

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

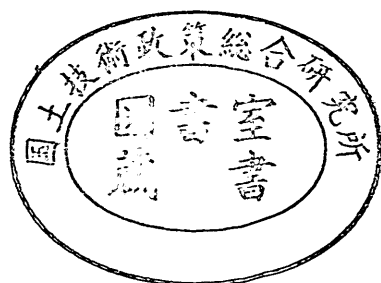
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 15

NO. 2

JUNE 1976

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第15巻 第2号 (Vol. 15, No. 2), 1976年6月 (June 1976)

目 次 (CONTENTS)

1. Theory of transient fluid waves in a vibrated storage tank
..... Tomotsuka TAKAYAMA..... 3
(振動外力を受けるタンク内発生波の非定常解について.....高山 知司)
2. 防波堤隅角部付近の波高分布に関する研究 小舟浩治・大里睦男.....55
(A study of wave height distribution along a breakwater with a corner
..... Koji KOBUNE, Mutsuo OSATO)
3. 阿賀野川河口近傍海岸の海底地形変化について (1962年~1973年)
..... 田中則男・加藤一正・柳島慎.....89
(Changes of sea-bed topography at the coast near Agano River (1963~1973)
..... Norio TANAKA, Kazumasa KATO, Shin-ichi YANAGISHIMA)
4. 波浪中の直立円柱浮体に働く流体力とその運動
..... 合田良実・鈴木康正・笹田 正..... 167
(Movements of a floating vertical circular cylinder in waves and associated
forces..... Yoshimi GODA, Yasumasa SUZUKI, Tadashi SASADA)
5. 大阪湾の潮流と物質拡散に関する模型実験 (第2報)
——主要汚染源の湾内汚染に与える影響——
..... 金子安雄・堀江 毅・村上和男・亀山 豊・入尾野幸雄..... 211
(Model experiment on tidal current and substance diffusion in Osaka Bay (2nd
Report)—Influence of main sources on the water contamination of the Osaka
Bay Yasuo KANEKO,
Takeshi HORIE, Kazuo MURAKAMI, Yutaka KAMEYAMA, Sachio IRIONO)
6. 潮流計算における境界等の取扱い——特にADI法による検討——
..... 堀江 毅・金子安雄・村上和男・細川恭文・亀山 豊..... 251
(Boundary treatments of tidal simulation—Investigation by alternating direction
implicit method—..... Takeshi HORIE, Yasuo KANEKO, Kazuo MURAKAMI,
Yasushi HOSOKAWA, Yutaka KAMEYAMA)
7. 強震記録の上下動成分の解析と重力式岸壁の安定に関する事例研究
..... 上部達生・野田節男・倉田栄..... 289
(Characteristics of vertical components of strong-motion accelerograms and
effects of vertical ground motion on stability of gravity type quay walls.....
..... Tatsuo UWABE, Setsuo NODA, Eiichi KURATA)

7. 強震記録の上下動成分の解析と重力式岸壁の安定 に関する事例研究

上 部 達 生*

野 田 節 男**

倉 田 栄 一*

要 旨

地震時における構造物の安定に及ぼす地震動の上下成分の影響を明らかにするため、574本の強震記録に基づく検討を実施した結果、以下に示す事項が明らかとなった。

- 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が同一でないことを考慮すると、構造物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強震記録の水平加速度に対する上下加速度の比を求めた結果は、1/3 以下となった。
- 3) 港湾構造物に対する現行設計法に鉛直震度を加味し、重力式岸壁につい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。

* 構造部 耐震構造研究室
** 構造部 沈埋構造研究室長

7. Characteristics of Vertical Components of Strong-Motion Accelerograms and Effects of Vertical Ground Motion on Stability of Gravity Type Quay Walls

Tatsuo UWABE*

Setsuo NODA**

Eiichi KURATA*

Synopsis

Characteristics of vertical components of 574 strong-motion accelerograms were studied in order to know the effects of vertical ground motion on dynamic stability of structures. The followings were made clear.

- 1) According to accelerograms of the maximum acceleration more than 50 gals the ratio of the maximum acceleration of vertical component to that of horizontal component was less than 1/2.
- 2) The occurrence time of the maximum acceleration of horizontal component was different from that of vertical component. At the time that the safety factors of sliding and overturning were smallest, the ratio of vertical acceleration to horizontal acceleration was less than 1/3.
- 3) The stability of the gravity type quay walls were analyzed taking account of the vertical seismic coefficient according to the current design method of port facilities. As a result of this design calculation, the vertical seismic coefficient had little influence on the safety factor of a gravity type quay wall.

* Member of the Earthquake Resistant Structures Laboratory

** Chief of the Subaqueous Tunnels and Pipe Lines Laboratory

目 次

要 旨	289
1. はじめに	293
2. 強震記録	293
2.1 強震記録の解析対象範囲	293
2.2 観測地点と強震計	293
2.3 観測地点の地盤条件	294
2.4 解析対象記録	294
2.5 記録のデジタル化	296
3. 地震の上下動成分の検討	296
3.1 上下最大加速度と水平最大加速度の比	296
3.2 上下水平最大加速度比に影響する要因	298
3.3 上下最大加速度と水平最大加速度の位相差	304
3.4 上下動のフーリエスペクトルと応答スペクトル	305
3.5 1968年3月30日和歌山市付近の地震	310
4. 重力式構造物の安定に及ぼす上下動の影響	310
4.1 剛体の滑動安全率に及ぼす影響	310
4.2 重力式岸壁の安定に及ぼす影響	313
5. 結 論	315
謝 辞	316
参考文献	316

1. はじめに

地震時における地盤の振動には、水平動の他に上下動が含まれている。水平動と比較すると、この上下動の振巾は小さく、且つ、高い周波数成分が卓越していると従来より言われている。このため、上下動が一般の土木、建築構造物の安全性に及ぼす影響は小さいと見なされて来た。

設計の実務面における上下動の取扱いとしては、その構造物が被災した時、人命に直接的に係り合ったり周囲に多大の影響を及ぼす場合や、構造的に上下動の影響を受けやすい場合等によって異っている。例えば、原子力発電施設・沈埋トンネル・海峡横断橋に対しては、水平震度の1/2の鉛直震度を考慮する一方、港湾施設・アースダム或は一般の橋梁のように、鉛直震度を考慮しない場合もある^{1)~6)}。

しかし、これまでに上下動に関して発表された資料は非常に限られている⁷⁾。それ故、上記構造物に対する基準等では、上下動の振巾や周波数特性に関する十分なデータに基づくとするよりも、構造物の振動特性や安全性を考慮した工学的判断によって、上下動の影響を設計に取込んでいると言えよう。

一方、アースダムのような一般の構造物においても、上下動の影響は無視出来ないとする報告⁸⁾もあり、直下型地震に注目したビルディングの地震応答観測⁹⁾も行なわれるようになって来た。

このような現状に対応する為、本報告では、強震観測により得られた実測記録に基づき、耐震設計上で必要な上下動の振巾・卓越周波数・水平動に対する割合等に関する定量的把握を試みた。さらに、上下動が構造物の安定性に影響する程度を明らかにする為に、重力式岸壁を例に検討を加えた。

2. 強震記録

2.1 強震記録の解析対象範囲

この報告で対象とした強震記録は、港湾技術研究所が港湾関係諸機関と協力して組織している港湾地域強震観測網で収集された強震記録と、建設省土木研究所で収集された強震記録である。対象をこれら両機関のものに限った理由は、強震観測網の主要な強震計がSMAC型(ほとんどがB2型)であることと、収集された記録が整理され、かつ歴年ごとに刊行されていること、観測網が整備されており、観測地点の資料が入手しやすいことなどである。港湾地域強震観測網の強震計は海岸に沿って設

置されており、土木研究所においては主として内陸の土木構造物を対象に強震計が設置されていて、これら両機関の観測網は、整備がいきとどいてると同時に地域的に相補っているものである。港湾地域強震観測網の現況および各観測地点の設置条件等の資料について「港湾地域強震観測地点資料」^{10)~12)}として詳しい報告がある。また得られた記録の主要なものは数字化され応答スペクトルとともに「港湾地域強震観測年報」として歴年ごとに刊行されている^{13)~25)}。土木研究所における強震観測に関する資料としては、歴年ごとに刊行されているものとして「土木構造物における強震記録」^{26)~31)}があり、数字化されたデータについては土木研究所資料として「地震記録のデジタル数値」^{32),33)}がある。土木研究所の強震観測記録については、各成分の最大値のみをデータとして用いた。土木研究所で数字化された強震記録のデータについては、時間的制約等により今回の報告ではとりあつかわなかった。なお、港湾地域強震観測年報には上下成分の数字化データが発表されていないが、主要なものに限り水平成分とまったく同様数字化され磁気テープ及びカードで保存されている。

今回の報告で対象とした強震記録本数は、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、土木研究所による記録の中で入手できたものが1968年1月から1973年12月までの280本である。

以後本報告では港湾地域強震観測による地震記録を港研の記録、土木研究所関係の地震記録を土研の記録と略記する。観測地点、強震計、数字化の方法等は上述の両研究機関の資料に詳しい記述がある。ここではその概要を以下に説明する。

2.2 観測地点と強震計

港湾地域強震観測網における強震計設置台数及び土木研究所関係の強震計設置台数を表-1に示す。港研では1974年12月末現在で69台の強震計が設置されており、土研では1974年3月現在で435台の強震計が設置されている。港研では、観測地点を強震計の設置位置としているため地点数と強震計の台数とが等しくなっている。土研では、各観測地点において、地盤上と構造物に強震計を設置しているため強震計の台数は地点数よりかなり多くなっている。使用されている地震計は、港研では大きく分けるとSMAC型強震計およびERS型強震計の2種類、土研でもSMAC型強震計と電磁式強震計の2種類である。ERS型強震計は港研で開発したもので、可動線型の変換器と無現像電磁オンログラフを組み合わせたもの

表-1 強震計設置台数

	港湾技術研究所 (1974年12月現在)				土木研究所 (1974年3月現在)			
	地点数	地盤上	構造物上	合計	地点数	地盤上	構造物上	合計
SMAC 型強震計	51	43	8	51	96	96	93	189
ERS 型強震計	18	8	10	18	—	—	—	—
電磁式強震計	—	—	—	—	48	—	246	246
合計	69	51	18	69	144	—	435	435

表-2 SMAC 型強震計の標準仕様

	SMAC-A (A2)	SMAC-B (B2)	SMAC-D	SMAC-E (E2)	SMAC-Q
成分	水平 2成分 鉛直 1成分	同 左	同 左	同 左	同 左
振子の固有周期 (sec)	0.1 (0.14)	0.1 (0.14)	0.05	0.05	0.05
振子の減衰	臨界減衰	同 左	臨界減衰の60%	同 左	同 左
記録感度 (gal/mm)	25 (12.5)	25 (12.5)	100	200(100)	200
記録最大加速度 (gal)	1,000 (500)	1,000 (500)	500	1,000	1,000
記録紙	スタイラスペーパー	同 左	35mmスクラッチフィルム	同 左	同 左
記録速度 (mm/sec)	10	10	5	2.5 (5)	5
記録時間 (min)	3	3	1.5	1.5	1.5
時刻 (sec)	1, 1/2, 1/5	1	1/5	1/5	1/2
寸法 (cm)	56×48×84	54×54×37	45×45×35	45×45×35	40φ×32

である。ERS 型強震計及び電磁式強震計のデータについては今回の報告では使用していないので詳細は省略する。SMAC 型強震計のうち、港研で使用されているのは SMAC-B2 型強震計であり、土研は SMAC-B2 型が主であるが他に A 型、B 型、D 型、E 2 型、Q 型の強震計が使用されている。表-2 に SMAC 型強震計各型式の標準仕様を示す。

観測地点に関する各種データは港研については「港湾地域強震観測地点資料」、土研については「土木構造物の強震記録」に示されている。図-1 には港湾地域強震観測網を示す。地盤上に設置された強震計は同一形式の基礎の上に設置されている。港研の強震計の基礎の場合、割栗石の上に中空箱型のコンクリート基礎台がのった構造で、2, 3 の例を除き全ての各観測地点で統一されている。特に地盤の悪いところを除き杭は使用されていない。土研の場合もほぼ同様な基礎であるが、短い基礎杭が使用されている。さらに軟弱な地盤上ではかなり大きな基礎台と杭が使用されている。基礎は観測室と縁切りされている。

2.3 観測地点の地盤条件

港湾地域強震観測網の観測地点の土質柱状図および周

辺の地形図は前述の地点資料に報告されている。土木研究所関係の観測地点の土質資料に関しては十分なものが得られなかったため、この報告では土木研究所関係の観測地点の地盤条件に関する検討は実施しなかった。

港湾地域強震観測網の各観測地点の地盤条件の差によるグループ分けを表-3 に示す。これは、平均応答スペクトルの解析³⁴⁾の際に使用された地盤種別であり、かなり大まかなグループ分けであるが、以後この報告ではこのグループ分けによって検討を行なう。

2.4 解析対象記録

本報告では SMAC 型強震計により記録されたものを対象としている。港研では SMAC-B2 型強震計だけであるが、土研では各型式の SMAC 型強震計を使用している。表-4 に各型式別の観測地点数と今回対象とした記録本数を示す。ここで示すように D 型、E 2 型がそれぞれ 3 記録あるのみで、今回の報告で対象とした記録に関する限りほとんど全て SMAC-B2 型強震計による記録と考えてよい。

各地震で記録された強震記録のうち、この報告で用いたものは水平 2 成分の内どちらかの最大加速度が 10 gal 以上のもの 594 本である。各加速度レベル別の記録本数

強震記録の上下動成分の解析と重力式岸壁の安定

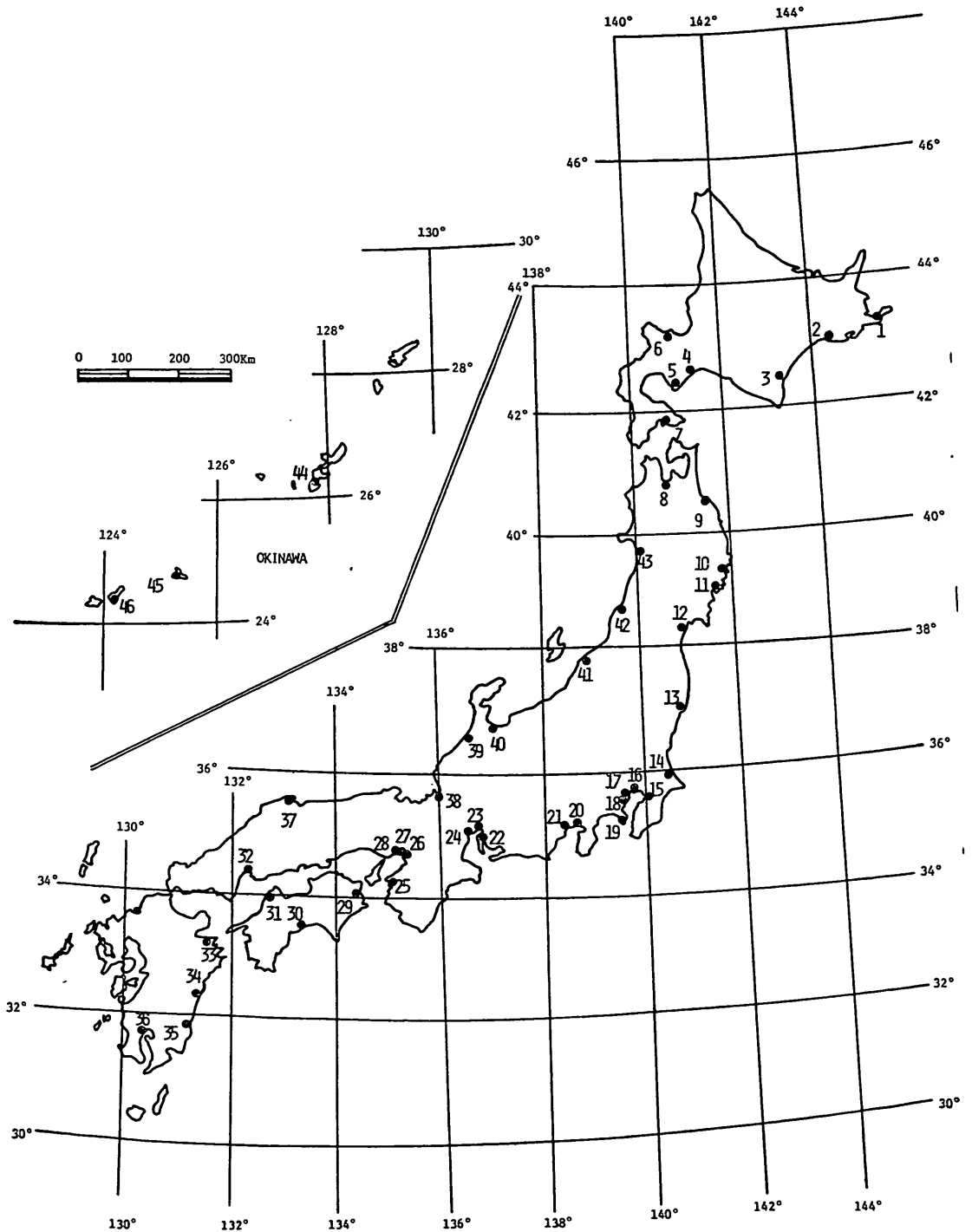


図-1 港湾地域強震観測網 (1975年12月現在)

表-3 地盤条件の差による観測地点のグループ分け

グループ	地盤条件	観測地点
A	岩盤及び非常に締ったN値50以上のレキ層、砂層からなる地盤	宮古-S, 鹿島-S, 釧路-S, 港研-S, 大船渡防地-S, 秋田-S
B	中程度に締った砂層およびシルト質、粘土質地盤、グループA, Cに属さない中間的地盤	室蘭-S, 八戸-S, 塩釜-S, 苫小牧-S, 塩釜工場-S, 小名浜-S, 千葉-S, 京浜事-S, 品川-S, 山下変-S, 田子の浦-S, 清水工場-S, 衣浦-S, 名古屋造函-S, 四日市事-S, 四日市千才-S, 神戸事-S, 広島-S, 高知-S, 細島-S, 金沢-S, 酒田-S, 和歌山事-S, 敦賀-S, 大船渡-S, 鹿島事-S, 興津-S
C	ゆるぎめでN値約5以下であり締固まっていない砂層から成る地盤	青森-S, 鹿児島-S

表-4 強震記録の強震計の型式別本数

	土 木 研 究 所							
	港湾技術研究所	B 2型	A型	B型	B 2型	D型	E 2型	Q型
記録数	294	0	0	274	3	3	0	
地点数	51	1	4	62	12	10	2	

表-5 強震記録の加速度別本数

	港湾技術研究所 (1963.3~ 1974.12)	土 木 研 究 所 (1968.1~ 1973.12)	合計
10gal~20gal	135	103	238
20gal~50gal	106	114	220
50 gal 以上	53	63	116
合 計	294	280	574

を表-5に示す。ここでいうところの各成分の最大加速度値とは、土研のデータについては「土木構造物の強震記録」に示されている数値である。港研の場合は、数字

化されている水平成分の記録については、数字化された加速度値の最大値を用いたが、10~20 galの記録及び記録の上下成分については「港湾地域強震観測年報」に示されている原記録にスケールを当てて読取った値を用いた。

港研の記録の場合には20 gal以上の記録は全て数字化されており、1971年以降は50 gal以上の記録については上下成分の記録も数字化されている。この上下成分が数字化されている記録は特に詳しく検討をおこなっているためこれらの記録を表-6に示す。記録番号の先頭のSはSMAC型強震計による記録であることを示し、数値は記録の港研への到着順に付けた番号である。

2.5 記録の数字化

この報告で対象とした港湾地域強震観測網の数字化された強震記録は、概略次のような手順で数字化されている。

- i) 原記録からマイラーベースの印画紙上に密着複製を作る。
- ii) 密着複製を強震記録読取装置にセットし、0.1mmごとに読み取る。結果は、紙テープに出力される。
- iii) 紙テープを電子計算機に読み込み、磁気テープに記録する。
- iv) 磁気テープに書き込んだデータをカーブプロッターで図化し、原記録と比較して、読取上の欠陥がないか、ゼロ線の挿入が適切であるかを検討する。
- v) 前ステップで修正が必要と認められたら、電子計算機内の数値を修正する。
- vi) SMAC-B 2型強震計の記録は円弧書きである。強震記録読取装置は直交座標系で動作する。したがって、数値化された結果は円弧誤差を含んでいるので、時間軸に対して補正を行なう。この結果、数値化された記録は不等時間々隔に対する数値となっている。
- vii) 直線補間により0.01秒刻みの等時間々隔に対する記録に変換する。
- viii) 結果は磁気テープ及びカードで保存する。
- ix) リストをとる。このリストが「港湾地域強震観測年報」に数値化記録として収録されているものである。

3. 地震の上下動成分の検討

3.1 上下最大加速度と水平最大加速度の比

表-5に示したように今回対象とした強震記録は574本であるが、これらの記録について水平成分の最大加速度

強震記録の上下動成分の解析と重力式岸壁の安定

表-6 強震記録（上下成分が数字化されているもの）

強 震 記 録						地 震 資 料				
観 測 地 点	記録番号	最大加速度 (gal)			震央距離 (km)	発 震 年 月 日 (年月日時分)	北 緯 (度)	東 経 (度)	深さ (km)	マ グ ニ チ ュ ー ド
		N-S	E-W	U-D						
釧 路-S	S-634	68.0	64.7	21.3	183	1971. 8. 2.16.25	41.5	143.4	60	7.0
	S-674	94.1	66.3	25.0	74	1972. 5.11. 9.45	42.5	145.0	40	5.8
	S-733	166.0	120.0	56.3	132	1973. 6.17.12.55	42.9	146.0	40	7.4
	S-741	56.9	49.8	15.0	173	1973. 6.24.11.43	42.9	146.5	30	7.1
	S-804	13.8	13.8	6.3	146	1974. 1.25. 4.13	41.7	144.0	40	6.0
苫小牧-S	S-877	62.3	53.2	12.5	15	1974.11. 9.16.23	42.6	141.8	120	6.5
青 森-S	S-235	207.7	179.9	131.0	243	1968. 5.16. 9.49	40.7	143.7	20	7.9
	S-670	49.6	56.5	21.3	85	1972. 3.20. 0.58	41.0	141.8	40	6.4
八 戸-S	S-252	232.7	180.6	88.0	188	1968. 5.16. 9.49	40.7	143.7	20	7.9
	S-669	54.3	44.8	23.8	57	1972. 3.20. 0.58	41.0	141.8	40	6.4
	S-857	61.2	49.1	17.5	53	1974. 9. 4.18.20	40.1	141.7	20	5.6
大船渡防地-S	S-786	36.8	60.7	25.0	46	1973.11.19.22. 2	38.8	142.2	20	6.4
塩釜工場-S	S-782	46.1	55.6	27.5	111	1973.11.19.22. 2	38.8	142.0	20	6.4
鹿 島-S	S-612	41.2	54.1	20	42	1971. 6.13.13. 6	36.2	141.0	40	5.3
	S-647	34.3	127.4	12.5	17	1971.10.11.19.16	35.9	140.5	40	5.2
鹿島事-S	S-770	28.8	70.0	10.0	26	1973. 9.30.15.18	35.7	140.7	40	5.9
	S-813	35.8	98.1	11.3	38	1974. 3. 3.13.50	35.6	140.8	40	6.1
	S-845	48.8	31.6	13.8	82	1974. 7. 8.14.45	36.4	141.4	20	6.3
	S-882	67.6	75.2	20.0	47	1974.11.16. 8.32	35.8	141.2	40	6.1
京浜山下変-S	S-658	53.1	46.9	12.5	282	1972. 2.29.18.23	33.3	141.3	40	7.0
衣 浦-S	S-585	81.3	76.0	22.5	59	1971. 1. 5. 6. 9	34.4	137.2	40	6.1
名古屋造函-S	S-578	45.5	53.3	15.6	82	1971. 1. 5. 6. 9	34.4	137.2	40	6.1
四日市千才-S	S-577	86.0	79.5	32.5	80	1971. 1. 5. 6. 9	34.4	137.2	40	6.1
和歌山事-S	S-788	55.3	55.3	23.8	42	1973.11.25.18.19	33.9	135.4	40	5.8
秋 田-S	S-655	21.4	72.9	5.0	14	1972. 2.17. 7. 5	39.8	140.0	20	4.0

のうち大きいものと、上下成分の最大加速度をプロットしたのが 図-2 である。図中で横軸は水平最大加速度となっているが、これは水平 2 成分のうち大きいものを示している。以後この報告では、水平 2 成分のうち大きいものを水平最大加速度と呼ぶ。また、同図には上下最大加速度と水平最大加速度の比を示す直線も同時に示してある。この上下最大加速度と水平最大加速度の比を上下水平最大加速度比と定義する。この上下水平最大加速度比の度数分布図を 図-3 に示す。この図には水平最大加速度のある箇所ごと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 以上の特に大きな値を示す記録は 3 本である。その内訳は、上下水平最大加速度比が 1.3 の記録が 1 本、1.60 の記録が 1 本、1.67 の記録が 1 本となっている。

上下水平最大加速度比が 1 以上の記録は全部で 9 本あり、このうち特に興味があるのは上下最大加速度が 405 gal という強震記録である。これは 1968 年(昭和 43 年) 3 月 30 日和歌山市付近で発生した局発地震の際に、和歌山港に設置した強震計(観測地点名:和歌山事-S)で記録したものである¹⁹⁾。水平 2 成分の最大加速度は N-S:

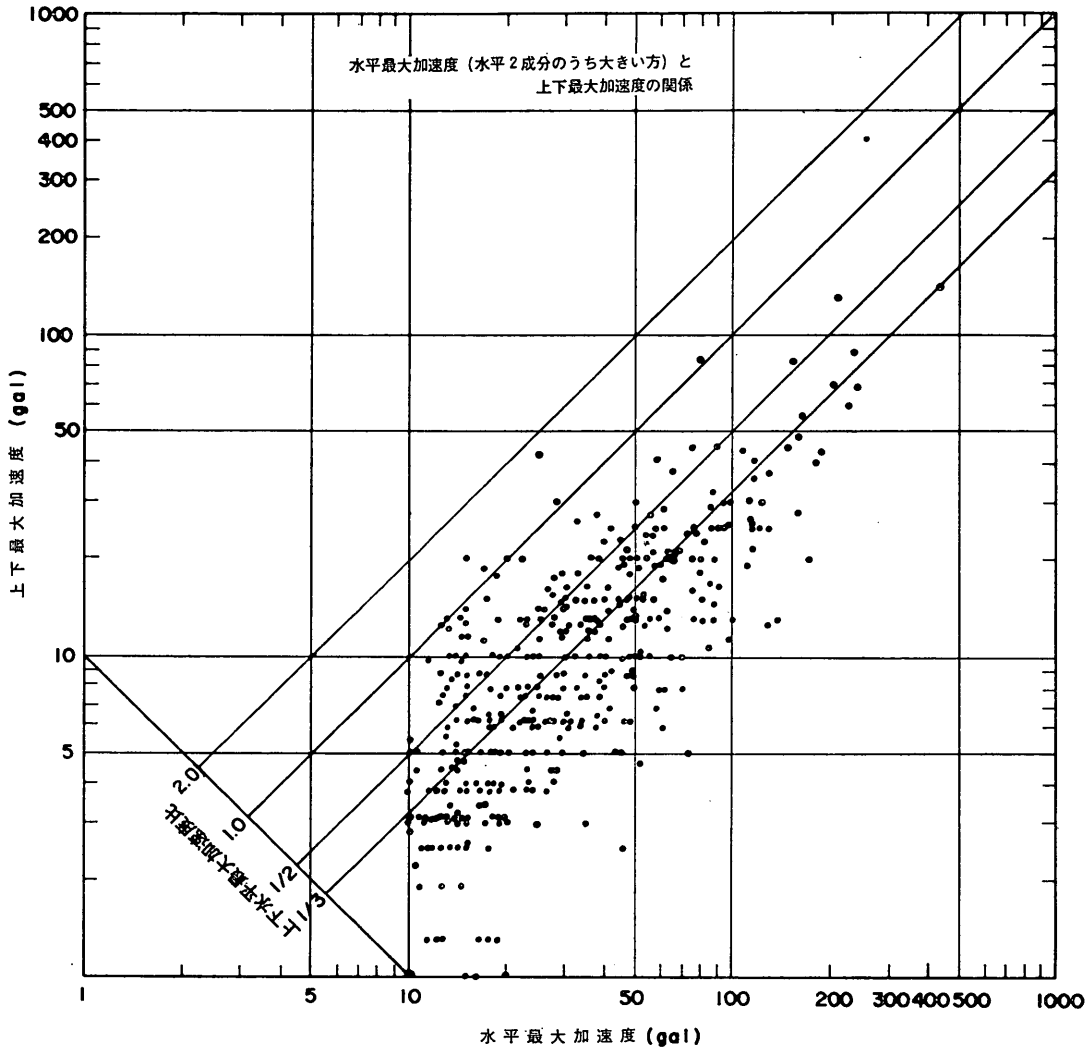


図-2 水平最大加速度と上下最大加速度

173 gal, E-W: 253 gal であり, 上下水平最大加速度比は $405/253=1.60$ となる。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 $1/2$ 以下である。

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, これをここでは水平合成加速度と呼ぶ。水平合成最大加速度は, 水平最大加速度より大きく最大 $\sqrt{2}$ 倍であるが, 参考のため今回対象としたデジタル化されている港研の記録について水平合成最大加速度と水平最大加速度をプロットしたのが, 図-4 である。3 本の直線はそれぞれ水平合成最大加速度と水平最大加速度

の比が, $\sqrt{2}:1$, $(\sqrt{2}+1)/2:1$, $1:1$ の直線である。今回の報告は水平最大加速度を用いて検討をおこなっているが, これは水平最大加速度は記録からすぐ読み取れるということ, 過去において整理解析されている強震記録が水平 2 成分の最大加速度によっているという理由からである。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は, 上下水平最大加速度比は本報告で求めた値より小さくなる方向にある。

3.2 上下水平最大加速度比に影響する要因

図-2 に示したように上下水平最大加速度比の値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

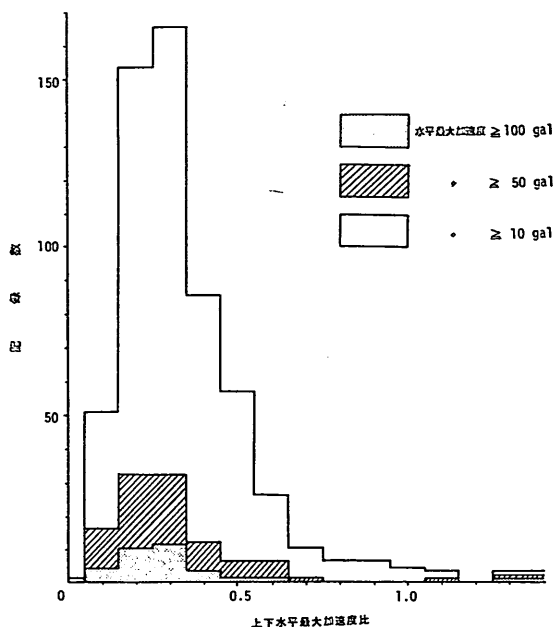


図-3 上下水平最大加速度比の度数分布図

が、この比に影響を及ぼす要因の存在が推定できれば、地震動の特性を明らかにできると同時に、合理的な耐震設計を行なうための基礎資料としての地震入力の問題が明確なものとなる。この報告では、まず影響する要因がどのようなもので、どのように影響しているかを明確にすることを主眼において検討をおこなっている。要因の影響を正確に評価するには、数理統計的な手法によって定量的な判断ができることが望ましい。この点については、本報告にはまとめることが出来なかったが、引き続き検討すべき問題であると考えている。

以下に上下水平最大加速度比に影響を与える要因として検討項目にとりあげた事項を列記する。

- i) 水平最大加速度
- ii) 震央距離
- iii) マグニチュード
- iv) 地盤条件
- v) 発震機構

これらに関して順次検討する。

1) 水平最大加速度

3.1の図-2において水平最大加速度と上下最大加速度の関係を示した。この図には、上下水平最大加速度比を示す直線も同時に示されている。この図から、水平最大加速度の大小によって上下水平最大加速度比がどのように変化するかがわかる。図によると水平最大加速度が50gal以下の場合には上下水平最大加速度比が0.5以上の記録がかなりあるが、水平最大加速度が50gal以上になると上下水平最大加速度比が0.5以上となる記録がかなり少なくなっている。このように、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以下となることがわかる。

2) 震央距離

この報告で対象とした強震記録574本について、それぞれの震央距離を計算し、それと上下水平最大加速度比の関係プロットしたのが、図-5である。この図によれば、震央距離が5kmの付近に上下水平最大加速度比が1.0以上の記録があるのと、震央距離50km以上で上下水平最大加速度比が0.5以上の記録がかなりあるのが認められる。前述したように水平最大加速度が大きくなると上下水平最大加速度比が0.5以下なることを考慮して、水平最大加速度が50gal以上の記録についてプロットしなおしたのが図-6である。この図によれば、ほぼ震央距離に関係なく、上下水平最大加速度比はばらつきについている。ただし、震央距離が極端に小さいところで

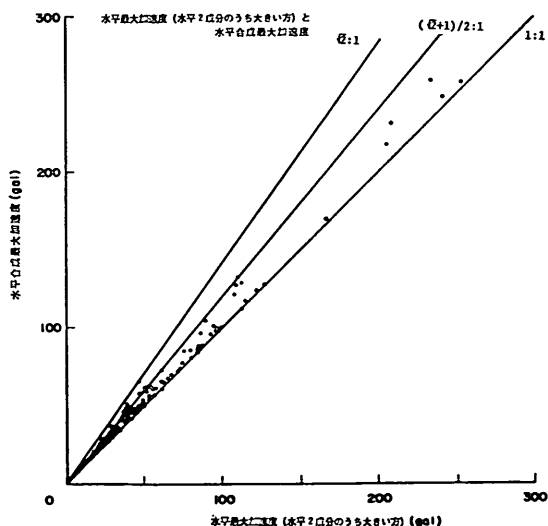


図-4 水平最大加速度と水平合成最大加速度

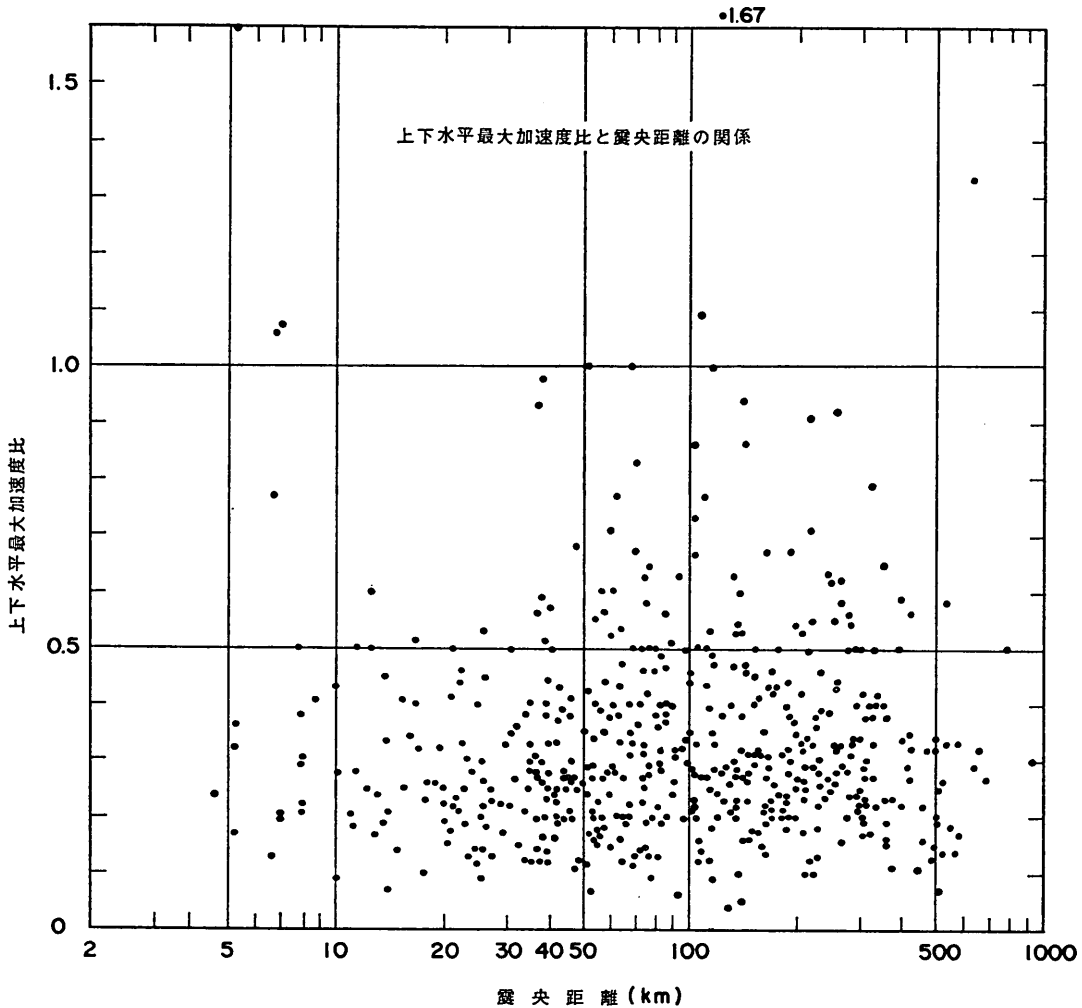


図-5 上下水平最大加速度比と震央距離の関係

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に注目すべきことである。

3) マグニチュード

水平最大加速度が50 gal以上の記録116本について、その記録の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図示したのが図-7である。この図によれば、上下水平最大加速度比に対してマグニチュードがどのように影響を与えるのか、とくに明瞭な傾向は認められない。

4) 地盤条件

ここで検討するのは港湾地域強震観測で収集された記

録についてだけである。土木研究所による記録については、各観測地点の地盤条件に関するデータが十分収集できなかったので検討を行なわなかった。港湾地域強震観測網の各観測地点は、2.3に示した表-3のように地盤条件の差によりグループ分けされている。これにしたがい、各グループごとに水平最大加速度と上下最大加速度の関係を図-8~10に示し、また、上下水平最大加速度比と震央距離の関係を図-11~13に示す。

水平最大加速度と上下最大加速度について、図-8には地盤条件のAグループのものを、図-9にはBグループ、図-10にはCグループのものを示したが、Cグループの記録では他の2つのグループと比較して、上下水平最

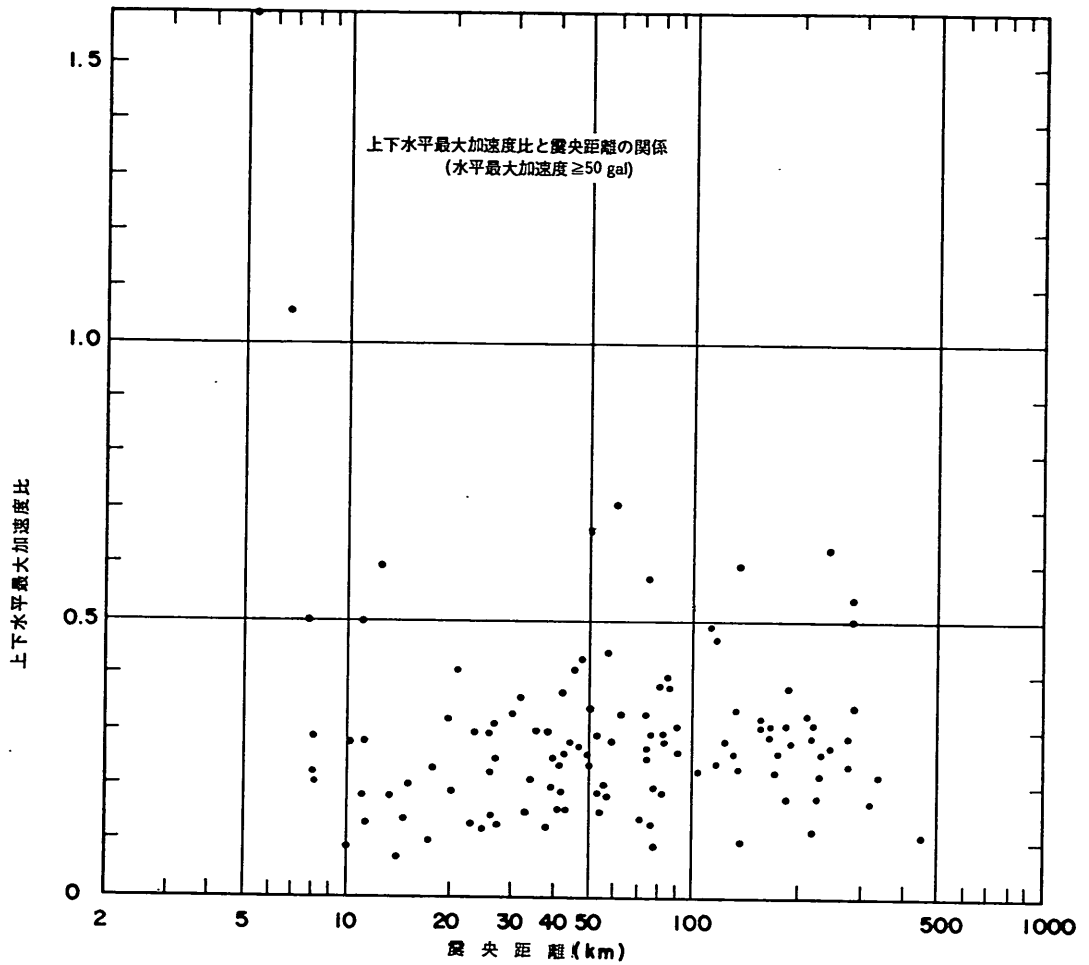


図-6 上下水平最大加速度比と震央距離の関係 (水平最大加速度 ≥ 50 gal)

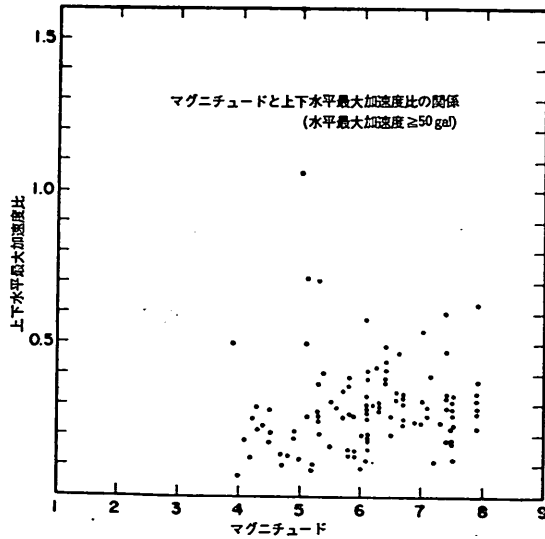


図-7 上下水平加速度比とマグニチュードの関係

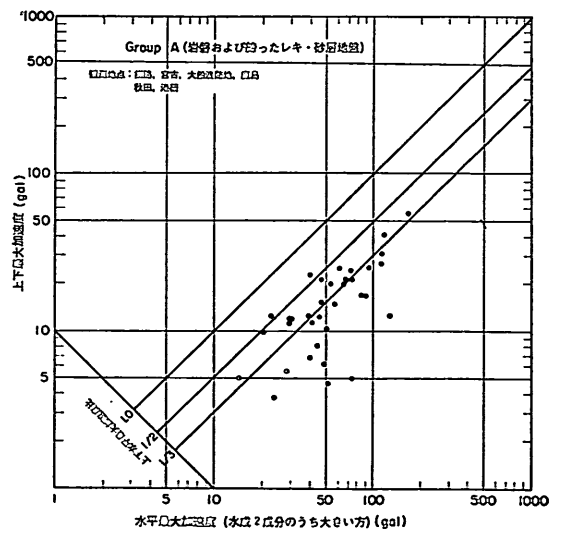


図-8 水平最大加速度と上下最大加速度 (Aグループ)

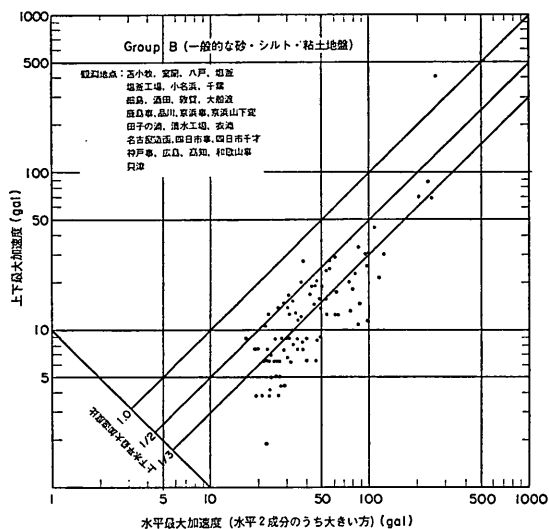


図-9 水平最大加速度と上下最大加速度 (Bグループ)

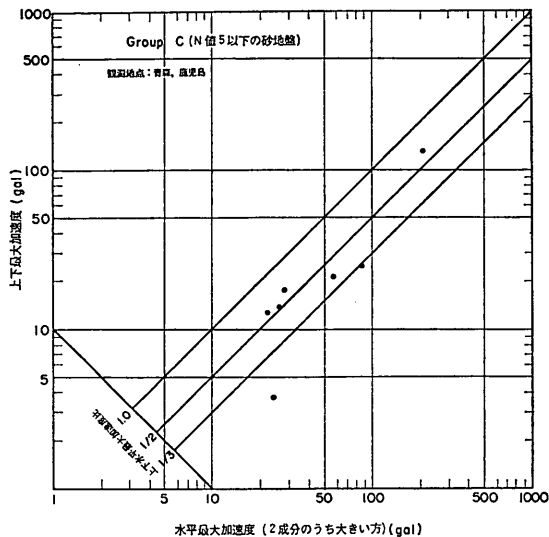


図-10 水平最大加速度と上下最大加速度 (Cグループ)

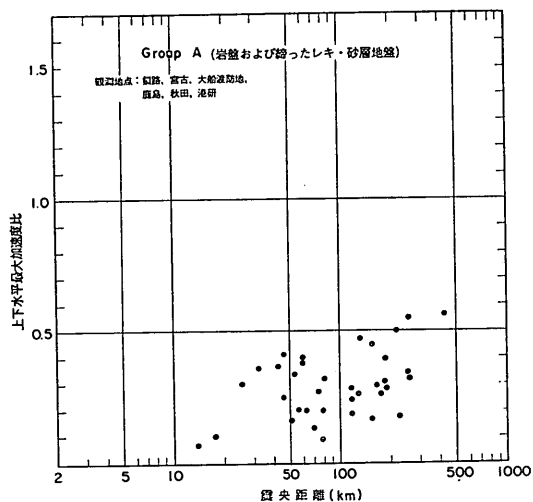


図-11 上下水平最大加速度比と震央距離の関係(Aグループ)

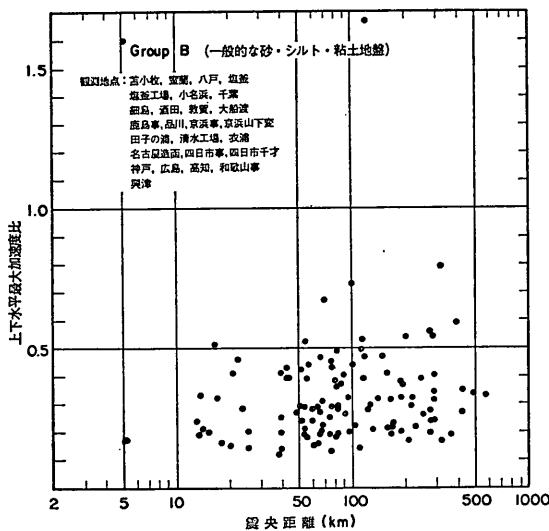


図-12 上下水平最大加速度比と震央距離の関係(Bグループ)

大加速度比が若干大きいと思われる。上下水平最大加速度比と震央距離の関係についても、震央距離の小さいところの記録がないので不十分ではあるが、とくに地盤条件の差は認められないと言えよう。

5) 発震機構

港湾地域強震観測網の観測地点和歌山事-Sの記録のなかには上下水平最大加速度比の大きいものがあり、また土木研究所関係の観測地点の紀の川大橋(地点 No.

112)で観測された強震記録についても上下水平最大加速度比が大きいものが目立つ。この両観測地点は直線距離にして約1.4kmしか離れておらず、同一地震についての記録もいくつか含まれている。それで、この両観測地点で得られた記録について、上下水平最大加速度比と震央距離の関係を示したのが図-14である。和歌山事-Sの記録については黒丸点で、紀の川大橋の記録については×印で示してある。プロットされている印の横の数字

強震記録の上下動成分の解析と重力式岸壁の安定

は、和歌山事-Sについては1から、紀の川大橋については11から、地震の発生順につけたものである。ただし両観測地点で同じ地震についての記録の場合は、同じ数字が付けてある。同じ日に発生した他の地震については数字にダッシュをつけて区別してある。

この図によると、震央距離が5.2 km の記録の上下水平最大加速度比は地震によりかなり異なった値を示しているのがわかる。これらの記録のマグニチュードは3.6

～5.0である。一方、和歌山事-Sと紀の川大橋で同じ地震について観測された記録についてみると、地震番号5については、上下水平最大加速度比は両地点とも1.0以上、地震番号9については、両地点とも上下水平最大加速度比は0.5以下である。これらのことを考慮すると、上下水平最大加速度比はマグニチュードが5程度の地震についていえば、地震の発生のしかた、すなわち発震機構に影響をうけるものと思われる。つまり、これは地震が断層によって発生するという立場にたてば、断層の動き方が上下水平最大加速度比に大きな影響を与えるということであろう。

和歌山事-Sの他に港湾地域強震観測網の他の観測地点、釧路-Sについて得られた記録の上下水平最大加速度比と震央距離の関係を示したのが図-15である。この場合とくに大きな上下水平最大加速度比の値はないが、地震の違いにより上下水平最大加速度比は0.26～0.56の間に分布している。

大地震について各観測地点で得られた記録の上下水平最大加速度比がどうなっているのかを示したのが、図-16である。対象としたのは1968年十勝沖地震で水平最大加速度が20 gal 以上の記録についてプロットしてある。港研のデータについては地盤条件により区別して示してあるが、土研のデータについては地盤条件については考慮していない。この図をみると各記録のバラツキが大きく、大地震になってくると、震源域が大きくなり同

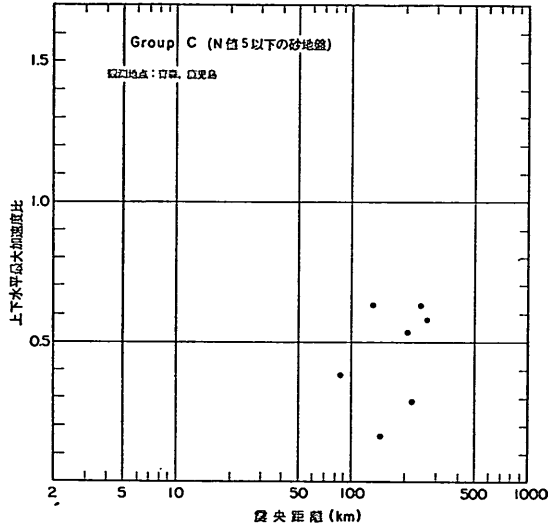


図-13 上下水平最大加速度比と震央距離の関係 (Cグループ)

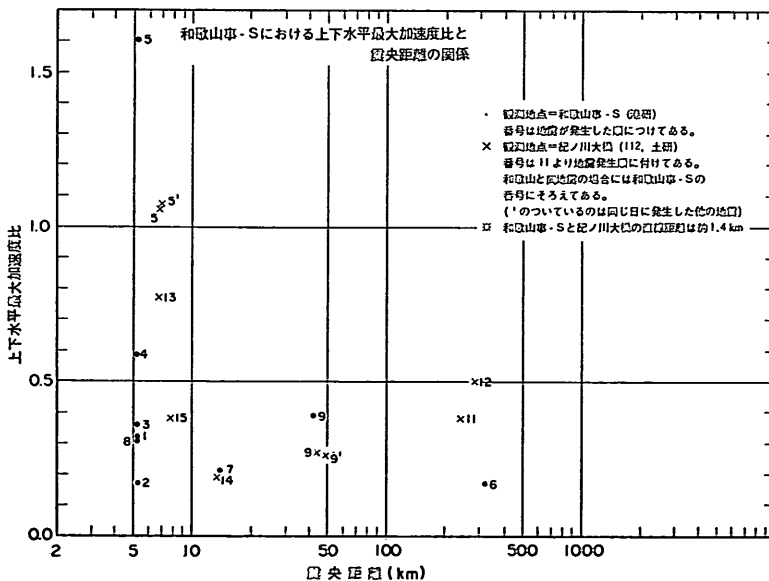


図-14 和歌山事-Sにおける上下水平最大加速度比と震央距離の関係

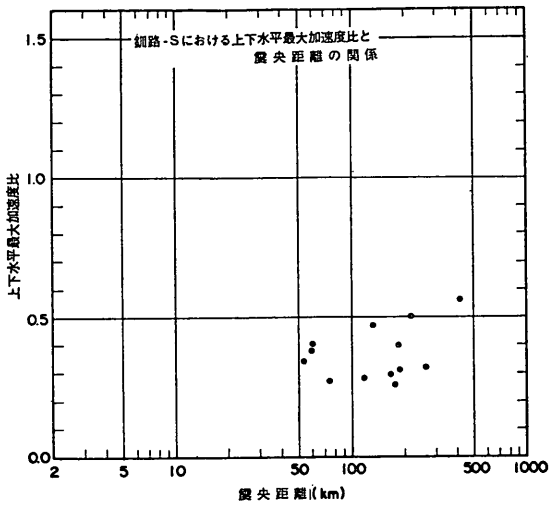


図-15 釧路-Sにおける上下水平最大加速度比と震央距離の関係

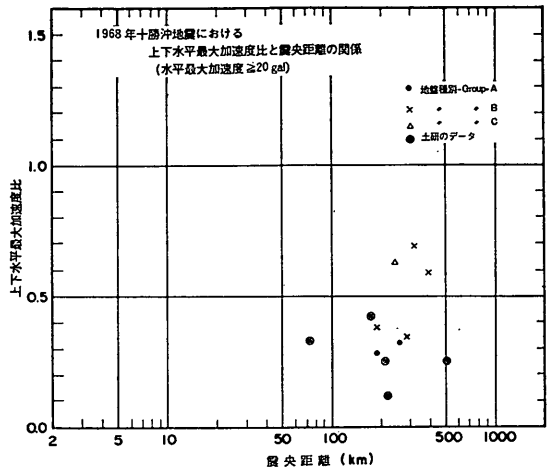


図-16 1968年十勝沖地震における上下水平最大加速度比と震央距離の関係

一地震だとしても必ずしも各観測地点での記録の上下水平最大加速度比が等しくはならない。

3.3 上下最大加速度と水平最大加速度の位相差

各強震記録についてみると水平最大加速度と上下最大加速度が同一時刻に発生していることはほとんどないようである。それにもかかわらず、水平最大加速度と上下最大加速度の関係について議論をすることは、両者が同時に発生するとみなすことであり、もっとも危険な状態について検討していることになる。この事は構造物を設計するという立場からいえば、安全サイドとなる。しかし、実際の強震記録での上下最大加速度と水平最大加速度が時間的にずれているか否かということを明確にしておくことは、さらに合理的な耐震設計を実施するために必要な事項の1つである。ここでは、以下上下最大加速度と水平最大加速度の発生位相差を考慮して、地震時に構造物がもっとも不安定な状態となる時刻における水平加速度と上下加速度の比率がどの程度になるのかを検討する。いうまでもなく、上下最大加速度と水平最大加速度が同一時刻に発生した場合が構造物に対してもっとも危険な場合であるが、上下最大加速度と水平最大加速度がずれて発生している場合には、いかなる状態が構造物にもっとも危険であるのかが問題となる。ここでは単純化して剛体が平面上にある場合を想定する。

震度法によれば地震時に質量 m の物体に働く地震力は水平に $k_h mg$ 、鉛直に $k_v mg$ で表わされる。ここで、 k_h は水平震度、 k_v は鉛直震度である。ここでいうところの震度は工学的震度で気象庁震度階の震度とは異なる。この

物体にはこのほかに重力が作用し、重力と地震力の合力の大きさと方向は

$$R = mg \sqrt{(1 \pm k_v)^2 + k_h^2} \quad (1)$$

$$K = \tan \theta = \frac{k_h}{1 \pm k_v} \quad (2)$$

ここで、 R : 物体に働く合力

m : 物体の質量

g : 重力の加速度

k_v : 鉛直震度

k_h : 水平震度

K : 合震度

θ : 合力と重力の作用方向のなす角度

となる。 K の値が大きいほど物体は平時の重力の方向から余計に傾いた方向に引かれることになり、剛体のすわりは悪く不安定となる。この意味で K を合震度という。水平震度、鉛直震度に重力の加速度 g をかけた数値は加速度の次元をもつ。強震記録の水平成分、上下成分を重力の加速度 g で割ったものはそれぞれここでいうところの水平震度、鉛直震度となるから、各強震記録の時々刻々の合震度が計算できる。表-6で示した強震記録のデジタルデータについて、まず、水平2成分より水平合成加速度を計算し、これと上下加速度を重力の加速度 g で割り、両者の値より時々刻々の合震度を計算した。合震度が最大のとき滑動と転倒に対して構造物がもっとも危険な状況であるから、この合震度が最大となる時刻における水平合成加速度と上下加速度の値をプロットしたのが、図-17である。合震度はほぼ水平加速度が最大とな

強震記録の上下動成分の解析と重力式岸壁の安定

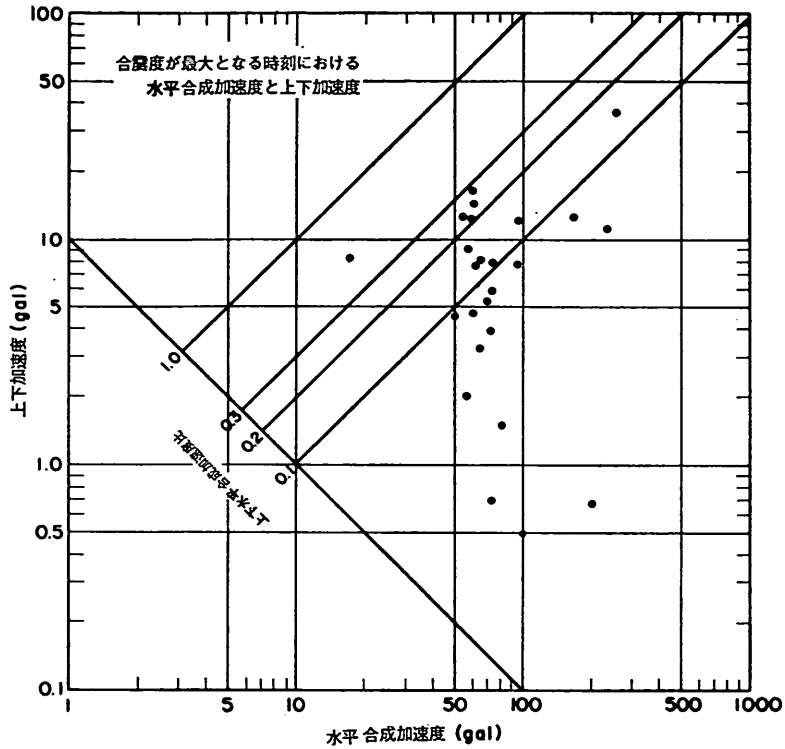


図-17 合震度が最大となる時刻における水平合成加速度と上下加速度

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事を考慮すると、合震度が最大となる時刻では上下加速度と水平合成加速度の比はほぼ 1/3 以下となる。

3.4 上下動のフーリエスペクトルと応答スペクトル

1) フーリエスペクトル

地震動の上下成分の最大加速度に関する検討の他に、上下成分の周波数特性がどうなっているのかを知る事も構造物の耐震設計において重要である。ここでは、地震動の上下成分の周波数特性で特徴的なものがあるのかどうか、水平成分と上下成分との周波数特性の間に相違するものがあるか否か等について検討する。この報告では地震動の各成分の周波数特性を検討するに当たり、フーリエスペクトルを採用した。対象とした記録は表-6に示した25本の強震記録で、成分数にして75である。表-6には震央距離も同時に示してある。この表によると震央距離がもっとも小さい記録で14kmで、これら25本の記録については震央のごく近傍で得られた記録は含まれていない。したがって以下の議論は震央のごく近傍での地震動については考慮されていない点に注意を要する。フ

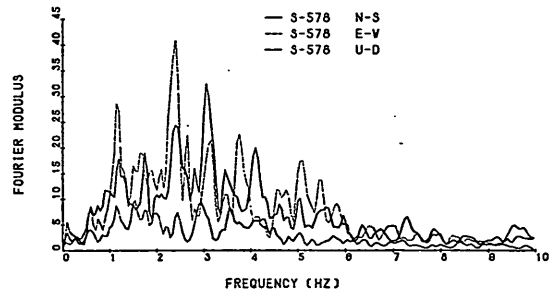


図-18 各成分のフーリエスペクトル (S-578)

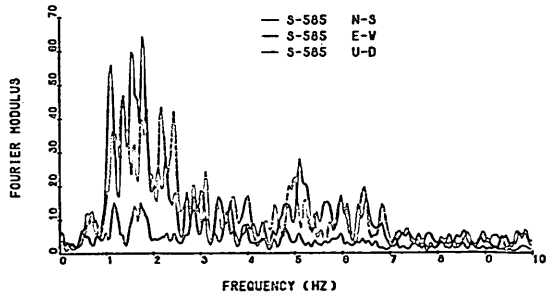


図-19 各成分のフーリエスペクトル (S-585)

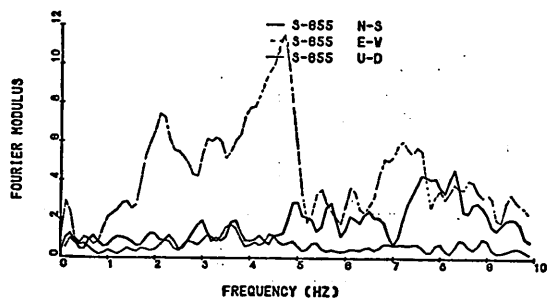


図-20 各成分のフーリエスペクトル (S-655)

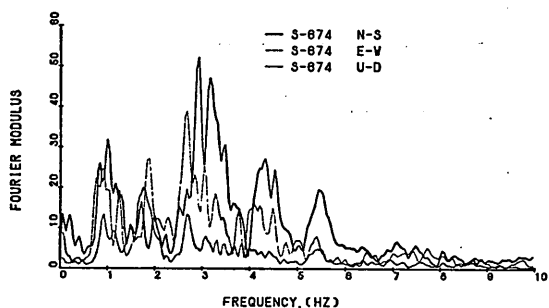


図-21 各成分のフーリエスペクトル (S-674)

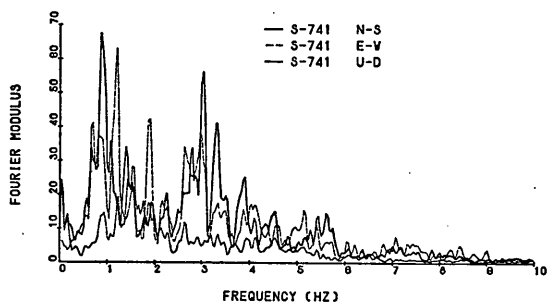


図-22 各成分のフーリエスペクトル (S-741)

フーリエスペクトルの計算に当っては、水平2成分と上下成分の1つの組合せで、フーリエスペクトルを計算しようとする記録の各成分の計算区間を統一し、しかも各成分の最大加速度がそのなかに含まれるようにした。こうして決めた記録の区間は20~30秒間である。強震記録は0.01秒間隔でデジタル化されているからデータ数は2,000~3,000となる。なお以下に示すフーリエスペクトルはHanningのスペクトル・ウィンドウによって平滑化をおこなった。

ここでは計算結果の全てを図示しないが、結果よりわ

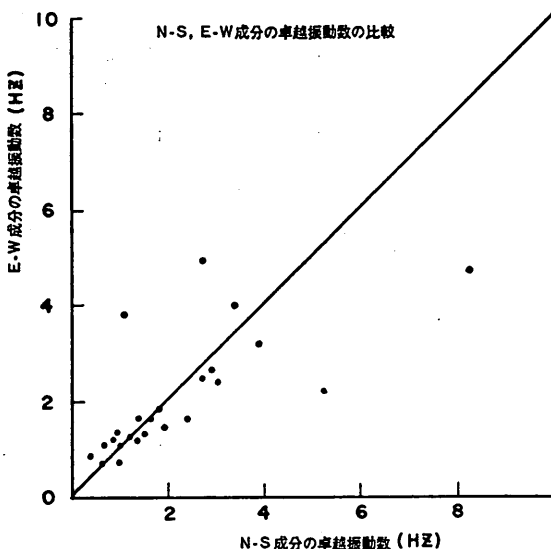


図-23 水平2成分の卓越振動数の比較

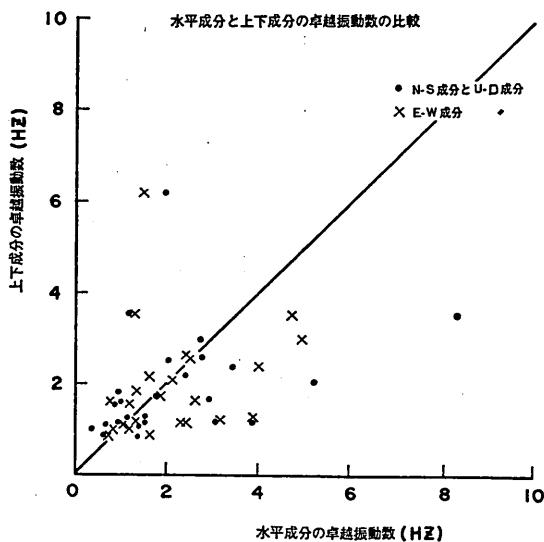


図-24 水平2成分と上下成分の卓越振動数の比較

かることは、上下成分のフーリエスペクトルは水平成分のそれと比較してとくに短周期成分が卓越しているとは言えず、上下成分、水平2成分の周波数特性の大まかな傾向はほぼ一致していることがあげられる。その例として図-18, 19にS-578, S-585の各成分のフーリエスペクトルを示す。ただし、25本の記録の強震記録のうち5本の記録については水平成分と上下成分のフーリエスペクトルを比較して、上下成分の方が相対的に短周期成分の割合が多いのが認められた。S-655, S-674, S-741の各記録については、水平成分と上下成分のフーリエスペ

強震記録の上下動成分の解析と重力式岸壁の安定

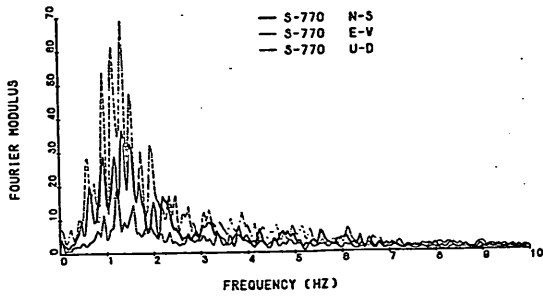


図-25 各成分のフーリエスペクトル (S-770)

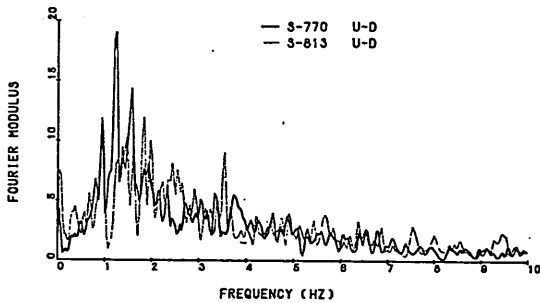


図-26 同一観測点での上下成分のフーリエスペクトルの比較

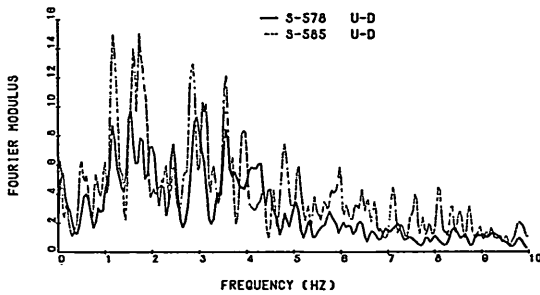


図-27 同一地震での上下成分のフーリエスペクトルの比較

クトルは多少異なっており、図-20~22にそれらを示す。さらに詳細にみるために、次にフーリエスペクトルで一番高いピークを示す振動数(卓越振動数)をとりだし、強震記録の各成分ごとに比較してみた。図-23には地震動のN-S成分とE-W成分の卓越振動数の比較を示す。かなり異なっているものもあるが、ほぼ1:1の直線付近に分布している。図-24には地震動のN-S成分とU-D成分、E-W成分とU-D成分の卓越振動数の比較をそれぞれ区別して示す。図-24によればかなり異なっているものもあるが、やはり1:1の直線付近にばら

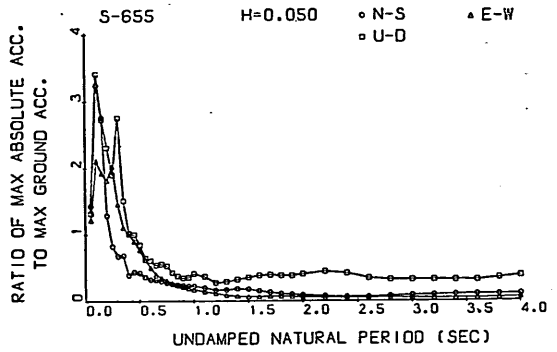


図-28 加速度比応答スペクトル (S-655)

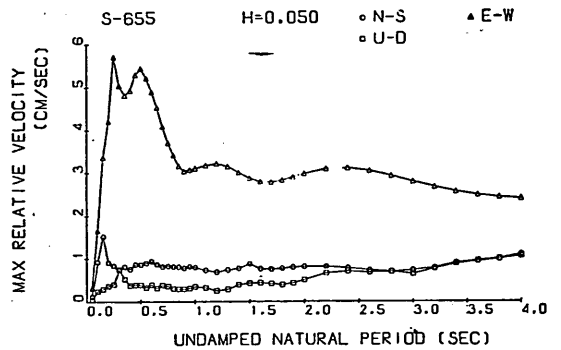


図-29 速度応答スペクトル (S-655)

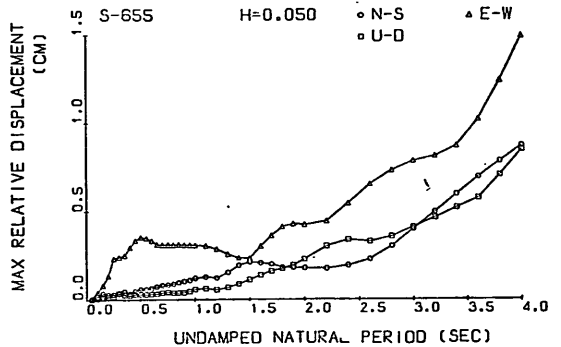


図-30 変位応答スペクトル (S-655)

ついているといえそうである。ただし、N-S成分とE-W成分を比較して示した図-23よりばらつきが大きいのがわかる。ほぼ同一の卓越振動数を示す例として、S-770の記録のフーリエスペクトルを図-25に示す。異なっているものなかのS-741の記録については、すでに図-22で示した。

同一観測地点で観測された2個の強震記録の上下成分のフーリエスペクトルを図-26に示す。この図で示された記録の観測地点は、鹿島事-Sである。傾向としてはほぼ同様なスペクトルを示している。図-27には1971年1

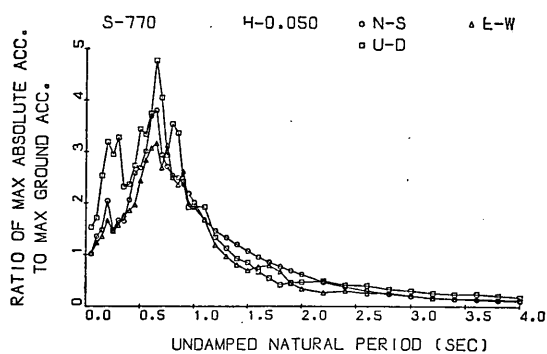


図-31 加速度比応答スペクトル (S-770)

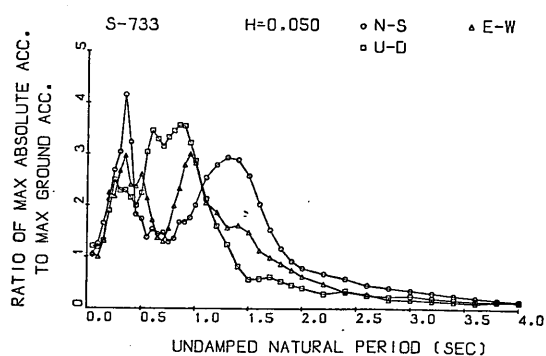


図-34 加速度比応答スペクトル (S-733)

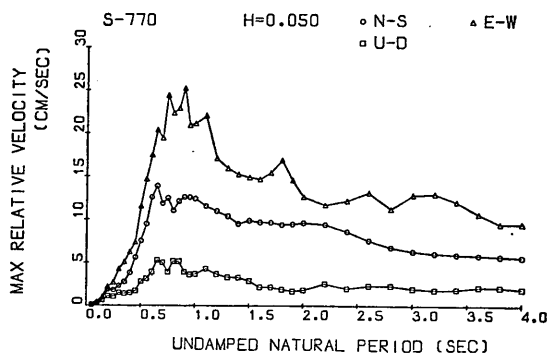


図-32 速度応答スペクトル (S-770)

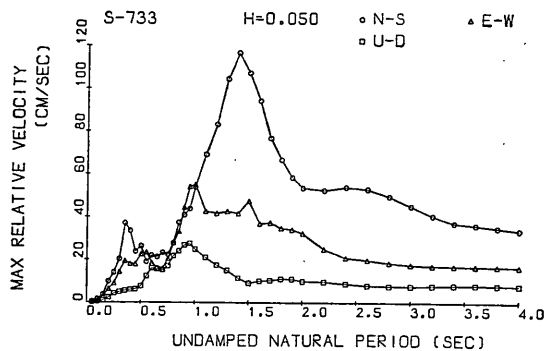


図-35 速度応答スペクトル (S-733)

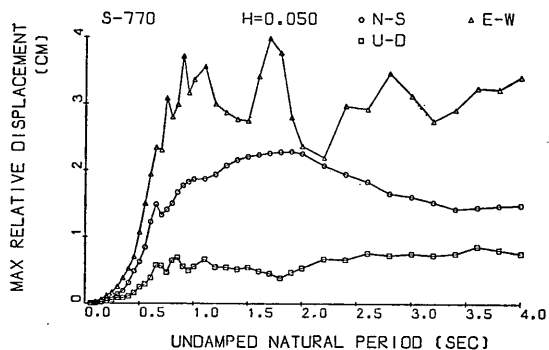


図-33 変位応答スペクトル (S-770)

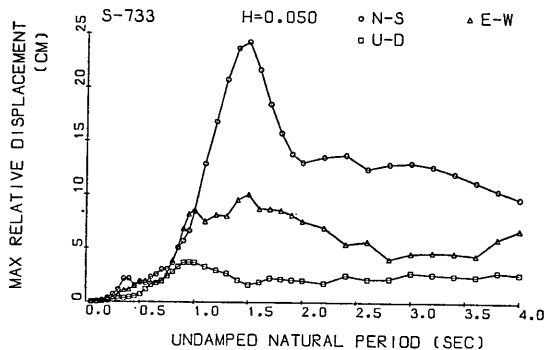


図-36 変位応答スペクトル (S-733)

月5日の地震で名古屋造函-Sと衣浦-Sで観測された強震記録の上下成分のフーリエスペクトルを示す。以上のほかに、地盤条件による差、地震による差等について検討を実施したが、とくに明確に指摘できるような点は認められなかった。

2) 応答スペクトル

地震時における構造物の応答特性を正確に把握するためには、地震動の水平成分と上下成分を同時に入力して動的解析を実施することが、もっとも望ましいが、現在ではそこまで行なうことは相当難かしい。それ故ここで

は、まず応答スペクトルを各成分について計算し、それらを比較検討してみた。港湾地域強震観測年報には、50 gal以上の記録について応答スペクトルが水平2成分に対して示されている。応答スペクトルの計算その他については、この年報にくわしく述べられているので参照されたい。応答スペクトルの値としては、相対変位、相対速度、絶対加速度があり、この報告でもこの3つの値について検討をおこなっている。ただし、絶対加速度の応答スペクトルについては、最大応答加速度と最大地動加速度との比を縦軸にとり、無次元化した加速度比応答ス

強震記録の上下動成分の解析と重力式岸壁の安定

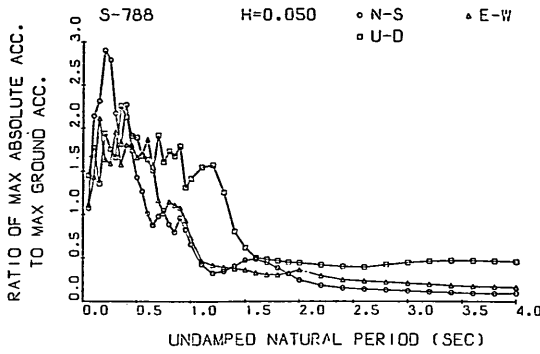


図-37 加速度比応答スペクトル (S-788)

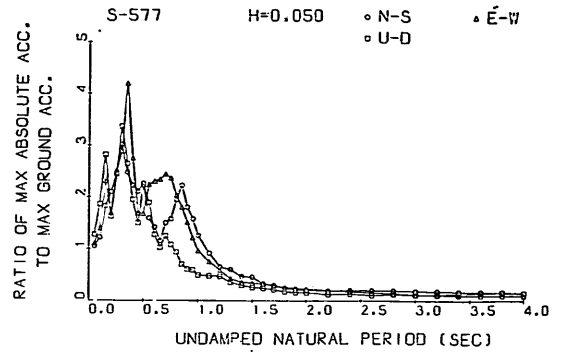


図-40 加速度比応答スペクトル (S-577)

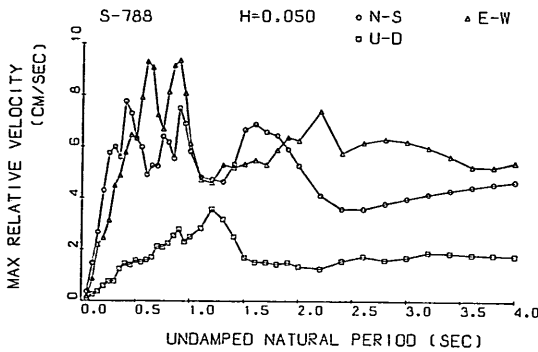


図-38 速度応答スペクトル (S-788)

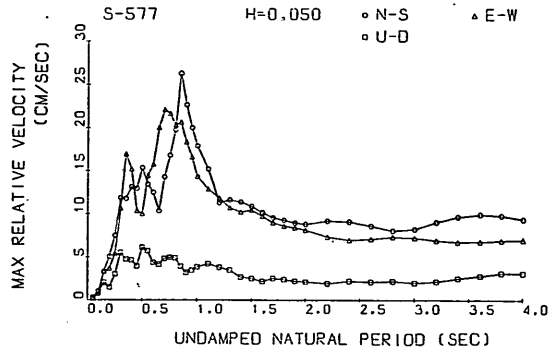


図-41 速度応答スペクトル (S-577)

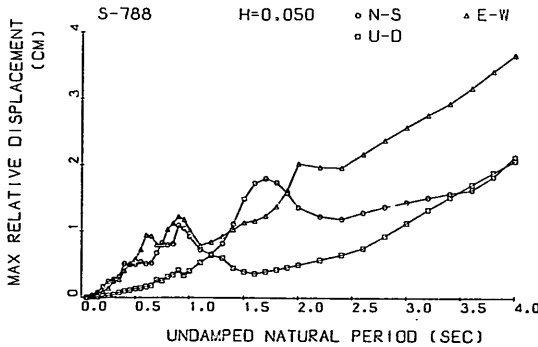


図-39 変位応答スペクトル (S-788)

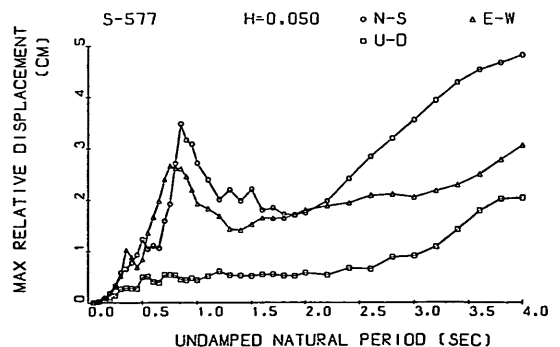


図-42 変位応答スペクトル (S-577)

ベクトルを用いた。応答スペクトルの計算は、数字化されている記録の全データについて行い、減衰定数は0.05と0.10とした。これらの減衰定数は港湾地域強震観測年報で示されている応答スペクトルのそれと同じ値である。

計算結果によれば、S-577, S-578, S-655, S-770の記録については上下成分、水平成分の応答スペクトルの形はほぼ一致しており、S-633, S-674, S-733, S-741, S-788, S-882の記録については、水平成分と上下成分の応答スペクトルの形は一致したものとはならなかった。その他の14本の記録については水平成分と上下成分

の応答スペクトルはほぼ同じ傾向を示していた。図-28～33にS-655とS-770の強震記録の各成分の応答スペクトルを示す。この図の場合の減衰定数は0.05である。図-28～33は各成分の応答スペクトルが類似している例だが、図-34～39には各成分が異なった応答スペクトルを示している例である。図-40～42には変位応答スペクトルについてのみ各成分で異なっている例としてS-577の場合を示す。

本報告で検討した記録数は25で記録数としてはまだ不十分であるので、ここでは、各成分の全体的傾向の比較

表-7 1968年3月30日 和歌山市付近の地震

発震年月日: 1968年3月30日 4時4分					
震央の位置: 北緯 34.2°					
東緯 135.1°					
深 さ: 0 km					
マグニチュード: 5.0					
観測地点	記録番号	最大加速度 (gal)			震央距離 (km)
		N-S	E-W	U-D	
和歌山事-S	S-265	172.5	252.6	405	5.2
高知-S	S-210	3.1	3.1	1.6	160.0
紀ノ川大橋 (112)	112-GT-8	70	85	80	6.8
和歌山事-S	本震より43秒後の余震	12.5	25.0	13.1	5.2
	本震より57秒後の余震	35.0	60.0	32.5	5.2

についての検討にとどめる。地盤条件の差による検討も実施したが、とくに指摘できるような事項はなかった。ただ、今回検討の対象とした記録のうち釧路-Sで観測された記録は5本であったが、その全ての記録が上下成分と水平成分とで異なった応答スペクトルとなっている。この釧路-Sの地盤条件はAグループであるが、Aグループの他の地点たとえば秋田-Sの記録についてはそのような傾向は認められなかった。

3.5 1968年3月30日和歌山市付近の地震

1968年3月30日和歌山市付近で発生した局発地震の際に和歌山港で観測された強震記録は、地震動の上下成分の最大加速度が特に大きいという点で特記に値するものであった。それ故、ここではこの強震記録について詳述する。表-7に地震の発震時とともに港湾地域強震観測で得られた強震記録と土木研究所関係の観測地点で観測された強震記録を示す。

記録番号S-265の強震記録の上下成分の最大加速度はかなり激しく405 galであり、主要動付近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。水平2成分については数字化されているが¹⁹⁾、上下成分は数字化されていないので、図-43に記録された波形を示す。ただし、この図は原寸大ではなく、縮小してある。図中の上に表示されている直線の1区切りが1secを示す。図-43によれば水平最大加速度と上下最大加速度が発生する時刻はずれており、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となっている。また、上下成分の最初の0.3秒間は読取不可能で

あるが、主なピークをひろくと6個あり、これを単純に考えて正弦波と仮定すれば平均的な周期は約0.05秒となる。したがってこれは約20 Hzの非常に短周期成分が卓越している波形と推察される。港湾地域強震観測年報¹⁹⁾にはこの水平2成分のフーリエスペクトルが示されているが、これによるとN-S成分の卓越振動数は5 Hz、E-W成分の卓越振動数は2 Hzである。なお、SMAC-B2型強震計の場合は20 Hzで感度が約1/10になることを加味すると、高い固有振動数を持つ構造物の耐震性を検討する場合には注意を要する。

しかし、この地震の際に特に注目されるのは、地震動の上下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な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は皆無であったという事実である。これはこの地震のマグニチュードが5で規模が小さかったということもあるが、地震動がかなり短周期成分の強いものであったこと、かつ地震動の上下成分と水平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がそれほど大きくならなかったと推察される。

4. 重力式構造物の安定に及ぼす上下動の影響

一般の土木構造物の耐震設計には、主として震度法が用いられていることは既に述べたとおりである。この場合、設計条件として上下動を考慮する設計法もあり、考慮しないものもある。しかし、設計条件として上下動の規定の無い設計法においても、何らかの形で上下動を無視したことを補償し、総合的には妥当な設計結果が得られるようになっている必要がある。従って、最終的な設計法をどのような形に纏めるかは別として、上下動の影響を適切に評価しておくことは、耐震設計法の合理化のために重要である。

本章では、上下動が構造物の安定に及ぼす影響を明らかにするため、まず構造物を非常に単純化した場合に対する検討を行った。続いて、3.で得られた実測記録の上下水平加速度比を参考にして選定した鉛直震度を適用して、標準的な断面を持つ重力式岸壁に対する安定解析を行ない、実際の設計において上下動が安全率に及ぼす影響を検討した。

4.1 剛体の滑動安全率に及ぼす影響

ここに適用した方法は、筆者らの1人が既に数本の強震記録を用いて行ったことがあるが²⁰⁾、本報告ではそれ以後に収集された記録を追加すると共に、検討方法に若干の修正を行っている。

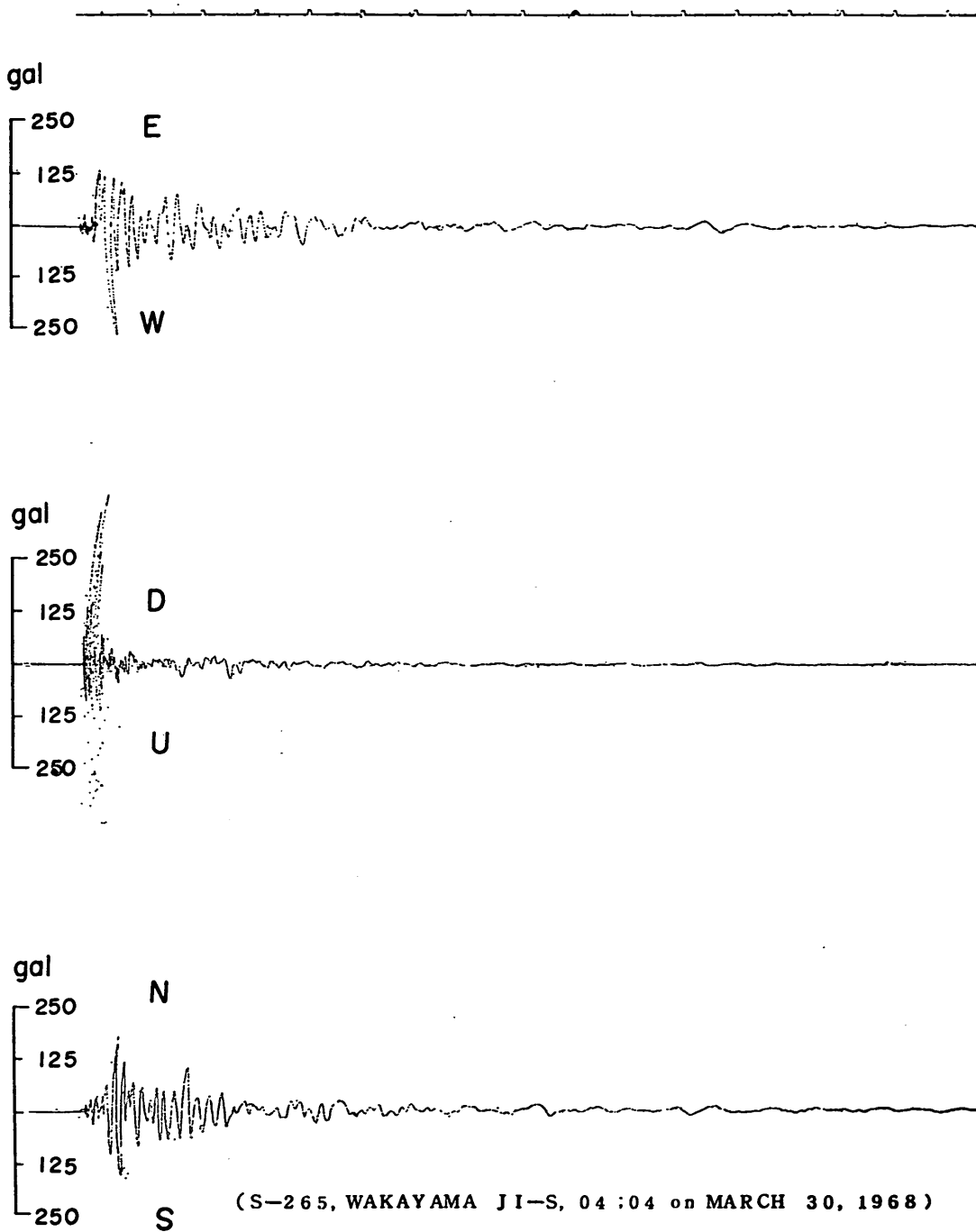


図-43 S-265 和歌山事-Sの強震記録(1968年3月30日和歌山市付近の地震)

まず、剛な地盤上にケーソンのような剛体があり、これに水平および上下方向に加速度が加わったとする。

この時、剛体の滑動に対する安全率は次式で表わされる。

$$SF = \frac{\mu(1-k_v)}{k_h} \quad (3)$$

ここに、 SF ：安全率、 μ ：剛体と地盤の間のまさつ係数、 k_h および k_v ：水平および上下方向の加速度を重力の加速度で除したものである。本報告では、重力式岸壁におけるケーソンと捨石の間のまさつ係数を参考に、一応 $\mu=0.6$ として以下の計算を行っている。剛体の滑動に対する安全率としては、次の3ケースが考えられる。第1に、水平最大加速度のみが作用した場合で、この時の安全率を $SF(0)$ と呼ぶことにする。第2に、水平合成加速度と上下動の加速度とを用いて、時々刻々の安全率を式(3)より求め、その最小値を $SF(A)$ とする。第3に、水平・上下方向の最大値を同時に作用させて、式

(3)より求めた安全率を $SF(B)$ とする。ただし、強震記録相互の比較をする為に、計算には各記録の水平2成分の合成最大加速度が250 galとなるよう、全記録に定数を乗じている。このようにして求めた安全率を、記録番号、250 galにする以前の合成最大加速度と共に、表-8に示す。ここで、 $SF(0)$ は式(3)において $k_h=0.25$ 、 $k_v=0$ と置けば、全ケースについて一定値0.24となる。

ここで、上下動成分が安全率に影響する程度を検討するために次の諸量を定義し、各記録について求めた結果を表-8に示す。

$$D_A = \frac{SF(0) - SF(A)}{SF(0)} \times 100 \quad (4)$$

$$D_B = \frac{SF(0) - SF(B)}{SF(0)} \times 100 \quad (5)$$

$$D = D_B - D_A \quad (6)$$

表-8の D_B より明らかのように、上下・水平動の最大値が同時に発生すると考えた時の安全率は、上下動を無

表-8 水平動と上下動の最大加速度とすべり出しに対する安全率

記録番号	発震年月日	観測地点	合成最大加速度 (gal)	$SF(A)$	$SF(B)$	D_A (%)	D_B (%)	D (%)
S-235	1968- 5-16	青森-S	232.3	2.32	2.00	3	17	14
S-252	"	八戸-S	259.2	2.27	2.19	5	9	4
S-577	1971- 1- 5	四日市千才-S	97.3	2.28	2.13	5	12	7
S-578	"	名古屋造函-S	61.7	2.29	2.21	5	8	3
S-585	"	衣浦-S	81.3	2.34	2.19	2	9	7
S-612	1971- 6-13	鹿島-S	55.1	2.37	2.19	1	9	8
S-634	1971- 8- 2	釧路-S	69.9	2.31	2.18	4	9	5
S-647	1971-10-11	鹿島-S	127.6	2.35	2.29	2	5	3
S-655	1972- 2-17	秋田-S	73.1	2.35	2.31	2	4	2
S-658	1972- 2-29	山下変-S	56.0	2.37	2.23	1	7	6
S-669	1972- 3-20	八戸-S	54.4	2.22	2.11	7	11	4
S-670	"	青森-S	56.9	2.26	2.13	6	12	6
S-674	1972- 5-11	釧路-S	95.2	2.35	2.23	2	7	5
S-733	1973- 6-17	釧路-S	167.8	2.33	2.20	3	8	5
S-741	1973- 6-24	釧路-S	59.1	2.29	2.20	5	8	3
S-770	1973- 9-30	鹿島事-S	71.7	2.38	2.26	1	6	5
S-782	1973-11-19	塩釜工場-S	61.0	2.22	2.11	7	11	4
S-786	1973-11-19	大船渡防地-S	60.3	2.20	2.16	8	10	2
S-788	1973-11-25	和歌山事-S	60.5	2.31	2.24	4	7	3
S-804	1974- 1-25	釧路-S	17.2	2.12	1.90	12	21	9
S-813	1974- 3- 3	鹿島事-S	98.8	2.36	2.28	2	5	3
S-845	1974- 7- 8	鹿島事-S	49.8	2.30	2.16	4	10	6
S-857	1974- 9- 4	八戸-S	73.3	2.30	2.21	4	8	4
S-877	1974-11- 9	苫小牧-S	64.8	2.32	2.22	3	7	4
S-882	1974-11-16	鹿島事-S	75.2	2.34	2.18	2	9	7

強震記録の上下動成分の解析と重力式岸壁の安定

視した場合より、およそ 10% (最大 21%, 最小 4%) 減少している。一方、 D_A に示される上下・水平動の時々刻々の変化を考慮した場合の安全率の減少の程度は、約 4% (最大 12%, 最小 1%) である。もし $SF(A)$ が最も構造物の地震時の挙動を正しく表現しているとすれば、上下動を考慮しない場合には、4% 程度安全率を過大に評価しており、上下・水平動の最大値を用いた場合には、 D_B から求まるように、5% 程度安全率を過小に評価している事を意味している。なお、式(3)は式(2)で与えられる合震度の逆数に比例していることから、表-8の $SF(A)$ が求まった瞬間の上下動と水平動の比は、図-17に示されるように、ほとんどが 0.3 以下であると言える。

以上の検討は、水平最大加速度 250 gal, まさつ係数 0.6 という条件の下ではあるが、構造物の安全性に及ぼす上下動の影響を把握する為に役立つと考えられる。

4.2 重力式岸壁の安定に及ぼす影響

上下動が構造物に及ぼす影響を明らかにする為に、重力式岸壁を例にとり現行の設計法⁴⁾による安定解析を行った。但し、港湾構造物に対する現行設計法では鉛直震度は考慮されていないので、今回の安定計算において鉛直震度を考慮した場合の設計法について、以下に説明する。

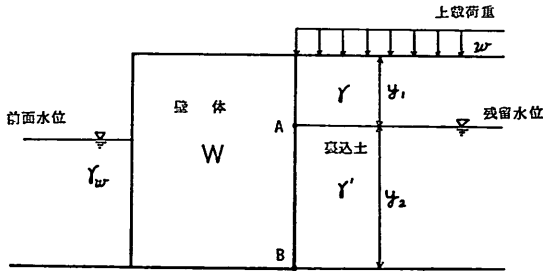


図-44 重力式岸壁

重力式岸壁として図-44を考える。鉛直震度を考慮した場合、水もこの影響を受けその単位体積重量が $\gamma_w(1-k_v)$ となる。それ故、浮力: b も $\gamma_w(1-k_v)$ となるので、土の水中単位体積重量: γ' は $\gamma - \gamma_w(1-k_v)$ となる。一方、地震力: f は物体の質量が変わらぬ限り変化はないので、水中にあって浮力を受けている場合でも、陸上における値と等しい。故に、鉛直震度を考慮した場合の水中での震度(見かけの震度)は次式で表わされる。

$$K' = \frac{f_h}{\gamma - b - f_v} = \frac{\gamma}{\gamma - \gamma_w} \frac{k_h}{1 - k_v} = \frac{\gamma}{\gamma - \gamma_w} K \quad (7)$$

ここで、 K は鉛直震度を考慮した場合の空中における

合震度であり、 K' は水中での合震度である。同様に、鉛直震度を考慮した場合の壁体の水中重量: W'' は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} W'' &= W - bV - k_v W \\ &= W - \gamma_w(1 - k_v)(W - W') - k_v W \\ &= W'(1 - k_v)\gamma_w \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 W' : 鉛直震度を考慮しない時の壁体の水中重量、 V : 壁体の体積。よって、残留水位以上の点での土圧係数: C_1 は、通常使われている水平震度のみの物部・岡部公式より K を用いて求めることが出来る。残留水位以下の点での土圧係数 C_2 は、 K' を用いて物部・岡部公式から求まる。結局、図-44の A, B 点における土圧強度: p_A, p_B は次式によって与えられることになる。

$$p_A = C_1(1 - k_v)(w + \gamma y_1) \quad (9)$$

$$p_B = C_2(1 - k_v)(w + \gamma y_1 + \gamma' y_2) \quad (10)$$

以上に述べた設計理論を用いて、最も普通の形状の -5.5m 岸壁および -12m の大型岸壁に対する安定計算を行った。図-45, 46 は、それぞれ -5.5m, -12m 岸壁の断面図である。計算条件は表-9にまとめてある。

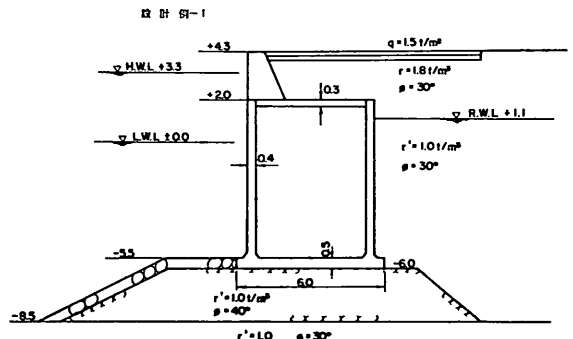


図-45 重力式岸壁の断面図 (計算例-1)

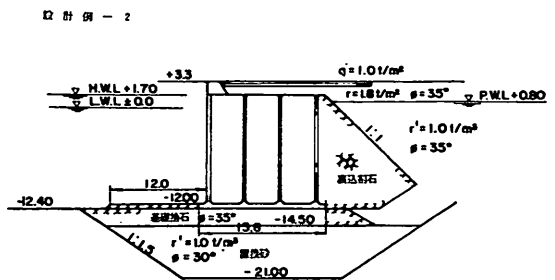


図-46 重力式岸壁の断面図 (計算例-2)

計算結果を纏めると、表-10 のようになる。まず、例-1について考察する。ケース 1~3 では、中型岸壁に対する震度の代表的な値として $k_h = 0.1$ を選び、 $k_v = 0$ 及び $\frac{1}{2} k_h$ の場合を計算したが、滑動・転倒等の全ての検

表-9 設 計 条 件

設 計 条 件		計 算 例-1		計 算 例-2	
水	深 (m)	-5.5		-12.0	
天	端 高 (m)	+4.3		+ 3.3	
H. W. L	(m)	+3.3		+ 1.7	
L. W. L	(m)	±0.0		± 0.0	
R. W. L	(m)	+1.1		+ 0.8	
載荷重(地震時) (t/m ²)		1.5		1.0	
地	盤	φ=30° γ'=1.0t/m ³		置換砂 φ=30° γ'=1.0t/m ³ 粘性土 q _u =0.10+0.065z (kg/cm ²) γ'=0.53 t/m ³	
基 礎 捨 石		φ=40° γ'=1.0t/m ³		φ=35° γ'=1.0t/m ³	
裏 込 め		R. W. L 以上 φ=30。 γ=1.8t/m ³	R. W. L 以上 φ=35° γ=1.8t/m ³	R. W. L 以上 φ=35° γ=1.8t/m ³	R. W. L 以上 φ=35° γ=1.8t/m ³
		" 以下 " γ'=1.0t/m ³	" 以下 " γ'=1.0t/m ³	" 以下 " γ'=1.0t/m ³	" 以下 " γ'=1.0t/m ³
		浮力を考慮しない	浮 力 を 考 慮	浮力を考慮しない	浮 力 を 考 慮
壁 体 重 量 (t/m)		119.65	88.23	483.82	280.54
重 心 位 置 (m)		y=5.00	x=3.15	y=7.55	x=8.35

表-10 安 定 計 算 結 果

EXAMPLE No.	CASE No.	k _h	k _v	滑 動		転 倒		壁体底面		捨石下面		偏心傾斜	
				安全率	増減率	安全率	増減率	反 力 (t/m ²)	増減率	反 力 (t/m ²)	増減率	安全率	増減率
1	1	0.1	0	1.06	—	1.52	—	55.43	—	27.60	—	/	/
	2	"	0.05 UP	1.03	-0.03	1.48	-0.03	55.47	0.0007	26.65	-0.03	/	/
	3	"	" DOWN	1.09	0.03	1.56	0.03	55.72	0.005	28.56	0.03	/	/
	4	0.05	0	1.31	—	1.89	—	40.19	—	25.07	—	/	/
	5	"	0.15 UP	1.23	-0.06	1.77	-0.06	36.98	-0.08	22.24	-0.11	/	/
	6	"	0.15 DOWN	1.38	0.05	1.99	0.05	43.83	-0.09	27.93	0.11	/	/
2	1	0.15	0	1.16	—	2.62	—	36.61	—	32.43	—	2.86	—
	2	"	0.075 UP	1.10	-0.05	2.46	-0.06	35.26	-0.04	31.11	-0.04	2.50	-0.13
	3	"	" DOWN	1.23	0.06	2.76	0.05	37.99	0.04	33.75	0.04	3.18	0.11
	4	"	0.05 UP	1.12	-0.03	2.51	-0.04	35.71	-0.02	31.56	-0.03	2.63	-0.08
	5	"	" DOWN	1.21	0.04	2.71	0.03	37.53	0.03	33.31	0.03	3.08	0.08
	6	0.10	0.10 UP	1.41	0.22	3.15	0.20	29.24	-0.20	26.69	-0.18	5.54	0.94
	7	"	" DOWN	1.61	0.39	3.61	0.38	33.00	-0.10	30.09	-0.07	6.20	1.17

※ 増減率：同一の k_h において、k_v=0 の時の安全率に対するそれぞれの安全率の増減の割合

強震記録の上下動成分の解析と重力式岸壁の安定

討項目に関して安全率の増減は3%以下と微小であった。なお、上下動が特に大きい場合を想定して、ケース5, 6において $k_0=3k_h$ について検討したところ、滑動および転倒に対する安全率の変化は約6%であるのに反し、壁体および捨石下面の反力が約10%変化している。このことは、直下型地震のような場合に対しては、基礎地盤の安定に関して特に配慮すべきことを示している。次に、例-2について検討する。 k_h としては重要な大型岸壁に対する代表的な値として0.15を選び、 $k_0=0, \frac{1}{2}k_h, \frac{1}{3}k_h$ に対する安全率を求めたところ、偏心傾斜に対するもの以外は数%以下の変化に留まっていた。特に、3.3の結果を参考に $k_0=\frac{1}{3}k_h$ の場合を見ると、安全率の変化は4%以下である。ケース6, 7では、上下動が比較的大きな場合を想定している。この場合、水平動も同時に最大となることは希である点を考慮して、 $k_h=0.1$

とした。得られた安全率は $k_h=0.15$ の場合よりも大巾に増大しており、基礎地盤の反力も減少していることから、壁体の安定に影響する度合は、水平動が支配的であって上下動の影響は小さいことがわかる。例-1, 2において共に偏心傾斜に関する安全率の変化が大きいことが目立つ。この点については安定計算法の基礎となる地震時の地盤の円形すべり理論に対する信頼性にも係っているため、本報告では図-47にすべり円の位置を示すに留め、それ以上の検討は省略する。

以上の検討より明らかとなった事は、実際の地震において上下動が構造物の安定に及ぼす影響は嵩々数%以下であるので、水平震度のみによる設計法を用いても充分その補償が可能であることである。但し、上下動の比較的大きな場合には、構造物の基礎地盤に関する安定が損われないような配慮が必要となろう。

偏心傾斜荷重を受ける二層系地盤の円形すべり面

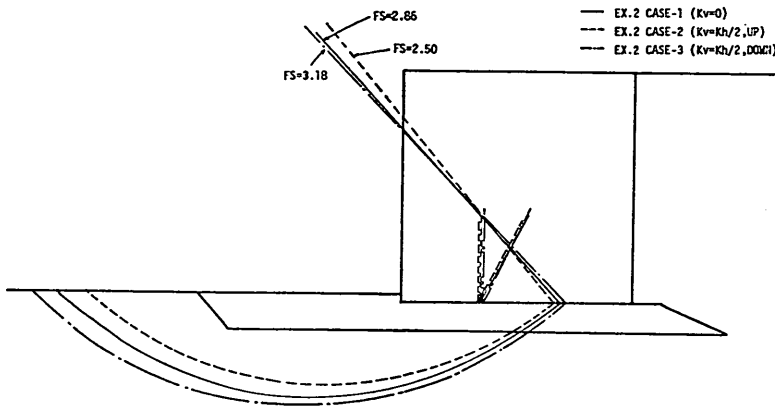


図-47 偏心傾斜荷重を受ける二層系地盤の円形すべり面（設計例-2）

5. 結 論

過去に得られた強震記録に基づき、地震動の上下成分に関する検討を行い、水平方向と上下方向の地震力を考慮した構造物の安定計算を実施した。以下に本報告で明らかになった事項を列記する。

1) 水平最大加速度が50gal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）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の大きさ、震央距離、マグニチュード、地盤条件をとりあげ検討したが、特に明確な相関性は認

められなかった。

3) 同一観測地点ではほぼ同じ震央距離、マグニチュードのいくつかの地震記録の上下水平最大加速度比について検討した結果、地震により上下水平最大加速度比はかなり異なった値を示した。

4) 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、構造物が滑動及び転倒に対して、もっとも危険な状態になる時刻における上下加速度と水平加速度の比を強震記録について求めた結果、その値は1/3以下となった。

5) 上下動成分のフーリエスペクトルと応答スペクトルについて検討をおこなった。震央距離14km以上の記録の上下成分と水平成分のフーリエスペクトルはほぼ同

様なスペクトル特性を示していた。応答スペクトルについては特に明確な事実は指摘できなかった。

6) 1968年3月30日の和歌山市付近の局所的な地震において、震央距離5.2kmの強震観測地点和歌山事-Sにおける記録の上下最大加速度は約405 galであり、上下最大加速度としては特に大きいものであったが、和歌山港における港湾施設の被害は皆無であった。

7) 現行の港湾構造物の設計法によって重力式岸壁について鉛直方向の震度を考慮した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、鉛直方向の震度の影響は小さかった。(1976年3月31日受付)

謝 辞

本報告は、強震観測事業の成果に負うところ大であり、港湾地域強震観測にたずさわっている方々および建設省土木研究所の強震観測に関係されている方々に敬意を表する。さらに、報告をとりまとめる際に、幾度かの討議を通じて貴重なる助言を与えて下さった林構造部長、土田耐震構造研究室長、荒井振動研究室長に対しここに記して深甚の謝意を表わす次第である。

参 考 文 献

- 1) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針，1970年10月，pp.2~3
- 2) 土木学会：沈埋トンネル耐震設計指針(案)，1975年3月，p.34
- 3) 土木学会：本州四国連絡橋耐震設計指針，1974年9月，pp.18~19
- 4) 日本港湾協会：港湾構造物設計基準，1967年4月，pp.2-9-1~4
- 5) 農林省農地局：土地改良事業計画設計基準，第3部設計，第1編フィルダム，1967年6月，pp.203~205
- 6) 日本道路協会：道路橋耐震設計指針，1969年1月，pp.14~19
- 7) 高田孝信，大久保忠良，栗林栄一：橋梁の耐震設計に関する研究(I)—地震応答スペクトル・1964—，土木研究所報告，第128号，1965年10月
- 8) A.K. Chopra: The importance of the vertical component of earthquake motions, Bull. of the Seismological Society of America, Vol. 56, No. 5, Oct., 1966, pp. 1163~1175
- 9) 桜井彰雄・増子芳夫・栗原千鶴子：鉛直地震動による建物の応答観測の一例，第4回日本地震工学シンポジウム，1975年11月，pp.743~750
- 10) 土田肇・山田通一郎・倉田栄一：港湾地域強震観測地点資料(その1)，港湾技研資料，No.34，1967年11月
- 11) 倉田栄一・土田肇・須藤克子：港湾地域強震観測地点資料(その2)，港湾技研資料，No.107，1970年

- 12) 倉田栄一・石坂徳三：港湾地域強震観測地点資料(その3)，港湾技研資料，No.156，1973年3月
- 13) 林聡・宮島信雄：全国主要港湾における強震観測(第1報)，港湾技研資料，No.10，1964年4月
- 14) 林聡・宮島信雄・山田通一郎：全国主要港湾における強震観測(第2報)，港湾技研資料，No.15，1965年2月
- 15) 土田肇・山田通一郎・倉田栄一・須藤克子：港湾地域強震観測年報(1963,1964)，港湾技研資料，No.55，1968年9月
- 16) 土田肇・山田通一郎・倉田栄一・須藤克子：港湾地域強震観測年報(1965,1966)，港湾技研資料，No.62，1968年12月
- 17) 土田肇・倉田栄一・須藤克子：港湾地域強震観測年報(1967)，港湾技研資料，No.64，1969年3月
- 18) 土田肇・倉田栄一・須藤克子：港湾地域強震観測年報(1968)，港湾技研資料，No.98，1970年3月
- 19) 土田肇・倉田栄一・須藤克子：港湾地域強震観測年報(1969)，港湾技研資料，No.100，1970年6月
- 20) 土田肇・倉田栄一・須藤克子：港湾地域強震観測年報(1970)，港湾技研資料，No.116，1971年3月
- 21) 倉田栄一・石坂徳三・土田肇：港湾地域強震観測年報(1971)，港湾技研資料，No.136，1972年3月
- 22) 倉田栄一・石坂徳三・土田肇：港湾地域強震観測年報(1972)，港湾技研資料，No.160，1973年3月
- 23) 倉田栄一・石坂徳三・土田肇：港湾地域強震観測年報(1973)，港湾技研資料，No.181，1974年3月
- 24) 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.202，1975年3月
- 25) 土田肇・倉田栄一・須藤克子：1968年十勝沖地震とその余震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料，No.80，1969年6月
- 26) 栗林栄一・岩崎敏男・若林進・若月高晴：土木構造物における強震記録(1968)，土木研究所資料，No.430，1969年4月
- 27) 栗林栄一・岩崎敏男・若林進・若月高晴：土木構造物における強震記録(1969)，土木研究所資料，No.641，1971年3月
- 28) 栗林栄一・岩崎敏男・若林進・若月高晴・高木義和：土木構造物における強震記録(1970)，土木研究所資料，No.718，1972年3月
- 29) 栗林栄一・岩崎敏男・若林進・若月高晴・高木義和：土木構造物における強震記録(1971)，土木研究所資料，No.815，1973年3月
- 30) 栗林栄一・若林進・川島一彦・若月高晴・高木義和：土木構造物における強震記録(1972)，土木研究所資料，No.913，1974年3月
- 31) 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)，土木研究所資料，No.967，1974年11月
- 32) 栗林栄一・川島一彦・若月高晴・高木義和：地震記録のデジタル数値改訂版(その1~その3)，土木研究所資料，第876号，1973年12月

強震記録の上下動成分の解析と重力式岸壁の安定

- 33) 栗林栄一・川島一彦・若月高晴・高木義和：地震記録デジタル数値（その4），土木研究所資料，第877号，1973年12月
- 34) 土田肇・倉田栄一・石坂徳三・林 聡：各種地盤における平均応答スペクトル，港湾技術研究所報告，第12巻，第4号，pp.171~199
- 35) 土田肇・倉田栄一：地震の上下動成分がケーソンの安定におよぼす影響について，第11回地震工学研究発表会講演概要，1971年7月，pp.111~118