

京都大学工学部 正員 家村浩和 同 正員 山田善一

京都大学工学部 正員 野田茂 前田建設工業 正員 嶋田三朗

1. まえがき 最近における土木技術の進歩にともなう、大規模かつその固有周期の長い（数秒以上）構造物が次々と建設されている。長大吊橋、斜張橋、海上プラットフォーム、大型タンクなどはその典型である。これら長周期構造物の設計スペクトルは、加速度記録の応答スペクトルを外挿することにより決定されて来たが、観測記録に基づいた実証的な値であるとは言いがたい。すなわち、長周期領域における加速度記録の信頼性が明確でないことや、一倍強震計は±3 cmで振り切れてしまうことなどが原因となっている。本研究は、スロッシング高さから、長周期地震動の応答スペクトルを逆算し、各種設計スペクトル値との比較・検討を行ったものである。

2. 日本海中部地震による地盤震動 昭和58年5月26日に発生した日本海中部地震（ $M=7.7$ ）により巨大タンクが大きなスロッシングを起した。秋田では火災が発生した。さらに震央から約270km以上隔った新潟においては、震度がⅢで加速計がトリガーしなかった（十数ガル以下）にもかかわらず（図1）、溢流をとまうスロッシングが発生した。これらの事実は、地盤が長周期で振動したことを示している。図2、3に示した秋田と新潟の一倍強震計記録

を見ると、約2分間ほどの振り切れの後、7~10秒程度の周期の波が十数分以

上にわたって継続している。大きなスロッシングは、継続時間の長い長周期地震波との共振現象によるものと考えられる。この地震による各地の最大地震変位のアテニュエーション特性を、地震

月報に示された各地の1倍強震計記録の最大振幅 δ (cm) より、

次のように検討した。まず1倍強震計の計器特性を考慮して、最

大変位の生じた周期についてのみ振幅補正を行い、震央距離 Δ に応じてプロットしたのが図4である。振り切れた地方（秋田、青森、酒田、新潟）のデータは含まれてないが、計器補正により10cm程度の最大変位も見られる。この修正変位は、 Δ が500km以内において、次に示す坪井式よりもかなり大きく（5倍程度）なることがわかる。

$$\log \delta = 4.53 - 1.73 \log \Delta \quad \cdots \cdots (1) \quad (M=7.7 \text{ を利用})$$

3. 各地巨大タンクのスロッシング周期と高さ 著者らは、地震直後より、各地の大型タンクのスロッシング高さに興味を持ち、東北、北陸および南北海道における各都市の消防本部に、タンクの種類、直径、液深、内容液、地盤条件などにに関する詳細なアンケート調査を実施した。これより秋田、男鹿、新潟市におけるスロッシング高さを、それぞれの周期に対してプロットしたのが図6である。他の都市においては、大型タンクが存在しないかあるいは存在しても

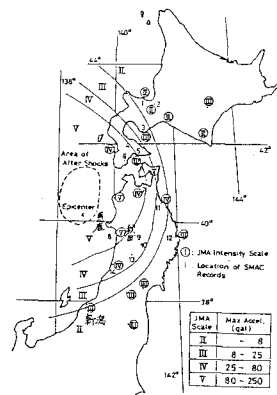


図1 等震度図とタンク位置

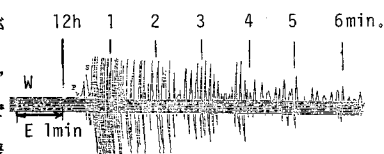


図2 秋田の1倍強震計記録

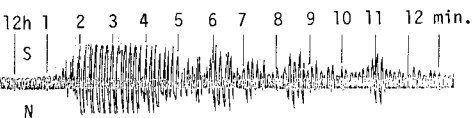


図3 新潟の1倍強震計記録

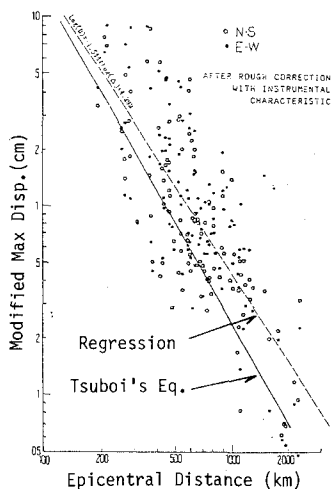


図4 修正変位と震央距離の関係

非常に微小なものであった。スロッシングの1次モードの周期 T_s は、流力解析より次式で与えられる。

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{D}{3.68g} \coth\left(\frac{3.68H_1}{D}\right)} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 D はタンクの直径、 H_1 は液深である。新潟では、8～11秒のタンクにおけるスロッシングが他の周期帯のそれより異常に大きな値を示している。秋田は震央より100 km程度と震源に近いが、8～10秒のスロッシング高さは新潟よりもやや低い。しかし4秒の所にもかなり大きな値が存在する。秋田よりもさらに震源に近い男鹿では、非常に低いスロッシング高さであった。スロッシングは、減衰の非常に小さい振動であるから、地震波動のうち固有周期周辺の狭帯域の周波数成分にのみ敏感である。したがってスロッシング周期に対応する長周期地震波が存在したことは間違いがない。一倍強震計記録はこうした事実を裏づけている。スロッシング高さが地域や周期により大きく異なるが、その原因については、震源過程や地盤条件などから現在検討中である。

4. スロッシング高さより逆算した応答スペクトル スロッシングの1次モードのみを考えれば、その高さ η_{max} は、基準座標における1自由度振動系の最大応答変位そのものであり、モード解析から次の関係を得る。

$$\eta_{max} = \frac{D}{2g} \cdot 0.84S_A = \frac{D}{2g} \cdot 0.84\left(\frac{2\pi}{T_s}\right) S_v \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 S_A 、 S_v は加速度および速度応答スペクトルである。上式より逆算した S_v 、 S_A を図6、7に示した。高次モードおよび地盤との相互作用の影響がほとんど無いことを、解析的に確認している。図6中にスロッシング高さ推定用のスペクトルおよび各種長周期構造物の設計スペクトルを載せた。新潟および秋田の S_v 値は、周期9秒前後において200kine前後の非常に大きい値を示しており、自治省の告示値の2倍以上となるものもかなり存在する。一方男鹿の値は、いずれも小さい値である。逆算値は減衰定数が1%以下の応答スペクトルに対応するから構造物の設計スペクトルとは直接比較できないが、異常に大きい値である。通常の構造物の減衰定数(2～10%)によりどの程度にまで低下するかは、別報で発表する。一方、どのような正弦波が入力されれば、図6、7に示した S_v 、 S_A に相当する応答となるのかを、数値計算により検討したのが図7である。同図には、振幅10cm、周期10秒、および振幅15cm、周期9.5秒の正弦波15波に対する、減衰定数0.4%の1自由度系の完全共振応答を示した。加速度応答倍率が40倍などという異常な値となっているが、入力振幅がもう少し大きかったのかも知れない。いずれにしても、従来の3波共振法は再検討されるべきものと考えられる。

謝辞 本研究でのアンケート調査と資料収集に御協力頂いた、各消防本部および気象台の皆様方に感謝の意を表します。

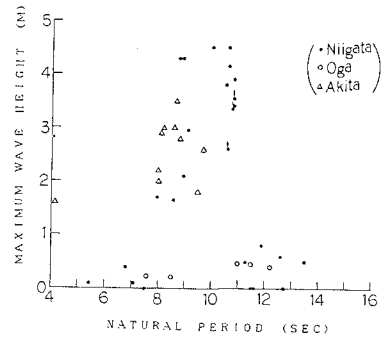


図5 スロッシング周期と高さ

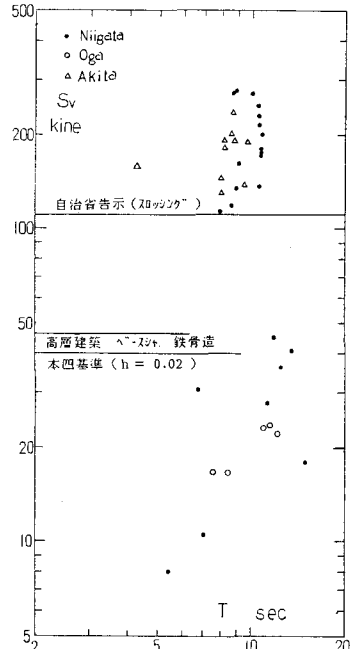


図6 η_{max} より逆算した S_v

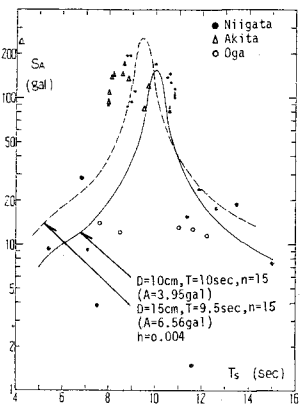


図7 15波共振応答(h=0.004)