

1. はじめに

地震動には水平動成分と共に上下動成分があり、現行の設計法には対象とする構造物によって、設計条件として明確に上下動を考慮しているものと、設計条件としては考慮していないが何らかの形でその影響を考慮しているものがある。しかし、過去のいくつかの地震において、構造物の被害状況からその地震動の上下動成分の影響が大きかったことが指摘された例もある。一方、現在までに地震動の上下動成分に関して発表された資料は非常に限られている。それ故、本報告ではより信頼性の高い耐震設計のための資料を得ることを目的とし、実測された強震記録に基づき地震動の上下動成分の工学的特性を検討した。さらに、この結果をふまえて地震時に構造物の安定性及び上下動成分の影響を明らかにするため、重力式岸壁を例にとり港湾構造物に対する震度法に基づく現行設計法による検討をおこなった。

2. 対象とした強震記録

この報告で対象とした強震記録は、運輸省港湾技術研究所が歴年ごとに刊行している「港湾地域強震観測年報」と、建設省土木研究所が歴年ごとに刊行している「土木構造物における強震記録」によった。用いた強震記録は水平2成分のうちどちらかの最大加速度が10 gal以上の記録であり、港湾地域強震観測によるものが1963年3月から1974年12月までの294本、土木研究所による強震記録が1968年1月から1973年12月までの280本、合計574本である。なお、これらの強震記録はごく少数を除き、SMA-C-B2型強震計によって得られた記録である。デジタル化された強震記録に関する検討は、時間的制約から港湾地域強震観測によって得られた強震記録のうちで現在までに上下動成分がデジタル化されている25本の強震記録についてだけおこなった。

3. 地震の上下動成分の検討

今回対象とした強震記録574本について、水平動2成分の最大加速度のうち大きい方（以後これを水平最大加速度とする）と、上下動成分の最大加速度をプロットしたものが図-1である。この図には、上下最大加速度と水平最大加速度の比（以後これを上下水平最大加速度比と呼ぶ）を示す直線も同時に示してある。また、全記録について上下水平最大加速度比の度数分布を求めた結果が図-2である。この図には水平最大加速度のレベル別の度数もわかるように示してある。上下水平最大加速度比が1.3以上ある記録は1.30, 1.60および1.67の3本である。図-1によれば水平最大加速度が50 gal以上の記録についていうと、少数の記録を除けばほとんどの場合上下水平最大加速度比は $1/2$ 以下となった。ここでいうところの水平

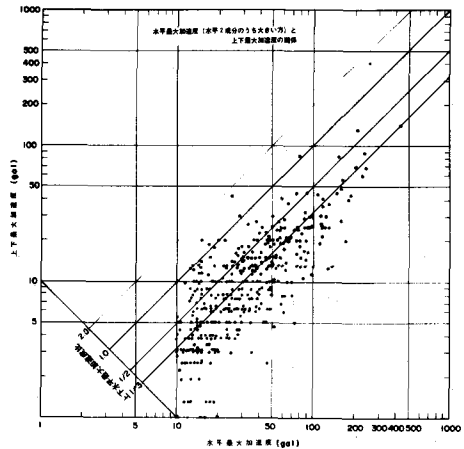


図-1 水平最大加速度と上下最大加速度

最大加速度とは水平2成分のうち大きい方の最大加速度であるが、実際の水平加速度は各瞬間における2成分の水平加速度のベクトル和で、この水平合成最大加速度は水平最大加速度より大きく最大 $\sqrt{2}$ 倍となる。したがって、水平最大加速度のかわりに水平合成最大加速度を用いた場合には、上下水平最大加速度比は小さくなる。

図-1に示したように上下水平最大加速度比はかなりばらついている。地震の現象は非常に複雑であるが、この比に影響を及ぼす要因が推定できれば、耐震設計を行う場合有効な情報となる。そこで、上下水平最大加速度比に影響を与える要因として、水平最大加速度、震央距離、地震のマグニチュード、地盤条件、発震機構をとりあげ検討をおこなった。図-1において水平最大加速度の大きさによる上下水平最大加速度比の変化をみると、水平最大加速度が小さい場合には上下水平最大加速度比の値のばらつきがかなり大きい、水平最大加速度が大きくなると、上下水平最大加速度比はほぼ0.5以下になることがわかる。図-3には震央距離と上下水平最大加速度比の関係を、図-4には地震のマグニチュードと上下水平最大加速度比との関係を示す。地盤条件については、港湾地域強震観測地点を岩盤及び締ったレキ・砂層地盤、一般的な砂・シルト・粘土地盤、N値5以下の砂地盤の3つのグループに分け、それぞれのグループ間の上下水平最大加速度比の相違について検討をおこなった。震央距離、地震のマグニチュード、地盤条件と上下水平最大加速度比との関係については、今回の検討結果では特に明確な相関は認められなかった。ただし、震央距離が極端に小さいところでは、上下水平最大加速度比が1以上になるものがあり、これは直下型地震を想定する場合注目すべきことであろう。ほぼ近接した和歌山の2つの観測地点のそれぞれの記録の震央距離と上下水平最大加速度比の関係を図-5に示す。図中の数字はそれぞれの地点について地震の発生順につけてあり、同一地震の場合には同じ番号が示してある。この図によれば、ほぼ同じ震央距離であっても、地震によってその上下水平最大加速度比はかなりばらついていることがわかる。このことから、地震のマグニチュードが5~6程度の地震についていえば、上下水平最大加速度比は、発震機構に大きく影響をうけるものと思われる。

上下最大加速度と水平最大加速度が全く同一瞬間に

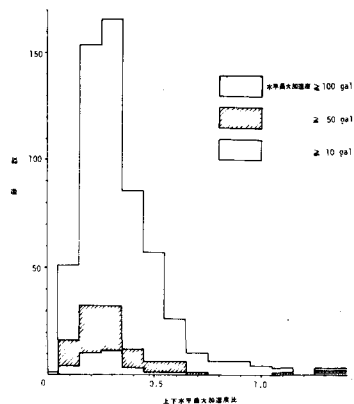


図-2 上下水平最大加速度比の度数分布図

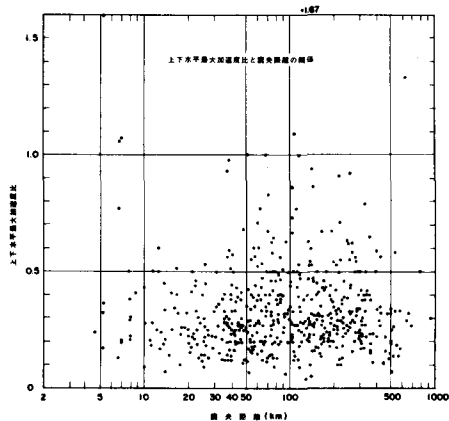


図-3 上下水平最大加速度比と震央距離の関係

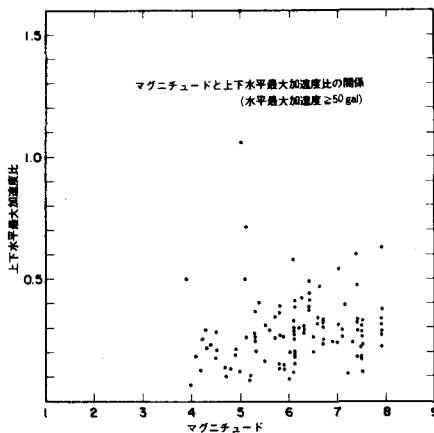


図-4 上下水平最大加速度比とマグニチュードの関係

発生するということはまれであるから、合理的な耐震設計を実施するためにはこの両最大加速度が時間的にずれて発生することによる構造物の安定に及ぼす影響を明らかにしておくことが望ましい。この上下最大加速度と水平最大加速度の位相差を考えた場合、地震時に構造物がもっとも危険になる場合はどの瞬間かが問題となるが、ここでは単純に剛体の滑動及び転倒に対してもっとも危険となる合震度が最大となる時刻を考え、その時刻における上下加速度と水平加速度の比率について検討した。上下動成分が数字化されている25本の強震記録

について時々刻々合震度を計算し、合震度が最大となる時刻における上下加速度と水平合成加速度をプロットしたのが図-6である。合震度はほぼ水平加速度が最大となる時刻付近で最大となるが、この時刻における上下加速度はそれほど大きくないことがわかる。このように、水平最大加速度と上下最大加速度が同一時刻に発生しないことを考慮すると合震度が最大となる時刻における上下加速度と水平合成加速度の比はほぼ $1/3$ 以下となった。

上下動成分が数字化されている25本の強震記録についてフーリエスペクトル及び応答スペクトルを計算した。これらの記録の震央距離は、もっとも小さいもので1.4 kmであり、震央のごく近傍で得られた記録は含まれていない。計算結果によると、上下動成分の場合にとくに短周期成分が卓越しているというような特性は認められなかった。

1968年3月30日和歌山市付近で発生した局発地震の際和歌山港で観測された強震記録は、水平2成分の最大加速度N-S: 176 gal, E-W: 253 gal, 上下成分の最大加速度405 galで特に地震動の上下動成分の最大加速度が大きい点で特記に値するものであった。この上下動成分の主要動付近では短周期成分が卓越し、記録が不鮮明なため読取は困難であったが、その主要動の周期は約2.0 Hzと推定された。水平最大加速度と上下最大加速度が発生した時刻はずれており、上下最大加速度が発生した時刻において水平加速度は約25 gal, 水平最大加速度が発生した時刻において上下加速度は約40 galとなっていた。この地震の際に特に注目されたのは、地震動の上下動成分が非常に大きく、かつ水平成分の最大加速度もかなり大きいものであったにもかかわらず、和歌山港における各港湾施設の被害が皆無であったという事実である。これは地震動がかなり短周期成分の強いものであったこと、かつ地震動の水平成分と上下成分の最大加速度がずれて発生していることから、構造物に与える振動の影響としてはそれほど大きいものでなかったことが推察される。

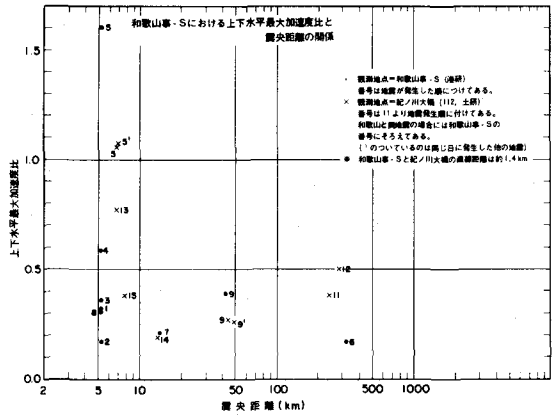


図-5 和歌山事-Sにおける上下水平最大加速度比と震央距離の関係

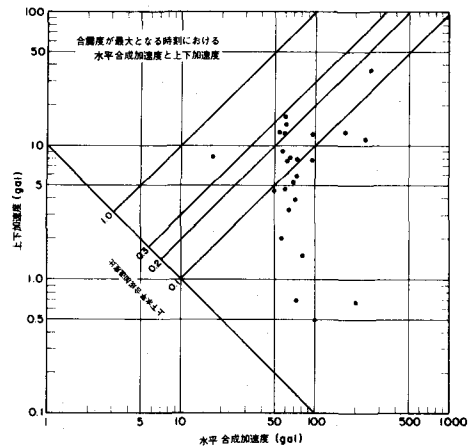


図-6 水平合成加速度と上下加速度

4. 重力式構造物の安定に及ぼす上下動の影響

地震動の上下動成分に関する検討結果をふまえて、重力式構造物の安定に及ぼす上下動の影響を現行の設計法によって検討した。対象とした構造物は重力式岸壁である。現行の重力式岸壁に対する設計法では設計条件として鉛直震度は考慮されていないが、設計条件として水平震度を与えるときに、このなかに上下動の影響は含まれるとして上下動を無視したことを補償していると考えられている。しかし、これは経験的にそう判断されているのであって、実測データに基づいて上下動の影響を評価したものではない。それ故、ここでは現行の設計計算法において設計条件として鉛直震度を考慮した場合と考慮しない場合とでは安全率がどの程度変化するかについて検討した。

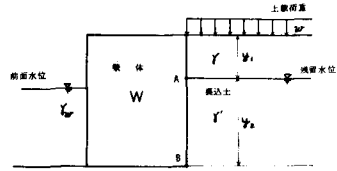


図-7 重力式岸壁

図-7に示すような単純化した重力式岸壁を設計計算の対象とした。鉛直震度は水平震度の $1/2$ とし、壁体に対して上、下方向に作用する場合についてそれぞれ検討をおこなった。水平震度、天端高、前面水深、裏込め土の内部摩擦角、上載荷重、壁体の高さとの比、残留水位を幾通りかにかえ設計計算をおこない、滑動安全率、転倒安全率、壁体底面反力を求めた。さらに次に設計条件としての鉛直震度の有無によって安全率及び底面反力がどのように増減するかその割合を求めた。

計算結果によると滑動安全率、転倒安全率に及ぼす上下動成分の影響の割合は鉛直震度が上方向に作用した場合が危険であり、その安全率の減少の割合は水平震度に比例して増大することがわかった。鉛直震度を設計条件として考慮した場合の安全率は、考慮しない場合と比較して安全率で水平震度が0.05で1.5%、水平震度が0.20で10%減少した。この減少率は水平震度以外の設計条件をかえてもほぼ同様であった。鉛直震度を考慮した場合の底面反力はその作用方向あるいは他の設計条件によって、鉛直震度を考慮しない場合の底面反力と比較して複雑に増減することがわかった。その増減の割合は普通数%であったが、設計条件によっては滑動安全率が1.0で底面反力の増加の割合が20%となる場合もあった。これらの検討結果は鉛直震度が水平震度の $1/2$ の場合を想定したものであり、上下最大加速度と水平最大加速度の位相差を考慮すると、以上求めた安全率、底面反力に及ぼす上下動の影響は小さくなる傾向にある。このことを考慮すると、重力式構造物の安定に及ぼす上下動の影響は小さいことがわかった。

5. 結 語

- 1) 水平最大加速度が50 gal以上の記録については、上下最大加速度と水平最大加速度（水平2成分のうち大きい方）との比率（上下水平最大加速度比）は $1/2$ 以下であった。
- 2) 上下最大加速度と水平最大加速度が発生する時刻のずれを考慮して、剛体が滑動及び転倒に対してもっとも危険な状態となる時刻の上下加速度と水平加速度の比を求めた結果、 $1/3$ 以下となった。
- 3) 港湾構造物の現行の設計法によって重力式岸壁について鉛直震度を考慮して安定計算を実施した。この結果、今回検討した重力式岸壁については鉛直震度の影響は小さかった。

参考文献

- 1) 土田肇・倉田栄一：地震の上下動成分がケーソンの安定に及ぼす影響について，第11回地震工学研究発表会講演概要，1971年7月
- 2) 倉田栄一・石坂徳三・土田肇：港湾地域強震観測年報（1974），港湾技研資料，No. 202
- 3) 栗林栄一・若林進・高木義和：土木構造物における強震記録（1973），土木技研資料，No. 967，1974年11月