

境港における常時微動観測による 表層地盤構造と鳥取県西部地震被害の関係

長尾 毅¹・西守男雄²・宮田正史¹・小濱英司³・海老原健介⁴

¹正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

²国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

³正会員 独立行政法人 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

⁴正会員 科学技術庁重点研究支援協力員 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

鳥取県西部地震により、港湾・空港施設には液状化を伴う被害が発生した。このうち境港においては、外港竹内地区において大規模な液状化が発生するなどの被害が発生したが、外江地区においては被害はほとんど発生しないなど、地区別に被害程度の差が大きかった。本研究においては、液状化発生箇所・未発生箇所それぞれにおいて常時微動アレー観測などを実施し、レイリー波の位相速度などを算出した。算出した位相速度などより観測地点毎の地下構造の違いを検討し、地下構造と地震被害との関係について考察した。

Key Words: microtremor, phase velocity, Rayleigh wave, S-wave velocity, liquefaction

1. はじめに

2000年10月6日に発生した鳥取県西部地震により、多くの土木施設が被害を受けた。港湾・空港土木施設については、境港や米子空港（美保飛行場）において液状化を伴う被害が生じた。このうち境港においては、外港竹内地区において大規模な液状化が発生するなどの被害が発生したが、外江地区においては被害はほとんど発生しないなど、地区別に被害程度の差が大きかった。このため、本研究においては、液状化発生箇所・未発生箇所それぞれにおいて常時微動アレー観測などを実施し、レイリー波の位相速度や地盤の固有周期を算出した。算出した位相速度などより観測地点毎の地下構造の違いを検討し、地下構造と地震被害との関係について考察した。なお、米子空港においても常時微動アレー観測を実施しており、その結果は別途報告している¹⁾。

2. 検討対象地点

図-1に検討対象地点を示す。常時微動観測を実施した各地区の被害状況は次の通りである。

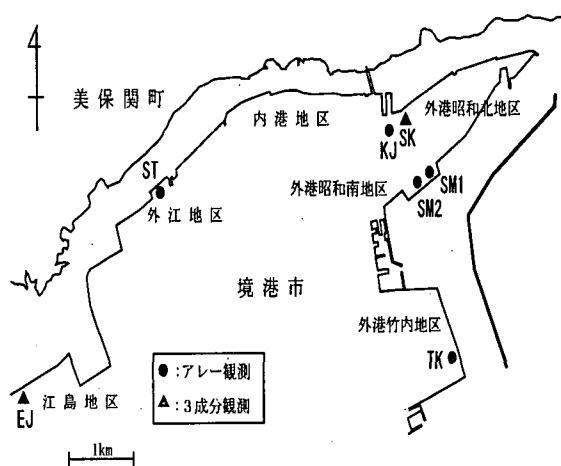


図-1 観測地点

①外港昭南地区 SM1, SM2

重力式岸壁(-7.5m,-10m,-13m)の建設されている地区である。岸壁の法線の出入りはほとんどなかったが、岸壁背後に段差が生じた。特に-13m岸壁部分(SM1)において段差が大きく、かつ液状化による噴砂が認められた。その他の岸壁の背後においては噴砂の痕跡は認められなかった。なお-10m岸壁(SM2)は裏埋部分はロッドコンパクションにより液状化対策が施されている。

②外港昭和北地区 SK

栈橋式岸壁(-9.0m,-7.5m)の建設されている地区である。地震による岸壁法線の出入りはほとんどなく、ほぼ無被災であった。なお背後地には液状化対策工が施されている。

③外港竹内地区 TK

ポンプ浚渫により埋立られた地区であり、大規模な液状化が発生した。ケーソンヤードではケーソンが約 50cm 程度沈下した。

④外江地区 ST

地震による被害はほとんど見られなかった。液状化の発生した痕跡も認められない。

⑤江島地区 EJ

矢板式岸壁(-9.0,-7.5m)の建設されている地区である。地震による被害はほとんど見られず、液状化の発生した痕跡は認められない。本地点においては物理的な制約からアレー観測を実施できなかったため、3成分観測のみを実施した。

⑥境港湾空港工事事務所 KJ

強震観測が実施されている地点である。鳥取県西部地震による強震記録は(<http://www.phri.go.jp>)にて公開されている。地震時に噴砂などの明瞭な液状化の痕跡は認められなかったが、図-2 に示す強震記録(NS 成分)およびランニングスペクトルを見れば明らかなように、20 秒以上においては長周期成分が卓越し、地盤の剛性が急激に低下したことがわかる。このため、本地点については便宜的に液状化に分類することとする。

以上をまとめて、液状化の発生の有無を表-1 に示す。

3. 観測および解析方法

常時微動観測は、2000 年 10 月 11 日～12 日に実施した。アレー観測については空間自己相関法^{2,3)}を適用した解析を行うため、円周上に 3 点のセンサーを配置したアレー形状とした。アレー半径は 3,10,18m の 3 種類とした。観測はサンプリング周波数 200Hz、観測時間は各アレー半径について 10 分間とした。3 成分観測地点については、200Hz サンプリングの 3 分間の観測とした。

解析方法としては、3 成分観測地点については水平成分と鉛直成分のスペクトル比（以下、H/V スペクトル）を求めることとし、アレー観測については空間自己相関法を適用することによりレイリー波の位相速度を求めた。微動 H/V スペクトルは微動波形をもとに、乱れの少ない部分から 40.96 秒の区間を 3 分間の観測では 3 区間、それ以上の観測では 6 区間抽出した。水平成分については直角 2 方向の 2 乗和平均の平方根とした。各区間について H/V スペクトルを求め、バンド幅 0.5Hz の Parzen ウィンドウで平滑化を行い、抽出した区間について平均化を

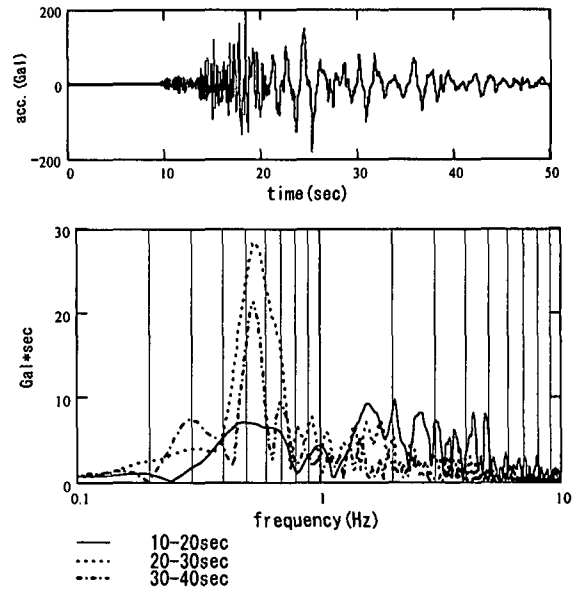


図-2 強震記録およびランニングスペクトル

表-1 観測地点の液状化発生の有無

SM1	液状化
SM2	非液状化
TK	液状化
SK	非液状化
ST	非液状化
EJ	非液状化
KJ	液状化（ただし、噴砂は認められない）

行った。空間自己相関法の適用による位相速度の算出においては、観測記録を 50%重なり の 40.96 秒の区間に分割してコヒーレンスを算出した。算出されたコヒーレンスをもとに $r=10, 18\text{m}$ の場合は 0.6Hz、 $r=3\text{m}$ の場合 1.6Hz のバンド幅の Parzen ウィンドウを用いてスペクトルの平滑化を行った。

4. 解析結果

(1) 位相速度

アレー観測を行った 5 地点の観測結果をもとに得られるレイリー波の位相速度を図-3 に示す。レイリー波の位相速度は地盤の S 波速度構造に強く依存し、短周期側では表層の S 波速度に、長周期側では基盤の S 波速度に近付く。また、走時で重み付けした一定の深さの平均 S 波速度 (V_{sx}) は特定の波長レイリー波位相速度 ($C(y)$) と相関が高く、レイリー波の位相速度の特定の波長における値を読みとることにより地盤の平均 S 波速度が直接推定できる^{4,5)}。平均 S 波速度と最も相関の高いレイリー波位相速度の波長は表-2 に示すとおりである。

5 地点の位相速度より直接推定した表層地盤の平均 S 波速度を液状化・非液状化の各地点について整理すると表-3 の通りである。

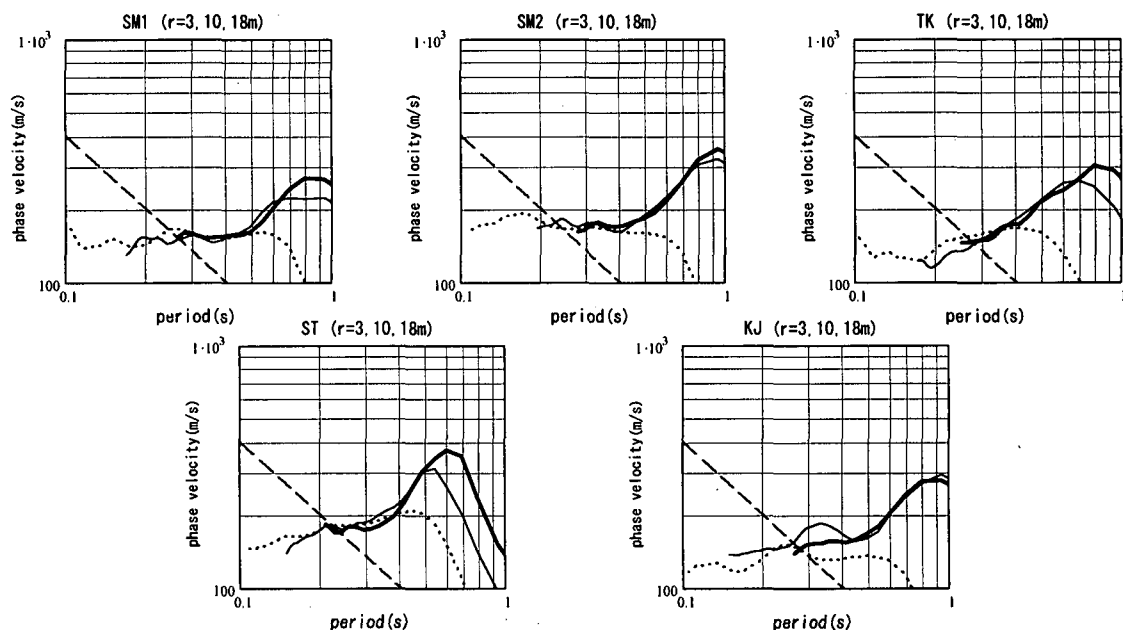


図-3 位相速度 (r=3m : 点線, r=10m : 細線, r=18m : 太線)

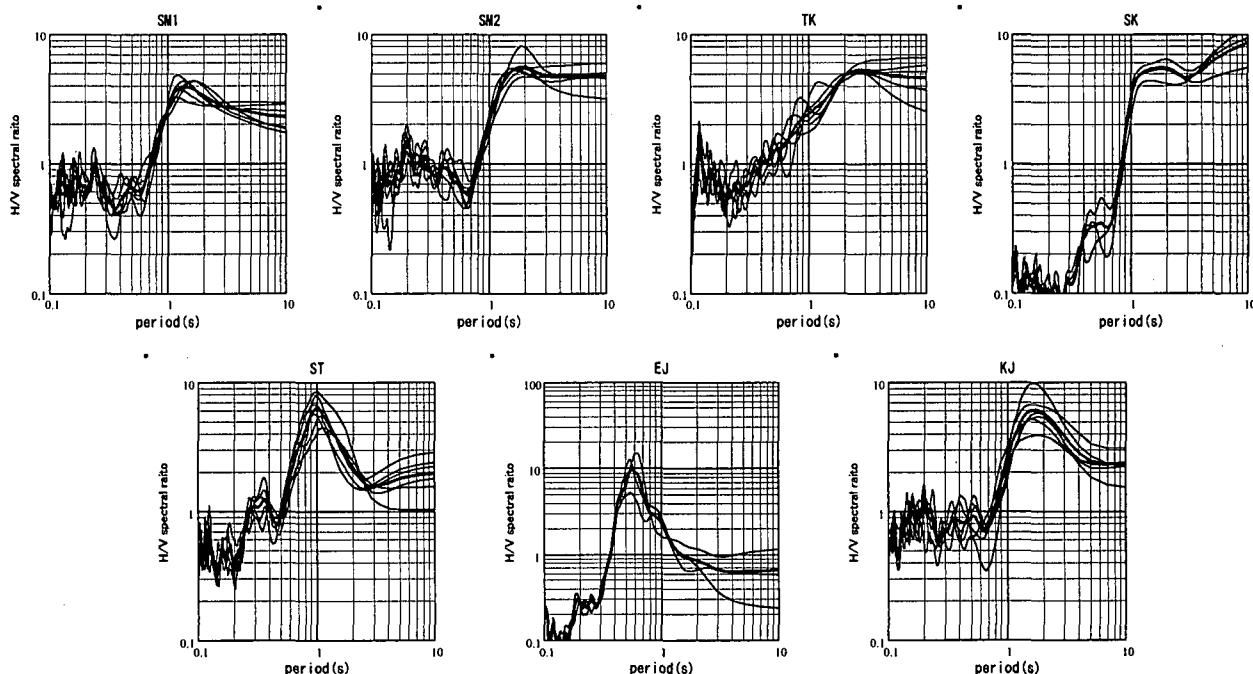


図-4 H/V スペクトル (平均 : 太線)

表-2 平均S波速度と
レイリー波位相速度波長の関係

Vs10	C(15)
Vs15	C(20)
Vs20	C(30)
Vs25	C(35)
Vs30	C(40)

表-3 平均S波速度と液状化有無の関係

	(m/s)	
Vsx	液状化	非液状化
Vs10	115 - 135	145 - 160
Vs15	120 - 140	150 - 160
Vs20	135 - 145	165
Vs25	140 - 150	165 - 170
Vs30	145 - 150	170 - 175

表-4 固有周期と液状化有無の関係

	(sec)	
	液状化	非液状化
T0	1.4 - 2.0	0.6 - 1.5

(2) H/V スペクトル

7地点の微動 H/V スペクトルを図-4に、H/V スペクトルより読みとった地盤固有周期について整理すると表-4のとおりである。

(3) 地盤被害と地盤構造の関係

以上の結果より、鳥取県西部地震による地盤被害の有無と地盤構造については比較的明瞭な対応が見られ、液状化の発生は表層 10m 程度の平均 S 波速度について

140m/s 未満, 表層 30m の平均S波速度について 150m/s 未満が目安となる。また, 地盤固有周期については 1.4 秒程度以上が目安となると考えられる。ただし, これらの値は地震発生後の観測値によるものであることに注意が必要である。

観測を行った地点のうち, 境港湾空港工事事務所 KJ においては強震計設置時に速度検層が実施されている。図-5 に地点 KJ の地下構造を示す。速度検層の結果より得られる SH 波重複反射理論による伝達関数, 基本モードレイリー波の H/V 振幅スペクトルおよび微動 H/V スペクトルの対比を図-6 に, 基本モードレイリー波の理論位相速度と観測位相速度の比較を図-7 に示す。

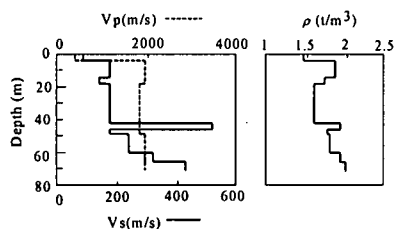


図-5 地点 KJ 地下構造

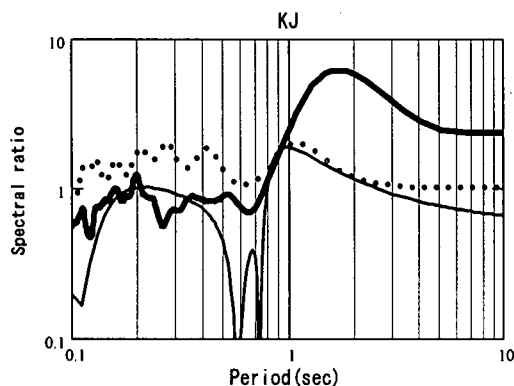


図-6 スペクトル比の比較

(レイリー波 H/V : 細線, 微動 H/V : 太線, 伝達関数 : 点線)

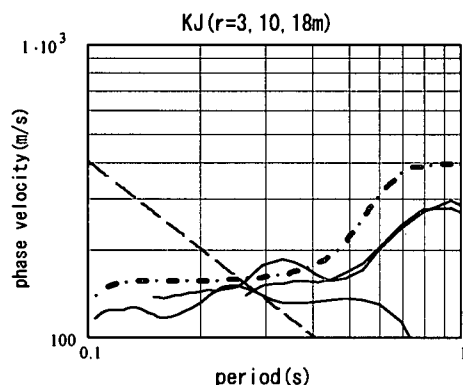


図-7 位相速度の比較

(観測位相速度 : 実線, 理論位相速度 : 鎖線)

スペクトル比について, 微動 H/V スペクトルについて

は 1.7 秒程度にピークがあるが, 基本モードレイリー波 H/V スペクトルおよび伝達関数のピークは 1.0~1.1 秒程度であり, 微動の結果と速度検層の結果にはやや開きがある。次に位相速度についても, 理論値と観測値にはやや違いが認められる。短周期側で観測位相速度は周期の変化に伴って多少変動が大きい, これは高次モードの影響と考えられる。変動する観測位相速度の下限値を基本モードの観測位相速度と考えると³⁾, 観測位相速度は理論位相速度を下回っている。このように, スペクトル比および位相速度のいずれの結果からも, 観測時点の S 波速度が速度検層時の S 波速度を下回っていることが示唆される。本研究における観測は鳥取県西部地震の本震後 6 日目に実施したものであり, 地震による剛性の低下の影響が考えられる。したがって, 上述した平均 S 波速度や固有周期は, 地震発生前の値には適用できない可能性が高い。

5. おわりに

本研究においては, 鳥取県西部地震により被害を受けた境港において微動観測を実施し, 位相速度より得られる平均 S 波速度や地盤固有周期と地震被害との関係について考察を行った。常時微動観測結果には地震による地盤の剛性低下の影響があると考えられることから, 地震発生後半年以上が経過した現在, 同一地点において再度微動観測を実施して位相速度の変化などを検証する必要がある。最後に, 常時微動観測の実施におきまして, 運輸省第三港湾建設局境港湾空港工事事務所 (観測当時) の協力を頂きましたことに感謝します。

参考文献

- 1) 長尾 毅・西守男雄: 常時微動観測による米子空港地下構造と鳥取県西部地震被災の関係, 第 56 回土木学会年次学術講演会, 投稿中
- 2) Aki, K. : Space and time spectra of stationary stochastic wave, with special reference to microtremors, Bulletin, Earthquake re-search Institute, Vol.35, pp.415-456, 1957.
- 3) 紺野克昭: 地下構造推定に用いる 2 点間および 3 点間空間自己相関法に関する理論的検討, 土木学会論文集 No.654, I -52, pp.367-375, 2000.
- 4) 紺野克昭, 片岡俊一: レイリー波の位相速度から地盤の平均 S 波速度を直接推定する方法の提案, 土木学会論文集 No.647, I -51, pp.415-423, 2000.
- 5) 長尾 毅, 紺野克昭: 常時微動アレー観測に基づく表層地盤の平均 S 波速度推定精度に関する研究, 土木学会論文集 (投稿中)