
長周期地震動について

株式会社プラント耐震設計システムズ
池 田 雅 俊

1. まえがき

2003年9月26日に発生した十勝沖地震によって、北海道苫小牧の石油タンクに火災が発生し、数多くの石油タンクが破損した。この地震で、普通の家屋にはほとんど影響はなかった。

2004年9月5日の紀伊半島南東沖の地震の際には、遠く離れた千葉県にある石油タンク数基にスロッシングが発生していた。ゲージポールが溶接線に沿って折損した被害も報告されている。²⁾ 同じ年の10月23日に発生したマグニチュード6.8の新潟中越地震では、震源近くの地域が大きな被害を受けただけでなく、200キロ近く離れた東京の六本木ヒルズの高層ビルは大きく揺れ、そのエレベーターが停止した。

1985年メキシコ地震の際、震源から400kmも離れたメキシコ盆地に位置するメキシコ市で周期約2～4秒の波動が卓越し、高層建築に大被害が生じたことにより、この現象は世界的に注目されるようになった。

古くは1964年の新潟地震で、石油タンクに火災が発生した。この時以来、液面のスロッシングの危険性が注目され始めた。

これらの災害は数秒に1回程度の人間が気付かないこともあるユーラユーラとした緩やかな揺れの地震動によって引き起こされる。プラント設備に関して初めて規定された高圧ガス保安法(当時は、高圧ガス取締法)の高圧ガス設備等耐震設計基準において、このスロッシングに対する耐震設計規定が導入された。

一般に「やや長周期地震動」(以下、略して単に「長周期地震動」という。)と言われる。高圧ガス保安法では、通常のカタカタと揺れる地震動を「第1設計地震動」と言い、この長周期地震動を「第2設計地震動」という。「やや長周期」と呼ばれるのは、古典的な強震動研究で扱われた周期範囲は短い周期(周期1～2秒以下)で、通常地球物理学で扱う範囲は長周期(周期10数秒以上)であり、このスロッシングで対象となる周期帯域がその中間にあるためである。但し海外では最近「長周期強震動(Long-Period Strong Ground Motion)」と呼ばれることが多い。

この長周期地震動に関しては、コンビナートの石油タンクや超高層ビル、さらには超大橋などの巨大構造物だけを襲う。巨大構造物を破壊するほどのエネルギーを秘めた地震動である。いままで、石油タンクを除いて、巨大構造物に大きな影響を及ぼすようなこの長周期地震動を経験したこ



図1 十勝沖地震で石油タンク炎上

とはなかったが、東海地震や東南海・南海地震等の巨大地震が発生した場合の影響の大きさが近年徐々に分かって来た。土木学会・建築学会から2006年に「海溝型巨大地震による長周期地震動と土木・建築構造物の耐震性向上に関する共同提言」がなされ、来るべき巨大地震に対する周的な備えを構築する為の枠組みが提言された。

その揺れの特性は、急激にガタガタと強烈かつ小刻みに襲う揺れとは性質がかなり異なるものである。従来の建築・土木構造物の耐震規定は、長周期地震動に対して十分なものとは言えない。

本講座のその6で、「タンクのスロッシングについて」¹⁾解説したが、今回は、その外力となる「長周期地震動」について解説する。

2. 長周期地震動とはどんな特徴をもった地震動か

普通のプラント設備や住宅に大きな被害の出る揺れは周期が0.1～2秒だが、長周期地震動の周期は数秒～十数秒程度になる。

断層の破壊により発生した地震は、地殻内を実体波(縦波-P波及び横波-S波)として伝播し、基盤に達した波は表層の地盤で増幅されて、地表に達する。この地表に達した地震動により設備、建物、住宅等を加振して損傷などの影響を与える。2秒くらいまでの周期をもつ地震動である。

地震波が平野のような堆積層に達したときに周期の長い表面波となり、それが長周期地震動となる。表面波は地表を伝わる地震波で、縦波や横波が干渉しあって発生する。ガタガタ(P波)、ユサユサ(S波)の揺れの後にやってくる揺れである。

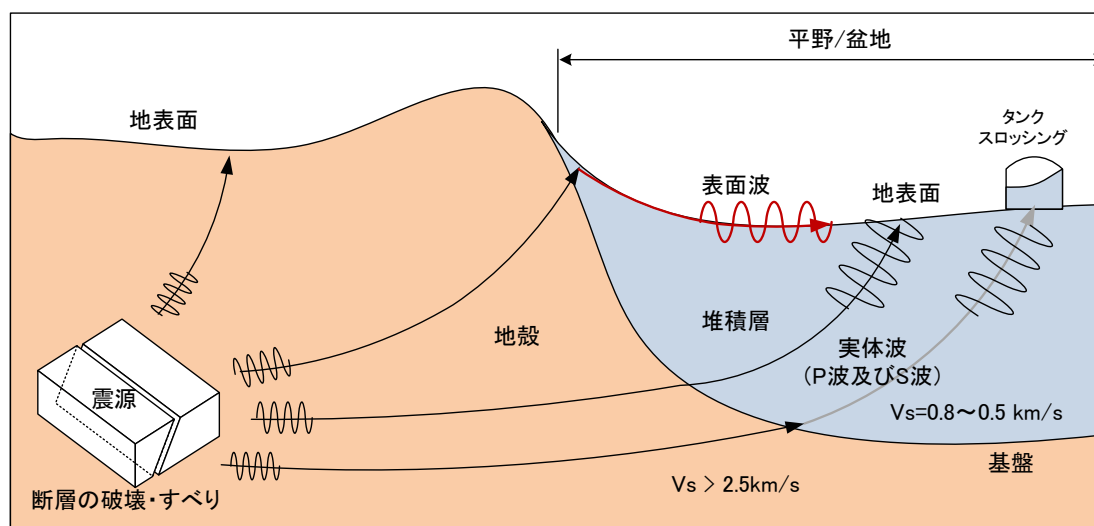


図 2 実体波と堆積層表面波

表面波にはレイリー波とラブ波の2種類がある。レイリー波は地表が上下方向に楕円を描くように振動する波で、振動は地表が最も大きく、地下に行くに従って減少する。

それに対して、ラブ波は水平面で進行方向と直角な方向に振動する波で、地震波の横波の中で水平方向に振動する波である。

今までの観測や解析から、長周期波動の主要成分は、盆地境界部で二次的に発生し、堆積層内で発達した表面波である。このため「堆積層表面波」とよばれる場合もある。

同程度の規模で東北日本の太平洋側と日本海側という異なった震源域で起こった地震の記録を比較すると、日本海側で起こった地震の方が震央距離が長くかつ地震規模が小さいにも拘らず、長周期地震動の振幅が大きく継続時間も長い。このように地震動の観測点を固定してみると震源地によって相当異なった地震動特性となる。反対に震源地を固定してみても観測点によって大きな相違がある。長周期地震動特性は、震源特性（発震過程）、地震波の伝播特性及び観測地点での深部地下構造に応じてかなり違ったものとなる。

2.1. 長周期地震動は遠くまで伝わる

新潟県中越地震でも、長周期の揺れが、震源から 200 ㎞近く離れた関東平野に「飛び地」のように現れた。また、紀伊半島南東沖の地震の際には、400 ㎞ほど遠く離れた千葉県にある石油タンク数基にスロッシングが発生していた。

この長周期の表面波は一般的に、P 波 (6 km/sec 程度) や S 波 (3.5km/sec 程度) よりも遅く、減衰しにくく、震源から遠くまで伝わる。

2.2. 長周期地震動は正弦波に近い

実体波 (P 波や S 波) の速さが波を伝える岩石の性質によって決まるのに対し、表面波の場合は波長(波の山から山までの長さ)によって決まり、波長が長くなるほど速くなる。そのため、最初は長波長と短波長が混じっている表面波も、波の進行とともに分離(「分散」という。)して、短波長の揺れは早く減衰して、長周期の正弦波に近い地震動が遠くまで伝わる。構造物は、その固有周期に応じて、選択的に影響を受ける。

2.1. 堆積層の深い平野・盆地で長周期の地震動が強く揺れる

長周期地震動の表面波は、すり鉢状の堆積層の深い盆地で、その地下構造に応じて特定の周期の波が励起され、増幅される。堆積層の固有周期は、ほぼ堆積層の深さに比例した値となる。

短周期波動は、堆積層の持つ高減衰のため伝播できない。

例えば、地下に 3000 から 4000 メートルの堆積層がある東京周辺では 6 秒から 8 秒程度の長周期地震動が多く発生する。また、十勝沖地震の場合、地震波が勇払平野の東端部に達したところで表面波が発生し、約 7 秒の長周期地震動が石油タンクを「共振」させて火災へとつながった。

紀伊半島東部地震に際しては、周期 5.0 秒では震源に近い大阪平野や濃尾平野で強く揺れた。周期 7.0 秒では、大阪平野や濃尾平野で目立たないのに、震源から遠い関東平野では、大阪平野や濃尾平野よりも強く揺れた。さらに 10.0 秒の周期でみると、大阪平野や濃尾平野ではほとんど震動が消滅しているのに対し、関東平野はなお広範囲で強震動となった。

堆積層の深さが 6000 から 7000 メートルと関東地域で最も深い千葉県姉ヶ崎周辺では 12 秒という長周期地震動が多く発生する。

2.2. 長周期地震動の継続時間は長い

十勝沖地震で、静内や門別の記録に比べて苫小牧では勇払平野のなかで発達した周期数秒のやや長期の波が50秒以上も長く継続している。

関東平野・勇払平野のようなすり鉢状の堆積盆地では、このような長周期の波動が共振・増幅して、何回も反射して繰り返され継続時間の長い波動が発達する。

巨大構造物とその固有振動に一致した長周期地震波が強く何度も長い時間揺すられたら、与えられる破壊エネルギーは巨大なものとなる。

東南海・東海地震に関するシミュレーションの結果によると、関東平野では5～8秒の長周期地震が、3分以上にわたって長い間継続する。これは波数で20～40波に相当する。

3. どんな事態が予想されるか

特に我が国の都市部やコンビナートは例外無く堆積盆地上に位置することが多く、地震の際、やや長周期波動が励起される可能性大である。十勝沖地震で発生した長周期地震動は、普通の家屋にはほとんど影響はなかったが、石油タンクと共振して大きな被害となった。将来、南海トラフ沿いで起きる東海地震や東南海地震、南海地震等の巨大地震では、数100km離れた関東、大阪、名古屋などの大都市やコンビナート地区に、十勝沖地震での苫小牧での場合より強い長周期地震動が起きると考えられている。

3.1. 巨大地震による長周期の揺れは、震度と無関係に大きな被害を招く

気象庁の発表する震度は普通の家屋の倒壊の状況を考慮して設定されたものであり、短周期地震動の強さの指標として作成された。しかしながら長周期地震動の強さに関しては考慮されていない。したがって、阪神大震災では震度の大きさが被害が整合していたが、長周期地震動が関東、大阪、名古屋などの大都市やコンビナートを襲ったとき、震度に関わらず、多くの高層ビルや石油タンク等の大規模構造物に大きな影響があると予測できる。

超高層ビルや巨大な橋、石油タンクは何メートルも揺れ、影響が特に大きい。どのような被害がもたらされるのか、実際にはよく分からない面も多い。

3.2. コンビナートの設備の被害

ほとんどが埋め立て地に立地する日本のコンビナート地帯は長周期地震動の影響を受けやすい地盤構造を持っている。千葉、川崎、神奈川の東京湾岸、名古屋、伊勢湾、大阪周辺、瀬戸内海、和歌山も然りである。そのような巨大コンビナートは戦後の高度成長期に造れたもので大きな地震を一度も経験していない。日本のコンビナートには石油の備蓄タンクや発火物を扱う施設もあり、その安全性は未知と言わざるを得ない。

500kl以上の屋外石油タンクは、全国に13000基あるうち、東京、神奈川、千葉には約3000基、愛知、三重・静岡には約1600基、大阪、兵庫、和歌山には約1700基存在する。東海、東南海、南海地震の震源域から200km以内の距離にある。これらの地震が連動して発生し、同時多発的大規

模火災を引き起こす恐れも十分予測される。

3.3. 大都市の超高層ビルなどの被害

マグニチュード8クラスの巨大地震は未だに近代都市と高度な工業都市を襲ったことはなく、都心の高層ビルなどの大規模構造物は戦後に建設されたもので、これまでに強い長周期地震動の影響を受けたことがない。

兵庫県南部地震では、超高層ビルや、免震・制振建屋は被害はなかった。短周期型の衝撃的な波動が主体であったことによる。海溝型の巨大地震で励起される大きな破壊エネルギーを有し長時間継続する長周期型の震動に対して構造部材やエネルギー吸収機構の耐震性能を再評価することも行われている。

超高層ビルが「長周期型」地震動に遭遇したとき、上層階の揺れが著しく大きくなる。その内部でどのような事態が起こるのかが、防災科学技術研究所の3次元震動装置「E-ディフェンス」で一連の実験が行われた。実験の結果は<http://www.bosai.go.jp/hyogo/movie.html>で確認できる。震動台上で南海地震により予想される変形(最大で片側約150cm、揺れは約200秒)をやや上回る揺れを与え、オフィス、リビング、寝室、キッチンで収容物の移動、転倒による人的被害が増大する事態を検証することができる。

4. 今後の長周期地震動対策

4.1. 長周期地震動の揺れ特性

図3は構造物の固有周期ごとの揺れの強さを模式的に表したものである。建築物やプラントの設備(塔槽類、架構等)は高圧ガス保安法における設計用応答スペクトルのように短周期地震動に対して設計している。超高層ビルや石油タンクは長周期地震動に対して設計を行う必要がある。図3のようにかなり様相が異なる。

石油タンクのスロッシングの固有周期は、おおむね、 $T = \sqrt{D}$ (s)、 D はタンクの直径(m)であるので、 $D=50\text{m}$ で周期7秒、 80m で9秒となる。超高層ビルの固有周期は $T=0.09N$ (s)、 N は床の数で60階のビルの場合で5.5秒、70階で6秒となる。

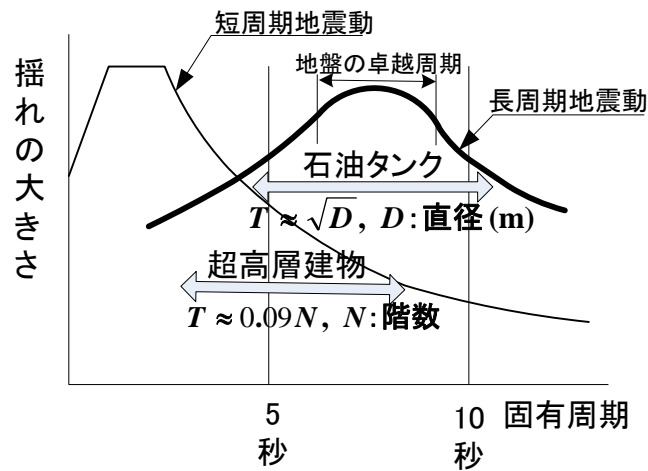


図3 固有周期ごとの揺れの大きさ (m/s)

消防法では、2003年の十勝沖地震における苫小牧での甚大な被害を受けて、石油タンクのスロッシングに係る設計水平震度の見直し、浮き屋根の強度に関する検討、消火方法などについての見直しを行い、2005年1月技術基準が改正^{文献5)}され、4月施行された。

高压ガス保安法に関しては、平成16年度より長周期地震動（第2設計地震動）に関する見直しを始め、正弦3波応答に基づく規定が十分な安全性を確保していることを確認している。しかしながら、地域区分を短周期地震動（第1設計地震動）に関する規定を準用しているためにその改定が望ましい^{文献6)}としている。

4.2. 巨大地震による長周期地震動の予測精度の向上

将来の巨大地震による被害を軽減するためには、精度の高い地震動予測が重要である。

長周期地震動は、震源・サイト依存が強いことを考慮して、震源における起震特性や伝播、特性堆積盆地、特に盆地境界部の複雑な速度構造を反映し、やや長周期波動の発生や伝播にも複雑な地形・地質の3次元効果を含むシミュレーションを行うことができるようになってきた。その結果に応じて精度の高い対策を講じることができる。

例えば、関東平野西部の非常に堅い露頭古生層と明瞭なコントラストを成す堆積層の形状及び地下深部の基盤の凹凸が表面波の生成、伝播に大きく影響することを考慮して、2004年10月に発生したマグニチュード6.8の新潟中越地震では、震源近くの地域が大きな被害を受けただけでなく、300キロ以上離れた東京における長周期地震動の影響を確認^{文献8)}することができた。

(<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/furumura/lp/2007Chuetsuoki.mpg> 参考)

東南海地震と東海地震の2つの地震が連動することを想定して、紀伊半島沖から駿河湾までの約300キロにわたる断層破壊(マグニチュード8)のシミュレーション^{文献4)}を行っている。東京都心は震源から400キロ離れているので、約1分半後には、震度は4~5程度の地震が到達するが、そのとき、堆積層の深さが3000から4000メートルの東京都心では6秒から8秒程度、堆積層の深さが

6000 から 7000 メートルと関東地域で最も深い千葉県姉ヶ崎周辺では 12 秒という長周期地震動が発生する。また、多くの地域の地震動がおさまっても、名古屋、静岡、東京の平野部分では震動が 5 分から 10 分継続する。

現在、深部地下構造に関するデータは一部の地域に限られている。今後、全国各地のデータが着実に収集され公開されることを望む。

4.3. 浮き屋根の強度

2003 年の十勝沖地震における苫小牧でのスロッシングに起因する浮き屋根の損傷から生じたタンク火災を受けて、スロッシングの 1 次モードの非線形性の影響及び 2 次モードの影響を考慮した浮き屋根の耐震強度評価基準を策定した。これは、2005 年の消防法の改正^{文献5)}に採用されている。

4.4. スロッシング抑制策

スロッシング抑制のため例えば次のような各種のスロッシング抑制策が提案されている。

- 1) 浮き屋根にばねとおもりをつけ液体の振動制御装置
- 2) 浮き屋根の外周部にゴム製の減衰材を設置
- 3) 浮き屋根の外周部に制振マス設置
- 4) 浮き屋根下面に流体移動に対する抵抗減衰要素設置

4.5. 地震被害予測・警報システムの構築

長周期地震動は、海洋型の遠距離巨大地震によるサイトまで到達するのに、例えば東海地震の場合東京都心まで到達するのに 60～100 秒要すると予測されている。緊急地震速報を活用しこの間に揺れの性状を予測し、総合的な地震被害予測・警報システムの構築を検討が行われている。
文献7)

常時、全タンクの内径、貯油の種類、各タンクの油糧等をリアルタイムで自動収集する。緊急地震速報からタンクサイトのスロッシング波高算定に必要な地表の速度応答スペクトルを推定し、この大きさとタンクのスロッシング周期を用いて全タンクのスロッシング波高を評価する。この情報をリアルタイムでタンクの危険度判定を行い、タンク管理者、作業従事者にリアルタイムに配信するシステムである。

その結果に基づいて適切な対策を適切なタイミングで講じることによって、安全性の高い施設の管理・運営を行うことが可能となる。

さらに、地震波が到達する前に緊急に情報を入手して、超高層ビルや浮き屋根の応答抑制装置や制振装置などにより揺れを軽減することが可能となる。

5. おわりに

今回は地震に関して話題となっている長周期地震動について最近の状況を解説した。現在、進行中の新しい分野であり、発展途上にある。しかしながら、東海地震、東南海地震及び南海地震は、今世紀前半にはかなりの確度で来襲するといわれている。切迫した状況にあることも確かである。新設は勿論のこと、既存の建物や設備を長周期地震動の観点からその耐震性を確認することが望ましい。

文献

- 1) 池田雅俊：タンクの内容液のスロッシングについて、LP ガス プラント、Vol.41 No.4、耐震設計講座、
- 2) 畑山健、座間信作：紀伊半島東南沖の地震による石油タンクのスロッシングと長周期地震動、消防研究所第 99 号、技術報告、2005/3
- 3) 土木学会・建築学会：海溝型巨大地震による長周期地震動と土木・建築構造物の耐震性向上に関する共同提言、2006/11/20
- 4) 古谷孝志：迫る東海地震—長周期地震動が東京の高層ビルを揺らす、
http://www.itmedia.co.jp/enterprise/articles/0511/22/news040_3.html
- 5) 消防庁：危険物の規制に関する規則の一部を改正する省令等の施行について、消防危第 14 号(2005)
- 6) 高圧ガス保安協会：高圧ガス耐震化対策報告書、平成 19 年経済産業省委託事業、2009,3
- 7) 大保直人、加藤健治：リアルタイムスロッシング評価システム、大形タンクのスロッシングに関する耐震・免震技術のミニシンポジウム公園概要集、pp15-18、2005
- 8) Takashi Furumura and Toshihiko Hayakawa : Anomalous Propagation of Long-Period round Motions Recorded in Tokyo during the 23 October 2004 *M*_w 6.6 Niigata-kenChuetsu, Japan, Earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97, No. 3, pp. 863–880, June 20