

地震防災に資する耐震シミュレーション技術

A Seismic Simulation Technology Contributed to Preventing Earthquake Disaster

植木 卓也 UEKI Takuya JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員 (副課長)
塩崎 禎郎 SHIOZAKI Yoshio JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員 (課長)
加村 久哉 KAMURA Hisaya JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員 (部長)・工博

要旨

JFE スチールでは、将来予想される大規模地震の発生に対して、人命尊重、重大社会影響回避、安定操業維持の視点から全社的な耐震対策検討を進めている。製鉄所内の構造物や設備の耐震補強を合理的に進めるためには、実際にどのような地震動が到達するのかを正確に予測することが重要となる。そこで今回、製鉄所独自のボーリングデータや地震観測データを有効に活用し、局所的な地盤特性を高精度にモデル化した最新の強震動予測手法を提案した。また、本手法により得られた予測地震動を用いて、合理的な設備投資に資する想定震度マップ作成や諸基準に基づく個別構造物の被害想定手法を構築した。

Abstract:

An investigation against the occurrence of a large-scale earthquake predicted to occur in the near future has been carried out in JFE Steel to protect human life, avoid a major disaster to communities in the area and maintain operations. It is important to predict the type of seismic wave the authors encounter in order to prepare reasonable plans for seismic retrofitting of structures and plants. This paper discusses the method estimating the latest strong ground motion using a site amplification factor reflecting local strata inspected by the original boring data and the seismic observation. This method to predict earthquake damages contributes to an effective investment.

1. はじめに

近年、中央防災会議（内閣府）あるいは地震調査研究推進本部（文部科学省）において、東南海・南海地震などの海溝型地震や首都圏直下型地震といった大規模地震発生の可能性が指摘されており、製鉄所の BCP（事業継続計画）には、これらの大規模地震に対する建物・設備の耐震化が重要課題となっている。

合理的な耐震補強を実現するためには、想定すべき地震動がどのように伝播し、到達するかを正確に予測する必要がある。そのためには、局所的な地盤特性を精度よく評価することが重要となる。一方、製鉄所は異なる地域に複数あり、工場建屋・ライン設備のほか、岸壁や橋、エネルギー配管の支持架構など多岐にわたる構造物が存在している。これらの構造物は、それぞれ準拠する指針や基準が異なるため、耐震診断の判定レベルにも相違が生じる可能性がある。

そこで、地区ごとの想定地震や地盤特性、構造物ごとの応答特性や診断基準を適切に考慮し、かつ目標とする耐震

強度レベルを全社的に統一するための合理的な被害想定手法を構築した。本論文では、最新かつ高度な強震動予測手法（2～4 章）と、各種設計基準に反映した構造物の耐震評価手法（5 章）について述べる。

2. 想定地震

被害想定を検討にあたっては、まず想定すべき大規模地震の選定が重要となる。国および自治体の最新の調査結果¹⁾では、(1) 過去に当該地域に影響を及ぼしたと考えられる歴史地震、(2) 活断層を震源とする地震、(3) 海溝を震源とする地震などが明らかにされている。主な想定地震を図 1 に示す。これらの地震の発生確率と規模、構造物の重要度などを総合的に勘案して、最も影響の大きいと思われる地震を製鉄所が立地している地域ごとに選定している。

3. 被害想定手法

3.1 概要

従来の被害想定で用いられている地震波形は、過去に発生した地震の観測波形をもとに、想定される最大加速度レ

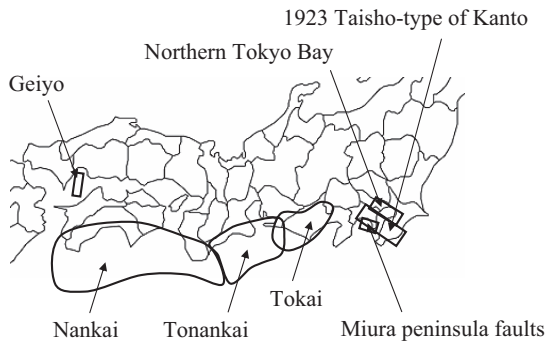


図1 主な想定地震

Fig. 1 Main of expected earthquake

ベルに増幅した地震波を用いる方法²⁾や、いくつかの地震応答スペクトルの平均あるいは最大値を包絡して作成された標準応答スペクトルを満足する人工波形を用いる方法³⁾などが一般的であった。

しかしながら、同じ震度レベルの地震であっても、震源特性や局所的な地盤特性で地震波形は異なり、個々の構造物の特性に応じて応答は異なってくる。そこで、検討すべき対象地点において、これらの特性を精度よく反映したシナリオ地震動を作成し、構造物の被害予測を行うことが必要と考えられる。

兵庫県南部地震を契機として、地震観測網の高密化や、各種探査による地下構造の解明が進められ、震源の破壊過程や地震動の伝搬特性の研究が急速に進んだことにより、シナリオ地震動も、ある程度の精度をもって予測可能となっている。このような考え方を取り入れた最近の事例としては、2005年3月に「全国を概観した地震動予測地図」¹⁾が地震調査研究推進本部より公表されている。また、2006年5月の港湾法改正に伴い、性能設計に対応した「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁴⁾が2007年7月に改定され、シナリオ地震動を用いた設計手法が採用されている。

JFE スチールでは、社内独自の地盤データや地震観測データを適切に反映した局所地盤特性を最新の強震動予測技術に組み込むことで、高精度なシナリオ地震動を作成している。これをもとに、初動対応に資するマップの作成や構造物の応答特性に応じた耐震検討を実施し、製鉄所の効率的かつ合理的な被害想定の手組みを構築した。被害想定手法の全体フローを図2に示す。

3.2 強震動予測手法

震源で発生した地震動は、幾何学的な減衰（距離減衰）と地中の非弾性減衰を伴って、当該サイトの地震基盤に達する。ここで、地震基盤とは、S波（初動の後に到達する横波）速度で3000 m/s相当の層を示す。その後、深い地盤（地震基盤～工学的基盤：S波速度300～700 m/s相当層）、および浅い地盤（工学的基盤～地表面）の地盤特性に応じた増幅を繰り返して地表面に達する。

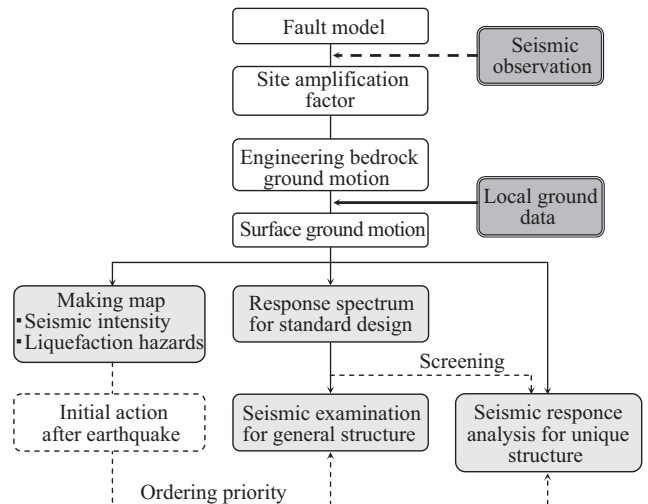


図2 被害想定全体フロー

Fig. 2 Flow of predicting earthquake damage

したがって、(1) 震源断層の破壊過程（震源特性）、(2) 震源断層から地震基盤に至るまでの地震動の伝搬経路（伝搬経路特性）、(3) 地震基盤から地表面に至る堆積層による増幅（サイト増幅特性）を適切に考慮することで、精度の高い強震動予測が可能となる。

本論で用いる強震動予測手法は、地表面における製鉄所全域の被害想定を把握するとともに、個々の上部構造の詳細な地震応答解析検討を目的としているため、港湾分野の設計で採用されている経験的サイト増幅・位相特性を考慮した統計的グリーン関数法⁵⁾を採用した。

統計的グリーン関数法とは、震源断層をメッシュ状の小断層に分割し、その小断層から発生する小地震波形をグリーン関数と見なして、大地震は小断層が連鎖的に破壊することで生じるものと考えて合成する手法である。図3に統計的グリーン関数法概念図を示す。

観測記録の振幅 $O(f)$ は、(1) 式で示すように震源特性 $S(f)$ 、伝搬経路特性 $P(f)$ 、サイト増幅特性 $G(f)$ の積で表される。

初めに対象とすべき地震の震源モデルを作成する。想定地震の断層モデルは中央防災会議などで提案されており⁶⁾、これらを用いることにより、国や自治体による被害想定との整合性を確保する。震源特性 $S(f)$ は、地震断層の運動特性

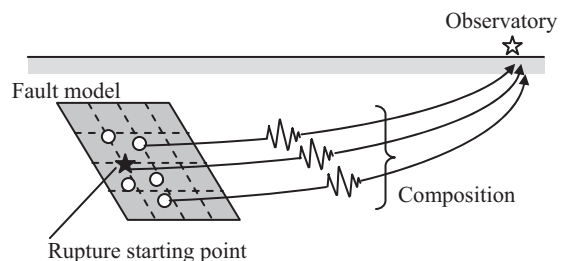


図3 統計的グリーン関数法概念

Fig. 3 Concept of statistical Green's functions method

を周波数領域で簡単にモデル化した ω^{-2} モデルに従う (2) 式で評価できる。伝搬経路特性 $P(f)$ は震源から球面状に広がる実体波の幾何減衰と非弾性減衰を考慮して (3) 式で評価する。サイト増幅特性 $G(f)$ は、野津ら⁷⁾ による複数の地震記録と観測点の逆解析で求めたものを利用することができるほか、3.3 節で示す手法を用いて求めることができる。

なお、地震動の作成で必要となる位相特性は、観測点の中小地震波から抽出している。

$$O(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot G(f) \dots\dots\dots(1)$$

$$S(f) = R_{\theta\phi} \cdot FS \cdot \text{PRTITN} \cdot \frac{M_{0e}}{4\pi\rho V_s^3} \cdot \frac{(2\pi f)^2}{1 + (f/f_c)^2} \dots\dots\dots(2)$$

$$P(f) = \frac{1}{r} \exp(-\pi f r / QV_s) \dots\dots\dots(3)$$

- ここに、 $R_{\theta\phi}$: ラディエーション係数
- FS : 自由表面の効果
- PRTITN : 地震動エネルギーの水平方向の分散効果
- M_{0e} : 小地震の地震モーメント
- ρ : 地震基盤の密度 V_s : S 波速度
- f_c : 小地震のコーナー周波数 ($= 0.66V_s / \sqrt{S_e}$)
- S_e : 小地震の断層面積
- r : 震源距離 Q : 伝搬経路の非弾性減衰係

3.3 工学的基盤における強震動予測

サイト増幅特性が未知の沿岸部の地点で、地震基盤から工学的基盤までのサイト増幅特性を求める手法として、下記の手法が提案されている⁴⁾。

簡易法 1 : 内陸部 $G_K(f)$ と沿岸部 $G_P(f)$ における平均的な関係 (全国 124 地点) を用いて、既知の地表面におけるサイト増幅特性 $G(f)$ から予測地点のサイト増幅特性 $G_P(f)$ を推定する方法 (図 4 (a))。

簡易法 2 : 既知の観測点と予測地点で同時に地震観測を行い、得られた地震波のスペクトル比から予測地点の地表

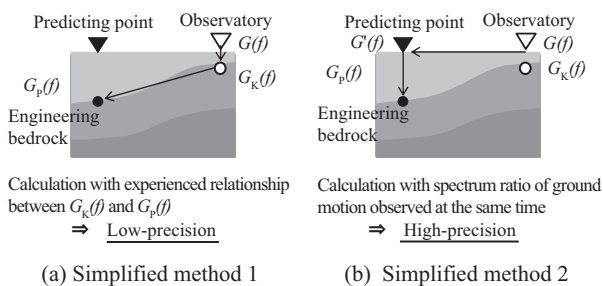


図 4 サイト増幅特性の推定方法

Fig. 4 Method of estimating a site amplification factor

面におけるサイト増幅特性 $G'(f)$ を直接求め、工学的基盤から地表面までの伝達関数で割り戻すことによって予測地点のサイト増幅特性 $G_P(f)$ を推定する方法 (図 4 (b))。

3.5 節に示す想定震度マップ作成には簡易法 1 を用いて算定しているが、重要構造物の詳細解析においては、地震観測結果に応じて、一部については、より精度の高い簡易法 2 を採用している。簡易法 2 については、4 章で詳しく述べる。

3.4 地表面における強震動予測

工学的基盤から地表面への増幅率 (伝達関数) は、一般的には過去の強震記録の結果から回帰解析を行い、地形・地質別に決定される。地形・地質データは国土数値情報として日本全国約 1 km メッシュ (現在は約 250 m メッシュ) でデータベース化されている。ただし、この手法は全国を同水準で求めることが前提とされており、マクロ的な被害予測には有効であるが、地域を限定した被害想定には精度が低いと考えられる。そこで、製鉄所の被害想定においては、過去に蓄積した数多くのボーリングデータを収集・整理 (基盤の深度や細粒分含有率などは一部文献や近傍の地盤調査結果から補完) し、ボーリング地点ごとに地盤応答解析を行うことで、高精度なサイト増幅特性を反映している。

3.5 想定震度マップ

これまで述べた手順に従って強震動予測を行うことにより、製鉄所各地区の局所的なシナリオ地震動の作成が可能となった。そこで、各ボーリング地点における地表面の応答値 (最大加速度, 計測震度, 液状化危険度) をもとに、約 300 m メッシュに分割した各製鉄所の想定震度マップおよび液状化危険度マップを作成した。これらのマップは、検討すべき構造物の優先順位付けや、初動対応の基礎データとして用いられている。想定震度マップのイメージを図 5 に示す。

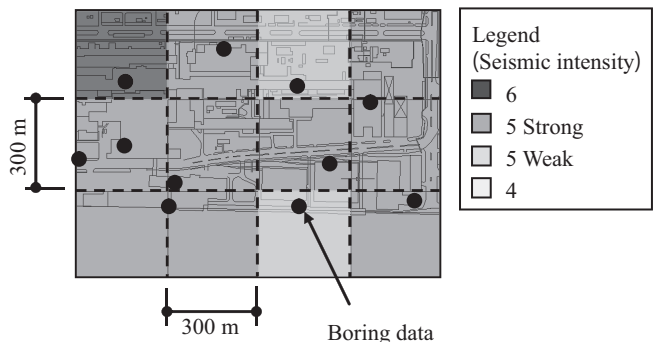


図 5 想定震度マップのイメージ

Fig. 5 Image map of predicting earthquake damage

4. 地震観測によるサイト増幅特性の高精度化

4.1 高精度化に向けた取り組み

3.3節で述べたサイト増幅特性の算定手法において、簡易法1はあくまでも全国平均的な考え方に基づいているため、製鉄所のサイト増幅特性を正確に評価しているとは言いがたい。そこで、簡易法2によるサイト増幅特性の精度向上を目的として、2007年に最新機種地震計を新たに設置し、製鉄所内での地震観測を続けている。現時点では十分な評価に至る観測数を得ていないが、ここでは観測結果の一例を用いて、前述の2つの手法によるサイト増幅特性の違いについて比較した結果について述べる。

4.2 地震観測の一例

倉敷地区では、K-net⁸⁾観測点(岡山県内の最も製鉄所に近い観測点: OKY012)で観測された地震のうち、これまでの約3年間で以下の4つの地震について同時収録した。

- (1) 2008年3月14日: 岡山県中部の地震 (M3.8)
- (2) 2009年9月3日: 鹿児島県南部の地震 (M6.0)
- (3) 2010年7月21日: 奈良県の地震 (M5.1)
- (4) 2010年7月23日: 高知県西部の地震 (M4.4)

(1)および(4)の地震はマグニチュードが小さいが、傾向を把握するための参考としては有用である。図6(a), 7(a)

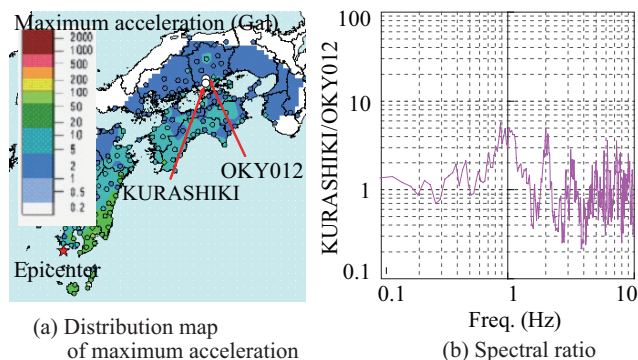


図6 鹿児島県南部の地震
Fig. 6 Kagoshima-Ken Nanbu earthquake

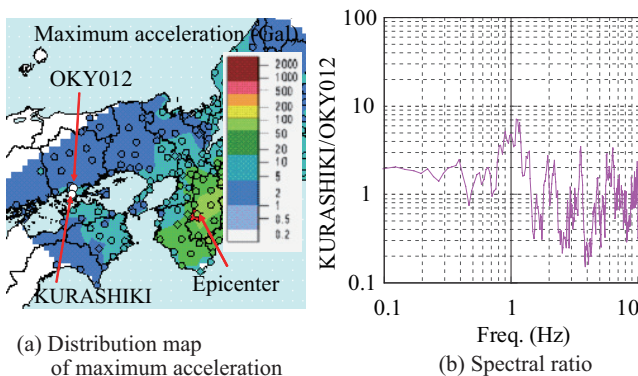


図7 奈良県の地震
Fig. 7 Nara-Ken earthquake

に、(2)および(3)の地震の震央位置と最大加速度分布を示す。また、OKY012に対する倉敷地区の加速度フーリエスペクトル比を図6(b), 7(b)に示す。2つの地震に対するスペクトル比はおおむね一致しており、1 Hz付近で倉敷地区の応答が大きくなっていることが分かる。

4.3 シナリオ地震動に与える影響

図8に、(1)~(4)の地震に対して簡易法2で算定したサイト増幅特性 $G_p(f)$ を、簡易法1で算定した結果と併せて示す。S/N比(ノイズ量に対する観測量の比)が小さかった地震(1)の長周期側を除けば、簡易法2で算定したサイト増幅特性はいずれもほぼ一致している。また、簡易法1に比べて短周期側で $G_p(f)$ が大きく(増幅率が高く)、長周期側では小さい傾向が見られた。

ここで、手法の違いがシナリオ地震動に与える影響を把握するため、それぞれの手法で得られたサイト増幅特性を用いたシナリオ地震動を作成し、1983年日本海中部地震で被災したA港の鋼矢板式岸壁モデル⁹⁾(図9、実際の被災変形量の再現を確認済み)に対する地震応答解析¹⁰⁾を行った。岸壁の変形状態と最大せん断ひずみ分布を図10に示す。簡易法2を用いた解析結果では、簡易法1の場合と比較

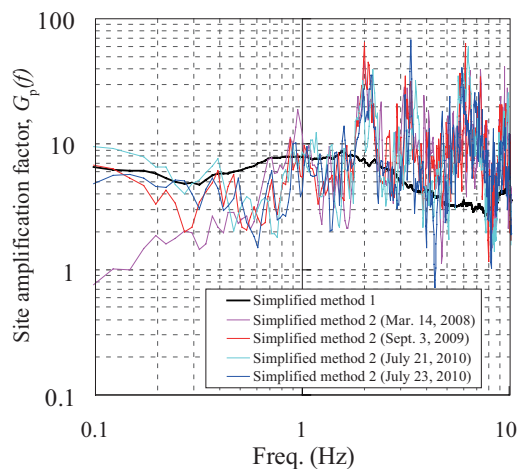


図8 手法の違いによるサイト増幅特性比較
Fig. 8 Effects on site amplification factor of different method

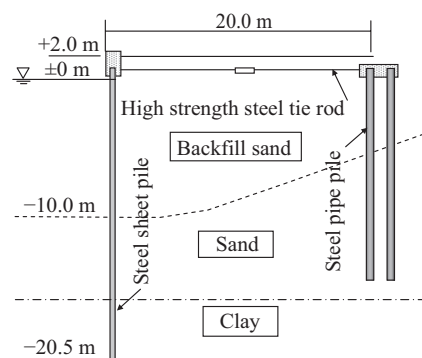


図9 A港の鋼矢板式岸壁
Fig. 9 The sheet pile type quay wall of A port

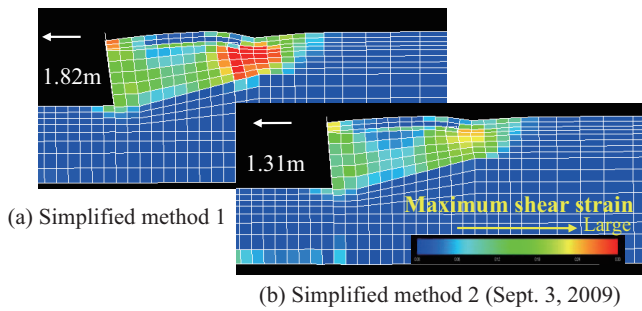


図 10 地震応答解析結果
Fig. 10 Result of seismic analysis

して、被災変形量が約7割に低減されていることが分かる。これは、簡易法2で算定したシナリオ地震動の最大加速度は大きくなるものの、岸壁の変形に影響が大きい1 Hz以下の長周期成分が減少したことが原因として挙げられる。

このように、サイト増幅特性の違いがシナリオ地震動に与える影響は大きいので、一部の重要構造物については、地震観測結果を反映したシナリオ地震動による再評価を実施している。

5. 構造物の耐震検討

5.1 動的詳細解析例

本章では、前述の手法で作成したシナリオ地震動を用いた個別構造物の耐震検討手法について述べる。はじめに、得られた時刻歴波形を直接用いる手法として、RC造煙突を模擬した多質点系モデルによる動的詳細解析の一例を紹介する。

従来の煙突の耐震診断では、想定される地表面最大応答加速度と固有周期から簡易的に必要耐力を算定する手法¹¹⁾が一般的に用いられている。この手法は、代表的な地震観測波形(7波形)を用いた弾性応答解析結果から経験的に導かれたものであり、特定の地域や地震の影響は考慮されていない。一方、高さ60mを超える煙突などの新設時の性能評価では、2007年から時刻歴応答解析の使用が義務づけられるようになった。

そこで、代表的な観測地震波(El Centro波)とシナリオ地震動を用いた弾塑性時刻歴応答解析を実施し、既存RC造煙突指針による必要耐力との比較を行った。

煙突は12質点からなる曲げせん断型非線形はりモデルとし、基礎固定とした。この煙突の初期剛性(弾性)に対する1次固有周期は1.57sである。曲げに対する復元力特性の骨格曲線は、煙突構造設計指針¹²⁾に示される方法に基づき、コンクリートのひび割れ点 M_c 、引張側最外端鉄筋の降伏点 M_y 、および圧縮側コンクリートの圧壊による終局点 M_u の3点で代表されるトリリニア曲線でモデル化した。

El Centro波およびシナリオ地震動に対する弾塑性応答解析結果として、煙突の各層における最大曲げモーメントの

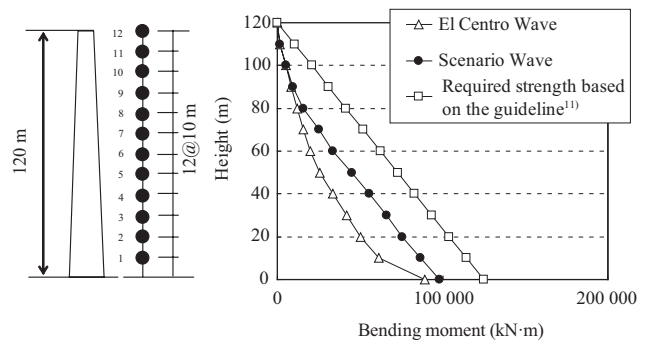


図 11 地震波による解析結果比較
Fig. 11 Effects on the response of different seismic wave

比較を図11に示す。また、同図には既存RC造煙突指針に基づき算定した必要曲げ耐力を併せて示す。

この計算例では、El Centro波およびシナリオ地震動による発生曲げモーメントは、既存RC造煙突指針による必要曲げ耐力を下回る結果となった。当然ながら、構造物特性あるいは入力地震動によって結果は異なるが、本条件下においては安全率(=保有耐力/必要耐力)を高く評価できる。また、高さ80m以下の下層部では、シナリオ地震動(181gal)による発生曲げモーメントが、El Centro波(342gal)と比較して約1.5倍と大きくなっており、地表面の最大応答加速度だけでなく、周波数特性の違いが応答に与える影響が顕著に現れている。

最終的な補強要否は、劣化調査の結果などを踏まえて判断する必要があるが、シナリオ地震動を用いた動的解析により安全率を適切に評価でき、合理的な設備投資の理論的根拠となり得ることが確認できた。

5.2 標準設計用応答スペクトルの設定

重要な構造物、あるいは特殊な形状を有する構造物(高炉、鉄塔、岸壁、ガス配管架台など)の耐震検討においては、前述のように構造物を直接モデル化した動的解析を採用している。

しかしながら、整形な中低層の建築物や、主として静的解析を用いる設備・エネルギー系構造物の耐震診断方法としては、固有周期に応じた応答スペクトルから算定される設計震度を用いるケースが多く見られる。このような簡易診断は、多くの構造物を所有する製鉄所においては、1次スクリーニングの手段としても有効となる。

そこで、静的な簡易診断に用いる応答スペクトルとして、対象地区ごとのシナリオ地震動に基づく標準設計用応答スペクトルの設定を試みた。

はじめに、強震動予測手法により算出した対象地区全エリアの地表面最大加速度の頻度分布を作成し、そのばらつきを勘案して有効となるデータの抽出を行う。次に、抽出したデータの地表面加速度応答波形を用いて地震応答解析を行い、得られた加速度応答スペクトルを全て重ね合わせる

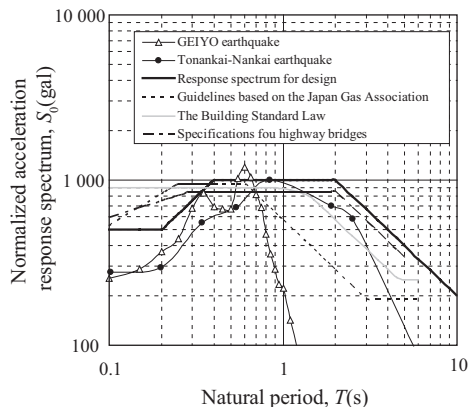


図 12 標準設計用応答スペクトルの例

Fig. 12 Example of response spectrum for standard design

ここでスペクトル曲線の包絡線を得る。この際、シナリオ地震動によって周波数特性が異なるため、できる限り卓越周期の異なる複数の想定地震について上記の解析を行う。これらの包絡線をもとに、諸基準との整合性を考慮して平滑化したものを標準設計用応答スペクトルとして設定した。

標準設計用応答スペクトルの一例を、諸基準と合わせて図 12 に示す。この例では、最大応答加速度を建築基準法における極めて稀な大地震 ($C_0=1.0$) に相当する 1000 gal に設定し、長周期側では、想定東南海南海地震の包絡線を上回るように、 $T \geq 2$ s の範囲で周期に応じた低減をしている。低減勾配は、道路橋示方書のレベル 2 地震動タイプ I (海洋型) に準拠した。一方、短周期側は $T \leq 0.4$ s の範囲で、卓越する想定芸予地震の包絡線に準じた低減をしている。ただし、下限値としては、日本ガス協会指針¹³⁾ のレベル 2 地震に相当する 500 gal ($T=0.1$ s) を採用した。

なお、 $T=0.6$ s 近傍では、設定した標準設計用応答スペクトルを超える応答が一部表れているため、この近傍に固有周期を持つ構造物については、設置位置の地盤特性を個別にチェックした上で、動的解析を併用することとした。

このようにして求められた標準設計用応答スペクトルを用いた静的簡易診断により、詳細に検討すべき設備・構造物の選定や優先順位付けを行い、多岐にわたる構造物の耐震検討の効率化を図っている。

5.3 I_s 値への適用

兵庫県南部地震の教訓から制定された耐震改修促進法の規定に基づく告示 (平成 18 年国土交通省告示第 184 号、第 185 号) によれば、耐震診断方法には構造耐震指標 I_s 値による評価が用いられる。また、既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準¹⁴⁾ によると、(4) 式に示す I_s 値による評価と、(5)、(6) 式に示す現行の新耐震設計法との対応において、整形な中低層建物を想定した場合、(7) 式のように、構造耐震判定指標 I_{s0} 値は振動特性係数 R_t を用いて表すことができる。

$$I_s \geq I_{s0} = E_s \cdot Z \cdot G \cdot U \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$Q_{un} \geq D_s \cdot F_{es} \cdot Q_{ud} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Q_{un} = Z \cdot R_t \cdot A_i \cdot C_0 \cdot W \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$I_s \geq I_{s0} = 0.6 \cdot Z \cdot R_t \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 E_s ：耐震判定基本指標
 Z ：地域指標 G ：地盤指標 U ：用途指標
 Q_{un} ：必要保有水平耐力 Q_{ud} ：地震時に生じる水平力
 D_s ：構造特性係数 F_{es} ：形状特性係数
 A_i ：層せん断力係数の高さ方向分布

振動特性係数 R_t は、昭和 55 年建設省告示第 1793 号第 2 によって定められているが、ただし書きにおいて、特別の調査または研究の結果に基づく数値 (告示で定める数値の 3/4 を限度とする) まで減じたものとして減じることができる。 R_t は基準化された設計用応答スペクトルに相当するものなので、前述の標準設計用応答スペクトル形状を R_t とすることで、シナリオ地震動に対する周波数依存の I_{s0} 値を設定することが可能となる。

海溝型地震の影響が大きい西日本製鉄所において、シナリオ地震動に基づく I_{s0} 値を用いた建屋の耐震診断判定を実施した結果、一律に設定された I_{s0} 値 (=0.6×地域係数 0.9) で判定した場合と比較して、 I_{s0} 値を満たさない (耐震性能が不足しており、直ちに耐震補強が必要と判断される) 建物数は、約 15% 低減できることを確認した。

6. おわりに

本論では、製鉄所の局所地盤特性を適切に反映した最新の強震動予測手法について述べた。また、得られたシナリオ地震動に基づく応答特性を各種設計基準に組み込んだ耐震検討手法を提案し、多岐にわたる構造物を効率的かつ合理的に評価できることを示した。現在、各所管部署との連携のもと、本手法に基づく個別構造物の耐震検討が着実に進められ、具体的な補強対策の実施に入っている。また、ここに記載した被害予測技術は社外にも広く適用できるものであり、JFE グループとして、エネルギープラント設備のような大規模工場を有するお客様のニーズにも対応できる体制を整えている。

今後さらなる被害予測の高精度化を図るとともに、製鉄所の安心・安全を確実なものとし、安定した製品供給をもってお客様の BCP (事業継続計画) にも資するよう鋭意努力していく所存である。

本手法に用いた計算プログラムは (独) 港湾空港技術研究所の野津厚 地震動研究チームリーダーから提供していた

だき、使用方法について指導を受けました。ここに感謝の意を表します。地震動観測記録は、港湾地域強震観測（国土交通省国土技術政策総合研究所ほか）と強震ネットワーク K-net（防災科学技術研究所）を利用しました。

参考文献

- 1) たとえば、地震調査研究推進本部地震調査委員会. 全国を概観した地震動予測地図. 2005.
- 2) 日本道路協会. 道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編. 2002-03.
- 3) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹. 気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動および応答スペクトル推定式の提案. 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集. 1997, p. 161-164.
- 4) 日本港湾協会. 港湾の施設の技術上の基準・同解説（上・下巻）. 2007-07.
- 5) 古和田明ほか. 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価. 日本建築学会論文集. 1998, vol. 514, p. 97-104.
- 6) たとえば, 中央防災会議. 首都直下地震対策専門調査会（第 12 回）溝上委員説明資料 2-2. 2004-11.
- 7) 野津厚, 長尾毅. スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等におけるサイト増幅特性. 港湾空港技術研究所資料. 2005.
- 8) 防災科学技術研究所. 強震ネットワーク K-NET.
- 9) Iai, S.; Kameoka, T. Finite element analysis of earthquake induced

- damage to anchored sheet pile quay walls. Soils and Foundations. 1993, vol. 33, no. 1, p. 71-91.
- 10) Iai, S.; Matsunaga, Y.; Kameoka, T. Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility. Report of the Port and Harbour Research Institute. 1990, vol. 29, no. 4, p. 27-56.
- 11) 日本建築防災協会. 既存 RC 造煙突の耐久・耐震診断指針. 1981.
- 12) 日本建築学会. 煙突構造設計指針. 2007-11.
- 13) 日本ガス協会. 製造設備等耐震設計指針 改訂版. 2001-08.
- 14) 日本建築防災協会. 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説. 2001.



植木 卓也



塩崎 禎郎



加村 久哉