

(24) 地盤の非線形増幅特性に及ぼす間隙水圧の影響

飛島建設(株) 森 伸一郎

飛島建設(株) ○三輪 滋

1. はじめに

地震時の表層地盤の増幅特性を考える場合、地盤の非線形性の影響を考慮することが重要である。地表面の地震動の応答スペクトルを設定する手法として、工学的基盤面で設定した応答スペクトルに表層地盤の増幅スペクトルを乗じることによって設定することが考えられている。そのような手法を確立するためには、地盤の非線形性に対して、増幅スペクトルという等価線形的な取扱いの適用範囲を明確にする必要がある。

地盤の非線形性については、剛性・減衰のひずみ依存性と地盤内の間隙水圧の変動による拘束圧依存性が考えられるが、間隙水圧の上昇に伴う地盤の増幅特性の変化についての検討は、いくつかの研究例^{1) 2)}が見られるものの、十分にはなされていないのが現状である³⁾。しかし、液状化が発生し得る飽和砂層のある地盤では、液状化に至らない場合でも、間隙水圧の上昇による有効応力の減少に伴って地盤のせん断剛性は低下し、その結果として地震動の増幅特性は変化するはずである。すなわち、このような地盤では、ひずみに依存する非線形性に加えて、間隙水圧の上昇、言い換えれば拘束圧に依存する非線形性も考慮することが重要と考えられる。本論文では、地盤のひずみに依存する非線形性に加えて、拘束圧に依存した非線形性が地盤の地震動増幅特性に及ぼす影響を地表の加速度最大値と加速度応答スペクトルに注目して、解析的に検討した。なお、ここでは、過剰間隙水圧と初期有効上載圧との比(間隙水圧比)が1.0(解析では0.97)に達した状態を液状化と呼ぶことにする。

2. 検討方法

前述の目的のため、石原・東畑⁴⁾の有効応力径路モデルを組み込んだ次元有効応力解析法で全応力法と有効応力法による非線形地震応答解析を行い、両者を比較検討した^{5) 6) 7) 8)}。地盤モデルは、砂質地盤と代表的な臨海埋立地盤の二つを考えた。砂質地盤としては、1964年新潟地震の際に液状化による被害を受けた新潟市川岸町の地盤を対象とし、表-1(a)に示す石原・東畑⁴⁾が設定したモデルを使用した。代表的な埋立

表-1 解析用地盤モデル

(a) 新潟市川岸町地盤モデル

(b) 代表的な臨海埋立地盤モデル

土質	N値 10 20 30	深度 (m)	層区分	単位体積 重量 γ_s (tf/m^3)	せん断 液状化 速度 V_s (m/s)	繰り返し 応力比 R_{z0}	内部摩擦 角 ϕ ($^\circ$)	静的強度 c (tf/m^2)	地層構成	N 値	深度 (m)	層区分	単位体積 重量 γ_s (tf/m^3)	せん断 液状化 速度 V_s (m/s)	繰り返し 応力比 R_{z0}	内部摩擦 角 ϕ ($^\circ$)	静的強度 c (tf/m^2)
表土		1	1	1.33	2.28	—	29	0.92	埋立土 (粘性土)	5	1	1	1.70	110	—	24	4.06
中砂		2	2	1.98	—	28	1.37				2	2	2	1.80	110	0.16	22
中砂		3	3	1.84	1.58	0.17	26	1.04	埋立土 (砂質土)	3	3	3	1.80	110	0.16	22	3.34
		4	4	—	—	—	—	1.43			4	4	4	1.80	110	0.16	22
		5	5	1.94	2.49	0.20	30	2.40	液浸土 (砂質土)	4	5	5	1.75	100	0.12	23	1.91
		6	6	—	2.78	0.22	32	3.21			6	6	6	1.75	100	0.12	23
中細砂		7	7	—	—	—	—	3.73	有楽町層 上部	3	7	7	—	—	—	—	—
		8	8	—	—	0.19	—	4.14			8	8	8	—	—	—	—
		9	9	—	—	0.16	—	4.76	粘性土層	5	9	9	1.60	120	—	22	3.30
		10	10	—	—	0.22	—	5.37			10	10	10	1.80	160	0.16	24
	11	11	—	—	0.21	—	5.79	有楽町層 砂質土層	5	11	11	—	—	—	—	—	
	12	12	2.04	3.96	0.20	37	8.18			12	12	12	—	—	—	—	—
		13	13	—	—	0.29	—	9.40	有楽町層 下部	3	13	13	—	—	—	—	—
		14	14	2.14	4.48	0.33	41	13.7			14	14	14	—	—	—	—
		15	15	—	—	0.31	—	16.2	東京層 砂質土層	30	15	15	—	—	—	—	—
		16	16	—	—	—	—	—			16	16	16	—	—	—	—
		17	17	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	17	17	—	—	—	—	—
		18	18	—	—	—	—	—			18	18	18	1.65	120	—	22
		19	19	—	—	—	—	—	東京層 砂質土層	30	19	19	—	—	—	—	—
		20	20	—	—	—	—	—			20	20	20	—	—	—	—
		21	21	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	21	21	—	—	—	—	—
		22	22	—	—	—	—	—			22	22	22	2.00	330	0.25	36
		23	23	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	23	23	—	—	—	—	—
		24	24	—	—	—	—	—			24	24	24	—	—	—	—
		25	25	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	25	25	—	—	—	—	—
		26	26	—	—	—	—	—			26	26	26	—	—	—	—
		27	27	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	27	27	—	—	—	—	—
		28	28	—	—	—	—	—			28	28	28	—	—	—	—
		29	29	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	29	29	—	—	—	—	—
		30	30	—	—	—	—	—			30	30	30	—	—	—	—
		31	31	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	31	31	—	—	—	—	—
		32	32	—	—	—	—	—			32	32	32	—	—	—	—
		33	33	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	33	33	—	—	—	—	—
		34	34	—	—	—	—	—			34	34	34	—	—	—	—
		35	35	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	35	35	—	—	—	—	—
		36	36	—	—	—	—	—			36	36	36	—	—	—	—
		37	37	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	37	37	—	—	—	—	—
		38	38	—	—	—	—	—			38	38	38	—	—	—	—
		39	39	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	39	39	—	—	—	—	—
		40	40	—	—	—	—	—			40	40	40	—	—	—	—
		41	41	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	41	41	—	—	—	—	—
		42	42	—	—	—	—	—			42	42	42	—	—	—	—
		43	43	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	43	43	—	—	—	—	—
		44	44	—	—	—	—	—			44	44	44	—	—	—	—
		45	45	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	45	45	—	—	—	—	—
		46	46	—	—	—	—	—			46	46	46	—	—	—	—
		47	47	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	47	47	—	—	—	—	—
		48	48	—	—	—	—	—			48	48	48	—	—	—	—
		49	49	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	49	49	—	—	—	—	—
		50	50	—	—	—	—	—			50	50	50	—	—	—	—
		51	51	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	51	51	—	—	—	—	—
		52	52	—	—	—	—	—			52	52	52	—	—	—	—
		53	53	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	53	53	—	—	—	—	—
		54	54	—	—	—	—	—			54	54	54	—	—	—	—
		55	55	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	55	55	—	—	—	—	—
		56	56	—	—	—	—	—			56	56	56	—	—	—	—
		57	57	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	57	57	—	—	—	—	—
		58	58	—	—	—	—	—			58	58	58	—	—	—	—
		59	59	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	59	59	—	—	—	—	—
		60	60	—	—	—	—	—			60	60	60	—	—	—	—
		61	61	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	61	61	—	—	—	—	—
		62	62	—	—	—	—	—			62	62	62	—	—	—	—
		63	63	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	63	63	—	—	—	—	—
		64	64	—	—	—	—	—			64	64	64	—	—	—	—
		65	65	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	65	65	—	—	—	—	—
		66	66	—	—	—	—	—			66	66	66	—	—	—	—
		67	67	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	67	67	—	—	—	—	—
		68	68	—	—	—	—	—			68	68	68	—	—	—	—
		69	69	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	69	69	—	—	—	—	—
		70	70	—	—	—	—	—			70	70	70	—	—	—	—
		71	71	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	71	71	—	—	—	—	—
		72	72	—	—	—	—	—			72	72	72	—	—	—	—
		73	73	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	73	73	—	—	—	—	—
		74	74	—	—	—	—	—			74	74	74	—	—	—	—
		75	75	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	75	75	—	—	—	—	—
		76	76	—	—	—	—	—			76	76	76	—	—	—	—
		77	77	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	77	77	—	—	—	—	—
		78	78	—	—	—	—	—			78	78	78	—	—	—	—
		79	79	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	79	79	—	—	—	—	—
		80	80	—	—	—	—	—			80	80	80	—	—	—	—
		81	81	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	81	81	—	—	—	—	—
		82	82	—	—	—	—	—			82	82	82	—	—	—	—
		83	83	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	83	83	—	—	—	—	—
		84	84	—	—	—	—	—			84	84	84	—	—	—	—
		85	85	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	85	85	—	—	—	—	—
		86	86	—	—	—	—	—			86	86	86	—	—	—	—
		87	87	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	87	87	—	—	—	—	—
		88	88	—	—	—	—	—			88	88	88	—	—	—	—
		89	89	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	89	89	—	—	—	—	—
		90	90	—	—	—	—	—			90	90	90	—	—	—	—
		91	91	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	91	91	—	—	—	—	—
		92	92	—	—	—	—	—			92	92	92	—	—	—	—
		93	93	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	93	93	—	—	—	—	—
		94	94	—	—	—	—	—			94	94	94	—	—	—	—
		95	95	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	95	95	—	—	—	—	—
		96	96	—	—	—	—	—			96	96	96	—	—	—	—
		97	97	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	97	97	—	—	—	—	—
		98	98	—	—	—	—	—			98	98	98	—	—	—	—
		99	99	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	99	99	—	—	—	—	—
		100	100	—	—	—	—	—			100	100	100	—	—	—	—
		101	101	—	—	—	—	—	東京層 粘性土層	10	101	101	—	—	—	—	—
		102	102	—	—	—	—	—			102	102	102	—	—	—	—

地盤としては、表-1(b) に示す東京湾臨海部の埋立地盤を想定した砂質土と粘性土の互層地盤モデルを用いた。入力地震動には、砂質地盤に対しては、1940年伊予沖地震のEl Centro記録(NS成分)(以後 El Centro波と呼ぶ)と新潟地震の秋田県庁記録(NS成分)を用いた。秋田県庁波は、震央距離の違いを考慮するため卓越周期を調整して用いた(以後修正秋田県庁波と呼ぶ)。埋立地盤に対しては、El Centro波と日本海中部地震の秋田港記録(NS成分)(以後秋田港波と呼ぶ)を用いた。なお、解析では、上記の入力地震動は基盤入射波として取扱ったが、以下の検討においては、基盤での入反射波に対する増幅について考える。

3. 間隙水圧が地表の最大加速度に及ぼす影響

図-1に基盤での入反射波 (E+F) の最大加速度(以後基盤加速度と呼ぶ)と地表面最大加速度 (以後地表加速度と呼ぶ) との関係を非線形の全応力解析および有効応力解析について示す。図中には、はじめに液状化層が現れる基盤加速度が示してある。どの場合でも、このレベルの基盤加速度を境にして有効応力解析の地表加速度の変化の様子は不規則となり、それ以上では単調な(等価線形的な)非線形性を示さなくなる。

全応力解析では、いずれの検討ケースでも基盤加速度が大きくなるにしたがって、非線形性が強くなり、地表加速度は 200cm/s^2 程度で頭打ちとなる。このように、入力と応答の加速度の間にはひずみ依存性の非線形効果で説明できる単調な(等価線形的な)関係がある。有効応力解析の地表加速度は、基盤加速度が $40\sim 50\text{cm/s}^2$ 程度までは、間隙水圧の影響はほとんどなく、全応力解析とほぼ同じ値を示す。それ以上の基盤加速度のうち、修正秋田県庁波や秋田港波入力の場合 $70\sim 80\text{cm/s}^2$ 、El Centro波入力の場合 100cm/s^2 程度以下の範囲では間隙水圧の上昇に伴うせん断剛性の低下の影響が現れて、全応力解析よりも小さくなる。このように、液状化層が現れはじめるよりも小さい基盤加速度の範囲では、いずれの検討ケースの場合も、入力が大きくなるにしたがって、ひずみ依存と拘束圧依存の非線形性による効果が単調に強くなり、入力と応答の加速度の間には、全応力解析の結果と同様に単調な(等価線形的な)関係が見られる。

しかし、地盤のいずれかの層に液状化層が現れはじめる $70\sim 80\text{cm/s}^2$ 程度あるいは 100cm/s^2 を越える入力

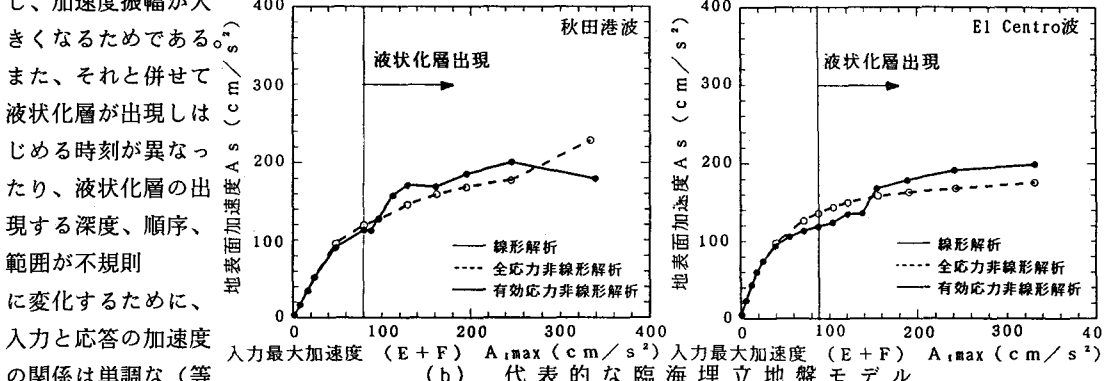
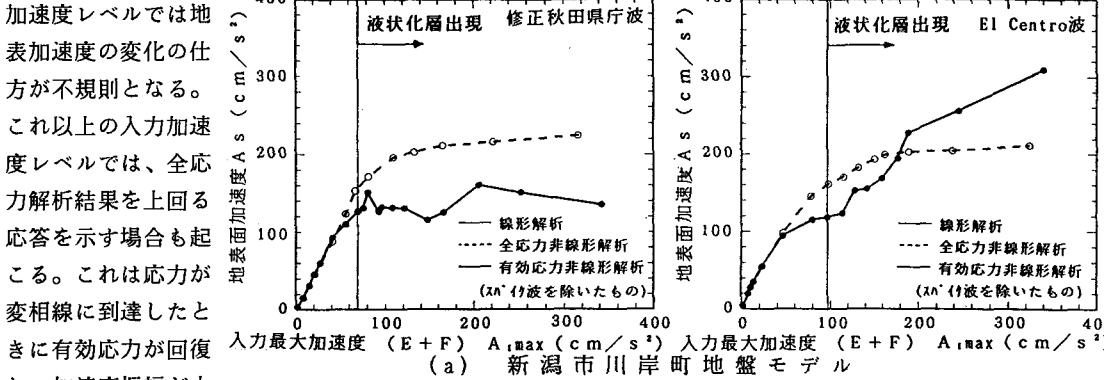
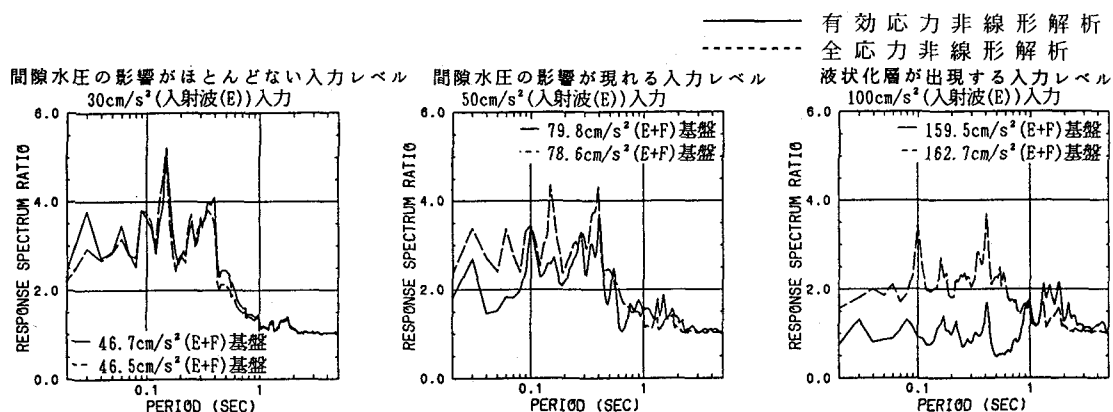
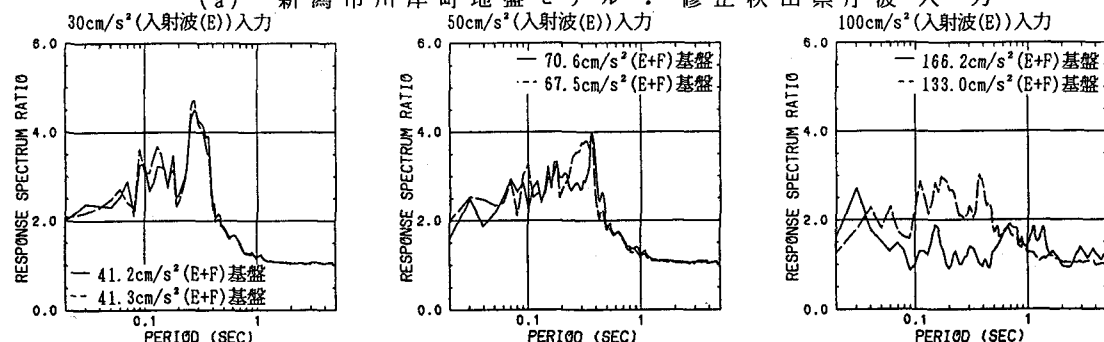


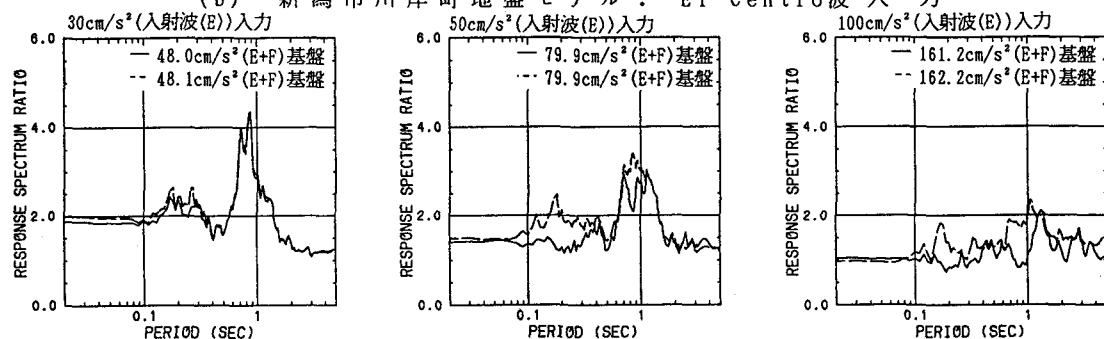
図-1 入力最大加速度(入反射波(E+F))と地表面最大応答加速度の関係



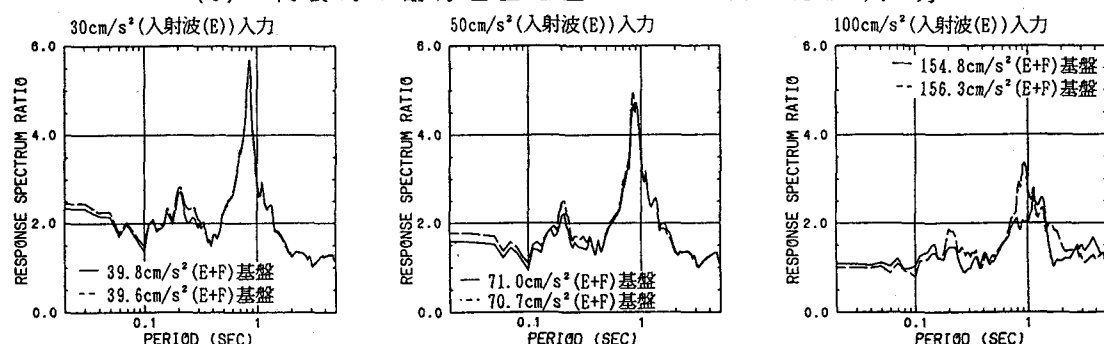
(a) 新潟市川岸町地盤モデル：修正秋田県庁波入力



(b) 新潟市川岸町地盤モデル：El Centro波入力



(c) 代表的な臨海埋立地盤モデル：秋田港波入力



(d) 代表的な臨海埋立地盤モデル：El Centro波入力

図-2 加速度応答スペクトル比(地表/入射波(E+F))の比較

効果では説明できない不規則なものとなる。

4. 間隙水圧が応答スペクトル比に及ぼす影響

入力加速度の増加に伴う周波数領域での増幅特性の変化を見るため、入力(入反射波(E+F))の加速度応答スペクトルに対する地表面の加速度応答スペクトルの比について検討を行った。図-2に全応力解析と有効応力解析の応答スペクトル比を比較して示す。解析の土層分割、地震波データの時間間隔より概ね0.1秒以上の周期については十分な精度が確保されていると考えられる。いずれの検討ケースでも、最大加速度に間隙水圧の影響がほとんど現れない入力レベルの場合は、応答スペクトルも差がほとんどない。しかし、間隙水圧の影響が現れ、地盤のいずれかの層に液状化層が出現する直前の入力レベルでは、応答スペクトルにも影響が現れ、有効応力解析では全応力解析に比べ約1.0秒より短周期成分の増幅率が低下する。

全応力解析、有効応力解析とも入力加速度が大きくなるにしたがって応答スペクトル比の卓越周期は長周期側に移行するが、液状化層が現れはじめる入力よりも大きな入力レベルでは、両者の増幅特性には大きな相違が見られる。有

表-2 増幅特性の非線形性と間隙水圧の影響

間隙水圧の発生状況と非線形性	増幅特性の特徴 (最大加速度と加速度応答スペクトルで確認)	加速度 $\ddot{u}$ (cm/s^2) (上段:入反射波、下段:入射波)			
		新潟市川岸町地盤		代表的な臨海埋立地盤	
		秋田県庁波	エルトロ波	秋田港波	エルトロ波
レンジ1	発生せず	0 ~ 40	0 ~ 50	0 ~ 40	0 ~ 40
	ほぼ線形				
レンジ2	発生する	40 ~ 70	50 ~ 100	40 ~ 80	40 ~ 100
	中程度非線形				
レンジ3	液状化層出現	70 以上	100以上	80以上	100以上
	顕著な非線形				
		50以上	60以上	50以上	60以上

5. まとめ

今後の課題

以上の検討結果を表-2³⁾に整理し、以下にまとめる。

- (1) 加速度の増幅特性は入力レベルによって表-2に示すような3つの領域に分けられそうである。
- (2) 表-2のレンジ2とレンジ3の境界が等価線形的に取扱える上限と考えられそうである。(入反射波の最大加速度で70~100 cm/s^2 、入射波の最大加速度で50~60 cm/s^2)
- (3) 等価線形的に扱えるのは、地盤内のいずれかの層で液状化が発生するまでと考えられる。したがって、液状化判定の液状化安全率 F_L が1.0以下になる層があれば、等価線形的に扱うのは難しいと考えられる。
- (4) 応答スペクトル比についても最大加速度の場合と同様に、増幅特性は3つの領域に区分できそうである。

地盤の地震動増幅特性に及ぼす間隙水圧の影響に関しては今後、解析面では、①入力加速度の増加に伴う周波数領域の増幅特性の詳細な検討、②異なった有効応力解析法での検討、③地震被害と関連が深いと言われている速度や地盤ひずみでの検討、④入力地震動特性の違い・地盤条件の違いの及ぼす影響の検討等、また、実験や観測の面では⑤振動台実験による検討、⑥加速度と間隙水圧を観測している観測記録を用いた検討、等を進め、スペクトルを等価線形的に取り扱うための、評価法、指標などについて考える必要がある。

(謝辞)：文献4)を通じて有効応力経路モデルおよび川岸町の地盤データを全面的に使用させて頂きました。最後になりましたが東京大学工学部の石原研一先生、奥田前生先生に謝意を表します。

(参考文献)

- 1) 片田敏行, 中田隆博, 芹沢芳芳, 森田実: 表層地盤の最大地震動の定量的推定, 第18回地震工学研究発表会講演要旨, pp. 133~pp. 135, 1985. 7
- 2) 鈴木勇夫, 清水勝美: サクソビ・カムを考慮した二次元有効応力解析手法とその地盤への適用性, 第7回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 685~pp. 690, 1986. 12
- 3) 森伸一郎, 三輪進: 地震の地震動増幅特性に及ぼす間隙水圧の影響(その3), 日本建築学会1991年度大会学術講演要旨集(構造I), 1991. 9, 投稿中
- 4) K. Ishihara, I. Towhata: One-Dimensional Soil Response Analysis during Earthquakes Based on Effective Stress Method, J. of Fac. Eng. Univ. of Tokyo, 1980
- 5) 森伸一郎, 三輪進: 地震の加速度応答に及ぼす間隙水圧の影響, 第26回土質工学研究発表会発表講演集, 1991. 7, 投稿中
- 6) 三輪進, 森伸一郎: 埋立地盤における地震の加速度応答に及ぼす間隙水圧の影響, 土木学会第46回年次学術講演会講演要旨集I, 1991. 9, 投稿中
- 7) 三輪進, 森伸一郎: 地震の地震動増幅特性に及ぼす間隙水圧の影響(その1), 日本建築学会1991年度大会学術講演要旨集(構造I), 1991. 9, 投稿中
- 8) 加藤真人, 森伸一郎, 三輪進: 地盤の地震動増幅特性に及ぼす間隙水圧の影響(その2), 日本建築学会1991年度大会学術講演要旨集(構造I), 1991. 9, 投稿中