

アレー観測結果に基づく上下動の特性

伊東守¹・大塚久哲²・豊永臣悟³

¹正会員 佐藤工業株式会社 中央技術研究所 土木研究部門 (〒812-8581 東京都中央区日本橋)

(九州大学大学院工学研究科建設システム工学専攻 博士過程)

²フェロー 工博 九州大学教授 工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

³学生員 九州大学大学院工学研究科建設システム工学専攻 修士過程 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

本研究は、各地で実施されている鉛直アレー観測により得られた観測波形を基に、上下動の特性を検討し地中構造物の耐震解析用鉛直入力地震動作成に資するものである。特に多くの鉛直アレー観測記録が得られている日本原子力研究所(大洗サイト)における鉛直地震動の特性について検討を行った。

また、観測地点の一次元と二次元の地盤モデルを用いて、波動法解析および動的FEM解析を行うことにより、上下動の地盤による増幅傾向を推定した。この解析結果と観測結果を比較し、解析に基づく深度方向の上下動応答値に関して推定精度を検討すると共に、最大加速度やフーリエスペクトルを用いて水平動応答値との比較を行った。

Key Words : Vertical array records, Vertical ground motion, Simultaneous input

1. はじめに

これまでの地震動の増幅に関する研究では、水平動成分の増幅を取り扱ったものが多かったが、鉛直地震動の増幅に関する研究も行われるようになり、その特性も次第に明らかになりつつある¹⁾。

また筆者らは鉛直地震動が地中構造物に与える影響の評価を念頭に置き、地中構造物の設計用鉛直方向入力地震動に関した研究を行っている^{2)~3)}。本文では、日本原子力研究所大洗研究所(茨城県大洗町)等合計6サイトにおいて観測された鉛直アレー観測記録波形を用いた、鉛直地震動の増幅の仕方やその周波数特性の検討及び動的解析による地中応答波と実観測波との比較を行った。

2. アレー観測概要

(1) 大洗サイト(日本原子力研究所)⁴⁾

大洗サイトでは、地中鉛直方向にサーボ型地震計4台が設置されており、1地震波に対して水平2方向、鉛直1方向の合計12波の鉛直アレー観測が実施されている。またこの地域はわが国有数の地震発生地域である鹿島灘に面しており、特性の異なる様々な地震動が多く観測されているが、本研究では大洗サイトにおける鉛直アレー観測記録のうち、1987年から1992年までに観測さ

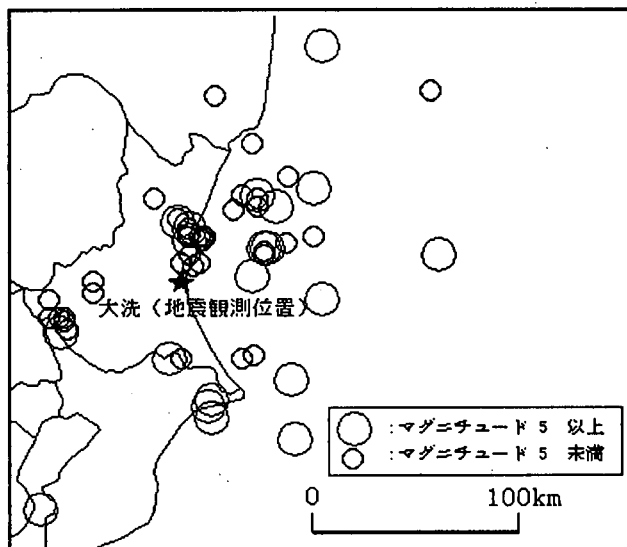


図1 観測地点および対象地震震源分布
れた57地震の結果を検討の対象とした。図1に対象とした地震波の震源位置と観測位置の分布図を、表1に大洗サイトの地盤物性値を示す。

(2) その他の鉛直アレー観測記録⁵⁾

1995年の兵庫県南部地震において大規模地震動が観測された神戸ポートアイランド(KPI)、高見フローラルタウン(TFT)、高砂発電所(TKS)、総合技術研究所(SGK)、猪名川(ING)の5サイトについて検討を行った。表2にこれら5地点の鉛直アレー観測記録の概要を示す。

表1 大洗地点の地盤物性値

TP(m)	地層	地盤計 設位置	土層厚 H(m)	単位体積重量 γ (t/m ³)	せん断波速度 V_s (m/s)	せん断弾性係数 G (t/m ²)	ポアソン比 ν
+36.5	ローム層	No.4 -○-	3.5	1.33	230	7200	0.46
+33.0		(GL-1.2m)	4.5	1.93	350	24100	0.43
+28.5			1.5	1.78	300	16300	0.45
+27.0	見和層		11.0	1.82	440	36000	0.41
+16.0			6.0	2.05	650	88400	0.33
+10.0		No.3 -○-	12.0	1.93	430	36400	0.46
-2.0		(GL-32.1m)	1.5	1.89	380	27800	0.47
-3.5	石崎層		24.5	1.85	370	25800	0.47
-28.0			15.0	1.87	390	29000	0.45
-43.0		No.2 -○-	11.0	2.02	490	49500	0.45
-54.0		(GL-95.2m)	44.0	1.79	480	42100	0.45
-98.0	鮮新統		25.0	1.82	540	54200	0.44
-123.0		No.1 -○-	15.5	1.86	590	66100	0.43
-138.5	中新統	(GL-173.6m)	-	1.99	1020	211300	0.36

表2 鉛直アレー観測記録の概要

サイト名	機関名	最大加速度(gal)
神戸ポートアイランド	神戸市	789 gal (GL-16m,UD)
高見フローラルタウン	鴻池組技術研究所	266 gal (GL-1.5m,EW)
高砂発電所	関西電力	198 gal (GL 0m,EW)
総合技術研究所	関西電力	507 gal (GL 0m,EW)
猪名川	阪神高速道路公団	422 gal (GL 0m,NS)

3. 地震波の分析

図2に大洗サイトで観測された57地震の結果の方向別最大加速度倍率(各地点の加速度を最深点の加速度で割ったもの)を示す。ただし、図中の実線は平均値を示している。同図より水平・鉛直ともに増幅の傾向が見て取れる。特に地表面での増幅が大きく、平均値が4倍程度となっている。また、増幅倍率の点では水平動と上下動における増幅傾向の差異は、ほとんど見受けられなかった。

次に図3に上下動と水平動の最大加速度比を示す。この図より、各観測位置において倍率が1以内に収まっていることから、最大加速度では上下動に対して水平動が卓越していることがわかる。平均倍率では0.4~0.5倍の間であることから、既往の研究成果⁹⁾とほぼ同じ結果となっている。ただし、深さ32mの観測点で倍率が大きく分散していることや、中には1倍を越える地震波が存在すること等を考慮すると、地震波を震源やマグニチュードなど特性ごとに分類した上での検討が必要と思われる。

4. 応答解析結果と実観測波との比較

この章では先に挙げた鉛直アレー観測記録が得られた地盤を用いた応答解析結果と観測結果との比較により、解析による鉛直地震動の再現性について検討を行った。

解析手法として、①1次元重複反射理論による解析、②2次元FEMによる解析の2手法を用いた。モデル化

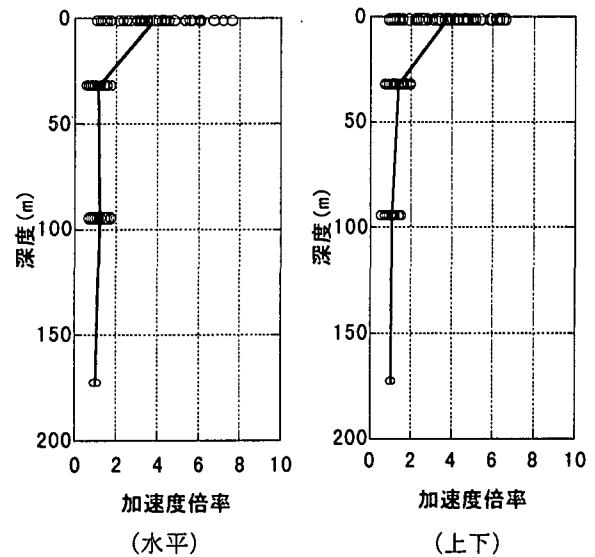


図2 大洗サイトの最大加速度増幅倍率

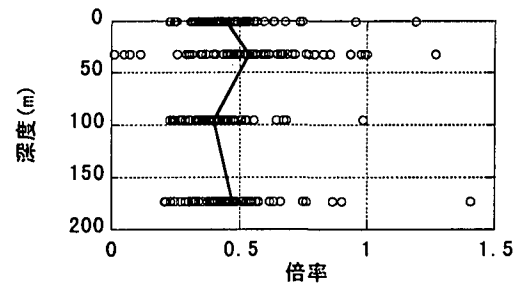


図3 大洗サイトの最大加速度比(上下動/水平動)

については最深点の加速度計が設置されている深さまでとし、その下端に最深点での観測記録を入力し、その応答値の比較を行った。ただし、本文中において大洗では地表面における最大加速度が大きい2つの観測波を用いた結果を、大洗以外のサイトについては地盤モデルの深さが異なる猪名川(30m)、総合技術研究所(100m)の結果に着目して検討を行った。

また解析手法はともに周波数領域とし、地盤は等価線形手法により非線形性を考慮した。地盤のひずみ依存特性は、大洗サイトについては原位置試験の結果を、その他のサイトについては土研式⁹⁾を用いた。

1次元の解析では先に水平動の解析を行い、その収束物性値を基に上下動の線形解析とした。2次元の解析では地中構造物への地震動の入力を考慮して、地震波の単独入力よりも実現象に近いと思われる水平動・上下動の同時入力による等価線形解析とした。

(1) 最大加速度

図4に大洗サイトでの解析による最大加速度結果を、図5、6に猪名川と総合技術研究所の解析結果を示す。

大洗サイトの水平動では解析値は観測値をほぼ正確に再現している。上下動については水平動と比較して再現出来ていない。他のサイトの水平方向においても、解析値が比較的観測波に近い値を示しているのに対して、上下動は再現性が悪い。全体として大洗サイトでの結果が

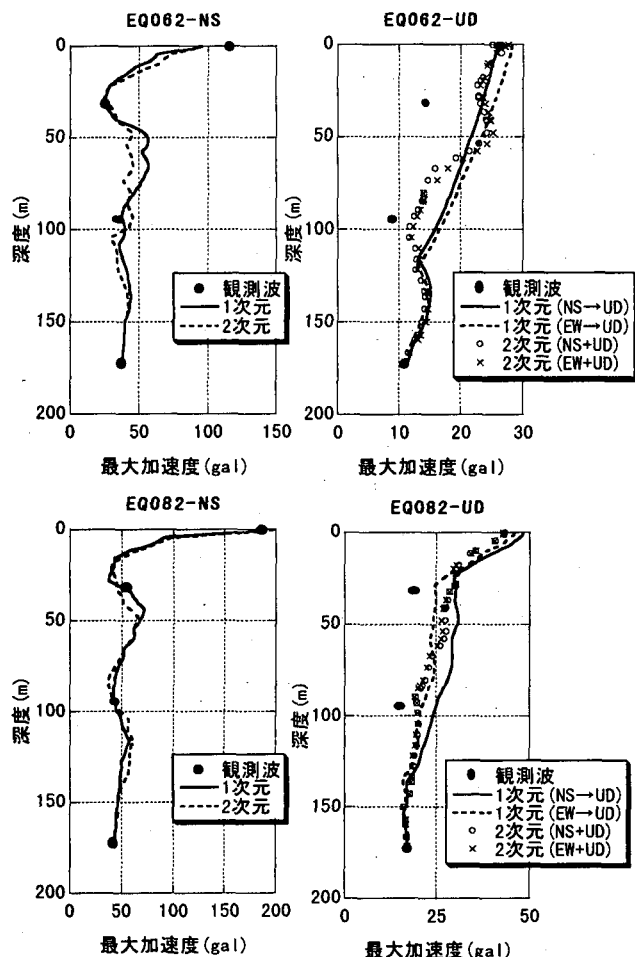


図4 最大加速度比較 (大洗)

実現象、特に水平動を正確に再現できている。この理由として大洗サイトで観測された地震波は規模が小さい(200gal)のに対して、他サイトについては兵庫県南部地震という大規模な地震動であるため、等価線形手法の適用範囲の限界付近であるひずみレベルが0.1～1%程度まで進行したため、実観測波との一致が難しいと思われる。また、上下動の結果が一致していない理由として、地下水位の影響などが考えられる。

上下動における同時入力2ケースを比較すると差異が見られなかった。この結果から解析上では上下動の増幅に対して水平動の寄与の影響が少ないことがわかる。

(2) 周波数特性

図7に大洗の、図8、9に猪名川および総合技術研究所の地表面における解析結果と実観測波のフーリエスペクトル(NS,UD)を示す。ただし、グラフは見やすいようにHanningウィンドウをかけている。

地盤が比較的浅い地点(高見フローラルタウン、猪名川)では観測波と解析結果のフーリエスペクトルはほぼ一致している。その他の箇所についても水平・上下ともに卓越周波数のいくつかは一致している。ただし総合技術研究所のNS方向については猪名川と比較して一致が見られない。これは猪名川、総合技術研究所の地震の規模

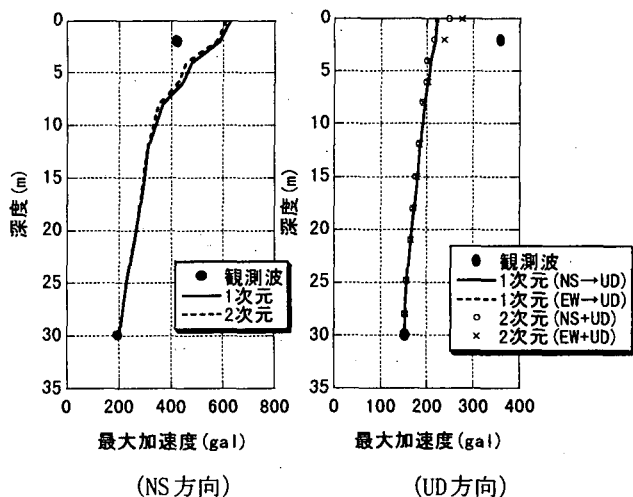


図5 最大加速度比較 (猪名川)

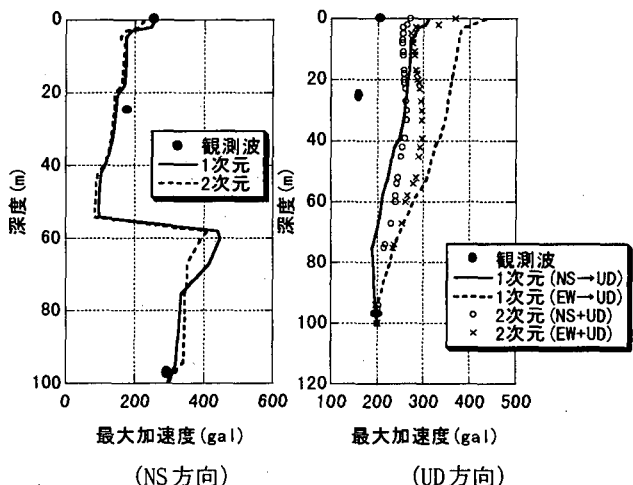


図6 最大加速度比較 (総合技術研究所)

はほぼ同じであるのに対して、それぞれの地盤モデルで深さが異なることによる影響が考えられる。

また、上下動の場合は各ケースにおいて高周波数の解析値が卓越しており、観測波の結果と大きく異なっている。すなわち、上下動の場合はせん断波速度 V_s よりも V_p が大きく影響するため、10Hz以上の周波数領域における卓越が解析によって現れたと思われる。

5. まとめ

本研究では、鉛直地震動の性質の解明および解析による実観測波との整合性について検討を行い、以下の知見を得た。

- 1) 実観測波では、地表面における最大加速度の増幅が地中に比べて大きい。
- 2) 水平動と上下動の最大加速度では、水平動が卓越している。ただし地震ごとのばらつきが大きく、上下動が大きい部分もある。
- 3) 解析結果と実観測波との比較において、水平動では1, 2次元ともにほぼ正確に最大加速度を再現できているが、上下動については再現が難しい。

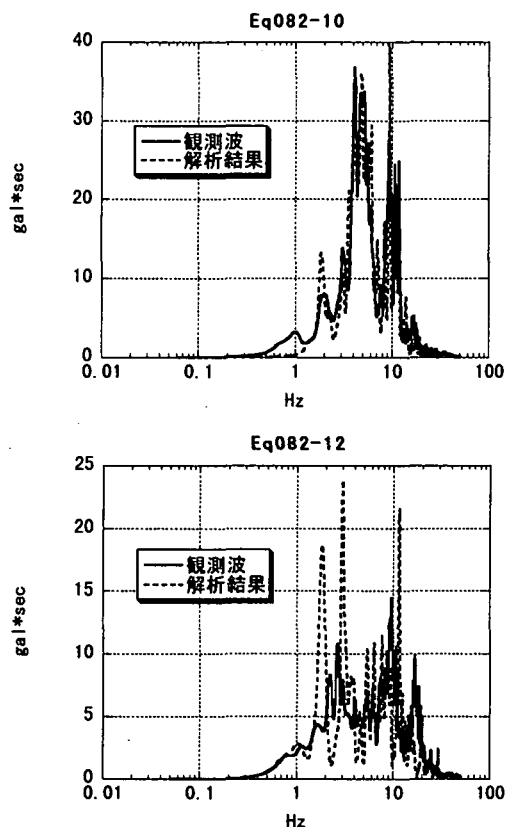


図7 周波数特性比較 (大洗)
(上段: NS 方向, 下段: UD 方向)

4) 周波数特性については、フーリエ振幅に違いは見られるものの、卓越周波数はほぼ再現できている。ただし上下動については実観測波では現れていない高周波領域での卓越が見られ、このことが過度の増幅の一因であると考えられる。

上下動の最大加速度や周波数特性を正確に再現するための今後の課題として、より詳細な地盤データの設定やひずみレベルが大きくなる場合の対策が必要である。上下動の解析を行う場合の精度の向上について、非線形解析などを用い、更に検討を加えたい。

参考文献

- 1) 藤堂正喜, 羽鳥敏明, 千葉脩, 高橋克也, 武村雅之, 田中英朗: 堆積地盤における上下地震動の特性と Qp 構造, 日本建築学会構造系論文集, 第 475 号, pp. 45-54. 1994.
- 2) 伊東守, 大塚久哲, 豊永臣悟, 蛭沢勝三: 鉛直アレー観測加速度波形に基づく鉛直方向成分の増幅特性, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, 第 1 分冊, pp. 1235-1240. 1998.
- 3) 伊東守, 大塚久哲, 豊永臣悟: 鉛直アレー観測加速度波形を用いた地中構造物の応答に及ぼす鉛直地震動の影響, 構造工学論文集, Vol. 45A, pp. 1591-1598. 1999.
- 4) 蛭沢勝三, 安藤和博, 柴田勝之, 穂高志郎, 長屋雅文, 伊東守, 亀岡裕行, 加治木茂明: 自然地震動を利用し

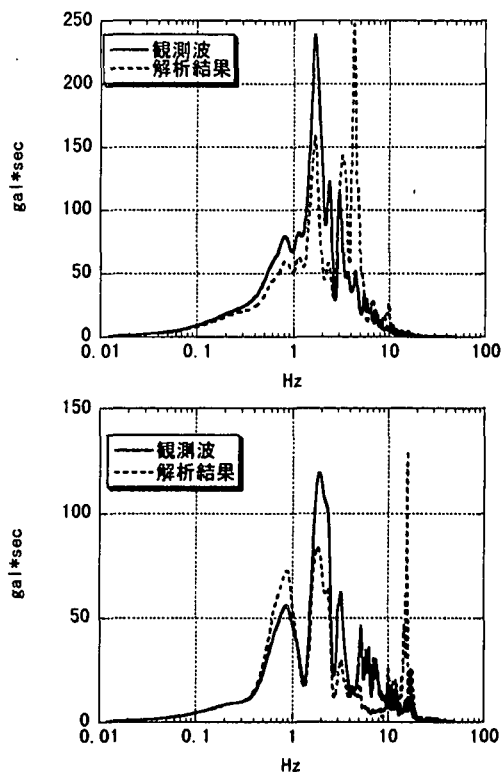


図8 周波数特性比較 (猪名川)
(上段: NS 方向, 下段: UD 方向)

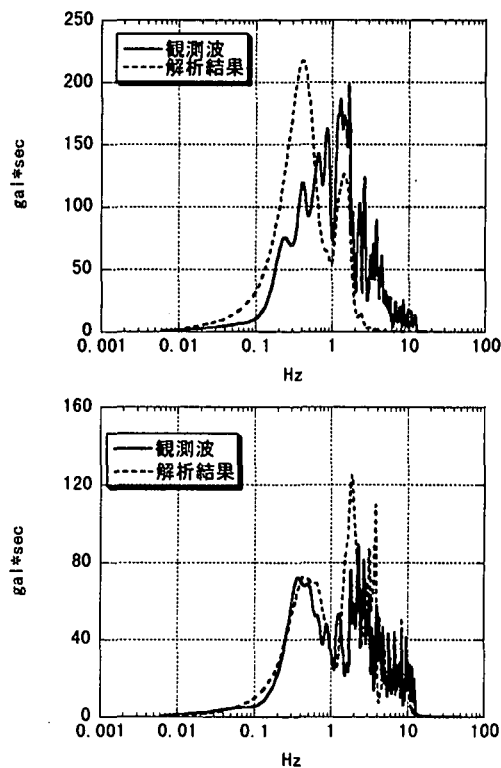


図9 周波数特性比較 (総合技術研究所)
(上段: NS 方向, 下段: UD 方向)

- た機器免震確認試験計画, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, 第 1 分冊, pp. 309-312, 1997.
- 5) (財) 震災予防協会: 強震動アレー観測 / No. 3, 1998.
 - 6) 建設省土木研究所: 地盤地震時応答特性の数値解析法, 土研資料第 1778 号, 1987.