

鉛直方向設計用入力地震動に関する基礎的考察

BASIC STUDY OF VERTICAL GROUND MOTION FOR SEISMIC DESIGN

大塚久哲¹⁾ 伊東 守²⁾ 豊永臣悟³⁾

Hisanori OTSUKA, Mamoru ITOH and Shingo TOYONAGA

This paper investigates the characteristics of vertical ground motions obtained by the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake and at Oharai array observation site in recent several years. After the survey of several design codes concerning the vertical ground motions, observation records treated in this paper are compared to the response acceleration spectra proposed by Building Research Institute in MOC, Japan, and some recommendation are proposed.

Key Words: vertical ground motion, seismic design, underground structure, observation records

1. はじめに

多くの耐震設計に関する指針類において設計用入力地震動が規定されているが、鉛直動を明確に規定した指針類は非常に少なく、たとえあったとしてもその多くは水平動の1/2程度としており、鉛直動が卓越する短周期領域での増幅などを反映した指針類は少ない。現状の設計用入力地震動に関する規定において鉛直動が明確に示されていない理由として、(1)水平動と比較して鉛直動の性質や特性について不明な点が多い、(2)鉛直動による直接の被災事例が少ない、(3)鉛直動が構造物に与える影響に不明な点が多いこと、などが考えられる。ちなみに、現在の地中構造物の耐震設計においても水平動の1/2とすることが提案されている¹⁾。

1995年兵庫県南部地震に代表されるような大規模な直下地震が発生した場合、大きな鉛直地震動が発生する可能性が大きいことは広く認識されるようになった。鉛直地震動単独による構造物への影響は少なくとも、水平動と鉛直動がほぼ同時刻に発生した場合には、水平動が単独で作用した場合と比較して損傷が増大することも予想される。特に地中構造物の地震時挙動における鉛直地震動の影響について、著者らは観測地震波を用いた数値計算によって考察している^{2), 3)}。すなわち、1層2スパンのRCボックスカルバートを対象にした数値計算によれば、水平方向加震時と水平鉛直両方向加震時の断面力増分を比較した場合、後者の方が明らかに断面力が増大し、それによってひび割れ発生箇所が多くなっていることが知られた。特に同時加震の場合、床版スパン中央部と中壁における軸力増加、隅角部における曲げモーメント・せん断力の増加が顕著であり、設計において鉛直地震動の考慮の必要性を示唆するものであった。

しかしながら、鉛直方向設計用入力地震動に関しての提言は、兵庫県南部地震以後も具体的にはなされていないようであり、未だ研究途上の課題と思われる。本研究はこれらの現状を踏まえ、まず、鉛直アレー観測記録の特性分析を行う^{4), 5)}、その結果を元に、既往の指針類^{1), 6), 7), 8)}における鉛直方向設計入力地震動の規定の検討を行い、鉛直地震動の作成に関する基礎的考察を加えて、今後の鉛直地震動の作成に関する基礎的資料を提供するものである。

2. 1 兵庫県南部地震における観測記録⁹⁾

(1) 鉛直アレー観測の概要

1995年の兵庫県南部地震において得られた鉛直アレー観測記録を用いて鉛直動の特性の分析を行う。対象とした鉛直アレー観測サイトは、神戸ポートアイランド(PI)、高見フローラルタウン(FT)、高砂発電所、総合技術研究所、猪名

1) フェロー 工学博士 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門
2) 正会員 佐藤工業(株)
3) 正会員 修士(工学) 新日本製鐵(株)

川の5つであり、このうち神戸PIと高砂発電所では地盤の液状化が確認されている。図-1に兵庫県南部地震の震央位置及び各鉛直アレー観測サイトの位置、表1に各サイトの概要、図-2に各サイトのせん断波速度の分布、図-3に各観測サイトの観測方向別の最大加速度分布を示す。

(2) 最大加速度を用いた検討

図-4は観測された最大加速度の水平動と鉛直動の相関図を、図-5は各地震波における水平動と鉛直動の最大加速度発生時刻の比を示す。図-4の最大加速度の比(水平動と鉛直動の最大加速度： A_h と A_v)は平均で0.8であり、0.3

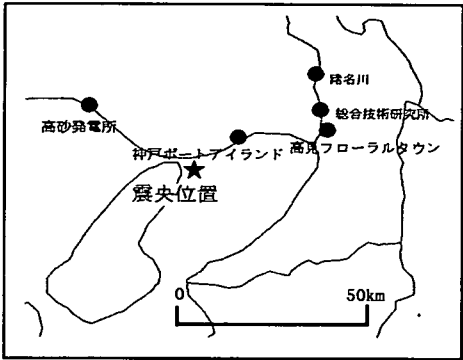


図-1 兵庫県南部地震の震源と観測点

表-1 鉛直アレー観測諸元

サイト名	機関名	地震計設置点数	最大加速度 (gal)
神戸ポートアイランド	神戸市	4	789 gal (GL-16m,UD)
高見フローラルタウン	鴻池組技術研究所	2	266 gal (GL-1.5m,EW)
高砂発電所	関西電力	3	198 gal (GL 0m,EW)
総合技術研究所	関西電力	3	507 gal (GL 0m,EW)
猪名川	阪神高速道路公団	2	432 gal (GL 0m,NS)

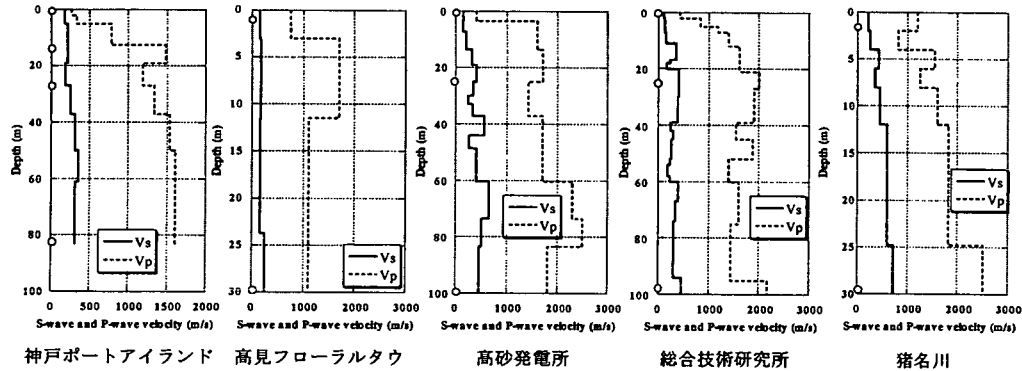


図-2 兵庫県南部地震における各鉛直アレー観測サイトのせん断波速度分布 (○印は地震計設置位置を示す)

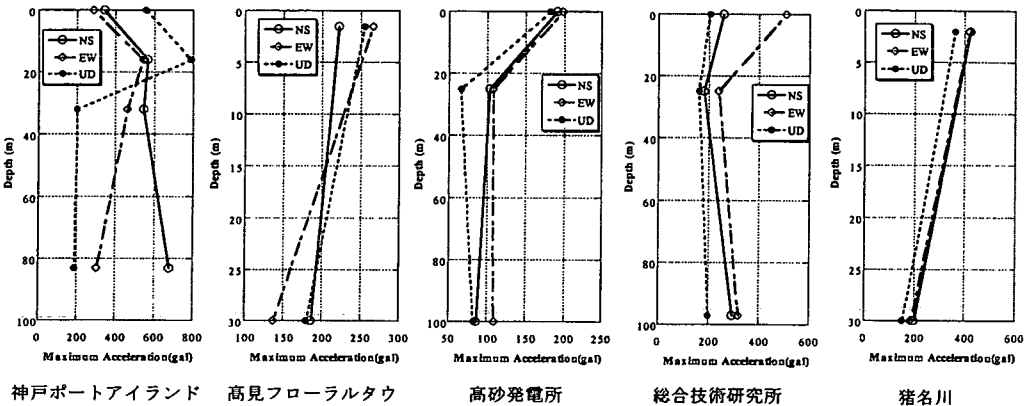
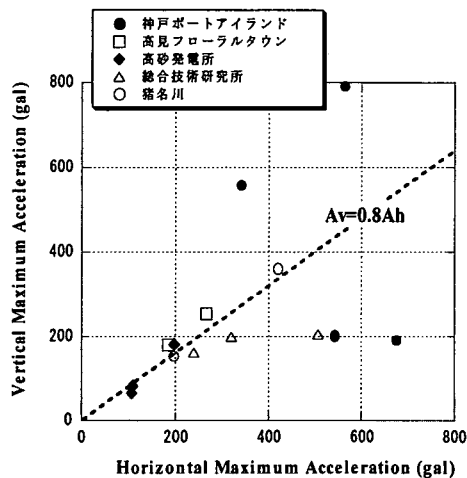


図-3 兵庫県南部地震における各鉛直アレー観測サイトの最大加速度分布

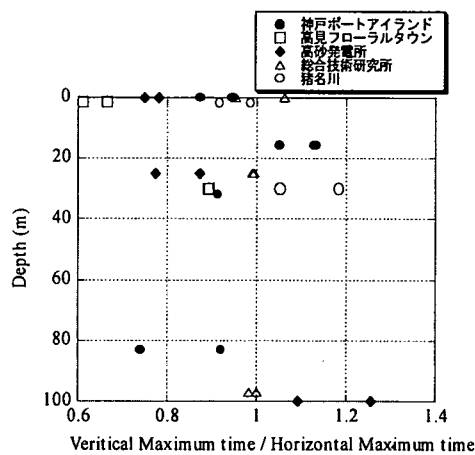
～0.6とする既往の研究成果よりも大きな鉛直動であることがわかる。ただし、神戸PIでは地盤の液状化によって地表面の水平加速度が地中に比べて減少したデータが含まれている。神戸PIのデータを削除しても直線の傾きはほとんど変化しない。図－5の最大加速度発生時刻の比は鉛直動の主要動がP波およびS波のどちらにより生成されるかの確認および水平動と鉛直動の同時性の検討を目的としたものである¹⁰⁾。鉛直動がP波により発生している場合、P波の最大値はS波よりも早く到達し、その比は1よりも小さくなる。逆にこの比が1を超える場合は、鉛直動の主要動がS波により生成されたことの裏付けとなる。結果を見ると、全ての観測深度において発生時刻の比が1を越える場合がある。

(3) 周波数特性の検討

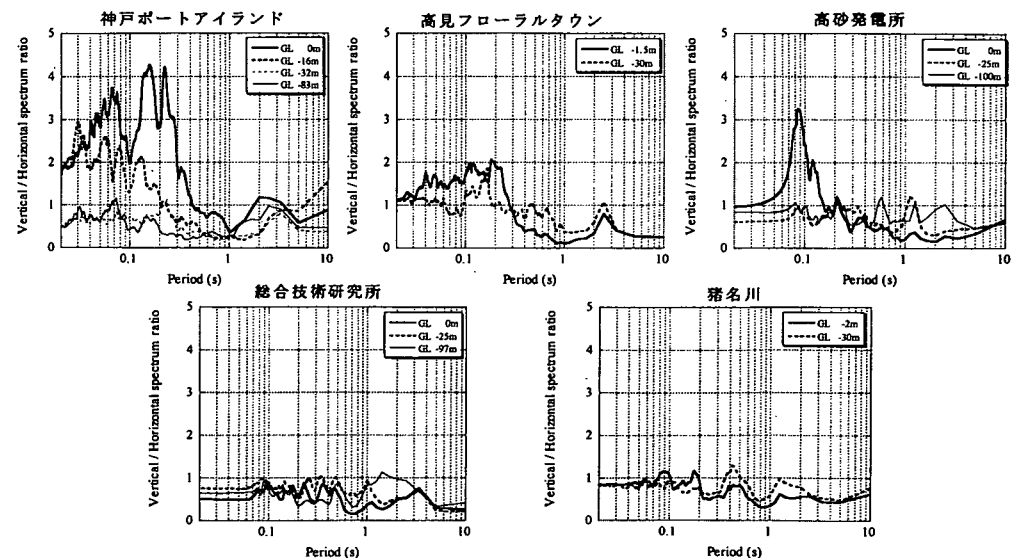
水平動と鉛直動の加速度応答スペクトルの増幅の違いを検討するため、各サイトの各観測位置における加速度応答スペクトルの鉛直動/水平動比を図－6に示す。総合技術研究所と猪名川の鉛直動/水平動比が1倍前後であり水平動が卓越していることがわかる。同様に、ポートアイランドのGL-32mとGL-83m地点では1倍以内に収まっているのに対し、鉛直動の最大加速度が水平動の最大加速度を上回っているGL 0mとGL-16m地点では鉛直動の応答スペクトルが水平動を大きく上回っている。また、鉛直動/水平動比の卓越周期は鉛直動が卓越する短周期側に集中している。



図－4 最大加速度比較 (破線部は平均を示す)



図－5 最大加速度発生時刻の比 (鉛直／水平)



図－6 加速度応答スペクトルの鉛直動/水平動比

2.2 大洗サイトにおける観測記録³⁾

(1) 鉛直アレー観測の概要

日本原子力研究所大洗研究所(茨城県大洗町)において観測された鉛直アレー観測記録を用いた検討を行う(以下大洗サイトとする)。大洗サイトにおける観測記録は兵庫県南部地震より地震の規模は小さいものの、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長期にわたって特性の異なる多くの地震波が観測されていることから、同一の地盤において豊富な地震データがそろっていることや詳細な地盤データがわかっているなどから、表層地盤における地震波の増幅について詳細な検討が可能であり、本研究に対して有用であると考え検討データに加えた。

本研究では、この大洗サイトにおいて1987年～1992年の間に観測された地震波のうち、57地震波を対象とした。大洗サイトの地盤物性値、せん断波速度分布、対象とした地震の震源位置と大洗サイトの観測位置は文献3)を参照されたい。

(2) 最大加速度を用いた検討

水平動と鉛直動の最大加速度の比(図-7)と最大加速度発生時刻の比(図-8)を示す。図-7より、大洗サイトの全観測波の最大加速度比の平均は0.45であり、前節の兵庫県南部地震観測波の最大加速度比0.8よりも小さいが、0.3～0.6としている既往の研究結果と同じ結果となった。前節での兵庫県南部地震の最大加速度発生時刻の比は地表面に近づくにつれて小さくなる(鉛直動の最大発生時刻が水平動よりも早い)傾向が見られた。図-8の大洗観測波においても同様の傾向が見られる。ただし、各地震波ごとのばらつきが大きく、GL-32m以下の3地点ではその比が0.6以下と0.8以上に大別され、0.6～0.8となっている地震波はない。一方、GL-1.2m地点では比が1以下である地震波の数が増えており、GL-1.2mとGL-32mの間で地震波がS波からP波へ変換したことが予想される。この深さにおいては地盤条件の変化が見られるため、この層境界付近での地震波の変化が生じたものと思われる。

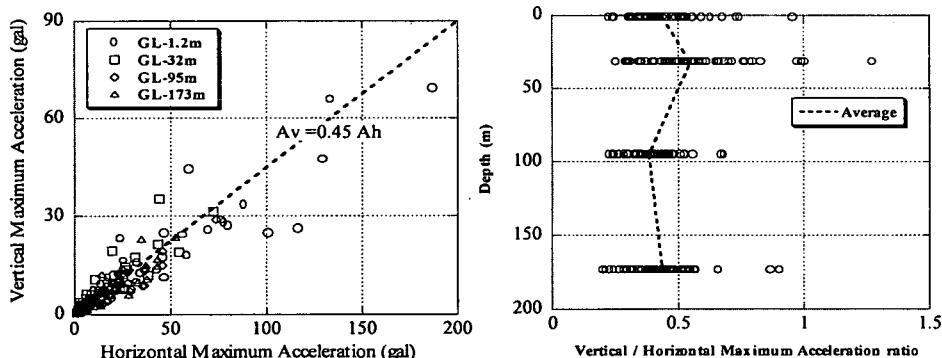


図-7 大洗観測波の最大加速度比較(破線は平均を示す)

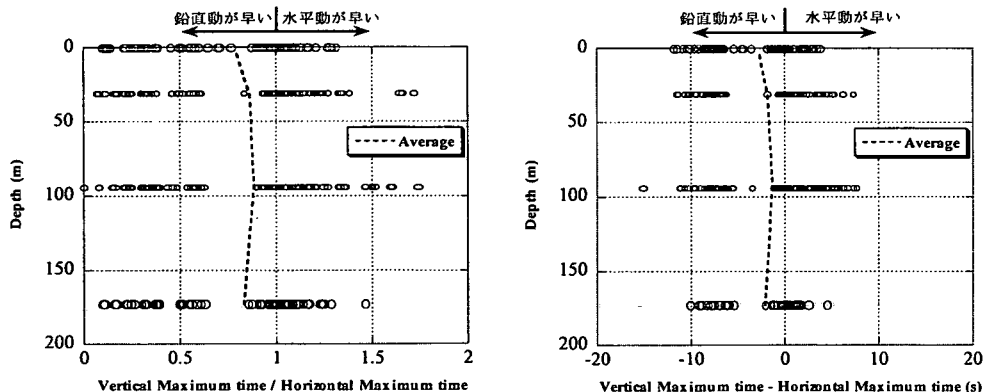


図-8 水平動に対する鉛直動の最大加速度発生時刻の比

(3) 周波数特性の検討

水平動と鉛直動の加速度応答スペクトルの増幅の違いを検討するため、各観測位置における加速度応答スペクトルの鉛直動／水平動の比を図9に示す。この図より、各観測深度ごとに鉛直動が卓越する周期が異なっていることがわかる。特に地表面では0.05秒と非常に短周期側で卓越しており、倍率も約1.1倍と水平動に対して大きな増幅をしていることが特徴である。また、GL-32m地点では地表面と異なり、0.3秒付近での増幅が見られるが、この原因は各地盤における増幅特性の違いによるものと思われる。

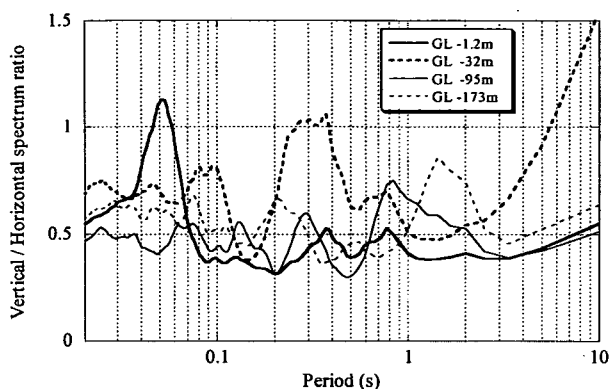


図9 大洗観測波の加速度応答スペクトルの

3. 建築研究所指針における鉛直地震動の規定の検討

代表的な指針類として、設計用入力地震動作成手法技術指針(案)⁵⁾(以下建研指針)、原子力発電所耐震設計技術指針⁶⁾(以下原子力指針)、道路橋示方書・同解説V耐震設計編⁷⁾(以下道示)の3指針類を対象として調査したところ、鉛直地震動に関する明確な規定が存在するのは建築研究所指針のみであり、原子力指針では単純に水平動の1/2、道路橋示方書では鉛直地震動に関する規定は見られない。そこで本研究では建研指針における鉛直動の規定に着目して検討を行うものとする。

建研指針では、鉛直動の目標スペクトル(上下動設計用応答スペクトル) $\mu S(T)$ を(1)式により決定している。

$$\mu S(T) = \xi \cdot B(T) \cdot L(T) \cdot G(T) \quad (1)$$

ただし、 ξ ：地震活動度係数、 $B(T)$ ：上下動基準応答スペクトル、 $L(T)$ ：上下動やや長周期補正係数、 $G(T)$ ：上下動増幅特性係数である。このほかに、砂質地盤にあって過剰間隙水圧の影響を考慮する必要がある場合や特殊な地形の影響を考慮する必要がある場合は、 $S(T)$ に上下動液化補正係数 $P(T)$ と上下動地形効果係数 $I(T)$ を乗じるようになっているが、いまだ不明な点が多いとして指針では $P(T)=I(T)=1.0$ としている。

表-2は各鉛直アレー観測サイトの地盤データと計算に必要なパラメータを示したものであり、これらを用いて(1)式から算出した上下動設計用応答スペクトル $\mu S(T)$ と、地表面における実観測波の擬似速度応答スペクトルの比較を図-10に示す。この図から、神戸PIの記録がレベル2の目標スペクトルを上回っていることを除けば、兵庫南部地震において観測された鉛直動は建築指針で規定される目標応答スペクトルとほぼ一致していることがわかる。特に、構造物への影響が大きいのと思われる0.1～1秒の周期帯域では、各観測波ともにレベル1とレベル2の中間に位置しており、建築研究所指針で想定している地震動のレベルに合致している。

以上より、上下動設計用応答スペクトル $\mu S(T)$ が兵庫県南部地震で得られた実観測波に比較的良好に一致していることが明らかとなったが、前述の(1)式は補正係数を含んでいるので、各係数ごとの検討を以下に行うこととする。表-2より建研指針に定められる工学的基盤に対応するのは、高砂発電所のGL-100m地点、総合技術研究所のGL-97m地点、猪名川地点のGL-30m地点の3地点である。図-11ではこの3地点の速度応答スペクトルと上下動基準応答スペクトル $B(T)$ を比較している。この図より、上下動基準応答スペクトル(レベル2)は工学的基盤における3地点の観測波をほぼ包括しており、工学的基盤における目標応答スペクトルを適切に設定していると言える。実は上下動基準応答スペクトル $B(T)$ は水平動基準応答スペクトル $B(T)$ に図-12に示す上下動成分係数 $V(T)$ を乗じて求められている。ここで、上下動成分係数 $V(T)$ はレベル1、2ともに1倍を超えておらず、基盤面において上下動は水平動を超えることはない(最大で0.85倍)としている。この上下動成分係数 $V(T)$ と兵庫県南部地震観測波の比較を図-13に、大洗観測波との比較を図-14に示す。これらの図を見ると上下動成分係数 $V(T)$ は観測波に対して明らかに小さいことがわかる。特に兵庫

県南部地震観測波との比較では、ほとんどの周期帯において観測波が上下動成分係数 $V(T)$ を上回っており、特に短周期域において建研指針で示されている値が小さすぎることがわかる。しかし、図-11の上下動基準応答スペクトル $\beta(T)$ において結果的観測波と一致しているのは、水平動基準応答スペクトル $\beta(T)$ の規定が短周期側で大きめに設定されているからと思われる。

次に上下動や長周期補正係数 $L(T)$ の検討を行う。建研指針では $L(T)$ は水平動や長周期補正係数 $L(T)$ の値を準

表-2 各指針に基づいた鉛直アレー観測サイトの地盤データ

		兵庫県南部地震における鉛直アレー観測サイト					大洗
		神戸ポートアイランド	高見フローラルタウン	高砂発電所	総合技術研究所	猪名川	
深度 (m)		GL-83m	GL-30m	GL-100m	GL-100m	GL-30m	GL-173m
地盤説明		軟固	軟固	比較的硬質	比較的軟固	硬質	硬質
設計用入力地震動 作成手法 技術指針(案)	工学的基盤面 $V_s > 400$ (m/s)	無し	無し	GL -37.0m	GL -94.0m	CL -8.0m	GL -11.47m
	地盤の固有周期 (s)	1.263	0.691	0.550	1.291	0.105	0.169
	平均せん断波速度 V_0 (m/s)	266	174	269	291	305	272
	せん断波速度のばらつき ΔV (m/s)	53.5	27.9	82.1	71.4	79.9	81.1
	V_e / V_b	0.66	0.43	0.67	0.73	0.76	0.68
	$\Delta V / V_e$	0.13	0.07	0.21	0.18	0.20	0.20
	地盤分類	均質型	均質型	不均質型	均質型	不均質型	不均質型
	短周期増幅係率 レベル1- α	0.87	1.15	1.40	0.85	1.81	1.75
	最大増幅率 レベル1- β	1.54	1.91	1.72	1.43	1.52	1.71
	短周期増幅係率 レベル2- α	0.50	0.72	1.05	0.50	1.49	1.43
	最大増幅率 レベル2- β	1.47	1.79	1.62	1.38	1.45	1.61
	地震活動度係数	A (1.0)	A (1.0)	A (1.0)	A (1.0)	A (1.0)	A (1.0)
	地域区分	地域 3	地域 3	地域 3	地域 3	地域 3	地域 3
	やや長周期補正係数	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
道路標示方書 ・同解説 V 耐震設計編	工学的基盤面 $V_s > 300$ (m/s)	GL -50.0m	無し	GL -19.0m	GL -20.0m	GL -4.0m	GL -4.57m
	地盤の固有周期 (s)	0.918	0.716	0.411	0.360	0.072	0.108
	地盤種別	Ⅲ種	Ⅲ種	Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅰ種	Ⅰ種
	地域区分	A (1.0)	A (1.0)	A (1.0)	A (1.0)	A (1.0)	A (1.0)
原子力発電所 耐震設計技術指針	工学的基盤面 $V_s > 700$ (m/s)	無し	無し	無し	無し	GL-28m	GL-173m

(注) V_s : 工学的基盤のせん断波速度で $V_s \geq 400$ m/s の場合は $V_s=400$ m/s としてよいのでそうした。

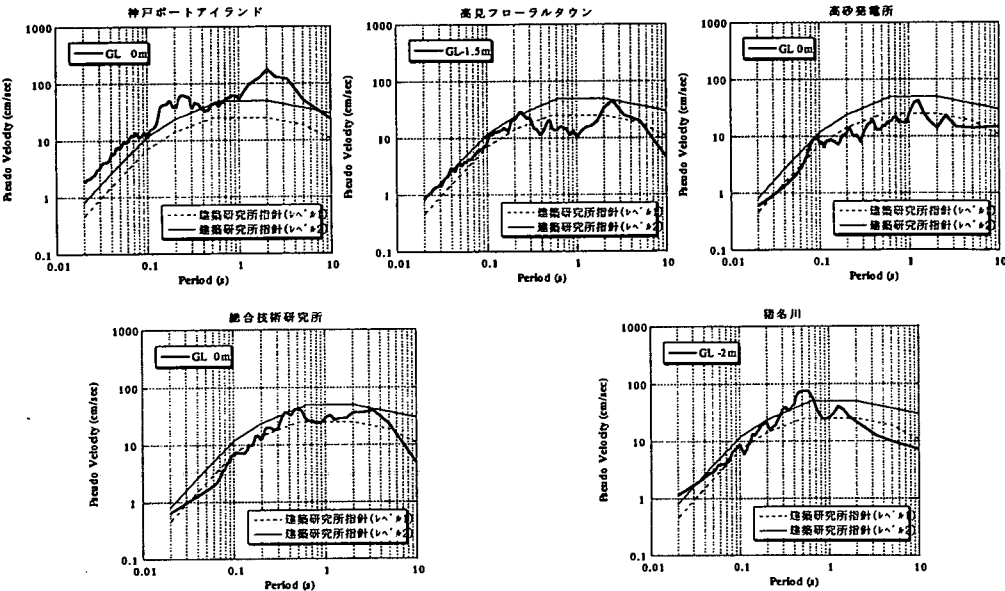


図-10 兵庫県南部地震観測波と建築研究所指針の擬似速度応答スペクトル $S(T)$ の比較

用することとしており、地域2、3では周期2秒以上から低減させている。図-10の上下動設計用応答スペクトル $S(T)$ と実観測波を比べてみると、2秒以上の長周期側での速度スペクトルの減少の程度は建研指針を上回っており、よって上下動や長周期補正係数 $\mu(T)$ は妥当と思われる。

最後に上下動増幅特性係数 $G(T)$ であるが、水平動増幅特性係数 $G(T)$ が地盤分類・地震動レベル・地盤の固有周期 T_b より求まる短周期側増幅倍率 α 、及び工学的基盤のせん断波速度に対する表層地盤の平均せん断波速度の比 V_s/V_b を用いて求まる β より決定されるのに対し、上下動増幅特性係数 $G(T)$ は地震動レベルのみによって分類され、最大で1.5倍であり、地盤のデータは反映されていない。この理由として建研指針では、『工学的基盤以浅の表層地盤における上下動増幅特性は、水平方向の動特性の違いによらず短周期領域で共通して増幅し、ピーク値のばらつきも比較的少ないことから、地盤の種別によらず単一の増幅特性係数で表すものとする。また、上下動成分に関しては非線形の影響はあまり大きくないと考えられることから、レベル1、2ともほぼ同様の特性とした。』と述べている。

ここで、図-15の兵庫県南部地震観測波と大洗観測波の鉛直動速度応答スペクトルの増幅と、建研指針における上下動増幅特性係数 $G(T)$ を見ると、上下動が卓越する周期帯域は建研指針では0.04～0.2秒であり、観測波もほぼその周波数領域で増幅している。しかしながら、増幅倍率は建研指針では最大1.5倍であるのに対して、兵庫県南部地震観測波では最大5倍、大洗観測波では最大7倍の増幅が見られる。このように、建研指針において示される上下動増幅特性係数 $G(T)$ は鉛直地震動観測波の増幅特性を適切に表現しているとは言えず、実観測波では1.5倍以上の増幅が発生する可能性がある。特に上下動は水平動よりも短周期側で卓越するが、表層地盤の構成により増幅する周期帯は変化するため、地盤の定数を考慮した適切な表層地盤の増幅特性の検討が必要と思われる。その際、鉛直動の場合はP波による影響が大きいため、疎密波速度 V_p を地盤データとして用いることも考慮に値すると思われる。

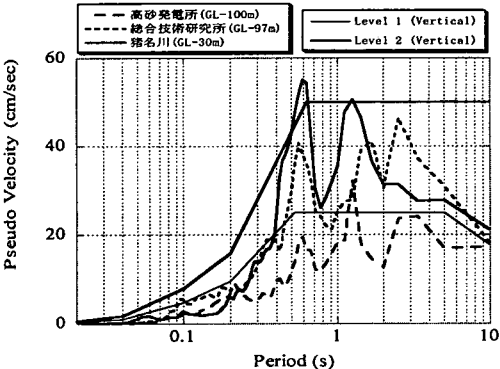


図-11 上下動基準応答スペクトル $B(T)$ と兵庫県南部地震観測波の比較

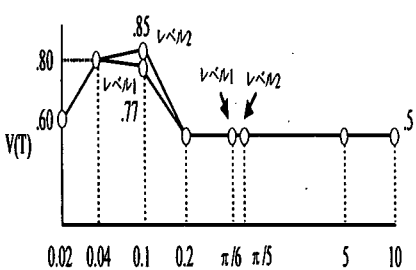


図-12 建築研究所指針における工学的基盤での上下動成分係数 $V(T)$

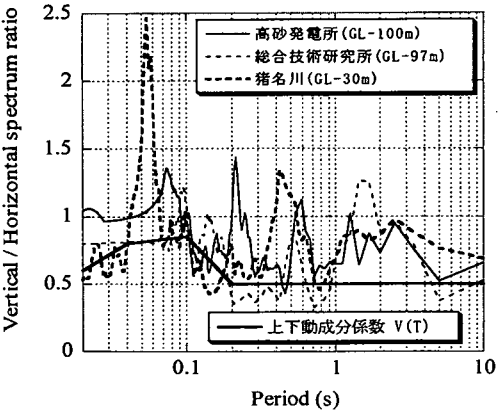


図-13 上下動成分係数 $V(T)$ と兵庫県南部地震観測波の比較

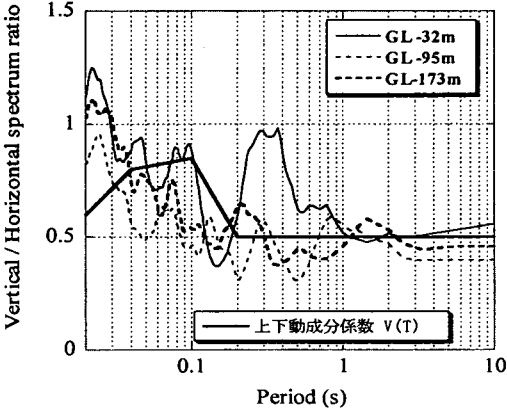
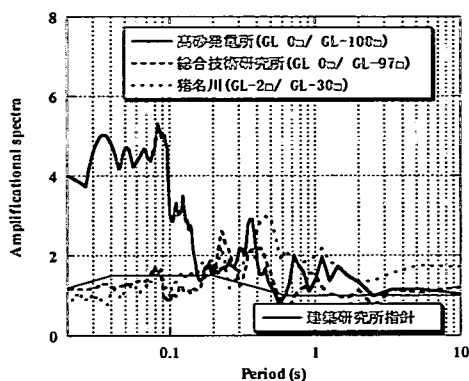
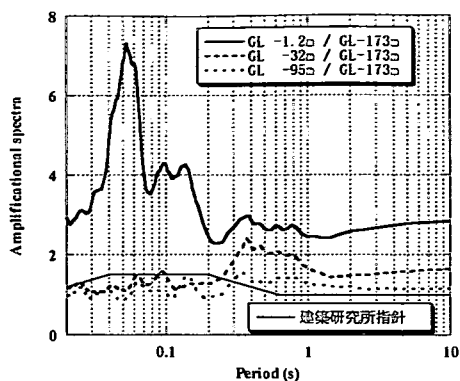


図-14 上下動成分係数 $V(T)$ と大洗観測波の比較



(a) 兵庫県南部地震観測波



(b) 大洗観測波

図-15 観測波の鉛直動速度応答スペクトルの増幅と上下動増幅係数 $G(T)$ の比較

4. まとめ

現行の設計用入力地震動に関する指針のなかで、鉛直地震動に関する規定が非常に少ないため、建築研究所指針で提案されている上下動に関する規定は非常に貴重である。同指針で提示されている上下動設計用応答スペクトルは兵庫県南部地震において観測されたデータと照らし合わせても全体として整合性のあるものとなっている。しかし、同スペクトル作成において用いられている各係数ごとに検討を行った結果、観測波と比較して特に上下動増幅特性係数が十分ではないことがわかった。これに関し、今後のデータの蓄積と係数の改善とが望まれる。

また、建研指針では、地表面における目標スペクトルを規定しており、地中の任意点における設計用入力地震動については、原子力指針と同様に一次元波動伝播モデルや質点系モデルにより応答値を算出して用いているとしている。この場合、水平動では一次元波動法等により地盤の解析モデルが提案されており、比較的簡便に解析を行うことが可能であるが、鉛直動に関する解析モデルの提案は少なく、精度も悪いようである¹⁾。したがって、例えば地中構造の設置位置のような表層地盤中の任意の深さにおける鉛直動の予測も今後の課題である。

参考文献

- (1) (社)土木学会：トンネル・ライブラリー第9号 開削トンネルの耐震設計，pp18-19，平成10年10月。
- (2) 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. 3。
- (3) 伊東守，大塚久哲，豊永臣悟：地下構造物の断面力に与える鉛直地震動の影響について，構造工学論文集，Vol. 46A，pp. 1755-1762，2000. 3。
- (4) 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，pp1235-1240，1998. 11。
- (5) 伊東守，大塚久哲，豊永臣悟：鉛直アレー観測結果に基づく上下動の特性，第25回地震工学研究発表会講演論文集，第1分冊，pp285-288，1999. 7。
- (6) 建設省建築研究所，財団法人日本建築センター：設計用入力地震動作成手法技術指針(案)，平成4年3月。
- (7) (社)日本電気協会，電気技術基準調査委員会：原子力発電所耐震設計技術指針，1987。
- (8) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，平成8年12月。
- (9) 財団法人震災予防協議会：強震動アレー観測No. 3，平成10年3月。
- (10) 渡辺孝英，佐藤俊明，松下裕他：地震動の上下成分の波動伝播特性に関する検討(簡単な波線理論を用いた主要動の立ち上がり部分の走時解析)，日本建築学会大会学術講演梗概集B，pp661-662，昭和63年10月。
- (11) 渡部丹，千葉脩，藤堂正喜，福沢六朗：上下地震動の特性について(その1 米国震源近傍記録の最大加速度)，日本建築学会大会学術講演梗概集B，pp631-632，昭和63年10月。