

連携記事

鋼材の塑性変形による エネルギー消散を利用した制震・免震技術

Anti-Seismic Technologies Utilizing Steel Post-Yielding Characteristics of Energy Dissipation

新日鉄エンジニアリング(株)
建築・鋼構造事業部

川村典久
Norihiisa Kawamura

新日鉄エンジニアリング(株)
建築・鋼構造事業部

小西克尚
Yoshinao Konishi

新日鉄エンジニアリング(株)
建築・鋼構造事業部

小西宏明
Hiroaki Konishi

1 緒言

地震国である我が国の建築物は、予測できない大地震にいかに対応できるかが最大の課題である。平成7年の兵庫県南部地震では、倒壊を免れて人命を守ることができたものの、鉛直荷重を支える柱梁等主架構の大きなダメージにより継続使用が不可能となり、資産価値を損なうこととなった建物も少なくない。ここに、大地震の際には主架構にある程度の損傷(塑性変形)を許容し、塑性変形後の強度やねばり強さ(変形能力)に期待することで倒壊を防いで人命を守る「耐震構造(図1(a))」の効果が証明された一方で、建物資産の保全が課題としてクローズアップされた。この課題を解決する手段として、鉛直荷重を支持しない筋かい・壁などの部位に制震装置を組み込み、地震エネルギーを吸収・消散する箇所を限定することで主架構を健全に保つ「制震構造(図1(b):制振構造とも表記)」が提案され、これまでに多くの建物で採用されてきた(図2)¹⁾。また免震装置が配置される免震層のみを大きく変形させることで居住・執務空間である上部構造に伝わる揺れを軽減する「免震構造(図1(c))」も広く普及し

てきた(図3)¹⁾。兵庫県南部地震以降の度重なる地震、例えば、平成12年の鳥取県西部地震、平成15年の十勝沖地震、平成16年の新潟県中越地震、平成20年の岩手・宮城内陸地震に対して制震・免震構造の建築物が健全性を保ったことも、その普及を後押ししたといえる。平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に対しても、制震・免震構造の建築物において設計で意図した効果が確認されている^{2,3)}。

制震構造では、筋かい型や壁型の制震装置(ダンパー)として鋼材など金属を利用したものやオイルを利用したものなど多様な装置が開発・実用化されてきた。免震構造でも、柱の下に配置する積層ゴムなど支承機能をもつ装置の他に、ダ

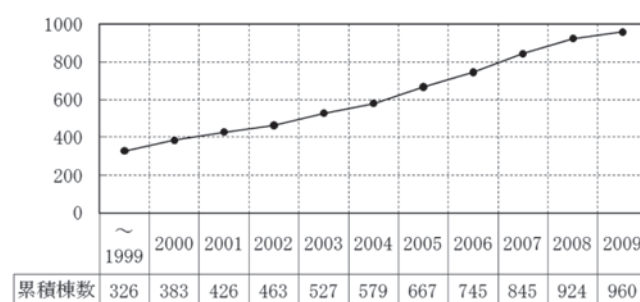


図2 制振建物棟数の推移(一般社団法人日本免震構造協会提供)

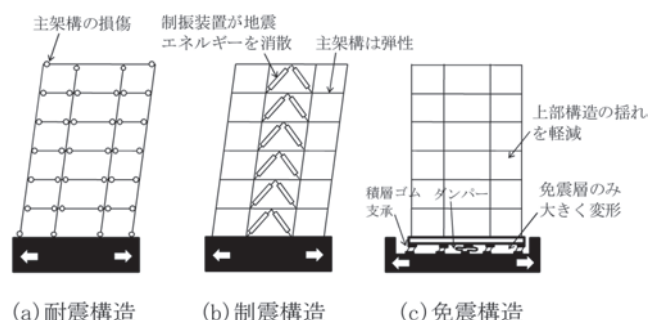


図1 構造形式の比較

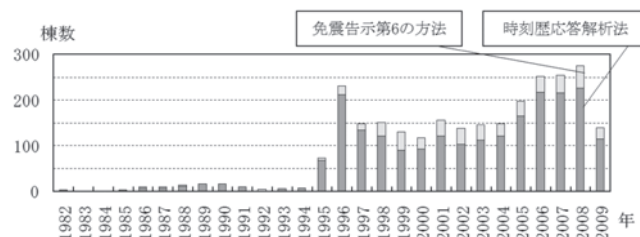


図3 免震建築物計画推移(一般社団法人日本免震構造協会提供)

ンパーとして鋼材、鉛、オイルを利用したものなど多種実用化されている。制震構造や免震構造におけるダンパーは地震の大きなエネルギーを吸収・消散する重要なデバイスであり、中でも鋼材の塑性変形によるエネルギー消散を利用したものは、大きな容量と安定した品質を有することから実績も多い(図4)¹⁾。例えば制震構造では、軸力を受ける鋼材の座屈を鋼管とモルタルで拘束したアンボンドブレースが超高層ビル等で多数使用され(写真1)、近年では橋梁・建築物の耐震補強やプラント架構への適用事例も増えている(写真2)⁴⁾。免震構造では鋼板をU字型に成形した免震U型ダンパーが、

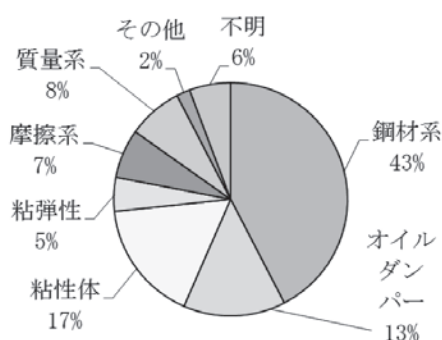


図4 制振部材の使用割合 (一般社団法人日本免震構造協会提供)



写真1 アンボンドブレース適用事例 (高層建築)



写真2 アンボンドブレース適用事例 (橋梁耐震補強)

病院、庁舎、集合住宅など公益性の高い建物を中心に多数採用され、建築物以外ではプラント架構への適用も図られてきた(写真3)。

本稿では、制震構造に用いられるアンボンドブレースと、免震構造に用いられる免震U型ダンパーについて述べる。

2 アンボンドブレース

2.1 アンボンドブレースの概要

鋼材はコンクリートなど他の構造材料と比べて強度・剛性が高いため、細長くかつ断面を小さくできる利点を有する。一方でこのような細長い部材を圧縮力に対して使用する場合には不安定現象である座屈に対する配慮が必要となる(図5(a))。アンボンドブレースは、軸力を受ける中心鋼材(以下、芯材という)を鋼管とモルタルとで被覆し、さらに芯材とモルタルの間にはアンボンド材と呼ばれる緩衝材を配置することで、鋼管とモルタルには軸力が伝わらない構造となっている(図6)。この機構により座屈を防止するとともに、鋼材の塑性領域における引張・圧縮同性状の安定した荷重-変形関係を実現している(図5(b))。また芯材がモルタルによ

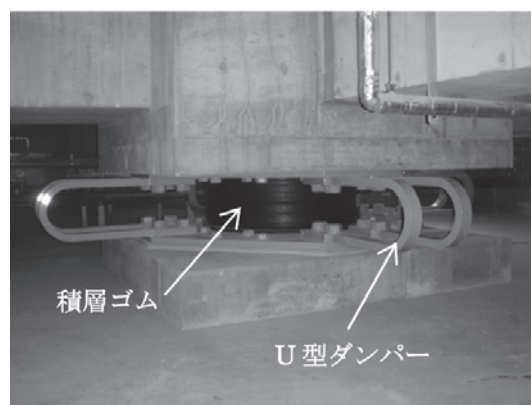


写真3 U型ダンパー設置事例

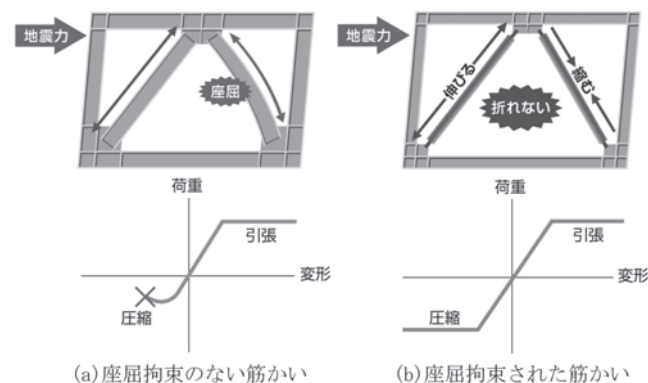


図5 地震力に対する筋かい材の挙動

て一様に拘束されていることで局所歪が最小化され、大変形領域での高い繰返し疲労性能を実現し、安定した弾塑性繰返し挙動を介して地震エネルギーを熱エネルギーとして消散する制震ダンパーとしての鋼材の利用を可能なものとしている。アンボンドブレースを制震ダンパーとして適用する場合には、地震時に主架構を弾性領域に留め、塑性化して地震エネルギーを吸収・消散する部位をアンボンドブレースのみに限定する目的で、芯材には降伏点を管理したLY225などダンパー専用の特殊鋼材が一般的に使用される。

鋼材を制震ダンパーとして利用する際には、その繰返し疲労特性を把握し、構造物の供用期間中に想定される地震に対して疲労設計を行うことが重要である。アンボンドブレースの繰返し疲労特性は、歪振幅、芯材板厚、形状、鋼種などをパラメータとした数多くの実大実験で確認されており、以下にその一部を紹介する。

試験体の例を図7に、試験体設置状況を写真4に示す。TP4、TP5は、塑性変形する部位を限定することで歪振幅を

増幅し、より小さな変形からエネルギーを吸収・消散させる適用法を想定した試験体である。TP6は超高層ビルなどで使用される実大の部材を想定し、芯材に板厚40mmのLY225材を使用した大容量試験体である。試験結果として縦軸に歪、横軸に破断までの繰返し回数を取って対数グラフ上にプロットしたものを図8に示す。アンボンドブレースの繰返し疲労特性は芯材の形状や鋼種による差異が小さく、縦軸に歪を取って無次元化することで下式に回帰することができる。

$$\Delta \epsilon_t = 1.06 N_f^{-0.17} \quad (\Delta \epsilon_t \leq 0.22\%)$$

$$\Delta \epsilon_t = 20.48 N_f^{-0.49} \quad (\Delta \epsilon_t > 0.22\%)$$

ここで $\Delta \epsilon_t$ は歪振幅(全振幅)を、 N_f は破断回数を表している。上述の座屈拘束機構により、一般的な建物の層間変形角1/100に相当する $\Delta \epsilon_t \cong 1.5\%$ で疲労寿命200回程度、TP4、TP5のような方法で増幅させた場合の歪振幅 $\Delta \epsilon_t \cong 4\%$ で疲労寿命30回程度を実現しており、制震ダンパーとして優れた疲労特性を有していることが確認されている⁵⁻⁷⁾。

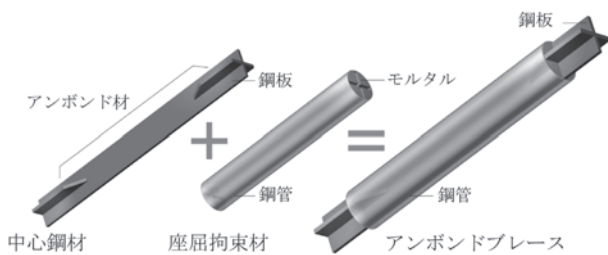


図6 アンボンドブレースの構成

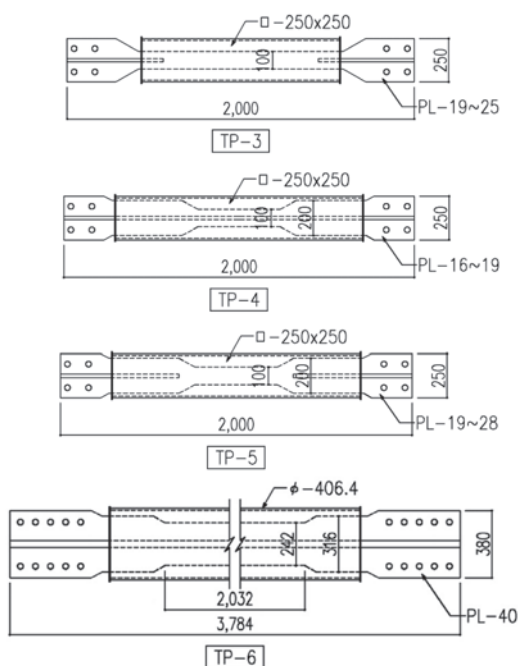


図7 アンボンドブレース試験体

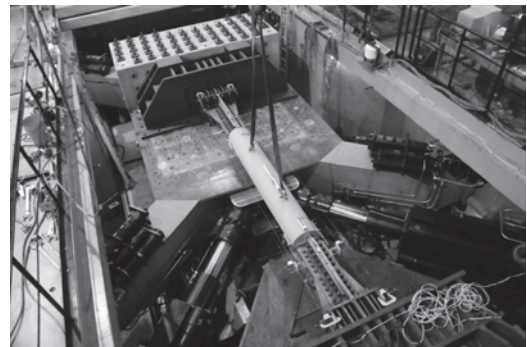


写真4 試験体 (TP-6) 設置状況

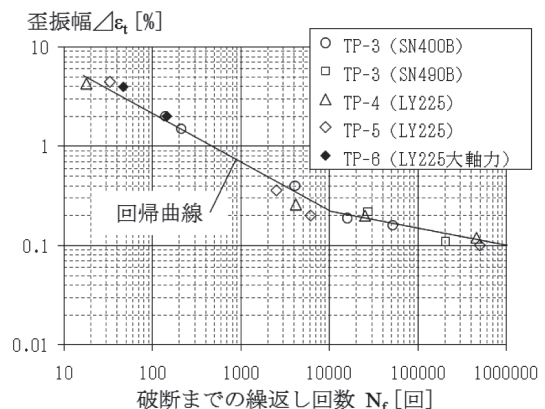


図8 アンボンドブレースの疲労性能確認試験結果

2.2 実地震動による動的载荷試験

アンボンドブレースは、上述の疲労試験や各種静的载荷試験の他に、実地震動を入力した動的载荷試験でも性能が確認されている。試験は、建築物の柱－梁架構を模した治具内に実大ブレース試験体を設置し、重錘の慣性力を利用した試験装置により治具を振動させることで実地震動を再現したものである。試験のセッティングを写真5に示す。入力地震動として、兵庫県南部地震 (1995) 神戸海洋気象台記録 (JMA神戸) のNS (南北方向) 成分ならびに建築耐震設計で一般的に検討される米国カリフォルニア州インペリアルバレー地震 (1940) エルセントロ記録 (エルセントロ) のNS成分を選択した。試験体は2体とし、入力レベルとして表1に示すものを設定した。試験結果の例として試験体1ステップ3の応力－歪関係を図9に示す。動的载荷においても引張・圧縮ともに安定した挙動を示している。更に最大で7%を超える圧縮歪を経験させた試験体1ステップ4でも座屈せずに履歴を保持し、建物設計の想定を超える極大歪領域においてもアンボンドブレースの座屈拘束機構が有効であることが確認された^{8,9)}。

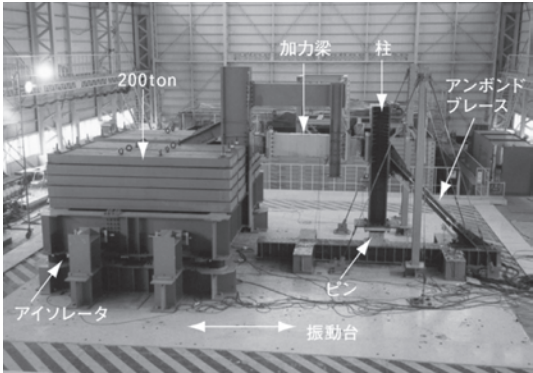


写真5 アンボンドブレース動的試験セッティング

3 免震U型ダンパー

3.1 免震U型ダンパーの概要

免震構造では大きな変形を免震層に集中させることで上部構造の振動を抑制するため、ダンパーには360度どの方向に対しても大きな変形に追従しつつ安定して地震エネルギーを吸収・消散することが求められる。免震U型ダンパー (以下、U型ダンパー) は、特殊なSN490B圧延鋼材をU字型に成形した部品 (図10 (a) : 以下、ダンパーロッド) によりこれらの要求を満足し、免震構造用ダンパーとしての鋼材の利用を実現するものである。ダンパーロッド単体は360度どの方向に変形しても、荷重－変形関係曲線を荷重で積分して求まるエネルギー吸収量がほぼ一定となるよう形状が工夫されている。これを図10 (b)～(c) のように複数本対称に組み合わせることで各方向ほぼ同様の荷重－変形関係を実現している。ダンパーロッド単体各方向の荷重－変形関係を図11に、U型ダンパー 4本組の荷重－変形関係を図12に示す。図12中の太線は構造設計用としてバイリニア型に基準化された荷重－変形関係を表している。ダンパーロッドには5種類のサイズバリエーションがあり、設計の要求により適切な本数およびサイズの組み合わせが選択され、図10 (d) のように免震支承

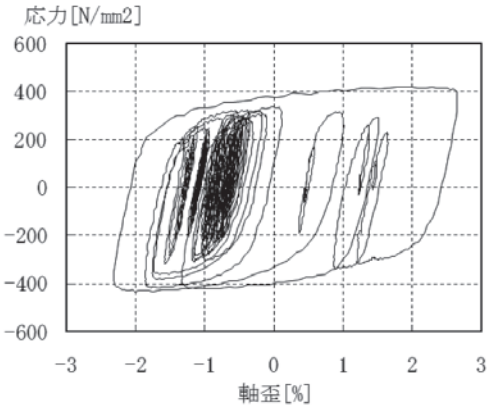


図9 アンボンドブレースの動的载荷試験結果

表1 アンボンドブレース動的試験概要

载荷ステップ	加振レベル	試験体1 [JMA神戸NS成分]	試験体2 [エルセントロNS成分]
ステップ1	弾性加振	Vmax=10cm/sec ² 、最大歪0.2% (層間変形角1/694に相当)	Vmax=5cm/sec ² 、最大歪0.1% (層間変形角1/1620に相当)
ステップ2	弾塑性加振	Vmax=40cm/sec ² 、最大歪2.6% (層間変形角1/57に相当)	Vmax=30cm/sec ² 、最大歪1.1% (層間変形角1/133に相当)
ステップ3		Vmax=40cm/sec ² 、最大歪2.9% (層間変形角1/52に相当)	Vmax=50cm/sec ² 、最大歪2.7% (層間変形角1/57に相当)
ステップ4	弾塑性加振 (極大歪)	Vmax=70cm/sec ² 、最大歪7.6% (層間変形角1/20に相当)	Vmax=70cm/sec ² 、最大歪4.4% (層間変形角1/34に相当)
ステップ5		—	Vmax=90cm/sec ² 、最大歪7.2% (層間変形角1/21に相当)

材である積層ゴムと一体で使用することも可能である。鋼材を利用したU型ダンパーはゴムなどの高分子化合物を使用したものに比べて温度や速度の依存性が少ないといった利点を有する。

アンボンドブレース同様、U型ダンパーの繰返し疲労性能もダンパーロッドのサイズ、振幅、載荷方向、載荷速度をパラメータとした数多くの実大載荷試験によって確認されている。実構造物で使用される変形領域では図10 (a) に示した0度方向の疲労限界が支配的であり、鋼材の塑性疲労寿命を評価する際に一般的に用いられるManson-Coffin則を適用して下式に帰帰することができる。

$$\gamma_e = 35N_f^{-0.15} \dots\dots\dots (1)$$

$$\gamma_p = 3620N_f^{-0.80} \dots\dots\dots (2)$$

$$\gamma_t = 35N_f^{-0.15} + 3620N_f^{-0.80} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 γ_t 、 γ_e 、 γ_p は、それぞれ全変位振幅 δ_t 、弾性変位振幅 δ_e 、塑性変位振幅 δ_p をU型ダンパー高さで除したせん断変形角(%)であり(図13参照)、 N_f は破断回数である。方向別の実大試験結果ならびに(1)～(3)式を図14に示す。縦軸に無次元量 γ_t を取ることで、ダンパーロッドサイズが異なる場合や、正負で変位振幅が異なる場合でも適用できる評価式となっている。図14中の○、●はそれぞれ静的載荷結果、動的載荷結果を表しており、繰返し疲労特性に対する速度の影響は無視できることを示している¹⁰⁻¹²⁾。

3.2 実地震動による二方向動的載荷試験

免震層は実際の地震動に対して水平方向に不規則に挙動するため、ランダム載荷下におけるU型ダンパーの変形追従性を確認する目的で、実地震動を入力した二方向動的載荷試験も実施されている。実験では、大振幅での動的二方向載荷が可能な米国カリフォルニア大学サンディエゴ校(UCSD)の

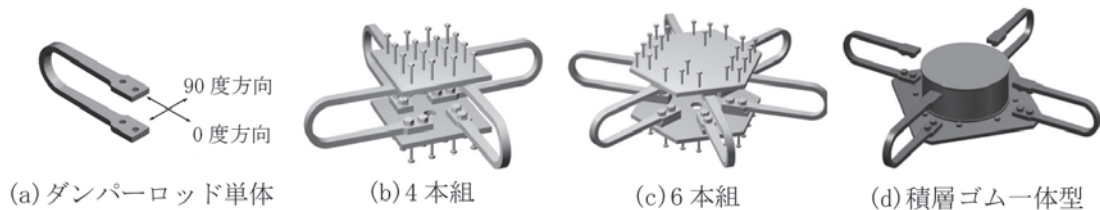


図10 免震U型ダンパーの形状

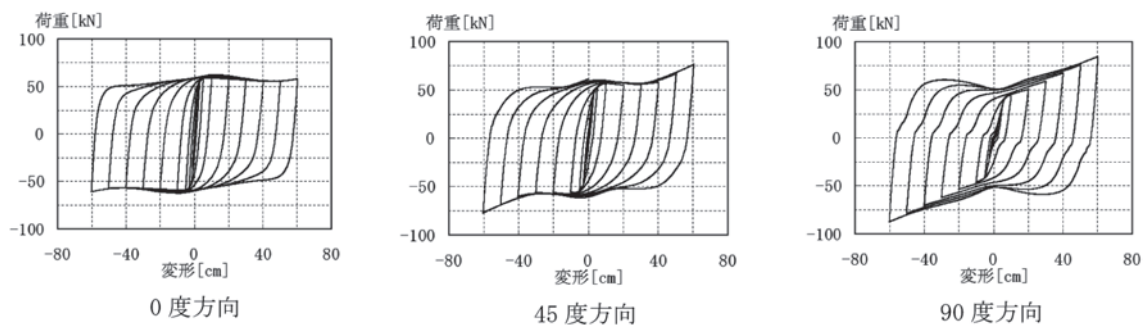


図11 ダンパーロッド単体の荷重－変形関係例

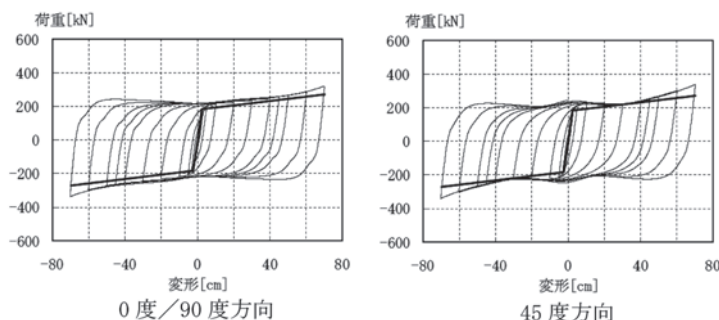


図12 4本組U型ダンパーの荷重－変形関係例

振動台（写真6）を使用した。入力する地震動として、兵庫県南部地震（1995）JR鷹取記録（以下、JR鷹取）ならびにアンボンドブレースの動的載荷試験でも採用されたエルセントロ記録を選択した。事前に仮想建物の応答解析を実施し、免震層応答速度の最大値が0.5m/sとなるよう基準化したものをL2レベル、0.75m/sに基準化したものをL3レベルと設定した。JR鷹取については応答速度が約1.5m/s、最大変位約60cmとなる原波レベルでの動的載荷も実施し変形追従性の確認を行った。入力した変位軌跡を図15に示す。試験体は2体用意し、載荷プログラムは【鷹取：L2×3セット＋L3×1セット＋原波×1セット】ならびに【エルセントロ：L2×3セット＋L3×1セット】と設定した。鷹取の載荷プログラム終了後の試験体の状態を写真7に示す。鋼材の塑性変形の残留が観察される以外では、わずかに一部の塗装に剥離が見られる程度であり、U型ダンパーの優れた挙動が確認された^{13,14)}。

3.3 地震を受けたU型ダンパーの評価

平成23年3月11日の東北地方太平洋沖地震で大きな被害を受けた岩手、宮城、福島3県には、当時100棟以上の免震建物が存在し、U型ダンパーが採用されているものも多数存在した。そのうち震度6を記録した石巻市に立地するI病院を対象に、大きな地震を経験した建物のU型ダンパー抜き取り加振試験を今回初めて実施した。

I病院の免震層には罫書き変位計が設置されており、地震による免震層相対変位のうち突出した部分の軌跡が図16の通り採取された。変位計の記録では半径80mm（図16中のR80）の内側の範囲で罫書き線が密集して小振幅領域における軌跡の正確な把握が困難であった一方で、建物の変形が長手方向に卓越しており、原点からの最大変位が南南東方

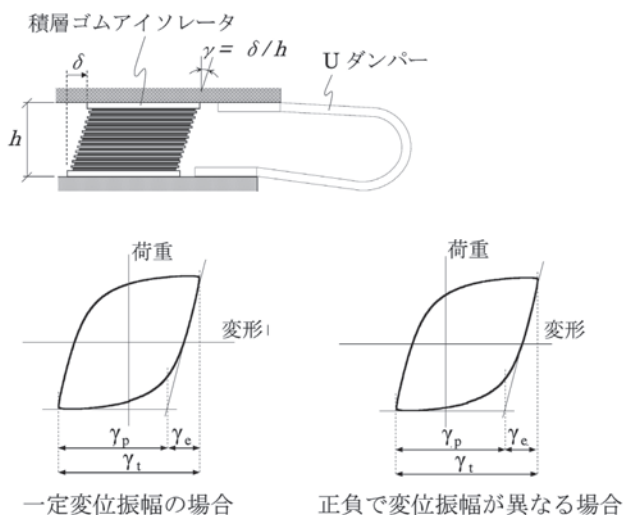
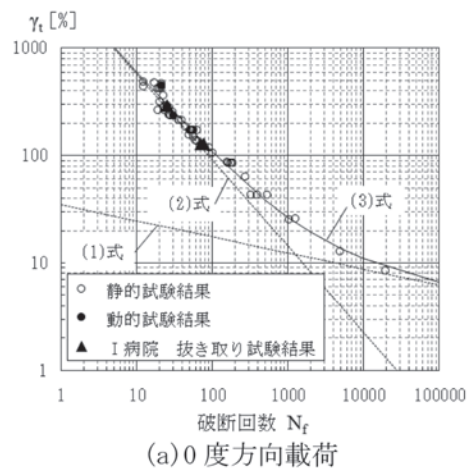
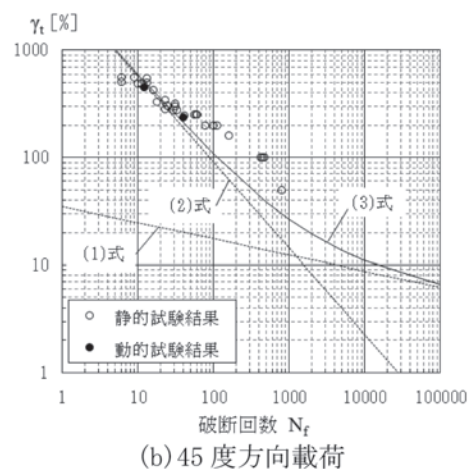


図13 U型ダンパーせん断変形角の定義

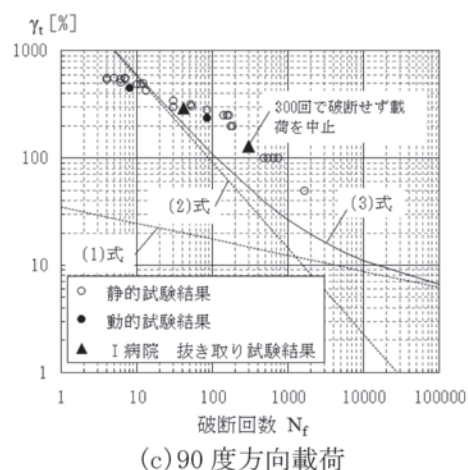
向に約25cm、長手方向ピーク間の距離が約42cmであったことが確認された。U型ダンパーには写真8のように鋼材の塑性変形の残留が観察された。この8本組U型ダンパーを建物から抜き取って図17に示す2本組試験体を4体製作し、それぞれのダンパーロッドが受けた地震動の卓越方向と試験の載荷方向とがほぼ同一となるよう載荷を行った。結果を図14上に▲で表記する。本試験結果の繰返し回数は新品と遜色な



(a) 0度方向載荷



(b) 45度方向載荷



(c) 90度方向載荷

図14 U型ダンパーの疲労性能確認試験結果

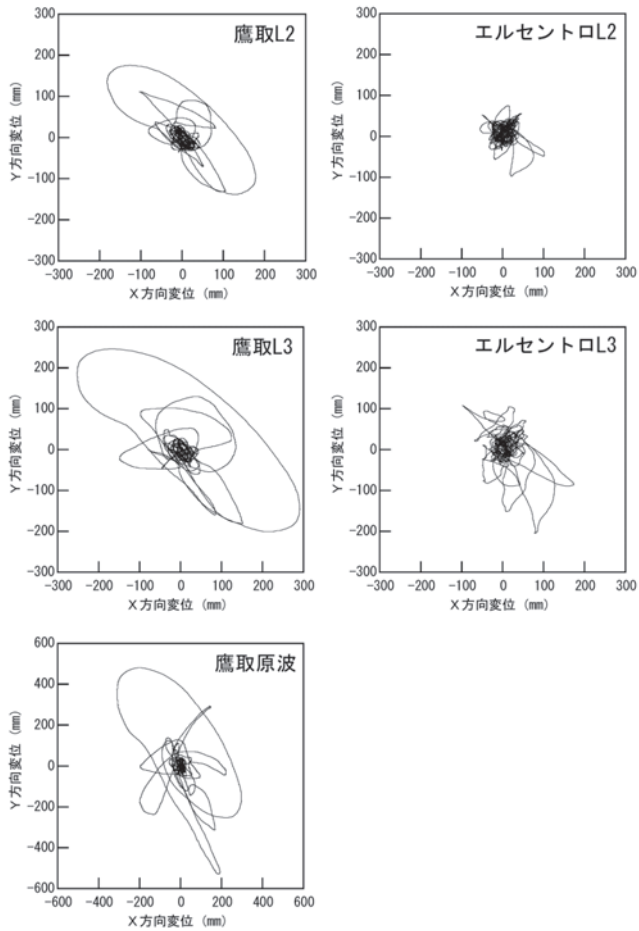


図15 動的試験入力用変位軌跡

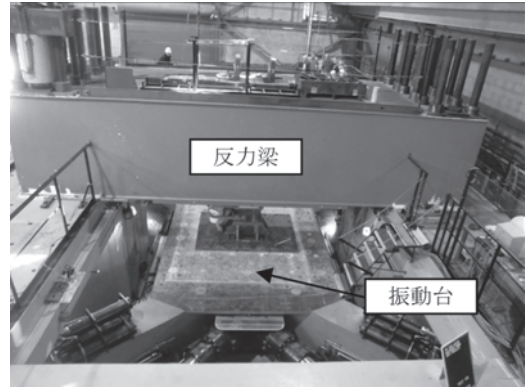


写真6 UCSD 振動台

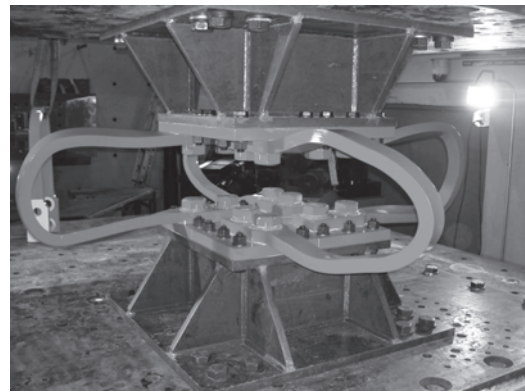


写真7 「鷹取」 載荷終了後の試験体

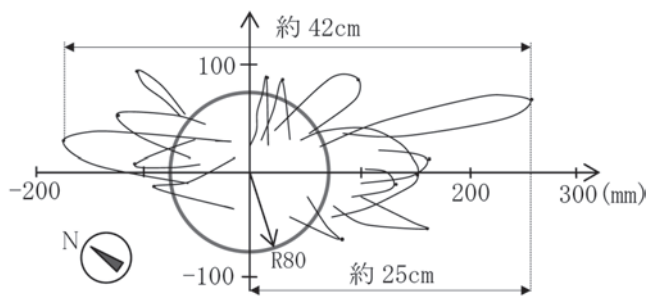


図16 I病院の免震層上下相対変位記録



写真8 I病院抜き取り試験対象

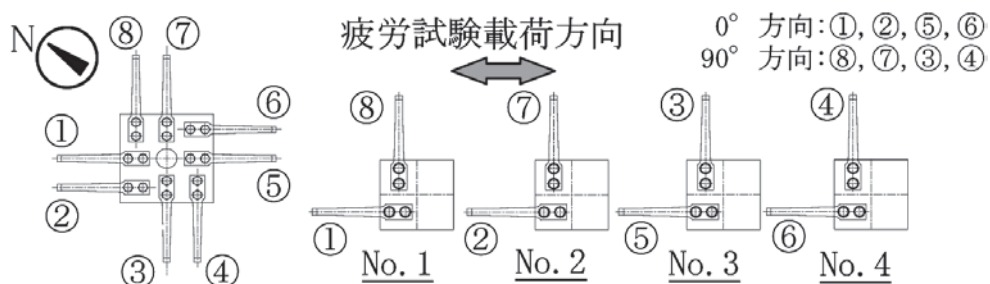


図17 I病院抜き取り試験体

く、東北地方太平洋沖地震を経験しても継続使用に全く支障がないことが確認された^{15,16)}。

4 結言

本稿では鋼材の塑性変形によるエネルギー消散を利用した制震・免震技術の一例として、アンボンドブレースならびに免震U型ダンパーを紹介した。制震・免震装置としては鋼材系、非鉄金属系、オイル系、粘性・粘弾性系、摩擦系など多種多様な製品が実用化されている。その中でも鋼材の塑性変形を利用したシンプルな機構は、コストおよび長期に渡る信頼性の観点からこれからも主役であり続けるものと確信している。素材としての鋼材はこれからも進化し続けるものと考えられる。20年で2度の大震災を経験した我が国では、社会基盤の耐震性向上のため、進化を続ける諸材料を活用した制震・免震技術の更なる発展が期待される。

参考文献

- 1) MENSOSHIN No.73, 一般社団法人日本免震構造協会, (2011.8)
- 2) 第14回免震フォーラム, 東北地方太平洋地震に対する応答制御建築物調査 (中間報告), 一般社団法人日本免震構造協会, (2011.9.1)
- 3) 東北地方太平洋地震に対する応答制御建築物調査, 一般社団法人日本免震構造協会, (2012.1.26)
- 4) 宮腰恒秀, 山浦武彦, 小林敏宏: 能見橋の耐震補強の設計と施工, 橋梁と基礎, (2011.3), 25-29.
- 5) 前田泰史, 中村博志, 竹内徹, 中田安洋, 岩田衛, 和田章: 実大アンボンドブレースの疲労特性 (その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1999.9)
- 6) 中村博志, 前田泰史, 竹内徹, 中田安洋, 岩田衛, 和田章: 実大アンボンドブレースの疲労特性 (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1999.9)
- 7) 渡辺厚, 西本晃治: 鋼製U型ダンパーおよびアンボンドブレースの疲労性能試験, 鋼構造年次論文報告集, (2007.11), 309-312.
- 8) 長谷川久巳, 竹内徹, 岩田衛, 山田哲, 秋山宏: アンボンドブレースの動的性能に関する実験的研究 (その1, 実験計画と計画概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), (1999.9)
- 9) 原田昭穂, 長谷川久巳, 竹内徹, 岩田衛, 山田哲, 秋山宏: アンボンドブレースの動的性能に関する実験的研究 (その2, 実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), (1999.9)
- 10) 植草雅浩, 大河原勇太, 吉敷祥一, 山田哲, 和田章: 免震U型ダンパー実大動的載荷実験 (その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), B-2, (2007.8), 1051-1052.
- 11) 大河原勇太, 植草雅浩, 吉敷祥一, 山田哲, 和田章: 免震U型ダンパー実大動的載荷実験 (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), B-2, (2007.8), 1053-1054.
- 12) 吉敷祥一, 大河原勇太, 山田哲, 和田章: 免震構造用U字型鋼材ダンパーの繰返し変形性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第624号, (2008.2), 333-340.
- 13) 西本晃治, 小西宏明, 吉敷祥一, 山田哲: 免震U型ダンパーの実大試験体による動的載荷実験 (その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), B-2, (2008.9), 405-406.
- 14) 吉敷祥一, 西本晃治, 小西宏明, 山田哲: 免震U型ダンパーの実大試験体による動的載荷実験 (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), B-2, (2008.9), 407-408.
- 15) 小西克尚, 川村典久, 山田哲, 吉敷祥一, 村上勝英, 染谷朝幸, 寺嶋正雄, 帆足勇磨: 地震を受けた免震U型ダンパーの残存疲労性能評価 (その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), (2012), 予定
- 16) 川村典久, 小西克尚, 寺嶋正雄, 帆足勇磨, 山田哲, 吉敷祥一, 村上勝英, 染谷朝幸: 地震を受けた免震U型ダンパーの残存疲労性能評価 (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), (2012), 予定

(2012年6月8日受付)