

# 履歴型制震ブレースを用いたプラント支持構造物の耐震性向上

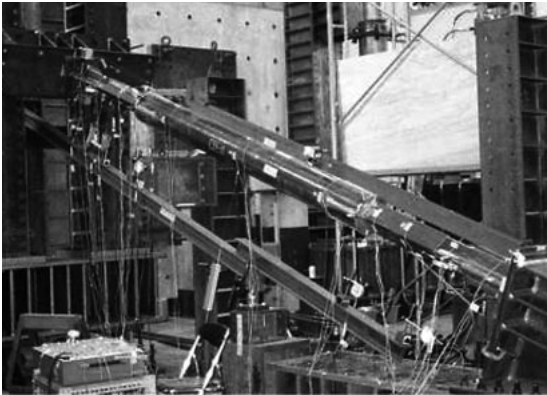
## Techniques for Improving Seismic Resistivity of the Equipment Supporting Structures with Plastic-Energy Absorption Braces

蛭川 明\*<sup>1</sup>  
Akira Hirukawa

岡本 康男\*<sup>2</sup>  
Yasuo Okamoto

森下 邦宏\*<sup>3</sup>  
Kunihiro Morishita

村瀬 良秀\*<sup>4</sup>  
Yoshihide Murase



当社は、従来からボイラ支持鉄骨をはじめとするプラント支持構造物に耐震構造、制震構造の開発を行ってきており、その一環として、新たな制震デバイスである履歴型制震ブレース（ダンパーブレース）を開発した。本報では、この履歴型制震ブレースの石炭ガス化炉複合発電設備（IGCC）におけるガス化炉支持鉄骨への適用事例を紹介する。その結果、履歴型制震ブレースを適用することで支持鉄骨基部層せん断力が70%程度低減可能となり、耐震対策としてきわめて効果が大きいことが確認された。

### 1. はじめに

兵庫県南部地震以降、一般建築物などに関しては耐震性能向上対策がさらに精力的に研究され、新設構造物に対する制震構造化、既設構造物に対する耐震補強が進められている。一方、当社製品のプラント支持構造物のうちボイラ支持鉄骨は、ボイラを頂部より吊り下げ、支持鉄骨と吊下げ機器の2つの構造の振動が連成する特殊性を有している。これらの支持鉄骨については、従来吊下げ機器と支持鉄骨の間に設置される振止め（ストッパ）の塑性化などによるエネルギー吸収効果を利用して耐震性能を向上させる工法が採られてきた<sup>(1)</sup>。この工法の場合、ストッパが局部的に配置されること、構造的にエネルギー吸収量が小さいことなどから、兵庫県南部地震のような激震に対しては、より大きなエネルギー吸収性能を有する制震デバイスが必要である。さらに激震に対する構造物の安全性、信頼性を明確にするとともに、廉価化が求められている。

この背景から、当社は新しい制震デバイスとして履歴型制震ブレースを開発し、ボイラ実機へ適用してきた<sup>(2)</sup>。本報では石炭ガス化炉複合発電設備（IGCC）におけるガス化炉支持鉄骨への適用事例を紹介する。

### 2. 履歴型制震ブレースの概要

履歴型制震ブレースは、機械的な機構（摩擦、オイルなど）でエネルギーを吸収するのではなく、鋼材の弾塑性特性を利用したエネルギー吸収機構を有しており、通常、トラス構造の斜材部分に挿入される。本報

で紹介する履歴型制震ブレース（以下、ダンパーブレース）は軸降伏座屈拘束型のブレースであり、要求される長さはプラント支持構造物を対象としているため、一般建築物と異なり10mを超える長尺部材が多くなる。しかし、一般的な軸降伏座屈拘束型ブレースは部材全長をダンパ部材とするため、長尺部材として用いる場合はダンパ部の製作精度管理などが困難である。

ダンパーブレースの構造は図1のように、作用軸力に対して軸降伏して弾塑性エネルギーを吸収する芯材（十字型断面：低降伏点鋼を使用）、芯材と所定の隙間

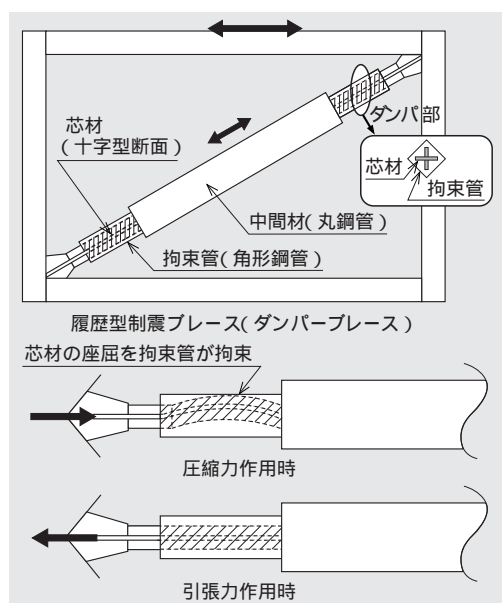


図1 ダンパーブレース概要及び変形状態  
圧縮状態でも芯材が座屈せず、軸変形している状態を示す。

\*<sup>1</sup> 原動機事業本部火力プロジェクト部配置土建技術課

\*<sup>2</sup> 原動機事業本部火力プロジェクト部配置土建技術課長

\*<sup>3</sup> 技術本部広島研究所鉄構・土木研究室 博(工)

\*<sup>4</sup> 菱明技研(株) 技師長

をあけて設置され、圧縮力に対して芯材が降伏後にねじれ横倒れ座屈するのを拘束する拘束管（角形鋼管：軸力を伝達しない）、ブレース部材の両端に配したダンパ部材（芯材+拘束管）をつなぎ軸力を伝達する中間材（丸鋼管）により構成されている。これにより、ダンパ部の製作精度管理が容易になり長尺部材への適用性が拡大するとともに、降伏軸力の調整はダンパ部材で軸剛性の調整は中間材で個別に行うことができ、最適な部材特性を設定することが可能となる。

このブレースは軸力が作用した場合、圧縮力に対しては、芯材が降伏後、座屈変形を生じようとするが、図1のように拘束管がその座屈変形を拘束することで、圧縮力に対しても引張降伏状態と同様に降伏軸力を超えても安定した弾塑性挙動を示す。ダンパーブレースに対する繰返し載荷実験結果を図2(a)に示す。縦軸は平均軸応力  $\sigma$ 、横軸は平均軸ひずみ  $\epsilon$  であり、圧縮/引張でほぼ同様の履歴特性を示している。図2(a)では  $\pm 1.5\%$  までの結果であるが、実験的には  $\pm$

2.5%まで安定した弾塑性エネルギー吸収効果を示していることを確認している。また、図2(b)にダンパ部の繰返し塑性変形性能を示す。横軸は芯材の幅厚比（芯材の突出板幅/板厚の比）、縦軸は繰返し塑性変形性能を示す指標を示す。図中の横太線は大地震時に要求される繰返し変形性能を示しており、ダンパーブレースは十分な繰返し変形性能を有していることが分かる<sup>3)-(5)</sup>。

### 3. ガス化炉支持鉄骨への適用

#### 3.1 対象構造の概要及びダンパーブレース配置

(株)クリーンコールパワー研究所向け石炭ガス化複合発電設備プラント（IGCC）におけるガス化炉支持鉄骨を対象として実機への適用を行った。その構造の概念図を図3(a)に、鉄骨スケルトン及びダンパーブレースの配置図を図3(b)に示す。また、ダンパーブレース設置構面の代表例としてX方向のA通りの軸組図を図3(c)に示す。ただし、図3(b)には支持鉄骨

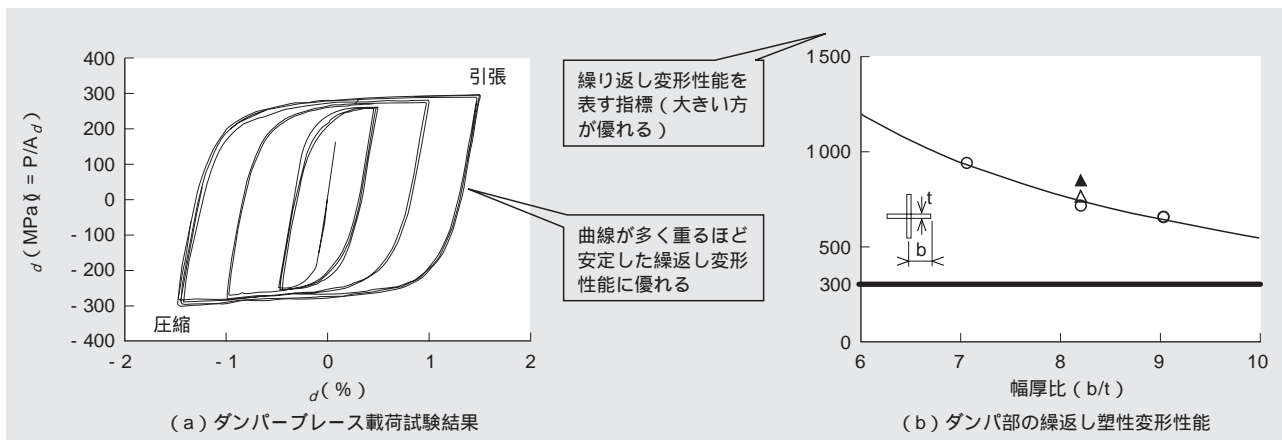


図2 ダンパーブレースの特性 安定した履歴特性（エネルギー吸収特性）、十字型断面芯材の寸法（幅厚比）による変形性能の変化を示す。

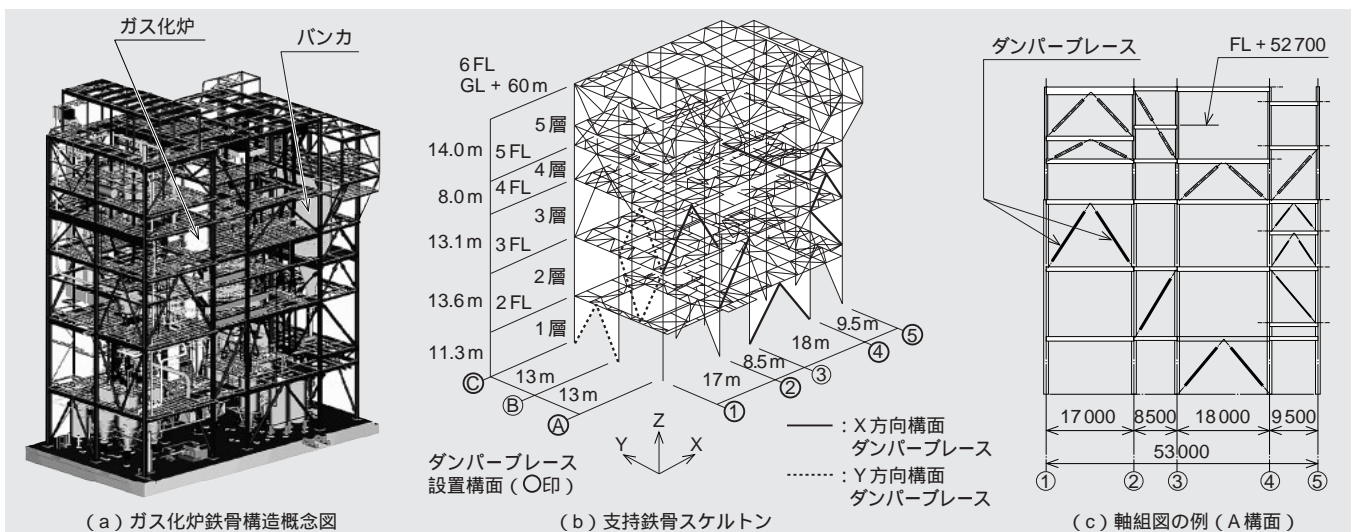


図3 ダンパーブレース組み込みガス化炉支持鉄骨構造の概念図 (b)(c)中の太線はダンパーブレースを示す。

の手前側の構面のみダンパーブレース設置箇所を示している。支持鉄骨は高さ60 m、X方向幅53 m、Y方向幅26 mである。

ダンパーブレースは、図3(b)のように支持鉄骨の1～3層に設置するものとし、X方向構面で20本、Y方向構面で27本設置した。ダンパーブレース部材長は最大で16 m、降伏軸力は1 200～6 100kN程度の範囲で設計した。

表1に従来型架構(図3(b)のダンパーブレースを通常のブレースとした支持鉄骨構造)と、ダンパーブレース架構(ダンパーブレースを設置した支持鉄骨構造)の、1次モードの弾性固有周期の比較を示す。

X、Y方向ともにダンパーブレース架構の方が従来型架構の1.2～1.3倍程度に長周期化しており、従来型架構の鉛直ブレースに比べダンパーブレース十字芯材断面が小さいためである。

3.2 地震応答低減効果

支持鉄骨にダンパーブレースを組み込むことによる地震時の定量的な応答低減効果を把握するため、従来型架構とダンパーブレース架構の両者に対して地震応答解析を行った。解析モデルは各構面、各層毎の特性を個々に水平パネとして評価し、平面的なねじれ挙動なども考慮できる擬似立体多質点モデルを用いた。入力地震波は最大加速度を316 Galに調整した直下型地震、海洋型地震の代表的な地震波形(2次レベル)を用いた。設計思想としては、ダンパーブレース架構ではダンパーブレースのみに塑性エネルギーを吸収さ

せ、その他の鉄骨部材は弾性範囲に収めるものとした。また、層せん断力をできるだけ低減させるとともに、応答変位は従来型架構と同程度に抑えることとした。

地震応答解析結果のうち、図4(a)(b)にX、Y方向のそれぞれについて高さ方向の層せん断力分布の比較を示す。ただし、従来型架構については部材の塑性化は考慮していない弾性応答値である。この結果より、層せん断力は従来型架構に比べ大きく低減していることが確認でき、その低減率は70%近くに達していることがわかる。また、図4(c)にはX、Y方向の応答変位分布の比較を示す。これによると、2FLでの応答変位がダンパーブレース架構の方が大きめの値となっているが、4FL～6FL(頂部)ではダンパーブレース架構の方が応答変位は小さくなっており、従来型架構と同程度の応答変位に抑えることができている。

この応答低減効果は、等価な復元力特性の評価に基づくダンパーブレースの塑性化に伴う等価周期の長周期化、ダンパーブレースのエネルギー吸収に伴う等価減衰の増加によるものである。

3.3 ダンパーブレース組み込みによるメリット

プラント支持構造物にダンパーブレースを設置することによるメリットとしては、大地震時に損傷する箇所(エネルギー吸収部材)をダンパーブレースのみに集中させ、他の部材は弾性範囲に収めることにより、地震時の安全性、信頼性が高まること、応答せん断力を大きく低減できる(=構造物の廉価化)ことが挙げられる。

廉価化については支持構造物自体の鉄骨重量低減効果、層せん断力低減に伴う基礎数量低減効果が挙げられるが、前者は本例では5%程度となった。これは上述のように応答変位自体が従来型架構と同程度になることにより、支持鉄骨の柱・梁部材の応力度があまり

表1 固有値解析結果

X方向固有周期(s)		Y方向固有周期(s)	
従来型架構	ダンパーブレース架構	従来型架構	ダンパーブレース架構
1.33	1.80	1.34	1.65

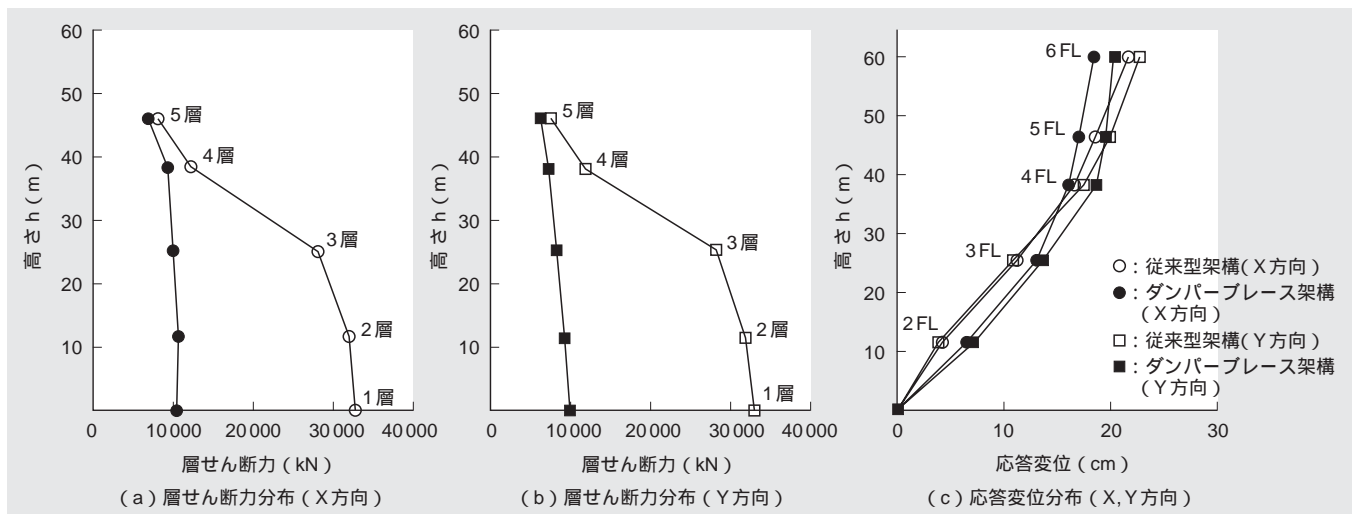


図4 地震応答解析結果の比較 従来型架構とダンパーブレース架構のX、Y方向の2次レベル地震応答値の比較を示す。



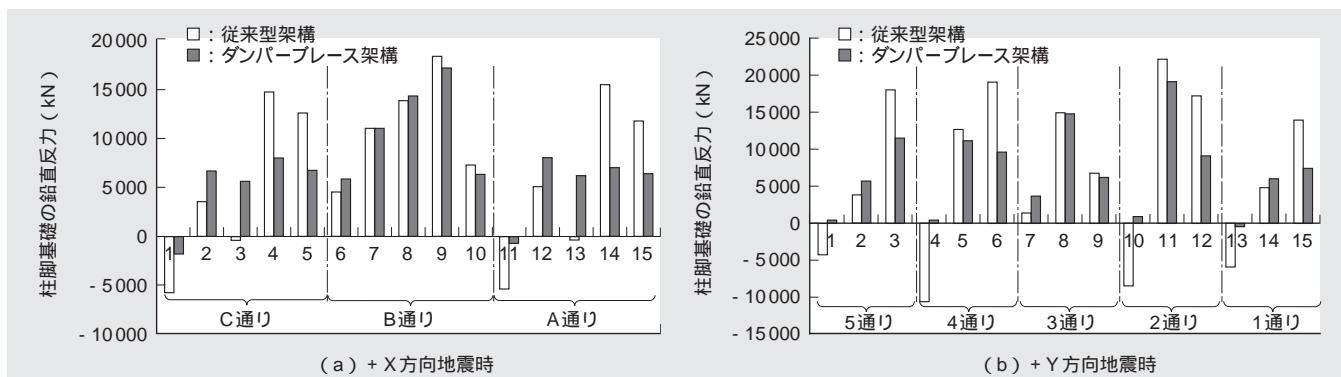


図5 柱脚鉛直反力の比較 従来型架構とダンパーブレース架構の柱脚鉛直反力の比較を示す。縦軸のマイナス値が引き抜き力を示す。

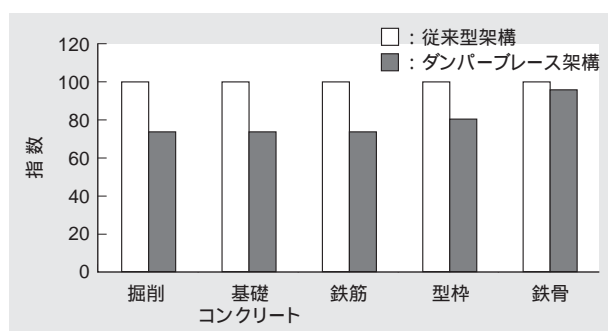


図6 工事数量の比較 従来型架構とダンパーブレース架構の工事数量の比較を示す。

変化しないためである。後者の基礎数量低減については、図5に従来型架構とダンパーブレース架構の柱脚鉛直反力の比較を示すが、従来型架構で引き抜き（図5中マイナス値）が生じていた箇所でも、ダンパーブレースを設置することにより層せん断力、転倒モーメントが大きく低減するため引き抜きが生じない、あるいは引き抜き力が大きく低減していることがわかる。図6にダンパーブレース架構と従来型架構の工事数量比較（予想数量）を示す。

図中の縦軸はダンパーブレース架構および従来型架構の工事数量の従来型架構工事数量に対する比率をそれぞれ示す。これより鉄骨量よりも基礎工事数量の方が大きく低減されている。

#### 4. ま と め

当社では国内外の数多くのプラントの設計、施工を通じ、多くの設計、施工技術を培ってきた。その中で、本報のような耐震性に優れたプラント支持構造物の開発を行っている。

現在、建築基準法の限界耐力計算などに代表されるように、構造物の塑性化を定量的に評価した耐震設計法なども適用されており、一般建築物では制震構造

が主流となっている。これらも踏まえ、国内外のプラント支持鉄骨構造の制震、耐震構造化を図っていく上でも本技術は大きな効果を発揮するものと考えられる。

今後も新たな耐震性向上対策を開発していくとともに、これらを用いたより高い信頼性、耐震性を確保しうるプラント支持構造物の開発、また、その適用範囲の拡大に努めていく所存である。

#### 参 考 文 献

- (1) 中尾ほか、ボイラ支持鉄骨の弾塑性地震応答解析、三菱重工技報 Vol.17 No.3 (1980)
- (2) 岡本、ボイラーの耐震性向上（履歴型ブレースの採用）、火原協中部大会 (2003)
- (3) 村瀬ほか、両端に座屈拘束型ダンパーを組込んだ長尺制震ブレースの設計法（その1）、日本建築学会構造系論文集 第578号 (2004) p.131
- (4) 森下ほか、両端に軸降伏ダンパーを組込んだ長尺ブレースの座屈拘束条件（その2）模型実験、平成11年度建築学会近畿支部研究報告集 (1999) p.297
- (5) 森下ほか、両端に軸降伏ダンパーを組込んだ長尺ブレースのダンパー部復元力特性試験、2000年度建築学会大会学術講演梗概集 (2000) p.903



蛭川明



岡本康男



森下邦宏



村瀬良秀