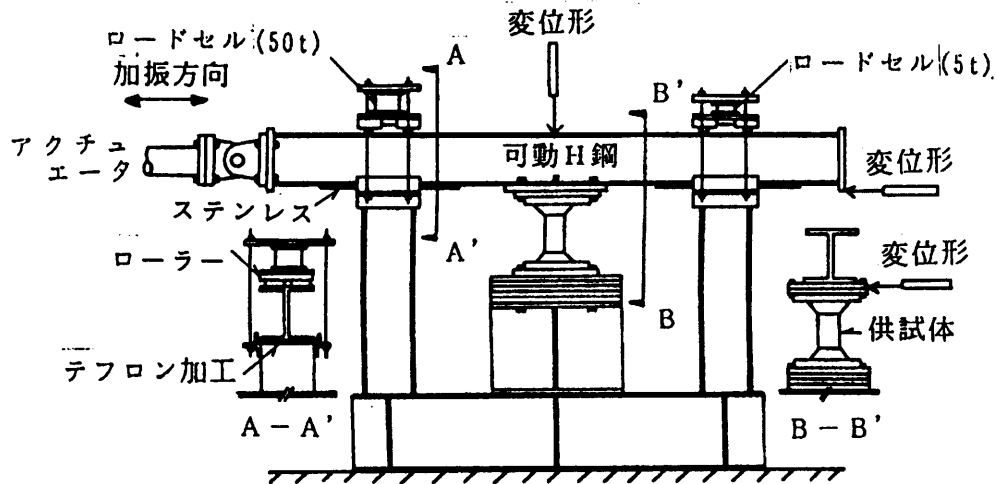
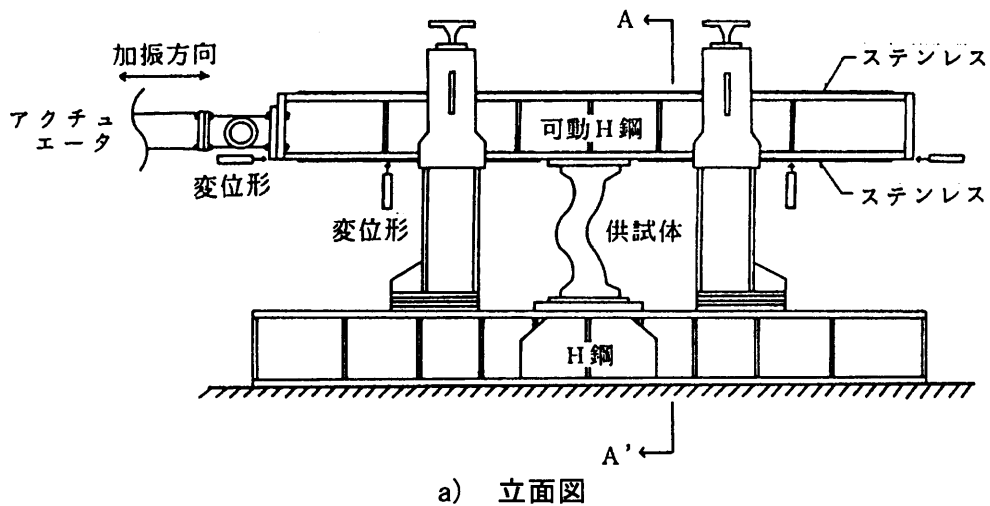
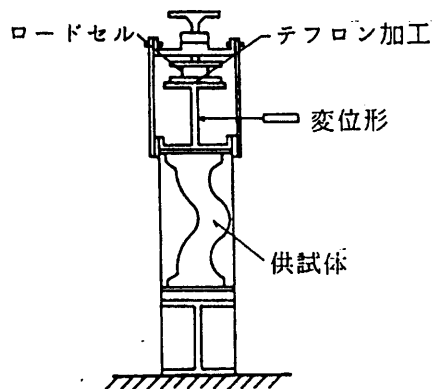


図 3. 2. 2 小型加力装置



a) 立面図



b) A-A' 断面図

図 3. 2. 3 大型加力装置

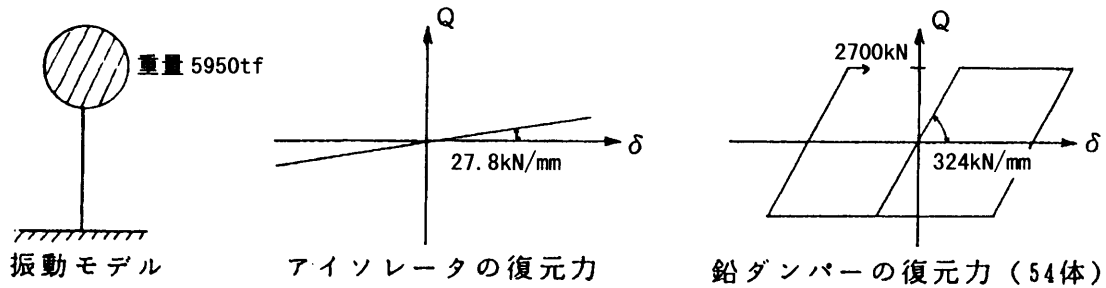


図 3.2.4 解析モデル

表 3.2.3 入力地震波

地震波名	最大加速度	50cm/s 基準時の最大加速度	継続時間
El Centro NS	341.7gal	507.4gal	30sec
八戸 NS	225.0gal	357.8gal	30sec

表 3.2.4 最大応答値

地震波名	最大加速度	最大速度	最大変位	せん断力係数
El Centro NS	124.0gal	59.8cm/s	173mm	0.126
八戸 NS	124.3gal	60.3cm/s	174mm	0.127

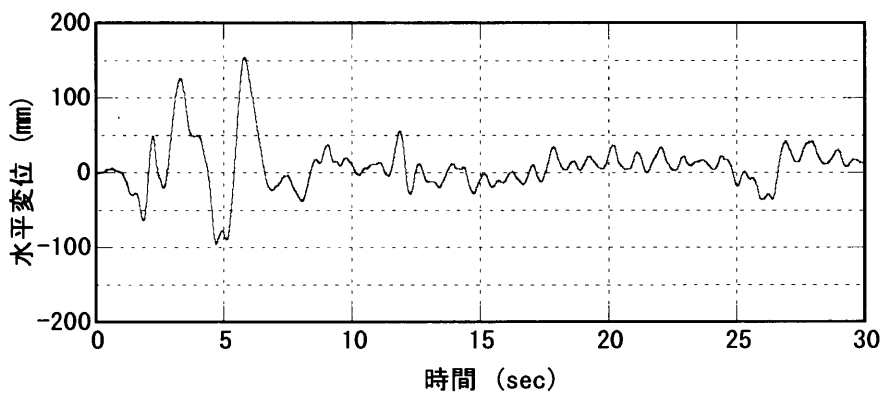


図 3.2.5 解析応答変位波形 (El Centro NS)

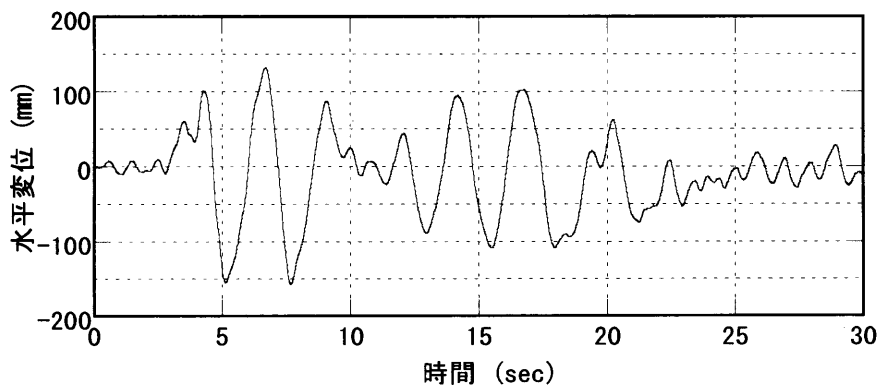


図 3.2.6 解析応答変位波形 (八戸 NS)

3.2.3 繰り返し試験における振幅の設定

復元力特性は、定常波加振における小変形領域、定常波加振における大変形領域、地震波入力を行った場合の復元力特性の3種類に分ける。

鉛の塑性変形については、第2章2.2.3 b)節に示し、図2.2.6にせん断力を受けた場合の変形特性の概要を示している。鉛ダンパーにせん断変形が与えられた場合、復元力特性に加工硬化が認められる領域がある。小変形域と大変形域の境目は、同図中の加工硬化がほとんど認められない部分(Stage I)と急激に加工硬化が進行する領域(Stage II)の境目であると考えられる。鉛ダンパーにおける領域の境目は、鉛の塑性変形の特性的みが表示されたものではなく、試験中の目視による観察から判断して、可撓部の上下両端部に顕著に軸方向変形が現れ始めることも影響していると考ええる。

定常波加振の変形領域は、せん断変形を与えた場合の部材角によって分類する。ここで用いる部材角 δ/H は、せん断変形量 δ と試験体の可撓部高さ H で定義する。

1. 小変形領域：部材角 $\delta/H < 0.17 \sim 0.27$ の場合
2. 大変形領域：部材角 $\delta/H \geq 0.17 \sim 0.27$ の場合
3. 地震波入力を行った場合の復元力特性

U型鉛ダンパーの場合には、軸部が湾曲しているために、軸方向変形が現れ始めるせん断変形量はI型鉛ダンパーに比べて大きくなる。実験から得られた復元力特性から、I型鉛ダンパーの場合は部材角 $\delta/H = 0.17$ 程度、U型鉛ダンパーの場合は部材角 $\delta/H = 0.27$ 程度であった。U型鉛ダンパーを可撓部長さ L とせん断変形量の関係で示せば、 $\delta/L = 0.22$ となる。I型鉛ダンパー同様、鉛軸部の長さに対して20%程度のひずみ度が生じたときに軸方向変形が現れ始めている。

3.3 縮小試験体と実大試験体の復元力特性の比較

鉛は鉄等と比較して、機械的性質がひずみ速度の影響を受けやすいという性質をもつ。鉛ダンパーにおいても、降伏耐力とひずみ速度の関係は把握することができる。

地震時の特性を把握する際に、動的加力試験により評価が必要となる場合がある。実大レベルでの動的試験を行う場合には試験機の加振能力の制約や試験体数、実験の困難さ等の問題が発生した場合には、縮小模型を用いた試験を実施する。縮小試験を行う場合には、縮小試験から得られた測定値と実大試験の測定値との間にはどのような関係があるか、また逆に相似則が成り立つためにはどのような条件が必要か把握しておく必要がある。

文献 1)~3)では、鉛ダンパーの実大試験体と縮小試験体を用いた試験結果について比較を行っている。文献 1)~2)では U180 鉛ダンパーの実大、1/2 縮小、1/4 縮小試験体の比較を行い、文献 3)では U180 鉛ダンパーの発展形である U2426 型鉛ダンパーの実大、1/4 縮小、1/6 縮小、1/8 縮小試験体の比較を行っている。実大と縮小の相似比を $1:1/\lambda$ とした場合、縮小試験結果から実大への換算は、変形量は λ 倍、せん断力は λ^2 倍することにより評価している。縮小試験体と実大試験体の復元力特性は良く一致しており、縮小試験体で実大試験体の復元力特性をほぼ把握できることを確認した。図 3.3.1 に実大試験体と縮小試験体の復元力特性を示す。縮小試験体については、荷重、変位共に実大レベルに換算して示す。

図 3.3.2 に相似比と実大試験体に対する降伏耐力の比率を示す。実大レベルの U 型鉛ダンパーで 150mm 相当の正弦波加振の復元力特性を用いて、変位 0mm におけるせん断力の値を実大試験体に対する比率で示したものである。相似比が 1/4 程度までであれば、実大試験体との差は 3%~15%までに収まっているが、相似比が 1/6、1/8 と小さくなるにつれて実大試験体との差は 12%~30%と大きくなっている。耐力は、相似比を小さくするほど実大レベルに換算した場合に実大の試験結果と比較して大きな値を示す傾向が認められる。

縮小試験体と実大で耐力に相違が生じる原因は、縮小試験体と実大試験体の鉛鋳造体の組織構造が異なること、及び加振を行うことにより塑性変形に起因する発熱(塑性熱)量の違いの影響によって、鉛材料強度が変化したためと考えられる。

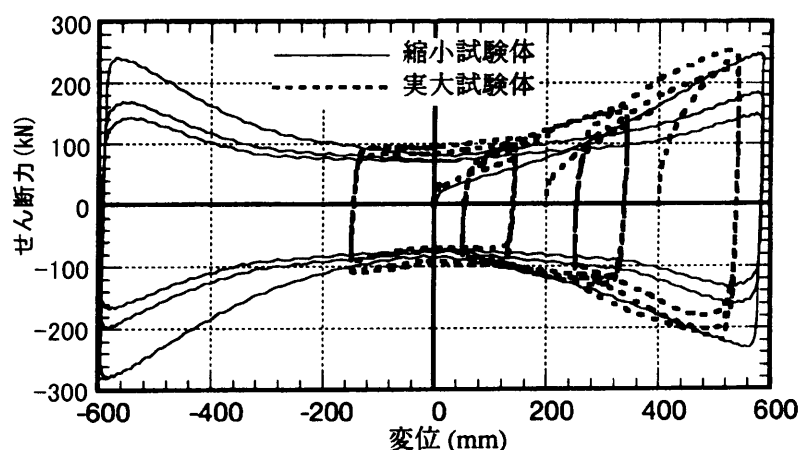


図 3.3.1 実大試験体と縮小試験体の比較 (U180, 実大換算値)

鉛ダンパーは鉛の鋳造により製作される。単純に円筒形と考えた場合でも、表面積と体積の比率がスケールに応じて比例関係とならない。縮小試験体は、表面積が縮小率の2乗倍となり、体積は縮小率の3乗倍に比例するため、製作時において実大試験体よりも冷却速度が速くなる。冷却速度が速いほうが鉛の結晶粒度は小さくなり、鉛の結晶粒度は小さい方が引張強度は大きくなる⁴⁾。実大と縮小試験体の両方から引張試験片を作成し、引張試験を実施すると縮小試験体の方が約10%程度高い引張強度を示したため、縮小試験体の結晶構造は実大の結晶構造と異なるものであることが推測できる。縮小試験体で相似則をもとに算出したせん断力が実大試験体より高くなるのは、冷却速度の違いが結晶粒成長に影響を与え、結晶構造に違いが生じるためであると考えられる。

鉛ダンパーを繰り返し加振すると、塑性熱によってせん断力が変化する。鉛は温度が高い方がその引張強さ等、強度が低下する傾向が顕著に現れる。

柏木らは文献3)において、履歴吸収エネルギーが全て熱エネルギーに変換されると仮定して、発熱量を算出すると、相似比 λ に比例し、体積に反比例すると報告している。実大試験体の方が縮小試験体より内部温度が高くなり、温度による鉛材料の軟化が発生し易くなることが示されている。図3.3.3に、文献3)に示された実大と縮小試験体における履歴面積の加振回数毎の変化を示す。加振振幅は、実大レベルで $\pm 150\text{mm}$ である。全てのデータで2回目の履歴で最大値を示すが、繰り返す毎に履歴面積の低下が大きくなる。特に、実大試験体は繰返しに伴う履歴面積の低下が縮小試験体と比較して著しい。この現象は、実大試験体の内部温度の上昇が、縮小試験体の温度上昇を上回る事を示唆している。

鉛ダンパーの縮小試験体では、構造的な相似性は成立するが、材料の特性や塑性ひずみによる発生熱の影響により、縮小モデルを実大換算して求めたせん断力は実大よりも高い値を示す。高温領域での鉛の伸びは、 150°C 以上ではほとんど変化しない⁴⁾。大変形を想定して縮小試験体を用いた動的試験を行った場合、変形追従性能は実大試験と同様な結果となると考えられる。耐力について評価を行う場合には、相似比を小さくしすぎないことが必要である。従って、図3.3.2～図3.3.3から判断して、相似比1/4程度までが限界であると判断する。

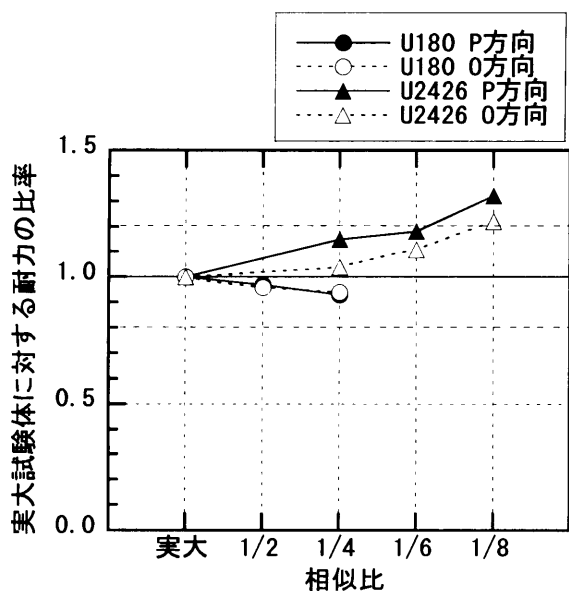


図 3.3.2 相似比と実大試験に対する降伏耐力の比率

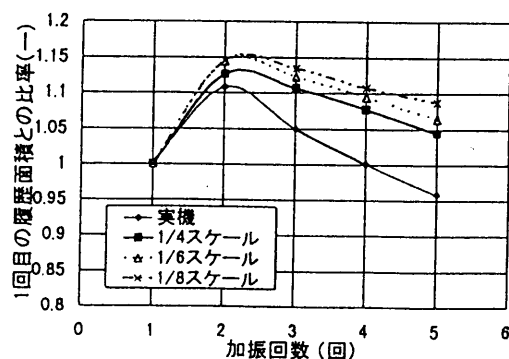


図 3.3.3 加振回数と履歴面積の関係³⁾

3.4 正弦波による定常波入力時の試験結果と考察

3.4.1 試験結果と復元力特性の概要

鉛ダンパーの復元力特性は非常に特徴的な形状を示す。I型とU型に分けてその復元力特性を示す。

a) I型試験体

図 3.4.1 に $D=100\text{mm}$, $H=300\text{mm}$ の I 型試験体の復元力特性を示す。

図 3.4.1 a) は、静的加力試験の結果である。鉛特有の復元力特性を示しており、小変形領域においては剛塑性型の復元力特性を示す。50mm ($\delta/H=0.17$) を越える領域から、鉛軸部が材軸方向に引っ張られるために、軸方向変形の影響をうけて抵抗力が大きくなり、蝶型の復元力特性を示す。変形の増大に伴って最大耐力の上昇が認められる。

図 3.4.1 b) は、動的加力試験の結果である。加振振動数 0.1Hz の正弦波を、振幅を変えて入力した場合の復元力特性である。動的加力試験においても静的加力試験と同様に、変形が大きくなるほど耐力が上昇して、蝶型の復元力特性を示している。しかし、 $\pm 20\text{mm}$ ($\delta/H=0.07$) 振幅以下では蝶型よりも bi-linear 型に近い形状を示している。加振振幅が大きくなるに伴って、変位 0mm における荷重 (y 切片荷重) は徐々に大きくなるが、振幅 50mm ($\delta/H=0.17$) 以上ではほとんど同じ値を示す。

動的加力試験においては、正弦波による定常波加振を行っている。ひずみ速度の影響で復元力特性にハードニング現象が現れる可能性も考えられるが、ハードニング現象はひずみ速度の影響ではなく、軸力の影響であると判断している。なぜなら、静的試験の結果においても振幅が大きくなると復元力特性がハードニングを示しているためである。

第 2 章 2.4 項では、I 型鉛ダンパーと同様の形状をした鉛の部材試験の結果を示した。部材試験の動的せん断試験では、ひずみと応力度の関係にはハードニングは認められない。せん断ひずみ 20% の部材試験結果 (p.36 図 2.4.7) ではハードニングが現れていない。一方、I 型鉛ダンパーの復元力特性は、せん断ひずみ 20% に相当する水平変位 60mm において、既にハードニングを確認することができる。部材試験体は I 型鉛ダンパーと比較すると非常に扁平な形状をしている。実際に免震層で使用される場合、鉛ダンパーは、水平方向の変形時にアイソレータに支えられて、一定の高さを保ちながら変形する。同様の状況を想定し、高さを一定に保ちながらせん断変形を与えている。部材試験体に比べて背の高い I 型鉛ダンパーは、引張・曲げの影響を受けやすくなり、復元力特性にハードニングが表れていると考えられる。

図 3.4.2 に I 型鉛ダンパーの復元力特性の概要を示す。I 型鉛ダンパーは、変形が大きくなるに従いせん断力が大きくなる蝶型を示す。I 型鉛ダンパーの復元力特性は、大きく分けて 3 つの剛性 KI_1 , KI_2 , KI_3 と降伏耐力 PI_y でモデル化することができる。静的試験の結果から得られた降伏変位 δ_y は 0.07cm~0.18cm と非常に小さな値をとり、初期勾配及び除荷勾配 KI_1 は剛な勾配をとる。

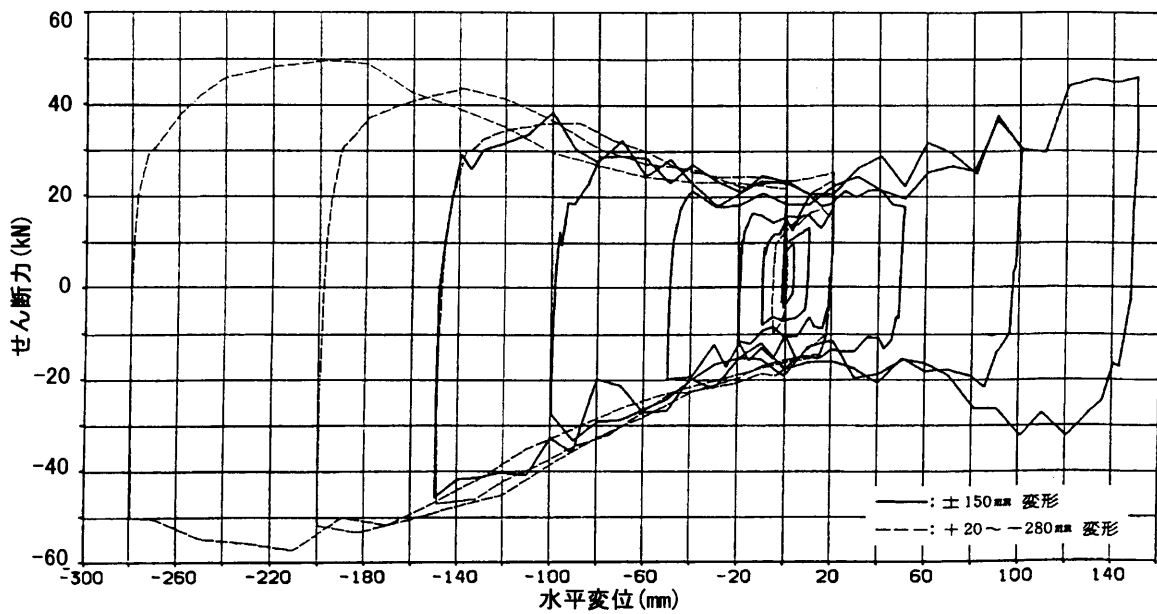


図 3. 4. 1 a) I 型鉛ダンパーの静的加振時の復元力特性 (D=100mm, H=300mm)

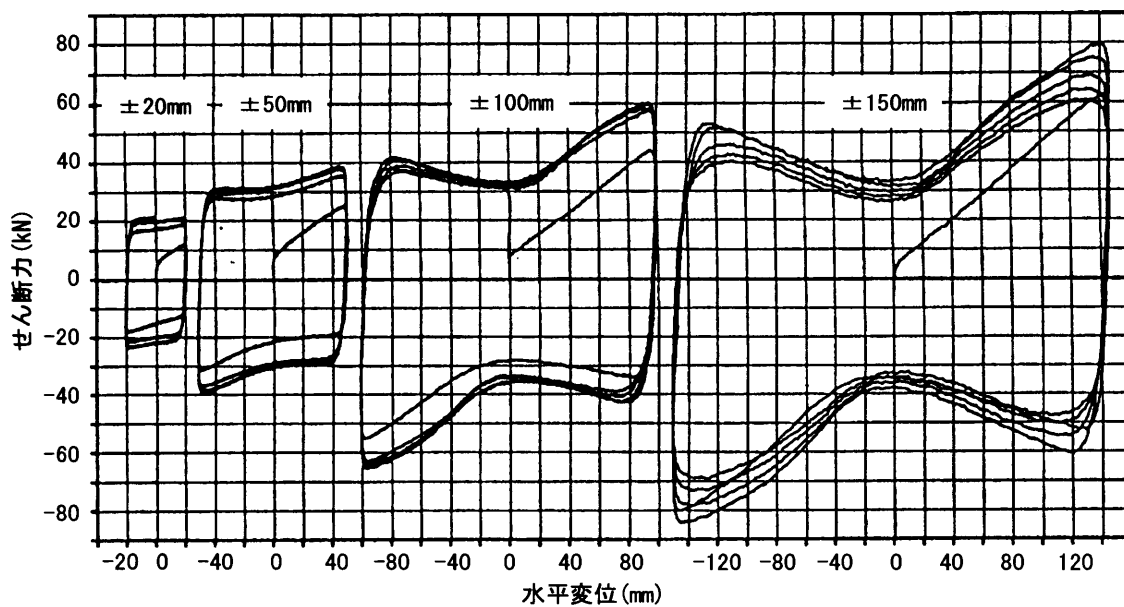


図 3. 4. 1 b) I 型鉛ダンパーの動的加振時の復元力特性 (D=100mm, H=300mm, 振動数 0. 1Hz)

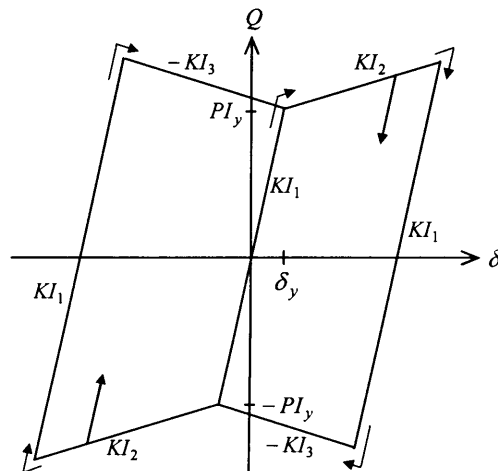


図 3. 4. 2 I 型鉛ダンパーの復元力特性の概要

b) U型試験体

図 3.4.3 に U140 試験体と U180 試験体の動的加力試験における復元力特性を示す。I 型試験体と違って、小変形領域から 150mm($\delta/H=0.27$)までほぼ bi-linear に近い形状を示している。可撓部を湾曲させて、変形したときに軸方向力による影響を小さくするための効果が現れている。

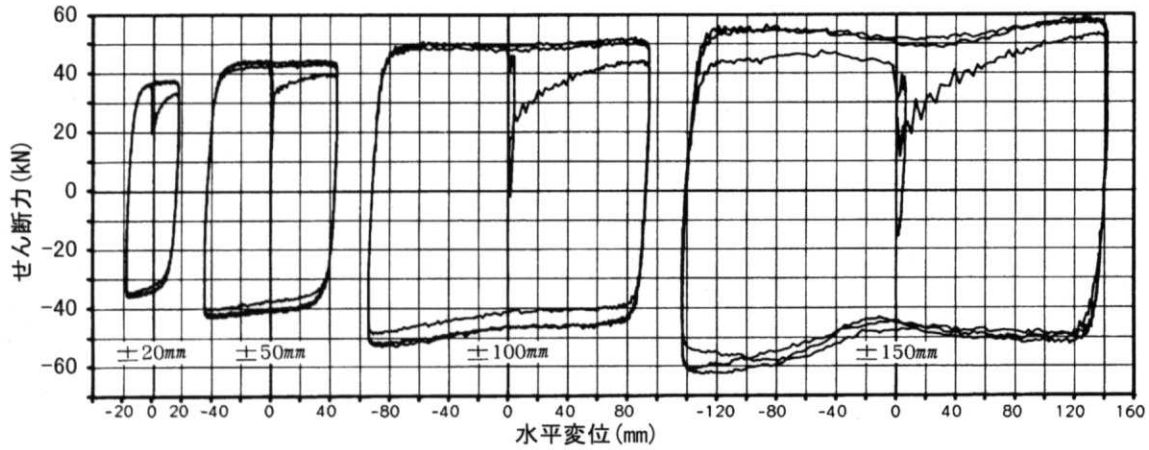


図 3.4.3 a) U140 鉛ダンパーの動的加振時の復元力特性 (0.33Hz, P 方向)

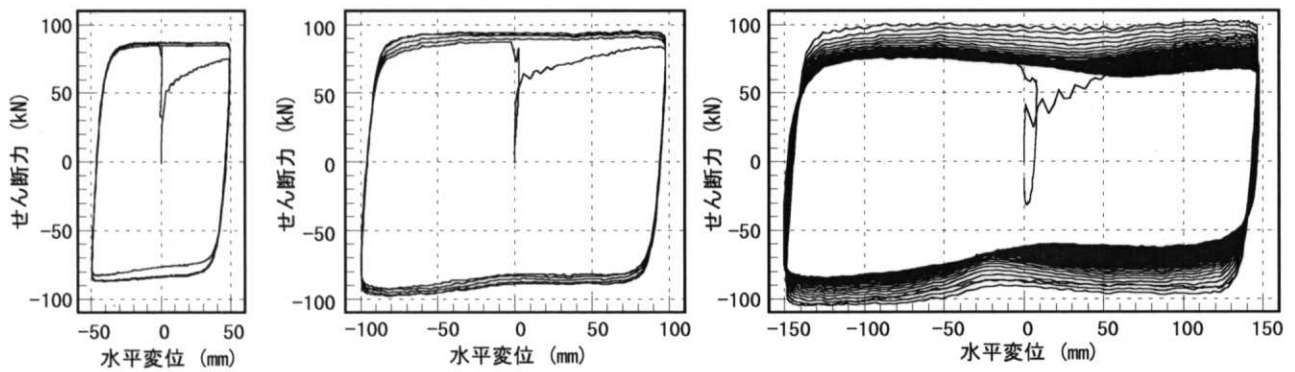


図 3.4.3 b) U180 鉛ダンパーの復元力特性 (0.33Hz, P 方向)

図 3.4.4 に U 型鉛ダンパーの復元力特性の概要を示す。U 型鉛ダンパーの復元力特性は、定常波加振における小変形領域と大変形領域とで分類する。

小変形領域で定常波加振を行なった場合、鉛ダンパーの軸方向変形は小さいため、復元力特性は剛塑性に近い形状を示す。なまりは、最初にひずみを与えた場合の弾性限は、再結晶が完了せずに継続してひずみを与えた場合の弾性限より低い値を示すため、まず低い耐力 $\beta \cdot Q_e$ (初期降伏荷重) で降伏する。以降、復元力特性の y 切片荷重は経験した振幅に伴って変化する。振幅が漸増すると y 切片荷重も漸増する。ある一定の振幅に達した後は、y 切片荷重は最大値 Q_e を示し、更に振幅が大きくなっても y 切片荷重はほぼ一定の値を示す。この変位振幅を本論では最大降伏変位 δ_e と呼称し、最大降伏変位 δ_e の加振振幅から得られる復元力特性の y 切片荷重の最大値 Q_e を U 型鉛ダンパーの降伏耐力と定義する。

最大降伏変位 δ_e を超えた振幅領域を大変形領域とする。大変形領域では鉛ダンパーに軸方向の変形が現れ始めるため、塑性後の勾配はハードニングを示し始める。

復元力特性をモデル化する際の剛性は、初期剛性 K_1 、降伏後の剛性 K_2 、ハードニング領域の剛性 K_3 の 3 種類とする。実験から得られる降伏後の剛性 K_2 は初期剛性 K_1 と比較すると、極めて小さな値となり、その復元力特性は完全弾塑性型の bi-linear 型と見なすことができる。

($K_2 \cong 0$)

加工前の降伏荷重を $\beta \cdot Q_e$ で表し、下式の関係で示す。

$$\beta \cdot Q_e = K_1 \cdot \delta_{y1} = K_1 \cdot \gamma_{y1} \cdot H \quad (3.4.1)$$

$$Q_e = K_1 \cdot \delta_{y2} = K_1 \cdot \gamma_{y2} \cdot H \quad (3.4.2)$$

$\beta, \gamma_{y1}, \gamma_{y2}$: 実験より得られる係数 ($\beta=0.4145, \gamma_{y1}=0.0035, \gamma_{y2}=0.0085$)

H : 鉛ダンパーの可撓部高さ

Q_e : 鉛ダンパーの降伏耐力

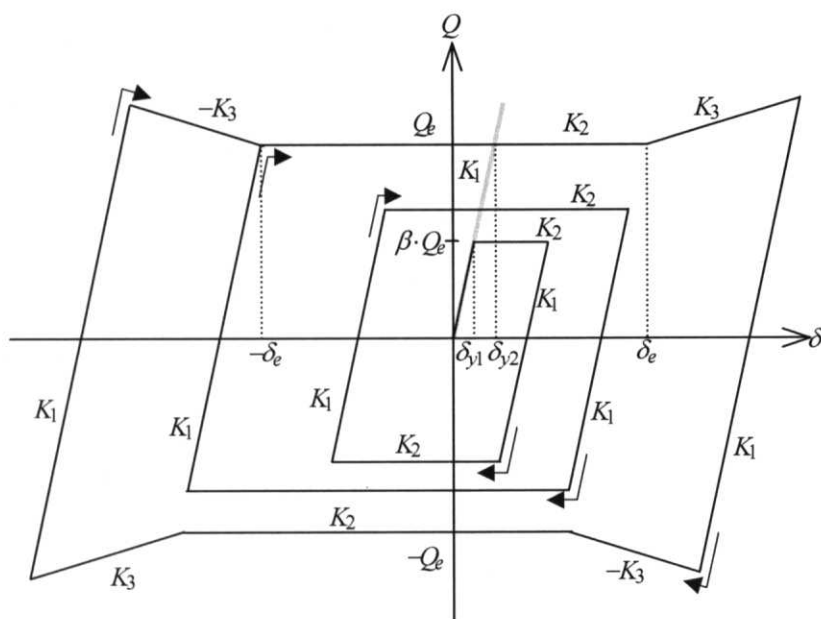


図 3.4.4 U 型鉛ダンパーの復元力特性の概要

δ_{y1} を初期降伏変位、 δ_{y2} を降伏変位と定義する。降伏変位 δ_{y2} は、図中灰色線のように初期剛性 K_1 を原点から延ばし、降伏耐力 Q_e の交点から求める。初期降伏変位 δ_{y1} は初期剛性 K_1 と加工前の降伏荷重 $\beta \cdot Q_e$ の交点から求める。最大降伏変位 δ_e は、(3.4.3)式で示す。

$$\delta_e = \gamma_e \cdot H \quad (3.4.3)$$

γ_e : 実験より得られる係数 ($\gamma_e=0.27$)

変形が最大降伏変位 δ_e を超えた場合には、その復元力特性は次第にハードニングを示し始める。実験より得られる結果より、大変形領域で示されるハードニングは、(3.4.4)式で示す。

$$K_3 = \gamma_k \cdot K_1 \quad (3.4.4)$$

γ_k : 実験より得られる係数 ($\gamma_k=0.015$)

図 3.4.5 に U 型鉛ダンパーの実験より得られた復元力特性を示す。復元力特性をせん断力比と部材角の関係で示したもので、縦軸のせん断力比は、せん断力を降伏耐力 Q_e で基準化したものである。横軸の部材角 δ/H は、鉛ダンパーの可撓部高さ H に対するせん断変形量 δ の比を示す。実験結果は1/4縮小試験体を用いた0.1Hzの漸増载荷の復元力特性で、灰色線で示す。鉛ダンパーのスケール効果については、1/4縮小試験体で実大試験体の復元力特性をほぼ把握できることを確認している。

実験から得られる復元力特性は、小変形領域では部材角の増大に伴って、せん断力比も大きくなっている。部材角 $\delta/H=0.27$ 程度を超えたあたりから、 y 切片のせん断力比はほぼ一定値を示す傾向が見られる。本論では、せん断力比が一定値を示し始める部材角 $\delta/H=0.27$ ($\gamma_e=0.27$)の復元力特性から決定した y 切片荷重をU型鉛ダンパーの降伏耐力 Q_e と定義し、この Q_e をbi-linear型にモデル化する際の降伏荷重の基準とする。(3.4.3)式を用いてU180鉛ダンパーの最大降伏変位を求めれば $\delta_e=150\text{mm}$ となる。

(3.4.1)~(3.4.4)式より求めた初期剛性 K_1 、降伏後の剛性 K_2 、ハードニング領域の剛性 K_3 もあわせて図 3.4.5 に示す。

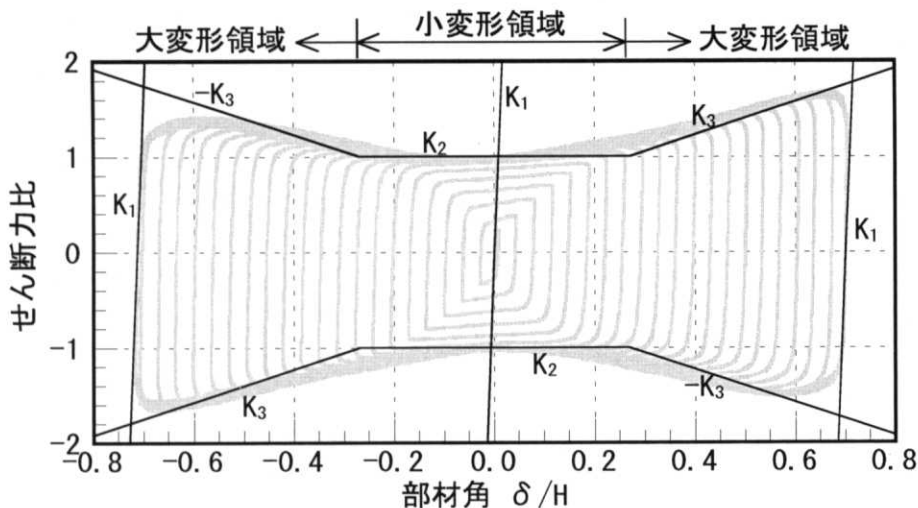


図 3.4.5 1/4縮小試験体(H18)のせん断力比と部材角の関係(0.1Hz)¹⁹⁾

c) 共通する特徴

I型、U型の試験体の復元力特性は1サイクル目の設定変位に達するまでの荷重値は他のサイクルに比べて低い値を示す。一度最大変位まで変形することにより、それ以降は加工後に示される特性を示す。

鉛は、5%圧延で5分後に再結晶が完了することが確認⁴⁾されている。このため、同じ試験体でいくつかの振幅を変えた加振を行なった場合でも、それぞれの履歴において1サイクル目の荷重値が低くなる現象が確認できる。

また、2サイクル目以降の復元力特性は、いずれも繰り返しの伴って僅かではあるが耐力が大きくなっている。これは、結晶粒度の成長と関連があると考えられる。通常、鋳型を用いて整形された鉛の結晶粒度は小さく、均一である。変形が加わると、結晶粒の成長が始まる。結晶粒の成長は、結晶粒度の小さい場合に顕著に起きる。結晶粒の成長が進み、結晶粒度が大きくなるに従って、結晶粒成長率は次第に小さくなる。成長率が大きい場合には、結晶粒子の残留ひずみも大きいため、復元力特性は繰り返しの伴って荷重が大きくなってゆくが、ある程度まで繰り返しを行うと、結晶粒が大きくなり成長率が小さくなるために復元力特性の大きさが安定する。

鉛には、ひずみ速度依存性があり、ひずみ速度の増大に伴ってその抵抗力も増加する。振動数が高くなるにつれて変位0mmにおける荷重は徐々に大きくなるが、振動数が1Hz程度まで高くなると変位0mmにおける荷重はほとんど変化しなくなる。また、大振幅での繰り返し加力では、発熱による耐力の低下が認められる。

d) 復元力特性の違い

I型鉛ダンパーの復元力特性はハードニングの影響を受けて蝶型の形状を示し、U型鉛ダンパーの復元力特性はほぼ剛塑性の形状を示す。この復元力特性の違いは、地震時におけるフロアレスポンスに大きく影響を与える。ダンパーの復元力特性は、アイソレータの剛性に影響を与えない形状が理想的であるため、剛塑性型を示すU型鉛ダンパーが免震構造用ダンパーとして最適であると考えている。

3.4.2 変形状態の観察

a) I型試験体

図 3.4.6 に直径 $D=100\text{mm}$ の I 型試験体の変形の様子を示す。I 型鉛ダンパーの変形能力は、試験体の直径(D)と可撓部高さ(H)による影響が大きい。

$D/H \geq 0.67$ ($D/H=70/100, 100/100, 100/150, 70/70, 100/150$)の試験体は、小変形では可撓部上下端の伸びが著しく、大変形領域ではせん断変形が優位であった。

$D/H=0.47$ ($D/H=70/150$)の試験体では、可撓部上下端を支点にしての曲げによる変形が目立ち、その部分からへこみや亀裂を生じた。破断に至るまでの繰り返し加振を行った場合、可撓部下端部(補強部と可撓部の付け根)から断面が細くなり破断に至るのがほとんどであった。

$D/H \leq 0.5$ ($D/H=70/200, 100/200, 70/300, 50/300$)の試験体は、 $D/H > 0.5$ の試験体に比べて、曲げせん断変形が卓越している。破断に至るまでの繰り返し加振を行った場合、曲げがかかる部分に鉛が寄り、鉛の上下端部が押しつぶされて膨らみ、中央部が徐々に細くなってゆき、引張により破断に至った。

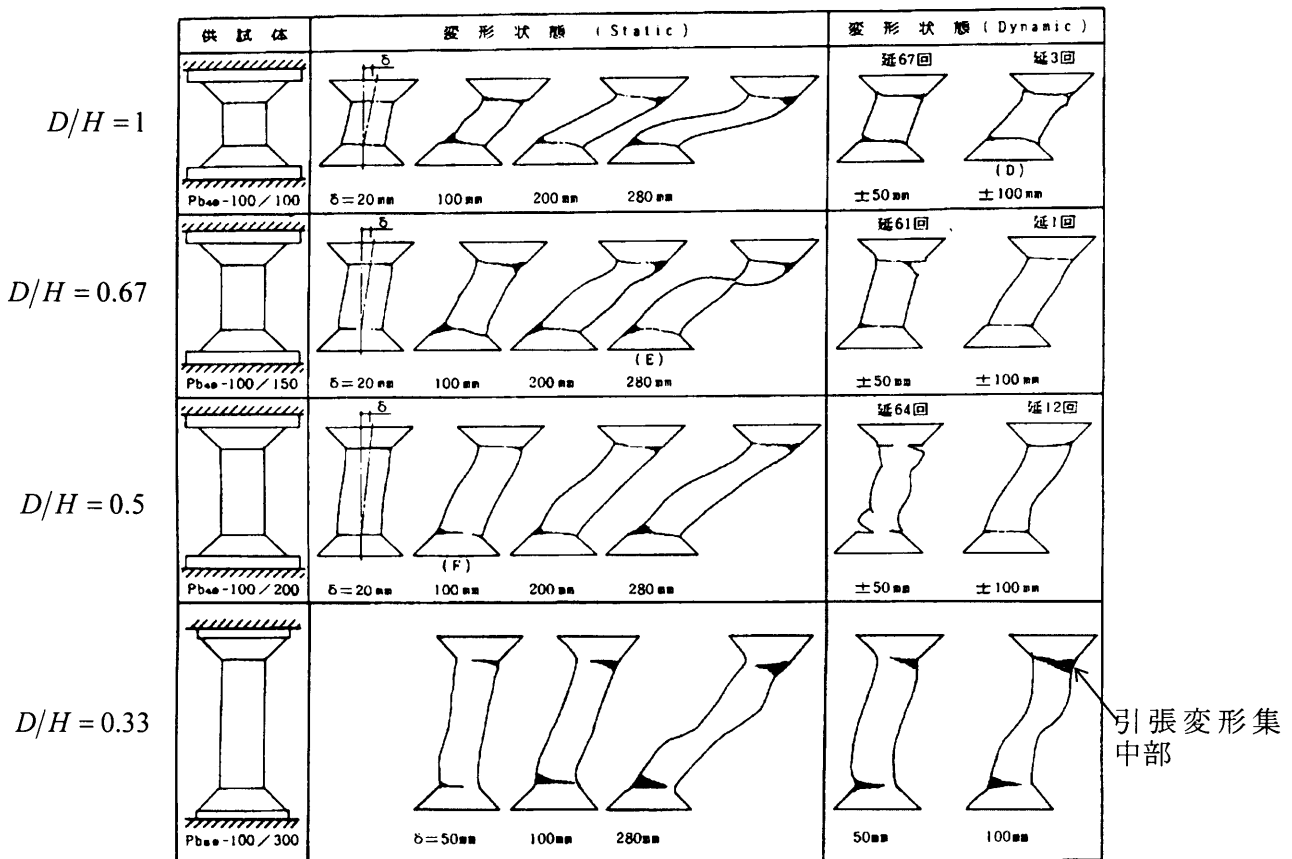


図 3.4.6 I 型鉛ダンパーの変形の様子 (直径 $D=100\text{mm}$)

b) U型試験体

図 3.4.7 に直径 $D=100\text{mm}$ の U 型試験体の 150mm ($\delta/H=0.27$) までの変形の様子を示す。また、写真 3.4.1 には、直径 $D=180\text{mm}$ の U 型試験体の 800mm ($\delta/H=1.42$) までの変形状態を示す。U 型は、可撓部の高さがどの試験体もほぼ同じであるため、直径 (D) によって、その特性が異なっている。

U50 型、U75 型では、変形が大きくなるにつれて、円弧部分が大きく突き出してくる。それに対して、直径が 100mm 以上の試験体 (U100, U140, U180) では、形状が全体的に変化して部分的な変化は見られなかった。

U180 については、 $\delta/H=0.27$ 以上の変形も与えている。変形に伴って可撓部の上下両端部に引張変形が集中しているが、 $\delta/H=1.07$ 程度では顕著な絞りは認められない。 $\delta/H=1.42$ では可撓部に絞りが確認され、荷重変形曲線においても抵抗力の低下が認められる。

I 型試験体と同様に、U 型試験体を直径と高さの関係で示すと、 $D/H=0.09\sim 0.32$ である。破断に至るまでの繰り返し加振を行った場合、I 型試験体の $D/H\leq 0.5$ の試験体と同様に、曲げがかかる部分に鉛が寄り、鉛の上下端部が押しつぶされて膨らみ、中央部が徐々に細くなってゆき、引張により破断に至る。

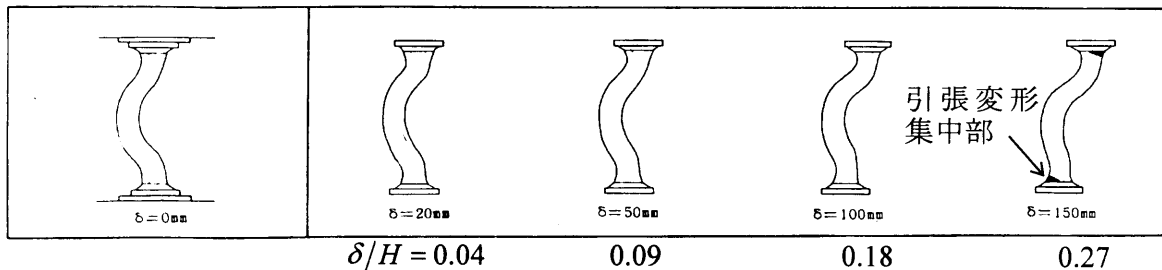
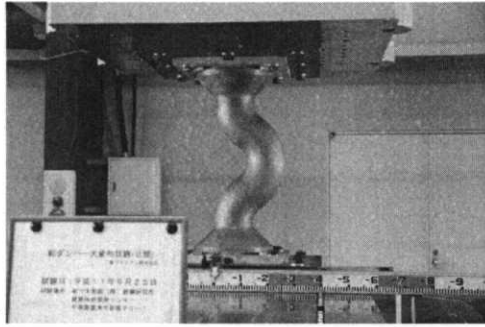
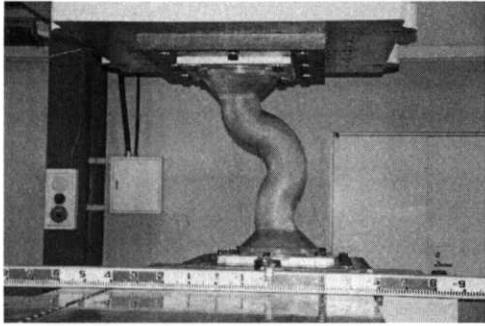


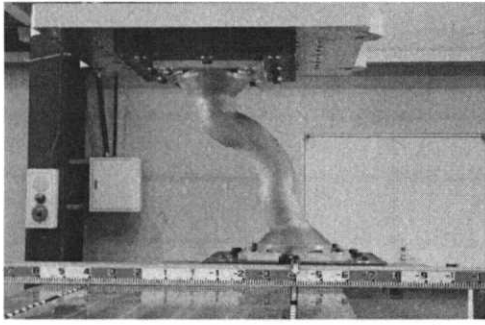
図 3.4.7 U 型鉛ダンパーの変形の様子 (直径 $D=100\text{mm}$, 動的試験)



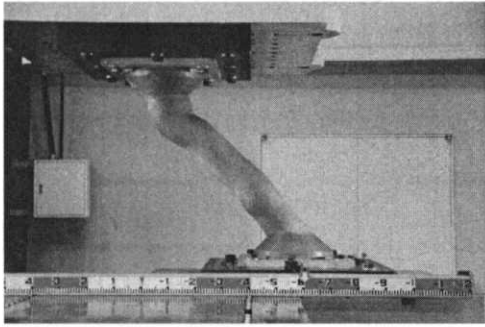
a) 加振前



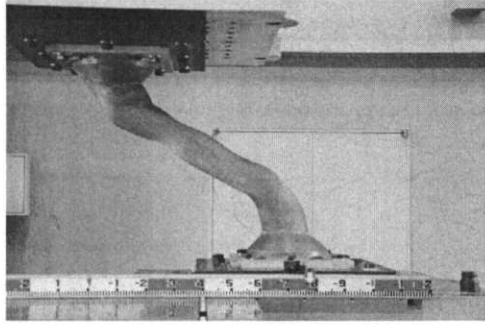
b) 200mm ($\delta / H=0.36$)



c) 400mm ($\delta / H=0.71$)



d) 600mm ($\delta / H=1.07$)



e) 800mm ($\delta / H=1.42$)

写真 3. 4. 1 U180 鉛ダンパーの変形の様子

3.4.3 復元力特性の荷重値の概要と降伏耐力の推定

a) I型試験体

復元力特性のモデル化を検討するため、図 3.4.8 に示す各点の荷重値に着目する。A 点の荷重 P_A は試験体が剛体と見なせる範囲での最大耐力(前述 $\beta \cdot Q_e$: 初期降伏耐力に同じ)、B 点の荷重 P_B は 1 サイクル目の復元力特性での最大耐力、C 点の荷重 P_C は変位 0mm における最大耐力、D 点の荷重 P_D は 2 サイクル目以降の復元力特性での最大耐力とする。

図 3.4.9 に各試験体の動的試験から求めた P_B と平均変位速度 v の関係を示し、図 3.4.10 に P_C と平均変位速度 v の関係を加振振幅毎に示す。動的試験の加振は sin 波入力による定常波加振を行っているため、平均変位速度 v は次式により定義する。

$$v = 4af \quad (3.4.5)$$

ここで、 a : 加振波形の片振幅 (cm) f : 加振周波数 (Hz)

同図より、 P_B 、 P_C は平均変位速度 v が 3cm/sec 以上になるとほぼ一定値を示す。鉛材料は、ひずみ速度の影響によりその抵抗力が変化することが知られているが、3~10cm/sec の範囲では影響が少なくなっている。W.H.Robinson¹¹⁾ 他も、地震動を対象としたようなひずみ速度の範囲ではひずみ速度の影響は少ないと述べている。 P_B は加振振幅 a によりかなりバラツキが大きく、加振振幅 a が大きいほど P_B も大きくなっている。

図 3.4.9-図 3.4.10 の耐力と平均変位速度の関係から判断して、ひずみ速度は耐力に対して影響を与えたと考えることができる。同じ振動数の場合、振幅が大きくなれば平均変位速度は大きくなるので、耐力が上がる様子も示されている。

図 3.4.11~図 3.4.12 は試験体可撓部高さ H (mm) と P_A 、 P_C の関係を示したものである。ここで、 P_A 、 P_C は、試験体可撓部高さ H が同じ試験体の実験から得られた耐力の平均値で示す。同図より、 P_A 、 P_C は高さ H が大きく、直径が小さいほど小さくなっている。また、静的実験の結果より動的実験の結果の方が、耐力は大きくなっていることが認められる。

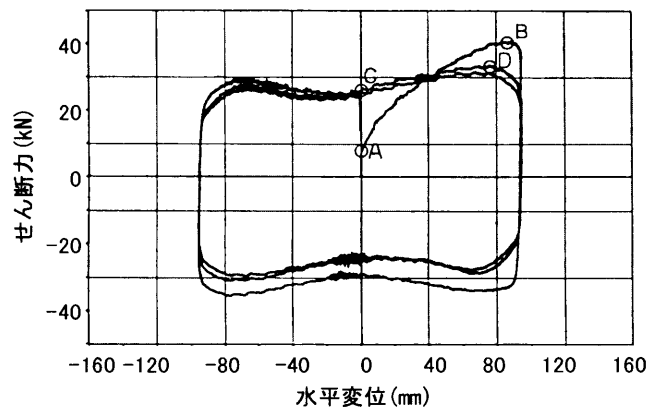


図 3.4.8 復元力特性での耐力

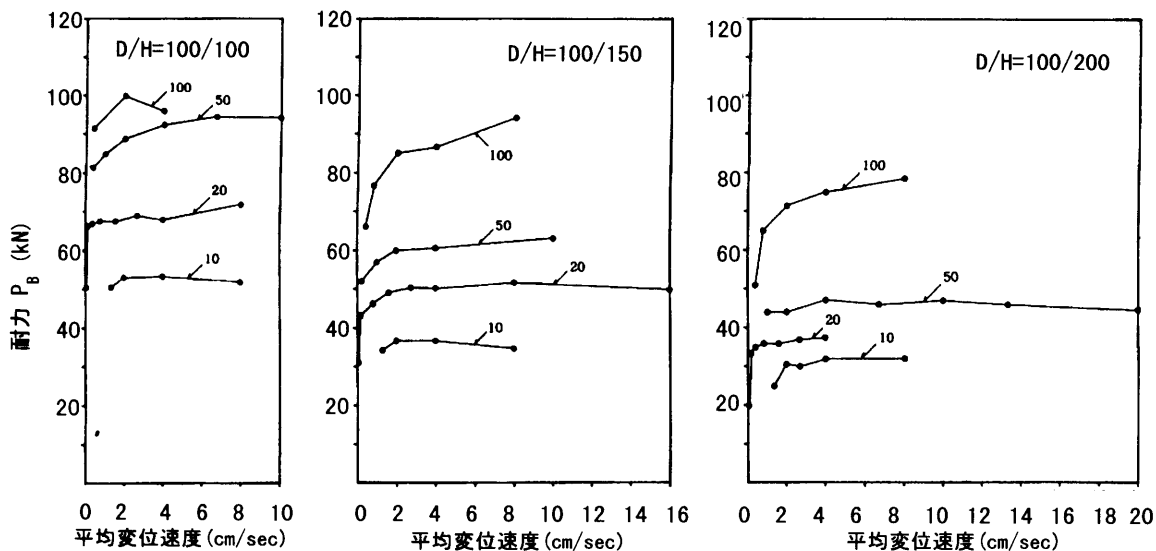


図 3.4.9 耐力 P_B と平均変位速度の関係 (※図中の数値は加振振幅 (mm) を示す)

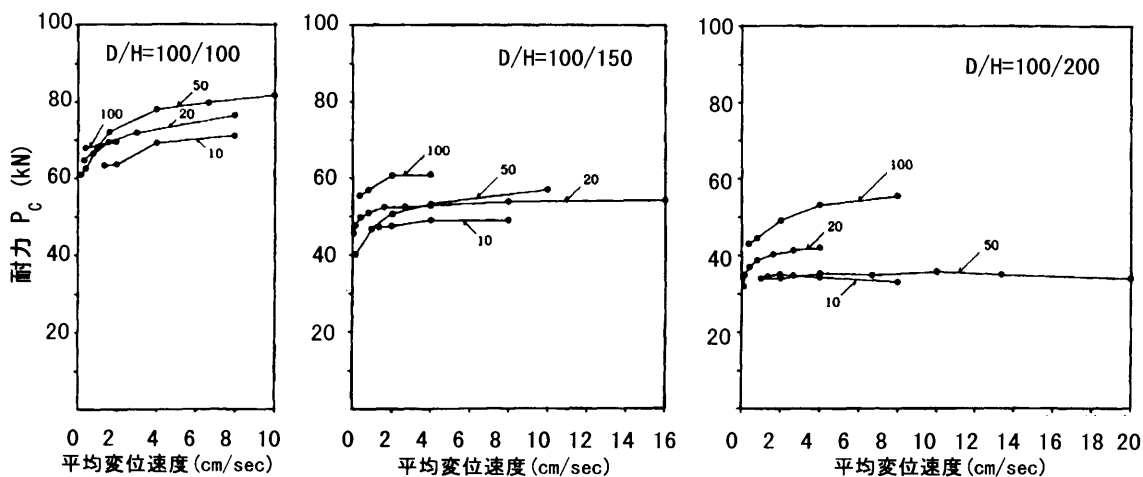


図 3.4.10 耐力 P_C と平均変位速度の関係 (※図中の数値は加振振幅 (mm) を示す)

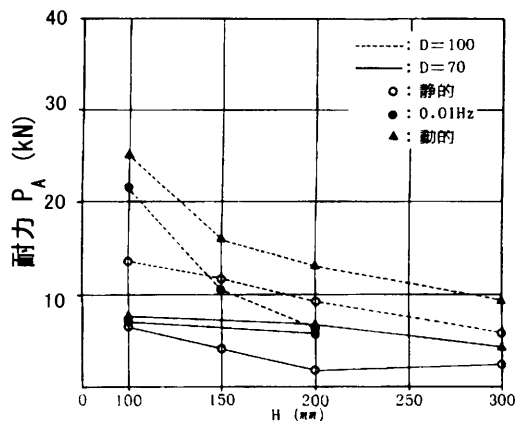


図 3.4.11 耐力 P_A と高さ H の関係

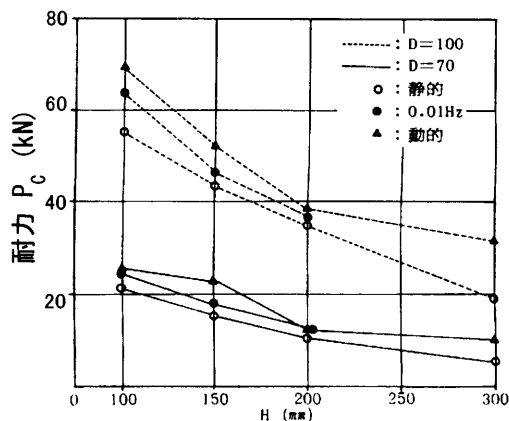


図 3.4.12 耐力 P_C と高さ H の関係

図 3.4.13～図 3.4.14 に静的実験と動的実験(振幅±100mm)から得られる P_A , P_B と部材剛度 I/H の関係を示す。ここで、各試験体の断面 2 次モーメントは円形断面の可撓部直径 D を用いて次式より算出した。

$$I = \frac{\pi D^4}{64} \quad (3.4.6)$$

図 3.4.15 に P_C と $\log_{10} \frac{I}{H}$ の関係を示す。いずれの場合も P_A , P_B は $\frac{I}{H}$ と、 P_C は $\log_{10} \frac{I}{H}$ と比例関係にあることが認められる。

各変位レベルでの最大耐力 P_D と部材角 δ/H の関係を図 3.4.16 に示す。同図より高さ H が大きい方が最大荷重の上昇率は大きくなっている。また、静的と動的の耐力を比べると、動的実験から得られた耐力の方が高い値を示している。

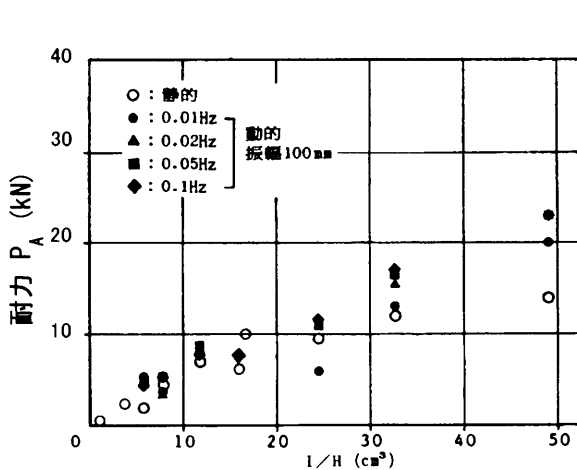


図 3.4.13 耐力 P_A と部材剛度 I/H の関係

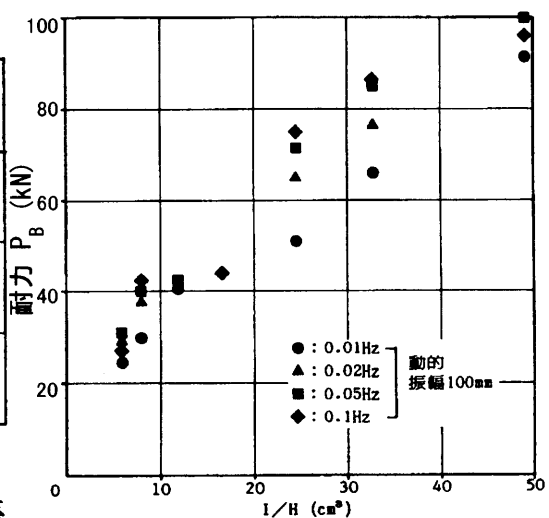


図 3.4.14 耐力 P_B と部材剛度 I/H の関係

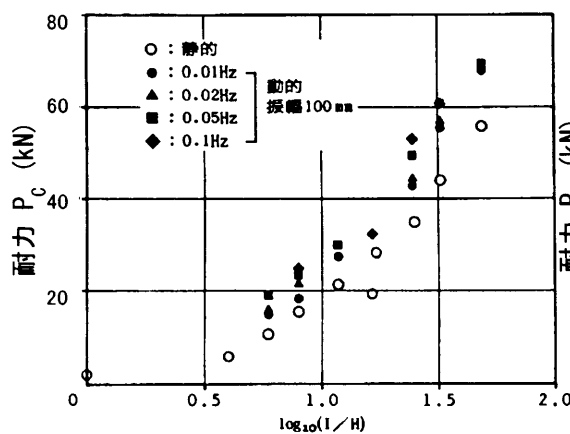


図 3.4.15 耐力 P_C と $\log_{10}(I/H)$ の関係

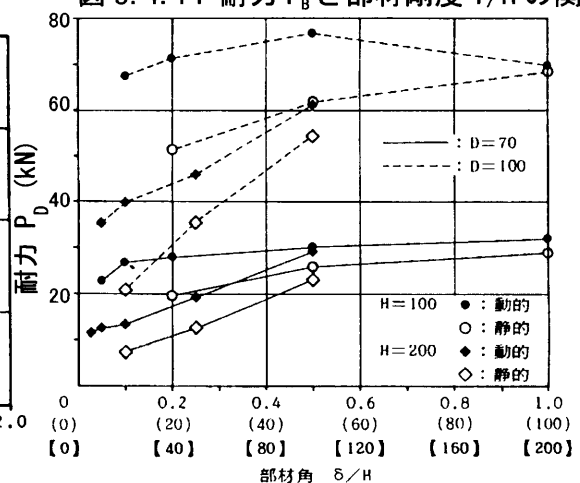


図 3.4.16 耐力 P_D と部材角の関係

図 3.4.17 に動的繰り返しによる最大荷重 P_D と繰り返し回数の関係を示す。最大耐力 P_D は繰り返し回数の増加にともない単調に減少する。地震時には、最大の振幅での繰り返しは数回程度と考えられるので、破断までに 10 サイクル以上の加力に耐えることができれば十分であると判断する。繰り返しにより耐力が低下するのは、エネルギー吸収の結果として、鉛が発熱するためである。鉛の融点は、 327°C である。実験終了時にダンパー中心部はほぼ融点に達していることも確認している。従って、鉛ダンパーの破断は熱による鉛の溶融によって起こり、これに抵抗するには鉛の体積を増やすことが効果的であるが、反面、降伏耐力が変わるために実際に設置する鉛ダンパーの個数を調整する必要が出てくる。

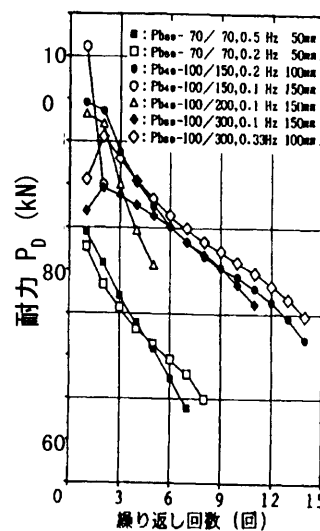


図 3.4.17 耐力 P_D と繰り返し回数の関係

図 3.4.2 に示した I 型鉛ダンパーの降伏耐力 PI_y は、図 3.4.8 の C 点における最大耐力 P_C (変位 0mm における最大荷重) と定義する。

鉛ダンパーの降伏耐力 PI_y の評価については、鉛材が既に塑性領域に入っているために、厳密には弾性理論は適用できない。しかし、試験結果を理解する上で有効であると考えられるため、弾性論に基づいて鉛ダンパーを両端固定の曲げ部材と考えて、次式の P_y を I 型鉛ダンパーの降伏耐力 PI_y とし、降伏応力度 σ_y を対応づける。

$$P_y = \frac{2Z_p \sigma_y}{H}, \quad Z_p = \frac{D^3}{6} \quad (3.4.7)$$

ここで、 P_y : 降伏耐力(N), Z_p : 円形断面の塑性断面係数(mm^3),

σ_y : 降伏応力度(N/mm^2), H : 可撓部高さ(mm), D : 可撓部直径(mm)

図 3.4.18 に可撓部高さ H と(3.4.7)式から導いた降伏応力度 σ_y の関係を示す。静的加力試験結果と(3.4.7)式を用いて求めたダンパーの降伏応力度 σ_y は、13.1~21.0N/mm² の範囲で示される。 σ_y の平均値 $\bar{\sigma}_y$ は、16.0N/mm² である。これより、(3.4.7)式より求められる PI_y はダンパーの形状によらず、静的加力時の降伏耐力を推定するのに有効であると判断した。この時、鉛の降伏応力度としては平均値 $\bar{\sigma}_y=16.0\text{N/mm}^2$ を使うこととする。また、(3.4.7)式より、ダンパーの降伏耐力は直径 D の 3 乗に比例し、可撓部の高さ H に反比例することが分かる。

静的加力試験の場合と同様に(3.4.7)式を用いて動的加力試験における降伏応力度 σ_y の範囲を算出すると、 $\sigma_y=21.0\sim30.2\text{N/mm}^2$ となる。この時の平均値は、22.7N/mm² である。動的加振時の降伏耐力は、静的加振時の降伏耐力の約 1.3~1.9 倍となっている。従って、動的加振時の降伏耐力は静的加振時の推定式(3.4.7)式を拡張して、次式のように示すことができる。

$$P'_y = \frac{\alpha \cdot 2 \cdot Z_p \bar{\sigma}_y}{H} \quad (3.4.8)$$

ここで、 $\bar{\sigma}_y$: 静的加振時における平均降伏耐力、 α : 静的加力における降伏耐力の割増し係数($\alpha=1.3\sim1.9$)である。加振振動数、加振振幅が大きい場合には、 $\alpha=1.9$ の値を用いることができる。

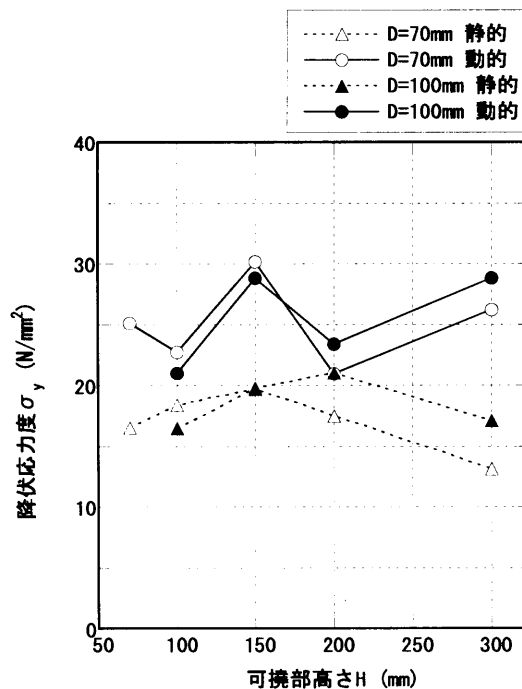


図 3.4.18 I 型鉛ダンパーの可撓部高さ H と(3.4.7)式より導いた降伏応力度 σ_y

b) U型試験体

図 3.4.19 に、U型試験体の直径 D と耐力 P_c の関係対数グラフで示す。図中の実線は U100 型試験体の P_c を基準としておのおのの P_c を直径の比の 3 乗倍した値を示している。P 方向、O 方向共に同じ傾向を示し、耐力 P_c は直径の比の 3 乗にほぼ比例する結果となった。

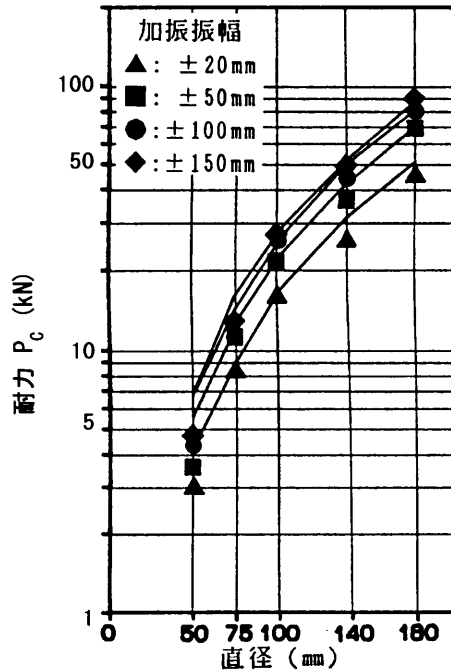


図 3.4.19 U型鉛ダンパーの直径と P_c の関係 (P 方向)

※実線は、U100 鉛ダンパーの P_c を基準として
各々の P_c を直径の比の 3 乗倍した値

図 3.4.20 には、U 型試験体の部材剛度と耐力 P_c の関係を、両対数グラフで示す。ここで、 I は試験体可撓部の断面 2 次モーメントを示す。U 型試験体の耐力 P_c も部材剛度 I/H と直線関係にある。

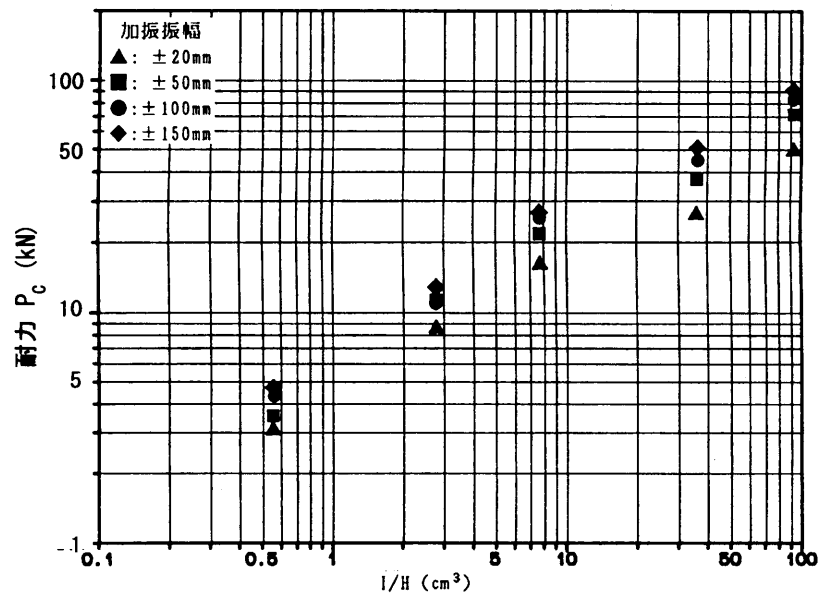


図 3.4.20 U 型鉛ダンパーの I/H と P_c の関係 (P 方向)

図 3.4.21 は、直径 D を 75mm, 100mm, 140mm, 180mm と変化させた場合の降伏耐力 P_c を示したものである。可撓部高さはいずれも 560mm である。図中には、(3.4.8)式による降伏耐力の推定式を割り増し係数 α の値を変化させて併せて示す。鉛の降伏応力度は、前述した I 型試験体の静的試験の平均値 $\bar{\sigma}_y = 16.0\text{N/mm}^2$ を用いて算出した。推定値と実験値は良い対応を示しており、静的加力試験結果を評価した(3.4.8)式は U 型試験体にも適用可能であると考えられる。

次に、動的試験結果から降伏耐力を推定してみる。ここで用いる降伏耐力は、履歴面積を加振振幅の 4 倍で除して算出した平均的な降伏耐力である。履歴面積の算出には、各々 3 サイクル

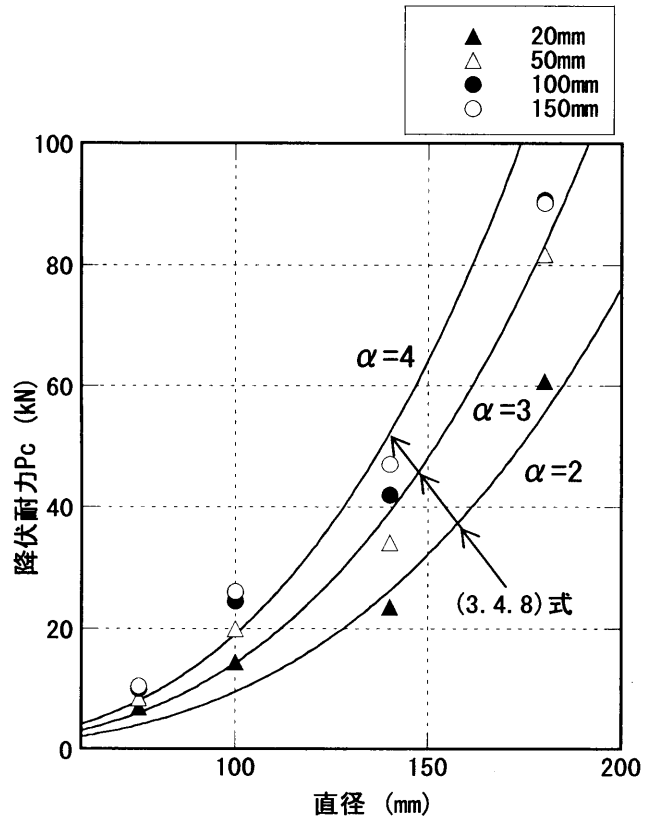


図 3.4.21 U 型鉛ダンパーの降伏耐力 P_c と直径の関係

以上加振しているうちの、水平変位が2回目に正側の最大値を示す時点から1サイクル分の履歴を用いる。

図3.4.22には、降伏耐力と加振振幅の関係と、図中の試験結果より求めた回帰曲線を示す。図中のプロット点は、加振振幅150mm以下の正弦波加振によって得られた実験値を示す。U140とU180鉛ダンパーでは、それ以外の試験体に比べ、より広い周波数領域に対する復元力特性を、特に加振振幅50mmに対して実施している。このため、降伏耐力の変化が他の振幅に比べて大きく見える。

図3.4.23に加振振幅50mmの場合の加振振動数と降伏耐力の関係を示す。W.H. Robinson他は、文献11)において、地震動を対象としたようなひずみ速度の範囲では鉛材料に対するひずみ速度の影響は少ないとしている。U型試験体を用いた動的試験では、0.02Hz~1.0Hzの範囲で正弦波加振を実施している。この範囲では、ひずみ速度の影響は小さいと判断されるが、0.1Hz以下(10sec以上)の範囲では、ひずみ速度が大きくなるほど耐力は大きくなる傾向が若干見られ、ひずみ速度依存性が確認できる。0.1Hz以上(10sec以下)の範囲では、復元力特性はほぼ同じ傾向を示し、ひずみ速度依存性が小さい。

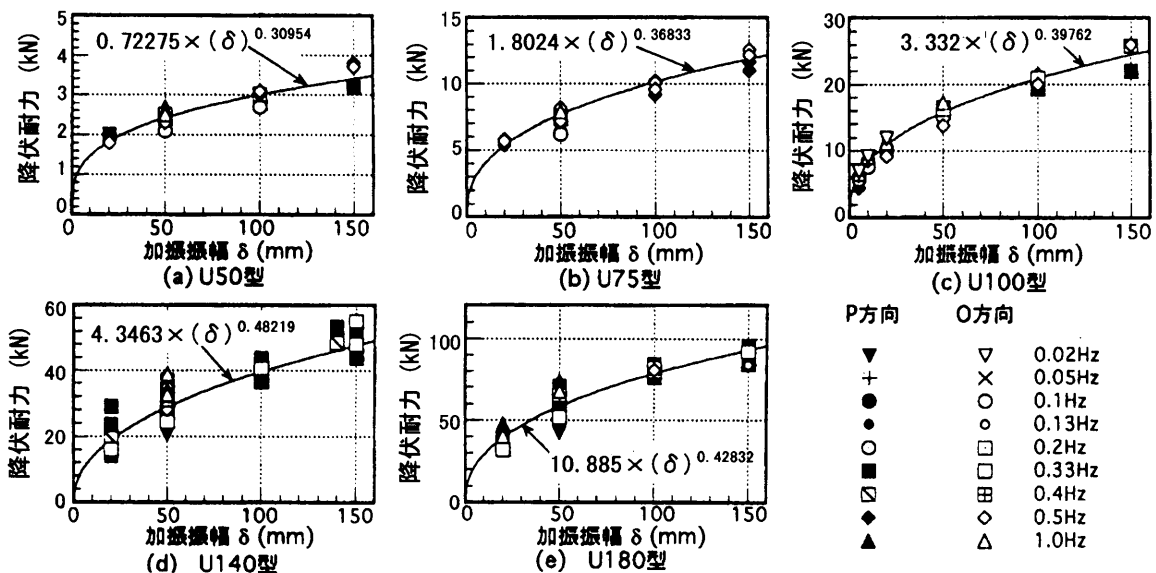


図 3.4.22 加振振幅と降伏耐力の関係

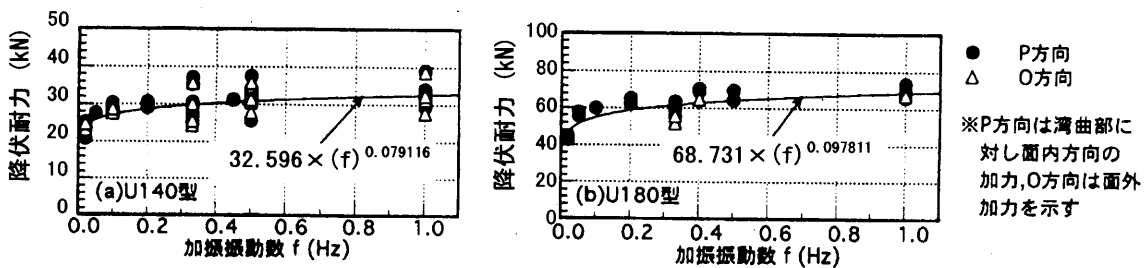


図 3.4.23 加振振幅±50mmにおける加振振動数と降伏耐力の関係

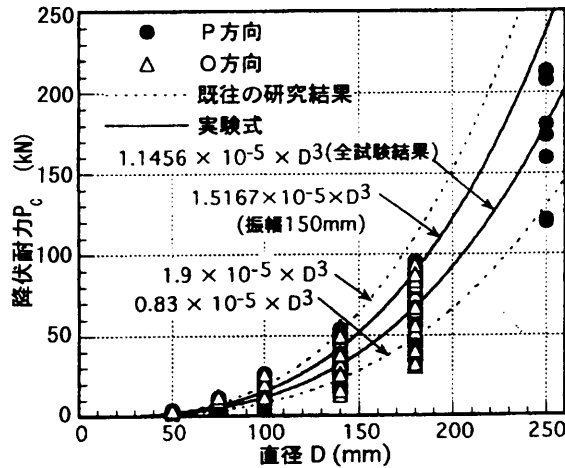


図 3.4.24 U 型鉛ダンパーの可撓部直径と降伏耐力の関係

図 3.4.24 には、降伏耐力 P_c と U 型鉛ダンパーの直径の関係を示す。図中には加振振動数・加振振幅に関わりなく全ての試験結果をプロットしている。予備的に試験を行なった U250 型試験体の動的試験結果⁷⁾も示し、全ての試験結果を用いて求めた回帰曲線を実線で、U140 型までのデータを用いた既往の研究⁸⁾による回帰曲線を破線で示す。加振振幅 150mm の場合が降伏耐力の上限を示すため、振幅 150mm の降伏耐力から求めた回帰曲線も図中に示す。同図より、直径が大きくなるにつれて、参考文献 8) に示した回帰曲線よりも、やや降伏耐力が低めとなる傾向は見られるものの、直径の 3 乗にほぼ比例することがわかる。

ここで、鉛ダンパーの降伏耐力について、湾曲している軸部を可撓部高さと同じ長さの円柱と仮定して(3.4.7)式を適用する。せん断変形させた場合、U 型鉛ダンパーは I 型鉛ダンパーと同様に、まず可撓部の上下端部に変形が集中する部分が現れる。両端固定の単純ばりの、ちょうど両端にヒンジが発生したような形でせん断変形してゆく。(図 3.4.6-図 3.4.7) U 型鉛ダンパーの場合、可撓部中央の湾曲した部分はせん断変形が大きくなってきたときに初めて変形を始める。このことによって、軸力の影響を抑えることができる。このような変形状態より、U 型鉛ダンパーの復元力特性は I 型鉛ダンパーの評価方法に従うことができると考えた。このため、I 型鉛ダンパーの降伏耐力を評価した(3.4.7)式を適用し、U 型鉛ダンパーの可撓部高さ H を I 型の可撓部高さ H と対応させて評価する。

(3.4.7)式より、鉛ダンパーの降伏耐力は可撓部直径の 3 乗にほぼ比例し、可撓部高さに反比例することが分かる。鉛ダンパーの降伏耐力を変化させるためには、直径 D と高さ H を変化させることで実現できる。降伏応力度は材料によってほぼ決定される値である。従って、降伏耐力を高くするためには、鉛ダンパーの可撓部直径 D のみを大きくするのが効果的である。また、bi-linear 型の復元力特性を損なわずに変形能力を増大させるためには可撓部の長さ L を大きくする方法が有効である。可撓部の直径 D と高さ H を相似的に拡大させて、実質的に長さ L を拡大させれば、降伏耐力と変形能力を同時に増加させる事が可能である事が分かる。

1/4 縮小試験体を用いて、可撓部直径 D と可撓部高さ H 、U 字形に湾曲している可撓部に沿った長さ L を変化させ、形状が耐力や変形能力に与える影響を検討している¹²⁾。試験体の概

要を表 3.4.1 に示す。(3.4.7)式を用いて算出した 1/4 縮小試験体の降伏応力度 σ_y と部材角 δ/H の関係を図 3.4.25(a)に示す。降伏応力度は試験体の種類に関係なく、部材角 δ/H に伴って変化している。部材角 δ/H が 0.27 より小さい場合には部材角の増加に伴って、降伏応力度が増大している。部材角 $\delta/H=0.27$ を越えると、降伏応力度がほぼ一定の値を示している。部材角 $\delta/H \geq 0.27$ の範囲の降伏応力度の平均 $\bar{\sigma}_y$ は、 27.8N/mm^2 である。

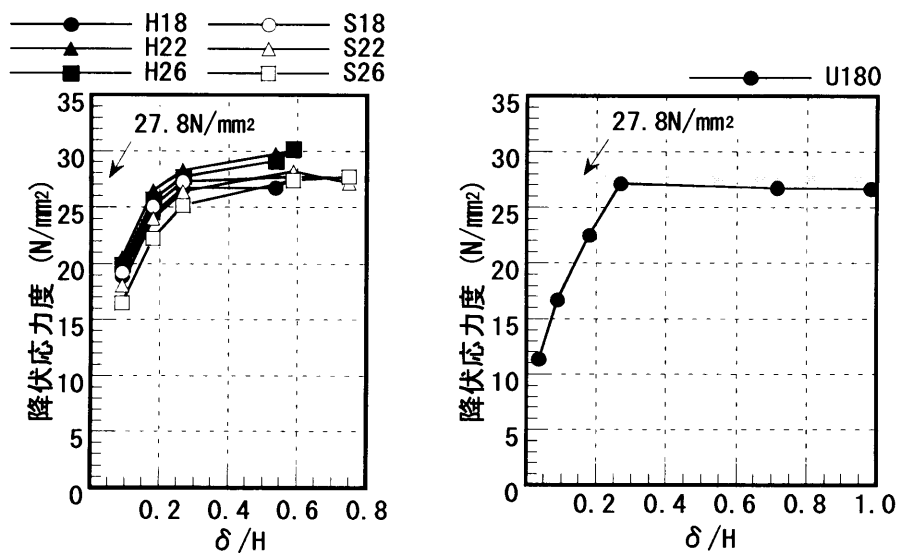
(3.4.7)式に基づいて算出した実大 U180 鉛ダンパーの降伏応力度と部材角 δ/H の関係を図 3.4.25 (b)に示す。1/4 縮小試験体の結果と同様に、降伏応力度は部材角 δ/H に伴って変化している。図中には 1/4 縮小試験体の実験結果から得られた降伏応力度の平均値 $\bar{\sigma}_y=27.8\text{N/mm}^2$ の値も示す。実大試験体の降伏応力度と $\bar{\sigma}_y$ は $\delta/H \geq 0.27$ の範囲でほぼ一致している。

図 3.4.26 に(3.4.7)式より求めた降伏耐力と、実大 U 型鉛ダンパーの降伏耐力 $P_c^{16)}$ の比較を示す。(3.4.7)式は、実験結果と良く対応している。ダンパーの降伏耐力をモデル化するには、可撓部長さと高さの比 $L/H=1.18\sim 1.4$ の範囲であれば、降伏応力度の平均値 $\bar{\sigma}_y=27.8\text{N/mm}^2$ と(3.4.7)式を用いて推定することができる。と考える。

表 3.4.1 試験体概要

試験体	直径 D(mm)	可撓部高さ H(mm)	可撓部長さ L(mm)	L/H
H18	45(180)	140(560)	165(660)	1.18
H22	55(220)		182(728)	1.3
H26	65(260)		196(784)	1.4
S18	45(180)	140(560)	196(784)	1.4
S22	55(220)	170(680)	221(884)	1.3
S26	65(260)	200(800)	248(992)	1.24

※()内は実大レベルの寸法換算値を示す



(a) 1/4 縮小試験体 (b) 実大試験体

図 3.4.25 鉛ダンパーの降伏応力度と部材角の関係

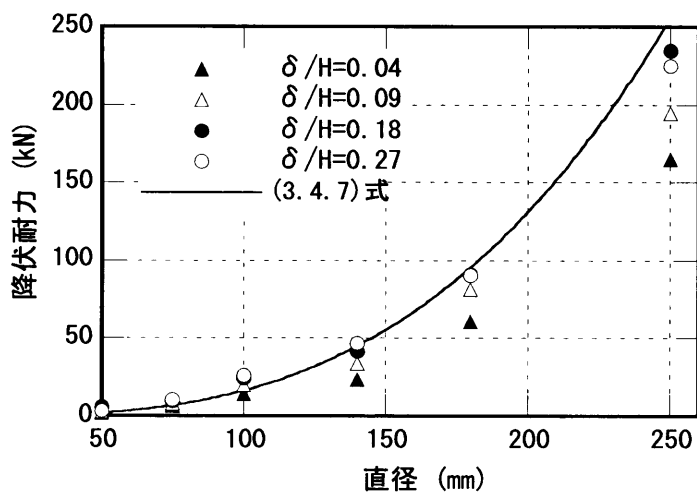


図 3.4.26 U型鉛ダンパーの直径と降伏耐力

3.4.4 弾性剛性

鉛ダンパーの初期剛性(弾性剛性) KI_1 および K_1 は剛な値を示し、履歴の初期剛性から算出するのは困難である。そのため、復元力特性の戻り勾配より算出する方法を採用する。表 3.4.2 に動的試験結果より算出した鉛ダンパーの諸定数を示す。鉛ダンパーのせん断弾性係数は次式で示すことができる。

$$G = \frac{K_1 \cdot H}{A} \quad (3.4.9)$$

ここで、 A : 可撓部断面積 (mm^2)、 G : せん断弾性係数 (N/mm^2)、 H : 可撓部高さ (mm)

a) I 型試験体

実験値をもとに、(3.4.9)式より求めた I 型鉛ダンパーのせん断弾性係数 G は、 $G=688 \sim 1221 N/mm^2$ の範囲となった。平均値 $\bar{G}=889 N/mm^2$ である。降伏変位を可撓部の高さ H を用いて示した場合、 $0.0038H \sim 0.127H$ の範囲となった。

b) U 型試験体

U180 鉛ダンパーの試験結果をもとに、(3.4.9)式より求めた U 型鉛ダンパーのせん断弾性係数 G は、 $G=330 \sim 453 N/mm^2$ の範囲となった。平均値 $\bar{G}=376 N/mm^2$ である。降伏変位を可撓部の高さ H を用いて示した場合、平均値は $0.0096H(0.96\%)$ であった。前述第 2 章 2.4.2 c) に示した、せん断方向の部材試験から得られたせん断降伏ひずみとほぼ同じ値を示している。微小変位の範囲では曲げの影響が少なく、純せん断の試験結果と同等の性質を示すものと考えられる。

表 3.4.2 動的試験結果より算出した鉛ダンパーの諸定数

試験体		KI_1 (N/mm)	KI_2 (N/mm)	KI_3 (N/mm)	降伏耐力 P_y (kN)	降伏変位 δ_y (mm)	δ_y/H
I 型 (D/H)	70/100	35.5	0.135	-0.056	28.7	0.81	0.00810
	70/150	28.5	0.141	-0.096	23.2	0.81	0.00540
	70/200	23.5	0.159	-0.093	17.1	0.73	0.00375
	100/100	54.1	0.230	-0.063	68.5	1.27	0.0127
	100/150	36.9	0.205	-0.056	58.5	1.59	0.0106
	100/200	27.0	0.194	-0.089	48.6	1.80	0.0090
U 型 (U180)		K_1	K_2	—	P_y	δ_y	δ_y/H
		17.1	0.037	—	91.6	5.36	0.0096

※ H :可撓部高さ(mm)

3.4.5 塑性域の剛性

鉛ダンパーの第2剛性 KI_2 および K_2 は、その大部分が軸方向変形によるものと考えられる。従って、ダンパーの軸方向剛性が復元力特性の勾配 K_2 に等しいと考えれば、(3.4.9)式と同様に

$$K_2 = \frac{E_p A}{H} \quad (3.4.10)$$

と示すことができる。ここで A : 可撓部断面積(mm^2)、 E_p : 軸方向変形時の弾性係数(N/mm^2)である。

a) I型試験体

$H = 300\text{mm}$ とし、 D を変化させた供試体の動的加力実験結果から得られた第2剛性 K_2 を(3.4.10)式に代入して算出した E_p は、 $E_p = 11.7 \sim 15.3 \text{ N/mm}^2$ の範囲となった。平均値は $\bar{E}_p = 13.2 \text{ N/mm}^2$ となる。I型鉛ダンパーの平均値に対する E_p のバラツキは、 $\pm 15\%$ と狭い範囲に集中しており、(3.4.10)式を用いて第2剛性を推定することができる。同実験結果より KI_3/KI_2 は、 $0.3 \sim 0.5$ 程度の値を示した。

b) U型試験体

I型鉛ダンパーと同様に、U型鉛ダンパーの軸方向変形時の弾性係数 E_p を、(3.4.10)式に基づいて示す。U180鉛ダンパーの動的加力実験結果から得られた第2剛性 K_2 を用いて算出した E_p は、 $E_p = 0.53 \sim 1.06 \text{ N/mm}^2$ の範囲となり、平均値は $\bar{E}_p = 0.822 \text{ N/mm}^2$ となった。

3.4.6 最大変形能力

a) I型試験体

I型鉛ダンパーの復元力特性は、変形が大きくなるに従い、せん断力が大きくなる蝶型を示す。そこで、種々の直径 D 、高さ H の組合せに対して実施された静的試験の結果を用いて、鉛ダンパーの最大変形能力は最大耐力 P_D に達したときの変位を限界変位と仮定する。最大耐力 P_D と限界変位の関係を表 3.4.3 に示す。可撓部の直径 D が大きくて高さ H が小さいものほど最大耐力 P_D が大きくなる傾向があり、限界変位は $0.7H \sim 0.9H$ の範囲内に収まる結果となった。

b) U型試験体

U型試験体は、部材角 δ/H が $0.25 \sim 0.3$ を越えるような変形を与えられた場合、I型試験体と同様に、蝶型の復元力特性を示す。I型と同様に、最大変形能力は最大耐力 P_D に達したときの変位を限界変位と仮定する。

図 3.4.27 に U180 鉛ダンパーの静的及び動的の大変形試験結果を部材角 δ/H と応力度 σ で示す。応力度は前述(3.4.7)式を用いて算出したものである。応力度は動的試験の結果の方が、静的試験の結果より大きな値を示している。これは、耐力のひずみ速度依存性の影響が表れる範囲で比較したためである。復元力特性の形状はほぼ同じ形を示している。

U型試験体は、部材角 δ/H が、 $0.27 \sim 0.3$ を越えるような変形を与えた場合には、その復元力特性はハードニングを示し始める。最大変形能力は、限界変位と破断変位で定義する。最大応力度(最大耐力)に達したときの変位を限界変位とする。静的に加振した場合の試験結果から、限界変位は部材角 $\delta/H = 1.16 \sim 1.25$ の範囲であった。このときの試験体可撓部の伸びは 30%程度と推定でき、一軸引張の材料試験結果における破断時の伸び量とほぼ対応する結果が得られた。

動的に加振した場合は、速度依存性の影響で応力度の大きさに違いが現れる。しかし、限界変位に与える影響は小さいと判断されるため、限界変位は静的試験の結果を参考に決定する。静的試験から得られた限界変位は部材角 $\delta/H = 1.16 \sim 1.25$ であることから、 $\delta/L = 1$ (L : 可撓部長さ)となる部材角 $\delta/H = 1.18$ を限界変位と定義する。U180 鉛ダンパーであれば、約 660mm 程度が限界変位となる。

破断変位は正確には確認できていないが、大変形試験時における U180 鉛ダンパーの復元力特性と目視による観察(第 3 章 写真 3.4.1)により、部材角 $\delta/H = 1.42$ 程度であろうと判断している。

表 3.4.3 静的加振試験における耐力 P_D と限界変位の関係

試験体		耐力 P_D (kN)	限界変位 δ_{cr} (mm)	部材角 δ_{cr}/H
I 型 (D/H)	70/70	31.5	60	0.86
	70/100	29.5	90	0.90
	70/150	29.5	120	0.80
	70/200	28.0	160	0.80
	100/100	70.0	90	0.90
	100/150	65.0	135	0.90
	100/200	66.0	180	0.90
	100/300	57.0	210	0.70

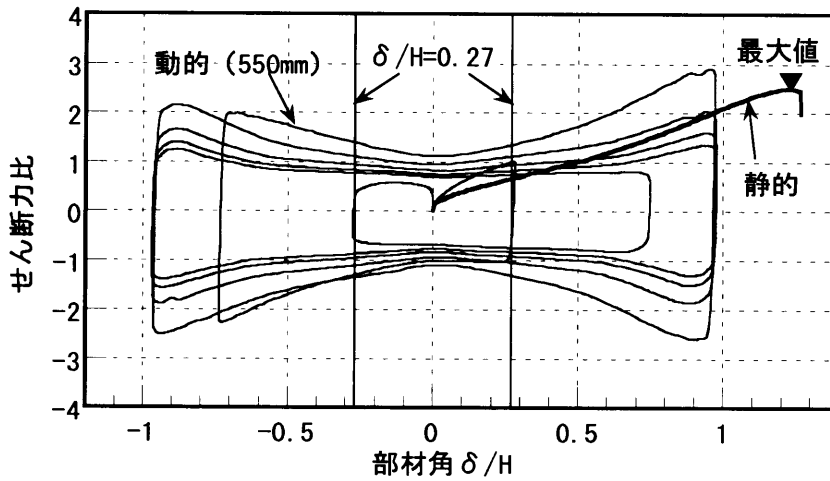


図 3.4.27 静的試験・動的試験の復元力特性の比較(U180)

3.4.7 鉛ダンパーの累積エネルギー吸収能力

鉛ダンパーは、鉛の融点が低いために、通常の使用温度では復元、再結晶、組織形成を起し、疲労を蓄積させることはない。しかし、地震の際に履歴吸収されたエネルギーは即座に熱に変換される。温度の上昇により鉛の機械的性質は変化する。このため、連続した加振が行われた際の復元力特性の変化や、累積エネルギー吸収能力を把握しておく必要がある。連続加振に対する評価は、定常波加振の繰り返し実験結果を用いて行う。

図 3.4.28 に U180 鉛ダンパーの繰り返し加振を行なった場合の復元力特性を示す。P 方向加力 0.33Hz±150mm 150 サイクルの結果である。加振を繰り返す毎に耐力が低下している。

図 3.4.29 に U180 鉛ダンパーの累積ひずみエネルギーとサイクル数の関係を示す。0.33Hz ±150mm を 150 サイクル加振したものである。実験結果より得られる履歴面積をひずみエネルギーとして評価している。鉛ダンパーはサイクル数の増加に伴って、安定したエネルギー吸収性状を示している。20 サイクルを超えたあたりから、O 方向の方がエネルギー吸収量は小さな値を示している。これは、O 方向は面外方向へ捻れるように変形するため、P 方向に比べると 20 サイクル以上の繰り返しにおいて耐力の低下が顕著になってくるためである。

図 3.4.30 に降伏耐力比とサイクル数の関係を示す。降伏耐力は 3 サイクル目の耐力(基準降伏耐力)で基準化した。定振幅加力の耐力は初期の段階で最大値を示し、その後加振を繰り返す毎に徐々に低下しているのが分る。150 サイクルの繰り返し加振に対しても、鉛は完全に破断には至っていない。ここでは、完全に破断に至らなかった場合でも基準降伏耐力の 1/2 に達した時点を破断と仮定する。降伏耐力が基準降伏耐力の 1/2 となった場合、繰り返し加振試験後の計測により、ひずみの集中する部分の表面温度が 100℃近くまで上昇していることを確認している。ひずみが集中する部分の内部中心温度を推定した場合、200℃以上に上昇していることが見込まれる¹⁷⁾¹⁸⁾ため基準降伏耐力の 1/2 で破断に至ったと定義する。

a) 部材角と破断までの繰り返し回数

鉛ダンパーが破壊に至るまでに耐える繰り返し回数は、鋼製履歴ダンパーと同様に、応力度が増大するに従い低下する。こうした結果は、繰り返し応力振幅と破壊繰り返し回数の関係をプロットした S-N 曲線として一般に表現されている。

図 3.4.31 に、U 型鉛ダンパーの破断(実験終了時)までの繰り返し回数と部材角 δ/H の関係を示す。図中には、実験結果より得られる回帰曲線もあわせて示す。地震時において、ダンパーに要求されるエネルギー吸収能力は、累積ひずみエネルギー W_p として示すことができ、ダンパーの弾性挙動を無視すると次式で表すことができる¹³⁾。

$$W_p \geq 8 \cdot Q_y \delta_{\max} \quad (3.4.11)$$

ここで、 Q_y : ダンパーの降伏耐力、 δ_{\max} : ダンパーの最大変形

(3.4.11)式は、ダンパーに要求される吸収エネルギーが地震時の最大変形を振幅とする閉ループの 2 サイクル分以上であることを示している。

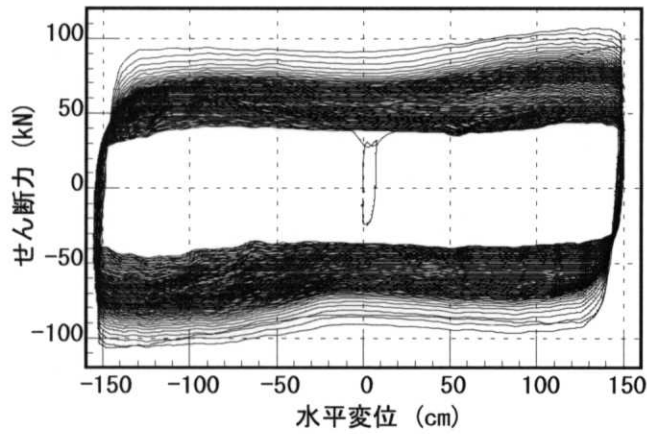


図 3.4.28 繰り返し加力試験 (U180 P方向 0.33Hz 150mm)

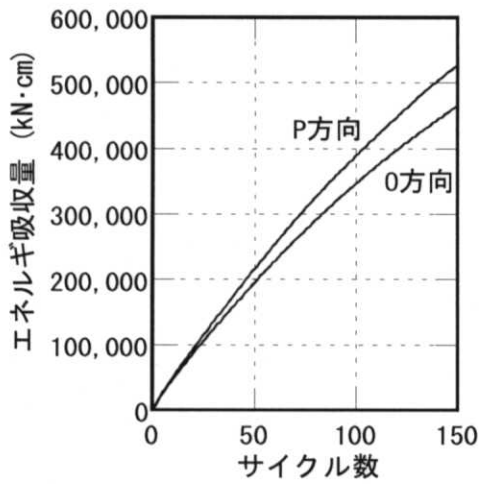


図 3.4.29 サイクル数とエネルギー吸収量

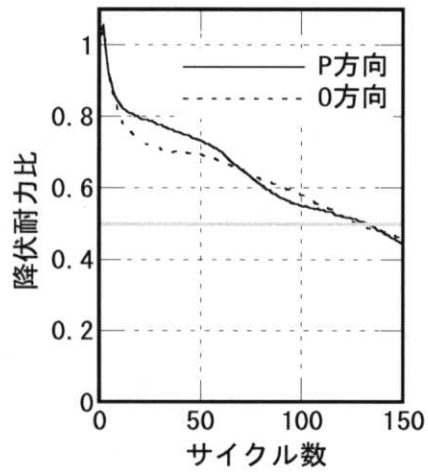


図 3.4.30 サイクル数と降伏耐力比

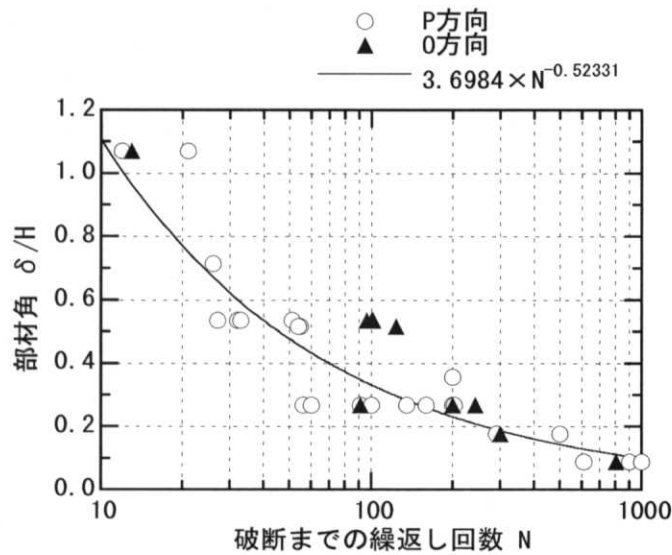


図 3.4.31 部材角と破断までの繰り返し回数の関係

図 3.4.31 に示される結果より、部材角 δ/H の加振レベルに対してダンパーは N_x 回の繰り返し能力を持つとする。 m 回の繰り返しを与えることによりダンパーのエネルギー吸収能力の m/N_x を消費すると仮定する。 U180 鉛ダンパーにおいて、加振振幅 $\delta=560\text{mm}$ にあたる $\delta/H=1$ の場合で、12 サイクル程度の繰り返しに耐えることが期待できる。 $\delta/H=1$ の振幅レベルが 1 回、 $\delta/H=0.6$ が 2 回、 $\delta/H=0.27$ が 3 回、 $\delta/H=0.1$ が 10 回含まれるような地震波を鉛ダンパーが経験したとする。 $1/12+2/32+3/148+10/991=0.18$ を消費することになり、このような地震波であれば 5 回程度の繰り返しに耐えられることとなる。

b) 累積塑性変形能力

地震による総エネルギー入力是最終的には全てダンパーで吸収されなければならない。総エネルギー入力量 E は等価速度 V_E を用いて次式により表される。

$$E = \frac{MV_E^2}{2} \quad (3.4.12)$$

ここで、 M : 総質量

V_E : エネルギー入力の等価速度

一方、ダンパーの吸収エネルギー W_p は、次式で与えられる。

$$W_p = \alpha_S Mg \delta_p \quad (3.4.13)$$

ここで、 α_S : ダンパーの降伏せん断力係数

δ_p : 累積塑性変形量, g : 重力加速度

ここで、エネルギーの釣り合い条件 $E = W_p$ より、累積塑性変形量と入力エネルギーの関係が、次の様に求められる。

$$\delta_p = \frac{0.5V_E^2}{\alpha_S g} \quad (3.4.14)$$

上式に、標準的な数値として、 $V_E=150\text{cm/sec}$ 、 $\alpha_S=0.03$ を代入して計算すると、 δ_p は約 4000mm となる。ここで得られた δ_p が、最大変形 δ_{\max} の 2 サイクル分と仮定した場合、 $\delta_{\max}=500\text{mm}$ となる。図 3.4.31 より、U180 鉛ダンパーにおいて期待される破断までの繰り返し回数は 15 サイクル(累積塑性変形量 $\delta_p=30000\text{mm}$)となり、7 倍以上の塑性変形能力を有していることが分かる。

c) 累積エネルギー吸収能力

図 3.4.32 には、全吸収エネルギー量(履歴面積の総和)を繰り返し回数で除して求めた平均値と繰り返し回数の関係を示す。繰り返し回数と吸収エネルギーの平均値を乗じることで、破断までに吸収する総エネルギー入力量を得ることができる。ここで、繰り返し回数が 20 回の時、吸収エネルギーの平均値は約 137,000kN・mm で、全吸収エネルギー量は 2,740,000kN・mm となる。

一方、ダンパー1体が吸収しなければならないエネルギー量 W_{p1} は、ダンパー1体当たりの負担重量を m として、次式で求められる。

$$W_{p1} = \frac{mV_E^2}{2} \quad (3.4.15)$$

$$\text{ここで、} m = \frac{Q_y}{\alpha_s g}$$

Q_y :ダンパーの降伏耐力

Q_y は繰り返しによる耐力低下を考慮して 80kN、 $\alpha_s = 0.03$ 、 $V_E = 150\text{cm/s}$ とすれば、 $W_{p1} = 306,100\text{kN}\cdot\text{mm}$ となる。この値は、2,740,000kN・mm の約 1/8 以下であり、 $V_E = 150\text{cm/s}$ 相当の地震入力の 8 回以上のエネルギー吸収能力があると言える。

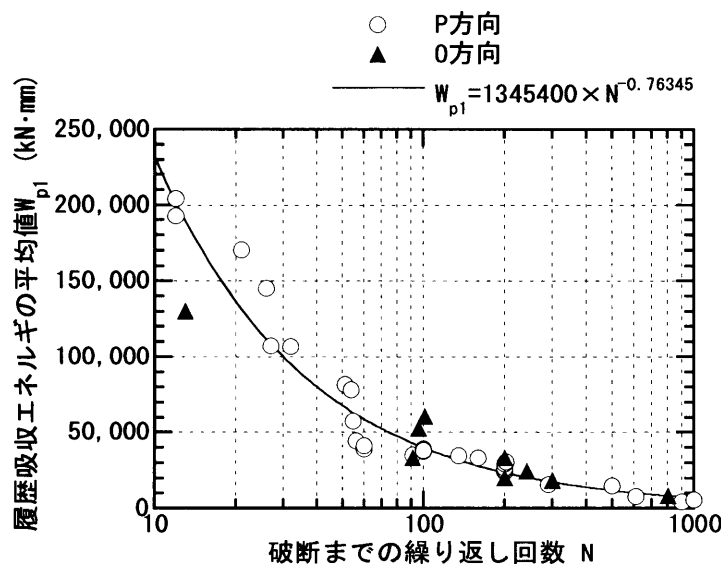


図 3.4.32 履歴吸収エネルギー1サイクルの平均値と繰り返し回数の関係

3.4.8 繰り返しによる温度の変化と復元力特性の温度依存性について

鉛の素材として、温度が変化すれば機械的性質が変わることを第2章で示した。同じく鉛ダンパーでもその傾向を把握するための実験を行った。温度変化が特に懸念されるのは、①繰り返し加振を受けたときの温度上昇による機械的性質の変化、及び、②寒冷地における低温下と温暖な地域における高温下での降伏耐力の違いである。①の温度上昇による機械的性質の変化に関する確認試験は、高層ビルへの適用や、現在注目を集めている長周期地震動の影響などをあわせて考えると、何らかの条件で長時間振動が継続する可能性もあると考えられ、検証は必要である。3.4.7項において通常では発生しないであろうと考えられるまでの繰り返しを実施し、限界性能を確認したことを示した。(図3.4.29-図3.4.30)

また、I型試験体を用いて、ヤング率の変化を把握した。また、降伏耐力の温度依存性の把握は、設計の際に考慮しておくべき項目であるため、実際の建物に使用されているU型鉛ダンパーについて低温から夏場の温度範囲を対象に検討を行った。

図3.4.33にI型試験体(D/H=100/100、100/150、100/200)の表面温度と繰り返し回数の関係を示す。また、同図中には表面温度の上昇から推定したヤング率の低下についても示す。同図より、繰り返し回数の増大に伴い、表面温度も上昇しているが、最高でも70℃程度である。この表面温度の上昇から推定されるヤング率の低下は4%程度である。しかし、破壊時の状態や実験後に観察した破断面の酸化膜の発色状況から、試験体の内部は鉛の融点327℃に達していたと判断している。

②の降伏耐力の違いについては、低温から常温における試験を実施して確認を行った。-10℃の低温下におけるU型鉛ダンパーを振幅±150mmの動的繰り返し加振を行なった場合、5サイクル毎に約10℃づつ温度が上昇することを確認した⁹⁾。また、U180鉛ダンパーの1/4縮小試験体を用いた低温下(-40℃～常温28℃)での加振試験¹⁰⁾からは、振幅±37.5mm(実大レベル150mm)、振動数0.33Hzの降伏荷重の試験結果に基づいて(3.4.16)式のような回帰式を提案する。ただし、温度が20℃の時の値で基準化している。

$$\text{耐力比} = -0.0040259 \times (\text{温度}) + 1.0805 \quad (20^\circ\text{C基準}) \quad (3.4.16)$$

文献4)に示された材料の温度依存性を、表3.4.4⁴⁾に示す。このデータは鉛材の引張強さであるが、鉛ダンパーの降伏荷重に直接関連するものと考えられる。(3.4.16)式と比較を行なった結果を図3.4.34に示す。300℃までの回帰式の予測精度は低くなると考えるが、(3.4.16)式は高温側の傾向とほぼ同じ傾向を示している。

また、U180鉛ダンパーの加振試験(±50mm、0.33Hz、5サイクル)から得た降伏耐力と気温の関係を図3.4.35に示す。図中には試験データを用いて作成した回帰式(破線)も示す。回帰式と(3.4.16)式(実線)の誤差は-20℃から40℃の範囲では2%程度である。よって、1/4縮小試験体の試験から得られた耐力比の回帰式((3.4.16)式)は、試験時の温度範囲を超えて40℃程度までは拡張して適用可能であると考えられる。

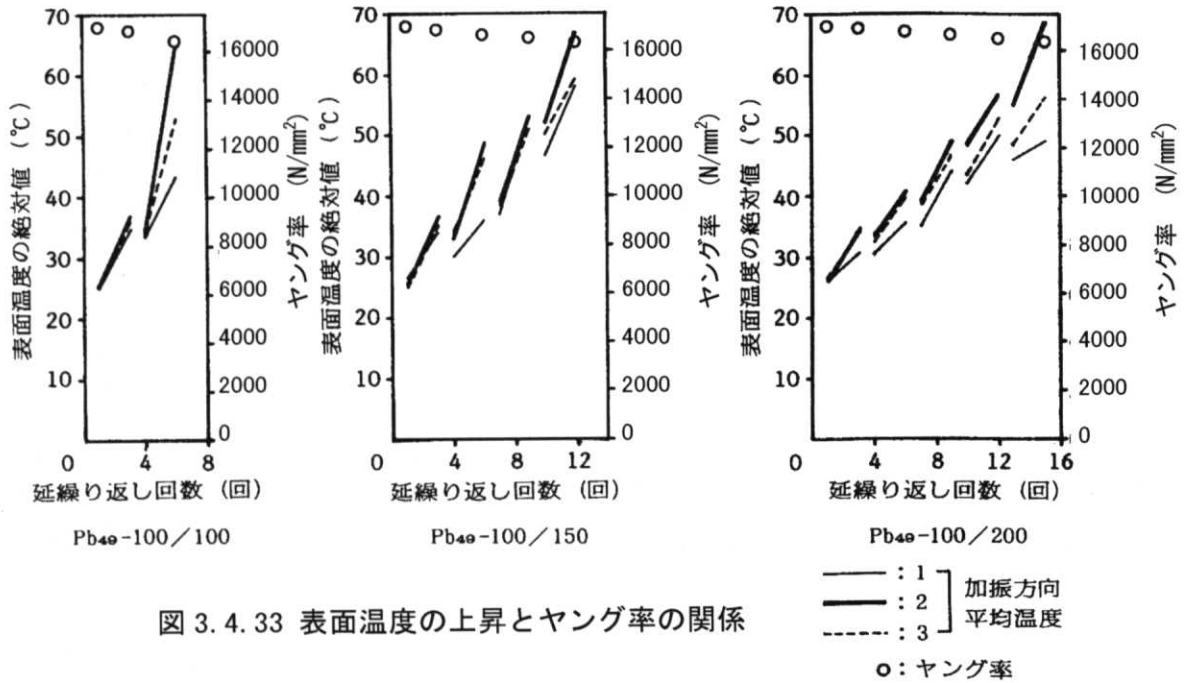


図 3.4.33 表面温度の上昇とヤング率の関係

表 3.4.4 鉛の機械的性質と温度⁴⁾

温度 (°C)	20	82	150	195	265
引張強さ (N/mm ²)	13.5	8	5	4	2
伸び (%)	31	24	33	20	20

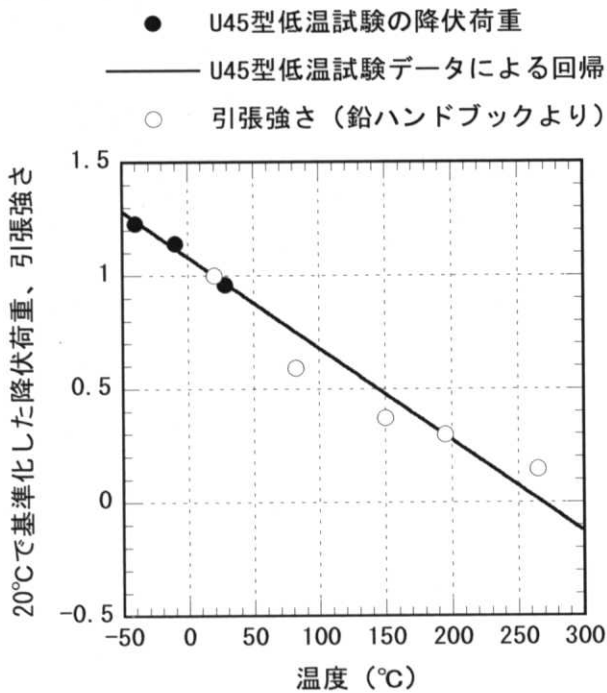


図 3.4.34 温度と耐力比の関係

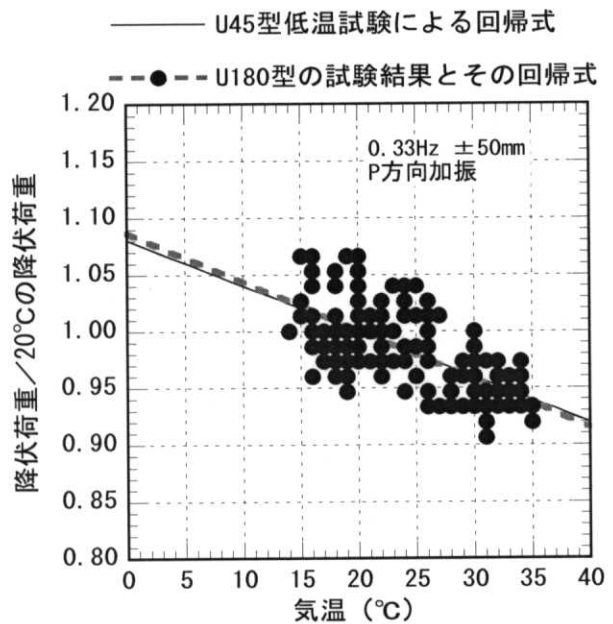


図 3.4.35 実大試験と縮小試験の比較

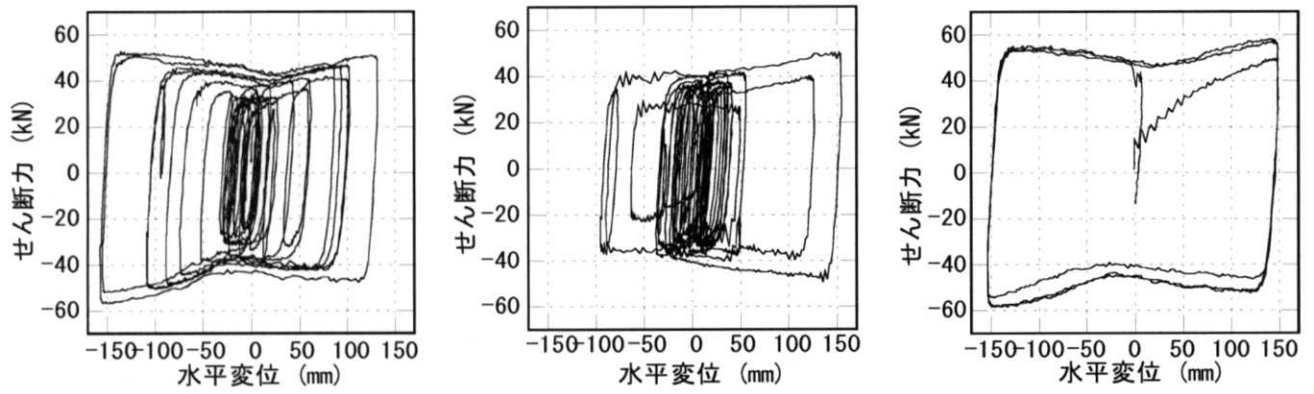
3.5 地震波入力時の試験結果と考察

「3.2.2 試験概要」で示した地震時応答特性を把握するための結果を本項に示す。図 3.5.1 は、応答解析から得られた免震構造の変位波形で、U140 型鉛ダンパーを加振した場合の復元力特性である。図 3.5.1 a) b) は、図 3.2.5～図 3.2.6 で示した解析応答波形を用いて加振を行った結果、図 3.5.1 c) は 0.33Hz ±150mm の定常波加振を行った結果である。いずれも加力方向は P 方向である。解析応答波形を用いて加振した場合の復元力特性の形状は、概ね定常波加振の復元力特性と同じ形状を示している。

比較のために各復元力特性の変位毎の荷重値を抜き出してみる。水平変位 20mm 毎の荷重値をプロットしたものが、図 3.5.2 である。解析応答波形入力と定常波の全体的な荷重のばらつきが示されている。横軸を部材角 δ/H で示す。図中には、履歴毎のデータに対して最小自乗法を用いて求めた回帰曲線も示す。

地震波と定常波の荷重は、いずれも部材角 δ/H と比例関係にあることがわかる。定常波加振の場合の方が、地震波加振よりも大きめの値を示す傾向が見られる。八戸波加振の結果は、定常波加振よりも 6%低い値を示し、El Centro 波加振の結果は 17%低い値を示している。しかし、加振の種類にかかわらず、部材角に対する荷重の変化は同様の傾向を示しており、その差は 20%以内に収まっている。

地震波は多くの周波数成分が複合されていると考えられる。鉛は、引張速度が大きくなると引張強さが増加する傾向がある。地震波加振と定常波加振の荷重分布をみるとバラツキの範囲がほとんど同じであり、地震波と定常波では変位に対して周波数や地震の種類に関係なく荷重値がほぼ同じ値をとると判断した。従って、定常波加振より得られた復元力特性に基づいて、地震時の復元力特性をほぼ推定できると考え、本論では定常波加振の復元力特性から鉛ダンパーの復元力特性を定義することにした。



a) 解析応答波形(八戸) b) 解析応答波形(El Centro) c) 定常波加振(0.33Hz 150mm)

図 3.5.1 U140 鉛ダンパーの復元力特性(P 方向加振)

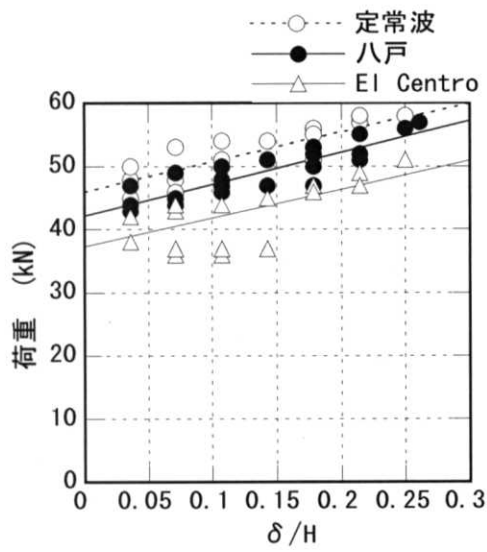


図 3.5.2 部材角 δ/H と荷重の関係

3.6 まとめ

本章では、鉛ダンパーが対地震用ダンパーとして要求される性能を保有していることを確認するための試験を実施し、その結果をまとめた。また、鉛ダンパーの基本的な復元力特性について述べた。以下に得られた知見を示す。

1. I型鉛ダンパーの履歴曲線を図 3.4.2 に、U型鉛ダンパーの履歴曲線を図 3.4.4 に簡略化して示した。I型試験体の復元力特性は、変形が大きくなるに従いせん断力が大きくなる蝶型を示す。U型試験体の復元力特性は、小変形領域と大変形領域とで分けて考えることができる。
2. I型鉛ダンパーの復元力特性はハードニングの影響を受けて蝶型の形状を示し、U型鉛ダンパーの復元力特性はほぼ剛塑性の形状を示す。この復元力特性の違いは、地震時におけるフロアレスポンスに大きく影響を与える。ダンパーの復元力特性は、アイソレータの剛性に影響を与えない形状が理想的であるため、剛塑性型を示すU型鉛ダンパーが免震構造用ダンパーとして最適であると考えられる。
3. 鉛ダンパーの降伏耐力 P_y の評価については、鉛材が既に塑性領域に入っているために、厳密には弾性理論は適用できない。しかし、試験結果を理解する上で有効であると考えられるため、弾性論に基づいて鉛ダンパーを両端固定の曲げ部材と考えて、次式により降伏耐力 P_y と降伏応力度 σ_y を対応づける。

$$P_y = \frac{2Z_p\sigma_y}{H}, \quad Z_p = \frac{D^3}{6} \quad (3.4.7)$$

ここで、 P_y : 降伏耐力(N), Z_p : 円形断面の塑性断面係数(mm³), σ_y : 降伏応力度(N/mm²), H : 可撓部高さ(mm), D : 可撓部直径(mm)である。ここで、ダンパーの降伏耐力は直径 D の3乗に比例し、可撓部の高さ H に反比例することが分かる。

4. I型鉛ダンパーの場合、静的加力試験より得られた降伏耐力 PI_y と(3.4.7)式を用いて求めたダンパーの降伏応力度 σ_y は、13.1~21.0N/mm² の範囲にあり、平均値 $\bar{\sigma}_y$ は16.0N/mm² となった。動的加振時の降伏耐力は、静的加振時の降伏耐力の約 1.3~1.9倍となっている。従って、動的加振時の降伏耐力は静的加振時の推定式(3.4.7)式を拡張して、次式のように示すことができる。

$$P'_y = \frac{\alpha \cdot 2 \cdot Z_p \bar{\sigma}_y}{H} \quad (3.4.8)$$

ここで、 $\bar{\sigma}_y$: 静的加振時における平均降伏耐力、 α : 静的加力における降伏耐力の割増し係数($\alpha=1.3\sim 1.9$)である。加振振動数、加振振幅が大きい場合には、 $\alpha=1.9$ の値を用いることができる。

5. U 型鉛ダンパーの場合、縮小試験体を用いた動的試験から得られた降伏応力度 σ_y は、 $\bar{\sigma}_y=27.8\text{N/mm}^2$ であった。可撓部長さと高さの比 $L/H=1.18\sim 1.4$ の範囲であれば、U 型鉛ダンパーについても、(3.4.7)式によって降伏耐力 P_y をほぼ推定することが可能であると言える。
6. 鉛ダンパーの最大変形能力は、可撓部の高さ H 及び可撓部の長さ L を用いて示すことができる。I 型試験体の場合、 $0.7H\sim 0.9H$ 、U 型試験体の場合、 $0.98L\sim 1.06L$ の範囲である。このときの試験体可撓部の伸びは 30%程度と推定され、一軸引張の材料試験結果とほぼ対応する結果が得られた。
7. U 型鉛ダンパーの変形能力は、最大耐力に達したときの変位を限界変位と仮定する。準静的に加振した場合の試験結果から、限界変位は可撓部高さ H を用いて示した場合、 $1.16H\sim 1.25H$ 、可撓部長さ L を用いて示した場合、 $0.98L\sim 1.06L$ の範囲であった。このときの試験体可撓部の伸びは 30%程度と推定され、一軸引張の材料試験結果とほぼ対応する結果を示している。
8. 実験より得られた U 型鉛ダンパーの破断までの繰返し回数と部材角 δ/H の関係を図 3.4.31 に示した。地震時において、ダンパーに要求されるエネルギー吸収能力は、累積ひずみエネルギー W_p として示すことができる。ダンパーに要求される吸収エネルギーは、地震時の最大変形を振幅とする閉ループの 2 サイクル分以上であることが、文献 13) で把握されている。この結果に基づいて検証を行えば、図 3.4.31 より示される破断までの繰返し回数は、2 サイクル以上を示しており、U 型鉛ダンパーが十分なエネルギー吸収能力を保持していることを示すことが分かる。
9. 温度が変化した場合、鉛の機械的性質も変わる。特に懸念されるのは、①繰返し加振を受けたときの温度上昇による機械的性質の変化、及び、②寒冷地における低温下と温暖な地域における高温下での降伏耐力の違いである。
①の温度上昇による機械的性質の変化に関する確認試験は、高層ビルへの適用や、現在注目を集めている長周期地震動の影響などをあわせて考えると、何らかの条件で長時間振動が継続する可能性もあるため検証は必要である。通常では発生しないであろうと考えられるまでの繰返しを実施し、限界性能に問題がないことを確認した。(図 3.4.29-図 3.4.30)
②の降伏耐力の違いについては、既往の研究結果と比較して $-40^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ の範囲であれば予測が可能であることを確認した。(図 3.4.34-図 3.4.35)
10. 鉛の素材として、温度が変化すれば機械的性質が変わる。温度の影響で降伏荷重の値がどの様に変化するかを縮小試験体を用いた実験より把握した。温度 20°C の時の値で

基準化すると(3.4.16)式で示すことができる。

$$\text{耐力比} = -0.0040259 \times (\text{温度}) + 1.0805 \quad (20^\circ\text{C基準}) \quad (3.4.16)$$

11. 地震波は多くの周波数成分が複合されていると考えられる。鉛は、引張速度が大きくなると引張強さが増加する傾向がある。図 3.5.2 に示した地震波加振と定常波加振の荷重分布をみるとバラツキの範囲がほとんど同じであり、地震波と定常波では変位に対して周波数や地震の種類に関係なくほぼ同じ値をとると判断した。従って、定常波加振より得られた復元力特性に基づいて、地震時の復元力特性をほぼ推定できると考える。

3.7 参考文献

- 1) 高山峯夫他：鉛ダンパーのエネルギー吸収能力に関する実大実験(その2)縮小鉛ダンパー試験の結果について，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，構造Ⅱ，1996年9月
- 2) 福岡大学高山研究室：U90型鉛ダンパー動的加振試験結果報告書，2001年6月
- 3) 柏木栄介他：U2426型鉛ダンパーの縮小モデルによる大変形性能試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，構造Ⅱ，2000年9月
- 4) 鉛ハンドブック 改訂版，日本鉛垂鉛需要研究会，1992年
- 5) 津田尚克：鉛の曲げ加工による結晶粒成長，日本金属学会誌，Vol.28，1964年6月
- 6) 岡本修司他：U180型鉛ダンパーの履歴特性に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2 構造Ⅱ，2000年9月
- 7) 森田慶子他：U250型鉛ダンパーの動的予備試験，福岡大学工学集報，第56号，1996年3月
- 8) 高山峯夫他：免震構造に関する実物実験(その20)，日本建築学会大会学術講演梗概集，B，構造Ⅰ，1989年10月
- 9) 高山峯夫、森田慶子他：U180型鉛ダンパーの低温下での動的加振試験，福岡大学総合研究所報，第218号，1998年12月
- 10) 宅野直毅、高山峯夫他：1/4縮小試験体を用いた鉛ダンパーの低温下動的加振試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，構造Ⅱ，1997年9月
- 11) R.I. Skinner, W.H. Robinson, G.H. McVerry：An Introduction to Seismic Isolation, John Wiley & Sons, 1993
- 12) 森田慶子他：鉛ダンパーの大型化に関する実験研究(その1)～(その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，構造Ⅱ，1999年9月
- 13) 秋山宏：エネルギーの釣り合いに基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，1999年
- 14) 森田慶子，高山峯夫他：免震構造用鉛ダンパーの大型化に関する実験研究，日本建築学会九州支部研究報告，第38号，1998年3月
- 15) 矢川元基，幾島毅：使用済核燃料輸送容器の構造解析プログラムの調査，日本原子力研究所，JAERI-M-87-156，1987年10月
- 16) 森田慶子，高山峯夫他：U型鉛ダンパーの降伏耐力に関する考察(その1)～(その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2 構造Ⅱ，1996年9月
- 17) Mineo Takayama 他：A Practical Study of Lead Damper for Base Isolation System (Part 2)，福岡大学工学集報，第45号，1990年9月
- 18) J.A. Bailey et al.：Effect of Strain Rate and Temperature on the Resistance to Deformation of Aluminum, Two Aluminum Alloys, and Lead, Journal of the Institute of Metals, Vol.92, 1963-1964
- 19) 森田慶子，高山峯夫：免震構造用鉛ダンパーの実験的研究 別置型鉛ダンパーの復元力モデルと繰返し特性の評価について，日本建築学会構造系論文集，第570号，2003年8月

第4章 別置型鉛ダンパーを有する免震建造物の地震応答解析

4.1 緒言

この章では、U型鉛ダンパーを有する免震建物の地震時応答について検討を行なう。建築構造物の地震時挙動を把握する方法として、数値解析による応答予測がある。免震構造に対する応答解析モデルは目的に応じて集中質量型の簡易モデルからねじれ応答、立体振動を考慮できる詳細モデル等が用いられる。設計を行う際、鉛ダンパーなどの履歴型ダンパーの復元力特性として完全弾塑性型 **bi-linear** が多用されているが、実際のダンパーの復元力特性とは多少の差異がある。ダンパーの復元力特性をモデル化する方法の違いが免震構造の応答特性に及ぼす影響について把握しておくことは必要である。そこで、次の2点に着目して、ダンパーの復元力特性を完全弾塑性型 **bi-linear** にモデル化した場合の応答特性との比較を行い、その特徴を明らかにする。

- 1) 降伏点の振幅依存性を考慮した場合の影響
- 2) 降伏後の復元力特性にハードニングを考慮した場合の影響

鉛ダンパーを定常波で動的に加振した場合、1サイクル目の最大設定変位に達するまでの耐力は、他のサイクルに比べて低い値を示す。大変形領域の範囲で決定した降伏耐力を使用し、完全弾塑性型 **bi-linear** でモデル化した場合には、この現象を考慮していない。強風時など比較的小さな外乱に対して検討を行う際には、小変形領域の履歴減衰を過大に評価する可能性もある。

また、U型鉛ダンパーの復元力特性は、小変形領域において完全弾塑性型 **bi-linear** を示す。過大な地震動を受け大変形領域に入ると、鉛ダンパーの可撓部に軸方向変形が顕著に現れ始めるために、引張力の影響が現れ、完全弾塑性型の復元力特性にハードニングが表れ始める。ハードニングの影響を考慮した復元力特性の応答解析を行ない、その特徴を示す。

これらの復元力特性の違いが免震層の応答変位に与える影響については、エネルギー論の観点からほぼ説明することができる。完全弾塑性型 **bi-linear** から得られた結果を用いて推定した応答変位の予測式についても検討する。

また、実免震建物で観測された地震動を用いて、応答解析を行い、提案する復元力特性のモデル化の妥当性を検証する。完全弾塑性型 **bi-linear** と比較して降伏耐力の振幅依存性を考慮したモデルが、小地震や強風時等の小外乱時の免震構造の応答評価に有効であることを示す。

4.2 解析概要

4.2.1 構造概要

対象とする免震構造は、天然ゴム系積層ゴムアイソレータ(以降、アイソレータ)と別置型ダンパーからなる免震層と、上部構造によって構成されるものとする。アイソレータは鉛直荷重を支持し、水平振動による地震入力エネルギーを弾性ひずみエネルギーとして吸収する。ダンパーは水平地震動による地震入力エネルギーを塑性エネルギーまたは熱エネルギーとして吸収し、免震層の水平変形を抑制し、かつ応答せん断力を低減させる。このように、ここで対象とする免震構造は水平地震動に対する免震のみを意図したものである。

アイソレータは、鉛直荷重に対して高い支持力と剛性を保持しつつ水平力に対しては高い弾性変形能力を発揮する。鉛直荷重を支持した状態で水平変形を受けた場合、アイソレータが一定の値より扁平な場合には、P- δ 効果の影響は現れない。このとき、多少の沈み込み変形を生じるが、水平変形下のせん断剛性は低下することなく、摩擦のない安定したベアリングのような性状を示すことができる。ただし、鉛直荷重に対する反力中心が積層ゴムの水平面内に留まることが前提となり、積層ゴムの直径に対して許容変形量を規定する必要がある。

ダンパーには、維持管理が容易で耐久性に優れ、少ない量で比較的大きな効果が得られる履歴減衰型のダンパーが多用されている。ここでは、本論で取り扱っている履歴減衰型であるU型鉛ダンパーを対象とする。

4.2.2 解析モデル

図 4.2.1 に示すような 1 自由度の質点系モデルを用いる。重量は 9,800tonf とした。

免震層を構成するのは、建物を支持しながら復元力を発揮するバネ特性を持つアイソレータと適切な減衰を付与するダンパーである。免震層がアイソレータのみで支持される場合の水平剛性を K_f とし、ダンパーの初期剛性を K_s とする。アイソレータの復元力特性は線形で示され、ダンパーは剛塑性型で示されるものとする。解析のための免震層の復元力特性は、この二つの復元力を合成することによって評価することができる。

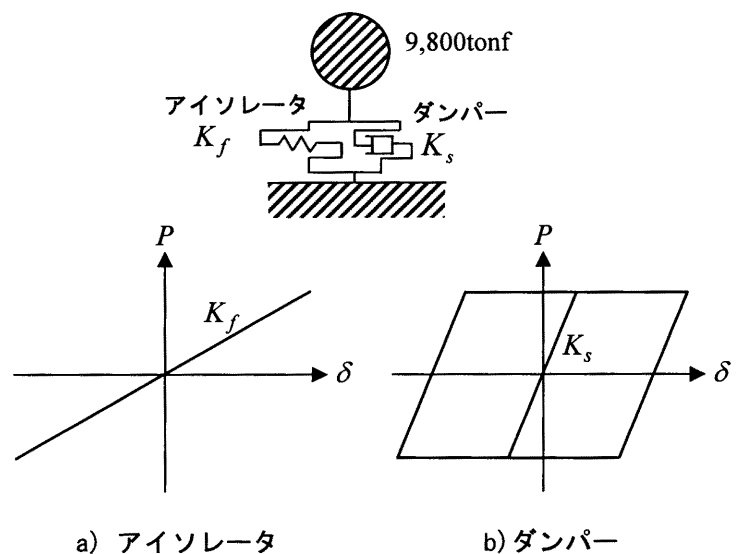


図 4.2.1 解析モデル

4.2.3 アイソレータの復元力特性のモデル化

a) アイソレータの概要

免震構造において、アイソレータは柱と同じように長期にわたって建物荷重を支持しなければならない。加えて、地震時には従来の柱に比べて、より大きな水平変形に対して建物荷重を支えながら水平方向に安定して挙動することが求められる。アイソレータは、大きく分けて積層ゴム、すべり支承、転がり支承の3種類に分けることができる。ここでは、ダンパーを別置きとする天然ゴム系積層ゴムアイソレータを対象としてアイソレータのモデル化を行う。天然ゴム系積層ゴムアイソレータの復元力特性は、図4.2.1 a)に示すように線形としてモデル化することができる。

b) アイソレータの復元力特性の概要

アイソレータの復元力特性の設定は、免震構造の基本的な特性を決定する重要な要素である。天然ゴム系積層ゴムアイソレータの特性は線形であるため、免震周期 T_f はアイソレータの変形に依存しない量として(4.2.1)式で簡単に求めることができる。また、この免震周期 T_f が免震効果を確認する重要な指標となる。

$$T_f = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g \cdot K_f}} \quad (4.2.1)$$

ここで、 K_f : 全アイソレータの水平剛性の総和(N/mm)
 g : 重力加速度(980cm/s²)
 W : 上部構造の全重量(tonf)

ここでは、解析に用いた建物の免震周期が $T_f=2.0\text{sec}$, 3.0sec , 4.0sec となるように、アイソレータの水平剛性 K_f を設定する。免震周期 $T_f=2.0\text{sec}$, 3.0sec , 4.0sec に対して、 $K_f=98.70\text{N/mm}$, 43.86N/mm , 24.67N/mm となる。

4.2.4 鉛ダンパーの復元力特性のモデル化

a) U型鉛ダンパーの概要

U型鉛ダンパーの概要を図4.2.2,表4.2.1に示す。U型鉛ダンパーは、円形断面を持ち、水平変形を受けて自由に変形可能な部分(可撓部)と、この可撓部の変形能力を確保するための円錐状の補強部、更にダンパー取り付けのための鋼製フランジにより構成されている。可撓部がせん断方向に変形す

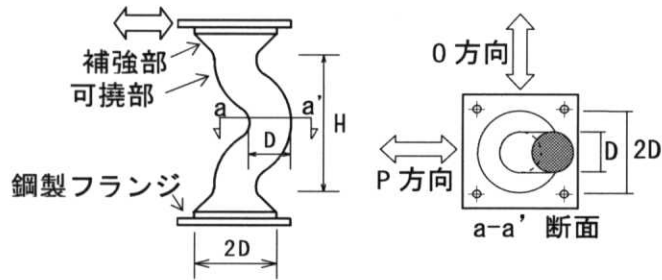


図 4.2.2 U型鉛ダンパー

表 4.2.1 U型鉛ダンパーの概要

	直径 D (mm)	可撓部高さ H (mm)	可撓部長さ L (mm)	L/H
U180	180	560	660	1.18

ることにより復元力特性を示し、地震のエネルギーを吸収する機構となっている。補強部の直径は可撓部直径の2倍で、鋼製フランジと補強部との接合にはホモゲン溶着法を採用している。本解析においては、現在、免震構造に多用されているU180を対象としてモデル化を行なう。

図4.2.2に示すように、実験では加振方向が鉛ダンパーの屈曲部に平行な方向(P方向)と、直交している方向(O方向)の2通りの加力を行なっている。U型鉛ダンパーは、加力方向により復元力特性の形状に若干の違いが見られるが、1回の地震で経験する範囲においては、降伏耐力や履歴吸収エネルギーには殆ど差は見られない¹⁾。復元力特性のモデル化の際には、方向性は無視できるものと判断し、平均的な値を用いている。

b) U型鉛ダンパーの復元力特性の概要³⁾

ダンパーの復元力特性のモデル化はbi-linear型を基本とし、その他の復元力特性についても解析を行なった。復元力特性のモデル化の概要を図4.2.3に示し、c)~e)の項目にその詳細を示す。

免震層の減衰量は、弾塑性ダンパーを用いた場合、降伏耐力によって決定され、免震層の変形量が制御される。ダンパーの降伏耐力の総和を sQ_y とした場合、(4.2.2)式で示すように降伏耐力を建物全重量で除した値がダンパーの降伏せん断力係数 α_s であり、免震建物の減衰量を示すものである。同様に、アイソレータの最大せん断力 fQ_{max} を建物重量で除した値がアイソレータのせん断力係数 α_f となる。従って、免震層のせん断力係数は α_s と α_f の和で求めることができる。

$$\alpha_s = \frac{sQ_y}{W}, \quad \alpha_f = \frac{fQ_{\max}}{W} \quad (4.2.2)$$

ダンパーの降伏せん断力係数は、 $\alpha_s=0.01\sim0.10$ の範囲で応答値が小さくなる最適値が存在する¹⁾。実際の免震建物の設計において、ダンパーの降伏せん断力係数 α_s は 0.03～0.06 の範囲で採用されることが多い。本解析では、 $\alpha_s=0.02, 0.03, 0.04, 0.06, 0.08$ について検討を行なう。ダンパーの設定値を表 4.2.2 に示す。

c) 完全弾塑性型 bi-linear (単純 bi-linear)

単純 bi-linear モデルは、図 4.2.3, 表 4.2.2 に示す初期剛性 K_1 、第 2 剛性 K_2 で示される完全弾塑性型モデルとする。最大降伏耐力 Q_e に達するときの降伏変位は(3.4.2)式の γ_{y2} を用いて、 $\delta_{y2}=4.8\text{ mm}$ とする。単純 bi-linear モデルでは、最大降伏変位 δ_e 以上の変形に対して、ハードニングは考慮しない。

d) 降伏点の振幅依存性を考慮した復元力特性(振幅依存 bi-linear)²⁾

振幅依存 bi-linear モデルは、最大降伏変位 δ_e までは、振幅によって降伏荷重が変化する復元力特性とする。復元力モデルの設定値を図 4.2.3, 表 4.2.2 に示す。最大降伏耐力 Q_e に達するときの降伏変位は $\delta_{y2}=4.8\text{ mm}$ とする。最大降伏変位 δ_e に達するまでの降伏荷重は、(3.4.1)式を用いて加工前の降伏荷重 $\beta \cdot Q_e$ から、 δ_e 点における最大降伏荷重 Q_e を結ぶ線上を移動するものとする。振幅依存 bi-linear モデルでは、最大降伏変位 δ_e 以上の変形に対して、ハードニングは考慮しないものとする。

e) 降伏後の復元力特性にハードニングを考慮した復元力特性 (tri-linear)

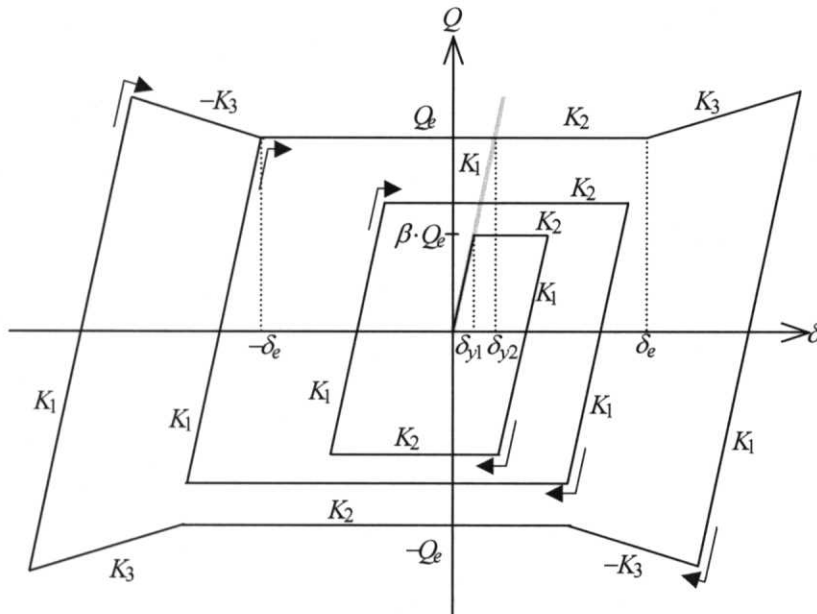
tri-linear モデルは、最大降伏変位 δ_e までは単純 bi-linear モデルと同じ復元力特性を示すものとする。復元力モデルの設定値を図 4.2.3, 表 4.2.2 に示す。最大降伏耐力 Q_e に達するときの降伏変位は $\delta_{y2}=4.8\text{ mm}$ とする。最大降伏変位 δ_e 以上の変形に対しては、ハードニングを考慮した復元力特性とする。ハードニング領域の勾配は、(3.4.4)式を用いて $K_3=0.015K_1$ とする。

f) 動的試験の代表値として取り扱う定常波入力の復元力特性

U型鉛ダンパーを用いた動的試験では、0.02Hz～1.0Hz の範囲で正弦波加振を実施している。地震動を対象としたような周波数の範囲では、W.H.Robinson らの研究からもひずみ速度の影響は小さいと判断されている。0.1Hz 以上(10sec 以下)の範囲では、履歴特性はほぼ同じ傾向を示し、ひずみ速度依存性が小さい。免震建物は、免震周期 $T_f=3$ 秒以上で設計されているものが大部分である。履歴曲線を評価するに当たって、0.33Hz を正弦波加振による動的試験の代表値として用いる。

表 4.2.2 復元力特性の設定表

	α_s	K_1 (N/mm)	K_2 (N/mm)	K_3 (N/mm)	δ_{y1} (mm)	δ_{y2} (mm)	β	Q_e (kN)	δ_e (mm)
単純 bi-linear 型	0.02	408	0	0	4.8	4.8	1	1960	150
	0.03	604	0	0	4.8	4.8	1	2900	150
	0.04	817	0	0	4.8	4.8	1	3920	150
	0.06	1208	0	0	4.8	4.8	1	5800	150
	0.08	1633	0	0	4.8	4.8	1	7840	150
振幅依存 bi-linear 型	0.02	408	0	0	2	4.8	0.4145	1960	150
	0.03	604	0	0	2	4.8	0.4145	2900	150
	0.04	817	0	0	2	4.8	0.4145	3920	150
	0.06	1208	0	0	2	4.8	0.4145	5800	150
	0.08	1633	0	0	2	4.8	0.4145	7840	150
tri-linear 型	0.02	408	0	6.12	4.8	4.8	1	1960	150
	0.03	604	0	9.06	4.8	4.8	1	2900	150
	0.04	817	0	12.26	4.8	4.8	1	3920	150
	0.06	1208	0	18.12	4.8	4.8	1	5800	150
	0.08	1633	0	24.50	4.8	4.8	1	7840	150



$$\beta \cdot Q_e = K_1 \cdot \delta_{y1} = K_1 \cdot \gamma_{y1} \cdot H \quad (3.4.1)$$

$$Q_e = K_1 \cdot \delta_{y2} = K_1 \cdot \gamma_{y2} \cdot H \quad (3.4.2)$$

$$\delta_e = \gamma_e \cdot H \quad (3.4.3)$$

$$K_3 = \gamma_k \cdot K_1 \quad (3.4.4)$$

H : 鉛ダンパーの可撓部高さ, Q_e : 鉛ダンパーの降伏耐力

δ_{y1} : 初期降伏変位, δ_{y2} : 降伏変位

$\beta, \gamma_{y1}, \gamma_{y2}, \gamma_e, \gamma_k$: 実験より得られる係数

($\beta=0.4145, \gamma_{y1}=0.0035, \gamma_{y2}=0.0085, \gamma_e=0.27, \gamma_k=0.015$)

図 4.2.3 U型鉛ダンパーの復元力特性の概要

4.2.5 アイソレータと組み合わせることによるダンパーの力学緩和

もし仮に、免震層に鉛ダンパーのみを設置した場合、復元力を持たないために元の位置に戻ることはできない。変形した鉛は、鉛の再結晶という性質により弾性範囲においても応力が解放され、時間が経過すると永久変形を残すためである。免震構造では、建物と地盤を絶縁するために、建物の基礎部分（免震層）にアイソレータとダンパーを設置する。ダンパーは、車でいえばブレーキの役割を担い、地震時の変形エネルギーを吸収する。アイソレータは建物を支え、地震時には建物を水平方向にゆっくり移動させ、地震終了後には元の位置に戻す役割を果たす。つまり、復元力を持つアイソレータと組み合わせることで、建物を地震前の位置に戻すことができる。

文献 6)には、ローラーの上に載せた鉛ダンパーに強制変形を与えたあと、およそアイソレータ 1 体分を想定したバネにより残留変形が元に戻る実験が報告されている。文献によれば、実験開始直後には 54mm あった残留変形が、288 時間後にはバネの力によって、27mm の変形まで戻っている結果が示されている。

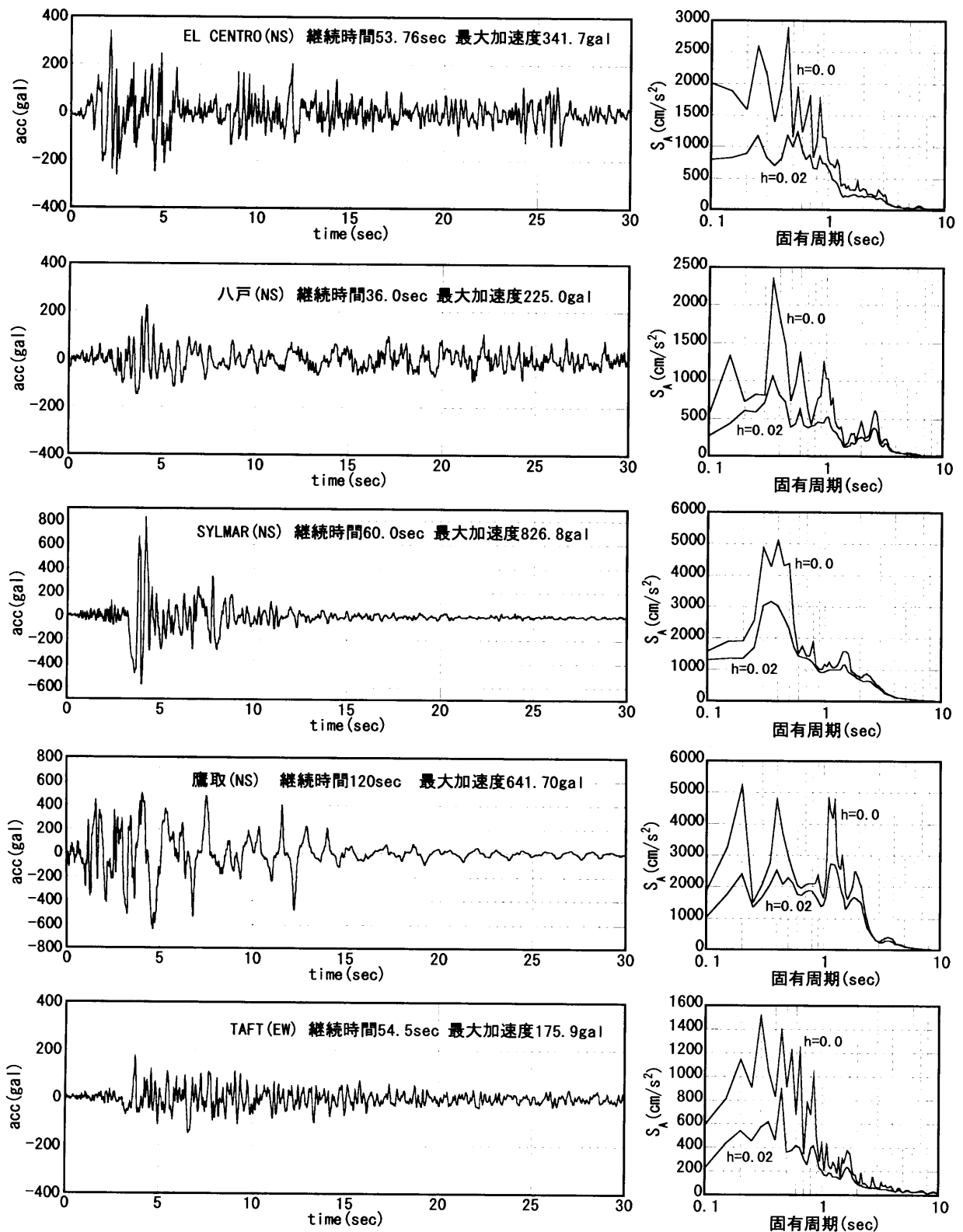
4.2.6 入力地震動

解析に用いた地震波は EL CENTRO(NS)波、八戸(NS)波、SYLMAR(NS)波、鷹取(NS)波、TAFT(EW)波の 5 種類とし、その概要を表 4.2.4 に示す。図 4.2.4 に加速度時刻歴と加速度応答スペクトルを示す。加速度時刻歴は主要動が現れる最初の 30 秒のみとしている。解析に用いた地震の継続時間は表 4.2.4 に示している。

最大速度を 5, 10, 15, 20, 25, 40, 50, 75, 100, 125, 150kine (cm/s)の 11 種類に基準化して入力した。また、観測された地震波の時間刻みを直線補間により 0.0005sec 刻みのデータに変換し、解析に用いた。

表 4.2.4 入力地震動の概要（出典：日本建築センター）

地震名		記録場所	方向	継続時間	時間刻み	最大加速度
EL CENTRO (NS)	Imperial Valley 地震 1940.5.18	El Centro, CA	NS	53.76 sec	0.02 sec	341.7 gal
八戸(NS)	十勝沖地震 1968.5.16	八戸港湾	NS	36.00	0.01	225.0
SYLMAR(NS)	Northridge 地震 1994.1.17(CSMIP)	Sylmar, CA	NS	60.00	0.02	826.8
鷹取(NS)	兵庫県南部地震 1995.1.17 (JR 警報地震計)	鷹取駅	NS	120.00	0.01	641.70
TAFT(EW)	Kern County 地震 1952.7.21	Taft, CA	EW	54.50	0.02	175.9



a) 加速度時刻歴

b) 加速度応答スペクトル

図 4. 2. 4 入力地震波

4.3 解析結果

4.3.1 免震層の復元力特性

図 4.3.1～図 4.3.3 に応答解析結果より得られた免震層の復元力特性を示す。免震周期 $T_f=2, 3, 4\text{sec}$ のモデルに Sylmar 波を 75kine に基準化して入力した結果である。ダンパーの降伏せん断力係数 α_s は 4% である。 $T_f=2\text{sec}$ の場合のみ Y 軸のスケールが他の 2 つの倍となっている。

振幅依存 bi-linear モデルでは、最大降伏耐力変位 $\delta_e=15\text{cm}$ までは、振幅に依存して降伏荷重が変化している。振幅が小さい時には降伏荷重が低く示され、振幅が大きくなるに伴って降伏荷重が上昇している。一方、tri-linear モデルは、最大降伏変位 $\delta_e=15\text{cm}$ を越えた辺りからハードニングしている。

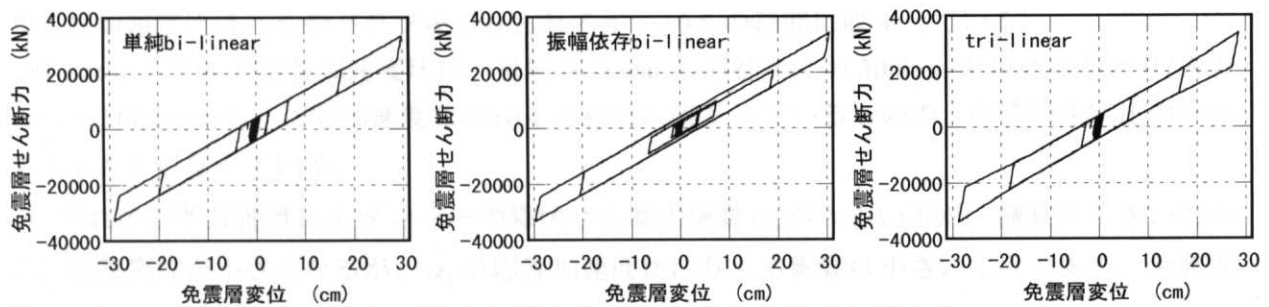


図 4.3.1 免震層の復元力特性 ($T_f=2\text{sec}$, $\alpha_s=0.04$, SYLMAR(NS) 75kine)

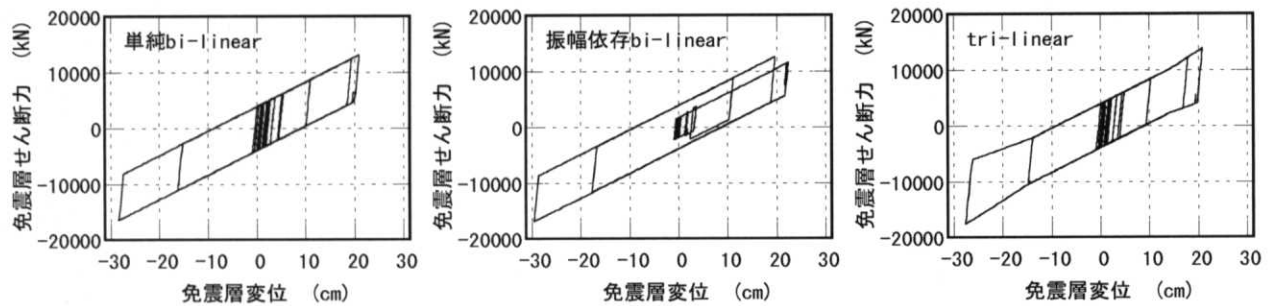


図 4.3.2 免震層の復元力特性 ($T_f=3\text{sec}$, $\alpha_s=0.04$, SYLMAR(NS) 75kine)

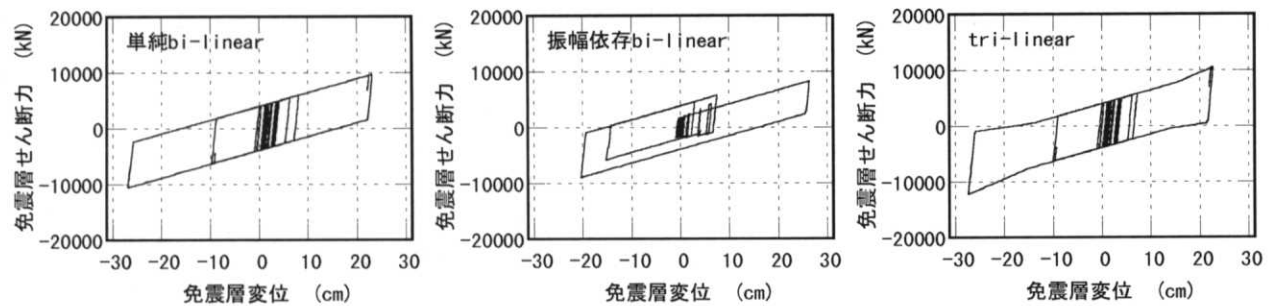


図 4.3.3 免震層の復元力特性 ($T_f=4\text{sec}$, $\alpha_s=0.04$, SYLMAR(NS) 75kine)

4.3.2 復元力特性の違いが最大応答加速度に与える影響

図 4.3.4～図 4.3.5 は最大応答加速度について着目し、免震層の応答加速度比と単純 bi-linear モデルの応答変位の関係を示す。図 4.3.4 に単純 bi-linear モデルに対する振幅依存 bi-linear モデルの応答加速度比を示し、図 4.3.5 に単純 bi-linear モデルに対する tri-linear モデルの応答加速度比を入力地震波毎に示す。縦軸は、同一レベルで基準化した入力地震動の応答加速度の最大値を比較したもので、(振幅依存 bi-linear モデルまたは、tri-linear モデル)/(単純 bi-linear モデル)の比率を示す。横軸は、単純 bi-linear モデルの変位応答値である。ダンパーの降伏せん断力係数 α_s 毎にプロット点を実線で結んで示す。

加速度応答比は、免震周期 T_f に関係なくほぼ同じ傾向を示した。振幅依存 bi-linear モデルの応答加速度比は、ややバラツキがみられるが、 ± 0.5 の範囲に収まっている。

tri-linear モデルの応答加速度比は、単純 bi-linear の応答変位が 300mm を超えるあたり(入力レベル 50kine)から、応答加速度比が ± 0.4 の範囲に収まっているものの、応答加速度比のバラツキが大きくなっている。

いずれの応答加速度比もダンパーの降伏せん断力係数 α_s が大きい方が、減衰が大きいため、応答変位が小さくなるが、 α_s が応答加速度比に与える影響は小さいようである。免震周期 T_f が 4sec の方が 2sec よりバラツキが大きくなる傾向が示されている。

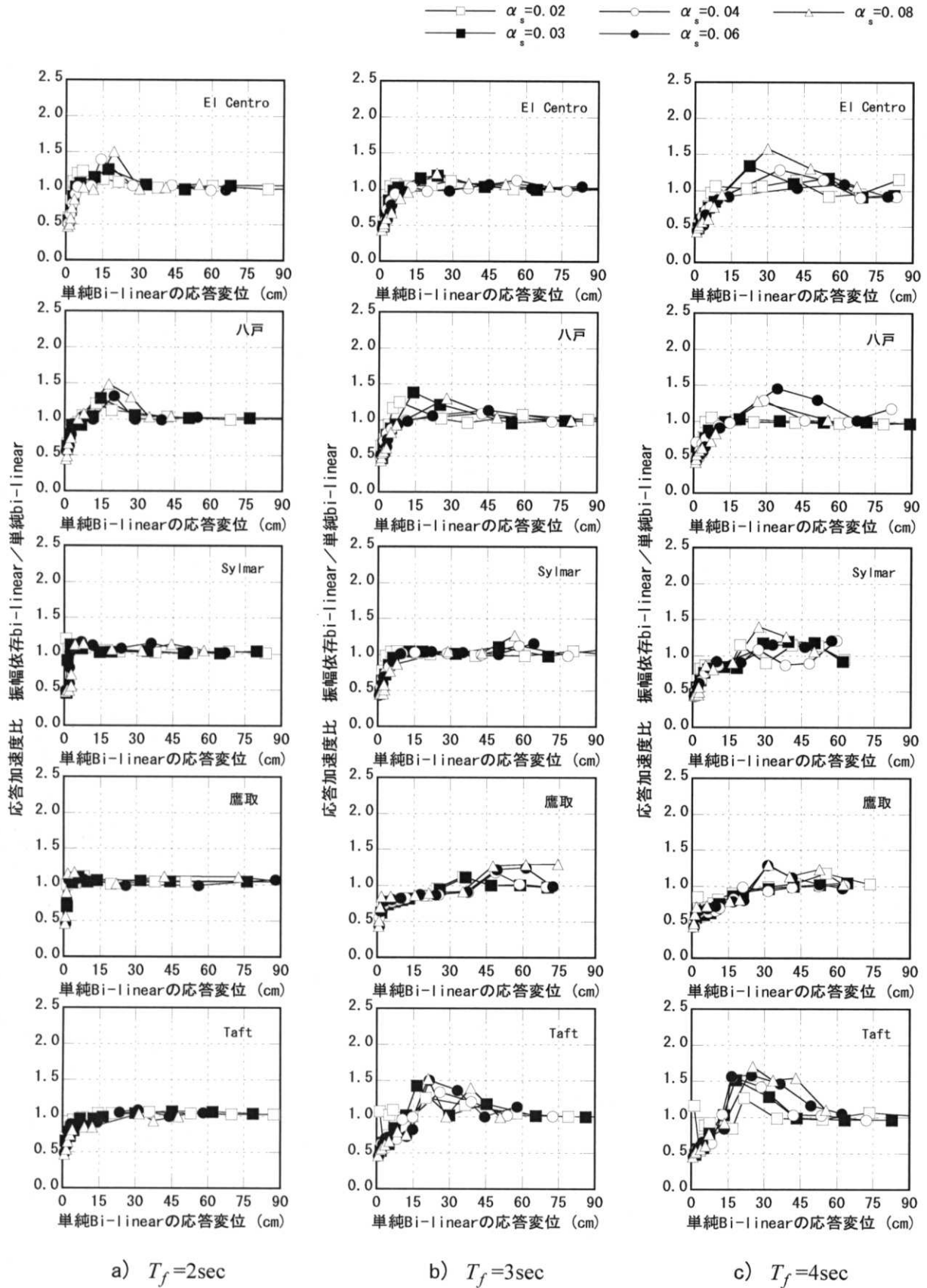


図 4.3.4 単純 bi-linear モデルに対する振幅依存 bi-linear モデルの応答加速度比

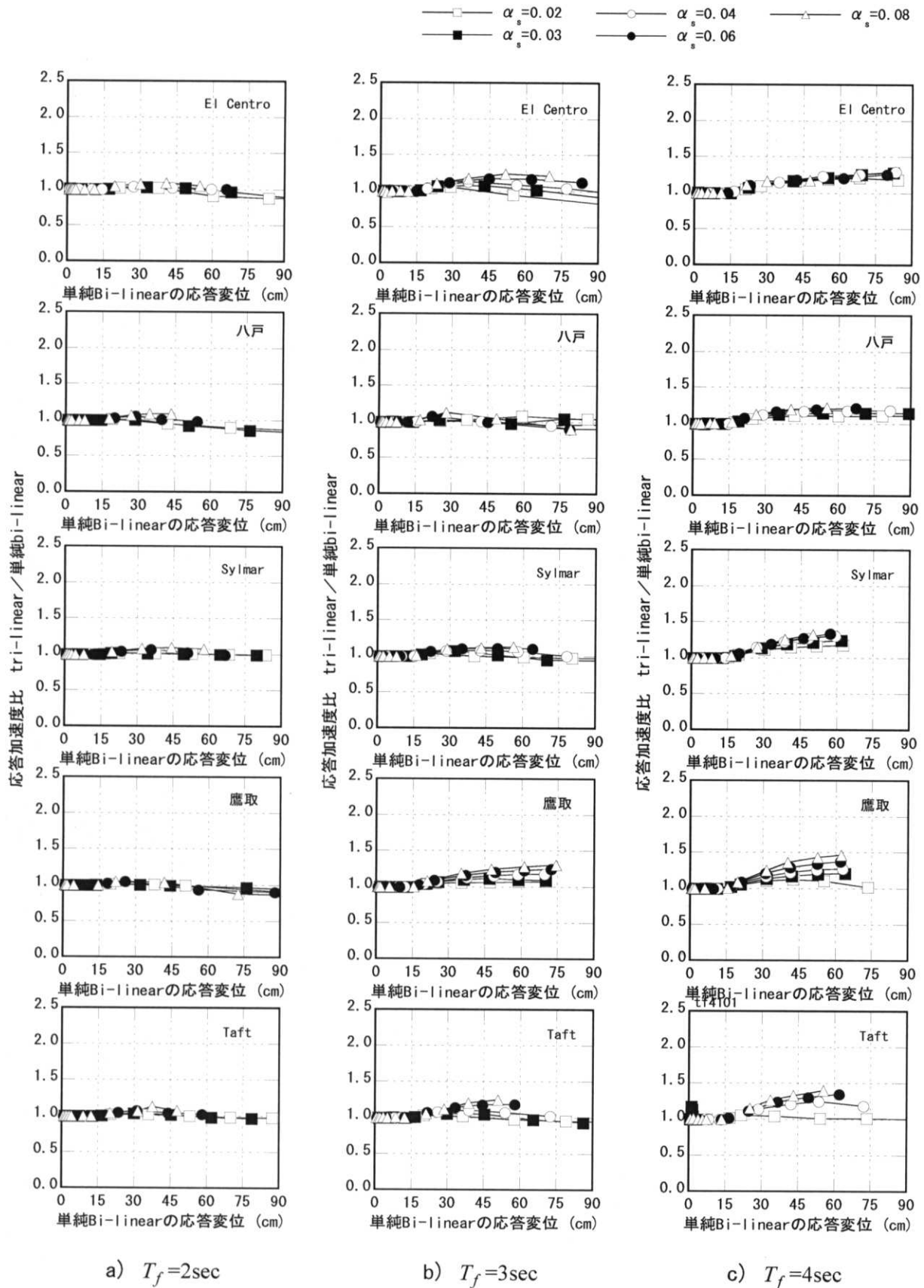


図 4.3.5 単純 bi-linear モデルに対する tri-linear モデルの応答加速度比

4.3.3 復元力特性の違いが免震層の応答変位に与える影響

ダンパーの復元力特性の違いが免震層の応答変位に与える影響は、荷重 Q_x と振幅 x で示される単純な復元力特性を用いて、エネルギーの観点からおおよそ説明することができる。

図 4.3.6 に、各モデルの x 点における荷重 Q_x の変化を示す。単純 bi-linear モデルの x 点における荷重 Q_x は、(4.3.1)式に示すように振幅にかかわらず最大降伏荷重 Q_e の一定値で示す。

$$Q_x = Q_e \quad (4.3.1)$$

振幅依存 bi-linear モデルの x 点における荷重 Q_x は、(4.3.2)～(4.3.3)式に示すように最大降伏変位 δ_e に至るまでは変位振幅の増加に伴って大きくなる。最大降伏変位 δ_e よりも振幅が大きくなった場合には最大降伏荷重 Q_e の一定値を示す。

$$0 < x < \delta_e \text{ の場合} \quad Q_x = \beta \cdot Q_e + \frac{1-\beta}{\delta_e} Q_e x \quad (4.3.2)$$

$$x > \delta_e \text{ の場合} \quad Q_x = Q_e \quad (4.3.3)$$

tri-linear モデルの x 点における荷重 Q_x は、(4.3.4)～(4.3.5)式に示すように、最大降伏変位 δ_e に至るまでは、最大降伏荷重 Q_e で示す。最大降伏変位 δ_e よりも振幅が大きくなった場合には、ハードニングの影響で x 点における荷重 Q_x が徐々に大きくなる。

$$0 < x < \delta_e \text{ の場合} \quad Q_x = Q_e \quad (4.3.4)$$

$$x > \delta_e \text{ の場合} \quad Q_x = Q_e + \frac{Q_e(x - \delta_e)}{\delta_e} \gamma \quad (4.3.5)$$

$$\text{ここで、} \quad \gamma = \frac{\gamma_k \cdot \gamma_e}{\gamma_{y2}}$$

$\gamma_k, \gamma_e, \gamma_{y2}$: (3.4.1)～(3.4.4)式参照

それぞれの x 点における荷重 Q_x と振幅 x によって得られる履歴面積の概要を図 4.3.7 に示す。単純 bi-linear モデルの x 点における履歴面積は、(4.3.6)式で示す。

$$A_0 = x \cdot Q_e \quad (4.3.6)$$

振幅依存 bi-linear モデルの x 点における履歴面積を、(4.3.7)～(4.3.8)式で示す。

$$0 < x < \delta_e \text{ の場合} \quad A = x \cdot Q_e \left(\beta + \frac{1-\beta}{2\delta_e} x \right) \quad (4.3.7)$$

$$x > \delta_e \text{ の場合} \quad A = x \cdot Q_e \left(1 - \frac{1-\beta}{2x} \delta_e \right) \quad (4.3.8)$$

tri-linear モデルの x 点における履歴面積は、(4.3.9)～(4.3.10)式で示す。

$$0 < x < \delta_e \text{ の場合} \quad A = x \cdot Q_e \quad (4.3.9)$$

$$x > \delta_e \text{ の場合} \quad A = x \cdot Q_e \left(1 + \frac{(x - \delta_e)^2}{2\delta_e \cdot x} \gamma \right) \quad (4.3.10)$$

図 4.3.7 a)では、単純 bi-linear モデルと振幅依存 bi-linear モデルの履歴面積を比較する。変位振幅と降伏耐力で示される矩形の履歴ループを考えた場合、最大降伏変位 δ_e における振幅依存 bi-linear モデルは単純 bi-linear モデルの履歴面積の 0.707 倍となる。その分、振幅依存 bi-linear モデルの変位応答は大きくなることが予想される。2 倍の最大降伏変位 ($2\delta_e$) における振幅依存 bi-linear モデルの履歴面積比は 0.854 倍である。この様な単純な履歴ループを考えた場合、単純 bi-linear モデルの履歴面積と振幅依存 bi-linear モデルの履歴面積は同じになることはない。しかし、地震動入力における応答では、単純 bi-linear モデルと振幅依存 bi-linear モデルの履歴面積がほぼ同等になり、応答変位が同等の値を示す領域に収束する変位振幅が存在するはずである。

図 4.3.7 b)では、単純 bi-linear モデルに対する tri-linear モデルの履歴面積の比を示す。最大降伏変位 $2\delta_e$ における tri-linear モデルは単純 bi-linear モデルの履歴面積の 1.119 倍となる。 $3\delta_e$ で 1.3176 倍となり、tri-linear モデルの変位応答は小さくなることが予想される。

単純な復元力特性を用いて、履歴面積を考慮することによって、安全性を確保できる範囲で免震層の応答変形を予測することができると思われる。

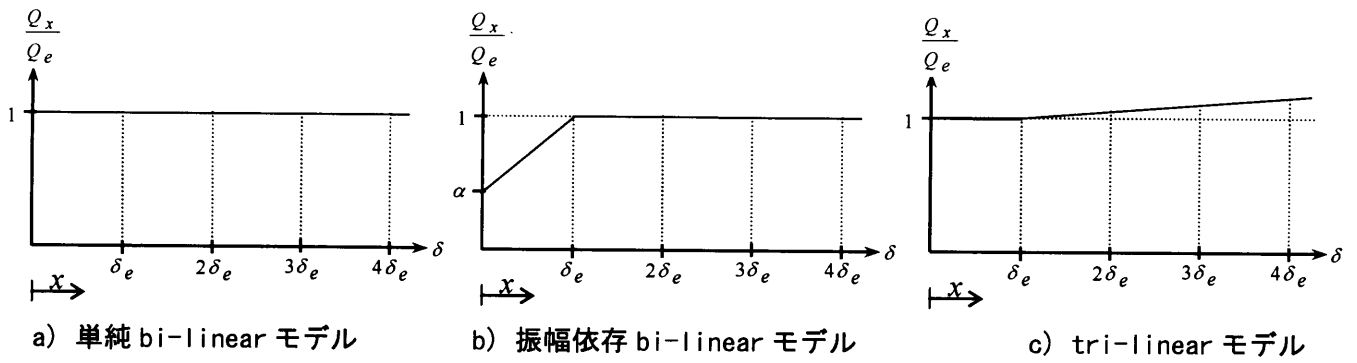


図 4.3.6 各モデルの x 点における Q_x 荷重の変化

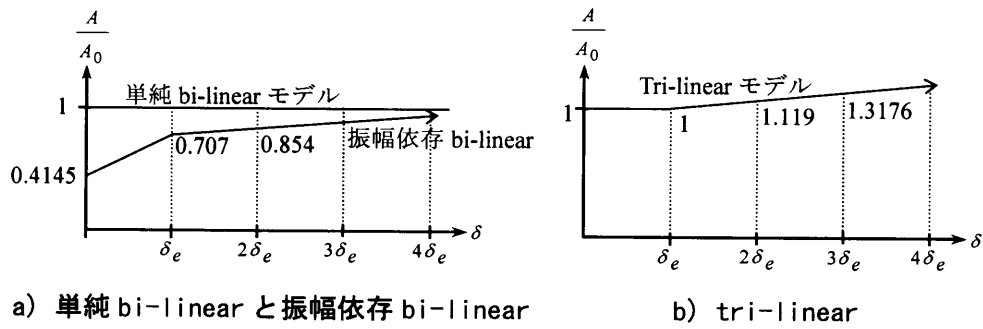


図 4.3.7 x 点における荷重 Q_x と振幅 x によって得られる履歴面積の比較

図 4.3.8～図 4.3.9 は、応答変位について着目し、免震層の応答変位比と単純 bi-linear モデルの応答変位の関係を示す。単純 bi-linear モデルの応答に対する振幅依存 bi-linear モデルと tri-linear モデルの応答値の比率を入力地震波毎に示す。応答変位比は、免震周期 T_f に関係なくほぼ同じ傾向を示した。縦軸は、同一レベルで基準化した入力地震動の応答値を比較したもので、(振幅依存 bi-linear モデルまたは、tri-linear モデル)/(単純 bi-linear モデル)の比率を示す。横軸は、単純 bi-linear モデルの変位応答値である。ダンパーの降伏せん断力係数 α_s 毎にプロット点を実線で結んで示す。図中には、履歴面積から推定される応答変位比の予測式も灰色の線で示す。振幅依存 bi-linear モデル及び tri-linear モデルの応答変位の予測式は、前述の(4.3.7)～(4.3.10)式と単純 bi-linear の変位応答値 x_0 を用いて次式のように示すことができる。

1) 振幅依存 bi-linear モデルの応答変位予測式

$0 < x_0 < \delta_e$ の場合

$$f(x) = \frac{x_0}{\beta + \frac{1-\beta}{2\delta_e} x_0} \quad (4.3.11)$$

$x_0 > \delta_e$ の場合

$$f(x) = \frac{x_0}{1 - \frac{1-\beta}{2x_0} \delta_e} \quad (4.3.12)$$

ここで、 x_0 : 単純 bi-linear の変位応答値

δ_e : 最大降伏変位(15cm)

β : 0.4145 ((3.4.1)式より)

2) tri-linear モデルの応答変位予測式

$0 < x_0 < \delta_e$ の場合

$$f(x) = x_0 \quad (4.3.13)$$

$x_0 > \delta_e$ の場合

$$f(x) = \frac{x_0}{1 + \frac{(x_0 - \delta_e)^2}{2\delta_e \cdot x_0} \gamma \cdot \kappa} \quad (4.3.14)$$

ここで、 $\gamma = \frac{\gamma_k \cdot \gamma_e}{\gamma_{y2}}$

$\gamma_k, \gamma_e, \gamma_{y2}$: (3.4.1)～(3.4.4)式参照, κ : 補正係数

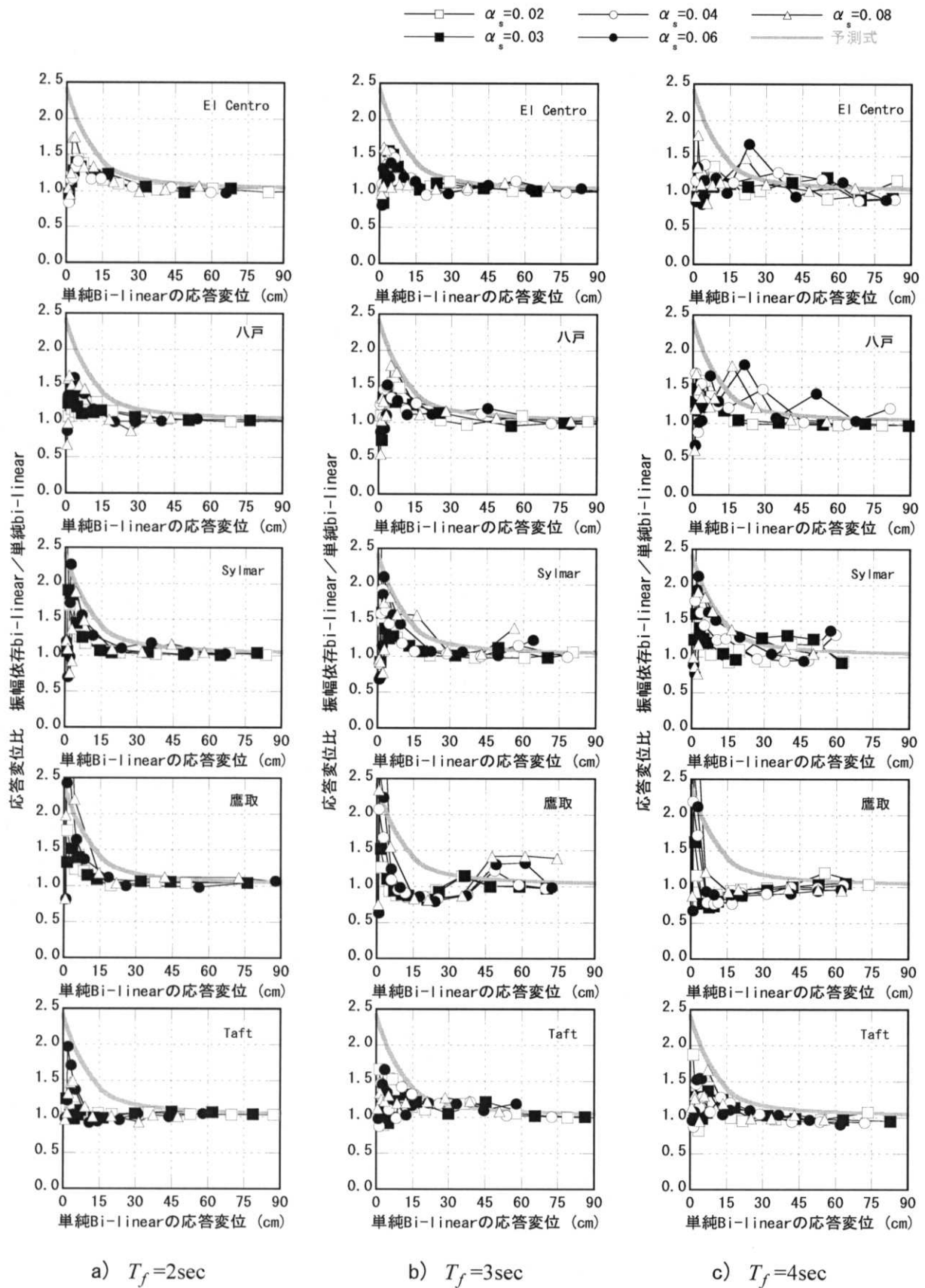


図 4.3.8 単純 bi-linear モデルに対する振幅依存 bi-linear モデルの応答変位比

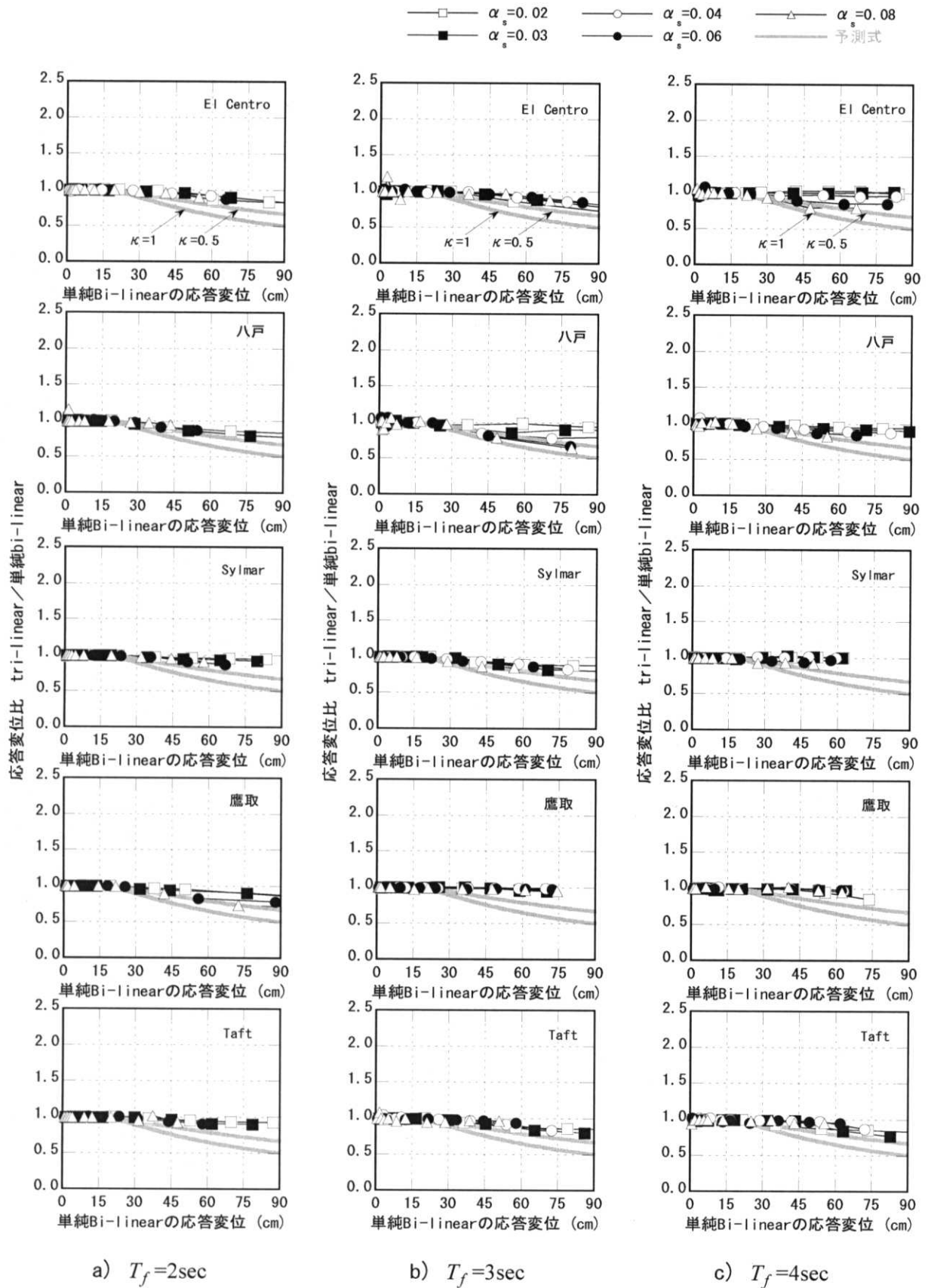


図 4.3.9 単純 bi-linear モデルに対する tri-linear モデルの応答変位比

図 4.3.8 において、振幅依存 bi-linear モデルの応答変位比の予測式は、基準となる単純 bi-linear の応答変位が大きくなるに従って応答変位比が小さくなり、1.0 に近づく傾向が示されている。(4.3.11)～(4.3.12)式より、最大降伏変位 $\delta_e=15\text{cm}$ において 1.41 倍、 $2\delta_e$ では 1.17 倍程度の応答比が予想された。また、 $3\delta_e$ 以降は応答変位比が 1.0 倍に収束する傾向が見られる。解析結果は予測式と同程度以下の応答比が示されている。

図 4.3.9 において、tri-linear モデルの応答変位比の解析結果及び予測式は、基準となる単純 bi-linear の応答変位が大きくなるに従って応答比が小さくなる傾向が示されている。(4.3.14) 式には、復元力特性のハードニング部分の影響を補正するための係数 κ を用いている。図 4.3.9 中の予測式は $\kappa=0.5$ と $\kappa=1$ の 2 通りを用いて示す。tri-linear モデルの場合、 $\kappa=1$ は応答変位が $\kappa=0.5$ より小さくなる傾向がある。 $\kappa=1$ は、ハードニングにより増加した履歴面積を全て評価することを意味し、 $\kappa=0.5$ はその半分であることを意味する。補正係数 $\kappa=1$ では、最大降伏変位 $\delta_e=15\text{cm}$ において 1.0 倍、 $2\delta_e$ では 0.89 倍、 $4\delta_e$ では 0.65 倍程度の応答比を予測している。しかし、この予測値は解析から得られた応答比よりも小さな値を示しており、減衰能力を過大に評価する傾向があることが分かる。(4.3.10)式で導いた履歴面積は、単純な履歴ループの 1/4 の面積を算出したものである。 $\kappa=1$ を用いて 1 ループとして評価した場合、地震入力による応答解析と比較して、ハードニングの影響を過大に評価していると考ええる。解析結果をまとめた結果、補正係数 $\kappa=0.5$ を用いた場合、予測値が解析結果の応答変位比の下限値をほぼ示す傾向が得られた。

実際の免震構造の設計においては、鉛ダンパーの復元力特性を bi-linear 型でモデル化することが多い。鉛ダンパーには、小変形領域においてはその降伏耐力に振幅依存性があり、大変形領域においては復元力特性にハードニングが示される。これらの影響については、bi-linear モデルを使用した解析結果から、履歴曲線の面積比を考慮することで、安全性を確保できる範囲で予測可能であると考ええる。

4.4 実免震建物における小外乱時の観測記録との比較

神奈川県横浜キャンパスの23号館は、地下2階と地下1階の間に免震層を有する鉄筋コンクリート構造物である。建物挙動を明らかにする目的で2001年より地震観測が実施されている⁷⁾。この免震建物では、本研究で使用した別置型鉛ダンパーが採用されている。

安達ら⁸⁾はこの建物の振動実験結果から、微小な相対変形から減衰効果が発揮されていることを指摘している。未だ大地震は経験していないが、小地震及び強風時の観測が実施されている。この観測記録と単純 bi-linear モデルおよび振幅依存 bi-linear モデルを用いた場合の応答解析結果を比較する。

4.4.1 建物概要

23号館は地下2階、地上8階、棟屋2階の建物である。地下2階と地下1階の間に免震層が設置されており、免震層は天然ゴム系積層ゴムアイソレータと、鉛ダンパー及び鋼棒ダンパーで構成されている。ここでは、免震層の応答変位に着目する目的で、上部構造を1質点でモデル化する。地下2階と地下1階に加速度計により地震観測を行っている。地下2階と地下1階の加速度記録を2回積分することにより変位を求め、層間変位を算出したものを免震層の観測変位記録とする。地下2階の加速度記録を解析の入力波形として単純 bi-linear 型モデルと振幅依存 bi-linear モデルに入力し、それぞれの解析モデルの応答変位を観測変位波形と比較する。

使用した観測地震波の概要を表4.4.1に示す。また、その加速度波形を図4.4.3に示す。2001年から2006年末まで30の地震記録が観測されている。解析に用いたのはこの観測地震の中で最大を示した地震記録である。この地震において、免震層の層間変位は鉛ダンパーの降伏点は超えるが、鋼棒ダンパーの降伏点は超えない範囲に収まる。

4.4.2 解析モデル

図4.4.1に示すような1自由度の質点系モデルを用いる。重量は29,743tonfである。免震層の復元力特性を図4.4.2に示す。 K_1 は設計時の初期剛性である。微小な相対変位から免震層に減衰効果が発揮されていたため、後に観測記録の検討によって再設定された初期剛性が K_1' である。ダンパーは、鉛ダンパーと鋼棒ダンパーが併用されているために、それぞれの降伏点において勾配が変化する tri-linear モデルとなっている。

ここでは、再設定された免震層の復元力特性をもとにして、本研究で使用している復元力特性の設定値を決定し、解析モデルの解析応答変位と観測変位波形の比較を行う。復元力特性の設定値を表4.4.2～表4.4.3に示す。

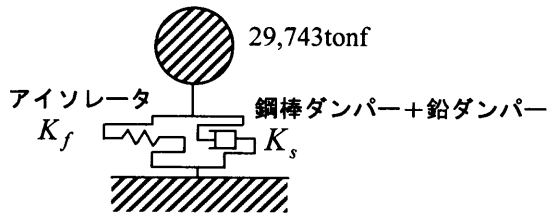


図 4.4.1 解析モデル

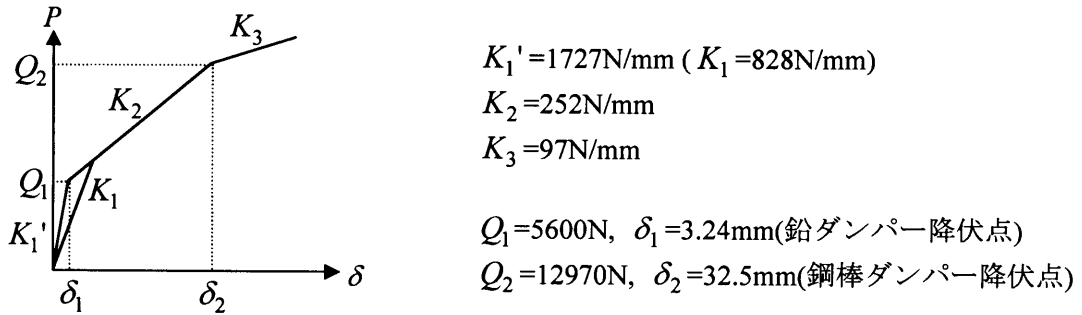


図 4.4.2 23号館の免震層の復元力特性

表 4.4.1 観測された地震記録の概要

発生日	震源時	震央地名	緯度	経度	深さ	規模	震度	加速度 最大値(gal)
					km	Mj	神奈川県 神奈川区 神大寺	
2005/7/23	16:34	千葉県 北西部	35° 34.9'	140° 8.3'	73	6	5弱	53.28

表 4.4.2 鉛ダンパーの復元力特性設定表

	$K_1' - K_2$ (N/mm)	K_2 (N/mm)	K_3 (N/mm)	δ_1 (mm)		β	Q_e (kN)	δ_e (mm)
				δ_{y1} (mm)	δ_{y2} (mm)			
単純 bi-linear 型	1475	0	0	3.24	3.24	1	560	150
振幅依存 bi-linear 型	1425	0	0	2	4.8	0.4145	560	150

表 4.4.3 積層ゴムアイソレータと鋼棒ダンパーを組み合わせた場合の復元力特性設定表

	K_2 (N/mm)	K_3 (N/mm)	δ_1 (mm)
単純 bi-linear 型	252	97	32.5
振幅依存 bi-linear 型	252	97	32.5

4.4.3 観測記録との比較

図 4.4.4 に観測記録の変位波形と、単純 bi-linear 型モデル及び振幅依存 bi-linear モデルの応答解析結果を示す。変位波形の最大値に着目すると、振幅依存 bi-linear モデルの応答解析値は、観測変位波形と良く対応しているのが分かる。単純 bi-linear モデルの応答解析値は、観測変位波形の最大値より 30%程度小さな値を示している。降伏耐力の値が大きいため、減衰力が過大に評価されているためである。従って、振幅依存 bi-linear モデルは、小外乱における応答を精度良く予測することができると思われる。

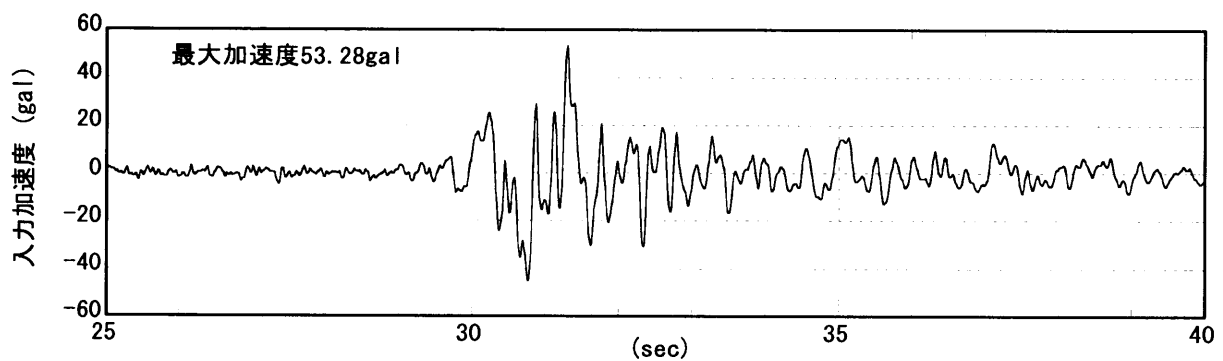


図 4.4.3 地下 2 階で観測された加速度記録

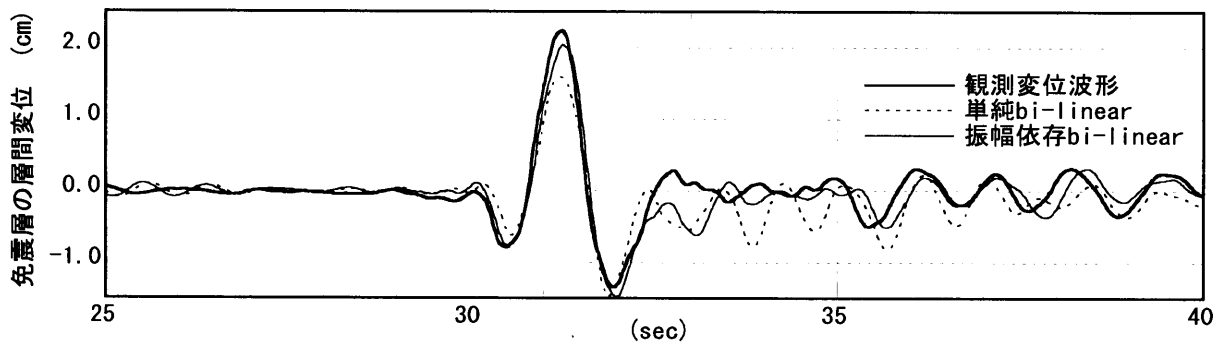


図 4.4.4 観測変位波形と応答解析値の比較(免震層の層間変位)

4.5 まとめ

本論では、U 型鉛ダンパーの復元力特性のモデル化が応答に与える影響について数値解析により検討し、以下の知見を得た。

1. U 型鉛ダンパーの復元力特性は、大変形を許容する比較的大きな地震を対象とした場合、完全弾塑性型である単純 bi-linear でモデル化することにより、十分な精度で設計に必要な応答を予測することが可能である。
2. 鉛は極めて小振幅から降伏し、減衰能力を発揮する。小地震時や強風時などの小外乱の際の免震構造の挙動について検討を行う場合には、小変形時の特性を考慮した振幅依存 bi-linear モデルの使用が有効である。
3. 復元力特性の違いが応答変位に与える影響は、履歴曲線の面積を考慮することで、予測が可能である。(4.3.11)式～(4.3.14)式に予測式を示し、応答変位が増幅する場合でも安全性を確保できる範囲で予測が可能であることを示した。
4. 応答加速度は、振幅依存 bi-linear モデルの応答加速度より単純 bi-linear モデルの方が大きくなる傾向を示した。ややバラツキがみられるが、変形が大きくなるにつれて収束する結果となった。tri-linear モデルの加速度応答は、単純 bi-linear モデルの応答とほぼ同じ値を示した。

4.6 参考文献

- 1) 日本建築学会：免震構造設計指針，日本建築学会，2001年
- 2) 小野喜信，金子洋文：鋼材ダンパーの解析アルゴリズムとサブルーチン，パッシブ制震構造シンポジウム 2001，2001年12月
- 3) 森田慶子，高山峯夫：免震構造用鉛ダンパーの実験的研究 別置型鉛ダンパーの復元力モデルと繰返し特性の評価について，日本建築学会構造系論文集，第570号，2003年8月
- 4) 秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，1999年
- 5) R.I. Skinner, W.H. Robinson, G.H. McVerry : An Introduction to Seismic Isolation, John Wiley & Sons, 1993
- 6) 山口直之，柏木栄介：鉛ダンパーの初期降伏点が性能に与える影響について，日本建築学会大会学術講演梗概集，2002年8月
- 7) 神奈川大学 TEDCOM プロジェクト Webpage :
<http://f0303176.yb12.kanagawa-u.ac.jp/TEDCOM/index.htm>, update 2007.03.27
- 8) 安達直人，引田智樹，内山正次，大熊武司：神奈川大学23号館(免震棟)および新1号館の振動実験 その3. 23号館(免震棟)免震層の復元力特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2 構造Ⅱ，2001年9月

第5章 結論

純度の高い鉛は、降伏応力度が低く、極めて延性に富んだ特性を示し、大変形領域で優れた繰返し塑性変形能力を発揮する。履歴特性は、矩形に近い形状となり、大きな減衰性能を持つことが期待できる。また、鋼材と比べて早期に降伏を促すことができ、比較的小変形時から減衰性能を発揮することも期待できる。このような特性を持ち、比較的安価な金属は、建築物の減衰材として利用するには最適の素材である。

鉛ダンパーを使って免震構造を設計する際には、鉛ダンパーの復元力特性が重要となる。地震時の鉛ダンパーの復元力特性を評価するために各種の試験を行い、その把握を行った。これらの試験により、鉛ダンパーの復元力特性のモデル化を行った。加えて、ダンパーに要求される性能を保持しているかどうか、温度の影響や限界能力の評価を行った。復元力特性のモデル化が地震応答解析の応答値、特に応答変位に与える影響についても検証を行った。以下に本論文のまとめを示す。

第2章では鉛ダンパーへの適用を想定した鉛の特性に関する試験として、正弦波による部材への動的繰返し試験を実施し、まとめた。以下に試験より得られた知見を示す。

1. 動的繰返しせん断試験より、鉛ダンパーの復元力特性のモデル化に必要となるひずみを定義した。加工前の弾性限である初期降伏ひずみを0.35%、加工後の弾性限であるせん断降伏ひずみを0.85%とする。
2. 動的繰返し試験において、軸方向試験から得られた応力度は、せん断試験から得られた相当応力度とほぼ対応することを確認した。軸方向試験から得られた加振ひずみ振幅 $\pm 10\%$ の応力度は $16.8\sim 19.1\text{ N/mm}^2$ であった。図2.4.8から得られる回帰曲線より、 10% ひずみのせん断応力度をVon Misesの降伏条件を用いて $\sqrt{3}$ 倍することで相当応力度を求めれば、 16.54 N/mm^2 となる。これは、低めの値であるが、軸方向試験の結果で示された程度の値を示している。
3. 鉛は、再結晶が完了している状態から最初にひずみを与えた場合(加工前)の弾性限は、再結晶が完了せずに継続してひずみを与えた場合(加工後)の弾性限より低い値を示す性質を持つ。軸方向及びせん断方向の動的繰返し試験においても、同様の傾向を確認した。
4. 加振振幅のひずみが同じ場合、加振周波数が大きくなるほど y 切片での応力度が大きくなる傾向があり、繰返し試験においてもひずみ速度に比例して応力度が大きくなる傾向が認められる。

第3章では、地震時に鉛ダンパーが受ける変形状態を想定して、せん断試験を行った結果をまとめた。この結果を用いて鉛ダンパーの復元力特性のモデル化を行った。鉛ダンパーに要求される性能を有しているかどうかの検討を行い、変形能力やエネルギー吸収量などの限界についても定義した。以下に得られた知見を示す。

1. I型鉛ダンパーの履歴曲線を図3.4.2に、U型鉛ダンパーの履歴曲線を図3.4.4に簡略化して示した。I型試験体の復元力特性は、変形が大きくなるに従いせん断力が大きくなる蝶型を示す。U型試験体の復元力特性は、小変形領域と大変形領域とで分けて考えることができる。
2. I型鉛ダンパーの復元力特性はハードニングの影響を受けて蝶型の形状を示し、U型鉛ダンパーの復元力特性はほぼ剛塑性の形状を示す。この復元力特性の違いは、地震時におけるフロアレスポンスに大きく影響を与える。ダンパーの復元力特性は、アイソレータの剛性に影響を与えない形状が理想的であるため、剛塑性型を示すU型鉛ダンパーが免震構造用ダンパーとして最適であると考えられる。
3. 鉛ダンパーの降伏耐力 P_y の評価については、鉛材が既に塑性領域に入っているために、厳密には弾性理論は適用できない。しかし、試験結果を理解する上で有効であると考えられるため、弾性論に基づいて鉛ダンパーを両端固定の曲げ部材と考えて、次式により降伏耐力 P_y と降伏応力度 σ_y を対応づける。

$$P_y = \frac{2Z_p\sigma_y}{H}, \quad Z_p = \frac{D^3}{6} \quad (3.4.7)$$

ここで、 P_y ：降伏耐力(N)、 Z_p ：円形断面の塑性断面係数(mm³)、 σ_y ：降伏応力度(N/mm²)、 H ：可撓部高さ(mm)、 D ：可撓部直径(mm)である。ここで、ダンパーの降伏耐力は直径 D の3乗に比例し、可撓部の高さ H に反比例することが分かる。

4. I型鉛ダンパーの場合、静的加力試験より得られた降伏耐力 PI_y と(3.4.7)式を用いて求めたダンパーの降伏応力度 σ_y は、13.1~21.0N/mm²の範囲にあり、平均値 $\bar{\sigma}_y$ は16.0N/mm²となった。動的加振時の降伏耐力は、静的加振時の降伏耐力の約1.3~1.9倍となっている。従って、動的加振時の降伏耐力は静的加振時の推定式(3.4.7)式を拡張して、次式のように示すことができる。

$$P'_y = \frac{\alpha \cdot 2 \cdot Z_p \bar{\sigma}_y}{H} \quad (3.4.8)$$

ここで、 $\bar{\sigma}_y$ ：静的加振時における平均降伏耐力、 α ：静的加力における降伏耐力の割増し係数($\alpha=1.3\sim1.9$)である。加振振動数、加振振幅が大きい場合には、 $\alpha=1.9$ の値を用いることができる。

5. U型鉛ダンパーの場合、縮小試験体を用いた動的試験から得られた降伏応力度 σ_y は、 $\bar{\sigma}_y=27.8\text{N/mm}^2$ であった。可撓部長さと高さの比 $L/H=1.18\sim 1.4$ の範囲であれば、U型鉛ダンパーについても、(3.4.7)式によって降伏耐力 P_y をほぼ推定することが可能であると言える。
6. 鉛ダンパーの最大変形能力は、可撓部の高さ H 及び可撓部の長さ L を用いて示すことができる。I型試験体の場合、 $0.7H\sim 0.9H$ 、U型試験体の場合、 $0.98L\sim 1.06L$ の範囲である。このときの試験体可撓部の伸びは30%程度と推定され、一軸引張の材料試験結果とほぼ対応する結果が得られた。
7. U型鉛ダンパーの変形能力は、最大耐力に達したときの変位を限界変位と仮定する。準静的に加振した場合の試験結果から、限界変位は可撓部高さ H を用いて示した場合、 $1.16H\sim 1.25H$ 、可撓部長さ L を用いて示した場合、 $0.98L\sim 1.06L$ の範囲であった。このときの試験体可撓部の伸びは30%程度と推定され、一軸引張の材料試験結果とほぼ対応する結果を示している。
8. 実験より得られたU型鉛ダンパーの破断までの繰返し回数と部材角 δ/H の関係を図3.4.31に示した。地震時において、ダンパーに要求されるエネルギー吸収能力は、累積ひずみエネルギー W_p として示すことができる。ダンパーに要求される吸収エネルギーは、地震時の最大変形を振幅とする閉ループの2サイクル分以上であることが、文献13)で把握されている。この結果に基づいて検証を行えば、図3.4.31より示される破断までの繰返し回数は、2サイクル以上を示しており、U型鉛ダンパーが十分なエネルギー吸収能力を保持していることを示すことが分かる。
9. 温度が変化した場合、鉛の機械的性質も変わる。特に懸念されるのは、①繰返し加振を受けたときの温度上昇による機械的性質の変化、及び、②寒冷地における低温下と温暖な地域における高温下での降伏耐力の違いである。
①の温度上昇による機械的性質の変化に関する確認試験は、高層ビルへの適用や、現在注目を集めている長周期地震動の影響などをあわせて考えると、何らかの条件で長時間振動が継続する可能性もあるため検証は必要である。通常では発生しないであろうと考えられるまでの繰返しを実施し、限界性能に問題がないことを確認した。(図3.4.29-図3.4.30) また、②の降伏耐力の違いについては、既往の研究結果と比較して予測が可能であることを確認した。(図3.4.34-図3.4.35)
10. 鉛の素材として、温度が変化すれば機械的性質が変わる。温度の影響で降伏荷重の値がどのように変化するかを縮小試験体を用いた実験より把握した。温度 20°C の時の値で基準化すると(3.4.16)式で示すことができる。

$$\text{耐力比} = -0.0040259 \times (\text{温度}) + 1.0805 \quad (20^\circ\text{C基準}) \quad (3.4.16)$$

11. 地震波は多くの周波数成分が複合されていると考えられる。鉛は、引張速度が大きくなると引張強さが増加する傾向がある。図 3.5.2 に示した地震波加振と定常波加振の荷重分布をみるとバラツキの範囲がほとんど同じであり、地震波と定常波では変位に対して周波数や地震の種類に関係なくほぼ同じ値をとると判断した。従って、定常波加振より得られた復元力特性に基づいて、地震時の復元力特性をほぼ推定できると考える。

第 4 章では、鉛ダンパーを設置した免震構造物の地震時の性能を確認するために応答解析を用いて検討を行った。ダンパーの復元力特性のモデル化が免震構造物の応答予測に与える影響について検討し、以下の知見を得た。

1. U 型鉛ダンパーの復元力特性は、大変形を許容する比較的大きな地震を対象とした場合、完全弾塑性型である単純 **bi-linear** でモデル化することにより、十分な精度で設計に必要な応答を予測することが可能である。
2. 鉛は極めて小振幅から降伏し、減衰能力を発揮する。小地震時や強風時などの小外乱の際の免震構造の挙動について検討を行う場合には、小変形時の特性を考慮した振幅依存 **bi-linear** モデルの使用が有効である。
3. 復元力特性の違いが応答変位に与える影響は、履歴曲線の面積を考慮することで、予測が可能である。下記に示す予測式、(4.3.11)式～(4.3.14)式で示すことができる。この予測式により、応答変位が増幅する場合でも充分安全性を確保できる範囲で予測が可能であることを示した。

▶ 振幅依存 **bi-linear** モデルの応答変位予測式

$0 < x_0 < \delta_e$ の場合

$$f(x) = \frac{x_0}{\beta + \frac{1-\beta}{2\delta_e} x_0} \quad (4.3.11)$$

$x_0 > \delta_e$ の場合

$$f(x) = \frac{x_0}{1 - \frac{1-\beta}{2x_0} \delta_e} \quad (4.3.12)$$

ここで、 x_0 : 単純 **bi-linear** の変位応答値

δ_e : 最大降伏変位(15cm)

β : 0.4145 ((3.4.1)式参照)

➤ tri-linear モデルの応答変位予測式

$0 < x_0 < \delta_e$ の場合

$$f(x) = x_0 \quad (4.3.13)$$

$x_0 > \delta_e$ の場合

$$f(x) = \frac{x_0}{1 + \frac{(x_0 - \delta_e)^2}{2\delta_e \cdot x_0} \gamma \cdot \kappa} \quad (4.3.14)$$

ここで、
$$\gamma = \frac{\gamma_k \cdot \gamma_e}{\gamma_{y2}}$$

$\gamma_k, \gamma_e, \gamma_{y2}$: (3.4.1)~(3.4.4)式参照, κ : 補正係数

4. 応答加速度は、振幅依存 bi-linear モデルの応答加速度より単純 bi-linear モデルの方が大きくなる傾向を示した。ややバラツキがみられるが、変形が大きくなるにつれて収束する結果となった。tri-linear モデルの加速度応答は、単純 bi-linear モデルの応答とほぼ同じ値を示した。

以上、別置型鉛ダンパーは免震用ダンパーとして要求される性能を十分保持しているものである。現在、実免震建物に使用される場合には、本研究で比較を行った神奈川大学の免震棟と同様に、鋼棒ダンパーと併用されることが多い。鉄を利用したダンパーも減衰能力と変形能力を所有しており、そのリサイクル率も高い、優れた金属であることも確かである。純鉛を使った別置型鉛ダンパーは、比較的小振幅から減衰能力を発揮することができる。頻発する小地震時や台風時などの風荷重に対しても鉛ダンパーは降伏することによって、エネルギー吸収能力を発揮し、早期に揺れを収束させる。中程度以上の地震に対しては、鉛ダンパーが剛塑性型の復元力特性を示すため、塑性領域に入れば免震構造本来の固有周期(免震周期)で揺れ、十分な免震効果が得られる。地震時には優れた変形追随能力を示し、その復元力特性が地震時のフロアレスポンスに与える影響は小さい。もちろんリサイクルも可能である。鋼棒ダンパーと併用されるより、むしろ単独で用いられる方がこれらの利点を十分に発揮することができる。

鋼棒ダンパーと併用される理由の一つに、コストの問題が指摘されている。現在の鉛ダンパーの降伏耐力では、鋼材ダンパーと比較して必要となる個体数が増えてしまうことが一因である。この問題を解消するために U180 鉛ダンパーの改良型ダンパーとして U2426 や U250 と呼ばれる可撓部直径を大きくした鉛ダンパーも使用され始めているが、やはり鋼材ダンパーが併用されている。本研究でもふれているが、降伏耐力を大きくするためには可撓部の直

径を大きくすることが有効である。しかし、直径を大きくするだけでは変形追随能力とのバランスがうまくとれなくなる。可撓部の軸に沿った長さを長くする必要があるのだが、このときに高さも変更させる必要がある。高さが高くなれば逆に降伏耐力の値は小さくなってゆく。現在の見解では、U180のプロポーシオンが最適であると判断しているが、更に効果的な形状を追求してゆく必要があると考えている。

本研究では、鉛ダンパーの復元力特性に着目して研究を行っている。このとき、2つの仮定が成り立つものとして評価を行っている。その仮定とは、

- 1) 鋼製フランジと鉛はホモゲン溶着で十分な強度をもって接合されている
- 2) 鉛ダンパーのベースプレートと免震層躯体は十分な強度をもって接合されている

1)の項目については、既往の研究および今までに実施した実験より、正確に処置が行われているものについては、ホモゲン溶着部は十分な引張強度を保有していることを確信している。2)の項目については、今後の課題の一つとなっていることを示しておく。2005年3月20日に福岡県で発生した福岡県西方沖地震において、躯体取り付け定着部のコンクリートが破損する事故が発生した。鉛ダンパーを固定するために設置されていたスタッドボルトの長さが短く、躯体コンクリート柱の鉄筋かごの内部に十分貫入していなかったことが原因である。免震部材の取り付け部には、部材に働く力を十分に伝達できる剛性や耐力が必要となる。設計段階において、取り付け部に対する配慮が不十分であった様である。これは、鉛ダンパーに限ったことではない。引張力や曲げを受ける全ての免震部材取り付け部の設計・施工の際には、細心の注意を払う必要があることを改めて認識させられた。今後の設計・施工にこの教訓を生かすことが重要で、取り付け部に関する研究も必要であると考えている。

また、本研究で行った地震応答解析では、風荷重などの比較的小外乱を意識したモデルの提案を行って検討を行ったが、長周期地震動に対する検討を行っていない。長周期地震動が発生した場合には、地震は継続時間が長く、また、卓越周期の関係で免震構造の変形が大きくなるのではないかと懸念されている。継続時間が長くなると、繰り返し振動を受けた鉛ダンパーは温度が上昇してくることが予想される。繰り返しに対する機械的性質の変化については実験的に検証を行い、ほぼその特性を把握していると考えている。今後は、変化した降伏耐力が振動応答特性に与える影響などにも着目して、長周期地震動に関する検討を進めていく必要があると考えている。

本研究で把握したダンパーとしての鉛の復元力特性は、鉛材のみならず錫などの超塑性材料の特性把握にも寄与するものであると考える。平易で確実に免震構造の構造性能を向上させるためのダンパー開発の一助となることを望む。