

免震スチールダンパー Steel Damper for Seismic Isolation

近年、日本では免震建築が普及され始めている。これらの免震建築に使用される振動エネルギー吸収部材として、花びら状に加工した4本の丸鋼によるスチールダンパーについて紹介する。鋼材を塑性変形させることにより地震時の振動エネルギーを熱エネルギーに変換して揺れを抑制するもので、直径50mm,70mm,90mmの3タイプが実用化されている。降伏耐力はそれぞれ6t,21t,38tで水平変形能力は振幅50cm以上である。

1. 概要

建築構造物の分野において、従来の耐震技術を一步進めたいわゆる免震・制振技術が重要な課題となって来ている。建築構造物の振動問題は交通や機械の稼働による騒音など、小さな振動として主に居住性に係わるものから地震や台風による破壊的な大振動まで極めて幅が広いことが特徴である。免震・制振技術はこれらの振動をより積極的に抑制しようとする試みである。中でも免震は建物と基礎の間に水平抵抗の少ない積層ゴムアイソレーターを挟むことによって建物に伝わる地震力を最小限にすると同時に、ダンパーによって振動のエネルギーを吸収し揺れを抑制するもので(図1参照)、1993年現在までに国内で約60棟が建設され、橋梁やプラント構造物にも

適用が始められている。

ここに紹介する免震スチールダンパーは、新日本製鐵建築事業部が福岡大学多田教授の指導のもとに1983年より開発を進めてきたもので、地震時に免震建築物が揺れを生ずると、上部構造と基礎の間に設置された4本の花びら状の鋼棒(ロッド)が塑性変形をして振動エネルギーを熱エネルギーに変換して揺れを抑制する働きをする(図2参照)。このスチールダンパーは1993年現在までに、6t,21t,38tの3タイプが開発され、国内11棟の免震建築に設置されている。

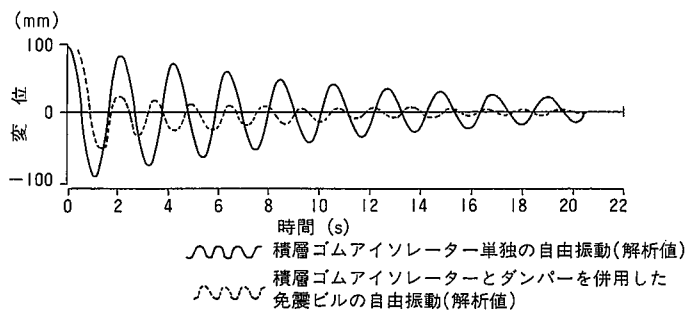


図2 ダンパーの効果

図3はエニコムハイコムステーションに適用した例であり、21tのスチールダンパーを32基使用している。水平降伏耐力の合計は672tで、これは建物重量15,539tの4.3%に相当する。

このように地震時に鋼材を塑性化させエネルギー吸収を行うメカニズムは鋼構造物の耐震要素(ブレース、耐震壁等)の場合と基本的に同じであるが、免震ダンパーの場合には水平変形が免震層一箇所に集中されているために大きな水平変形能力(±20~30cm程度以上)が必要とされることが特徴となっている。従って、変形歪量もかなり大きくなる。

例えば、通常の鋼材ブレースの場合には大地震時には結果的に最大変形歪 $\epsilon = 0.3 \sim 0.8\%$ になっていることが多いが、これに対してスチールダンパーの場合、大地震時には最大変形歪 $\epsilon = 2 \sim 5\%$ と一桁程度大きくなっている。

実際の地震では大きな揺れを繰り返して受けるため、これに対して充分安全性を確保する必要がある。

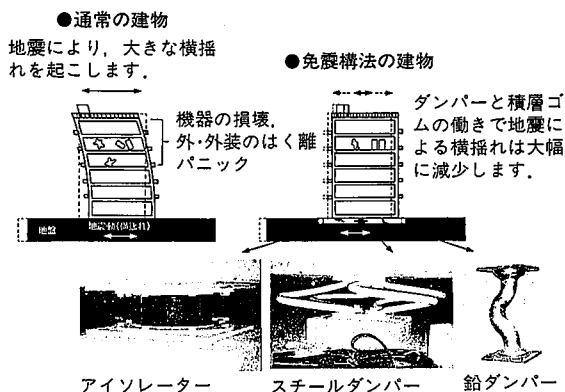
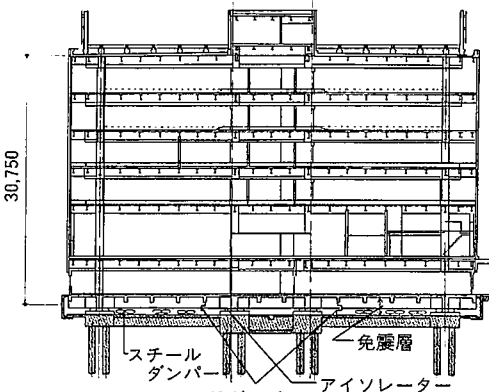
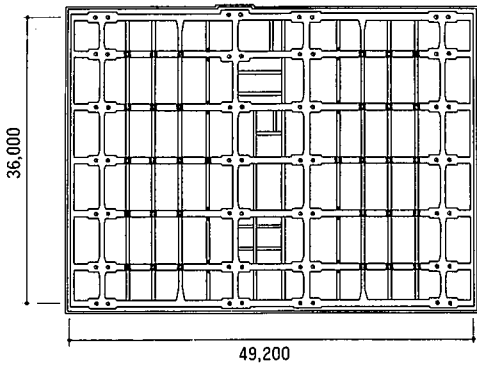


図1 免震構法

●断面図



●免震層平面図



●建物の構造形式

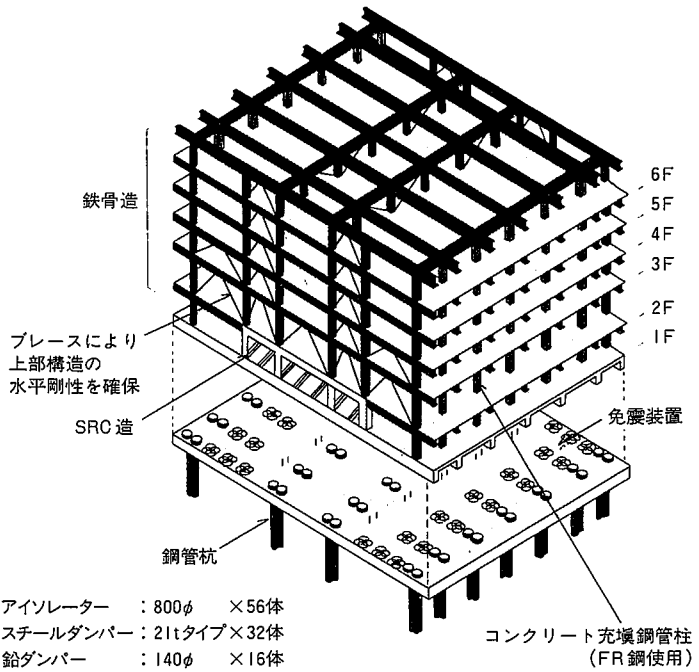


図3 エニコムハイコムステーション

スチールダンパーの製造に際しては、接合部の加工性と熱処理後の安定性が当初の課題であった。ついで大容量化に伴い、より降伏強度が高く、耐疲労性の良好な素材の適用が研究されて現在に至っている。

2. 免震スチールダンパー

このスチールダンパーは直径約50cmの円形に曲げた4本のロッドを組み合わせて花びらの形状をしている。ロッドの各端部はベースプレートとスタッドジベルを介してそれぞれ上部建物と基礎に固定される(写真1参照)。地震時にはこれらのロッドが変形することにより建物と基礎の間の層間変形に追随する。又、必要が生じた場合には取り替えができるようロッドとベースプレートとはボルト接合にしている。

スチールダンパーは免震建物の鉛直荷重を支えるアイソレーターと共に使用され、塑性変形することにより建物の揺れを抑制する。スチールダンパー自体は鉛直荷重

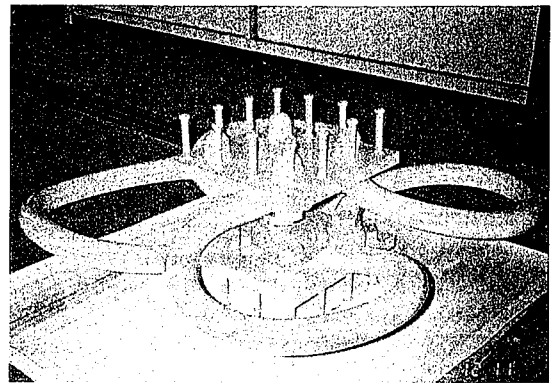


写真1 免震スチールダンパー全景

を負担していない。ちなみに免震用のダンパーとしては、この他に鉛、粘弾性体、摩擦等を利用したものが考案されている。

スチールダンパーは鋼材の特長である高強度、高じん性を活かした大きなエネルギー吸収能力、耐久性、温度や変形速度の影響を受けない安定した復元力特性が特徴である。

3. 性能

免震スチールダンパーとしての性能は概ね次のように設定している。

- (1) 起こりうる最大級の地震動（いわゆるレベル2の地震動）を受けても所定の性能を維持していること
- (2) 予想外の巨大地震による大変形が生じた場合でも安定性を失わず、急激な耐力低下を起こさないこと

地震時における建物の水平変形量については25cmを性能確認の標準値とした。実際の建物における地震時水平変形は地震の大きさ、地盤の状況、建物の重量剛性等により異なるが、免震建物の多くがレベル2の地震時に最大振幅20～25cm程度と設定されていることに準拠した。

繰返し性能についても、振幅25cmで実大繰返し加振試験を行って確認している。又、予想外の大変形を想定して振幅50cmの片押し試験を行っている。

4. 鋼種と熱処理

鋼種の選定にあたっては次のような点を考慮している。

- (1) いわゆる極低サイクル繰返し性能の向上を図り、熱処理後の伸びが大きい素材
- (2) 1サイクル当たりのエネルギー吸収量を大きくするため、降伏点の高い素材
- (3) 熱処理が比較的簡単で、品質の安定している素材
- (4) 実用性を考慮して規格材丸鋼の採用

当初、SGD鋼、ステンレス鋼、極軟鋼等を含めて検討した結果、50mm径タイプにはS25Cを採用した。70mm径タイプにはS45Cを採用してエネルギー吸収量を増大させた。90mm径タイプにはSCM415を採用し、容量増大と繰返し性能の向上を図っている。熱処理は冷却速度の遅い焼きなまし(850～900℃で3～4時間加熱後、炉冷、空冷)により曲げ加工による残留応力除去と調質を行っている。熱処理前後の組織変化を写真2に示す。

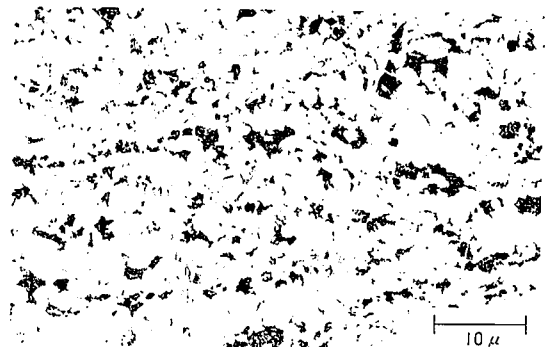
5. 設計

ダンパーの形状については次の点を考慮して決めている。

- (1) 1サイクル当たりのエネルギー吸収量
- (2) 水平変形能力
- (3) 繰返し能力



SCM415素材の組織



熱処理後の組織

写真2 素材および熱処理後の組織

降伏耐力は形状と材質から下記の簡略式より推定した。繰返し性能については、ロッドの歪量との関連性を考慮して、25cm変形時の最大歪が同程度になるようロッド径と曲げ半径と設定している。

$$\text{ロッドの降伏荷重(tf)} : P_y = \frac{0.29D^3 \sigma_y}{R}$$

$$\text{ダンパー終局強度(tf)} : P_u = \frac{0.67D^3 \sigma_y}{R}$$

$$\text{ダンパー初期剛性(tf)} : K = \alpha \frac{E D^4}{24R}$$

$$\text{ロッドの最大歪(\%)} : \epsilon_{\max} = \beta \frac{HD}{25R^2}$$

D : ロッドの直径(cm)

σ_y : ロッドの降伏点(tf/cm²)

R : ロッドの曲げ半径(cm)

H : ダンパー水平変形量(cm)

α : ロッドの回転等による剛性低下率(実験値)

β : 実験値

6. 性能確認試験

ダンパーの性能確認のため600t油圧ジャッキと加振機で構成された圧縮せん断試験機を使用して各種試験を行った。

- (1)静的漸増加力試験：振幅1,3,5,10,15,20,25cmの各1サイクルずつ正負交番加力
- (2)大変形加力試験：最大変形50cmの片押し加力
- (3)動的繰返し加力試験：振幅1,3,5,10,15,20cmの漸増波を振幅25cm周期4秒で繰返し加振

各試験とも荷重と全体せん断変形量を測定し、履歴曲線を作成した。又、90mm径タイプの静的漸増加力試験ではロッドの表面歪量を歪ゲージで測定した。

静的漸増加力試験結果によれば、履歴曲線はA, B方向共ほとんど等しい安定した紡すい形をなしている(図4参照)。これらの履歴曲線により降伏荷重、初期剛性、二次剛性等の構造設計用諸元を設定した(表1参照)。

変形歪については、90mm径タイプの繰返し試験で、ゲージの破断まで計測した結果、振幅15cm時に最大歪1.8%を計測した。これより振幅25cm時の最大歪は3%前後になるものと推測される。

片押し50cmの大変形試験の結果はいずれも安定した復元力特性を確認している(図5参照)。

動的加力試験の結果、繰返し荷重に対しても安定した塑性変形能力が確認されている(図6参照)。破断に至る繰返し回数 N_f と25cm変形時のロッド最大歪量 ϵ (推定値)との関係を図7にプロットしている。参考までに同図上にSS400試験片による低サイクル疲労のデータを併記している。

表1 スチールダンパーの性能

項目	90φSCM415	70φS45C	50φS25C
材料降伏点 (tf/cm ²)	3.3	3.4	2.8
材料引張強さ (tf/cm ²)	5.0	6.2	4.1
ダンパー降伏荷重 (tf)	38.0	21.5	6.2
ダンパー初期剛性 (tf/cm)	12.7	7.0	2.0
ダンパー二次剛性 (tf/cm)	0.36	0.36	0.04
ダンパー弾性限変形 (cm)	3.0	3.0	3.1

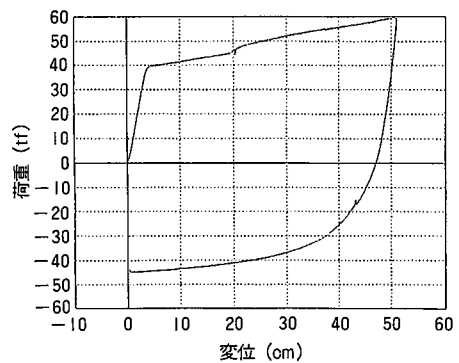


図5 大変形試験結果

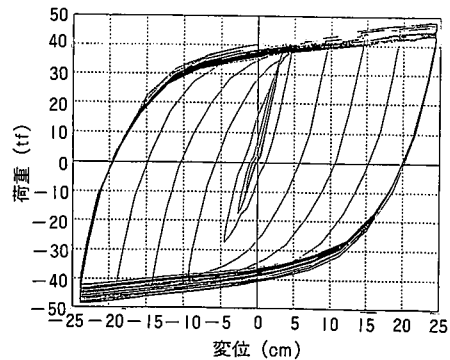


図6 動的繰返し加力試験結果

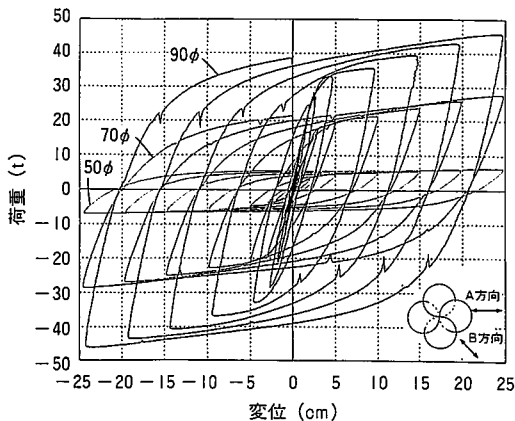


図4 静的漸増加力試験結果

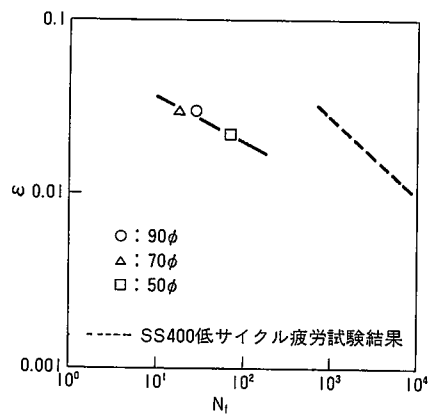


図7 N_f - ϵ 関係図

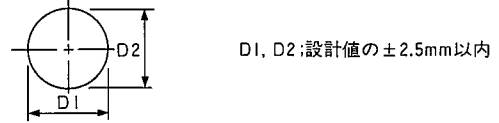
7. 製作と品質管理

加工手順を図8に示す。ロッド端部は鍛造加工及びボルト接合としている。鍛造加工後、曲げ加工、仮組立、熱処理、本組立、塗装の順に製作を行っている。接合ボルトには防錆処理高力ボルトを採用している。

品質管理としては、形状寸法、ロッドの材質、ロッドの外観及び塗膜厚等に重点をおいてチェックしている。図9には寸法検査基準を示す。

各ロッドには連番を打ち、同一材料チャージ、同一熱処理ロット毎に試験片を採取して引張試験と硬さ試験による材質確認を行うとともに、ノッチや有害な変形の無いことを目視確認している。高力ボルトについては抜取りで硬さ試験を行っている。

a. サーキュラーロッドの断面形状



b. 組立て寸法

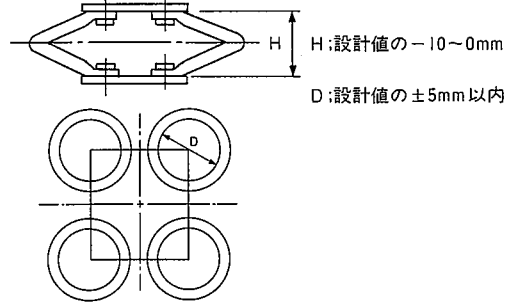


図9 寸法検査基準

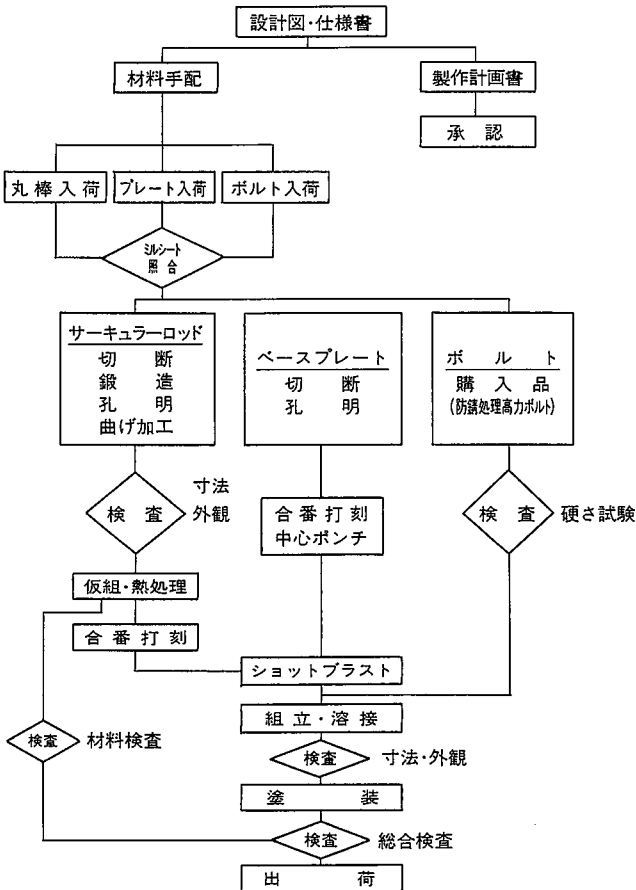


図8 加工手順

8. おわりに

現在建築構造物のエネルギー吸収性能（減衰性能）は耐震，制振，免震に共通した課題となっている。免震スチールダンパーは鋼材をエネルギー吸収材として使用した典型的なものである。このような低サイクル大歪の状況については、材料面での検討の余地があるようにも思われる。仮に、耐疲労性の画期的に良い鋼材があれば装置のコンパクト化と大容量化が簡単に行われるのみならず、構造物の耐震制振要素への応用も幅広く行われそうに思われる。今後とも材料及び応用の両面からの検討を進めていきたい。

スチールダンパーの開発にあたり、御指導いただいた福岡大学 多田英之教授及び御協力いただいた奥村組筑波研究所の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 多田 ほか：日本建築学会大会梗概集，1983年8月
- 2) 阿部 ほか：日本建築学会大会梗概集，1988年10月
- 3) 長谷川 ほか：日本建築学会大会梗概集，1990年10月

お問い合わせ先

エンジニアリング事業本部 建築事業部

Tel(03)3275-6640