

焼却炉ボイラ架構のハイブリッド制震構造

Furnace & Boiler Structure Applied Hybrid Seismic Response Control Device

飯田 泰彦 シビルエンジニアリング部 土木建築設計室 主査
吉田 勝利 シビルエンジニアリング部 土木建築設計室 統括スタッフ
今野 和近 基盤技術研究所 都市工学研究部 主査
加村 久哉 基盤技術研究所 都市工学研究部 主任研究員

Yasuhiko Iida
Katsutoshi Yoshida
Kazuchika Konno
Hisaya Kamura

兵庫県南部地震を契機に、ごみ焼却施設は工場棟建屋だけでなくプラント機器の架構についても、耐震性の向上とより精密な耐震性の評価を求められてきている。当社ではプラント機器の中核である焼却炉と廃熱ボイラを支持する架構について、既にオイルダンパーを適用した制震構造を開発・実機化している。本稿では大地震対策として、履歴型制震デバイスを加えたハイブリッド制震構造を提案し、その良好な制震効果を解析的に検証した。

Since the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake, it has become more important to ensure seismic safety and reliability of steel structures supporting refuse furnaces and boilers in incineration plants. We have developed the structure applied oil damper which control seismic torsional displacement. In this paper, the new structure applied oil damper and hysteretic energy dissipation device (brace-type hysteretic damper) was described and the improvement of seismic performance was investigated by large-earthquake response analysis.

1. はじめに

ごみ焼却施設の中核機器である焼却炉および廃熱ボイラは、建築建屋である鉄筋コンクリート造（以下、RC造と略記する）あるいは鉄骨鉄筋コンクリート造（以下、SRC造と略記する）の工場棟の内部において、鉄骨構造（以下、S造と略記する）の焼却炉ボイラ架構（以下、炉体架構と略記する）により支持されている。

近年、焼却炉および廃熱ボイラは、エネルギープラントとしての位置付けが大きくなってきており大型化の傾向にある。一方、兵庫県南部地震を契機に、建屋のみでなく、プラント機器の架構に対しても耐震性の向上と、より精密な評価が求められてきている。当社では炉体架構に特有の地震時の振動性状に対して、既にオイルダンパーを適用した制震構造を開発・実機化している¹⁾。本稿では、大地震対策として、オイルダンパーに加えて、制震ブレースを設置するハイブリッド制震構造について報告する。

2. ごみ焼却施設の耐震設計

2.1 応答制御構造設計法

兵庫県南部地震以降、病院や共同住宅あるいは避難拠点にあたる公共建築物を中心に、より耐震性能の高い建築物が求められるようになってきた。最近では、地球環境に配慮した長寿命建築の観点からも、オフィスビルなどで同様の傾向がみられる。従来の耐震設計法は、建築基準法に準拠して、関東大震災レベルの地震規模（300gal～400gal）

において、構造部材の損傷を許容しながらも倒壊しない程度（中破）の耐震性能を有する保有耐力設計の考え方である。応答制御構造設計法とよばれる新しい性能設計的な考え方では、建築主自らが想定する地震規模において、構造部材の損傷度合だけでなく、内外装材や建築設備の損傷度合も考慮に入れている。

Table 1 は応答制御構造設計法において、建築主が目標とする耐震性能グレードがメニュー化されたもの²⁾で、地震規模に対する損傷度合がマトリックスになっている。建築基準法の保有耐力設計は、基準級に該当する。

Table 1 Menu of seismic structural design

性能グレード						たまたに作用する 軽震						まれに作用する 軽震						ごくまれに作用する 軽震						余震の 検証																							
免震	特級	機能維持 無被害										許容限界										統局限界																									
	基準級	修復不要										許容限界										統局限界																									
特級	特級	無被害 修復不要										軽微な被害																																			
	上級	軽微な修復										小規模修復										中破																									
基準級	基準級	軽微な修復										大規模修復										大破																									
												大規模修復										修復不能																									
中地震																		大地震						巨大地震																							
震度		Ⅴ弱										Ⅴ強										Ⅵ弱										Ⅵ強						Ⅶ									
加速度 (m/s ²)		0.0~1.0										2.5										3.0~4.0										5.0										7.5					
速度 (m/s)												0.25																				0.5										0.75					

震設計によって設計されている。立地地域によっては防災意識の強い建築主の要望により、想定地震規模を関東大震災レベルの1.25倍あるいは1.5倍にする重要度係数³⁾を設定した保有耐力設計を行う場合がある。一般建築物と比較して、以下に示すように耐震性に優れた構造特性⁴⁾を有し、保有耐力に十分な余裕をもつ場合が多いため、部材サイズを大きくするなどの耐震コストの増加が小さく、重要度係数への対応が比較的容易である。

- (1) ごみピット、灰ピットなどの地下部分の根入れ効果により地震時の水平力に対して有効に抵抗する。
- (2) ごみピットを始め、耐震要素である壁を比較的多く有し、これが建物全体の強度と剛性を高めている。
- (3) アスペクト比（高さ／平面長さの比）が小さく、地震に対して安定した動的挙動を示す。

2.3 炉体架構の耐震設計

プラント機器の支持架構に対しては、法令で規定された明確な耐震設計法はない。当社の場合、プラントの中核機器を支持する炉体架構の耐震設計は、高さ方向の地震時の層せん断力分布を適正に評価するために、建築基準法に準拠している。また、オイルダンパーを制震デバイスとして工場棟との間で連結し、ボイラがオーバーハングしていることから生じるねじれ変形の制御を行う独自の工夫をしている¹⁾。

工場棟と同様に、関東大震災レベルを超える大地震を想定した場合、炉体架構の主要な耐震要素である鉄骨ブレースは、過大な圧縮応力で座屈が生じ、局部的な変形が架構の安定性に影響を及ぼすことも考えられる。また、通常の鉄骨ブレースは、復元力特性がスリップ型の傾向を示すため、入力地震エネルギーの吸収能力が小さい。このため、耐震コストの増加なしで、高い耐震性を確保するのは容易ではない。下記に現状の炉体架構の構造特性を示す。

- (1) 短辺 Y 方向 (Fig.1) は、アスペクト比が大きく、かつ、排ガスや焼却灰の動線確保のためにブレースなどの耐震要素を十分に配置できないため、地震時の変形が大きくなる傾向にある。

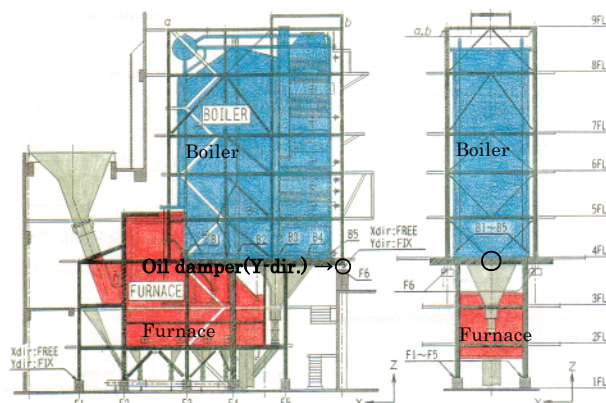


Fig.1 Furnace & boiler structure

- (2) 炉体架構の下部は、架構と一体となった炉体のケーシングプレートが耐震要素を構成する一方、熱による膨張が生じる。
- (3) 炉体架構の上部は、ボイラが架構の中心からオーバーハングして支持されているため、オイルダンパーによるねじれ変形の制御が行われている。

より高い耐震性能を実現するためには、免震構造や部材サイズを大きくして強度と剛性を高める従来の耐震構造が考えられる。しかし、両者とも耐震コストの増加が懸念される。また、免震構造を部分的に炉体架構に適用した場合、免震層の変形が、他の機器に接続している配管とダクト類に及ぼす影響が大きく、その対応が容易でないと考えられる。

3. 大地震時におけるハイブリッド制震型炉体架構

3.1 ハイブリッド制震型炉体架構の特長

ハイブリッド制震型炉体架構は、大地震時における炉体架構の耐震性向上の解決策として、ねじれ変形制御のオイルダンパーに加えて、大地震時のエネルギー吸収デバイスとして、国土交通大臣の認定を取得した制震ブレースを適用するものである。制震ブレースは、Fig.2のようにダンパー用鋼材（低降伏点鋼 NK-LY100,160,225）を用いた平鋼を座屈拘束したもので、Fig.3のように地震時の復元力特性が紡錘型でエネルギー吸収能力が高い履歴型の制震デバイスである⁵⁾。従来からブレース構造で計画されている炉体架構に適しているといえる。

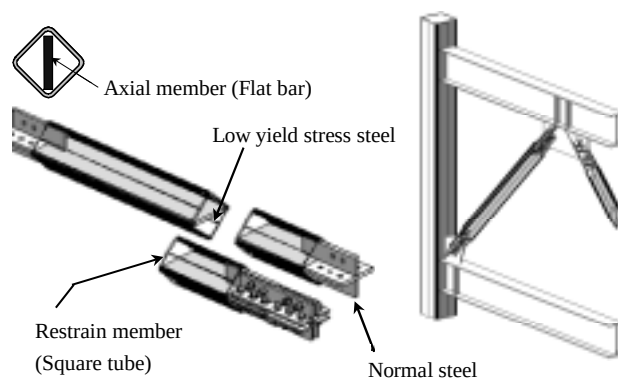


Fig.2 Illustrative diagram of brace-type hysteretic damper

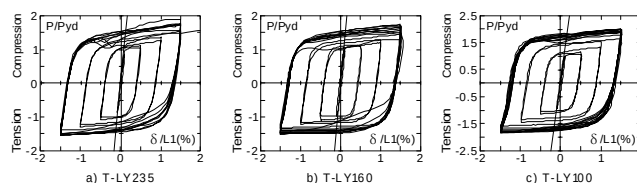


Fig.3 Non-dimensional axial load-displacement relations (Brace-pyre hysteretic energy dissipation device)

このデバイスにより、重要度係数が 1.5 程度の大地震時において、以下の制震効果が期待できるため、Table 1 の上級～特級に該当する耐震性能グレードへの向上が可能である。

- (1) 部材の損傷をブレースに集中させ、柱や梁などの構造上主要な部材を無損傷にできる。
- (2) 架構全体の変形制御として、層間変形角を 1/100 以内に抑えることが可能であり、焼却炉とボイラ本体の機能障害を未然に防ぐことができる。
- (3) 塑性化部位をブレースに特定することにより、耐震コストの増加を抑えることができ、被災後のメンテナンスも容易である。

3.2 ハイブリッド制震型炉体架構の地震応答解析

ハイブリッド制震型炉体架構の制震効果を検証するために、地震応答解析を行う。今回の検討では、一貫設計プログラムのデータを汎用 FEM 構造解析プログラム用のデータに変換し、弾性固有値解析と静的弾性解析および熱応力解析+静的弾塑性解析をふまえて、弾塑性地震応答解析を行っている。ボイラ本体を含めたフルモデルによる弾性解析は NASTRAN (MSC)，熱応力解析と弾塑性地震応答解析は ADINA (ADINA R&D Inc.)，プリポスト処理は I-DEAS (SDR Corp.) を用いて行った。

解析モデルを Fig.4 に、重量内訳を Table 2 に示す。炉体のケーシングプレートは、ブレースに置換し、ボイラ本体は、自由度を縮約しロッキングモデルに変換している。縮約モデルの妥当性は、ボイラ本体を含めたフルモデルとロッキングモデルによる弾性固有値解析結果を比較し、固有周期および変形モードに大きな違いがないことを確認した。

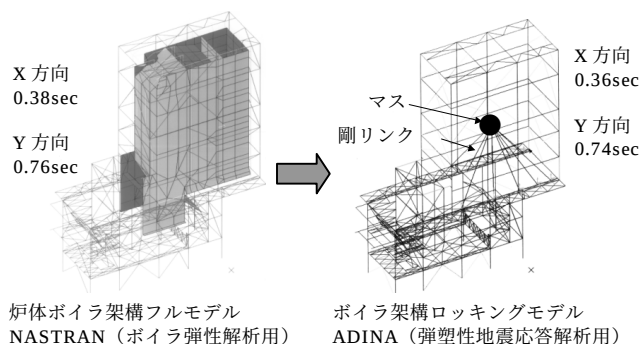


Fig.4 Analytical model

Table 2 Weight of structure

Boiler	233tf
Incinerator	206tf
Corridor (including load)	91tf
Steel dead weight	57tf
Total	587tf

オイルダンパーは Fig.5 のような非線形特性を有するダッシュポットとしてモデル化している。建屋と炉体架構の連結部にあるオイルダンパーが、過大な応力集中により損傷しないように、最大減衰力 35tf で頭打ちとしている。柱、梁および履歴型ダンパー部材の復元力特性は Bi-linear 型とし、ひずみ硬化係数は 2%とした。

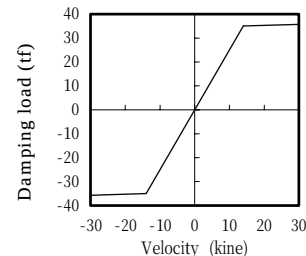


Fig.5 Load-velocity relationship of oil damper

解析条件を Table 3 に示す。解析に用いた地震動は、前回 ①の解析結果から、他の地震波に比べて応答倍率が大きかった El Centro NS (Fig.6) を採用し、炉体架構の X 方向と Y 方向のおおのに入力した。地震規模は、重要度係数 1.5 程度に相当する 511gal (50kine)である。焼却炉の熱の影響は、操業時温度荷重を初期状態とした静的弾塑性増分解析を行い、架構の変形—耐力特性に及ぼす影響がないことを確認している。したがって、弾塑性地震応答解析では設計温度荷重による熱応力は省略している。

Table 3 Analytical conditions

Earthquake	El Centro NS 511Gal 6sec
Structural damping [C]= α [K], $\alpha = 0.012T/\pi$	
Damping coefficient for oil damper C=2.5tf/kine	

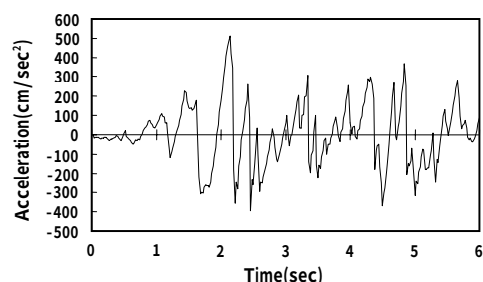


Fig.6 El Centro NS (max. 511gal)

3.3 解析結果

最大層間変位角分布を Fig.7 に示す。X 方向、Y 方向とも、各層において変形制御の目標値である 1/100 を満足する良好な結果である。X 方向の層間変位は、焼却炉のケーシングプレートが耐震要素として十分な剛性をもつため、下層で極めて小さい良好な結果となっている。Y 方向の層間変位は、廃ガスや焼却灰およびメンテナンス階段の動線確保のために、制震ブレースが配置できなかった箇所は、比較的大きな変形となった。

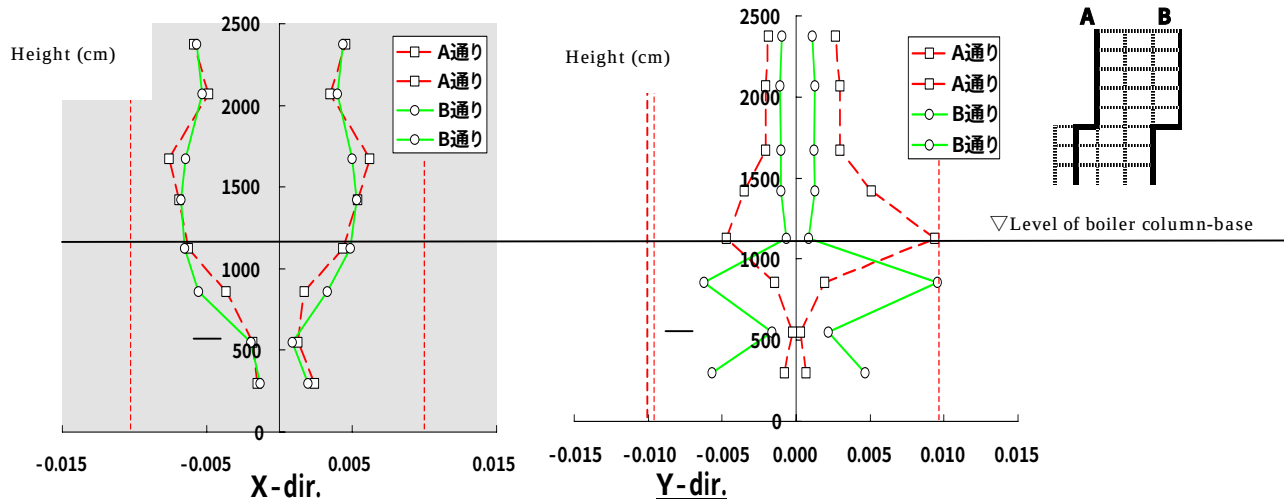


Fig.7 Distribution of maximum story drift angle

構造部材の損傷度合について、制震ブレースは Fig.8 (矢印の制震ブレースの例) に示すように良好なエネルギー吸収の履歴曲線がみられ、すべての柱梁に損傷がみられなかった。これは、制震ブレースの作用応力度／降伏応力度の比が、柱梁に比べて大きくなるように、両者の部材断面のバランスを最適化する配慮がされているためである。

変位応答の時刻歴の代表例として、Y 方向地震入力時のボイラ柱脚レベル (Fig.8 の a 点, b 点) の結果を Fig.9 に示す。地震入力が最大値を示す 2 秒前後で a 点 5.1cm, b 点 2.9cm, 変形差 2.2cm のねじれ変形が生じるが、前述のとおり層間変形角が 1/100 以内であり、地震入力の減少に伴い、ねじれ変形は収束していることから、架構の構造安定性に大きな影響は及ぼさないと考えられる。

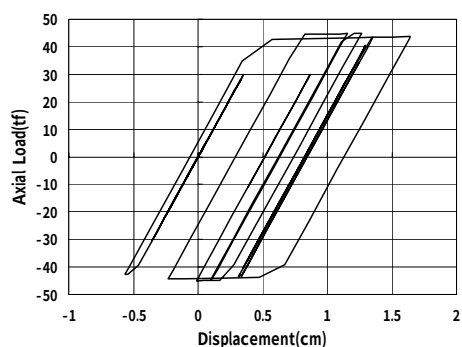


Fig.8 Hysteresis of energy dissipation device

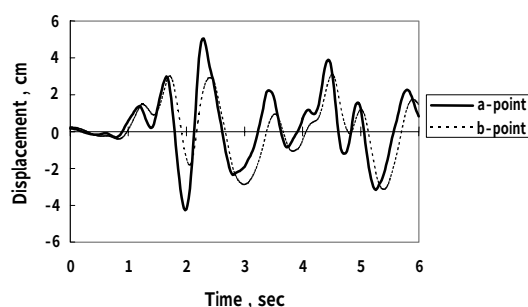
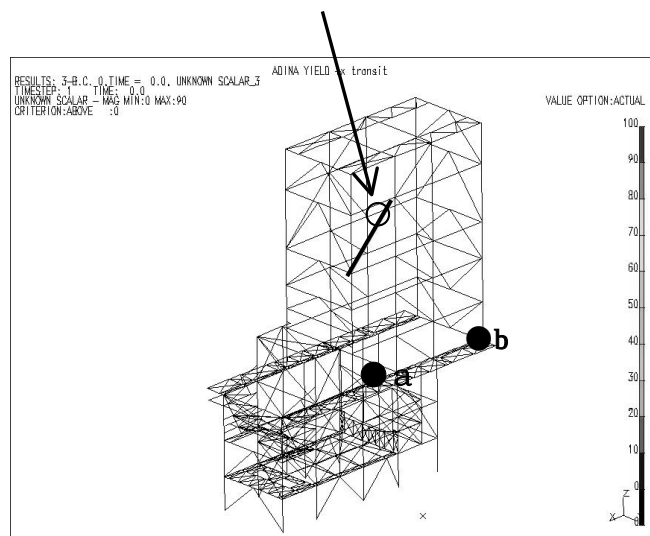


Fig.9 Displacement response at boiler column base



また、オイルダンパーの減衰力の時刻歴を Fig.10 に示す。地震入力最大値を示す 2 秒前後で、最大減衰力に達し、以降も良好なエネルギー吸収が見られる。応力集中の防止を意図した非線形モデルのとおり、減衰力が頭打ちに作用している。

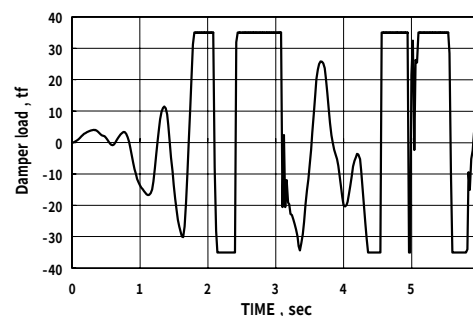


Fig.10 Damping load-displacement relation of oil damper

参考文献

- 1) 永関三千男ほか. “清掃工場の焼却炉ボイラ架構への制震装置の適用”. NKK 技報. No.160, pp.62-67(1997).
- 2) (社)公共建築協会. 官庁施設の総合耐震計画基準及び同解説(1996).
- 3) 日本建築構造技術者協会. 応答制御構造設計法(2000).
- 4) 村田潤一ほか. 今後の施設計画上の留意点(ごみ焼却施設). 都市清掃. Vol.48, No.207, pp.360-367(1995).
- 5) 伊藤茂樹ほか. “ダンパー用極軟鋼を用いた履歴型制震デバイス”. NKK 技報. No.170, pp.67-74(2000).

<問い合わせ先>

シビルエンジニアリング部 土木建築設計室

Tel. 045 (505) 7722 吉田 勝利

E-mail address : yoshidkt@eng.tsurumi.nkk.co.jp

4. おわりに

大地震時の耐震性向上のために、既に実機に適用済のオイルダンパーに、制震ブレースを加えたハイブリッド制震型炉体架構について、解析的な検証を行った。重要度係数 1.5 レベルの地震入力に対して、以下のように、良好な制震効果が得られることが明らかになった。

- (1) エネルギー吸収能力が高い制震ブレースの履歴減衰効果により、層間変形角を 1/100 に抑える架構全体の変形制御ができる。
- (2) オイルダンパーの粘性減衰効果により、架構の構造安定性に影響を及ぼさないように、ねじれ変形制御が可能である。
- (3) 構造部材の塑性化を制震ブレースに集中させ、主要な構造部材である柱梁を無損傷にすることができる。
- (4) 塑性化部材の特定により、耐震コストの増加を抑えることができ、被災後のメンテナンスも容易である。

以上のように、ハイブリッド制震構造は、ごみ焼却施設の立地特性や、建築主の要望に応え、耐震コストの増加を抑えつつ、従来の建築基準法に準拠した耐震構造より優れた耐震性能グレードを提供することが可能である。被災直後の災害廃棄物処理をはじめとして、円滑なごみ処理機能の維持のために活用されることが期待される。