

免震部材の調査報告

－鋼材ダンパー調査結果（中間報告）－

（社）日本免震構造協会 免震構造設計部会 ダンパーWG

1. はじめに

免震部材におけるダンパーの役割は、振動時のエネルギー吸収によって免震建築物に減衰性能を付与し、地震時に生ずる上部構造と地盤との過大な相対変位を抑制することにある。ダンパーは作動原理の面から、①履歴系ダンパー②流体系ダンパー③粘弾性系ダンパーの3種類に分類される。東北地方太平洋沖地震において、これらのダンパーは免震効果として有効に機能したと考えられるが、震災後の免震層の点検において、履歴系ダンパーのうち、鋼材ダンパーの塗装の剥落・ボルトの緩み等の現象がみられることから、第14回 免震フォーラムでの「東北地方太平洋沖地震に対する応答制御建築物調査（中間報告）」の抜粋版として、これらに関する技術的所見および今後の検討課題について以下に報告する。

2. 鋼材ダンパー（U型およびループ型）

2-1 被災後に確認された現象

鋼材ダンパーに関して被災後に確認された主な現象は下記の3項目である。

① ダンパーロッドの残留変形

鋼材ダンパーのダンパーロッドに残留変形がある（写真2-1）。

② ダンパー取付ボルトの回転

ダンパーロッドをベースプレートに取り付けるボルトが回転し、マーキングがずれている（写真2-2）。

③ 塗装の剥離

ダンパーロッド取付部周辺やダンパーロッド部の塗装が剥離している。

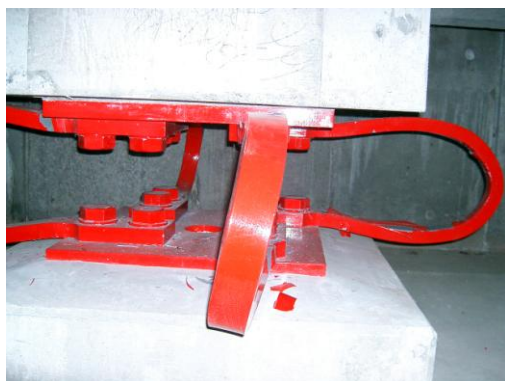


写真 2-1 ダンパーロッドの残留変形と塗装剥離

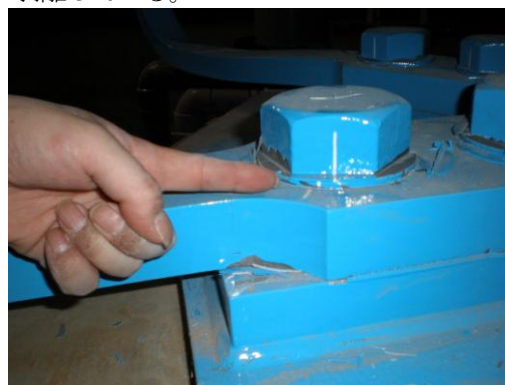


写真 2-2 ボルトの回転および塗装剥離

2-2 技術的所見

従来の試験において①～③までの状況は、大きな地震に対しては起こりえる事象として、その可能性をあらかじめ認識してきたが、今回の長周期・長時間の地震で顕在化している。

(1) ボルトの緩み

ダンパーロッドを固定するボルトはダンパーロッドの交換を可能とするため、せん断ボルトとして設計しており、ボルトまわりのクリアランスによるガタ付きやループダンパーの端部回転により、ボルトが回転したと判断される。また、従来の性能試験においてもボルト緩みの影響を含んだ試験結果において評価を行っている。なお、ボルトの締付については、表 2-1 に示すようにボルトの締め付け状況をパラメータとした性能確認試験を別途実施しており、その影響を確認している。

表 2-1 ボルトの締付け状況をパラメータとした性能確認試験の一例

形式名	試験体 No.	加力方向	ボルト締付け状態	繰返し加力振幅 (mm)	試験結果				試験結果バラツキ(実験値/規定値)			
					破断に至る繰返し回数 (回)	1次剛性 (kN/m)	2次剛性 (kN/m)	降伏荷重 (kN)	1次剛性		降伏荷重	
									規定値 (kN/m)	規定値に対する比	規定値 (kN)	規定値に対する比
NSUD50x4 (規定変位 30cm)	1	A	通常トルク管理	±750	5	7,968	144	237	8,320	0.95	232	1.02
	2	A	ゆるみ1回転		2*	3,094	144	310	8,320	0.37	232	1.33
	3	A	ゆるみ60度	±300	6	5,200	144	248	8,320	0.62	232	1.06
	4	A	ゆるみ60度	±750	46	4,989	144	251	8,320	0.59	232	1.08
	5	A	トルク+接着剤	±750	6	8,707	144	241	8,320	1.04	232	1.03

* ボルトねじ部の損傷によりダンパー破断前に実験を終了した

(2)塗装の剥離

ダンパーロッド部分の剥離は、地震時にダンパーとして機能を発揮し、鋼材が塑性変形を繰り返したことによるものと判断される。また、ボルト周辺部の剥離は、ダンパーの繰返し変形に伴ってボルトの回転やダンパーロッドとベースプレートのズレが発生したことによるものと判断される。

2-3保有性能に対する影響

(1)ダンパーロッドの残留変形

鋼材ダンパーは塑性化してエネルギー吸収を行うとダンパーロッドに変形が残るが、残留変形が確認された後も安定した履歴ループのエネルギー吸収性能を維持することが実験において確認されている。よって、必要に応じて、疲労損傷度の確認を行うことにより継続使用が可能である。

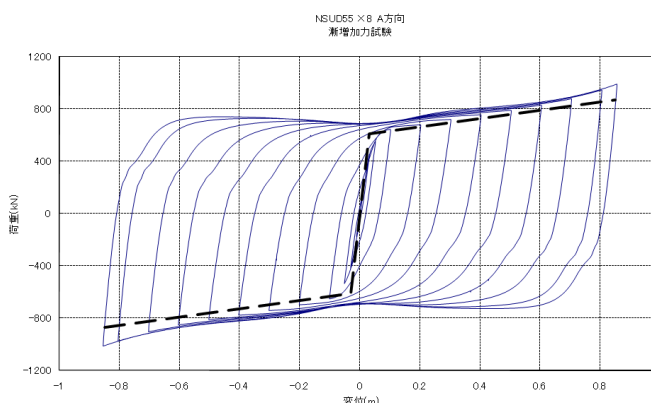
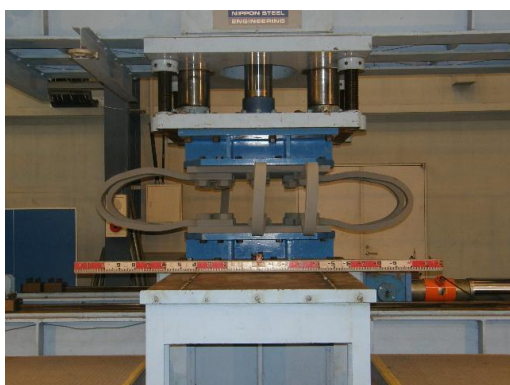


写真 2-3 漸増載荷終了後 (振幅±1cm~±85cm)

図 2-1 漸増載荷試験の荷重-変位関係

(2)ダンパーボルトの回転

せん断ボルトとしての機能を発揮出来るかぎりにおいては、急激なエネルギー吸収性能の低下はないと考えられるが、ボルトの緩みが確認された場合は、初期状態に戻すために緩んだボルトは締め直す必要がある。

(3)破断までの残存性能

ダンパーがエネルギー吸収をしたことによる疲労損傷度の確認が必要な場合は、ダンパーの疲労曲線とマイナー則を用いた検討法等により、評価可能である。検証法については、いくつかの手法が提案されている。

①Miner則による検討法

免震層の加速度記録の積分や罫書き変位計、応答解析等で免震層の変位履歴が判る場合は、変動振幅毎の繰返し数に計数し、疲労曲線から各振幅毎の疲労損傷度を算出し、その総和を累積損傷度とするMiner則を用いる方法がある。Miner則は、鋼材の低サイクル疲労評価法として一般的に用いられている手法で、式(1)により評価される。

$$D = \sum(n_i / N_{fi}) \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

D: 累積損傷度

n_i : i 番目の振幅の繰り返し数

N_{fi} : i 番目の破断回数(振幅から疲労曲線を適用して計算)

②最大変位から簡易的に推定する方法

免震建物周囲の可動設置物（段差吸収スロープなど）の移動などから、最大変位のみが判る場合の簡易的な疲労損傷度の推定法として、1回の地震入力エネルギーを最大振幅に換算した繰り返し回数で検討する。

2-4 対策

地震の影響を受けた鋼材ダンパーについて疲労による交換の必要がないと確認された場合は、地震後の維持管理として以下の作業が必要である。実施時期については、余震の可能性が低くなったのちの適切な時期（応急点検後や次回の定期点検時などに合わせて）が考えられる。

- 1) 回転したダンパーボルトの増し締め。
- 2) 剥離した塗装部のタッチアップ塗装。
- 3) ダンパーボルトの再マーキング。

2-5 交換に対する考え方

ダンパーロッド部に疲労による亀裂が確認される場合には、残存性能が少なくなっていると判断されるため、速やかに交換が必要である。ただし、今回の震災では亀裂が確認されたという報告はない。

また、亀裂が確認されていなくても交換が必要となる場合があるので、必要に応じて、前述の提案されている検証法にて確認した残存性能にもとづき、交換の可否を設計者が判断する。

2-6 今後の対応および課題

(1) ダンパーのエネルギー吸収性能について

ダンパーのエネルギー吸収性能については、今回の地震後の残存性能の確認と今後想定される長周期地震動に対する設計に関して以下の検討を行う。

① 今回の地震後のダンパー残存性能の確認

今回の地震において被災した建物の鋼材ダンパーについて、可能な範囲でその残存性能を確認する。（石巻赤十字病院では、ダンパーを取り出して加振試験を行い、残存性能から疲労損傷度が7%であることを確認した。これは、罫書き変位記録から算定した疲労損傷度と良い対応を示した。（表2-2）

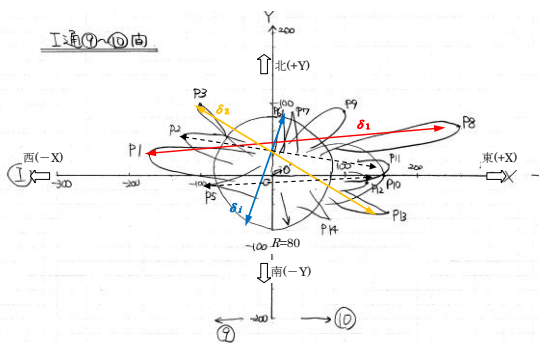


図 2-2 免震層の罫書き変位記録（石巻赤十字病院）

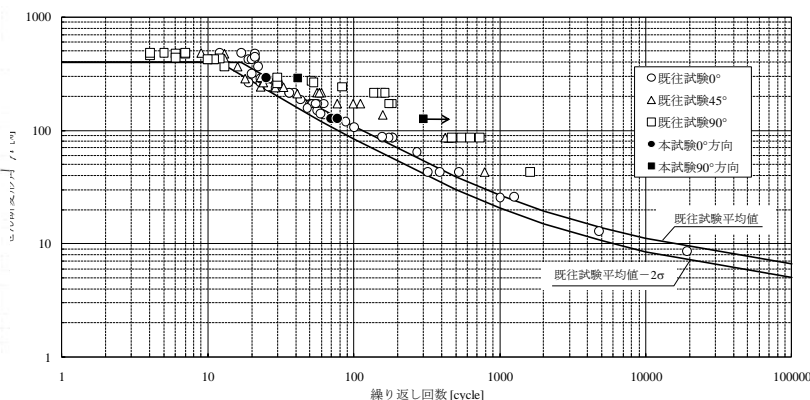


図 2-3 鋼材ダンパーの疲労曲線

表 2-2 ダンパー疲労損傷度検討結果（石巻赤十字病院）

	振幅±213mm ($\gamma t=127\%$)における破断までの繰返し回数	累積損傷度 D	備考
無損傷状態の初期値	80	-	疲労曲線（図 2-3）の既往試験平均値より算出
Miner 則による震災後の推定残存値	76	5%	罫書変位記録（図 2-2）より算出
加振試験結果	74	7%	震災後に建物から取り出した試験体 3 体の平均値

②今後の長周期地震動に対して

継続時間の長い長周期地震については、今後の発生が予見されている東海・東南海・南海地震に対して、従来考えられていた地震動の入力エネルギーよりも大きなエネルギーを設定して対策を講じる動きが始まると想定し、疲労性能に関する資料を用意する。

a. ダンパー残存性能の検証法の検討

目視により鋼材ダンパーの残存性能を検証する手法について検討する（図 2-4）。

b. 繰り返し加振中のエネルギー吸収性能の変化

繰り返し加振においてエネルギー吸収性能が変化することについて、サイクル数とエネルギー吸収量の低下の関係を明示し、設計時に考慮できるようにする（図 2-5）。

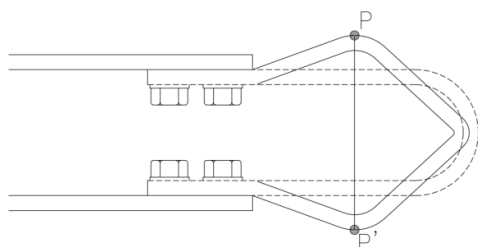


図 2-4 U型ダンパーの形状変化

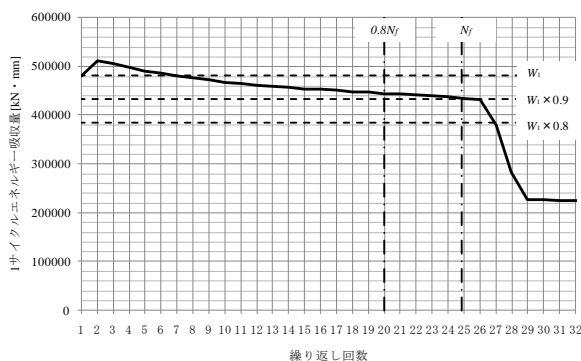


図 2-5 繰り返し加力に伴うエネルギー吸収性能の変化
 (NSUD50×4 振幅±600mm A 方向)

(2) ボルトの緩みに対して

今回のボルト緩みの発生状況を鑑み、以下の対応を行う。

a. ボルト緩み現象の通知

既納入鋼材ダンパーが健全な状態に維持管理されるために、地震時のボルト緩み発生とその後の再締め付けが必要なことを発信。

b. ボルト緩み対策（既納入案件）

上述の通知に加え、地震によるボルト緩みが発生しにくくなるような対策を検討。

c. ボルト緩み対策（今後の出荷案件）

ねじ部に接着材を塗布することによりボルトが緩みにくくする対策を確立（表 2-3）。交換の際のボルト取り外しについても、加熱により接着剤を軟化させる方法や大トルクにより緩ませる方法を検証済み。

表 2-3 ボルト緩み状況



サイズ	加振振幅	ボルト緩み発生サイクル
UD50×8 (対象 2 本)	±5cm×100サイクル、±10cm×30 サイクル、±15cm・20cm×1 サイクル	最終サイクルまでボルト緩み 発生無し
UD50×4	±1cm～±75cm×1 サイクル、以後 ±75cm を破断まで	漸増±75cm のサイクルでボル ト緩み発生
UD50×4	同上	漸増±60cm のサイクルでボル ト緩み発生
UD50×4 (接着剤無)	同上	漸増±10cm のサイクルでボル ト緩み発生

写真 2-4 接着剤塗布状況

(3) 塗装について

ボルト緩み現象と同様、必要に応じて塗装の補修が必要である旨を通知。

今後は現行仕様よりも変形追従性の良い新塗装を確立。

以上