

2003年十勝沖地震にみる石油タンク被害の特徴と対策

座間 信作*

要 旨

2003年十勝沖地震では、長周期地震動により励起された石油タンクのスロッシングにより、苫小牧において、タンク火災2件、浮屋根沈没7基などの甚大な被害が生じた。速度ポテンシャル理論に基づく推定最大波高と被害との関係からは、甚大な被害は、1例を除いて全てスロッシング固有周期7秒以上のシングルデッキ浮屋根式タンクであること、周期12秒付近のタンクを除き、最大波高は2m以上であること、周期12秒付近のタンクについては、2次モード(周期5.6秒)が卓越したことが沈没の原因となつたと考えられること等を指摘した。

甚大な被害のあったタンクサイト最寄の速度応答スペクトルが、周期約4-8秒の間で、当時の規制値である約100 cm/sの2倍以上の強さであったことから、スロッシング対策の一つとして、長周期帯域の設計用地震動の見直しを行った。

石油コンビナートは全国84箇所に散在しており、将来起こりうる大地震の震源からこれらのタンクサイトまでの広域深部地下構造はまだ殆ど明らかとなっていないことから、地震記録に基づいた経験的手法により、各コンビナートでの速度応答スペクトルを予測した。用いたデータは1950年以降の気象庁1倍強震計記録、K-NET, KiK-net, 港湾の記録である。

震源地が同じ場合、波形が酷似していることが多いことから、地震地体構造区分毎にデータを整理し、震源のスケーリング則を考慮した距離減衰式と観測スペクトルの比を地域特性として抽出した。これに基づいて、地震地体構造区分毎に与えられている最大規模地震に対する各コンビナートでのスペクトルを予測した。更に限られた地域ではあるが、理論(数値)的、半経験的手法による予測値をも取り入れ、最終的に揺れやすいコンビナート地域を指定するとともに、それぞれの地域に対する設計用スペクトルを提案した。なお、これに基づく技術基準の改正が行われ、2005年4月施行となった。

キーワード：2003年十勝沖地震、石油タンク、スロッシング、地震地体構造、設計用スペクトル

1. はじめに

2003年十勝沖地震では、石油タンクの液面揺動(スロッシング)によって重大な被害が生じた。特に、地震の2日後に発生したナフサタンクの火災は、44時間も燃え続け、社会的関心を集めた。

石油タンクのスロッシングによる被害については、1923年関東地震の際、横須賀軍港の重油タンクの発火、炎上、爆発の事例の他、大地震では比較的よく認められる(座間, 1990)。最もよく知られているのは1964年新潟地震でのタンク火災で、昭和石油新潟製油所において、浮屋根式原油タンクがスロッシングにより火災となり、隣接のタンクを巻き込み、内容液が無くなるまで

約半月間燃え続けた(消防庁, 1965)。

本稿では、先ず2003年十勝沖地震での地震動の特徴とスロッシングによる被害について概観すると共に、それらの関係について考察し、更にその知見に基づく石油タンクのスロッシング対策としての設計用地震動の設定について紹介する。

2. 石油タンクのスロッシングに関する基本的性質等

2.1 石油タンクの構造

タンクは地中(含む岩盤)、地上タンクに大別される。ここで扱う石油タンクは地上タンクに属し、更に地上タンクはガスホルダーと液体貯蔵用タンクに分けられ、石

2006年5月12日原稿受付；2006年7月11日受理

* 消防庁消防研究センター

〒182-8508 調布市深大寺東町 4-35-3

油タンクは後者に属する。液体貯蔵用タンクは更にいくつかに分類されるが、ここでいう石油タンクはその中の円筒縦型タンクである。

石油タンクは一般に屋根の形状によって分類される。開放型は、屋根付タンクに比べ安い費用で建設されるが、爆発や火災を引き起こす可能性のある液体等は貯蔵できない。固定屋根式 (CRT: Corn Roof Tank) は、揮発損失が比較的少ない石油類 (重油, 灯油, 軽油等) の貯蔵に多く用いられ、一般に容量約 4 万 kl 以下のものに多く採用されている。タンクの直径が大きくなるに従い、屋根自重が増して支持方法が困難となるため、大型タンクへの適用は難しい。浮屋根式 (FRT: Floating Roof Tank) は直径の大きい大型タンクも建設が可能であり、原油等揮発損失を考慮する必要のある石油類の貯蔵に多く用いられる。屋根と側板のシール部から雨水が侵入するので、貯蔵液体の品質保証が要求されるものには採用されない。大規模石油備蓄の主力をなすものである。固定屋根付浮屋根式 (CFRT: Covered Floating Roof Tank) は揮発損失が多く、貯蔵液に雨水の混入を避けたい場合等に多く用いられる。石油タンクは万一爆発が発生した時に周囲への影響を最小限にとどめるために、屋根が吹き飛ばすように設計されている。浮屋根式はもちろんであるが、固定式では屋根板と側板との接続部が最も弱く溶接されている。

Fig. 1 は、浮屋根式タンクの構造を示したもので、屋根板 (デッキ) が 1 枚のものをシングルデッキ, 2 枚のものをダブルデッキ型と呼ぶ。シングルデッキの場合の浮力は、デッキ周囲にあるポンツーンと呼ばれる浮室で与えられる。また、側板付近の相対する 2 つの支持棒 (ゲージ, ガイドポール) で屋根の回転を防止している。屋根上の雨水はルーフトレイン排水口から液中の配管を通して外部へ排出される。

2.2 スロッシングの基本的性質など

石油タンクのスロッシングは内溶液の低減衰 (自由液

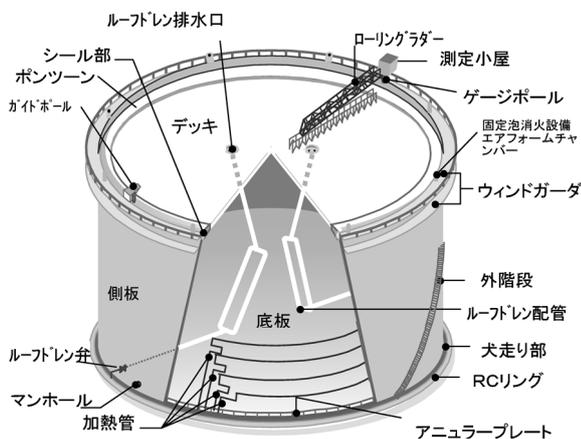


Fig. 1 Structure of single-deck floating roof tank.

面: 約 0.1%, 浮屋根式: 約 0.5–1.0%) の揺動であり、周期の選択性が極めて強いため、地震動の周期特性が重要となる。スロッシングの基本固有周期 T_s は、応答解析に良く用いられる速度ポテンシャル理論によれば、タンクの直径 D と液深 H の関数として (1) 式で与えられる (Senda and Nakagawa, 1954)。ここで g は重力加速度である。

$$T_s = 2\pi (D / (3.682g) \cdot \coth(3.682H/D))^{0.5} \quad (1)$$

実タンクの T_s は、おおよそ 3 秒から 15 秒程度にあることから、やや長周期帯域の地震動評価が重要となる。地震動の強さの指標としては、スロッシングによる側板付近の液面の最大上昇量 Wh がほぼ (2) 式で表されることから (坂井, 1980), 速度応答スペクトル S_v がこの場合には有用である。(2) 式は、タンク諸元で決まる値と、当該タンクのスロッシング固有周期 T_s での S_v との積で与えられ、実タンクでほぼ成立することが確認されている (座間, 1995)。

$$Wh = D/2g \cdot 0.837 (2\pi/T_s) \cdot S_v \quad (2)$$

ところで、自治省告示 (1983) では、石油タンクの空間高さを定めており、地震活動度に関する地域別補正係数を除けば、 S_v は周期に係らず全国一律約 1 m/s であった。しかし、以下に示すように、2003 年十勝沖地震で観測された苫小牧における地震動は、周期によってはこの 2 倍以上の値となっており、地域、周期依存性を考慮した地震動 (S_v) の見直しが求められた。

3. 地震動の特徴

1995 年兵庫県南部地震を契機に、強震観測網が整備・強化され、今回の地震では多くの貴重な地震記録が得られた。Fig. 2 は、震源地付近の襟裳岬からほぼ海岸線に沿って苫小牧周辺まで、速度波形 (0.05–0.5 Hz バンドパス) がどのように変化したかを示したものである。襟裳岬 (HKD112: 震央距離約 70 km) では、最大振幅が東西成分 0.12 m/s で、ほぼ 1 波が認められるのに対して、HKD129 (苫小牧: 震央距離約 225 km) では、0.35 m/s と大きく、また波数も多くなって震動継続時間が長く、やや長周期成分が卓越したものとなっている。このような後続位相の成長は、勇払平野の厚い堆積層の影響と考えられる。

また、苫小牧周辺の記録から計算された、石油タンクのスロッシング上昇量を規定する速度応答スペクトル S_v を見ると (Fig. 3), K-net 苫小牧 (HKD129), 千歳 (HKD184) で周期 5 秒から 10 秒という広い帯域で、従来の空間余裕高さに関する規定値約 1 m/s を大きく上回っている。

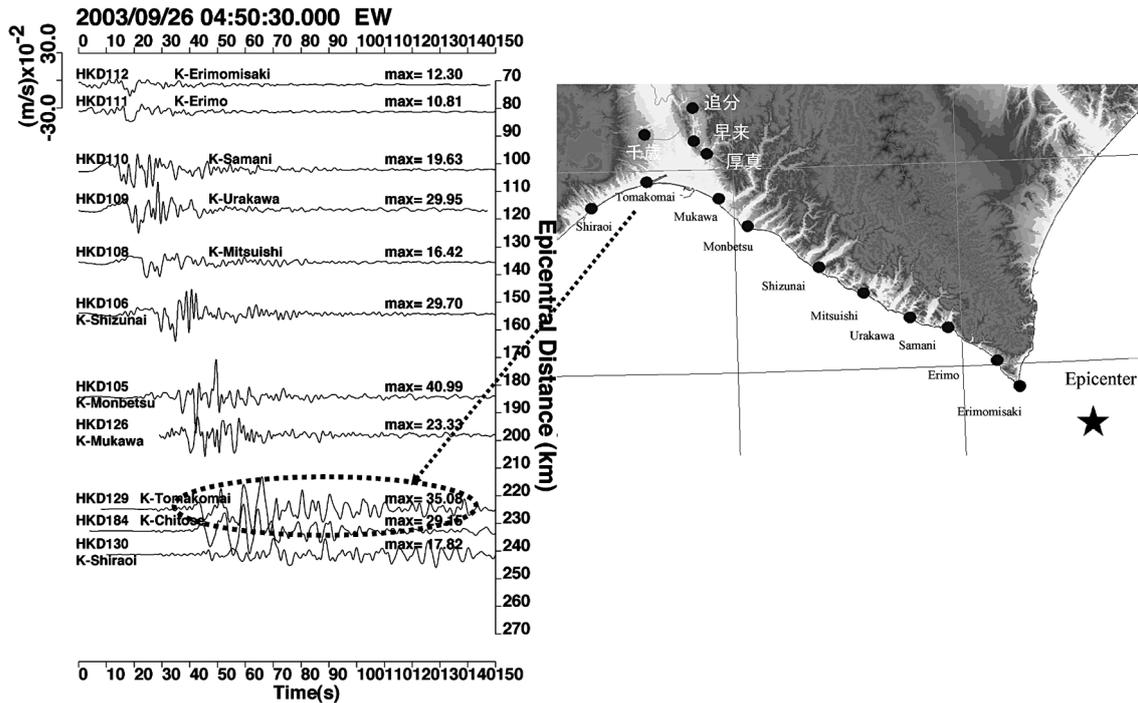


Fig. 2 Velocity waveforms at K-net stations from Erimo to Tomakomai during the 2003 Tokachi-oki earthquake.

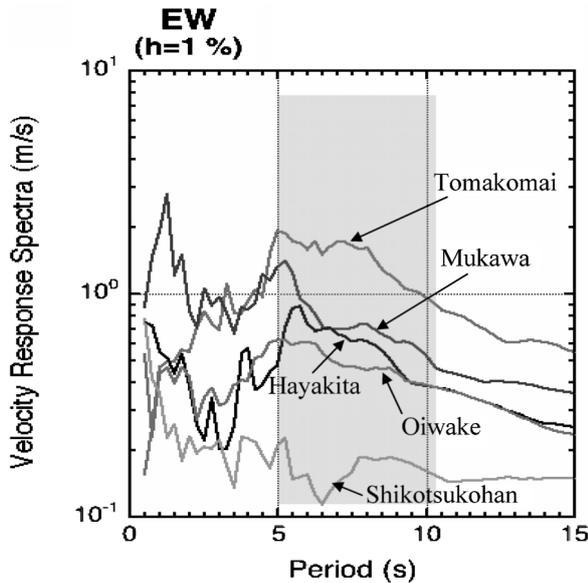


Fig. 3 Velocity response spectra at K-net stations in and around Tomakomai.

4. 石油タンクの甚大な被害とその原因

今回の地震での石油タンクの被害としては、釧路においてアンカーボルトの引き抜け等の短周期地震動による被害が認められた以外は、やや長周期地震動によって励起されたスロッシングに起因するものであった。以下、これら特徴的な被害を紹介する。

4.1 タンク火災

火災 2 基のタンクで発生した。地震とほぼ同時に発生した最初の火災では、タンク浮屋根と側板との間の火災（リング火災）、タンク東側地盤での火災およびタンク北側直近の配管の火災が認められた（Fig. 4）。原因は、大きなスロッシングのため、浮屋根とタンク上部施設とが衝突したことにより発生した火花が、浮屋根上の可燃性混合気に着火したものと考えられている（西・横溝，2006）。配管の火災については、地震により破断した配管から原油が漏洩し、それにタンク上部で発生した火災が延焼した可能性が、また防油堤内で確認された火災については、スロッシングにより溢流・漏洩した原油に、タンク上部で燃焼していた原油が飛散し延焼した可能性が高いとされている（西・横溝，2006）。

全面火災に至ったナフサタンク（Fig. 5）では、火災の前日に、浮屋根が油中に完全に没したため、ナフサの揮発防止のため消火用の泡を放出、液面を密封していたところ、火災当日の強風のため泡が風に押され、タンク液面の北側 3 分の 2 が大気中に露出した状態となっていた。このような状況の中、消火泡は時間の経過とともに水溶液に戻り、ナフサ中を沈降する際に帯電（沈降帯電）し、発生した電荷が浮島状に孤立した泡に蓄積され、泡の電位が上昇し、側板との間で放電が起こったため火災に至ったものと考えられている（西・横溝，2006）。

4.2 貯液の溢流・流出

想定以上の地震動強さのため、貯液が大きく揺動し、



Fig. 4 Tank fire just after the earthquake (photo by Tomakomai Fire Service).



Fig. 6 Failure of pontoon.



Fig. 5 Tank fire occurred after two days of the event (photo by Fire and Disaster Management Agency).

浮屋根式タンクの側板上部から大量の油が溢流したり (3基), 固定屋根式タンクの側板と屋根接合部を突き破って溢流したり (1基) という事例が認められた。また, 2基のタンクで, 浮屋根上に流出した油がドレイン排水口から内部配管を通して外に流出した。

4.3 浮屋根の変形・座屈・破断・沈没

Fig. 6は, 浮き屋根の揺動に伴い円周方向の曲げ変形を受け, 浮き室および屋根板デッキの接合部が破断した状況を示す。このため, 浮き室内及び浮き屋根上に大量の油が流入し浮力を保てなくなった浮屋根が沈没するという重大な事態に陥ったタンクが7基あった。

4.4 その他の被害

ゲージポール, ガイドポールの変形・破断, 回転梯子の損傷・落下, 測定小屋傾斜, 屋根板・ラフター変形, ウェザーフードの損傷, フォームダム変形, ルーフサポート変形, 吹き溜まり防止堰の変形・切断, 回転止サポート変形, 歩廊変形, ウェザーフードアース断線, ア

スファルト犬走り全面溶解, 液面計破断等が認められた (Fig. 1 参照)。

5. 苫小牧地区のスロッシングと被害について

火災, 浮き屋根の沈没等の甚大な被害を被ったタンクでのスロッシングはどの程度であり, その他のタンクとの関係はどのようになっているかを知ることは, 今後の石油タンクの耐震対策を考える際に重要なポイントである。最大上昇量についての実測データは, 甚大な被害のあった苫小牧においてもそれほど多くない。そこで, 苫小牧地区の全タンクのスロッシング状況を概観するために, 先ず実測されているタンクに対して, 速度ポテンシャル理論に基づく, 地震動の水平2成分を入力とするスロッシング時刻歴応答解析法 (座間, 1985) を用いて, 3次モードまで考慮し最大上昇量を算出し, 実測値と概ね一致することを確認した。その結果を踏まえ, 全石油タンクに上記方法を適用し最大上昇量を推定したものが Fig. 7である。なお, 苫小牧地区は大きく2つに分けられるので, それぞれの代表的事業所で得られた地震記録を用いた。またスロッシングの減衰定数は, 固定屋根式タンク0.1%, シングルデッキ及び内部浮屋根式タンク0.5%, ダブルデッキ浮屋根式タンク1%, またスロッシング2, 3次モードについては共通に5%とした (座間・ほか, 2004)。

Fig. 7で塗りつぶしたシンボルは何らかの被害があったことを示す。スロッシング1次固有周期5秒付近で固定屋根式タンク (CRT) での波高は4mを上回っているものもあるが, 甚大な被害とはなっていない。大きな丸を付したものは, 火災や浮き屋根の沈没という甚大な被害のあったタンク及びポンツーン内に油が確認され沈没の恐れがあったタンクである。これらのタンクは1例を除いて全てシングルデッキ浮屋根式タンク FRT (S) である。火災が発生したタンクは, 周期約7秒付近で, Wh は3mを上回っている。その例外のタンクは内部浮屋根式 (CFRT) で, 直径は27.8mと小さいものの, 地震時の液レベルが低かったために固有周期が約7秒

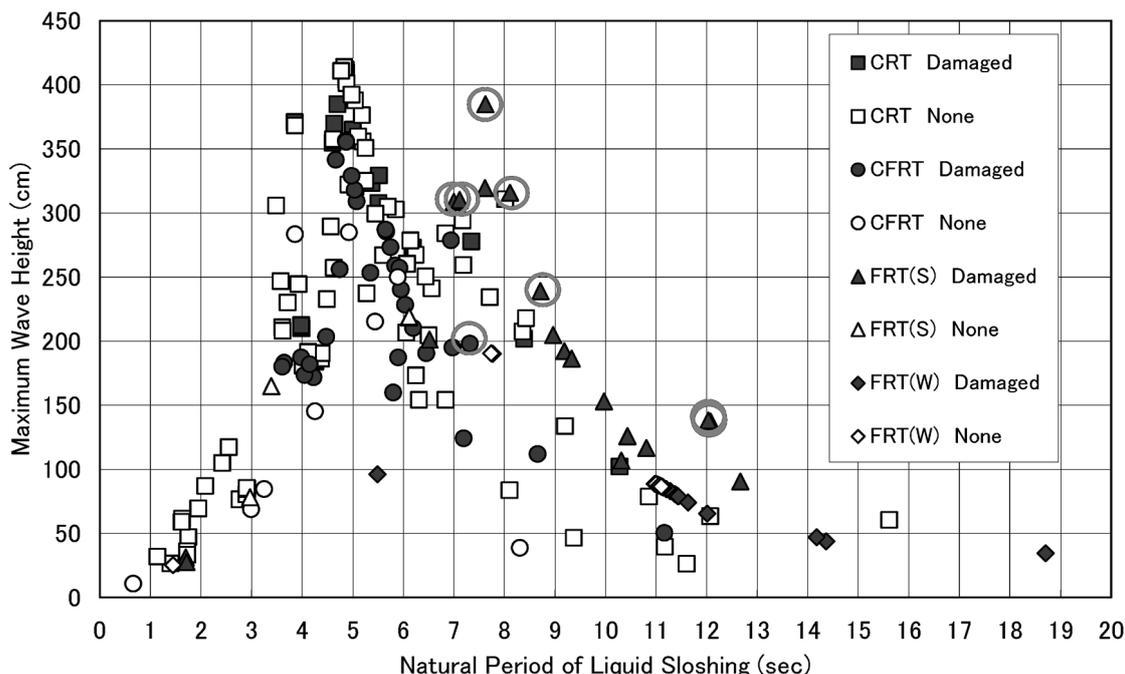


Fig. 7 Predicted maximum sloshing wave height at Tomakomai. Shaded symbols show tanks with some damage. Data enclosed by circles indicate tanks with severe damage such as fires, sinking roofs and so on.

であったが、 Wh は約2mと同じ固有周期を持つ他のタンクに比べ小さい。このタンクでは、スロッシングに起因する力（曲げ）として期待されない引っ張り力を受けてボンツーンが引き裂かれている。このタンクはナフサ貯蔵用であったため、全面火災になったタンクからのナフサ緊急移送用として用いられた経緯がある。

一方、固有周期が約12秒の容量約11万klタンク2基の Wh は約1.3mと大きくはないものの、浮き屋根は沈没した。このタンクの時刻歴応答解析結果の、特にスロッシングの大きかった東西方向のある時刻での液面形状をFig. 8に示す。これによれば、2次モード（周期5.6秒）が卓越し1m程度の変形が認められる。Fig. 3における製油所に近いHKD-129での速度応答スペクトルから分かるように、今回の地震ではこのような2次モードの周期でも強い地震動となっていて、大きくデッキが変形した可能性がある。

一般に、側板付近での最大上昇量への寄与は、1次モードが主で高次モードのそれは殆どない。今回の地震では、1次モードに相当する周期12秒の地震動強さはFig. 3から分かるように小さく、そのため最大上昇量は高々1.3mとなっている。有限要素法に基づく詳細な応力解析から、容量約11万klタンクでの浮き屋根の沈没の原因となったボンツーンの破損、デッキとの接合部の破断は、スロッシングの1次モードの影響に加え、2次モードのスロッシングによりデッキが大きく変形したために過大な荷重がボンツーンに加わり損傷を受けた可能性の高いことが指摘されている（危険物保安技術協会、

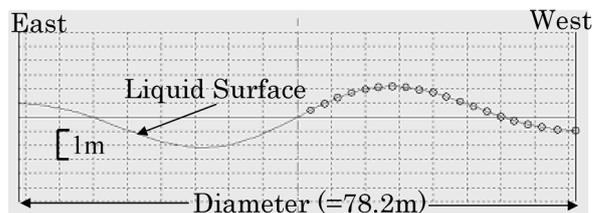


Fig. 8 Liquid surface displacement in the EW cross-section calculated for the 110,000 kl tank at a certain time using the record obtained at the Idemitsu refinery.

2004)。従って、浮き屋根の強度の観点からは、10万kl程度の巨大タンクの浮き屋根に対しては2次モードの影響も考慮する必要がある。

6. 石油タンクのスロッシング対策のための地震動の設定

6.1 地震動設定の基本的な考え方

上述のように、火災、浮き屋根の沈没の原因としては、第1義的にはスロッシング波高が高かったためであり、まずは液面管理が重要な対策となる。即ち(2)式から分かるように、スロッシング基本固有周期における地震動の適切な設定の問題となる。加えて、超大型の浮き屋根式タンクについては、スロッシング2次モードの影響が無視できない場合があり、結局、広帯域での地震動予測が重要となる。

やや長周期地震動は主に表面波からなり、その伝播特

性は少なくとも地下数 km 程度までの速度構造に大きく影響を受けることが知られている。関東平野など一部の地域では、観測記録を満足するような3次元深部地下構造モデルが提案されており、その場合には、差分法などの数値的手法を用いた波動場の計算が可能となっている。しかし、石油コンビナートは全国84箇所が存在しており、震源からこれらのタンクサイトまでの広域地下構造はまだ殆ど明らかとなっていないため、全国一律にこのような手法を用いることはできない。そこで、ここでは地震観測記録に基づいた経験的予測手法に関して考えていくこととする。

6.2 地域特性の抽出と地震動予測

やや長周期地震動特性は震源-サイトの組み合わせで大きく変わる。そこで、地震の起こり方が共通すると考えられる地震地体構造区分(気象庁, 1990: Fig. 9) 毎に記録を整理して、それらの地震に共通する各サイトでの地域特性をまず抽出する。

用いた記録は、地震規模 M6.0 以上で震源深さ 60 km 以浅の地震の気象庁 1 倍強震計記録である。この強震計は、固有周期 6 秒(水平成分: 公称)の変位計であるため、長周期帯域の地震動を比較的精度よく記録できる。また、1950年から約40年間、全国の主な気象官署での観測がなされていることから、全国を対象としたやや長周期地震動予測の問題に適している。但し、記録はペン書き、すす書きされた紙記録であるので、スキャナーで記録紙を読み取り、画像処理等によって数値化を行い、計器補正を行ってデータとした。

いま、ある地震地体構造区分内の i 番目の地震の観測

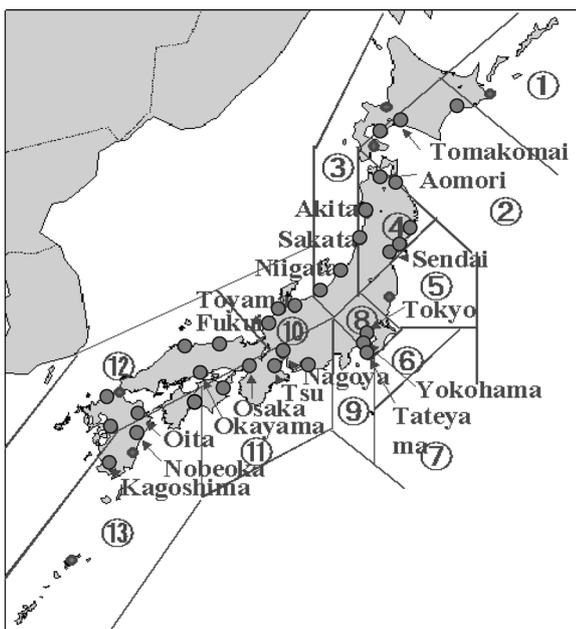


Fig. 9 Seismotectonic zoning by JMA (1990) and observatories treated in this report.

水平動スペクトルを $F_o(T)_i$, その地震のマグニチュード M と震央距離 r で定まる標準スペクトルを $F_c(T)_i$ とした時、地域特性 $R(T)$ をこれらの比の平均値で表わすこととする。

$$R(T) = \sum (F_o(T)_i / F_c(T)_i) / N \quad i=1, N \quad (3)$$

ここで、 N はある地体構造区分内のデータ数である。個々の地震に対するスペクトル比はややばらつきがあるものの、 $R(T)$ はある傾向にまとまってくる。(3)式で評価された地域特性を用いれば、予測対象地震の M と r を与えるだけでスペクトル $F_p(T)$ を次式で予測することができる。

$$F_p(T) = R(T) F_c(T) \quad (4)$$

標準スペクトルとしては、Kudo (1989) の定式化を発展させたものを用いる。Kudo (1989) は、やや長周期地震動が主に表面波からなるとし、Savege (1972) の震源モデルと正規モード解とを用いて、適当な地下構造モデルによる Love 波の加速度フーリエスペクトルを求め、それがやや長周期帯域でほぼ一定となることを示すと共に、 M と r の関数として表現した。これに基づき、 M と震源パラメータ(地震モーメント、断層長さ等)の関係に関する最近の知見に基づいて提案された次式(座間, 2000)をここでは標準スペクトルとした。即ち、

海溝型地震に対する標準加速度スペクトル:

$$F_c(T) = 4.8 \cdot 10^{0.5M-1.5} \exp(-\alpha \cdot r) / r^{0.5} \quad (M \geq 6.9) \quad (5)$$

$$F_c(T) = 4.8 \cdot 10^{1.25M-6.7} \exp(-\alpha \cdot r) / r^{0.5} \quad (6.2 \leq M < 6.9) \quad (6)$$

$$F_c(T) = 4.8 \cdot 10^{0.5M-2.1} \exp(-\alpha \cdot r) / r^{0.5} \quad (M < 6.2) \quad (7)$$

内陸地震に対する標準スペクトル:

$$F_c(T) = 4.8 \cdot 10^{0.5M-2} \exp(-\alpha \cdot r) / r^{0.5} \quad (M \geq 6.8) \quad (8)$$

$$F_c(T) = 4.8 \cdot 10^{0.6M-2.76} \exp(-\alpha \cdot r) / r^{0.5} \quad (6.4 \leq M < 6.8) \quad (9)$$

$$F_c(T) = 4.8 \cdot 10^{0.9M-4.68} \exp(-\alpha \cdot r) / r^{0.5} \quad (M < 6.4) \quad (10)$$

ここで、 $\alpha = 0.001 \text{ km}^{-1}$ 。

6.3 予測精度の検討

Fig. 10 は、一例として東京、新潟、大阪の地域特性を各震源地 (Fig. 7 では ZONE) ごとに示したもので、例えば日本海東縁部 (Fig. 7 の ZONE3) の地震については、新潟では周期約 10 秒で標準スペクトルより 3 倍程度揺れることが分かる。東京については、ZONE9 (伊豆半島付近) の地震に対し、周期 8~9 秒で 3.5 倍程

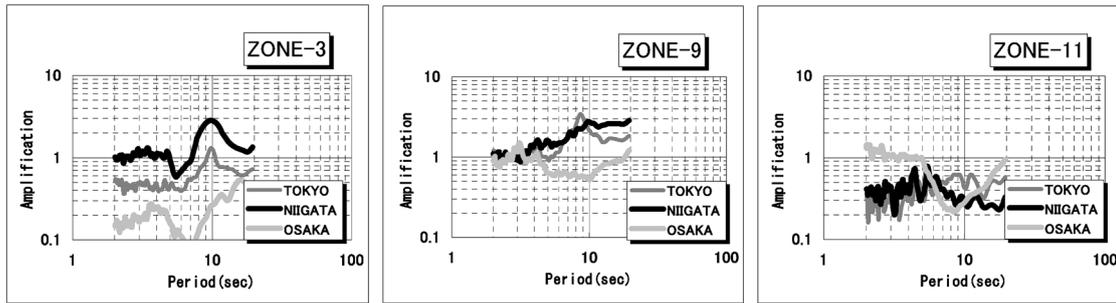


Fig. 10 Example of regionality of long-period ground motions at Tokyo, Niigata and Osaka.

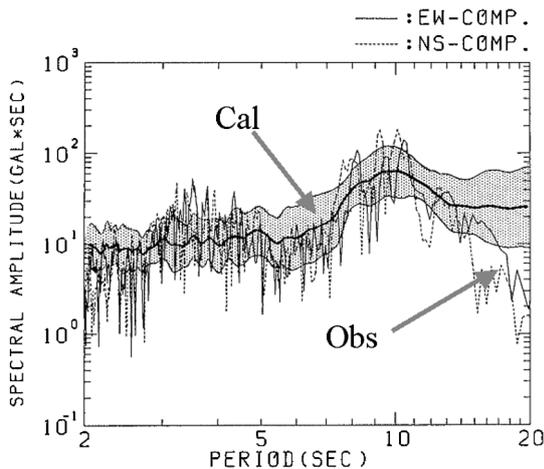


Fig. 11 Comparison between observed and calculated spectra at Niigata for the 1993 Hokkaido Nansei-oki earthquake. Shaded area shows predicted spectrum with standard deviation.

度揺れるというように、観測点ごとに注意すべき震源地と周期帯を絞ることができる。

Fig. 11はこのような地域特性を用いて、海溝型の1993年北海道南西沖地震の新潟での予測を行い観測値と比較したもので、良い一致を見せている。なお、予測のために用いたデータには、この地震は含まれていない。また、内陸地震の例として1930年北伊豆地震についてみると、概ね観測値を説明できている (Fig. 12)。その他、1944年東南海地震、1995年兵庫県南部地震などの大地震を対象として同様に予測精度を確認している。

6.4 長周期地震動の予測スペクトルから見た地域区分と補正係数

上述の経験的方法によって、ある程度の精度で長周期帯域のスペクトルを予測することが可能であることが分かった。そこで、石油タンクのスロッシングに係る従来の長周期帯域の地震動強さに関する規定値 ($S_v = \text{約 } 1 \text{ m/s}$) の見直しを試みた。なお、 S_v の減衰定数は0.5%とした。これは、甚大な被害を被ったシングルデッキ浮屋

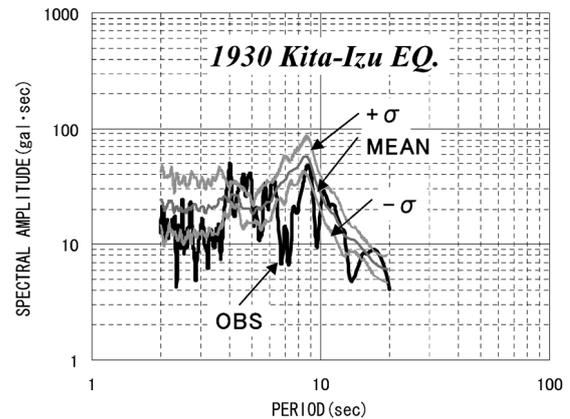


Fig. 12 Comparison between observed and calculated spectra at Tokyo for the 1930 Kita-izu earthquake.

根式タンクのスロッシングの減衰定数が約0.5%であるとしていることによる (座間・ほか, 2004)。この S_v と上述の加速度フーリエスペクトルとの関係を多くの記録について検討した結果、Hanning ウィンドウを5回かけて平滑化した加速度フーリエスペクトルとほぼ等しくなることが確認されたことから、以下の解析ではこれを S_v とみなした。

6.4.1 地域区分

ここでは、Fig. 9 に示した気象官署地点での将来の地震による長周期帯域の最大地動 (スペクトル) を予測して、その結果に基づいて地域分けを行なう。

まず、地震地体構造区分ごとに与えられている最大地震規模 (萩原, 1991) の地震に対して長周期地震動スペクトルを予測し、全てを重ねあわせる。加えて、過去の地震記録があればそれも重ね合わせて包絡線を作成することで、対象地点で期待される最大のスペクトルを求める。更にその結果に基づき、以下の判定基準によって解析対象気象官署地点を3つに区分した。

地域区分の判断基準としては、従来の余裕空間高さに関する規定値である速度応答スペクトル約 1 m/s を一つの閾値とする。加えて、Fig. 7 に示した2003年十勝沖地震による苫小牧地区での石油タンクのスロッシング

波高（計算値）と被害との関係から、特に火災や浮き屋根の沈没等の甚大な被害が、スロッシング固有周期約7秒以上の浮き屋根式タンクで発生していることに鑑み、閾値として上記スペクトル強度の他に周期特性も取り入れることとし、浮き屋根式タンクのスロッシング周期が約7秒以上での地震動強さも判断基準として取り入れることとした。即ち、

- 地域1：予測スペクトルが広い周期帯域、特に約7秒以上の長周期側で1 m/s を越える。
- 地域2：予測スペクトルが周期約7秒未満で1 m/s を越える。
- 地域3：予測スペクトルが1 m/s に満たない。

以上は、あくまでも記録依存の議論であり、タンクサイト最寄りに気象官署の観測点がない場合には、別途地震記録の収集を行う必要がある。また、十勝沖地

震における苫小牧で認められたように、気象官署と石油タンクサイトでの地震動特性は、高々数 km の違いであっても相当異なることもあるため、観測点とタンクサイトの地震動特性の相違には十分注意する必要がある。

そこで、港湾空港技術研究所、防災科学技術研究所の観測データの収集・解析、および半経験的手法、理論的ないしは数値的手法に基づく予測結果（愛知県、2003；愛知県私信、2004；古村、2003；早川・古村、2004；土方・ほか、2004；Kamae et al, 2004；釜江私信、2004；野津私信、2004；鶴来・ほか、2005）を用いて、見直し・追加を行った。

その結果、例えば、解析対象とした気象官署とタンクサイトが離れている名古屋（地方気象台）に対する予測スペクトルは約3秒までは1 m/s を越える結果であったため地域2に該当するとしていたが、愛知県による

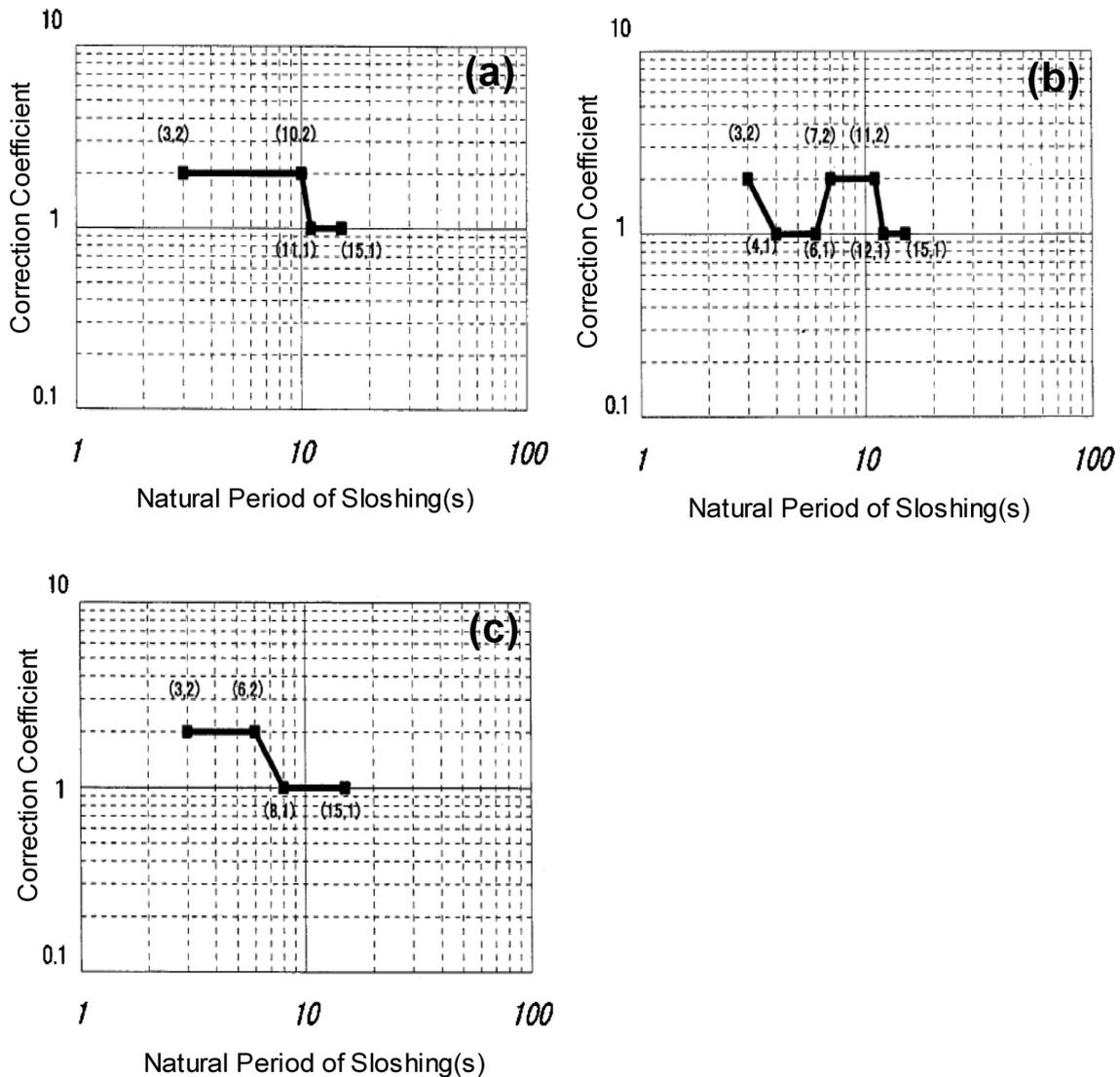


Fig. 13 Correction coefficients for the spectra in the fire service law of Japan regulating sloshing wave height of oil storage tank.
 (a) Region 1-1 (Tomakomai, Sakata, Niigata)
 (b) Region 1-2 (Tokyo, Yokohama)
 (c) Region 1-3 (Kamiiso, Akita, Shimizu, Nagoya, Yokkaichi, Osaka, Amagasaki)

湾岸地域の予測スペクトルが周期7-8秒程度まで1 m/sを超えていたことから、地域1に変更した。また大阪(管区气象台)については、周期5秒まで約2 m/sという予測に対して、石油タンクのある湾岸では、釜江(私信, 2004)、鶴来・ほか(2005)などから周期約6秒まで約2 m/sとした。東京湾岸については、周期8-9秒で2 m/s程度となるとしてはいたが、土方・ほか(2004)の結果及び2004年紀伊半島沖の地震の東京湾岸のデータの解析から周期7-11秒で2 m/s程度となるとした。紙数の関係で、他の地域の見直し結果については座間(2005)に譲るとして、結果を纏めると以下ようになる。

- 地域1：苫小牧，秋田，酒田，新潟，東京，横浜，大阪，名古屋，清水，四日市，尼崎，上磯
- 地域2：青森，仙台，富山，金沢，浜松，津，高知，熊本，大分，鹿児島，八戸，鹿島，小名浜，志布志
- 地域3：釧路，室蘭，大船渡，石巻，高田，福井，鳥取，米子，岡山，徳島，福岡，延岡，名瀬，蒲郡，和歌山，松山等

6.4.2 長周期地震動補正係数

実用に供するため、従来の規定値に対する補正係数(乗算)について検討した。ここでは、特に影響の大きいとされた上記地域1について、予測スペクトル包絡線を類型化し、補正係数をFig. 13(a)-(c)のように定めた。

7. おわりに

消防庁では、2003年十勝沖地震による石油タンク火災を踏まえ、スロッシングによる浮屋根損傷に対する耐震機能確保に関する技術基準の改正作業を進め、スロッシングに対する従来の設計水平震度を、周期・地域によって最大2倍とする上述案に沿った基準改正を行った(2005年1月改正，同年4月施行)。ただし、地震動予測は強震動地震学の永遠のテーマであり、今後も最新の知見を取り入れていく必要があることは言うまでもない。

謝 辞

京都大学・釜江克宏氏，東京大学・古村孝志氏，港湾空港技術研究所・野津厚氏，地域地盤環境研究所の趙伯明，鶴来雅人，香川敬生，宮腰研の各氏及び愛知県には、半経験的手法あるいは数値的手法による予測結果を提供して頂いた。また、気象庁，港湾空港技術研究所，防災科学技術研究所の強震観測データを利用させて頂いた。ここに記して深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 愛知県防災会議地震部会(2003)：愛知県東海地震・東南海地震等被害予測調査報告書，2-8。
- 古村孝志(2003)：地球シミュレータによる地震波動伝播の大規模3次元並列シミュレーション，月刊地球，15巻，9号，703-709。
- 萩原尊禮編(1991)：日本列島の地震，鹿島出版会，192-197。
- 早川俊彦，古村孝志(2004)：2004年紀伊半島沖地震の強震動シミュレーション，日本地震学会講演予稿集，PK17。
- 土方勝一郎・植竹富一・金谷淳二・真下 貢・早川 崇・渡辺基史・佐藤俊明(2004)：東海地震の関東平野における長周期地震動予測，日本地震学会講演予稿集，B20。
- Irikura, K. (1986) : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, Proc. 7th Japan Earthquake Symp., 151-156.
- 自治省(1983)：告示119号。
- Kamae K., H. Kawabe, K. Irikura (2004) : Strong Ground Motion Prediction for Huge Subduction Earthquakes using a Characterized Source Model and Several Simulation Techniques, 13World Conference of Earthquake Engineering, DVD No. 655, 1-11.
- 危険物保安技術協会(2004)：屋外タンク貯蔵所浮屋根審査基準検討会報告書，80-81。
- 気象庁地震火山部地震津波監視課(1990)：気象庁(東京)で観測された強震記録(1927年～1989年)，6。
- 鶴来雅人・趙伯明・Petukhin Anaoly, 香川敬生(2005)：南海・東南海地震の大阪府域における強震動予測，構造工学論文集，51A, 501-512。
- Kudo, K. (1989) : Significance of long-period strong Motion in seismic risk evaluation, Proc. 4th Int. Symp. on the Analysis of Seismicity and Seismic Risk., 433-439.
- 西 晴樹，横溝敏宏(2006)：出光興産榊北海道製油所タンク火災に係る調査概要について(最終報告)，消防研究所報告，100, 59-63。
- 坂井藤一(1980)：円筒形液体タンクの耐震設計法に関する2, 3の提案，圧力技術，18, 16-23。
- Savage, J. C (1972) : Relation of corner frequency to fault dimensions, J. Geophys. Res., 77, 3788-3795.
- Senda K. and K. Nakagawa (1954) : On the vibration of an elevated water tank -I. Technical Report of the Osaka University 4, 170, 247-264.
- 消防庁(1965)：新潟地震火災に関する研究，153-180。
- 座間信作(1985)：1983年日本海中部地震による苫小牧での石油タンクの液面揺動について，消防研究所報告，60, 1-10。
- 座間信作(1990)：石油タンクのスロッシングとやや長周期地震動，第18回地盤地震動シンポジウム，15-20。
- 座間信作(1995)：石油タンクのスロッシングとやや長周期地震動特性，安全工学，34, 148-155。
- 座間信作(2000)：やや長周期帯域における加速度スペクトルの半経験的表現，消防研究所報告，89, 1-10。
- 座間信作・西 晴樹・廣川幹浩・山田 實・畑山 健(2004)：石油タンクのスロッシングの減衰定数，消防研究所報告，98, 66-73。
- 座間信作(2005)：やや長周期地震動のスペクトル特性から見た地域区分の見直し，Safety & Tomorrow, 101, 14-26。

Damage of oil storage tanks due to the 2003 Tokachi-oki earthquake and revision of design spectra for liquid sloshing

Shinsaku Zama*

ABSTRACT

The 2003 Tokachi-oki earthquake ($M_w=8.0$) caused the severe damage to oil storage tanks such as tank fires, submergence of floating roof, and overflow of large amount of oil, due to large liquid sloshing more than 3 m excited by the long-period strong ground motions. According to the Japan fire service law for the maximum sloshing wave height at that time, the velocity response spectrum at a period of sloshing was about 1 m/s. Considering both predicted spectra at petroleum industrial complexes for earthquakes with maximum expected magnitude in each seismotectonic zone and damage pattern of oil storage tanks at Tomakomai, we proposed design spectra for liquid sloshing of oil storage tank in Japan by introducing the correction coefficients as a function of period and source region. The design spectra were adopted in the revised Japan fire service law enforced on April 2005.

Key words: Tokai-oki earthquake, Oil Storage tank, liquid sloshing, seismotectonic zone, design spectrum