

地盤異方性下の地盤非線形性について - 台湾・花蓮地点鉛直アレ - 地震観測記録から -

(財)電力中央研究所 正会員 上島 照幸

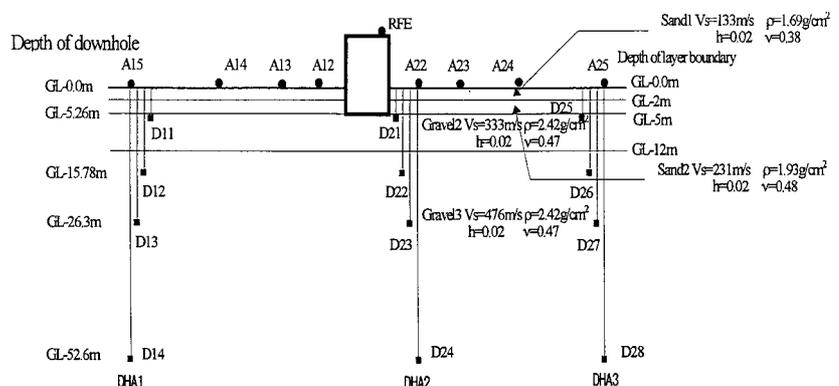
1. はじめに 台湾・花蓮地点における国際共同研究では、商業用原子炉建屋の 1/4 程度の縮尺の大型模型建屋を砂礫地盤上に建設し、(掘削前、掘削後・建屋建設前、建屋建設後・埋戻し前、および埋戻し後の)4段階に渡る地盤調査¹⁾、埋戻し前・後に行われた建屋強制振動試験の後、建屋-地盤系の地震観測が実施され、その解析結果が報告されてきた^例えば²⁾。一方、鉛直アレ - 地震観測記録の分析・同定などから、当サイト地盤には異方性があることが次第に明らかになってきた^例えば³⁾。また、砂礫層の応力・ひずみ関係を直交異方性弾性体でモデル化することにより、それまで説明出来なかった諸現象が説明できることが示されてきた⁴⁾。この間に Chi-Chi 地震を始め、地表最大加速度(PGA)にて 100gal を超える地震が幾つか記録された(表 1)。本報告では、当地点鉛直アレ - 地震観測記録から地盤定数を逆解析によって同定して、地震動強度が強くなった場合に地盤異方性はどのように変化するのか(またはしないのか)、地盤異方性と剛性・減衰のひずみレベル依存性とが地震時にどのように関係し合うのか、などの検討を行った。

2. 観測概要 花蓮地点は砂質地盤(G.L.0-5m)下の良く締まった砂礫地盤(G.L.-5m 以深)より成る(図 1)。地震観測点は地表3測線×5点/測線、鉛直アレ - 3系列×5点/系列(地表含む)、他、である(図 1)。図 1 中には PS 検層などより得られた各成層の V_s (せん断波速度)、 ρ (単位体積重量)、 h (減衰定数)、 ν (ポアソン比)を併記している。8 年余に渡る地震観測期間中に収録された地震記録は 100 個を超えるが、その中から 9 地震を選んで解析に供した(表 1)。

3. 鉛直アレ - 地震記録からの地盤定数の同定 表 1 に示される 9 地震の鉛直アレ - 地震記録から地盤定数を逆解析によって同定⁵⁾して、以下のような知見を得た; (1) コヒーレンスの変動より、当地点地盤の強軸方向は北から東に約 10° 回転した方向であると推定した。サイトにおける PGA が 50gal 弱程度の地震記録を用いた逆解析結果によれば、強軸方向の V_s は PS 検層(主としてダウンホール法)などから得られた地盤モデルと良く一致している。一方、弱軸方向の V_s は、礫層である GL-5.0m ~ GL-52.6m の範囲で 15 ~ 43% 程度、PS 検層などから得ている V_s より小さく、当地点地盤に異方性があることが、鉛直アレ - 地震記録の分析からも明らかとなった(表 2,3, 図 2)。(2)PGA が 50-150gal の 4 地震における逆解析結果によれば、弱軸方向の V_s は強軸方向の V_s に比して、砂層で 10%、礫第 1 層で 38%、礫第 2 層で 20%、それぞれ減少している。この(強軸 V_s に対する弱軸 V_s)減少率は、PGA が 50gal 弱の 2 地震に対するそれとほぼ同程度で同様の傾向を持っており、地震動強度が強くなっても、当地点の地盤異方性は変わらず保持されていることが確認された(表 2,3, 図 2)。(3)同定された各層の V_s , h (減衰定数)は、強軸・弱軸両方向とも、また成層を問わず、PGA の増加に伴って基本的に V_s は減少し、 h は増加しており、 V_s , h とも、地震動強度依存性を持つことがわかった(表 2,3, 図 2)。

表 1 解析に供した地震諸元および地表最大加速度

地震No. (Ev.No.)	発生 日付	マグニ チュード (M)	震源		地表最大加速度 Aij(gal)		
			距離 (km)	深さ (km)	V	EW(T)	NS(L)
Ev.2	94/01/20	5.6	24.4	49.5	24.5	48.8	39.4
Ev.3	94/05/30	4.5	9.6	18.5	17.6	21.4	28.5
Ev.4	94/06/05	6.2	54.0	5.3	28.3	27.8	41.4
Ev.6	95/02/23	5.8	21.8	21.7	30.1	45.8	51.4
Ev.7	95/05/01	4.9	4.6	8.4	115.5	73.7	135.8
Ev.8	95/05/02	4.6	1.7	8.9	118.3	65.0	87.1
Ev.38	99/09/20	7.3	82.0	8.0	33.2	118.9	87.1
Ev.80	99/11/01	6.9	73.4	31.3	29.0	108.2	59.3
Ev.91	00/07/14	5.7	11.7	7.2	21.0	142.0	92.1

図 1 鉛直アレ - 測点配置と PS 検層などより得た地盤モデル¹⁾

キ - ワ - ド: 異方性, 非線形性, 鉛直アレ - 地震観測, せん断波速度, 砂礫地盤, システム同定
連絡先: 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646, (TEL.)04-7182-1181, (FAX)04-7184-2941

4.鉛直アレ - 地震記録から得た $G/G_0 \sim h \sim$ 関係

当地点にてこれまでに得られた鉛直アレ - 地震記録に対して,“Zeghal の方法”⁶⁾を適用して地盤内のせん断応力~ひずみ()履歴を描き, G/G_0 (G :せん断剛性率, G_0 :初期せん断剛性率)~ $h \sim$ 曲線を求めて,室内試験から得られている $G/G_0 \cdot h \sim$ 曲線と対比した結果,次の諸点が明らかとなった(図3);

(1) 得られた最大せん断ひずみは 0.01%程度であった(これは等価線形解析結果と概ね一致している)。(2)本法から得た $G/G_0 \sim$ 関係は,ばらつきも大きい,基本的には室内試験の示す傾向に沿い,の増大に伴って G/G_0 は低下する,との結果が得られた。一方 $h \sim$ 関係はばらつきが大きく,一定の傾向あり,とは見なしにくい結果となった。

5.おわりに 重要施設等の建設地点において地盤の V_s 分布を求める上で,鉛直アレ - による地震観測とその分析は,異方性の検出など,地盤モデルの精度向上に寄与することを,本報告における検討の結果は示している。

参考文献 1) Kokusho, T., K. Nishi, T. Okamoto, Y. Tanaka, T. Ueshima, K. Kudo, T. Kataoka, M. Ikemi, T. Kawai, Y. Sawada, K. Suzuki, H. Yajima, S. Higashi (1997): “Distribution of ground rigidity and ground model for seismic response analysis in Hualien project of large scale seismic test”, NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN 172, pp.297-308.
2) 例えば, Ueshima, T., T. Kokusho, T. Okamoto and H. Yajima (1997):”Seismic response analysis of embedded structure at Hualien, Taiwan”, NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN 172, pp.289-295. 他,参加諸機関発表など多数。
3) Ueshima, T and H. Okano (June,1996):”Further Investigation on Seismic Response of Soil and Embedded Structure in Hualien LSST Program”, 11th WCEE, Paper No.1930.
4) Tanaka, Y.(June,2001): "Modeling anisotropic behavior of gravelly layer in Hualien, Taiwan", Soils and Foundations Vol.41, No.3, pp.73-86.
5) 中川徹・小柳義夫(1982): “最小二乗法による実験データ解析”, 東京大学出版会。
6) Zeghal, M., A.-W. Elgamal, H. T. Tang, and J. C. Stepp (Apr., 1995): “Lotung downhole array. II:Evaluation of soil nonlinear properties”, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.121, No.4, ASCE, pp.363-378.

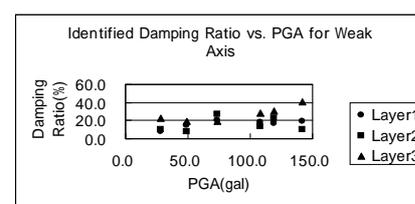
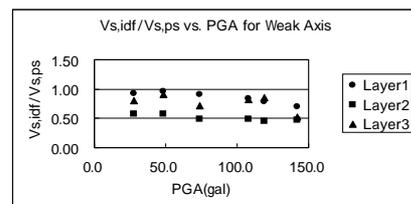
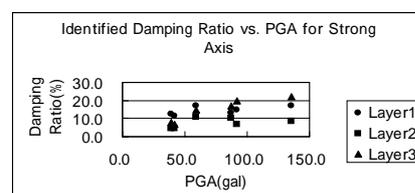
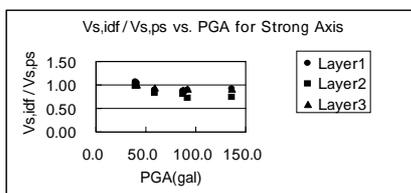
表2 強軸方向に沿って同定された地盤定数

Layer	PS検層などから得た地盤モデル			Average-1(PGA 50galの Event:Ev.2&4平均)			Average-2(PGA 50galの Event:Ev.7,38,80,91平均)		
	V_s (m/s)	h (tf/m ³)	$\%$	V_s (m/s)	h (%)	V_s 比-1 (*2)	V_s (m/s)	h (%)	V_s 比-1 (*2)
Layer 1(GL 0.0 ~ -5.0m)	192	1.83	2.0	202	12.1	1.05	172	15.6	0.90
Layer 2(GL -5.0 ~ -12.0m)	333	2.42	2.0	328	4.7	0.99	258	9.1	0.77
Layer 3(GL -12.0 ~ -52.6m)	476	2.42	2.0	482	7.6	1.01	436	18.4	0.92

表3 弱軸方向に沿って同定された地盤定数

Layer (表2に同じ)	PS検層などから得た地盤モデル			Average-1(PGA 50galの Event:Ev.2&4平均)				Average-2(PGA 50galの Event:Ev.7,38,80,91平均)			
	V_s (m/s)	h (tf/m ³)	$\%$	V_s (m/s)	h (%)	V_s 比-1 (*2)	V_s 比-2 (*3)	V_s (m/s)	h (%)	V_s 比-1 (*2)	V_s 比-2 (*3)
Layer 1	192	1.83	2.0	181	11.6	0.94	0.90	154	18.6	0.80	0.90
Layer 2	333	2.42	2.0	191	9.5	0.57	0.58	159	18.5	0.48	0.62
Layer 3	476	2.42	2.0	406	20.9	0.85	0.84	349	29.5	0.73	0.80

Layer 1 : Sand 1 & Sand2 *1) PGA:Peak Ground Acceleration(地表水平成分最大加速度)
Layer 2 : Gravel 2 *2) V_s 比-1= V_s の同定値 / PS検層による V_s
Layer 3 : Gravel 3 *3) V_s 比-2=弱軸方向に沿って同定された V_s / 強軸方向に沿って同定された V_s



(1)強(弱)軸方向 $V_{s,idf}/V_{s,ps} \sim PGA$

(2)強(弱)軸方向 $hidf \sim PGA$

図2 強(弱)軸方向 $V_{s,idf}/V_{s,ps} \cdot hidf \sim PGA$

$V_{s,idf}$, $hidf$: Event 毎に同定された各成層のせん断波速度, 減衰定数(表 2.3 参照)
 $V_{s,ps}$: P S 検層から得られた地盤モデルにおける各成層のせん断波速度(表 2.3 参照)

○ : from Ev06(PGA(NS)=51.4gal) ○ : from Ev07(PGA(NS)=135.8gal)
△ : from Ev08(PGA(NS)=87.1gal) △ : from Ev80(PGA(NS)=59.3gal)
× : from Ev91(PGA(NS)=92.1gal) — : from Laboratory test

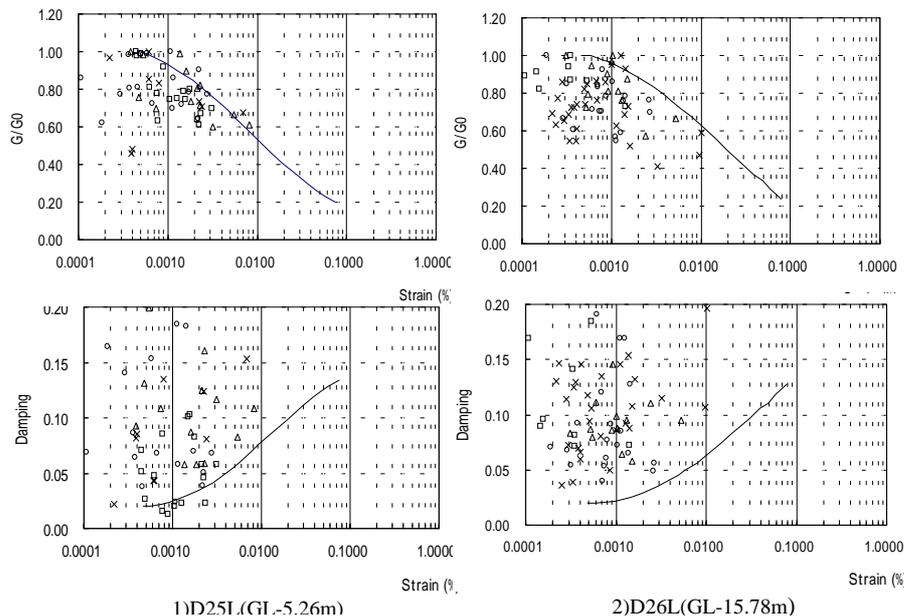


図3 鉛直アレ - 地震記録から得られた $G/G_0 \cdot h \sim$ と室内試験¹⁾との対比