

埋立地盤での鉛直アレー観測記録に基づく 地震動非線形増幅特性の検討

岡二三生¹、杉戸真太²、八嶋 厚³、山田耕一郎⁴、天野洋和⁵、

¹正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

²正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

³正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

⁴正会員 神戸市工務課長 港湾整備局新都市整備本部 (〒650 神戸市中央区加納町6-5-1)

⁵正会員 市川工務店土木部 (〒500 岐阜市鹿島町6-27)

Key Words : Nonlinear ground motion amplification, Borehole strong motion records, Reclaimed land

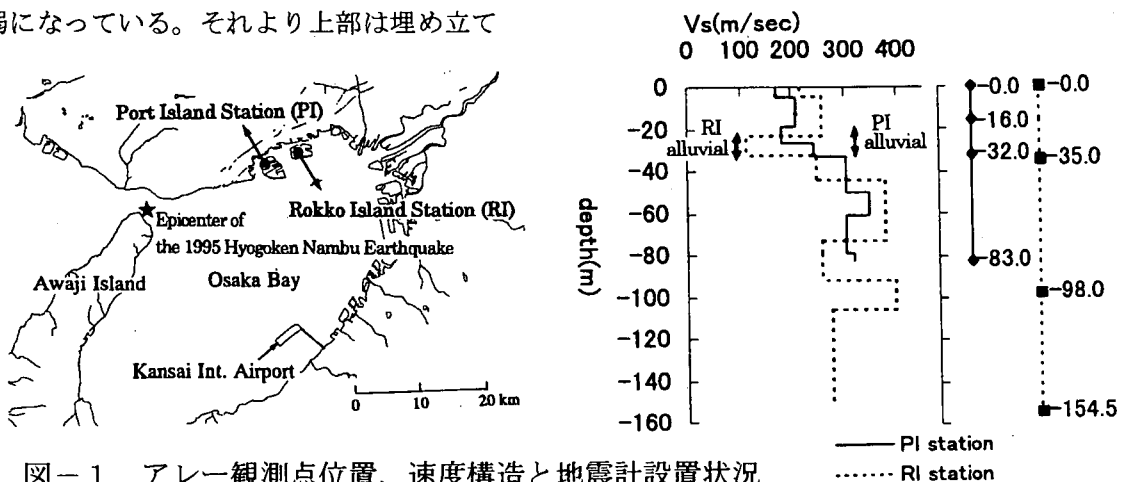
兵庫県南部地震において液状化の激しかった神戸市ポートアイランド(PI)では、鉛直アレー観測システムにより貴重な強震記録が得られた。当システムではこの地震以前より観測が行われており、前震、余震を含む多くの記録が得られている。また、六甲アイランド(RI)においては、本震記録は得られなかったものの、前後の期間で多くの記録が得られている。液状化の程度が異なるこの2つの埋立地盤での約2年間の強震記録をもとに、軟弱な地盤での地震動の複雑な増幅特性についていくつかの視点から検討を行っている。ここでは、その基礎的事項について報告する。

1. 両人工島での鉛直アレー記録の概要

図-1(a)に示す神戸市の両人工島では、兵庫県南部地震以前より多くの有感地震の記録が得られている。どちらも、地表観測点と3つの地中観測点からなる鉛直アレー観測システムを構成している。図-1(b)に、それぞれの観測点におけるせん断波速度分布と、地震計設置レイアウトを示した。以下、ポートアイランド観測点をPI、六甲アイランド観測点をRIと呼ぶ。PI観測点では、地下15~33mの部分に沖積層が存在し、そのうち15~23mの上部沖積層がやや軟弱になっている。それより上部は埋め立て

層である。RI観測点では、23.7~33.8mに沖積層があり、その部分のせん断波速度は115m/secでPI観測点に比べてさらに軟弱となっている。埋め立てが終了した時期が、PI観測点では1969年頃、RI観測点では1979年頃であり、沖積層の圧密期間の違いがせん断波速度の違いの一つの要因とも考えられる。

対象とした記録は、表-1に示す39地震によるものである。これらを本震とその前後の6つの期間に分類した。同表に示すように、地震計測システムの不備によりいずれかのシステムで記録が得られていない期間もある。



表－１ 地震の諸元とグループ化

地震区分	dataNo.	発震日	M	depth(m)	震源地	Log.	Lat.
本震以前	46281309	6/28 13:09	4.6	13	京都府中部	35.08.	135.39.
	47281002	7/28 10:02	4.1	9	大阪府南部	34.19.	135.19.
	4a241151	10/24 11:51	4.3	15	京都府中部	35.00.	135.31.
	4b092027	11/9 20:27	4	14	兵庫県東部	34.55.	135.23.
	4b100038	11/10 00:38	3.9	14	兵庫県東部	34.55.	135.23.
本震	51170546	1/17 5:46	7.2	13	淡路島	34.64.1	135.17.9
本震直後1	51170653	1/17 5:53	4.9	8	兵庫県南東部	34.40.7	135.03.9
	51170858	1/17 8:58	4.7	19	淡路島	34.35.2	135.00.4
	51180525	1/18 5:25	4.5	15	兵庫県南東部	34.41.8	135.10.9
	51181334	1/18 13:34	4	15	兵庫県南東部	34.41.3	135.10.5
本震直後2	51190109	1/19 1:00	4	14	兵庫県南東部	34.47.8	135.19.7
	51190152	1/19 1:52	3.3	10	大阪湾	34.38.7	135.07.5
	51190223	1/19 2:23	3.4	34	兵庫県南東部	34.41.7	135.02.1
	51190510	1/19 5:10	3.2	18	兵庫県南東部	34.39.8	135.09.6
本震以後1	51201538	1/20 15:38	3.7	14	兵庫県南東部	34.41.8	135.12.3
	51222144	1/23 21:44	4.3	16	兵庫県南東部	34.37.6	135.19.1
	51252346	1/25 23:46	4.7	17	兵庫県南東部	34.47.4	135.18.0
本震以後2	51260101	1/26 1:01	3.5	13	兵庫県南東部	34.46.0	135.16.0
	51262308	1/26 23:08	3.5	15	兵庫県南東部	34.47.4	135.18.6
	51280806	1/28 8:06	3	5	兵庫県南東部	34.41.0	135.10.7
	51290941	1/29 9:41	3.3	14	兵庫県南東部	34.39.4	135.08.6
	51291602	1/29 16:02	3.6	13	兵庫県南東部	34.41.1	135.10.8
	52021619	2/2 16:19	4.2	18	兵庫県東部沿岸	34.41.7	135.09.0
	52030436	2/3 4:36	3.7	15	兵庫県東部沿岸	34.41.8	135.11.2
	52032037	2/3 20:37	3.4	12	兵庫県東部沿岸	34.43.8	135.16.0
	52061300	2/6 13:00	3.5	12	兵庫県東部	34.47.6	135.19.5
	52182137	2/18 21:37	4.9	13	淡路島	34.26.7	134.48.4
本震以後3	52240803	2/24 8:03	3.3	15	兵庫県東部沿岸	34.42.9	135.12.5
	53051004	3/5 10:04	3.2	15	兵庫県東部沿岸	34.43.7	135.14.8
	54061050	4/6 10:50	4	12	兵庫県南東部	34.47.4	135.19.2
	55040553	5/4 5:53	3.6	15	兵庫県南東部	34.41.7	135.11.1
	55041742	5/4 17:42	4.1	18	大阪湾	34.32.2	134.54.3
	55080236	5/8 2:36	3.3	14	兵庫県南東部	34.42.6	135.12.8
	55150733	5/15 7:33	3.4	13	大阪湾	34.38.8	135.07.9
	55192035	5/19 20:35	4.4	19	大阪湾	34.36.4	135.02.1
	56281034	5/28 10:34	4	14	兵庫県南東部	34.40.4	135.10.1
	56190838	6/19 8:38	3.4	13	兵庫県南東部	34.45.9	135.16.2
	59120630	9/12 6:30	3.6	16	兵庫県南東部	34.41.5	135.11.8
	5a140204	10/14 2:04	4.8	17	大阪湾	34.37.0	135.06.4

本震前後の地震数＝38 内ポートアイランド観測点＝35 六甲アイランド観測点＝27

注1 :六甲アイランドにおいてdataが得られていない。

注2 :ポートアイランドにおいてdataが得られていない。

2. 地中地震計の設置誤差の補正

埋設地震計の観測方位の設置誤差については、多くの指摘がある^{1),2)}。著者ら³⁾は、本震の鉛直アレー記録が得られたシステムでの設置方位誤差について検討し、ポートアイランド観測点については、GL-83mの強震計の観測方位が時計まわりに水平面で22°ずれていることを指摘した。これに従い、ポートアイランドでのGL-83mのすべての記録について方向補正を施した。方向補正により最大加速度が最大60%程度変化することもあり、増幅率を検討するうえできわめて重要な事項であることがわかる。なお、本震記録が得られなかった六甲アイランドでの記録の検討においては、有意な設置誤差を見出すことができなかったため、原記録をそのまま用いることとした。

3. 低い地震動レベルでの増幅特性の比較

本震以前および本震後両人工島で記録が得られている期間での地震記録より、最大地動の増幅特性を検討した。図－2は、表－1の本震以前に区分される記録から得られる最大加速度の増幅特性（NS、EW、UD成分）を比較したものである。同図は、最深部の最大加速度により正規化した増幅分布を表している。PI地点で水平成分がGL-16mより浅い部分で大きく増幅しているのに対して、RI地点では、地表への増幅率が相対的に小さいことを示している。上下動成分については、両地点とも同様に地表付近で大きく増幅している。図－3は、表－1の本震以後2（95年1月26日～2月24日）に属する地震について、同様に最大加速度の増幅特性を比較したものである。RI地点では図－2とやや傾向の異なる

る記録も見られるが、概して図-2と同様の結果を示している。すなわち、PI 地点での水平成分の地表近くでの大きな増幅、ならびに RI 地点での低い増幅率が同様に示されている。

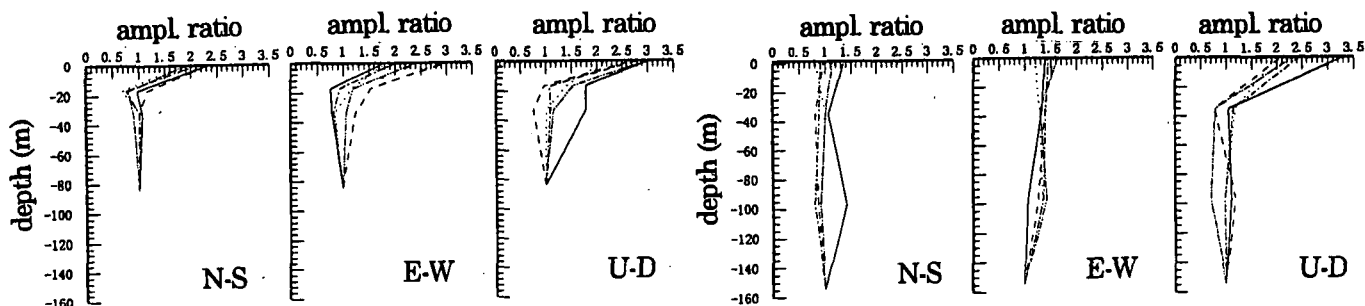
4. 数値計算による増幅率の検討

地盤の地震応答解析に用いられる等価線形化法は、液状化等の極端な地盤特性の変化を伴わないケースについては、必要とする地盤パラメータも少ないことから多用され、特に逆解析には有効な手法として現在でも利用されている。ここでは、等価ひずみに周波数特性を与える手法⁹⁾を導入した等価線形化法を用いて、3つの入力地震動レベルによる両観測点での増幅特性を求めた。図-4は、兵庫県南部地震におけるPI観測点 G.L.-83m での方向補正記録 N-S 成分を、1.0、0.2、0.05 倍に振幅調整した波形を G.L.-83m (PI 地点)、G.L.-154.5m (RI 地点) に入力した場合の最大加速度の分布を示したものである。入力地震動の最大加速度が 26cm/sec^2 の場合には、PI 観測点では地表で増幅し、RI 観測点では増幅しておらず、図-2、3の観測結果と対応している。一方、入力地震動レベルが大きくなると、地盤の非線形性の影響が現れ、地中部で増幅率が 1.0 を下回っている。特に RI 地点では軟弱な沖積層の部分で

大きく減衰し、結果として地表での最大加速度の増幅率が低くなっている。従って、とくに RI 観測点では、強震時には埋立て層への入力強度が押さえられることが考えられ、兵庫県南部地震における両人工島での液状化の程度の違いに影響した可能性もありうると考えられる。

5. 増幅率の経時変化

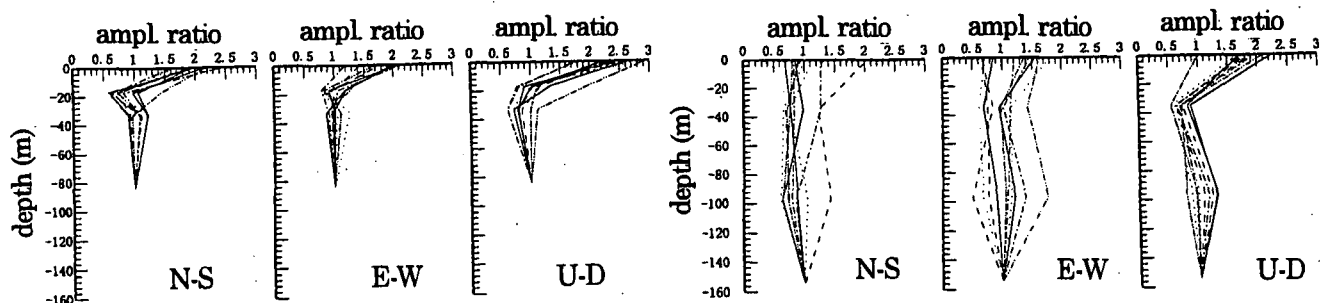
地震動のレベルが比較的低い場合には、PI 地点では最大加速度が地表付近で大きく増幅していることが示された。本震時には激しい液状化現象が発生したため、最大加速度は G.L.-83m の基盤より地表の方が低かったが、この地表への増幅率が時間の経過とともにどのように変化していったかについて検討した。図-5は、G.L.-83m から地表への最大加速度の増幅率を時間の経過とともに示したものである。水平成分では、本震以前の5地震における増幅率の平均値が 2.2~2.3 倍であるのに対して、本震直後の余震では本震時よりも低下し、その後徐々に回復している様子がわかる。本震後1~2週間後で本震以前の増幅率に近づいているのに対して、上下動では増幅率が本震以前、本震直後ともほぼ 2.5 倍前後で変化していない。



(a) ポートアイランド (PI) 観測点

(b) 六甲アイランド (RI) 観測点

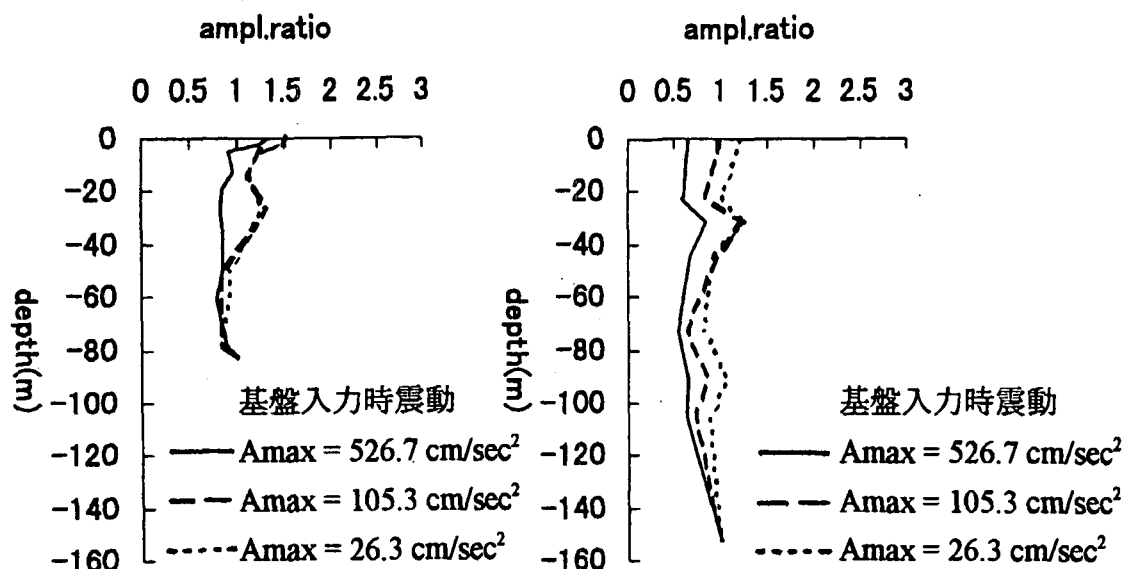
図-2 最大加速度の増幅特性 (表-1における本震以前の地震)



(a) ポートアイランド (PI) 観測点

(b) 六甲アイランド (RI) 観測点

図-3 最大加速度の増幅特性 (表-1における本震以後2の地震)



(a) ポートアイランド (PI) 観測点

(b) 六甲アイランド (RI) 観測点

図-4 地盤応答解析による最大加速度の増幅特性

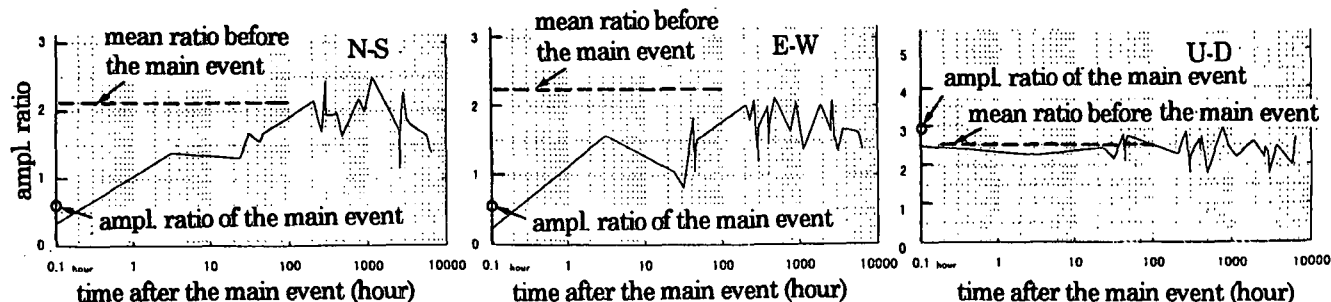


図-5 最大加速度の増幅率の経時変化 (ポートアイランド観測点)

5. まとめ

両人工島での貴重なアレー観測記録に基づく地震動増幅特性に関する基礎的検討について述べた。埋立て層下の沖積層の動的物性値の違いが両人工島での液状化の程度にどのように影響したかについては、さらに詳細な検討が必要であるが、液状化層下部への入力地震動レベルが異なっていた可能性については、観測記録と震動解析結果の両面から指摘した。

また、増幅特性の経時変化は最大加速度について見出されたが、スペクトル増幅特性の経時変化などについては別途発表する。なお、本報は、神戸市からの委託研究として行っている検討事項の一部について報告したものである。

参考文献

- 1) 鎌田晟雄、大石 博、関口宏二：埋設管路の三次元的地震時挙動観測 (3) - 三次元アレー観測による表面波の位相速度と下町配水幹線の耐震性の検討 -、水道協会雑誌、第 56 巻、第 5 号、pp.39-53、1987。
- 2) 山崎文雄、鹿 林、片山恒雄：アレー観測記録における地震計設置誤差の評価、土木学会論文集、No.432、I-16、pp.231-240、1991。
- 3) M.Sugito, K.Sekiguchi, A.Yashima, F.Oka, Y.Taguchi, Y.Kato: Correction of Orientation Error of Borehole Strong Motion Array Records obtained during the South Hyogo Earthquake of Jan.17, 1995, 土木学会論文集、No.531/I-34、pp.51-63、1996。
- 4) 杉戸真太、合田尚義、増田民夫：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察、土木学会論文集、No.493/III-27、pp.49-58、1994。