

鋼製U型ダンパーの性能確認試験

渡辺 厚¹・ 野呂 直以²

¹正会員 新日鉄エンジニアリング(株) 技術本部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

²正会員 新日鉄エンジニアリング(株) 橋梁部 橋梁設計室 (同上)

1 はじめに

橋梁構造物向けのいろいろな免震装置が実用化されているがそのほとんどが、桁自重を支える鉛直力支持機能と地震力のような水平力支持機能を一体化した機能一体型支承が大半である。機能一体型支承は、ダンパー量の自由度が少ないため減衰量が不足したり、地震後の点検や取替えが困難という問題を抱えている。この問題を解決するため、水平力支持機能を独立し、想定外の変形時にはジャッキアップ不要で取替えが容易な2方向に効果のある鋼製ダンパーを開発した。本論文では、①単体加力試験、②相似則の試験、③速度・温度依存性試験、④2方向加力試験の4種類の性能確認試験を報告する。

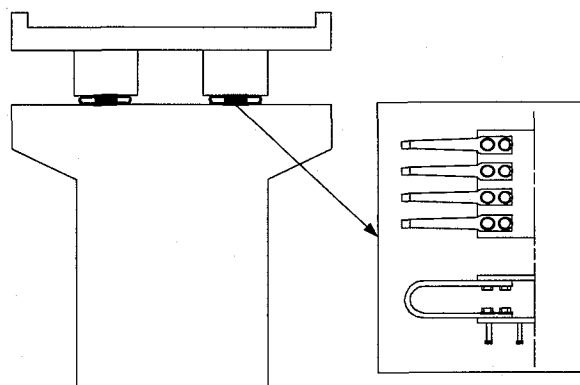


図1 適用例

2-1 単体加力試験

2章ではUダンパー単体での基本的な特性を把握することを目的とし、 $\pm 3.4, 5\text{cm}$ の小振幅は板厚36mm（一般サイズ）を使い、大きな変形に対してはやや小さなサイズの試験体（ $t=28\text{mm}$ ）について試験を行った。

2-2 試験概要

試験体を図2-1、に、加力方向の例を図2-2に示す。試験体の形状は、FEM解析により剛性・耐力の方向依存性をできるだけ少なくするように最適化し決定した。試

験体の鋼材は、優れた低サイクル疲労特性を確保し、かつ降伏強度のばらつきを少なくするために特別な成分管理を施したSM490相当品を使用した。

試験は、加力方向による影響を確認するため、0度方向から90度方向まで加力角度を変え実施した。試験内容を表2-1に示す。加力速度は、10mm/secで載荷した。

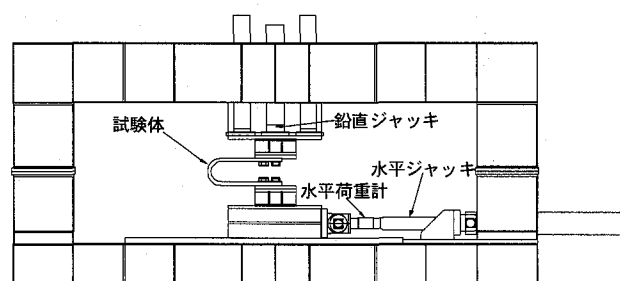


図2-1 試験装置図

2-3 試験結果

図2-3~5に0度・45度・90度方向の静的漸増加力試験結果を示す。各方向ともに安定した履歴特性を示している。図2-6~7に各加力方向における降伏せん断力、の関係を示す。降伏せん断力は、90度2.8tf~0度3.0tfの範囲であり、方向性による違いがあまり生じていない。なお、降伏せん断力は、振幅 $\pm 30\text{cm}$ の1サイクル吸収エネルギーが、試験値とバイリニアモデルによる計算値

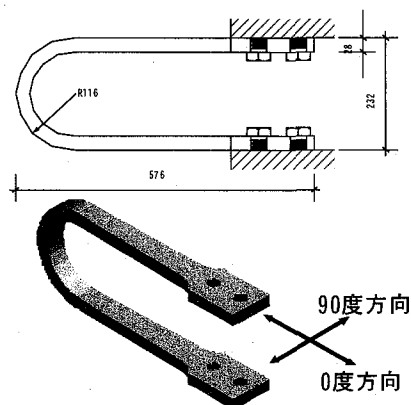


図2-2 試験体形状及び加力方向

とが等しくなるようにして求めた。表2-2に繰返し加力時の各方向における破断位置を示す。各方向によって破断位置が変化している。

表2-1 試験内容

振幅 (cm)	加力方向 (度)						
	0	15	22.5	30	45	60	90
±3.0	●	—	—	—	—	—	●
±4.0	●	—	—	—	—	—	●
±5.0	●	—	—	—	—	—	●
±20	○	—	○	—	○	—	—
±30	○	○	○	○	○	○	○
±50	○	○	○	○	○	○	○

○：漸増加力後、繰返し加力（一定振幅）

●：繰返し加力（一定振幅）

【吸収エネルギー】

各振幅における1サイクル吸収エネルギーを図2-7に示す。各方向共にほぼ等しい値となり、方向依存性が少ないことがわかる。

【疲労特性】

図2-8にダンパーが破断するまでの破断回数Nfと振幅 $\pm \delta t$ （片振幅）の関係を示す。振幅が $\pm 20\text{cm}$ で50回もつことがわかる。また、振幅が $\pm 40\text{cm}$ では20回もつことから想定外の大変形にも余裕があることが確認された。

温度変化による桁伸縮に対応する目的で、小振幅時についても、90度方向の降伏変位近傍の振幅 $\delta t = \pm 3, 4, 5\text{cm}$ の繰返し加力試験を行ない、その疲労性能を確認した。

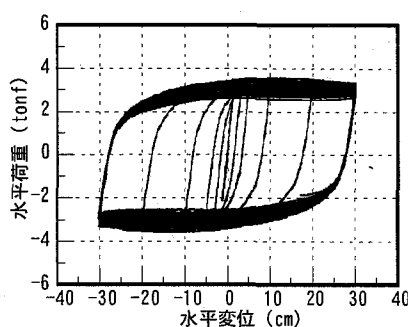


図2-3 0度方向加力結果
(板厚28mm)

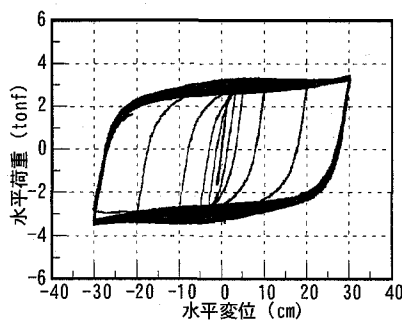


図2-4 45度方向加力結果
(板厚28mm)

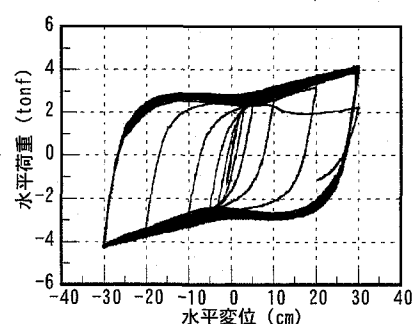


図2-5 90度方向加力結果
(板厚28mm)

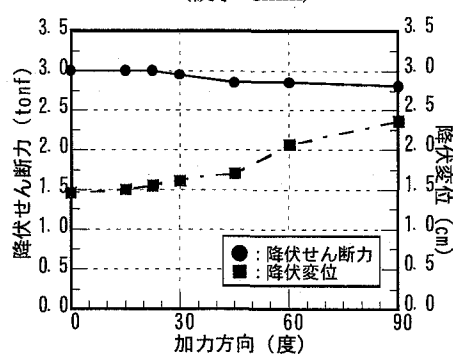


図2-6 各加力方向の力学的性状
(板厚28mm)

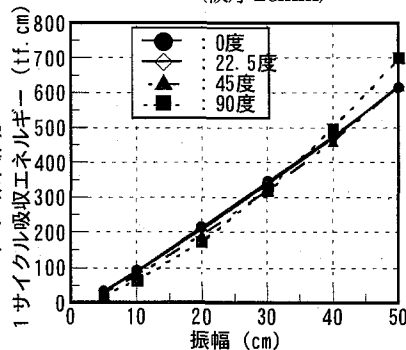


図2-7 1サイクル吸収エネルギー
(板厚28mm)

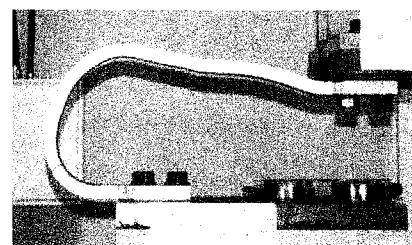


写真2 0度方向の変形状況(30cm)

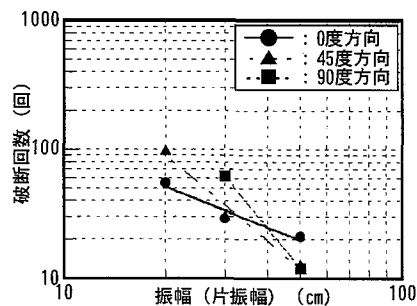


図2-8 疲労曲線
(板厚28mm)

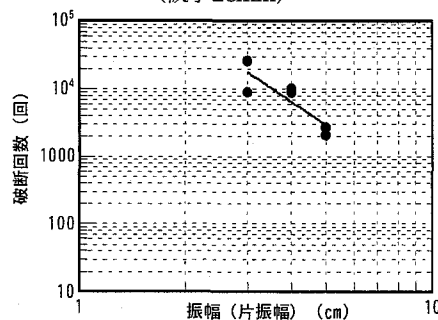


図2-9 90度方向の疲労曲線 (板厚36mm)
(温度変化による桁の伸縮の検討用)

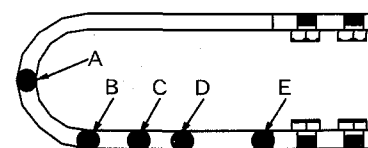


図2-10 繰返し加力の破断位置

表2-2 繰返し加力の破断位置

振幅 (cm)	加力方向 (度)						
	0	15	22.5	30	45	60	90
±3.0	B	—	—	—	—	—	E
±4.0	B	—	—	—	—	—	E
±5.0	B	—	—	—	—	—	E
±20	C	—	A	—	A	—	—
±30	D	A	A	A	A	A	E
±50	A	A	A	A	A	A	E

2-4 単体加力試験のまとめ

以上の試験結果から、U型ダンパーの単体での性能を確認した。各方向共に安定した復元力特性が得られ、耐力・剛性の方向依存性が少ないことを確認した。

3-1 相似則の確認試験

要求される変形量の違いには、同じプロポーショナルでサイズの違うダンパーを商品化するにより対応する。3章では、同じプロポーショナルで板厚の違う3種類のU型ダンパーについて比較を行い、そのスケールの違いによる差違について検討する。

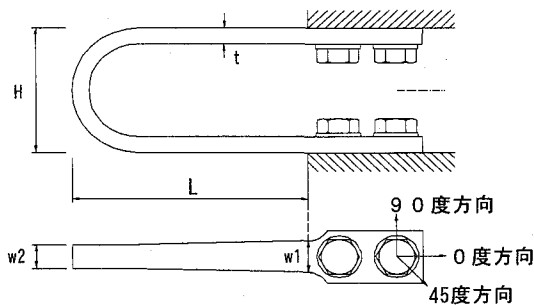


図3-1 試験体図

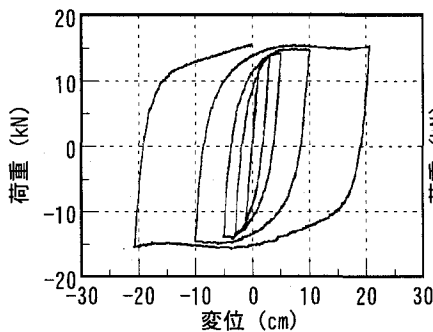


図3-2 T19 (t=19mm)
45度方向加力履歴曲線

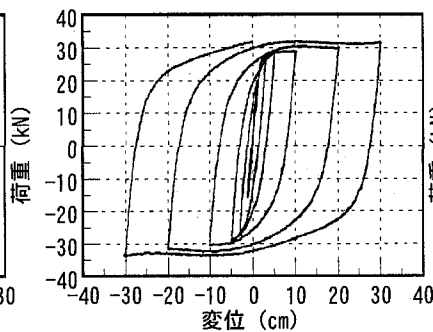


図3-3 T28 (t=28mm)
45度方向加力履歴曲線

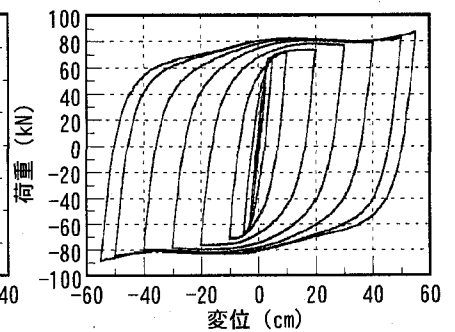


図3-4 T45 (t=45mm)
45度方向加力履歴曲線

3-2 試験概要

1) 試験体

スケールを変えた3種の試験体諸元を図3-1及び表3-1に示す。

2) 試験内容

試験体の上下端部をボルトで固定し水平方向に1方向漸増～定振幅繰返し载荷を行う。試験体に対する加力方向は0度、45度、90度の3方向とする。加力振幅は各サイズにおいて表3-2に示すような振幅の加力を行った。

表3-1 試験体緒元

ダンパー 種類	寸法 (mm)					降伏点 (kN/mm2)
	t	w1	w2	L	H	σ_y
T19	19	38	28.7	191	150	345
T28	28	60	44.4	300	232	355
T45	45	97	72.0	486	374	333

表3-2 加力振幅

ダンパー 種類	高さh (mm)	振幅 (cm)		
	高さ比率	T45換算振幅 (cm)		
T19	150	10.3	20.6	27.4
	0.401	25.7	51.4	68.3
T28	232	20.0	30.0	50.0
	0.620	32.2	48.4	80.6
T45	374	35.0	55.0	90.0
	1.000	35.0	55.0	90.0

3-3 試験結果

1) 初期剛性、降伏耐力

例として図3-2～4にT19、T28、T45の振幅20.6、30.0、55.0cmにおける45度方向の履歴曲線を示す。ここでの履歴曲線の形状は良い相似形を示している。

表3-4、5に上記の振幅における履歴曲線からバイリニアカーブにモデル化した初期剛性および降伏せん断力を示す。T45相当に換算した値 (T45換算値) を比較すると、多少のばらつきはあるものの初期剛性、降伏せん断耐力とも良い一致を示している。

2) 疲労特性と破壊形式

図 3-5 及び表 3-3 に繰り返し加力における破断位置を示す。破断位置は各サイズにおいてその関係はほとんど一致している。

表 3-6~8 に加力方向別に、繰り返し加力振幅と破断に至る繰り返し回数の関係を示す。また、図 3-6~8 は表 3-6~8 を T45 相当の振幅に換算し比較した疲労曲線である。スケールによる差は、板厚が厚くなると若干破断回数が少ない傾向を示すが、顕著ではない。

3-4 相似則の確認試験まとめ

同じプロポーションでスケールの異なる 3 種の U 型ダンパーの相似則について確認した。

- 1) 履歴特性については、スケールを合わせた相似倍率で剛性・耐力ともに良い対応を示した。
- 2) 疲労特性についてはスケールの違いによる低下があるが、顕著ではない。

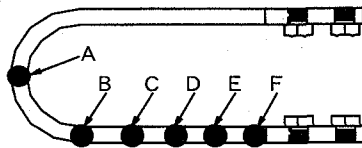


図 3-5 破断位置図

表 3-6 振幅と破断回数
(0 度方向)

T19		T28		T45	
振幅 (cm)	破断 回数	振幅 (cm)	破断 回数	振幅 (cm)	破断 回数
10.3	62	20	55	35	43
20.6	26	30	29	55	25
27.4	22	55	21	90	17

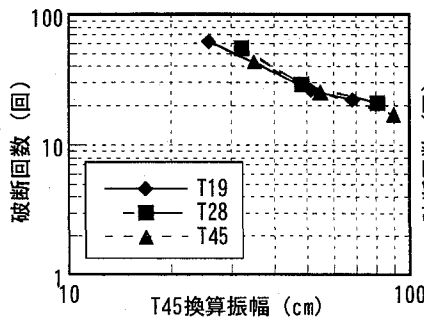


図 3-6 疲労曲線
(0 度方向)

表 3-7 振幅と破断回数
(45 度方向)

T19		T28		T45	
振幅 (cm)	破断 回数	振幅 (cm)	破断 回数	振幅 (cm)	破断 回数
10.3	158	20	99	35	—
20.6	31	30	31	55	23
27.4	16	55	13	90	9

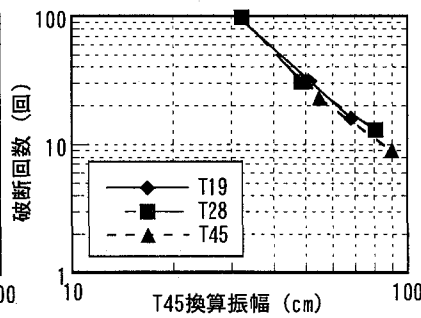


図 3-7 疲労曲線
(45 度方向)

表 3-8 振幅と破断回数
(90 度方向)

T19		T28		T45	
振幅 (cm)	破断 回数	振幅 (cm)	破断 回数	振幅 (cm)	破断 回数
10.3	—	20	—	35	—
20.6	51	30	62	55	30
27.4	13	55	12	90	7

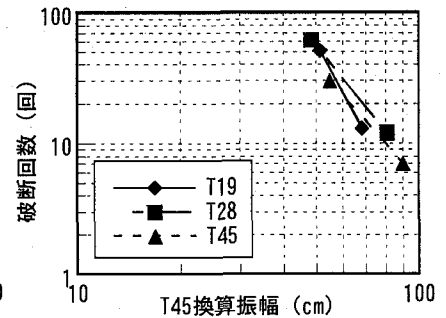


図 3-8 疲労曲線
(90 度方向)

4-1 速度・温度依存性試験

4 章では U 型ダンパーの地震時の動的な影響、使用温度環境による性能変化を確認する。

表 3-3 振幅、加力方向と破断位置の関係

T19				T28				T45			
振幅 (cm)	加力方向 (度)			振幅 (cm)	加力方向 (度)			振幅 (cm)	加力方向 (度)		
	0	45	90		0	45	90		0	45	90
10.3	C	E	—	20	C	A	—	35	C	—	—
20.6	D	A	F	30	D	A	F	55	D	A	F
27.4	D	A	F	50	A	A	F	90	A	A	F

表 3-4 バイリニア特性 (初期剛性)

加力方向	T19			T28			T45
	実験値 (kN/cm)	U1100 換算値 (kN/cm)	換算値 U1100	実験値 (kN/cm)	U1100 換算値 (kN/cm)	換算値 U1100	実験値 (kN/cm)
0 度	12.7	30.1	0.96	20.1	30.4	0.97	31.4
45 度	10.6	25.0	1.01	16.5	24.9	1.01	24.7
90 度	7.5	17.6	1.04	11.6	17.5	1.04	16.9

表 3-5 バイリニア特性 (降伏せん断耐力)

加力方向	T19			T28			T45
	実験値 (kN)	U1100 換算値 (kN)	換算値 U1100	実験値 (kN)	U1100 換算値 (kN)	換算値 U1100	実験値 (kN)
0 度	13.7	76.7	0.99	29.4	71.6	0.92	77.5
45 度	13.2	73.9	1.00	27.9	68.0	0.92	73.5
90 度	12.3	68.4	0.96	27.5	66.8	0.93	71.6

4-2 試験概要

1) 試験体形状、材質

試験体図と加力方向を図 4-1 に示す。本試験の試験体は、前章の試験体 (板厚 28mm) に対し、約 1/3.11 (=0.322) に縮小した相似形モデルである。

2) 試験内容

図4-2に試験装置図を示す。試験体の上下端部を載荷装置にボルトで固定し、490kNアクチュエータにより水平方向に強制変形を与える。加振は、正弦波による変位制御にて、ダンパーが破断に至るまで行った。試験体の温度調整は、加振装置の周囲を断熱材で養生し、加温にはジェットヒーターにて、冷却には液体窒素を用いて行った。表4-1に試験結果一覧を示す。加力方向は、0度方向、45度方向、90度方向の3方向で行った。

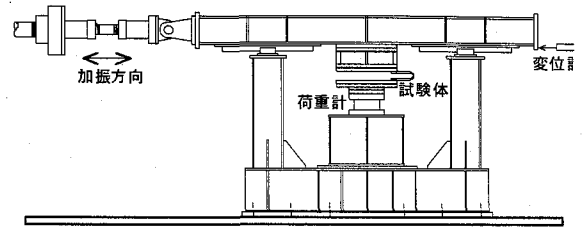


図4-2 試験装置図

表4-1 試験結果一覧 (板厚9mm)

温度 (°C)	加力方向	試験 体 No.	周期 (sec)	振幅 (cm)	最大速度 (cm/s)		破断 回数
					本報 試験体	実大換算値 (3.11倍)	
20	0度	1	静的	6.4	0.7	2.2	62
		2	2.8	6.4	14.3	44.4	55
		3	1.7	6.4	23.8	73.9	50
		4	1.1	6.4	35.7	111.1	52
	45度	5	静的	6.4	0.7	2.2	111
		6	1.7	6.4	23.8	73.9	77
	90度	7	静的	6.4	0.7	2.2	181
		8	1.7	6.4	23.8	73.9	174
40	0度	9	1.7	6.4	23.8	73.9	41
-10		10	1.7	6.4	23.8	73.9	42
-30		11	1.7	6.4	23.8	73.9	45
-50		12	1.7	6.4	23.8	73.9	45

4-3 試験結果

1) T28 と縮小試験体との比較

2章のT28と縮小試験体の比較を表4-2に示す。なお、縮小試験体の値は、T28に換算した値である。また、解析用バイリニアモデルの換算値は、最大振幅3回目のループの1サイクル吸収エネルギーと等価になるように近似して求めた。結果は、バイリニアモデル化した時の1次剛性、降伏せん断力ともに、ほぼ同等の値を示した。縮小試験体の破断回数は実大試験体よりも約10%多い程度で、概ね良い一致を示している。

2) 速度依存性

0度・45度・90度の各方向の振幅±6.4cmにおいて、最大速度を静的(0.7cm/s)、14.3cm/s、23.8cm/s、35.7cm/sに変化させた場合のバイリニアモデル値、1サイクル吸収エネルギー量、破断回数を比較した。図4-3、4に0度方向の静的(0.7cm/s)と最大速度23.8cm/sの復元力特性を示す。正弦波の载荷の影響で、速度が最大となる変位0の付近でわずかに耐力上昇が生じているのでやや丸みを帯びている。図4-7～9に各方向の静的加力の結果を1.0に基準化し、その増減の割合を比較した結果を、図4-10に破断回数と最大速度の関係を示す。

降伏せん断力、1サイクル吸収エネルギーは、ひずみ速度の増加にともない、最大速度35.7cm/sにおける降伏せん断力は+7%、1サイクル吸収エネルギーは+6%増加した。破断回数は、速度が増加する毎に減少したが、顕著ではない。1次剛性は、速度の変化による増加分は+2～3%であり、速度による影響は少ない。

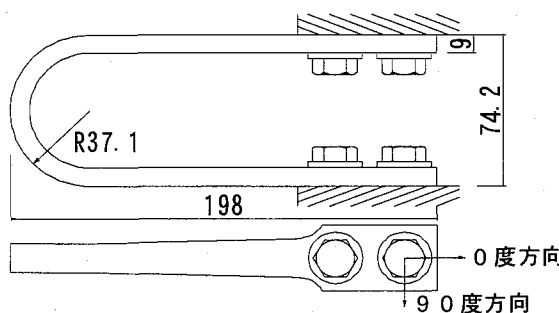


図4-1 試験体図 (板厚9mm)

表4-2 T28 (t=28mm) と縮小試験体 (t=9mm) との比較
(縮小試験体は換算値)

試験体 No.	加力 方向	振幅 (cm)	降伏せん断力 (kN)	1次剛性 (kN/cm)	1サイクル 吸収エネルギー (kN・cm)	繰返し回 数依存性 W1 (50) / W1 (3)	破断回 数
1	0度	20	30.3	20.4	2236	0.80	62
実大			29.4	20.1	2113	0.78	55
2	45度		28.2	16.3	2015	0.83	111
実大			27.9	16.5	1875	0.82	99
3	90度		28.2	11.3	1752	0.92	181
実大			27.5	11.6	1688	0.90	200以上

3) 温度依存性

0度方向の振幅±6.4cm、最大速度23.8cm/sにおいて、温度を40℃、20℃、-10℃、-30℃、-50℃に変化させた場合のバイリニアモデル値、1サイクル吸収エネルギー量を比較した。図4-5、6に面内方向最大速度23.8cm/sにおける-50℃と+40℃の復元力特性を示す。-50℃は変位0の付近でわずかに耐力上昇が生じているのでやや丸みを帯びている。図4-11、12に、20℃の結果を1.0に基準化し、その増減の割合を比較したものを示す。

降伏せん断力、1サイクル吸収エネルギーは、温度が低下する毎に増加し、降伏せん断力・1サイクル吸収エネルギー共に、40℃～-50℃で-3%～+10%変化した。

4-4 速度・温度依存性試験のまとめ

1) 速度・温度を変化させても安定した復元力特性を示した。前章のT45の試験体(板厚45mm)で、固有周期3秒、

振幅±35cmの正弦波と想定した場合、最大速度は73cm/sとなり、降伏せん断力は+3%増加する。

2) 温度の影響による復元力特性の変化は、実用上20～-10℃程度で使用する場合、+3%程度となる。

3) 縮小試験体により、本報の速度・温度範囲においては、速度・温度依存性を予測できることを確認した。

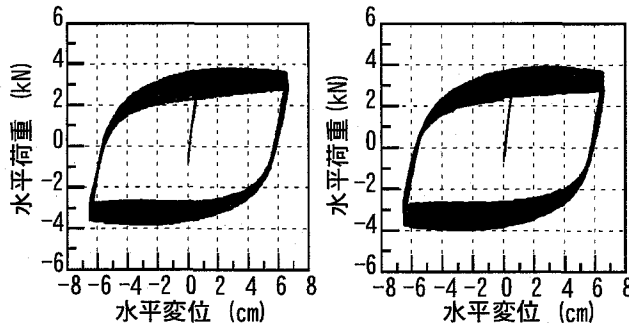


図4-3 0度 20℃ 静的 (t=9mm) 図4-4 0度 20℃ 23.8cm/s (t=9mm)

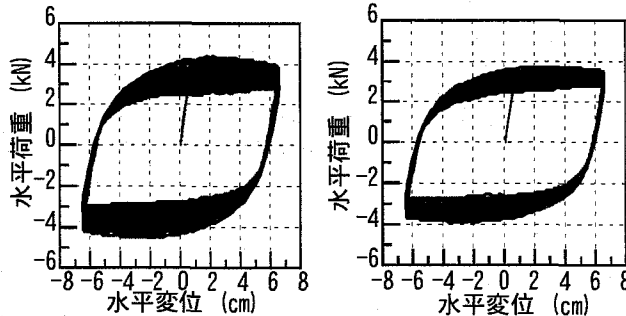


図4-5 0度 -50℃ 23.8cm/s (t=9mm) 図4-6 0度 40℃ 23.8cm/s (t=9mm)

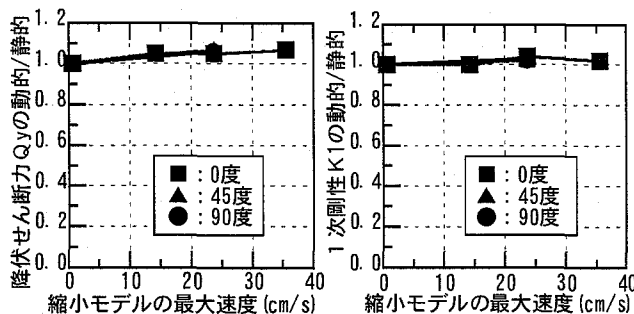


図4-7 降伏せん断力と最大速度 (t=9mm) 図4-8 1次剛性と最大速度 (t=9mm)

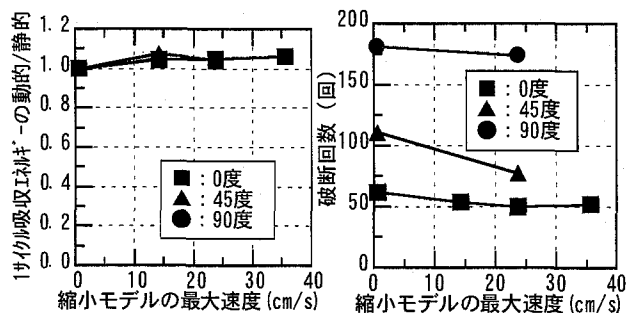


図4-9 1サイクル吸収エネルギーと最大速度 (t=9mm) 図4-10 破断回数と最大速度 (t=9mm)

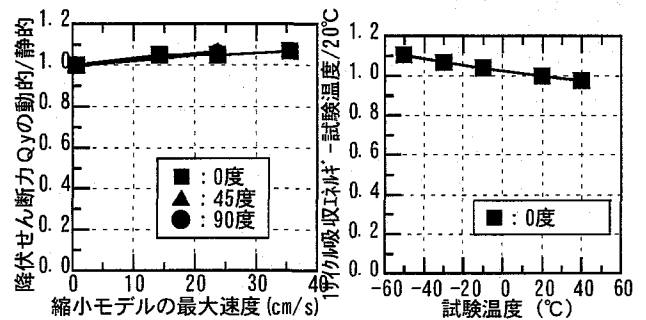


図4-11 降伏せん断力と速度 (t=9mm) 図4-12 1サイクル吸収エネルギーと温度 (t=9mm)

5-1 2方向加力試験

5章では、Uダンパーの2方向加力試験を行い、その性能を把握・確認する。

5-2 試験概要

1) 試験体形状、材質

試験体図は前章のT19と同じサイズを用いた。本試験の試験体は、縮小モデル(板厚19mm)で、例えば45mmのダンパーに対し、約1/2.3に縮小したものを使用した。ダンパーの鋼材は、縮小モデルの板厚19mmを曲げ加工後、熱処理したものである。

2) 試験内容

試験装置を写真5-1に示す。試験体は、試験体の両端部を上下の接続治具にそれぞれボルトで固定した。試験体への強制変形は、下部の治具を水平用オイルジャッキで加力しながら、上部の治具を鉛直用オイルジャッキで加力し、試験体に水平変形と鉛直変形を同じに与えた。

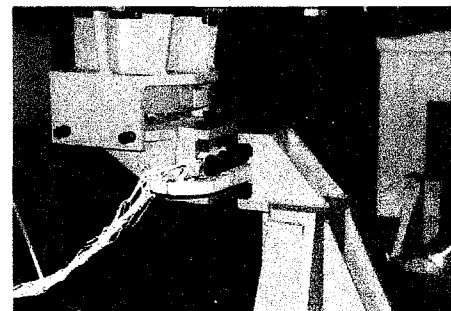


写真5-1 試験装置

5-3 試験結果

1) オフセット載荷【試験体1, 2 (比較対象6)】

図5-1, 2にオフセット載荷の復元力特性を示す。写真5-2に試験体2の25サイクル目の写真を示す。図5-8はオフセットなし(試験体6)の結果である。図5-2より45度方向オフセット載荷の場合は、降伏耐力に僅かな低下があるが、復元力特性に対するオフセットの影響はほとんどない。疲労特性については、オフセット載荷の

場合の方が、90度方向の疲労特性の影響を受けたため向上した。

2) 円形・楕円载荷【試験体3, 4, 5】

図5-3、5、7に円形・楕円载荷の2方向荷重特性を示す。円形、楕円载荷の図中で、一番内側の線は1サイクル目を示しており、2サイクル以降は歪み硬化の影響で耐力が上昇した。繰返し载荷毎に試験体の変形が進み、続いて0度の一方向一定振幅载荷に切り替え破断まで試験を行った(図5-4、6、8)。写真5-3に示すように、円形や楕円の载荷は一方方向载荷に比べてねじれ変形による残留変形が大きいが、復元力特性への影響は意外に少ない。また、その後の一方方向载荷試験での結果から、復元力特性はやや2次勾配が上昇しているが安定しており、ある程度の疲労特性を残していることが確認できた。

5-4 2方向加力試験のまとめ

- 1) 一方方向载荷試験の復元力特性は、オフセットの影響をほとんど受けない。
- 2) 円形・楕円载荷は、ダンパーのねじれ変形が大きいが、破断まで安定した復元力特性を示した。疲労特性は、一方方向载荷による疲労特性に比べ劣る。
- 3) 試験体3の結果を板厚45mmのダンパーに板厚の寸法効果を加味して換算すると、半径38cmの円形载荷を5回繰返した後で、±38cmの一方方向一定振幅下で約30サイクル程度に耐える能力に相当する。

表5 試験内容

試験体No.	加力方式	加力図	試験結果
1	OEESSET面外 19.4cm ↓ 0度 ±19.4cm		33サイクル目で破断
2	OEESSET45度 19.4cm ↓ 45度 ±19.4cm		48サイクル目で破断
3	正円 R=16.2cm		正円5サイクル目で中断、0度方向±16.2cm加力で35サイクル目で破断
4	正円 R=19.4cm		正円4サイクル目で中断、0度方向±19.4cm加力で17サイクル目で破断
5	楕円 長半径19.4cm 短半径9.7cm		楕円6サイクル目で中断、0度方向±19.4cm加力で11サイクル目で破断
6	0度方向 ±19.4cm		29サイクル目で破断

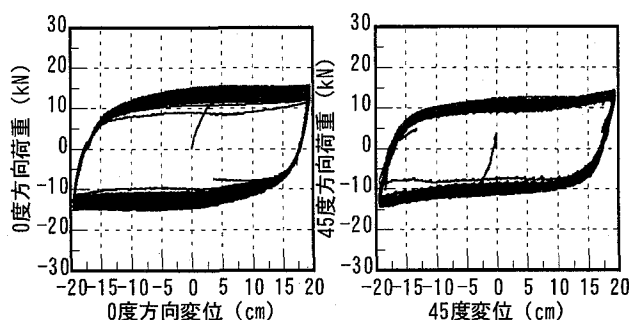


図5-1 No.1 復元力特性
(t=19mm)

OFFSET90度19.4cm→
0度19.4cm

図5-2 No.2 復元力特性
(t=19mm)

OFFSET45度19.4cm→
45度19.4cm

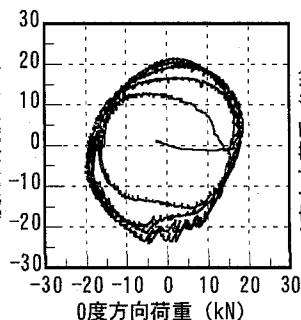


図5-3 No.3 復元力特性
(t=19mm)

正円 (R=16.2cm)

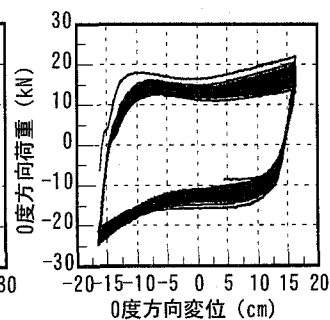


図5-4 No.3 復元力特性
(t=19mm)

正円载荷後0度繰返し

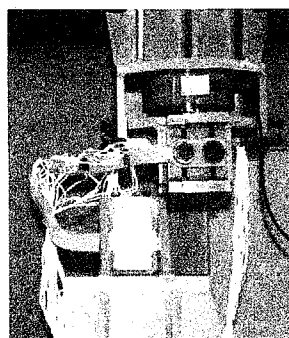


写真5-2 No.1 変形状況
25サイクル目(OFFSET)

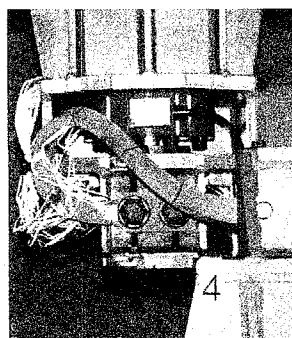


写真5-3 No.2 変形状況
4サイクル目正円(R=19.4cm)

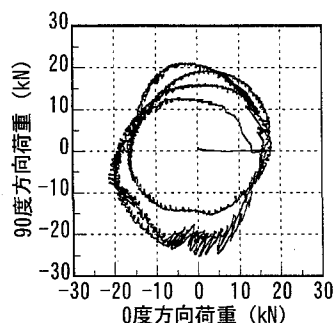


図5-5 No.4 復元力特性
(t=19mm)

正円 (R=19.4cm)

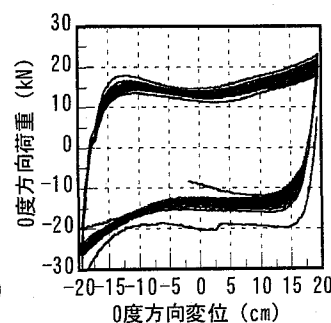


図5-6 No.4 復元力特性
(t=19mm)

正円载荷後0度繰返し

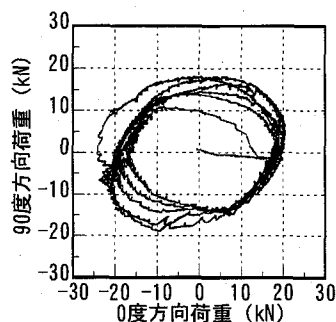


図5-7 No.5 復元力特性
($t=19\text{mm}$)

楕円 (長径 19.4cm, 短径 9.7cm)

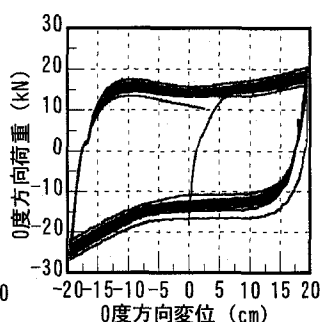


図5-8 No.5 復元力特性
($t=19\text{mm}$)

楕円載荷後 0度繰返し

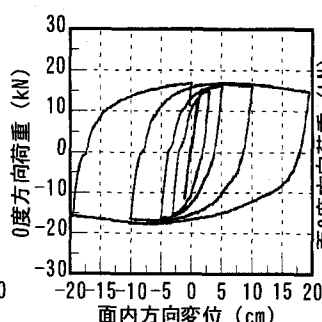


図5-9 No.6 復元力特性
($t=19\text{mm}$)

面内 0度漸増加力

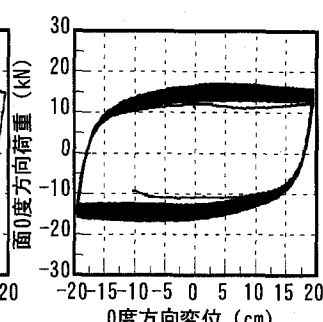


図5-10 No.6 復元力特性
($t=19\text{mm}$)

面内 0度繰返し加力

6 まとめ

Uダンパーの特徴は、支承機能分離型のためダンパーの設置本数を自由に選ぶことによって、橋梁上下部工に作用する地震力を容易にコントロールできることである。既設橋では、保有耐力の大きな橋脚に上部工慣性力を負担させるようにUダンパーの設置本数を調整し、保有耐力の小さな橋脚には慣性力を軽減することが可能になり、橋梁全体の地震被害を低減し、耐震補修費を縮減できる。

本論文では、鋼製U型ダンパーの①単体加力試験、②相似則の試験、③速度・温度依存性試験、④2方向加力試験の4種類の性能確認試験を行った。試験結果から以下の内容が明らかになった。

- ①各方向の履歴特性の形状に大差はなく、どの方向に対しても安定し、設計で想定する変形 (たとえば最大振幅で50サイクル程度の疲労特性を持つ変位) の2倍程度の巨大変位に対しても、20サイクル程度の疲労特性を持つことため、想定外の大変形に対しても余裕度が高い。
- ②スケールの違いによる履歴特性は、ほぼ相似形が成り立つ。疲労特性は、板厚が厚くなるとやや低下する。
- ③速度依存性や温度依存性は数%以内で、影響は少ない。
- ④2方向載荷での履歴特性は安定している。疲労特性については、1方向載荷との関連付けを行う必要がある。

今後、上記の結果を踏まえ、さらに橋梁構造への使い方を検討していく予定である。

謝辞

4章の試験に関して福岡大学の高山教授をはじめ、高山研究室の方々に協力していただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木、佐伯、渡辺他：免震U型ダンパーに関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 その1、2 1999.9
- 2) 鈴木、渡辺、高山他：免震U型ダンパーに関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 その3、4、5、6 2000.9