

## 5 耐震性を考慮した高機能鋼

### 5.1 高機能鋼の種類と特性

米国における High Performance Steel [Alexander D. Wilson, 1998]は、従来の耐候性高張力鋼(485W, 690W)の炭素等量を低減し、必要予熱温度を低くして溶接性を向上させた鋼種(HPS485W, HPS690W)が中心であり、日本における「高機能鋼」とその内容は必ずしも一致しない。

我が国における高機能鋼とは、鋼橋に汎用的に使用されている鋼種と比較して、「強度、靱性、溶接・曲げ加工性、耐腐食性」において、より優れた性能を有する鋼種、鋼材を総称している。耐震性を考慮した高機能鋼としては、次のような鋼種をあげることができる。

#### 5.1.1 強度に関する高機能鋼

耐震性を考慮した強度に関する高機能鋼には、狭降伏点レンジ鋼、低降伏比鋼および極軟鋼があり、それぞれの概要を以下に示す。また、それらの規格を表-5.1.1に示す[(社)鋼材倶楽部 橋梁研究会]。

- ・狭降伏点レンジ鋼：降伏点の上下限範囲が、SN鋼では  $120\text{N/mm}^2$ ，SA鋼では  $100\text{N/mm}^2$  という狭い範囲内に入ることを保証し、地震時に優れた変形能力を発揮することが期待できる鋼材である。
- ・低降伏比鋼：降伏比が80%以下になることを保証し、地震時に優れた変形能力を発揮することが期待できる鋼材である。
- ・極軟鋼：降伏点の低さと、優れた伸び能力(靱性)を有した鋼材であり、構造物の制震ダンパーなどに使用されている。極軟鋼の塑性変形により、地震入力エネルギーを吸収し構造物の揺れを低減できる。

表-5.1.1 強度に関する高機能鋼

名称	規格
狭降伏点レンジ鋼 (SN)	SN400：降伏強度レンジ $120\text{N/mm}^2$ SN490：降伏強度レンジ $120\text{N/mm}^2$ SA440：降伏強度レンジ $100\text{N/mm}^2$
低降伏比鋼(LYR)	SN400：降伏比 $\leq 80\%$ SN490：降伏比 $\leq 80\%$ SA440：降伏比 $\leq 80\%$
極軟鋼(LYP)	降伏強度 $100\text{N/mm}^2$ 級鋼 降伏強度 $160\text{N/mm}^2$ 級鋼 降伏強度 $235\text{N/mm}^2$ 級鋼

### 5.1.2 韌性に関する高機能鋼

耐震性を考慮した場合、強度のほかに韌性が重要な要素となる。この韌性に関する高機能鋼としては、高韌性鋼をあげることができる。高韌性鋼の特長を以下に示す。また、その規格を表-5.1.2に示す[(社)鋼材倶楽部 橋梁研究会]。

- ・高韌性鋼：高い韌性を有する鋼板を用いることにより、①小さな曲げ半径で冷間加工ができる、②寒冷地などの低温地域での鋼材の利用範囲が広がるなどのメリットが生じる。

表-5.1.2 韌性に関する高機能鋼

名称	規格	
高韌性鋼	①冷間曲げ加工 シャルピー吸収エネルギー VE ≥ 150J VE ≥ 200J	冷間曲げ加工半径(t:板厚) → 7t以上 → 5t以上
	②寒冷地における要求仕様を満足する鋼材	

### 5.1.3 耐震性を考慮したその他の高機能鋼

配管の分野では、耐震性に優れたラインパイプ用の鋼管として、塑性座屈が発生する歪み $\epsilon_b$ を上昇させた高n値鋼管が開発されている[鈴木信久, 1999]。このnは一般的な stub column の応力-歪み関係である式(5.1.1)で表現される歪み硬化指数であり、塑性座屈が発生する歪み $\epsilon_b$ は式(5.1.2)で表され、n値を高めることによりこの値を上昇させることが可能である。

$$\sigma/\sigma_y = (\epsilon/\epsilon_y)^n \quad (5.1.1)$$

$$\epsilon_b = 4/3 \cdot \sqrt{n} \cdot t/D \quad (5.1.2)$$

### 5.1.4 耐震デバイスとして活用が期待される高機能鋼

前出の高機能鋼のなかで、耐震デバイスとしての活用が期待されるものとして低降伏点鋼が挙げられる。これは、他の鋼材と比較して降伏強度が低いため早期に塑性化し、破断伸びが大きいため、大きな地震エネルギーの吸収を期待できるからである。

ここでは、この低降伏点鋼の、化学成分、機械的性質、応力-歪み関係、エネルギー吸収能力、歪み硬化特性、および疲労寿命特性について述べる。

#### (1) 化学成分

低降伏点鋼は JIS などにより化学成分や機械的性質が明確に規定されたものではなく、各社独自の規格により製造されているのが実状である。低降伏点鋼の化学成分は、表-5.1.3に示すように添加元素を極力低減した純鉄に近いものであり、圧延後に軟化焼鈍などの熱処理により降伏点を下げている[日本鋼管株, 1999]。

表-5.1.3 化学成分の規格値の例

記号	C	Si	Mn	P	S
NK-LY100	≤0.02	≤0.03	≤0.20	≤0.03	≤0.015

(2) 機械的性質

降伏耐力の規格値はメーカ各社で異なっているが、概ね100N/mm<sup>2</sup>級、160 N/mm<sup>2</sup>級、235 N/mm<sup>2</sup>級前後の3種類がある。表-5.1.4にNK-LY100の機械的性質を一例として示す[日本鋼管(株), 1999]。引張強さは200~300 N/mm<sup>2</sup>級程度であり、軟鋼よりも小さい。また、降伏耐力のレンジもメーカ各社で異なっているが、40ないし50 N/mm<sup>2</sup>級と、狭いレンジである。伸びについては5号試験片で40~50%以上を確保している。

表-5.1.4 機械的性質の規格値の例

記号	降伏耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び(%)	試験片形状
NK-LY100	90以上130以下	200以上300以下	50以上	JIS5号または4号

(3) 応力-歪み関係

低降伏点鋼と他の鋼材の応力-歪み関係を比較して図-5.1.1に示す。降伏耐力が235 N/mm<sup>2</sup>級では降伏棚を有するが、100 N/mm<sup>2</sup>級では概ねこの図に示すように明瞭な降伏棚のないラウンドハウス型となっている。この場合、降伏耐力は0.2%オフセット値で規定される。

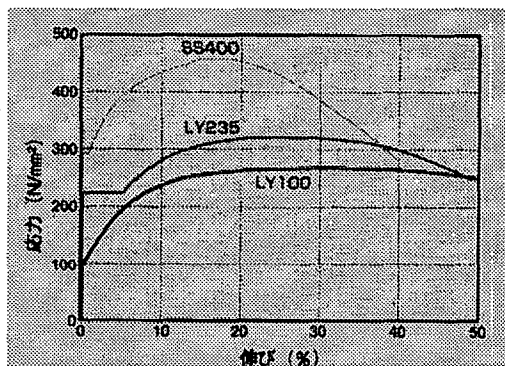


図-5.1.1 鋼材の応力-歪み曲線の比較

(4) 繰返し特性

図-5.1.2は±1.0%の定歪み振幅下での応力-軸方向歪み関係の一例である[原山浩一, 1999]。紡錘形の安定した歪み履歴特性を有する。

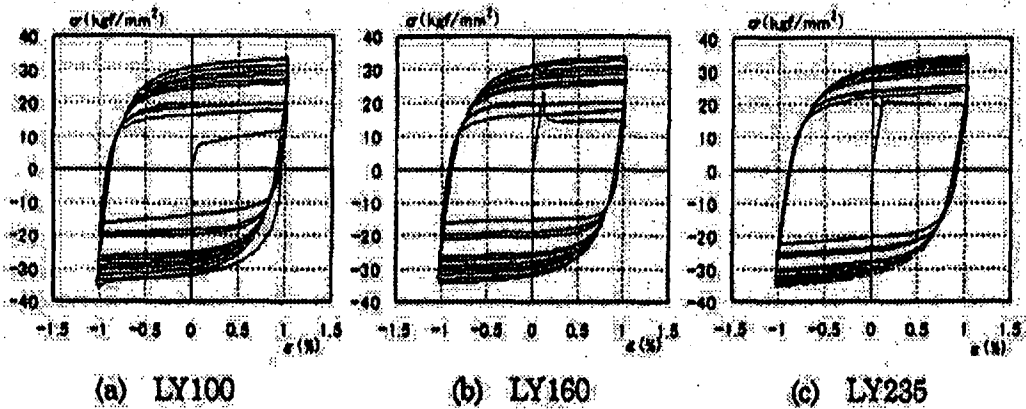


図-5.1.2 応力-軸方向歪み関係

図-5.1.3 に応力の履歴曲線を示す[原山浩一, 1999]. LY235 の 0.15%では軟化傾向を示すが, 他はひずみ硬化現象を示す. 歪み硬化は歪み範囲が大きく降伏点が低いほど顕著である.

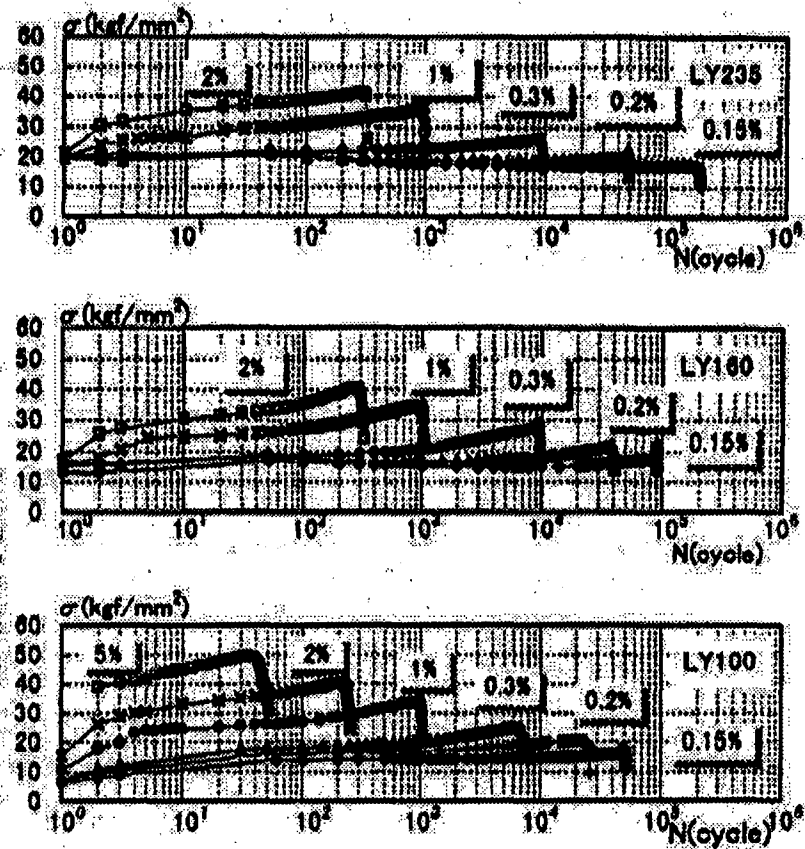


図-5.1.3 応力の履歴曲線

(5) エネルギー吸収能力

図-5.1.4 は累積ヒステリシスエネルギー  $\sum Wh$  と歪み範囲の関係を示す[原山浩一, 1999].

歪み範囲が1%以上ではエネルギー吸収能力に大差は無いが、0.5%以下ではLY100は最も優れたエネルギー吸収能力を有している。

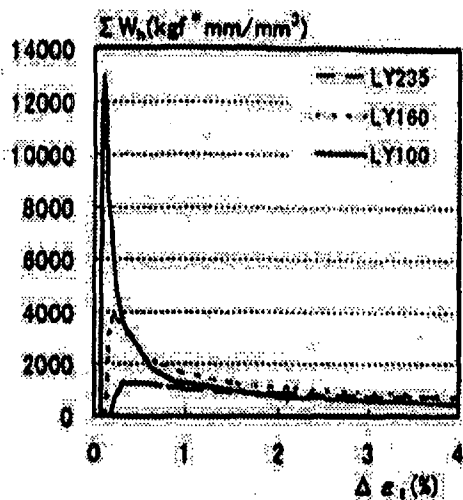


図-5.1.4 エネルギー吸収能力

(6) 疲労寿命特性

図-5.1.5は疲労寿命曲線であり、歪み振幅と破断までの繰返し数との関係を整理したものである[原山浩一, 1999]. 塑性歪範囲 $\Delta \epsilon_p$ , 弾性歪範囲 $\Delta \epsilon_e$ と破断寿命 $N_f$ は直線関係を示し、低降伏点鋼はManson-coffin則が成り立つことが確認されている。

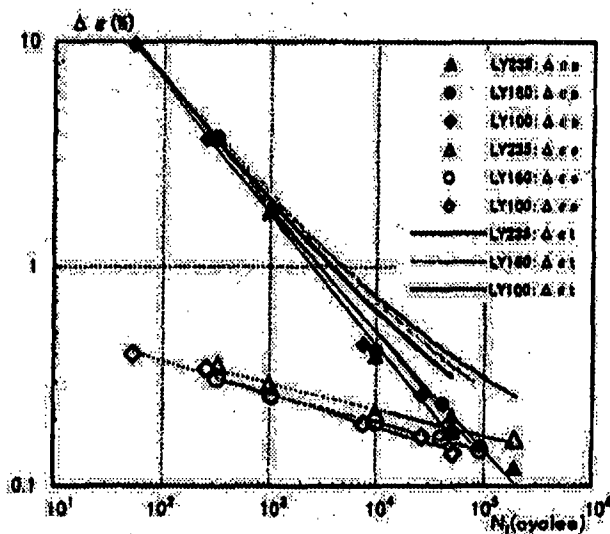


図-5.1.5 Manson-coffin 則による疲労寿命評価

(7) 歪み速度依存性

鋼材の機械的性質は歪み速度に依存し、高張力鋼と比較して軟鋼の方が歪み速度の上昇

に伴う降伏点の上昇が顕著となることはよく知られている。図-5.1.6の歪み速度を変化させた引張試験結果に示すように、歪み速度の上昇に伴い曲線が上方にシフトし、特に降伏点の上昇が顕著となることが確認されている[鈴木孝彦, 1999]。

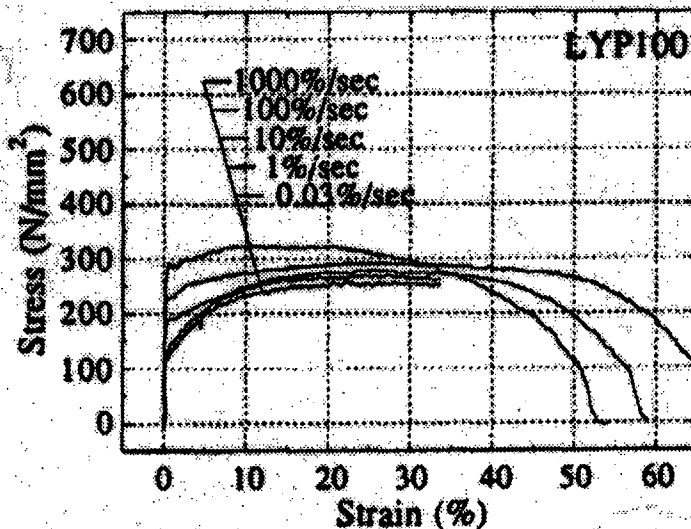


図-5.1.6 歪み速度の降伏強度に与える影響

#### (8) 適用上の留意点

低降伏点鋼を加工して実際のデバイスとして使用する際には、繰返し荷重により硬化する性質などの材料特性を加味して、想定する歪みレベルや繰返し数に応じたデバイスの復元力特性を決定する必要がある。また、降伏点が極めて小さい材料であることから、例えば、運搬時に両端を把持して吊り下げて塑性化させない様にパレットなどの上に載せるなど、加工・製作時に注意が必要である。

#### 参考文献

- [鈴木孝彦, 1999] 鈴木孝彦・沢泉伸一・山口種美・池辺卓：極低降伏点鋼の機械的性質に及ぼす歪速度の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.501-502，1997.9.
- [Alexander D. Wilson, 1998] Alexander D. Wilson: Development of High Performance Steels for U.S.A. Bridges, 14<sup>th</sup> US-Japan Bridge Engineering Workshop, 1998.11.
- [鈴木信久, 1999] 鈴木信久・加藤昭彦・吉川正樹・栗原正好・遠藤茂・大脇錠治：耐震性能に優れたラインパイプ，NKK 技報，No.167，pp.44-49，1999.9.
- [日本鋼管(株), 1999] NKK の履歴型制震ダンパー(りれきダンパー)，カタログ，1999.4.
- [原山浩一, 1999] 原山浩一・中込忠男・李建・岩本剛・廣田実・下川弘海：低降伏点鋼を用いた鋼管補剛平板ブレースの疲労特性に関する実験的研究その 1 低降伏点鋼素材の低サイクル疲労特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，1999.9.
- [(社)鋼材倶楽部 橋梁研究会] (社)鋼材倶楽部 橋梁研究会：高性能鋼の概要(橋梁向け)，カ

タログ。

## 5. 2 高機能鋼の耐震デバイスへの利用方法

耐震デバイスの機能形態としては、剪断変形、曲げ変形、ねじり変形、軸方向変形、および塑性変形による衝撃吸収に大きく分けられる。

### 5. 2. 1 剪断変形

・文献[人見泰義, 1996]では、剪断パネルを間柱(頬杖付き)に組み込み実際の耐震設計に用いている。振動応答解析の結果、高靱性剪断パネルの制震効果により、レベル 2 地震動の一般部材の塑性率は全て 2 未満となったことを報告している。

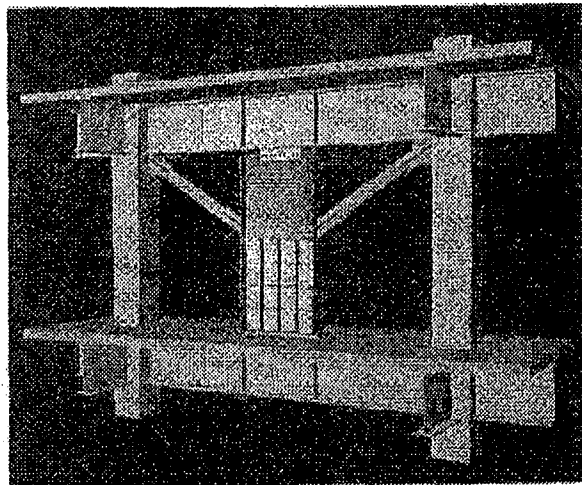


図-5. 2. 1 頬杖付き間柱全体図

・文献[佐分利和宏, 1994], [山口種美, 1995]では、低降伏点鋼から成る鋼板パネルを間柱の中に組み込んだ建築骨組の実大載荷実験を実施している。実験の結果、①縦横両方向リップ付き鋼板パネルは、層間変形 1/100 に対応する変位振幅以下において、多数の繰返しを受けても安定した履歴を保證しうる。②鋼板パネルの降伏軸圧縮力の 30%に相当する軸力を同時に作用させても、履歴性状はほとんど変化が無いこと。また、繰返しによる歪み硬化は極めて顕著であり、塑性率が 7 に相当する変位振幅時において、繰返し実験から得られた最大せん断力は、単調載荷実験の 1.5 倍にも至っていると報告している。

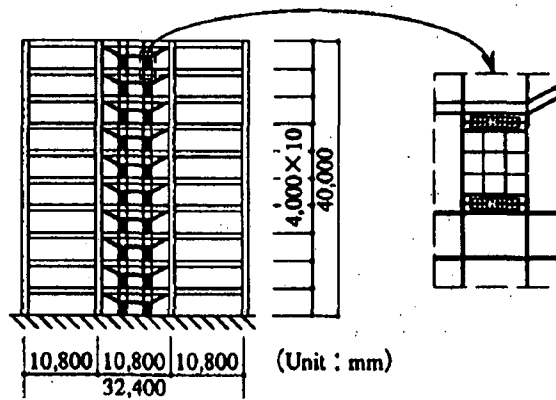


図-5.2.2 鋼板パネル付き建築骨組

・文献[山口種美, 1995],[Yuhshi Fukumoto, 1997],[森下泰光, 1998] は, 鋼製橋脚の内部にエネルギー吸収を期待する剪断パネルとして低降伏点鋼を用いる構造を提案している. 一定鉛直力下での繰返し載荷実験を実施したところ, 低降伏点鋼を用いた供試体は普通鋼を用いた供試体より, 劣化勾配が緩やかであり, 降伏荷重に低下するまでの塑性率も大きく, エネルギー吸収量が大きいことを報告している. また, シェアウォールとして配置した供試体は, ダブルフランジとして配置した供試体より最大耐力が大きいことを報告している.

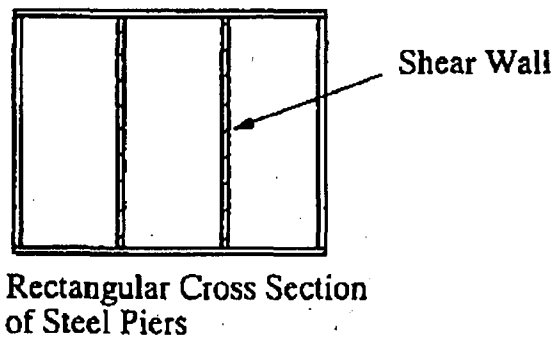


図-5.2.3 剪断パネルを有する鋼製橋脚

・文献[森下泰光, 1998],[高久達将, 1998],[鹿島孝, 1998],[中村信行, 1998],[高木潤一, 1998] は, 鉄骨造建築物の上下大梁間に緊結された履歴型ダンパーの単体を横方向に連結して構成される制震壁を提案している. このダンパー単体は, 普通鋼の H 形断面部材の階高中央部のウェブに低降伏点鋼を使用したものである. 25, 50, および 75kine の地震波を交互に繰返し入力した動的实验により, 靱性と共に耐久性にも優れていることを示している. また, 静的実験結果より制震壁の履歴特性モデルを作成して地震応答解析を行い, 地震入力の大い低層の鉄骨造建築物に対しても変形・加速度応答を低減させ骨組みを弾性に留めることができることを示している.



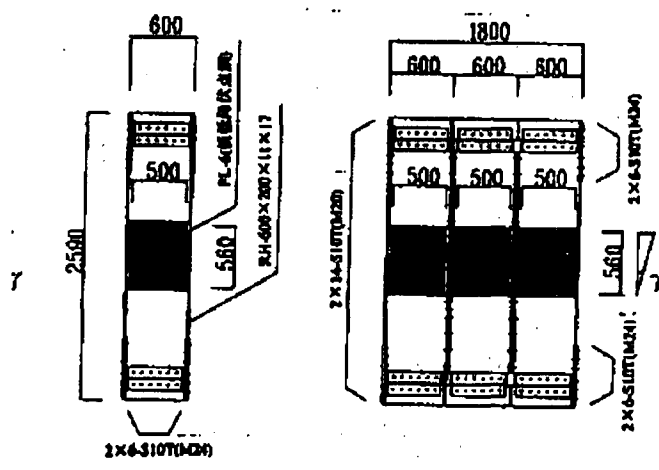


図-5.2.4 制震壁

・文献[中川郷司, 1995] では、地震時に主要構造骨組みが先行して塑性化することによって、地震応答を低減させ、骨組みの損傷を少なくする低降伏点鋼制震パネルの弾塑性履歴性状について検討している。実験はスチフナによる補強方法をパラメータとして実施し、パネルは剪断座屈によるしわが生じてもエネルギー吸収能力に富んだ履歴性状を示すことを明らかにしたと報告している。

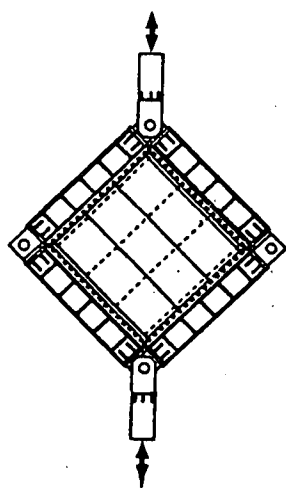


図-5.2.5 制震壁の剪断実験

・文献[中田安洋, 1996],[藤沢一善, 1996]は、低降伏点鋼を利用した制震壁を提案している。大型実験により柱梁フレームに組み込まれた状態での制震壁の性能を確認した。その結果、制震壁はレベル2規模の地震を2回経験する厳しい状態においても、安定したエネルギー吸収能力を維持しており、地震用制震デバイスとして優れた性能を有することを報告している。

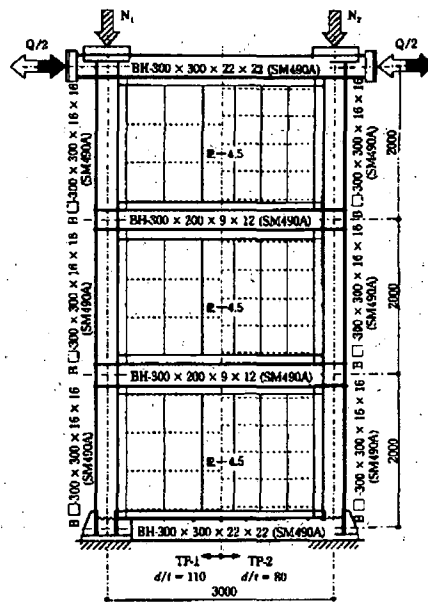


Fig. 9 Three-story frame with low yield stress steel plate walls

図-5.2.6 制震壁を有する骨組実験(1/2スケール)

・文献[鹿島建設, 1998]では, 低降伏点鋼を利用したハニカムダンパを紹介している. 鋼板に蜂の巣状(ハニカム)の開口を設けた形をしており, 塑性変形部と接合部から構成されている. ハニカムダンパは, 鋼材の弾塑性特性を利用した鋼板製のダンパーであり, その荷重-変位関係において塑性化による履歴ループを描くことによって地震エネルギーを吸収するものであると報告している.

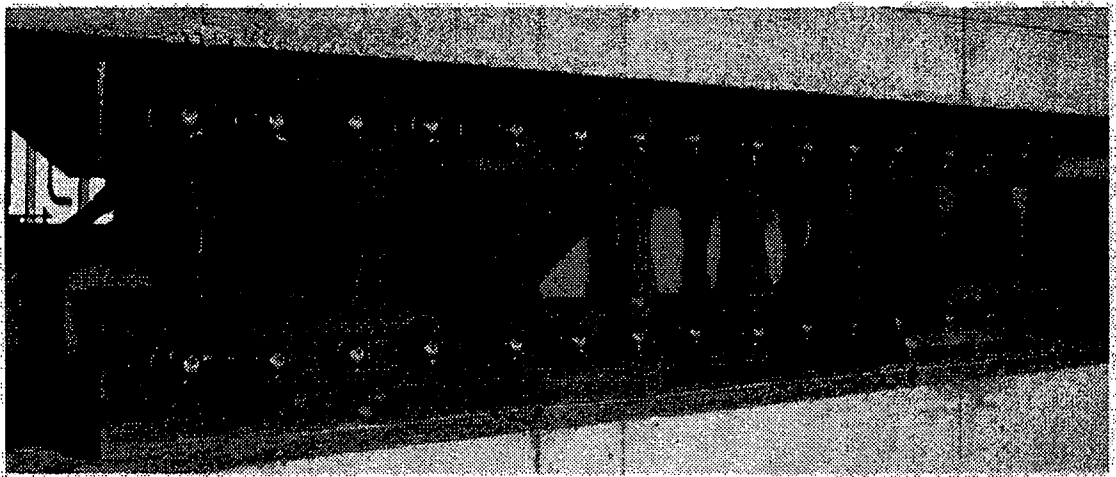


図-5.2.7 ハニカムダンパ

また, 文献[杉山聡, 1998]には, 低降伏点鋼ではないが, 高層建築物の地震エネルギー吸収部材として, 図-5.2.8に示すような鋼製スリットダンパ(SSD)が紹介されている. これは

比較的小さな鋼板(SN490B)にスリットを入れて、スリット間のリブ材の端部が曲げ降伏することによりエネルギー吸収するシステムである。

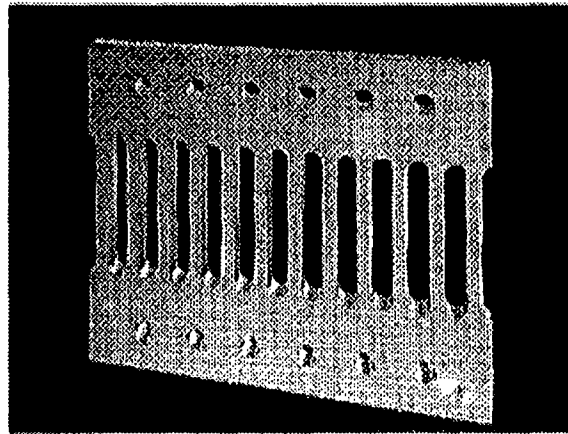


図-5.2.8 スリットダンパ

### 5.2.2 曲げ変形

・文献[大野隆平, 1998]は、橋脚の下部側面に低降伏点鋼による制震部材を装着し、これが主部材に先行して降伏して地震エネルギーを吸収することにより、主部材の損傷を防ぐことを意図した工法を提案している。制震部材の降伏のみを許容し、他は許容しない場合の等価減衰比を予測する簡易理論式により検討している。その結果、極軟鋼板接着では極軟鋼板の主部材への接合方法が重要であり、今後この接合方法を再検討する必要があることを報告している。

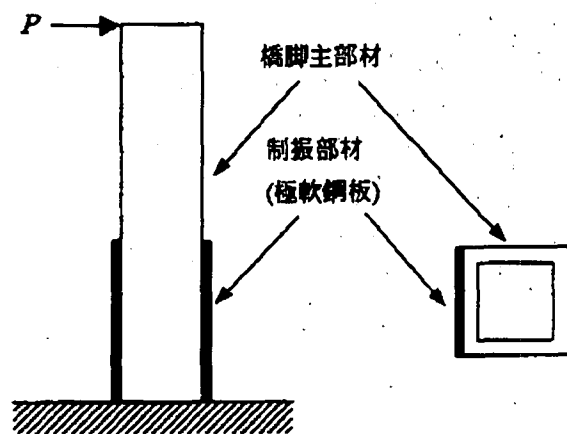


図-5.2.9 制震部材

・文献[中島章典, 1997]は、既設鋼製橋脚のうち、中詰めコンクリート上端位置付近が弱点部となる場合に対して、その付近の外側に橋脚鋼板パネルよりも降伏応力度の低い鋼板を

接着して、この接着鋼板の塑性変形により地震によるエネルギーを吸収させる耐震補強方法を提案している。この補強方法の有効性を確認するために、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した弾塑性地震応答解析を用いて検討した結果、1)補強鋼板接着位置のすぐ上の鋼断面への塑性化の集中を起こさないように補強鋼板の十分な接着長さを取ることで、2)中詰めコンクリート上端位置と橋脚基部の断面の全塑性モーメントと作用曲げモーメントの関係に着目して、一方に塑性化が偏らないように補強鋼板の板厚および降伏応力度を決定することが必要であることが、重要であると報告している。

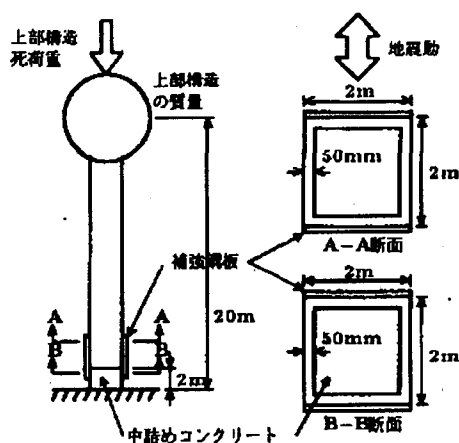


図-5.2.10 補強部材

### 5.2.3 ねじり変形

・文献[長町賢, 1998]は、極軟鋼ダンパーを使用した鋼製の免震装置を提案している。装置は図-5.2.11 に示すように、上部工に球形の上沓、下部工に皿形の下沓を配置し、上・下部工間に極軟鋼を用いた減衰装置を配した構造となっている。この免震システムは地震が発生すると、免震沓を介して上部工が滑ることから支承の非線形復元力特性が得られ、生じた上・下部工間の相対変位を極軟鋼鋼管がねじり変形によりエネルギーを吸収し、減衰する構造となっている。免震支承を有する橋梁システムの地震応答解析の結果、1)レベル 2 相当の内陸直下型地震波、海洋プレート境界型地震波のどちらの地震波に対しても、免震効果があることが確認できたこと、2)免震装置の最適仕様を免震沓の半径  $R$  と下部工に生じるモーメント比  $M_{max}/M_y$  の関係から、減衰装置の最適仕様を減衰装置の剛性と上・下部工の相対変位の関係から求め、剛結な場合と比較して免震装置で 80%、減衰装置で 70%、下部工の応答変位を減少できたことを報告している。

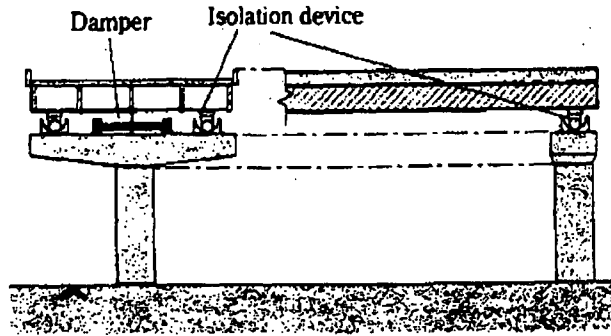


図-5.2.11 免震装置

・文献[土木学会, 1996]は, 連続桁橋の桁支点部に設置して, 地震時に橋軸方向変位に対してのみ効果を発揮する極低降伏点鋼を使用した吸震装置を考案している. 本吸震装置は, 極低降伏点鋼を用いて鋼管を製作し, そのねじりにより振動を吸収する構造となっている. 弾性応答解析の結果, 極低降伏点鋼を用いた吸振装置ではレベル1, レベル2のいずれの地震動に対しても, 最初の数波の地震波に対しては制震の効果はあまり期待できないが, 鋼管の塑性履歴が十分に進んだ後には大きな制震効果を発揮すると報告している.

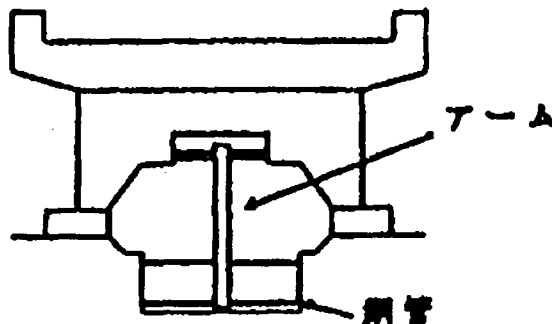


図-5.2.12 吸震装置

・文献[鈴木森晶, 1999],[青木徹彦, 1998]は, 実験設備のテストベットから基礎構造へ伝達される水平反力の低減, テストベットから他建築物への振動伝播遮断を目的として鋼管ねじり型免震装置を考案している. 免震装置をバイリニアモデルに仮定し, 種々の地震波を入力した動的応答解析を実施した結果, 降伏荷重が400tonf以下では最大変位の変動とパラツキが非常に大きく, 特に降伏荷重が250tonfの場合では最大応答変位は50cm以上となる場合があると報告している.

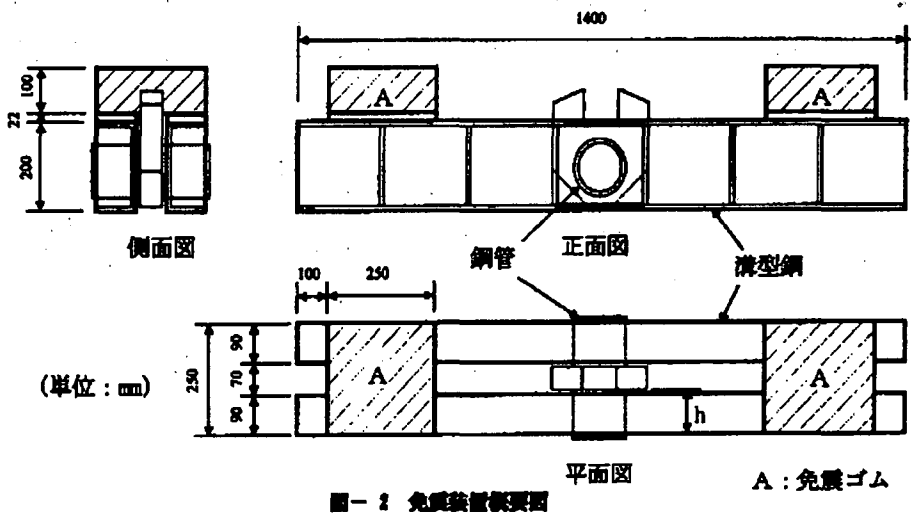


図-5.2.13 鋼管ねじり型免震装置

#### 5.2.4 軸方向変形

・文献[岡本晴仁, 1997]は, 鋼管補剛平板ブレースを開発している. このブレースは, 図-5.2.14 に示すように, 低降伏点鋼の平鋼を軸材とし, 座屈を角形鋼管のみで補剛した構成とし, 鋼管の他は特別な補剛材を必要としないこと. また, 継手部は普通鋼による十字継手とし端部補強も兼ねたものとなっていることを報告している.

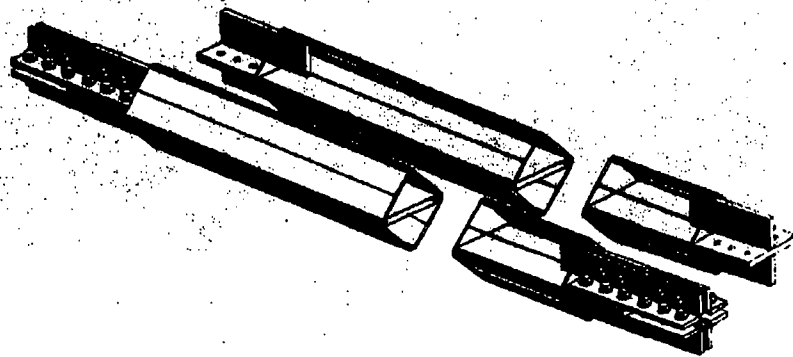


図-5.2.14 鋼管補剛平板ブレース

・文献[藤沢一善, 1998],[福畑潤一, 1998]は, 極軟鋼を使用した制震ブレースを開発している. 全体座屈を防止し, 引張圧縮载荷時にも安定した履歴挙動を示す二重管 FLD 部材 (Force Limiting Device, 応力制限機構) を開発した. 引張圧縮繰返し载荷実験の結果, 座屈を拘束しないと細長比が 40 でも塑性率が 10 の繰返しで耐力低下を生じている. 適切な座屈拘束を

実施することにより、細長比 120 という非常にスレンダーな場合においても安定した履歴特性を示し、耐震ブレースとして十分なエネルギー吸収能力を発揮できることが判明したと報告している。

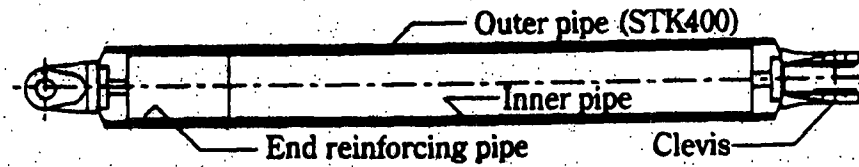


Fig. 12 Outline of double tube bracing

図-5.2.15 二重管FLD部材

・文献[山口種美, 1998]は、芯材に低降伏点鋼を用いたアンボンドブレースについて、実大実験を実施した結果について報告している。実験結果より、普通鋼と比較して歪硬化の影響がやや顕著に見られるが、極めて安定した紡錘形のループが得られること、また、歪み振幅±0.5%(層間変形角 1/100 相当)に対する繰返し変形能力は 200 回(累積塑性率約 7200)程度以上に達することを確認したと報告している。

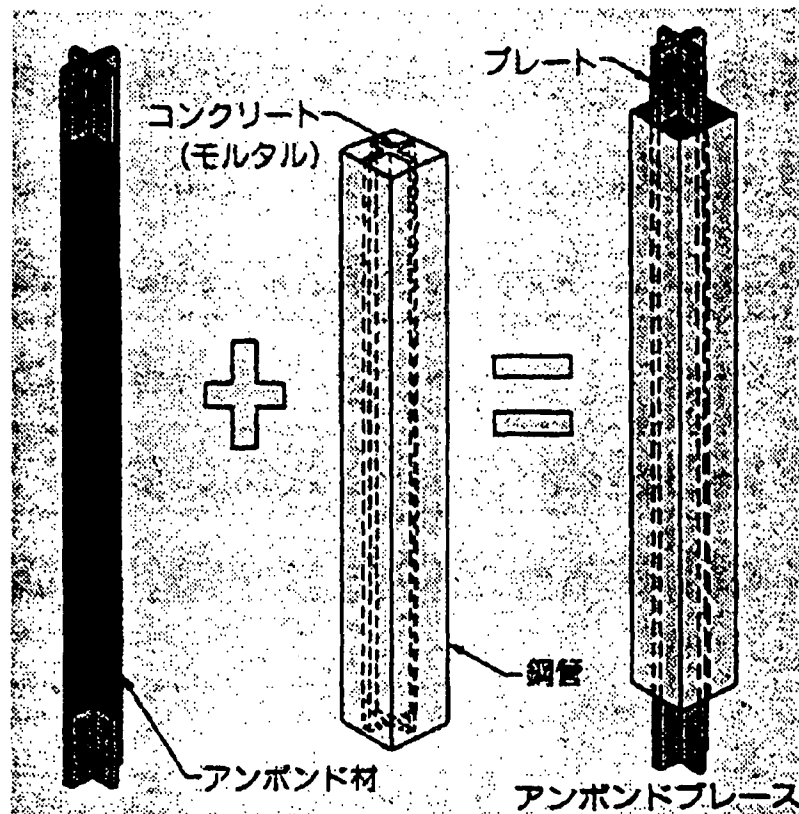


図-5.2.16 アンボンドブレース

・文献[岩田衛, 1995]は, 常時荷重を支持する主体構造(柱・梁)を大地震を受けた場合にも弾性状態に保つようにし, 地震によるエネルギーは低降伏点鋼を用いた制震部材(アンボンドブレース)で吸収させる構造を提案している. 柱・梁の曲げ実験により, アンボンドブレースに用いた低降伏点鋼が早期に塑性化することにより, 柱・梁は層間変形角 1/100 まで弾性状態を保ち, エネルギー吸収能力の高い架構が実現可能であることを報告している.

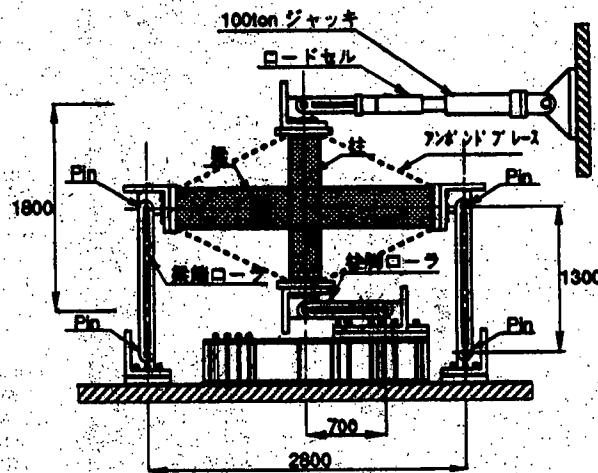


図4 加力装置

図-5.2.17 アンボンドブレース

### 5.2.5 塑性変形による衝撃吸収

・文献[小畑誠, 1999]は, 低降伏点鋼を使用したスリット付きの耐震連結板を提案している. 地震時に, ピンがスリットを通過することによる塑性変形により衝撃エネルギーを吸収することを期待している. 低降伏点鋼を適用するメリットは同一の形状でも SS400 よりピンがスリットを通過しやすいため, 設計において形状選択の自由度が大きいこと, そして高い延性を有することから, 予期しないような大きな変位に対しても破断に対する安全性が高いことを挙げている.

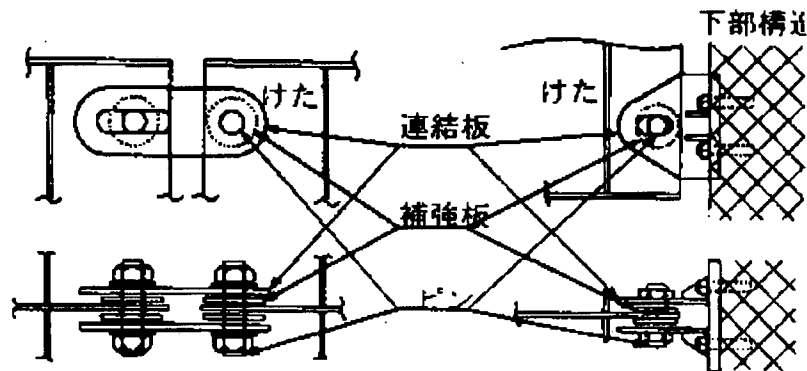


図-5.2.18 耐震連結板



## 参考文献

- [佐分利和宏, 1994] 佐分利和宏・中島正愛・岩井哲・岩田衛・許斐信三・赤沢隆士：低降伏点鋼を用いた鋼板パネルの履歴性能，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1341-1342, 1994.9.
- [岩田衛, 1995] 岩田衛・黄一華・川合広樹・和田章：被害レベル制御構造「Damage Tolerant Structure」に関する研究，日本建築学会技術報告集第1号，pp.82-87, 1995.12.
- [山口種美, 1995] 山口種美・岡田忠義・長谷川博行・望月晴雄・萩原賢次・宇野暢芳・計良光一郎：建築構造用鋼材の開発と実用化，新日鉄技報第356号，pp.22-30, 1995.
- [中川郷司, 1995] 中川郷司・山本昇・藤沢一善・寺本隆幸・木原碩美・鳥井信吾：極軟鋼制震壁のせん断載荷実験，材料とプロセス Vol.8 No.2, p.476, 1995.
- [人見泰義, 1996] 人見泰義・和田肇允・許斐信三・斉藤喜一郎・中田安洋・岩田衛：高靱性せん断パネルの開発研究，日本建築学会技術報告集第3号，pp.118-123, 1996.12.
- [中田安洋, 1996] 中田安洋：極低降伏点鋼を利用した制震デバイス，耐震性向上のための構造・材料・加工技術，pp.27-30, 1996.
- [藤沢一善, 1996] 藤沢一善：耐震設計と新しい金属構造材 極低降伏点鋼(極軟鋼)，建築技術，pp.86-91, 1996.2.
- [土木学会, 1996] 土木学会：鋼構造新技術小委員会 最終報告書(終局耐力に関する研究)，1996.5.
- [Yuhshi Fukumoto, 1997] Yuhshi Fukumoto, Tatsumasa Takaku, Takashi Okamoto, Hiromitsu Tsukahara, Masami Koyama and Kazushige Ozeki: Ultimate Strength of Steel Piers with Multi-cell Cross Section under Cyclic Loading, SDSS'97, pp.221-228, 1997.
- [中島章典, 1997] 中島章典・小野寺理・大塚久哲・鈴木基行・佐藤貴志：低降伏応力度鋼板接着による鋼製橋脚の耐震補強に関する基礎的研究，構造工学論文集 Vol.43A, pp.889-896, 1997.3.
- [岡本晴仁, 1997] 岡本晴仁・加村久哉・下川広海・廣田実・大森俊道・石川博：極軟鋼を用いた制震ダンパ，NKK 技報 No.160, pp.22-29, 1997.12.
- [森下泰光, 1998] 森下泰光・高久達将・川井豊・水谷慎吾：低降伏点鋼を用いたマルチセル構造を有する鋼製橋脚の載荷実験，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集 第I部門，pp.232-233, 1998.10.
- [高久達将, 1998] 高久達将・岡本隆・興守・安藤紘三・池田茂・森下泰光：マルチセル構造を有する鋼製橋脚の耐震性能，第2回鋼構造物の非線形数値解析への応用に関する論文集，1998.11.
- [鹿島孝, 1998] 鹿島孝・高橋賢司・金子洋文・樋口満・中村信行・広田実・加村久哉・形山忠輝：極低降伏点鋼を用いたH形鋼横連結型制震壁に関する研究，第10回日本地震工学シンポジウム，1998.10.
- [中村信行, 1998] 中村信行・廣田実・加村久哉・形山忠輝・打越瑞昌・和田章：座屈補剛

- 方法の違いに着目した極軟鋼制震壁の研究(その 2 繰返しせん断載荷試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998.9.
- [高木潤一, 1998] 高木潤一・廣田実・加村久哉・形山忠輝・打越瑞昌・和田章: 座屈補剛方法の違いに着目した極軟鋼制震壁の研究(その 3 塑性疲労特性と履歴特性のモデル化), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998.9.
- [廣田実, 1998] 廣田実・形山忠輝・加村久哉・伊藤茂樹・岡本晴仁・高橋賢司・金子洋文: 極低降伏点鋼を用いたH形鋼横連結型制震壁に関する研究 その5単体制震壁の動的実験計画, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.801-802, 1998.9.
- [形山忠輝, 1998] 形山忠輝・伊藤茂樹・加村久哉・中村信行・高橋賢司・金子洋文: 極低降伏点鋼を用いたH形鋼横連結型制震壁に関する研究 その6動的実験による性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.803-804, 1998.9.
- [鹿島建設, 1998] 鹿島建設: ハニカムダンパ, structure, No.67, p.88, 1998.7.
- [杉山聡, 1998] 杉山聡: 鋼製スリットダンパー アートホテルズ札幌, structure, No.67, pp.50-51, 1998.7.
- [大野隆平, 1998] 大野隆平・阿部雅人・藤野陽三・Yi Zheng: 極軟鋼板を用いた鋼製橋脚の損傷制御, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集 第 I 部門, pp.234-235, 1998.10.
- [長町賢, 1998] 長町賢・小池武・脇長正・西村宣男: 極軟鋼利用すべり式免震装置の動的応答特性, 川崎製鉄技報 Vol.30 No.1, pp.49-53, 1998.1.
- [青木徹彦, 1998] 青木徹彦・鈴木森晶: 鋼管を用いた弾塑性ねじりダンパー特性に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol.44A, pp.899-905, 1998.3.
- [藤沢一善, 1998] 藤沢一善・清水孝憲・上村健二: 極軟鋼を用いた制震ダンパーの構造性能, 川崎製鉄技報 Vol.30 No.1, pp.1-6, 1998.1.
- [福畑潤一, 1998] 福畑潤一・森田昌敏・梅宮良之: 神戸本社ビル再建に用いられた川崎製鉄の耐震技術, 川崎製鉄技報 Vol.30 No.1, pp.27-32, 1998.1.
- [山口種美, 1998] 山口種美・中田安洋・竹内徹・池辺卓・長尾年通・南晃・鈴木孝彦: 極低降伏点鋼, 低降伏点鋼を使用した制震技術の開発, 新日鉄技報第 368 号, pp.61-67, 1998.
- [鈴木森晶, 1999] 鈴木森晶・青木徹彦・遠藤輝好: 免震ゴム支承と鋼管ねじりダンパーを有する実験床の最大応答変位設計, 構造工学論文集 Vol.45A, pp.859-867, 1999.3.
- [小畑誠, 1999] 小畑誠・栗原位充・後藤芳顕: 高エネルギー吸収型耐震連結板の強度および変形性能, 土木学会論文集 No.612/I-46, pp.239-249, 1999.1.

### 5.3 活用が期待される高機能鋼

#### 5.3.1 耐震部材への活用の可能性

海外で"High Performance Steel"と呼ばれているものは、その殆どが高張力鋼と耐候性鋼である。我が国で開発された高機能鋼は、前節で紹介したように、耐震デバイスとしての活用例が多数見受けられる。これは、強度と延性を兼ね備え、高品質で非常に安定した鋼材の利点を生かしたものである。しかも、要求される性能が明瞭なために、今後ますます活用例が考案されるものと考えられる。

一方、高機能鋼を部材に活用する例は、低降伏比鋼などに限られており、高機能鋼の耐震部材への活用の可能性は不明瞭である。

奈良ら[奈良 敬, 1987] は、鋼材のひずみ硬化が鋼板構造物の構成板要素の座屈強度に与える効果を定量的に明らかにし、その効果が有効となる座屈パラメータの範囲を数値解析により求めた。さらに、補剛板を対象として、塑性変形能力と座屈パラメータの関係を明らかにし、塑性変形能力の改善への糸口を設けた[Nara, S., 1991]。その後、多くの研究者により、理論と実験の両面から、鋼構造物の部材や構成要素の変形性能と鋼材特性の関係が明らかにされた[森脇良一, 1993],[奈良 敬, 1993],[富永知徳, 1994],[山尾敏孝, 1994],[Nara, S., 1994],[山尾敏孝, 1994],[河上 守, 1998]。

小野ら[小野徹郎, 1993] や大畑ら[大畑 充, 1999]は、鋼材特性と部材の変形性能の関係から、部材の変形性能に寄与する鋼材特性の指標に言及し、望ましい鋼材特性について提案を行っている。これらの研究は、鋼材の機械的特性の制御のあり方について、有益な示唆を含むものと考えられ、この分野の研究の進展が望まれる。

#### 5.3.2 高機能鋼の材料構成則

高機能鋼を耐震部材に活用するためには、その耐震性能を評価する手段が必要である。特に、理論的に評価するには精度の良い材料構成則が重要である。材料構成則についてはDafalias-Popovの2曲面モデル[Dafalias, Y. F., 1975]が広く知られているが、我が国においても、構造鋼材の特徴である降伏棚や、弾性域の減少、硬化域の変化などを繰り返し載荷実験によって評価した精度の良い構成則が提案されている [皆川 勝, 1989],[Shen, C., Mizuno, 1993],[西村宣男, 1995],[奈良 敬, 1995],[後藤芳顯, 1998],[奈良 敬, 2000],[休場裕子, 2000]。特に、既存の構造物の変形性能を調査することに主眼をおいた奈良らの研究 [奈良 敬, 1995],[奈良 敬, 2000] や比較的大きなひずみ領域まで精度を追求した後藤らの研究 [後藤芳顯, 1998] は、汎用構造解析コードに用いられている混合硬化則に基づいているため、簡単なユーザサブルーチンを用意することで利用が可能であることから、これらの構成則は耐震部材性能評価への適用性が高いと考えられる。また、鋼材の利点である延性を引き出すためには、低サイクル疲労の観点から明確なひずみ制限を設けることが重要であり、そのひずみ領域までの応力-ひずみ挙動を明確にしておく必要がある[休場裕子, 2000]。

## 参考文献

- [Dafalias, Y. F., 1975] Dafalias, Y. F. and Popov, E. P., : A Model of Nonlinear Hardening Materials for Complex Loading, *Acta Mech.*, 1975, pp.173-192.
- [奈良 敬, 1987] 奈良 敬・出口恭司・小松定夫：ひずみ硬化を考慮した圧縮板の極限強度に関する研究, *構造工学論文集*, Vol.33A, 1987年3月, pp.141-150.
- [皆川 勝, 1989] 皆川 勝・西脇威夫・増田陳紀：塑性流れ域における構造用鋼の単純繰り返し挙動の推定, *構造工学論文集*, Vol.35A, 1989年3月, pp.53-65.
- [Nara, S., 1991] Nara, S. and Fukumoto, Y. : Evaluation of Ultimate Strength and Ductility of Longitudinally Stiffened Plates under Uniaxial Compression, *Proc. of Annual Technical Session, SSRC, Chicago, Illinois, April 15-17, 1991*, pp.391-402.
- [森脇良一, 1993] 森脇良一：鋼材特性を考慮した圧縮板の極限強度と塑性変形能力について, *構造工学論文集*, Vol.39A, 1993年3月, pp.115-124.
- [奈良 敬, 1993] 奈良 敬・梅村哲男・服部松利・森脇良一：鋼材特性を考慮した圧縮補剛板の極限強度と変形性能, *構造工学論文集*, Vol.39A, 1993年3月, pp.125-132.
- [小野徹郎, 1993] 小野徹郎・尾崎 亮・岩田 衛：歪・補エネルギーによる素材特性と部材変形性能に関する検討, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, 1993, pp.1139-1140.
- [Shen, C., Mizuno, 1993] Shen, C., Mizuno, E. and Usami, T. : Development of a Cyclic Two-Surface Model for Structural Steels with Yield Plateau, *NUCE Report, No.9302, March, 1993*.
- [富永知徳, 1994] 富永知徳・安波博道：厚肉少補剛断面を有する鋼製橋脚の変形能に関する実験的研究, *構造工学論文集*, Vol.40A, 1994年3月, pp.189-200.
- [山尾敏孝, 1994] 山尾敏孝・荒毛 徹・崎元達郎：鋼材特性を考慮した薄肉鋼H形短柱の耐荷力と終局挙動について, *構造工学論文集*, Vol.40A, 1994年3月, pp.355-364.
- [Nara, S., 1994] Nara, S., "Steel Properties for Improvement in Ultimate Strength and Ductility of Longitudinally Stiffened Plates under Uniaxial Compression", *Proc. of Annual Technical Session, SSRC, Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania, June 21-22, 1994*, pp.355-364.
- [西村宣男, 1995] 西村宣男・小野 潔・池内智行：単調載荷曲線を基にした繰り返し塑性履歴を受ける鋼材の構成式, *土木学会論文集*, No.513/I-31, 1995年4月, pp.27-38.
- [奈良 敬, 1995] 奈良 敬・服部松利・森脇良一：繰り返し軸方向荷重を受ける鋼板の弾塑性解析, *構造工学における数値解析法シンポジウム論文集*, 第19巻, 日本鋼構造協会, 1995年7月, pp.177-182.
- [山尾敏孝, 1997] 山尾敏孝・岩坪 要・崎元達郎：降伏比が異なる高張力鋼を用いた短柱の耐荷力と変形能力に関する実験的研究, *構造工学論文集*, Vol.43A, 1997年3月, pp.147-154.
- [河上 守, 1998] 河上 守・増田陳紀・白旗弘実：鋼材の応力～ひずみ関係が圧縮力を受ける平板の履歴吸収エネルギーに及ぼす影響に関する基礎的研究, 第2回鋼構造物の

非線形数値解析と耐震設計への応用に関するシンポジウム論文集，第2巻，1998年11月，pp.177-184.

[後藤芳顯，1998] 後藤芳顯・王慶雲・高橋宣男・小畑誠：繰り返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析と材料構成則，土木学会論文集，No.591/I-43，1998年4月，pp.189-206.

[大畑充，1999] 大畑充・田中紀章・大政光史・豊田政男：鋼構造部材の変形能向上のための鋼材機械的特性制御のあり方，鋼構造年次論文報告集，第7巻，1999年11月，pp.379-386.

[奈良敬，2000] 奈良敬・村上茂之・小西隆史：引張試験に基づく材料定数をパラメータとする鋼材の繰り返し構成則，第3回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関するシンポジウム論文集，第3巻，2000年1月，pp.105-112.

[休場裕子，2000] 休場裕子・三木千壽：繰り返し大ひずみ下における鋼材の応力-ひずみ挙動，第3回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関するシンポジウム論文集，第3巻，2000年1月，pp.51-56.