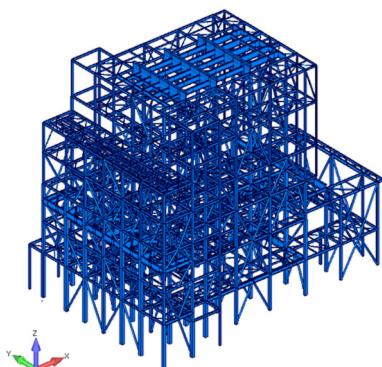


耐震性と経済性を両立する プラント支持鉄骨の合理的設計技術の開発

Development of Rational Design Technique for Frame Steel Structure
Combining Seismic Resistance and Economic Performance



加藤 基規*¹
Motoki Kato

森下 邦宏*²
Kunihiro Morishita

下野 将樹*³
Masaki Shimono

中馬 康晴*⁴
Yasuharu Chuman

岡藤 孝史*⁵
Takashi Okafuji

茂中 俊明*⁶
Toshiaki Monaka

プラント支持鉄骨に対する耐震設計は従来より実施されているが、今後予想される超巨大地震を想定した地震荷重の増大等により、更なる耐震性の向上と経済性確保を両立する合理的構造が求められている。本課題に対し、多数の鉄骨部材を同時に最小化し経済設計を可能とする鉄骨断面最小化手法と効率的な耐震性向上を実現する制震設計技術を組み合わせた鉄骨設計手法を構築し、実機設計への適用を推進している。本報では、本設計技術の概要を示すとともに、本技術を適用した設計例を紹介する。

1. はじめに

当社は数多くのプラント製品技術を保有しており、これらを支持するプラント支持鉄骨は数十の部材で構成される小規模のものから、大型のコンベンショナルボイラ支持鉄骨のように数千もの部材で構成される大規模なものまで多種多様に存在する。これらプラント支持鉄骨の機能は確実にプラント機器を支持することであり、地震や暴風といった自然外乱に対しても倒壊せず、安心・安全を担保することが必要となる。とりわけ、地震に対しては、我が国は地震大国であり、これまでの耐震設計基準の変遷に従い、当社プラント支持鉄骨も耐震性能を向上させてきた。一方で、2011年の東北地方太平洋沖地震の発生や、南海トラフ地震をはじめとする超巨大地震の発生予測の影響で、設計時に考慮する地震荷重レベルは増加傾向にあり、更なる耐震性能の向上が求められつつある。当然ながら、製品としては経済性も必要となり、現在は設計者が試行錯誤的に耐震性と経済性を考慮した設計を進めている。しかしながら、上述のように、数千部材規模の鉄骨に対し人間の手による設計では限界があり、耐震性と経済性という相反する性能を実現する合理的な設計技術が求められている状況である。

2. プラント支持鉄骨設計の概要

プラント支持鉄骨の耐震設計は、国内では建築基準法に準拠した設計を行う場合が多く、稀に発生することを想定したレベル1地震、極稀に発生することを想定したレベル2地震に対して、それぞれ1次設計、2次設計を行う。設計フロー概念図を図1に示すが、1次設計では、地震力に対してすべての鉄骨部材が短期許容応力度以下におさまること、層間変形角（下階と上階の水

*1 技術統括本部 広島研究所 技術士(建設部門)

*2 技術統括本部 広島研究所 室長 工博

*3 技術統括本部 広島研究所

*4 技術統括本部 長崎研究所 主席研究員

*5 技術統括本部 長崎研究所 技術士(機械部門)

*6 ICTソリューション本部 製品ソリューションセンター グループ長 理博

平相対変位／階高)が許容値 1/200 以下におさまることを確認する。また、2次設計では、近年の地震外力の増大の影響により、従来手法による設計では、鉄骨部材が肥大して非合理的な設計となる場合がある。このため、効率的に地震エネルギーを吸収して地震応答を低減させることが可能な制震デバイスを用いた制震設計が適用される例が増えている。

本報では、1次設計に対して、3章に示すように、試行錯誤によらず、各種制約条件などを満足させた上で設計評価を満足させる鉄骨断面最小化手法を適用し、2次設計に対して、4章に示す制震デバイスを有効活用した制震設計を適用することにより、耐震性、経済性に優れた合理的設計を行った例を示す。

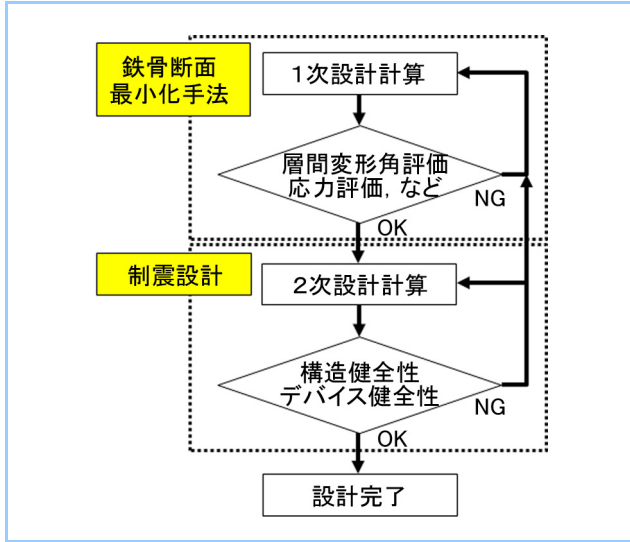


図1 プラント鉄骨設計フロー
稀に発生する地震、極稀に発生する地震に対して、1次設計、2次設計を実施する。

3. 鉄骨断面最小化手法

前章で示したように、プラント支持鉄骨の1次設計には、プラント支持鉄骨を構成する多数の部材断面を同時に最小化可能な鉄骨断面最小化手法 M-FRAME (Mitsubishi - Frame weight Reduction Algorithm for Multiple Elements : 三菱-多数部材向け鉄骨重量低減アルゴリズム)を開発し、適用した。本手法の概略フローを図2に示す。以降、本手法の各ポイントについて示す。

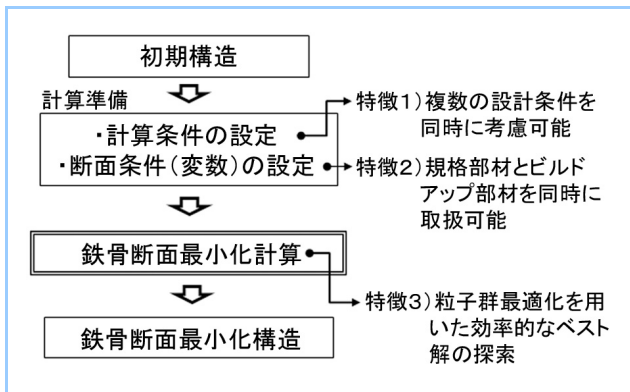


図2 鉄骨断面最小化設計フロー
鉄骨断面最小化計算は、あらゆる構造物に対応可能なような様々な設計条件、断面条件を同時に考慮可能。また、粒子群最適化手法の適用により効率的な解の探索を実現。

(1) 計算条件

鉄骨断面最小化手法では、構造全体としての経済性を確保するため、構造全体の重量を評価値として最小となるよう計算をする。鉄骨設計では、前章記載の通り、発生応力度や、水平方向の変形量等様々な許容値を満足した設計が必要となる。よって、本手法では、これら複数の設計条件を制約条件として考慮できるシステムを構築し、複数設計条件下での多数部材の同時断面最小化を実現した。これにより、通常試行錯誤が必要となる複数部材の適正な断面選定が、自動で実施可能となる。ここで、本手法適用による応力度比(発生応力度/許容応力度)と部材数の関係の変化を図3に示す。図に示すように、応力度比が小さく、比較的強度に余裕のある部材断面を制約条件内(応力度比 1.0 以下、層間変形角 1/200 以下等)で小さくすることにより、構造全体の重量低減を図る。

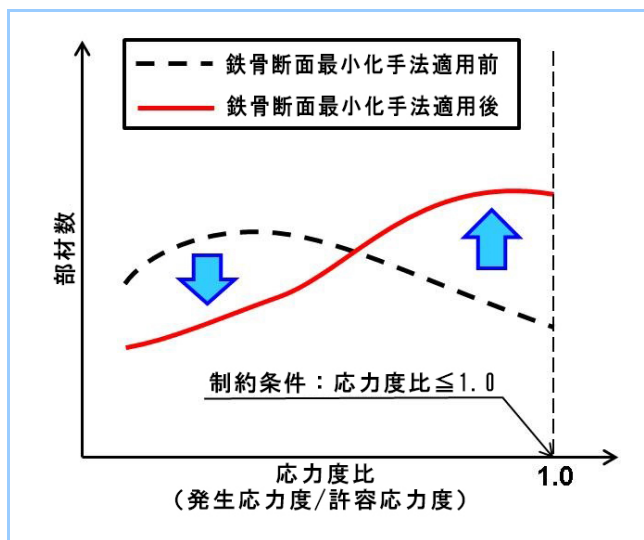


図3 部材応力度比と部材数の関係の変化

鉄骨断面最小化手法では、応力度比が小さく比較的強度に余裕のある部材の断面を制約条件内で小さくし、構造全体の重量低減を図る。結果的に、応力度比が小さい部材数は減り、大きい部材数は増える。

(2) 断面形状の設定条件

当社製品のプラント支持鉄骨には、様々なサイズの断面が適用されている。中小規模の構造物のように比較的小さい断面の部材となる場合には JIS 型鋼に代表される規格断面部材が多用される。一方で、大型のボイラ支持鉄骨のような大規模かつ大荷重条件の構造物では、規格断面部材では性能が不足する箇所が発生するため、ビルドアップ部材(鋼板を工場で切断、組立して製作する部材)と規格断面部材が混在する構造となる。本断面最小化手法は、あらゆる規模の構造物に対応可能とするため、規格断面部材、ビルドアップ部材いずれの断面にも対応可能とした。具体的には、離散値と連続値を同時に計算で取扱可能とした。規格断面部材を使用する場合には、あらかじめ準備した型鋼リストから適切な断面を選択させる(離散値への対応)。また、ビルドアップ部材を使用する場合には、断面定数(断面積、断面二次モーメント等)を連続的に変化させ、目的である重量最小化を実現させる断面定数を求める(連続値への対応)。

(3) 計算アルゴリズム

鉄骨断面最小化手法では、計算アルゴリズムとして粒子群最適化(PSO: Particle Swarm Optimization)を使用する。本アルゴリズムのイメージを図4に示す。本手法は、“昆虫、魚、鳥などの生物の群れにおいて、一匹が食料などの目的を発見すると、群れの残りがどこにいてもその情報をやり取りし、群として目的の方向に進むことができる”という生物群の知能を模倣した手法である。具体的には、図4に示すように、①群れとしてのベスト解、②各個体のベスト解、③

各個体の1つ前の位置から現在の位置の移動方向(慣性)の3つの情報より各個体の位置を更新していき、最終的なベスト解を求める。前述のとおり、鉄骨断面最小化手法では、規格断面部材とビルドアップ部材の両者を対象とすることから、離散変数と連続変数の両方を取り扱う整数混合最適化問題として計算を実施した。本手法は、各個体が自らのベスト解と群れとしてのベスト解を保持して解を探索するため、効率的に目的を達成する解を得ることができる。

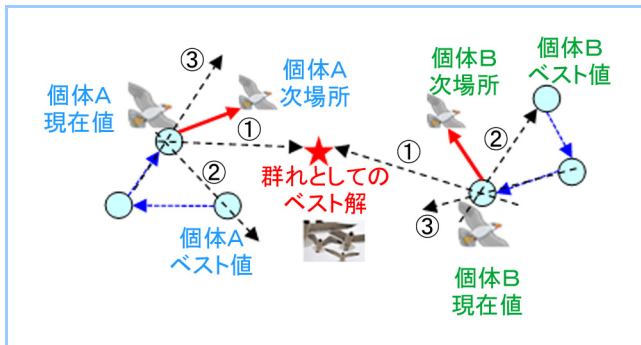


図4 粒子群最適化手法の概要

粒子群最適化手法では、①群れとしてのベスト解、②各個体のベスト解、③各個体の1つ前の位置から現在の位置の移動方向(慣性)に基づき、解を探索する。

4. 制震デバイス

制震デバイスとしては、トラス構造の斜材部分に挿入される履歴型制震ブレースを採用した。この履歴型制震ブレースは、機械的な機構(摩擦、オイルなど)により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いる。本報で採用した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、10m を超える長尺部材に対しても適用可能である。

ダンパーブレースの構造概要を図5に示すが、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十字芯材(十字型断面)、芯材と隙間をあけて設置され、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座屈拘束管(角形鋼管)、ブレース部材の両端に配したダンパー部材(十字芯材+座屈拘束管)をつなぐ中間材により構成されている。この構造では、降伏軸力の調整はダンパー部材で、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、十字芯材が降伏後、座屈変形を生じようとするが、座屈拘束管がその座屈変形を拘束することで、引張降伏状態と同様の弾塑性挙動を示す。ダンパーブレースに対する繰返し載荷実験結果を図6に示す。縦軸は平均軸応力 σ_d 、横軸は平均軸ひずみ ε_d であり、非常に安定した弾塑性エネルギー吸収効果を示していることが分かる。

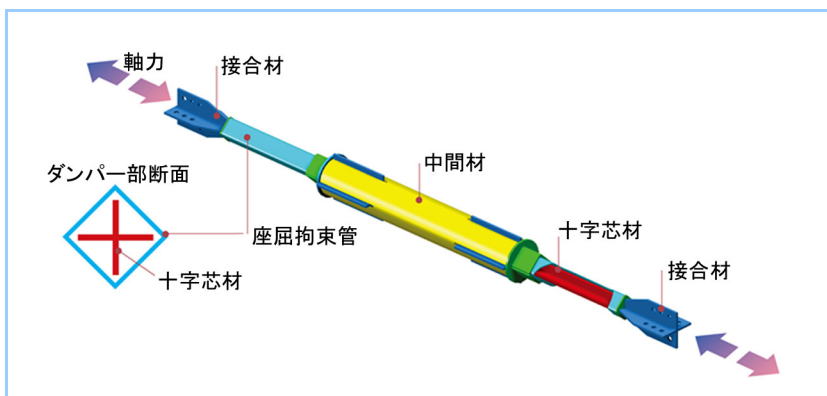


図5 ダンパーブレース構造概要

ダンパーブレースは十字芯材、座屈拘束管、中間材、接合材から構成される。

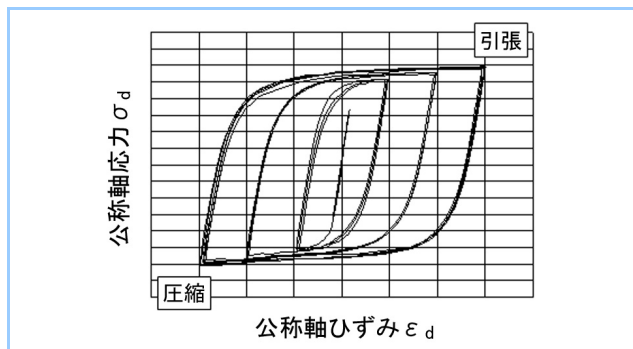


図6 ダンパーブレース履歴特性
 十字芯材が軸降伏するが、圧縮力に対しては座屈拘束管の補剛効果により座屈が拘束され、引張側と同様の弾塑性挙動を示す。静的に圧縮／引張の交番载荷を実施した結果。圧縮力(マイナス側)に対しても、引張側と同様の挙動を示している。

5. プラント支持鉄骨耐震設計事例

本章では、ここまで紹介した鉄骨断面最小化手法と制震設計を組合せて適用した事例を紹介する。

(1) 対象構造物

対象構造物のモデル図を図7に示す。対象はボイラ支持鉄骨であり、部材数は約 2000 の大規模な構造物である。なお、図中の赤線はダンパーブレース設置部位を示す。

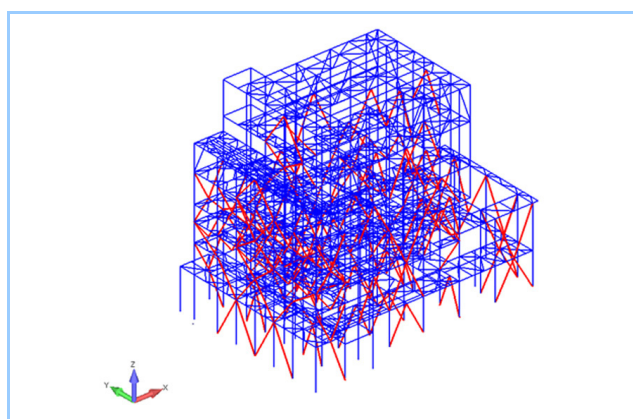


図7 適用対象構造(モデル図)
 適用対象構造物はボイラ支持鉄骨(部材数約 2000)。赤線部はダンパーブレース設置箇所を示す。

(2) 設計手法

設計は2章で示した図1に示す手順で実施し、1次設計に鉄骨断面最小化手法、2次設計に制震設計を適用する。なお、2次設計の地震外力レベルは1次設計の約2倍である。

(3) 設計結果

設計の結果得られた重量の低減効果を図8に示す。本図は、鉄骨断面最小化手法を適用しなかったケースとの比較を示しており(制震設計による重量低減効果は含まない)、鉄骨断面最小化手法による効率的設計により、数%～十数%の重量低減が達成可能となる。ここで、鉄骨断面最小化手法による効果として、1次設計における応力度比(=発生応力度/許容応力度、設計では応力度比が 1.0 を下回るように設計する)が 0.8～1.0 の範囲の部材数の推移を図9に示す。本手法適用により、応力度比 0.8～1.0 の部材数は約3倍に増えている。この推移からも鉄骨最小化手法により無駄のない設計ができていることが確認できる。次に、2次設計(地震応答解析)実施時の、層せん断力分布図を図 10 に示す。本図は、ダンパーブレース適用時と非適用時の比較を示しており、縦軸に建物高さ位置、横軸に層せん断力(ダンパーブ

ース適用しない場合の基部層せん断力を1として表現)をプロットした。この図より、ダンパーブレース適用時は、構造高さ全体にわたり層せん断力が低減しており、基部で2~3割程度の低減となっている。これは、前章で示したダンパーブレースによる制震効果によるものであり、ダンパーブレース設置により地震応答を大幅に低減した効率的な耐震設計を実現した。なお、この結果において、ダンパーブレースを除く鉄骨部材の発生応力度はすべて2次設計における許容応力度以下におさまっている。

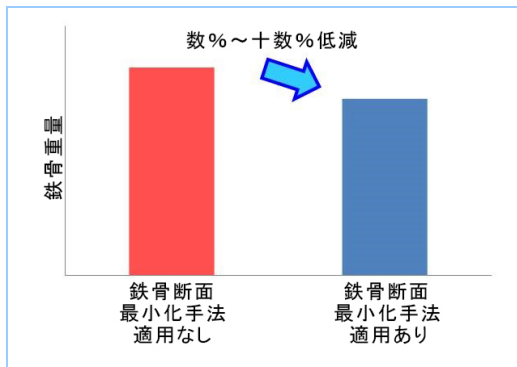


図8 重量低減効果

鉄骨断面最小化手法適用により重量が数%~十数%低減。(制震構造による重量低減効果は含まない)。

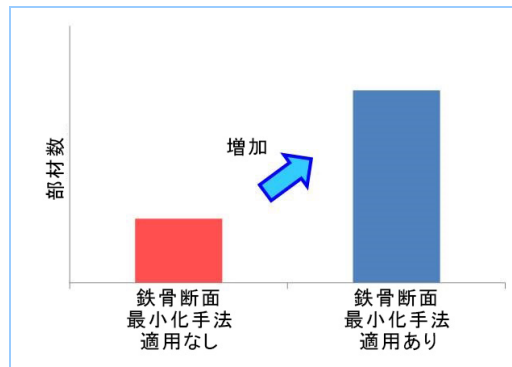


図9 応力度比の推移

応力度比(発生応力度/許容応力度)0.8~1.0の範囲の部材数の推移。鉄骨断面最小化手法適用により、応力度比0.8~1.0の部材数は約3倍に増加。

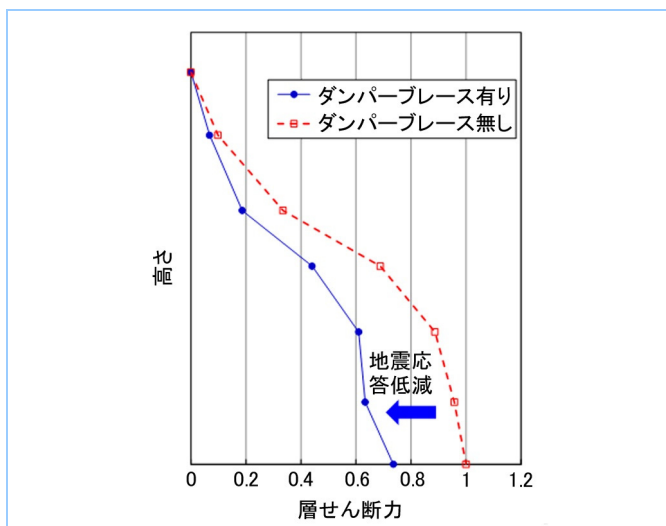


図10 2次設計の層せん断力分布

2次設計の地震応答解析での構造物の層せん断力分布(ダンパーブレース無しの基部層せん断力を1として表現)。ダンパーブレースによる制震効果により、構造高さ全体にわたり層せん断力が低減。

6. まとめ

プラント支持構造物等の鋼構造物を対象に、多数の鉄骨部材断面を同時に最小化可能な鉄骨断面最小化手法と、制震デバイスの地震エネルギー吸収効果により大幅な地震応答低減を実現する制震設計技術を組み合わせた設計手法を構築した。本手法を適用することにより、プラント支持鉄骨の合理化が図れるとともに、鉄骨を支える基礎構造についても地震応答低減効果により、規模の縮小を図ることができる。以上により、鉄骨、基礎の構造全体として耐震性と経済性を両立した合理的設計が可能となり、さらに、鉄骨および基礎の材料低減に伴い、環境にも優しい設計が可能となる。今後、本設計技術の他製品への展開も進めていく所存である。