

亜熱帯島嶼地域における微地形を考慮した 地震動特性評価について

松島良成¹・矢吹哲哉²・有住康則³

¹正会員 工修 (財)沖縄県建設技術センター (〒902-0064 沖縄県那覇市寄宮1-7-13)

²フェロー会員 工博 琉球大学教授 工学部環境建設工学科 (〒903-0123 沖縄県西原町千原1)

³正会員 工博 琉球大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒903-0123 沖縄県西原町千原1)

ある特定地域における地震災害防災を検討する場合に、当該地域の地形地盤特性および地震動の情報が重要な資料となる。これまでに、ある地域における地形地盤特性および地震動特性を把握する手法が、いくつか提案されている。一般に多く利用されている道路橋示方書の方法もその1つである。しかし、沖縄県のような亜熱帯島嶼地域特有の微地形および地質層序を考慮する必要がある場合には、従来利用されてきた手法の妥当性の検討が必要と考えられる。そこで、本研究は、沖縄県を例にして、亜熱帯島嶼地域の地形地盤特性を示し、その地形地盤特性と地震動特性の関係について検討する。また、以上のことを踏まえて、現行の地形地盤特性および地震動特性の推定手法の評価を行う。

Key Words : *subtropics small island, micro-relief, subsurface layers, site-amplification, strong-motion observation*

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、人口や都市施設の集積した神戸市やその周辺で甚大な被害が発生した。しかし、被災地域の中でも被害の程度は様でないことが報告されている。これは、地盤や地形条件および地震動と各構造物の形式等の因子が複雑に関係し合っているためであると考えられる。これまでに、地形および地盤条件と地震動の関係について多くの研究および報告がなされており、地盤および地形特性が地表面の地震動に影響を与えることが報告されている^{1)~6)}。よって、ある地域における詳細な地震被害予測や耐震設計を検討する場合、当該地域の地形および地盤条件を把握し、それと地震動特性の関係を把握することは重要であると考えられる。年縄・山崎は¹⁾、関東におけるローム台地と沖積低地について地震観測と常時微動観測データを利用して、その特性を評価している。また、1km²メッシュ等の国土地理情報を利用した地震動特性の把握に関する研究も行われている^{3)~6)}。

ここで、表-1および図-1に、沖縄県における地形分類図およびその凡例を示す⁷⁾。この図には、100mメッシュを付記してある。図-1に示すように、沖縄県のような島嶼地域の地形を十分に把握するためには、少なくとも100mメッシュの国土地理情報が必要であると考えられる⁸⁾。参考文献9)によれば、

地形を中地形、小地形、微地形、超微地形に分類しており、微地形は10²~10³m程度である空間規模の地形と定義している。以上のことから、図-1に示すような島嶼地域における地形分類図は、微地形を考慮した分類と考えることができ、島嶼地域は、微地形が発達した地域と考えることができる。また、沖縄県のような亜熱帯地域には、第四紀更新世に堆積したさんご礁堆積物で形成される層が広く分布する¹⁰⁾。このような亜熱帯島嶼地域に対して、前述した既往の1km²メッシュ地理情報を利用した研究成果を適用することは合理的ではないと考えられるため、島嶼地域地形特性や亜熱帯地域地盤特性に関する情報を利用した地震動特性の把握が望まれる。

著者等は、これまでに沖縄県における地盤情報をデータベース化し、地理情報システム(GIS)を併用することで、各地形分類における地盤特性の把握に努めてきた^{8), 11)~13)}。特に、沖縄県における地形分類と地盤の層序特性の関係から地形分類ごとの動的物理定数の推定法を提案した⁸⁾。この推定法を利用することより、地形分類から任意地点の概略地盤モデルを推定することができる。更に、この推定モデルから任意地点の地盤における卓越周期を推定することができる。これらの提案推定法の導出過程から、島嶼地域における微地形の地形分類(以下地形分類とする)と地震動特性の相関を把握することが可能であると考えられる。そこで、本研究では、沖縄県

表-1 地形分類図における種別と記号の例

丘陵地		台地					低地		その他
小起伏丘陵	盆状谷	上位面	中位面(上位)	中位面(下位)	下位面	石灰岩堤	谷底低地	海岸低地	埋立地
Hs	Vs	Lu	Lmu	Lml	Ll	Lw	Pv	Pc	Ar

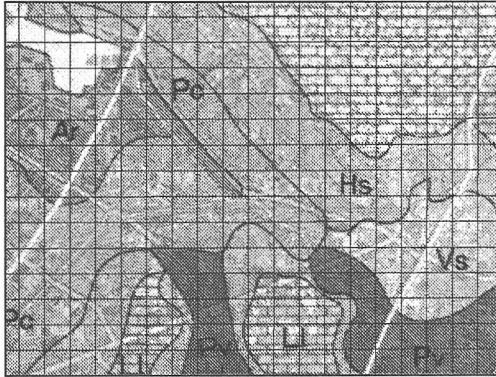


図-1 地形分類図の例

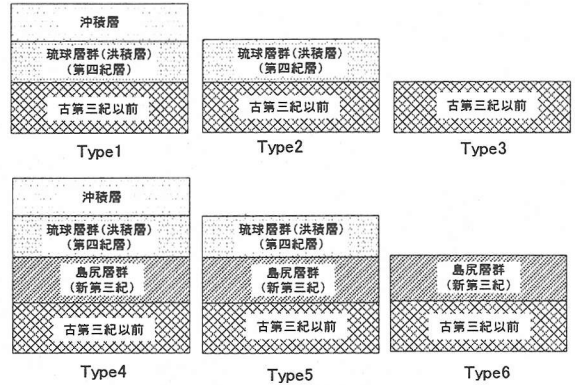


図-2 沖縄県における主な地質層序

地方で観測された水平2方向成分264組の地震波を基に、地形分類と地震動特性の関係の把握を試みた。地震動特性値としては、最大加速度PGA、最大速度PGV、計測震度I、最大加速度応答スペクトル $S_{a_{max}}$ 、最大速度応答スペクトル $S_{v_{max}}$ および $S_{v_{max}}$ が得られる周期 $T_{Sv_{max}}$ を考慮する。先ず、これらの特性値について回帰分析を行い、地形分類がパラメータとして回帰式に寄与することを確認する。次に、この回帰分析を利用して、地盤増幅度を推定する。更に、亜熱帯島嶼地域における微地形を考慮した加速度応答スペクトルと道路橋示方書において耐震設計に用いられている震度法の標準加速度応答スペクトルを比較し、地盤増幅特性の評価を論述する。

2. 沖縄県の地形および地質概要

沖縄県の地形を大きく分類すると、山地、丘陵、台地・段丘、低地、海岸、カルスト地形に区分できる^{14), 15)}。以下に各地形ごとの特徴を述べる。

- ① 山地：標高500m程度以下の山地からなる低地性の小起伏山地があり、山地面積も小さい。これらは、沖縄本島北部と八重山諸島に広く分布する。
- ② 丘陵地：丘陵地は山地の周辺に発達する大起伏丘陵と新第三紀の島尻層群からなる小起伏丘陵に分類される。この小起伏丘陵は、沖縄本島中南部および宮古島諸島に広く分布して

いる。大起伏丘陵は、沖縄本島北部、八重山諸島に広く分布している。

- ③ 台地・段丘：沖縄県には、砂礫層と石灰岩からなる二種類の台地・段丘が発達している。砂礫層からなる台地・段丘は、沖縄本島北部や八重山諸島に広く分布し、石灰岩からなる台地・段丘は、沖縄本島中南部および宮古島諸島に広く分布する。
- ④ 低地：主に、二種の成因を異にするものに区分される。すなわち、河川作用によって形成された谷底低地と、海成作用によって形成された海岸低地および完新世さんご礁面である。面積は、いずれも狭小である。
- ⑤ 海岸：さんご礁地形に関連する地形であり、さんご礁と海浜に分類できる。
- ⑥ カルスト地形：カルスト地形は、二種に分類できる。沖縄本島北部に分布する二畳系の石灰岩からなるカルスト地形および琉球石灰岩からなる石灰岩堤と鍾乳洞の二種である。

これらの地形概要から、沖縄県地方は、沖縄本島北部および八重山諸島と沖縄県中南部および宮古島諸島に区分できると考えられる。また、これは、図-2の地盤の概略モデルに示すように、前者はそれぞれ古第三紀以前を基盤とする地形群Type1~Type3、後者は新第三紀島尻層群を基盤とする地形群Type4~Type6に、それぞれ分類できる。ここで、基盤とは新第三紀以前に堆積した地層とした。

3. 各特性値の回帰分析

(1) 回帰モデル

ここでは、本研究の地震動特性の評価に用いる回帰モデルについて述べる。参考文献 16) によると、地震動の大きさ A と震源距離 X の間には次のような関係がある¹⁷⁾。

$$A = A_0 X^n e^{-kX} \quad (1)$$

ここで、 n は波動が平面的、空間的に広がることで生じる距離減衰係数、 k は媒質の粘性による減衰係数である。ここで、 A_0 の対数と地震のマグニチュード M との間には比例関係があると考えられるため、 $a_1 \sim a_4$ を新たな係数として、上式から

$$\log A = a_1 - a_2 M - a_3 \log X - a_4 X \quad (2)$$

が得られる。

また、地震動のフーリエスペクトルまたは応答スペクトルにおける特性の評価式として、次式を用いる^{18)~21)}。

$$\log S(T) = c_1(T)M - c_2(T)\log X - c_3(T) \quad (3)$$

ここに、 $S(T)$ はフーリエスペクトルあるいは応答スペクトル、 T は周期、 $c_1(T)M$ は、震源スペクトルに関する項、 $c_2 \log X$ は距離減衰項および $c_3(T)$ はサイト係数であり、地盤の増幅特性と震源に関する項である^{18)~20)}。

本研究では、地震動特性値と地震動のスペクトル特性の評価を同一の回帰モデルで行うことにする。そこで、本研究では、式 (3) に示す回帰モデルを参考にした。各地震動特性値は式 (4) を回帰モデルとし、地震動のスペクトル特性は式 (3) を回帰モデルとする。また、 X は震央距離(km)とする。

$$\log A = a_1 M - a_2 \log X - a_3 \quad (4)$$

また、本研究では、微地形と地震動特性の関係を検討するため、式 (4) に地形分類に対する係数 D_i をパラメータとして追加した回帰モデルも検討する。したがって、微地形と地震動特性の関係を考慮する場合、地震動特性値の回帰分析に式 (5)、スペクトル特性の回帰分析に式 (6) を用いる。

$$\log A = a_1 M - a_2 \log X - a_3 + D_i \quad (5)$$

$$\log S(T) = c_1(T)M - c_2(T)\log X - c(T) + D_i(T) \quad (6)$$

ここで、 D_i および $D_i(T)$ は、地形に対する補正項で、各地形分類 i に対して求める。

ただし、計測震度 I の場合、回帰分析の実績が他の地震動特性値に関する回帰分析より少ないため、参考文献 3) における回帰モデルを参考にした。計測震度 I の回帰モデルを式 (7) に示す。

$$A = a_1 + a_2 M - a_3 \log X + D_i \quad (7)$$

表-2 各地震観測点における地形分類

分類記号	分類	主な分布地域
Ar	埋立地	全域
Ce	掘州	北部, 八重山
Cr	浜堤	北部, 八重山
Hf1	丘腹・丘稜傾斜面15°未満	北部, 八重山
Hs	小起伏丘陵	中南部, 宮古
Ll	下位面段丘	中南部, 宮古
Lla1	低位段丘I面	北部, 八重山
Lla0	低位段丘I面	北部, 八重山
Llb2	低位段丘II面	北部, 八重山
Lm	中位面段丘	中南部, 宮古
Lma1	中位面段丘I面	北部, 八重山
Lmb0	中位面段丘II面	北部, 八重山
Lmb1	中位面段丘II面	北部, 八重山
Lml	中位面(下位)段丘	中南部, 宮古
Lmu	中位面(上位)段丘	中南部, 宮古
Lu	上位面段丘	中南部, 宮古
Lw	石灰岩丘	全域
Pc	海岸平野	全域
Pv	谷底低地	全域
S	段丘崖, 海食崖, 断層崖	北部, 八重山
Vs	盆状谷	全域

表-3 観測された地震の諸元

No	地震発生日	Mj	深度	観測数	No	地震発生日	Mj	深度	観測数
1	1997/4/9	3.4	200	1	23	2000/1/14	4.7	300	4
2	1997/11/17	4.1	200	1	24	2000/1/29	6.0	200.0	10
3	1997/11/26	3.5	200	1	25	2000/2/25	5.5	140.0	4
4	1997/11/26	3.8	200	3	26	2000/3/21	4.7	50.0	5
5	1998/4/27	4.0	100.0	1	27	2000/4/4	4.3	60.0	1
6	1998/5/5	4.3	200	1	28	2000/4/10	4.6	20.0	1
7	1998/10/3	6.0	200.0	2	29	2000/4/14	3.8	20.0	5
8	1998/12/28	5.0	110.0	1	30	2000/4/18	3.4	40.0	1
9	1999/2/11	3.9	300	2	31	2000/4/18	4.7	50.0	2
10	1999/3/6	3.5	60.0	1	32	2000/4/26	5.0	150.0	2
11	1999/4/21	4.0	300	1	33	2000/4/28	3.2	20.0	1
12	1999/5/15	4.6	200	20	34	2000/4/29	3.5	20.0	8
13	1999/5/22	4.3	200	1	35	2000/5/9	4.9	10.0	2
14	1999/6/3	3.2	200	2	36	2000/6/5	4.2	—	1
15	1999/8/1	5.4	120.0	2	37	2000/6/29	4.4	100.0	5
16	1999/8/7	3.4	300	2	38	2000/7/16	4.2	50.0	3
17	1999/9/8	4.0	300	1	39	2000/7/30	4.1	50.0	2
18	1999/10/10	4.6	400	2	40	2000/7/31	3.5	50.0	2
19	1999/11/19	3.9	200	2	41	2000/8/1	4.0	50.0	1
20	1999/12/16	4.7	140.0	2	42	2000/8/3	3.7	30.0	10
21	1999/12/19	3.7	400	2	43	2000/8/7	3.8	50	2
22	2000/1/12	3.8	200	8	44	2000/8/31	4.2	40	1

表-4 観測データの計測震度

計測震度	0<Ia<0.5	0.5<Ia<1.0	1.0<Ia<1.5	1.5<Ia<2.0	2.0<Ia<2.5	2.5<Ia<3.0	3.0<Ia<3.5	合計
データ数	12	39	40	23	15	2	1	132

表-5 地形分類ごとの観測データ数

地形分類	Hs	Vs	Lmu	Lml	Lmb	Lm	Lla	Llb	Ll	Lw	Pc	Ce	Ar	合計
計測震度	12	27	12	5	3	19	9	2	4	10	10	13	6	132
その他特性値	24	50	24	10	4	38	18	4	8	18	20	24	12	254

(2) 回帰分析

沖縄県では1997年より各市町村に95型地震計を設置し、地震観測を行っている。これら観測点における地形分類を表-2に示す。本研究では、1997年4月1日から2000年8月3日までに観測された気象庁マグニチュード M_j が3.2以上の地震を対象とした。これらの地震の諸元を表-3に示す。また、計測震度の分布を表-4示す。地形分類ごとの観測データ数を表-5に示す。この132個の観測波形より計測震度およびその水平成分264組中254組の記録を用いて、最大加速度PGA (cm/s²)、最大速度PGV (cm/s) および計測震度Iを求め、これらの回帰分析を行った。更に、これらの波形のスペクトル解析から、最

大擬似加速度応答スペクトル $S_{a_{max}}$ 、最大速度応答スペクトル Sv_{max} および Sv_{max} が得られる周期 $T_{Sv_{max}}$ を求め、回帰分析を行った。ここでの回帰分析は前述の 3. (1) の回帰モデルを利用した。各地震動特性値の回帰モデル式を式(8)~式(13)に示す。また、実務において一般に利用されている道路橋示方書は、耐震設計における加速度応答スペクトルを 5% 減衰で設定している²²⁾。したがって、本研究でも、減衰 5% 速度応答スペクトルおよび減衰 5% 擬似加速度応答スペクトルを算出した。

$$I = a_1^I + a_2^I M - a_3^I \log X + Di^I \quad (8)$$

$$\log PGA = a_1^A + a_2^A M - a_3^A \log X + Di^A \quad (9)$$

$$\log PGV = a_1^V + a_2^V M - a_3^V \log X + Di^V \quad (10)$$

$$\log Sa_{max} = a_1^{Sa} + a_2^{Sa} M - a_3^{Sa} \log X + Di^{Sa} \quad (11)$$

$$\log Sv_{max} = a_1^{Sv} + a_2^{Sv} M - a_3^{Sv} \log X + Di^{Sv} \quad (12)$$

$$\log T_{Sv_{max}} = a_1^T + a_2^T M - a_3^T \log X + Di^T \quad (13)$$

回帰分析の方法としては、マグニチュードと距離の相関の影響が大きいことを考慮して Joyner, W.B. と Boore, D.M. が最初に使用した 2 段階回帰²³⁾を採用した。ここでは、Mj を 15 階級分割し、それをダミー変数として回帰分析を行った。以上の回帰分析を基に、回帰モデルのパラメータに地形分類項 D_i を増やした場合のその寄与について検討した。その寄与の確認は、(8)式~(13)式において Mj および X の 2 パラメータとした回帰モデル(MX)と D_i の地形分類項を増やし、3 パラメータとした回帰モデル(MXD)の残差変動の分散を比較することで行った。残差変動の分散の不偏推定量 S_e は、次式により得られる²⁴⁾。

$$e_i = y_i - \tilde{y}_i$$

$$S_e = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (14)$$

ここで、 y_i は観測値であり、 \tilde{y}_i は推定値である。この S_e の有意差検定結果を表-6 に示す。ここに、R(MXD) および R(MX) は、それぞれ MXD モデルおよび MX モデルの重相関係数を示す。MXD 回帰モデルにおける回帰係数を表-7 に示す。また、実測値と回帰式からの計算値の比較図を図-3 に示す。回帰モデルにおける相関の程度を定量的に評価する場合、残差変動の平方和から得られる相関係数より、比較的良好的な評価が得られている。また、相関係数の定義より、残差変動の分散の小さい回帰モデルが良好な相関を示すと考えられるため、MX モデルと MXD モデルにおける残差変動の分散を比較することで、相関性の改善度を評価することが可能と

表-6 各特性値回帰モデルの地形分類項の判定

	PGV	PGA	Samax	Svmax	T	計測精度
R(MXD)	0.799	0.771	0.741	0.742	0.646	0.811
R(MX)	0.737	0.687	0.652	0.660	0.568	0.736
F値	1.306	1.274	1.236	1.286	1.164	1.341
$\alpha=0.05$	1.231	1.231	1.231	1.231	1.231	1.336
判定	○	○	○	○	x	○

表-7 各地震動特性値における回帰係数

地形分類項	Mj	V_{max}		A_{max}		I		$S_{a_{max}}$		$S_{v_{max}}$	
		観測値	推定値	観測値	推定値	観測値	推定値	観測値	推定値	観測値	推定値
H_0	0.000	-	0.000	-	0.000	-	0.000	-	0.000	-	-
V_a	0.166	0.095	0.240	0.068	0.332	0.139	0.329	0.069	0.174	0.068	0.068
L_{mu}	0.154	0.095	0.329	0.065	0.342	0.160	0.395	0.071	0.195	0.064	0.064
L_{ml}	0.137	0.091	0.189	0.065	0.204	0.208	0.176	0.071	0.071	0.068	0.068
L_{mb}	0.350	0.120	0.331	0.127	0.431	0.251	0.373	0.130	0.283	0.125	0.125
L_m	0.150	0.065	0.193	0.059	0.261	0.157	0.228	0.070	0.127	0.061	0.061
L_b	0.157	0.068	0.338	0.062	0.271	0.176	0.267	0.074	0.131	0.071	0.071
L_{ib}	0.007	0.116	0.068	0.122	0.177	0.299	0.170	0.125	0.005	0.120	0.120
L_i	0.167	0.095	0.057	0.100	0.094	0.244	0.115	0.102	0.103	0.098	0.098
L_w	0.119	0.073	0.105	0.077	0.107	0.180	0.167	0.079	0.071	0.076	0.076
P_c	0.151	0.067	0.228	0.071	0.375	0.173	0.289	0.071	0.201	0.070	0.070
C_e	0.398	0.096	0.367	0.059	0.698	0.168	0.451	0.071	0.456	0.068	0.068
A_1	0.392	0.077	0.294	0.062	0.112	0.199	0.219	0.061	0.061	0.060	0.060
A_2	0.000	-	0.000	-	0.000	-	0.000	-	0.000	-	-
A_3	3.2-3.4	0.000	-	0.000	-	0.000	-	0.000	-	0.000	-
A_4	3.4-3.6	-0.050	0.066	-0.070	0.104	-0.226	0.254	-0.207	0.109	-0.159	0.102
A_5	3.6-3.8	-0.027	0.102	-0.004	0.107	-0.132	0.250	-0.078	0.110	-0.034	0.106
A_6	3.8-4.0	-0.036	0.096	-0.086	0.102	-0.069	0.247	-0.181	0.104	-0.118	0.100
A_7	4.0-4.2	0.109	0.113	-0.017	0.119	0.255	0.290	-0.099	0.122	0.098	0.117
A_8	4.2-4.4	0.396	0.107	0.200	0.113	0.712	0.271	0.199	0.116	0.324	0.111
A_9	4.4-4.6	0.125	0.124	-0.109	0.121	0.365	0.311	0.114	0.114	0.125	0.125
A_{10}	4.6-4.8	0.558	0.089	0.217	0.105	1.129	0.254	0.231	0.107	0.566	0.103
A_{11}	4.8-5.0	0.332	0.112	0.211	0.119	0.707	0.289	0.153	0.121	0.261	0.116
A_{12}	5.0-5.2	1.036	0.151	1.033	0.159	1.810	0.388	0.668	0.165	0.902	0.156
A_{13}	5.2-5.4	0.467	0.134	0.251	0.141	0.957	0.345	0.219	0.145	0.476	0.139
A_{14}	5.6-5.8	0.467	0.127	0.327	0.134	0.952	0.327	0.223	0.137	0.404	0.132
A_{15}	6.2-6.4	0.662	0.118	0.419	0.124	1.269	0.303	0.393	0.127	0.586	0.122
A_{16}	Log(D)	-0.444	0.050	-0.533	0.063	-0.739	0.127	-0.847	0.054	-0.423	0.062
A_{17}	定数項	-0.393	0.116	1.364	0.123	1.720	0.298	1.932	0.125	0.133	0.120

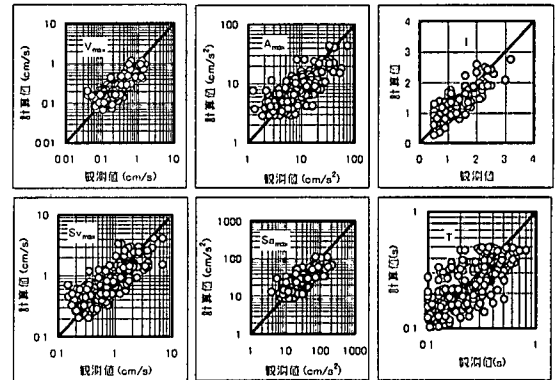


図-3 各地震動特性値の実測値と計算値の比較

なる。残差変動の分散の比較には、分散の有意差検定を利用する。ところで、残差変動の分散の不偏推定量は、式(14)で定義される。よって、本研究では、式(14)の不偏推定量に対して、分散の統計的検定に極めて一般的に用いられている F 分布を用いた。表-6 における判定は、F 分布の有意水準 $\alpha=5\%$ における検定結果に基づいた。この結果から、 $T_{Sv_{max}}$ を除く特性値について、パラメータとして地形分類項を追加することにより、回帰式における相関性の改善が確認できる。したがって、地形分類項をパラメータとすることが有効であると考えられる。

地震波の卓越周期と考えられる $T_{Sv_{max}}$ における回帰分析において、地形分類項を付加することによる相関性の改善には、有意な差は得られなかった。しかし、本研究で得られた重相関係数を考慮すると、

表-8 地形分類項に基づく地盤増幅度

	V _{max}	A _{max}	S _{a,max}	S _{v,max}	T(S _{v,max})	I
Hs	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000
Vs	1.465	1.739	2.128	1.492	0.689	0.332
Lmu	1.425	2.135	2.434	1.567	0.560	0.342
Lml	1.372	1.547	1.498	1.193	0.797	0.204
Lmb	2.240	2.144	2.363	1.595	1.126	0.431
Lm	1.411	1.561	1.691	1.339	0.921	0.267
Lla	1.434	2.034	1.850	1.326	0.672	0.277
Llb	1.016	1.170	1.480	1.085	0.806	0.177
Li	1.468	1.141	1.303	1.277	0.787	0.094
Lw	1.314	1.275	1.468	1.194	0.726	0.107
Pc	1.417	1.690	1.931	1.590	0.800	0.375
Ce	2.442	2.330	2.827	2.854	1.060	0.898
Ar	1.237	1.616	1.651	1.227	0.663	0.112

回帰分析から地震波における卓越周期の推定も可能であると考えられる。

4. 地形分類と地盤増幅度

(1) 地盤増幅度の算定

表-7に示す回帰係数の地形分類項 D_i は、Hs における地形分類項を解放基盤面として設定した値である。Hs は、主に新第三紀層泥岩が露頭する地形である^{7), 8)}と考えられている。また、数箇所の観測点における地盤情報を収集し、Hs の地盤種別を推定したところ、I 種地盤に分類された。本研究における地盤種別は、道路橋示方書に従って算定した²⁵⁾。また、参考文献8)においても、Hs は、I 種地盤が卓越した地形であることが示されている。

次に、地形分類項に基づく地盤増幅度を算定する。ここで、各地形分類 i における地震動特性値を A_i 、Hs における地震動特性値を A_{Hs} とすると、地盤増幅度 $AR_{i/Hs}$ は、次式で算定できる³⁾。

$$AR_{i/Hs} = A_i / A_{Hs} \quad (15)$$

また、式(5)より次式が導かれる。

$$\log(A_i / A_{Hs}) = D_i - D_{Hs} \quad (16)$$

式(16)を式(15)に代入することにより、地盤増幅度 $AR_{i/Hs}$ を表す式(17)が導かれる。

$$AR_{i/Hs} = 10^{D_i - D_{Hs}} \quad (17)$$

したがって、式(17)より、I 種地盤の地震動に対する地盤増幅度を求めることができる。また、計測震度 I については、式(18)に示すように各地形分類の I と Hs の I の差で定義できる。

$$AR_{i/Hs} = D_i - D_{Hs} \quad (18)$$

(2) PGA, PGV および I による地盤増幅度

表-8 および図-4 に地盤増幅度算定結果を示す。

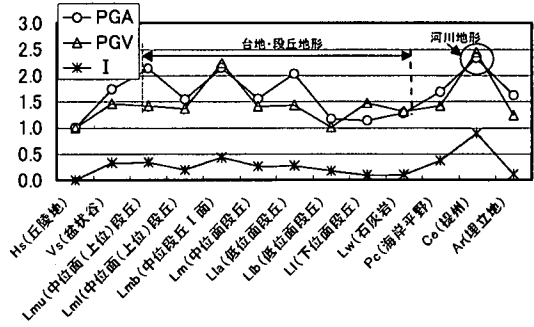


図-4 PGA, PGV および I による地盤増幅度

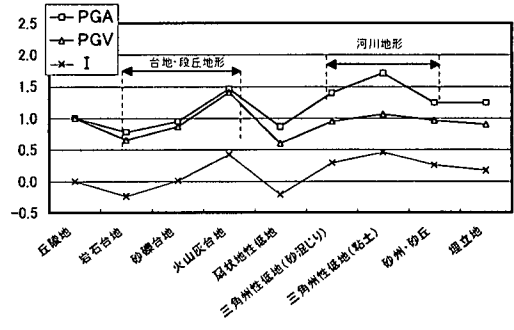


図-5 既往の地形分類ごとの地盤増幅度

これらの図表から、以下のことが認められる。

- ① 地盤増幅度は、1.00~2.50 の範囲にある。
- ② 琉球層群を主体とする台地・段丘(頭文字が L で始まる地形分類記号)は、地盤増幅度が 1.00 から 2.25 程度の範囲でばらついた値である。
- ③ 堤州地形 Ce の地盤増幅度が最も大きい。

次に、これらの結果を既往の結果と比較した。ここでは、参考文献3)との比較を行った。その理由として、当該文献が、計測震度 I、最大加速度 PGA および最大速度 PGV による地盤増幅度を推定しているためである。

当該文献は地形分類の山地を基準値 1.00 としている。本研究では丘陵地を基準値 1.00 としているため、同一の地形に対する増幅度に換算する必要がある。そこで、本研究では参考文献3)における各地形分類の増幅度を丘陵地の増幅度で除することで、基準値の換算を行った。この換算結果を図-5 に示す。更に、参考文献3)に基づく図-5 は、地形分類を中小地形³⁾による分類と地質分類を併用しているため、本研究の微地形を利用した図-4 と単純に比較することはできないと考えられる。そこで、本研究における微地形を中小地形分類ごとにまとめ、参考文献3)で考慮されている地質分類項を除外し、地形分類項のみにするこで定性的な比較を試みた。

図-4 および図-5 共に、次の傾向を示している。

- ① 丘陵地 Hs と比較して、他の地形の増幅度は大きい傾向を示す。
- ② 三角州低地、砂州等の河川作用で形成された地形の増幅度は、最も大きくなる傾向を示す。
- ③ 第四紀更新世に形成された台地・段丘地形の増幅度は、丘陵地のそれより大きい傾向を示す。
- ④ 埋立地の増幅度は、三角州低地、河川作用で形成された地形と比較して小さい傾向を示す。

以上より、図-4 および図-5 における地形分類と地盤増幅度の関係は、定性的な類似をしていると言えよう。ただし、定量的には本研究における地盤増幅度が全体的に大きい傾向が認められる。特に、地質年代更新世に形成された台地・段丘である Lmu~Lw の琉球層群台地・段丘と同一地質年代に形成されたと推定される砂礫台地等の台地系地形と比較した場合、前者の地盤増幅度 1.01~2.24 に対して、後者は 0.66~1.46 であり、同一の地質年代にかかわらず、地盤増幅度に差異が認められる。

第四紀更新世に形成された台地・段丘における地盤増幅度に比較的大きな差異が生じる原因として、以下のことが考えられる。沖縄県において、このような台地・段丘を形成する主な地盤は、琉球層群琉球石灰岩層である。この琉球石灰岩層は、固結した岩塊の状態の部分から N 値 20 以下を示すような砂礫状、砂状、粘土状の層が複雑に堆積しており、変化に富んだ状態で堆積している。また、固結部の圧縮強度が 19.6~29.4(MN/m²) 以上である^{11,10)}。したがって、琉球層群台地・段丘における地盤増幅度のばらつきは、琉球層群の堆積状況が影響していると考えられる。

提州 Ce の観測点における地盤情報が無いため、観測点付近における Ce の地盤情報より地盤種別を推定した。その結果、観測点の地盤種別は第 III 種地盤と推定された。既往の研究結果^{3), 4)}と同様に、本研究においても第 III 種地盤と推定される地形の地盤増幅度が最も大きいことが確認できる。

(3) 応答スペクトルによる地盤増幅度

既往の研究において、各地域における地盤増幅度の推定には、PGA および PGV が主に用いられて^{3)~5)}きた。道路橋示方書では、固有周期ごとの設計水平震度を日本国内で観測された 394 成分の強震記録における加速度応答スペクトルの統計解析結果に基づいて設定している²²⁾。そこで、地震動スペクトルから得られる最大応答スペクトルに基づいた地盤増幅度の推定も可能であると考えられる。

よって、次に加速度応答スペクトルおよび速度応

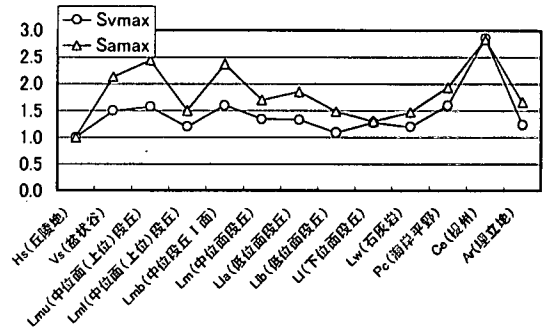


図-6 応答スペクトルによる地盤増幅度

答スペクトルの最大値(前掲 Sa_{max} および Sv_{max})に基づいた地盤増幅度と地形分類の関係について検討した。ここでは、前述の PGA と PGV の場合と同様に、地形分類項から地盤増幅度を推定した。図-6 にその結果を示す。この図から以下のことが認められる。

最大応答スペクトルによる地形分類と地盤増幅度の関係は、他の地震動特性値による地盤増幅度と地形分類の関係と概ね同様な傾向が認められる。Lmu, Lmb, Lla および Ce の加速度応答スペクトルの地盤増幅度は大きい傾向が認められる。また、 Sa_{max} による地盤増幅度は、他の地震動特性値による地盤増幅度より大きい傾向が認められる。

以上より、各地形分類ごとの地盤増幅度と最大応答スペクトルとの間には有意な相関が認められることから、応答スペクトルに対して地形分類項を考慮した回帰モデル式(6)の適用が可能であると結論づけられよう。

5. 地形分類と地震動応答スペクトル特性

ここでは、前述の地形分類を含めた回帰モデルである前掲式(6)を用いて、擬似加速度応答スペクトル回帰分析を行った。

また、周期 T は、0.1~1.0(sec)間を約 0.05(sec)ピッチ、1.0~5.0(sec)間を約 0.5(sec)ピッチで取出し、回帰分析を行った。

$\log S(T) = c_1(T)M - c_2(T)\log X + c(T) + D_i(T)$ (6) (前掲)

ここで、4.(1)と同様に地形分類項 $D_i(T)$ は、丘陵地 Hs を基準としている。また、前述の式(17)を応答スペクトル $S(T)$ に適用すると地盤増幅度 $AR_{iHs}(T)$ の値は次式(19)で表すことができる。

$$AR_{iHs}(T) = 10^{D_i(T) - D_{Hs}(T)} \quad (19)$$

また、4.(1)と同様、この地盤増幅度 $AR_{iHs}(T)$ は、周期 T ごとの Hs に対する地盤増幅度と考えられる。

図-7および図-8に回帰分析結果を示す。図-7は、Type1~3(前掲図-2)の地質層序におけるHsに対する地盤増幅度であり、地形分類としてはLmb, Lla, Llb, PcおよびCeが対象となる。また、図-8は、Type4~6(前掲図-2)の地質層序におけるHsに対する地盤増幅度であり、Hs, Vs, Lmu, Lml, Lm, Ll, Lw, PcおよびArが対象となる。ここで、Pcは地質層序Type1~3およびType4~6にあるため、図-7および図-8に同じ値を示す。また、地質層序Type1~6における相関係数の推移を図-9に示す。

(1) 地質層序特性とスペクトル特性

図-7と図-8から以下のことが確認できる。

① 関東地区の観測結果に基づく研究によると、III種地盤に分類される埋立地の地盤増幅度は、大きくなることが確認されている²⁾。しかし、今回の結果からは、この傾向は認められない。その理由として、当該地形における地盤構成が地域によって相違することが考えられる。参考文献3)においてもこの点を指摘している。沖縄県地域における埋立地は、さんご礁のイノー(礁池)で大規模な埋立てが行われているため⁷⁾、埋立て層厚が浅くなることが考えられる。また、琉球層群琉球石灰岩層が堆積していることも重要な要因であると考えられる。沖縄県地方における埋立地 Ar の地震計設置箇所付近で得られた地盤データによると、埋立層厚が7m、沖積層厚が10m、洪積層(琉球層群)25mとなっている。また、その地点におけるPS検層結果を基に、道路橋示方書による地盤特性値 T_0 は0.32(sec)であり、II種地盤に分類される²⁵⁾。したがって、当該地形において、沖縄県の地盤増幅度は、他地域の地盤増幅度より小さくなると考えられる。

② 沖積平野である海岸平野 Pc における地盤増幅度が比較的小さい理由としては、上記①Arと同様に、沖積層が5m~20m程度と比較的薄く堆積しており、また、Ar同様に琉球層群琉球石灰岩層が堆積している³⁾ためであると考えられる。

③ 図-7における地形分類 Ce と Lmb は、周期(T)0.1~5.0(s)の領域で地盤増幅度が1.5~3.0程度であり、他地形分類の地盤増幅度より比較的大きい傾向を示している。

④ 図-8に示す全地形分類において、周期(T)0.1~0.2(s)間の地盤増幅度が大きく、その領域の地盤増幅度は約2.0~3.0程度を示している。また、周期(T)が0.2以上では、地盤増幅度は1.0~1.5程度に推移する傾向が認められる。

⑤ 上記③④より、Type1~3とType4~6の地盤増幅特性は相違する傾向が認められる。この両者の地

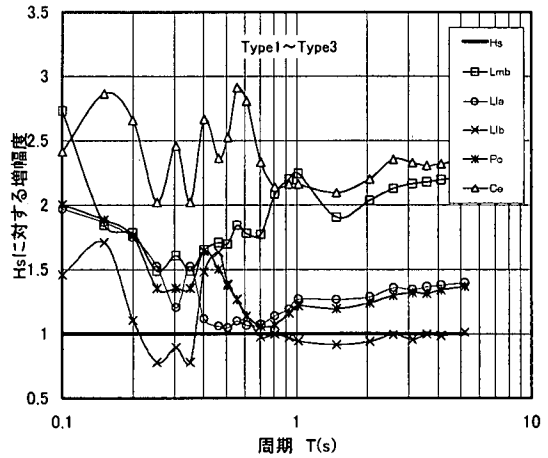


図-7 各周期TにおけるType1~Type3の地形分類項

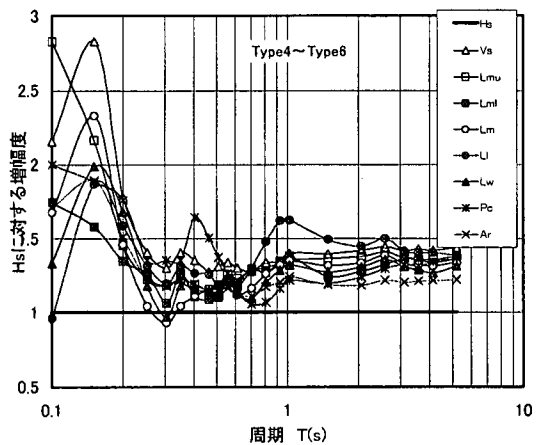


図-8 各周期TにおけるType4~Type6の地形分類項

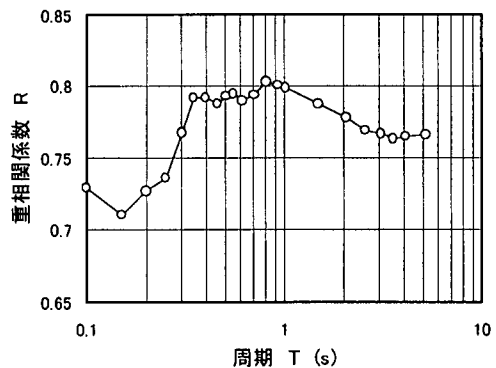


図-9 重相関係数Rと周期Tの関係

質層序の相違点の1つは、前掲図-2に示すように、地質層序中の島尻層群の有無である。よって、上記③④は島尻層群が起因していると考えられる。

上記③④⑤は、せん断弾性波速度 Vs が300(m/s)以上で定義される工学的基盤²⁵⁾以深における地盤

特性が、地表面地震動特性へ影響を及ぼすことを示していると考えられる。よって、今後は現行の設計用応答スペクトル²⁵⁾に対しては工学的地盤以深に堆積する島尻層群の地盤特性を補正する必要があると思われる。

(2) 地形効果とスペクトル特性

過去の地質調査から、島尻層群は約1000m以上堆積していることが確認されている^{26), 27)}。そこで、この深い位置まで地盤を考慮し、図-10に示す成層地盤モデルを利用して周波数応答関数を求めた。重複反射法に適用した地盤モデル(図-10(b))の最上層の動的物理定数は、沖積層として設定した。図-10において、島尻層群を解放基盤とした。これは、丘陵地Hsを想定したモデルと考えられる⁸⁾。このHsモデルに対して、解放基盤面Hsの直上に沖積層厚Hが5m, 7m, 10mの厚さで堆積する地表面の地盤増幅度を図-11に示す。また、図-11に、Type4~6の地形分類ごとの地盤増幅度と道路橋示方書のI種地盤に対する地盤増幅度も示す。この図から、島尻層群に沖積層が堆積する場合、短周期成分において地盤増幅度が大きくなることが確認でき、図-8と同様な傾向が認められる。また、図-10および図-11から、以下のことが確認できる。

① 参考文献8)によると、本研究で利用した地形分類において、沖積層が存在する地形分類は、ArとPcのみであると考えられ、図-10(b)の地盤モデルと類似する。ArとPc以外の他地形分類では、最上層が琉球層群(洪積層)であり、図-10に示す地盤モデル(最上層が沖積層)とは相違する。

② 図-11に示すように、回帰分析から得られた各周期(T)ごとのHsに対する地盤増幅度と重複反射法から得られる地盤増幅度は、類似した傾向を示している。このことから、ArおよびPcでは、観測記録の回帰分析結果と周波数応答関数は対応していると考えられる。しかし、ArおよびPc以外では、最上層の地盤特性が異なるにもかかわらず、地盤増幅特性は類似する傾向が認められる。

これらの結果より、地形特性は、地表面地震動特性へ影響を及ぼすと考えられる。したがって、今後は、地震動特性に対する地形特性の影響(地形効果)について評価を行い、地形効果に関する補正係数を設定する必要があると考えられる。

6. まとめ

本研究では、亜熱帯島嶼地域の例として沖縄県地

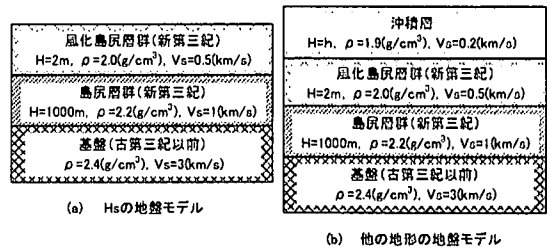


図-10 Type4~6の地盤モデル

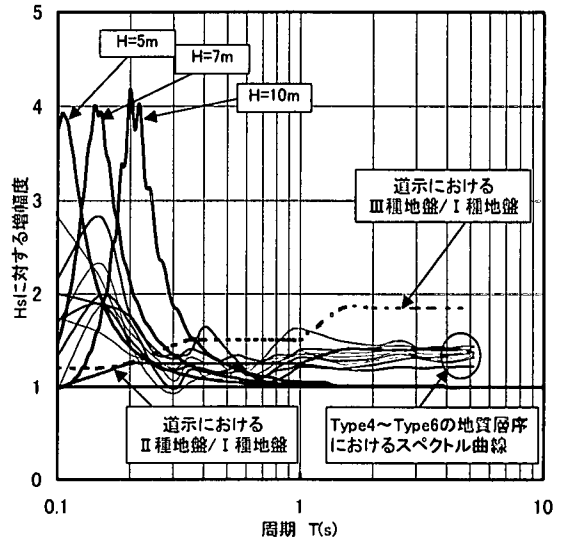


図-11 Type4~6における地盤増幅度の計算結果

地方を選定し、同地域で観測された水平2方向成分264組の地震波を基に、同地域における地形分類と地震動特性の関係の把握を試みた。これらの地震動特性値について回帰分析を行い、地形分類がパラメータとして回帰式に寄与することを確認した。また、この回帰分析を利用して、地盤増幅度の推定を試みた。本研究により得られた結果をまとめると、次のようである。

- 1) 地震動特性値の回帰分析において、通常用いられるパラメータである地震マグニチュード M および震源からあるサイトまでの距離 X に、地形分類項 D_i を追加する有効性が認められた。
- 2) 本研究の地震動特性値に基づく地盤増幅度と既往の研究における地形分類ごとの地盤増幅度の傾向は、定性的に類似していることが認められる。定量的には、本研究における地盤増幅度が大きい傾向が認められた。

3) 第四紀更新世に形成された台地・段丘において、その地盤増幅度に大きなばらつきがある。これは、砂礫状、砂状、粘土状および岩塊が複雑に混在する琉球層群琉球石灰岩層の影響であると考えられる。

4) 既往の研究は、埋立地や沖積平野の地盤増幅度は大きくなることを確認している³⁾が、本研究では、この傾向は認められなかった。これは、砂礫状、砂状、粘土状および岩塊が複雑に混在する琉球層群琉球石灰岩の影響であると考えられる。

本論文で評価した事項は、主に定性的に検討した結果である。これらの結果を設計に反映させるためには、工学的基盤以深に堆積した島尻層群に対する現行の設計応答スペクトルの補正および微地形効果に対する地震動特性の補正など定量的な検討課題が多く残されており、今後の検討事項と考えている。

また、地震動は隣接する微地形間で影響を及ぼし合うと考えられるため、隣接微地形による影響の評価についても検討が必要であると考えられる。

謝辞：本研究におきまして、地震動に関するのデータを提供していただいた沖縄県消防防災課の関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 年縄巧, 山崎宏晃: 地震観測・常時微動観測に基づくローム台地と沖積低地の地震動特性の比較, 土木学会論文集, No. 612/I-46, pp. 265-274, 1999.
- 2) 翠川三郎, 作川孝一: 1987年千葉県東方沖地震の地震応答スペクトルにみられる地盤特性評価, 日本建築学会構造系論文集, No. 447, pp. 31-37, 1993.
- 3) 大西淳一, 山崎文雄, 若松加寿江: 気象庁地震記録の距離減衰式に基づく地点増幅特性と地形分類との関係, 土木学会論文集, No. 626/I-48, pp. 79-91, 1999.
- 4) 福岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報を利用した広域震度分布予測, 日本建築学会構造系論文集, No. 447, pp. 51-56, 1993.
- 5) 西坂理永, 福和伸夫, 荒川政和, 銭傑: 国土数値情報を活用した地盤増幅度と地震動の予測, 第2回都市都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp. 341-344, 1997.
- 6) 福和伸夫, 荒川政和, 西坂理永: 国土数値情報を活用した地震時地盤増幅度の推定, 構造工学論文集, Vol. 44B, pp. 78-84, 1998.
- 7) 沖縄県: 土地分類基本調査, 沖縄本島中南部, 1983.
- 8) 松島良成, 矢吹哲哉, 有住康則: 沖縄県における地盤の動的物理定数の推定法について-地形分類図の利用-, 土木学会論文集, No. 665/VI-49, pp. 171-176, 2000.
- 9) 島博保, 奥蘭誠之, 今村選平: 土木技術者のための現地踏査, 鹿島出版, pp. 34-35, 1981.
- 10) 古川博恭: 琉球石灰岩, 「九州沖縄の特殊土」, 土質工学会九州支部, pp. 185-198, 1983.
- 11) 松島良成: 琉球石灰岩層におけるN値の評価について, 第53回土木学会年次講演会III, pp. 796-797, 1998.
- 12) 松島良成, 矢吹哲哉: 那覇市内における支持層標高と地表標高の相関について, 第54回土木学会年次講演会VI, pp. 284-285, 1999.
- 13) 松島良成, 矢吹哲哉: 地盤情報データベースを利用した基礎設計用地盤モデルの推定法について, 第55回土木学会年次講演会VI212, 2000.
- 14) 沖縄県: 土地分類基本調査, 沖縄本島中南部, 1983, 宮古島, 1984, 石垣島, 1985.
- 15) 沖縄県: 沖縄県地震被害想定調査報告書, pp. 8-13, 1997.
- 16) 土木学会耐震工学委員会: 動的解析と耐震設計-動的解析の方法, 技報堂出版, pp. 181-182, 1989.
- 17) 大塚, 金井: 耐震設計, 建築構造講座第12巻, コロナ社, pp. 37-38, 1961.
- 18) 佐藤智美, 佐藤俊明, 川瀬博, 植竹富一: 地震観測記録の応答スペクトルとフーリエスペクトルの回帰係数の違いとその解釈, 日本建築学会構造系論文集, No. 506, pp. 83-92, 1998.
- 19) 壇一男, 宮腰淳一, 八代和彦: 中小規模地震の観測記録から得られる地盤増幅特性に基づく大規模地震の応答スペクトルの簡易評価法, 日本建築学会構造系論文集, No. 480, pp. 35-46, 1996.
- 20) 太田外氣晴, 大野晋: 強震記録による震源域を含む地震動の平均特性, 日本建築学会構造系論文集, No. 479, pp. 31-40, 1996.
- 21) 理論地震動研究会: 地震動-その合成と波形処理-, 鹿島出版会, pp. 122-124, 1994.
- 22) 日本道路協会: 道路橋示方書・同示方書V耐震設計編, pp. 75-80, 1996.
- 23) Joyner, W.B. and Boore, D.M.: Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-motion Records Including Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, 71, pp. 2011-2038, 1981.
- 24) 松本嘉司: 土木解析学(I), 技報堂出版, pp. 279-282, 1971.
- 25) 日本道路協会: 道路橋示方書・同示方書V耐震設計編, pp. 43-48, 1996.
- 26) 木崎甲子郎: 琉球孤の地質誌, 沖縄タイムス社, pp. 107-114, 1985.
- 27) 福田 理: 沖縄島における島尻層群の地質と地下水, 地下水と井戸とポンプ, 社団法人地下水技術協会, Vol. 22, No. 8, 1980.

EVALUATION ON SEISMIC GROUND MOTION CHARACTERISTICS AT MICRO-RELIEF IN THE SUBTROPICAL SMALL ISLAND

Yoshinari MATSUSHIMA, Tetsuya YABUKI and Yasunori ARIZUMI

In examining the prevention of earthquake disaster at particular site, it is needed to investigate correlation of its landform and subsurface layers with ground-motion characteristics. Several methods how to evaluate the characteristics have been proposed. However, the application of the former methods to subtropical small islands like Okinawa prefecture should be examined for their validities. Thus, this study examines, first, the peculiarities of the landform and subsurface layers of Okinawa prefecture as a typical example of subtropical small islands. Then, the interactive relationship between their peculiarities and the ground -motion characteristics under the strong-motion which have been observed in the Okinawa prefecture are investigated and a practical evaluation formula for site-amplification is proposed. Finally, the proposed formula for its validity is examined by comparing with the general evaluation presented formerly.