

6. 液状化判定結果について

本章では、各地点（4工業団地）における平成12年鳥取県西部地震の地震動を再現（推定）して各地点毎の液状化現象のメカニズムおよび液状化の程度を評価し、今後の液状化対策における基準地震動を検討するとともに、再度地震が起こった場合の液状化判定を行うものとする。

6-1. 今回の地震に伴う液状化現象のメカニズム

6-1-1. 工学的基盤面における地震動の推定

各地点の工学的地震基盤面における地震動の推定は、以下の①~③の手順で行った。

- ①荒島地区で観測された余震の加速度波形を、線形地震応答解析（参（1）参照）により工学的地震基盤面に戻す。
- ②工学的地震基盤面に戻した余震波形を用いて、経験的グリーン関数法（参（2）参照）により、本震の基盤加速度波形を合成する。経験的グリーン関数法とは、小地震の観測波形（経験的グリーン関数）を時間領域で重ね合わせることで、大地震の波形を合成する手法である。
- ③各地点の基盤地震動を荒島地区の基盤地震動から与える。ただし、距離減衰を考慮して振幅を調整する。

このように、表層近傍の液状化による地盤の軟化の影響が少ない「余震記録」を用いることで、平成12年鳥取県西部地震の際に生じたと推定される「工学的地震基盤面上の本震波形」をより適切に評価できると考えられる。

今回行った以上の作業の流れを、図6-1-1. 1に示す。

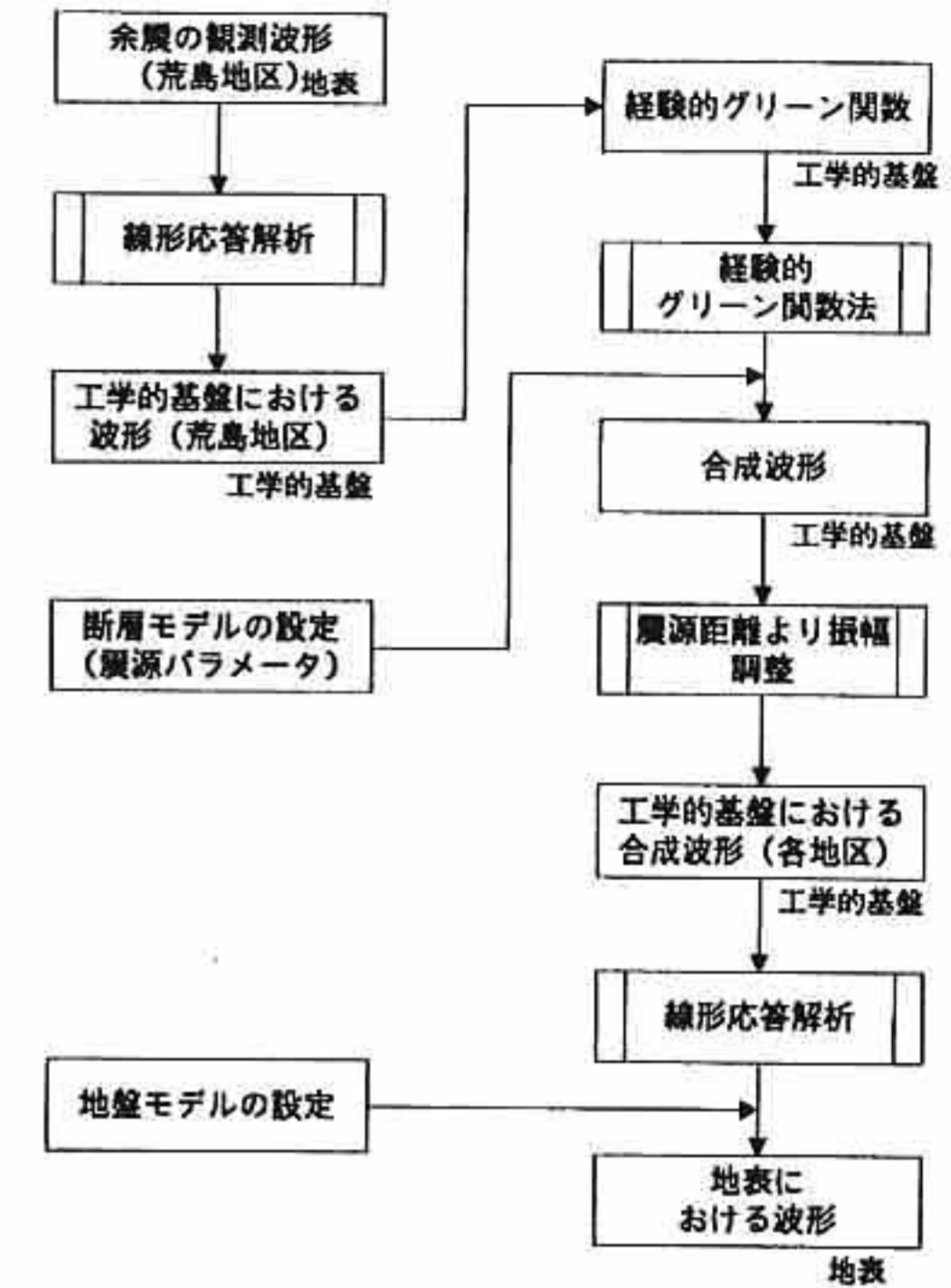


図6-1-1. 1 経験的グリーン関数法を用いた地震波形作成の流れ

まず、経験的グリーン関数法により、荒島地区の基盤加速度を推定する。経験的グリーン関数となる波形には、国土交通省出雲工事事務所の飯梨川河口左岸（荒島地区）に設置された地表面地震計で観測された地震波形を用いた。

図6-1-1.2に国土交通省出雲工事事務所が管轄する「荒島観測点」の位置図を、図6-1-1.3に地震観測点の地質想定断面図を示す。



図6-1-1.2 荒島観測点の位置図

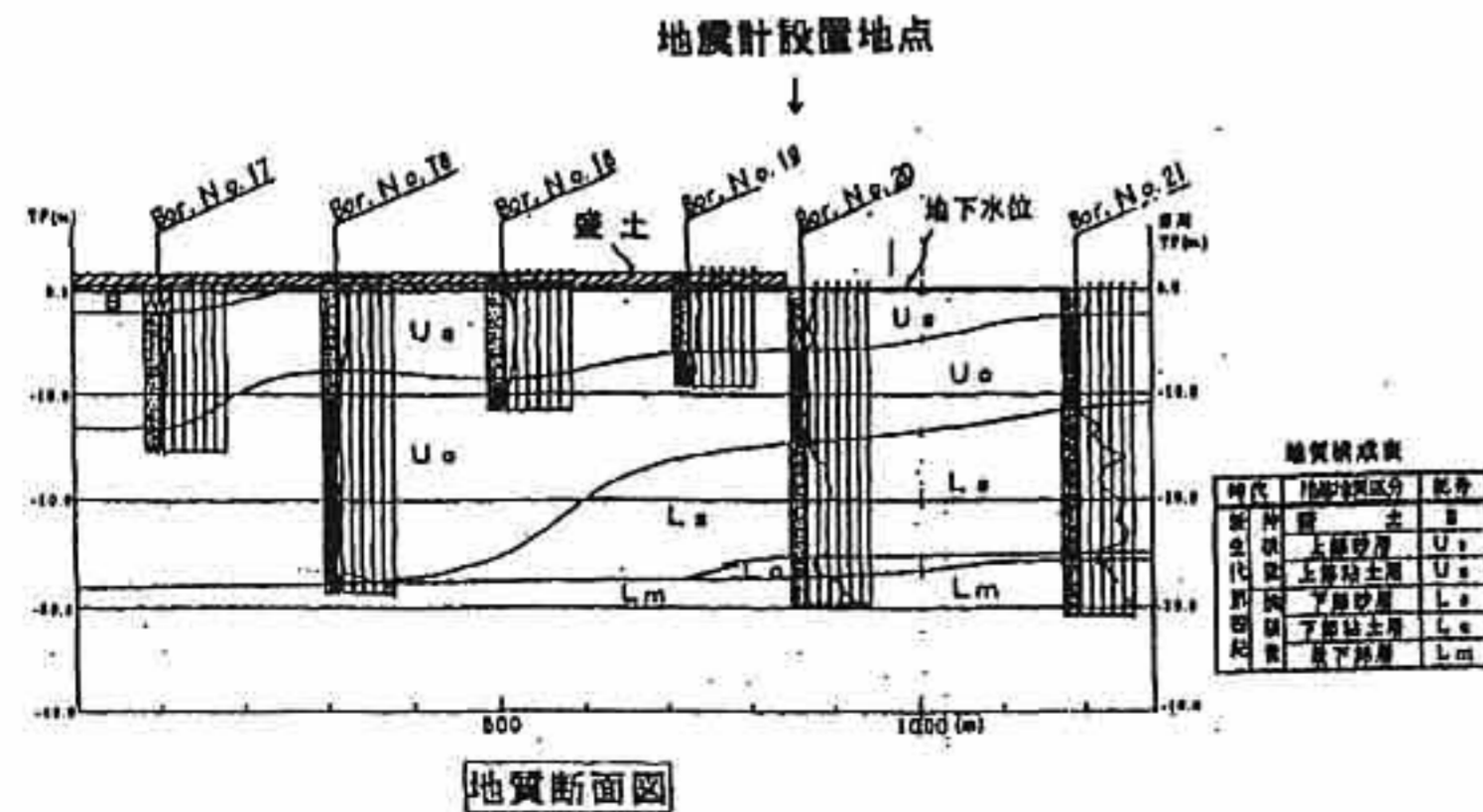


図6-1-1.3 荒島地区の地質想定断面図

経験的グリーン関数として用いた余震の諸元を表6-1-1.1に、観測波形を図6-1-1.4に示す。余震のマグニチュードは、M=4.4であり、今回の手法に用いる余震として妥当な大きさである。この波形を地震応答計算により基盤に戻した波形を、図6-1-1.5に示す。

経験的グリーン関数法により得られた、荒島地区における基盤加速度波形を図6-1-1.6に示す。他の地区における基盤加速度波形は、この荒島地区の波形を距離減衰を考慮して振幅調整したものである。

震源時	10月7日04時59分	
マグニチュード	4.4	
震源	緯度	35° 17.1'
	経度	133° 21.7'
	深さ	7 km

表6-1-1.1 用いた余震の諸元（気象庁による）

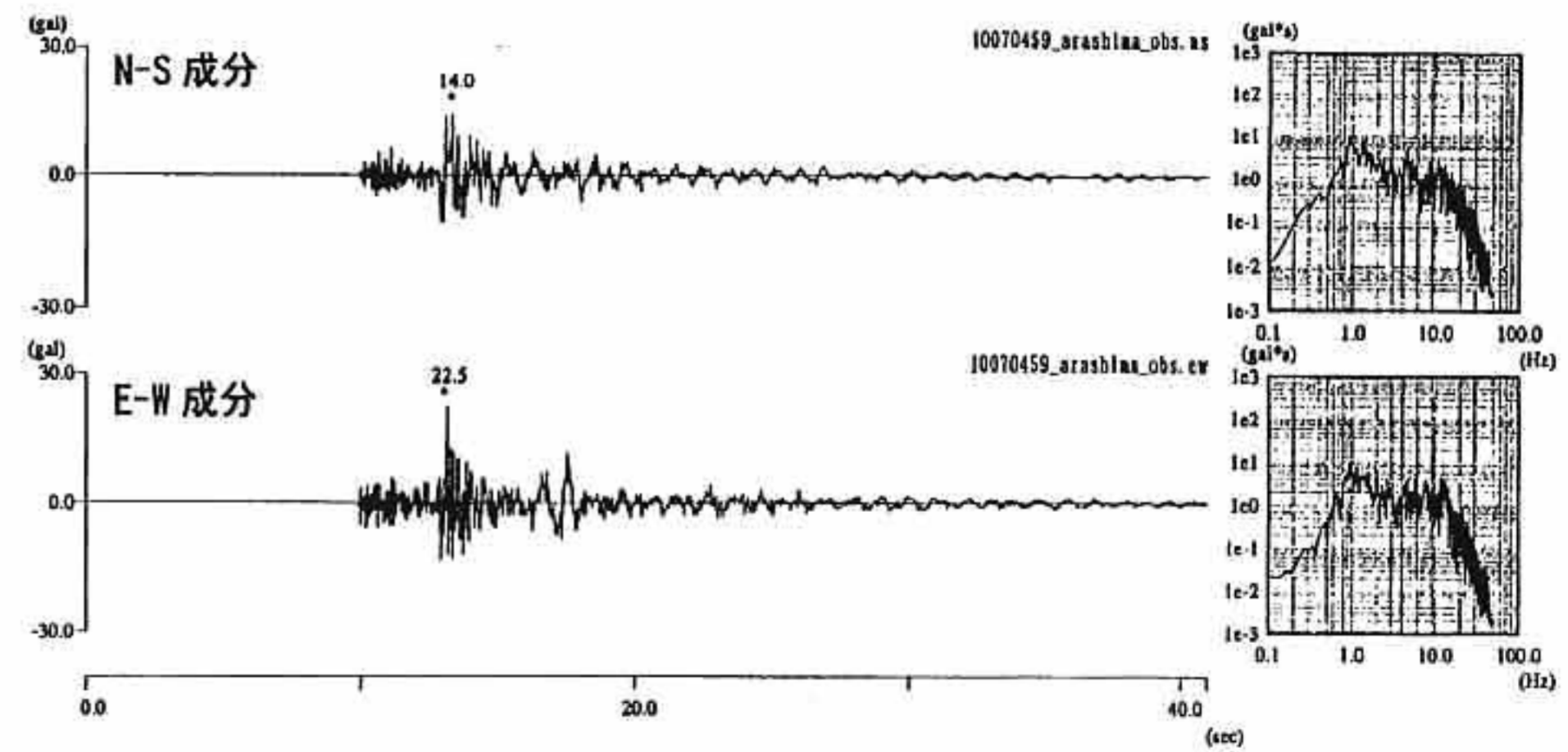


図6-1-1.4 解析に使用した余震の観測波形（荒島観測点）

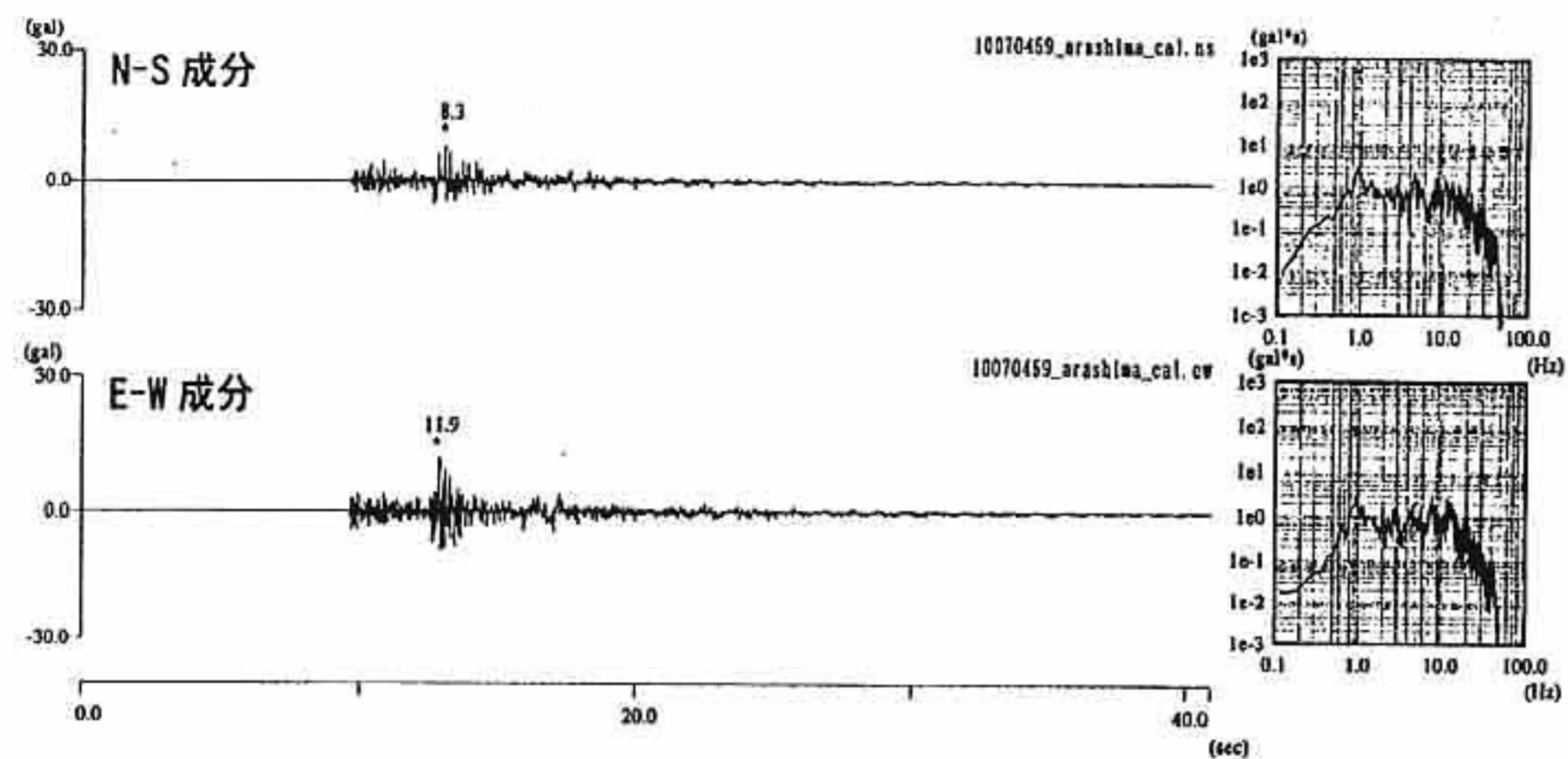


図6-1-1.5 地震応答解析で基盤に戻した余震波形（経験的グリーン関数）

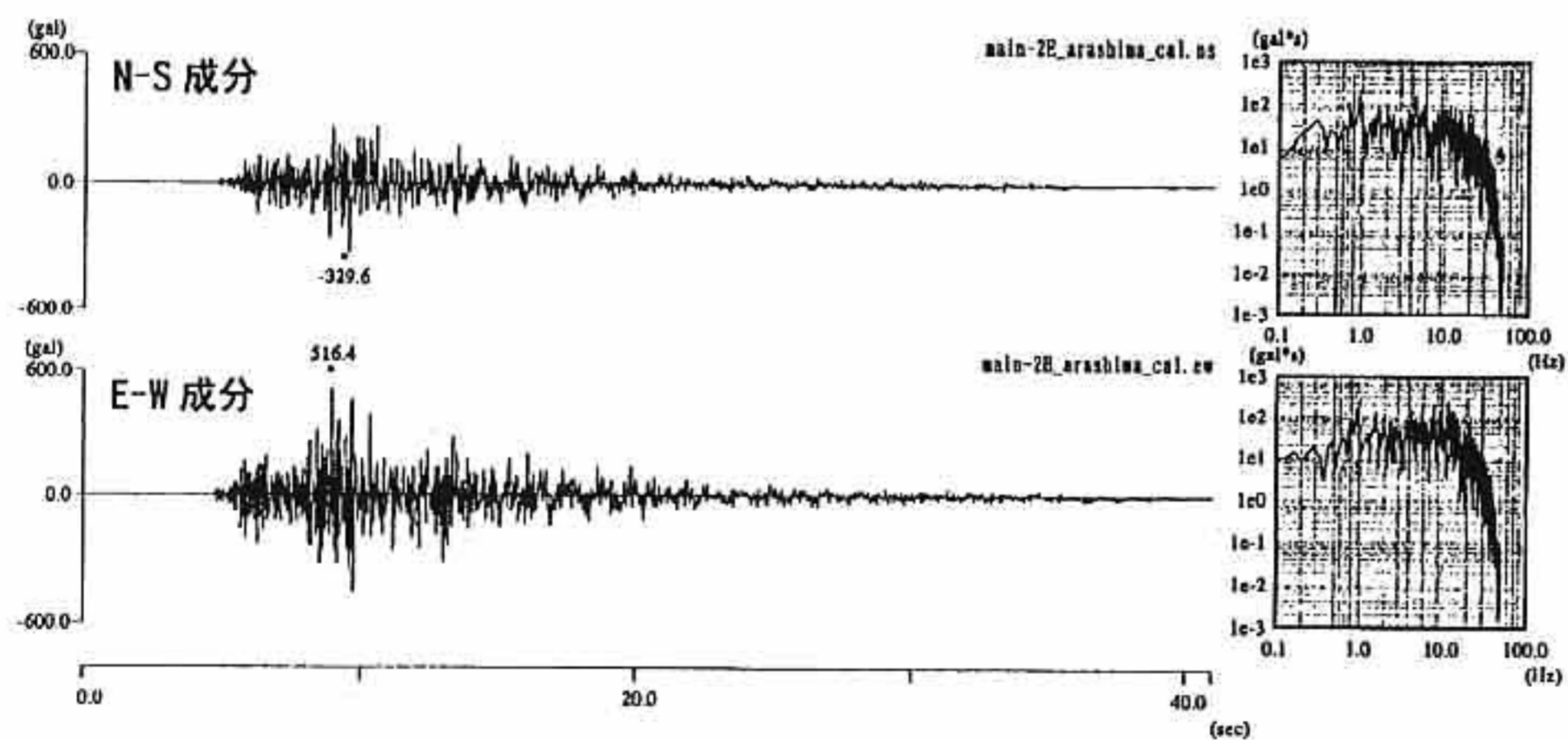


図6-1-1.6 経験的グリーン関数法による合成波形（荒島観測点）

(参1)「地震応答解析」の概要

今回の解析では、計算の過程で以下の地震応答解析を行っている(図6-1-1.1参照)。

- 1) 小地震の地表観測波形を工学的基盤に戻す
- 2) 各地点の工学的基盤における合成波形を地表に立ち上げる。

ここでは、重複反射理論に基づく次元地震応答解析手法を用いて線形で解析を行った。

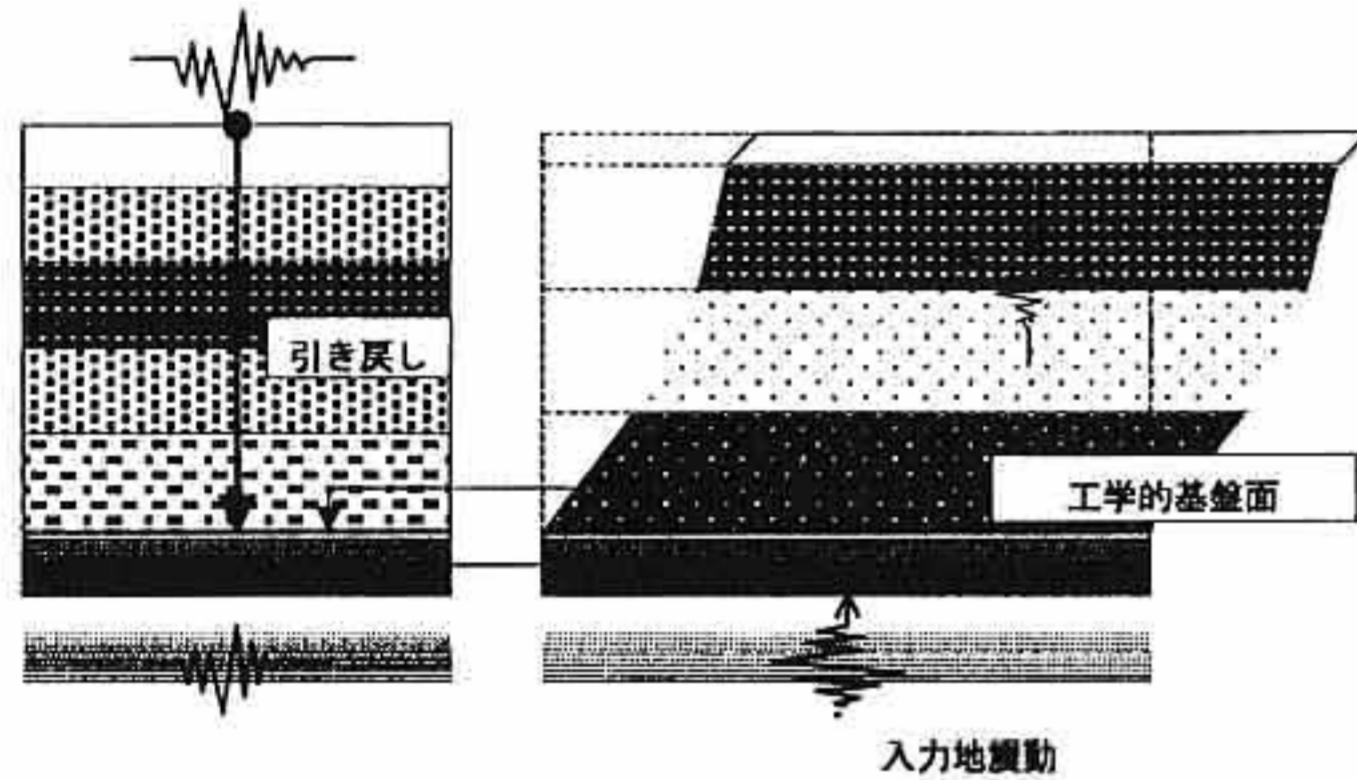


図6-1-1.7 地表観測波形の引き戻しと立ち上げ

地震応答解析にあたっては、解析対象地点の地盤モデルが必要となる。本解析に用いた地盤モデルを図6-1-1.8に示す。

深度 (m)	土質記号	層厚 (m)	湿潤密度 (tf/m^3)	S波速度 (m/s^2)	
					▽ 地表面
5	Us	6.3	1.8	140	
10	Uc	8.7	1.6	120	
15	Ls	2	1.8	130	
20	Ls	7.7	1.8	220	
25	Lc	2	1.8	180	
30	Lm	2.3	2	300	工学的基盤面

図6-1-1.8 荒島地区の地盤モデル

(参2)「経験的グリーン関数法」の概要

①手法の概要

対象とする地表面地点で地震観測を行っても、地盤の非線形性(特に液状化現象に伴う非線形性)の影響から工学的地震基盤で生じている大地震記録を再現することは困難である。したがって、地盤の非線形性の影響が少ない中小規模の余震記録を用いることが必要になる。

本手法は観測された中小の地震記録に含まれている、震源から対象地点までの地震波の伝播経路の情報を利用するために、中小の地震記録をグリーン関数として用いて、地震の相似則から合成のためのパラメータを推定し、時間軸上で重ね合わせて大地震の記録を得る方法である。合成に必要なパラメータは次のような考え方で定められる。

- ・重ね合わせる小地震の数は、大地震と小地震のモーメント比から決まる。
- ・大地震の断層面の分割個数は大地震と小地震の断層面積比で決められる。
- ・重ね合わせる小地震の数、大地震の断層の縦横の分割数は、震源パラメータの相似則が成り立っているとすると[大地震のモーメント/小地震のモーメント]^{1/3}に等しい。

分割されたおのおのの小領域から、大地震と小地震の滑り量の比に相当する個数の小地震が大地震のライズタイム内に発生すると考えて、時間軸上で、破壊伝播に要する時間や伝播経路の違いによる伝播時間の差を考慮して、重ね合わせる。

これらの手法は、以下のように定式化される (Irikura(1986)および入倉他(1997))。

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{r}{r_y} F(t) * (C \cdot u(t))$$

$$F(t) = \delta(t - t_{ij}) + \frac{1}{n} \{1 - \exp(-1)\} \cdot \sum_{k=1}^{(N-1)n} \left[\exp\left\{-\frac{(k-1)}{(N-1)n}\right\} \cdot \delta\left(t - t_{ij} - \frac{(k-1)T}{(N-1)n}\right) \right]$$

$$t_{ij} = \frac{(r_{ij} - r_0)}{V_s} + \frac{\xi_{ij}}{V_r}$$

図6-1-1. 9に波形合成の概念を示した。

②得られる波形またはスペクトル

用いる余震(小地震)記録の種類にしたがって、加速度、速度、変位の波形が得られるが、今回は加速度記録を対象とした。

③対象周期範囲

特に制限はないが、用いる余震(小地震)記録によって限界がある。すなわち、用いる余震(小地震)記録の測定周波数帯域、あるいは、デジタイズに伴う長周期ノイズなどから、結果として有意な周波数帯域を決定する。

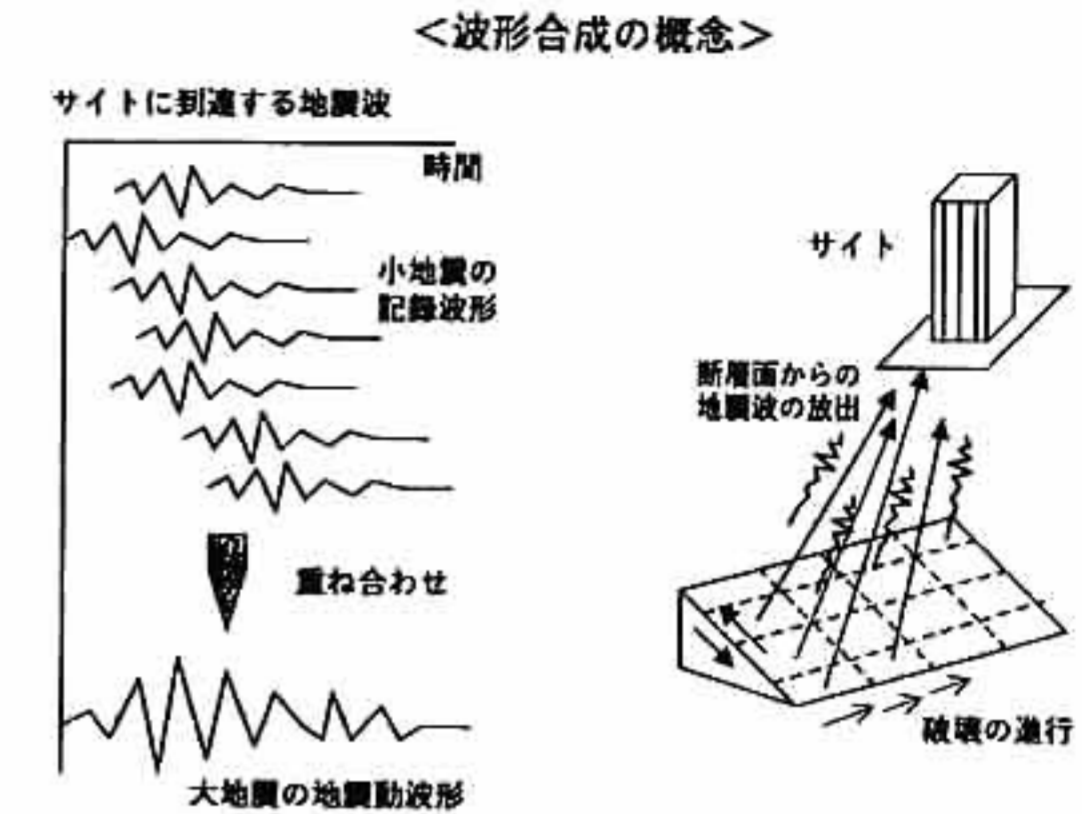


図6-1-1. 9 波形合成の概念

④対応できる震源距離

手法による制限はない。しかし、観測点(対象地点)と断層が極端に近いような場合は、小地震の経路と各要素からの伝播経路が同等と見なせなくなることに注意する必要がある。

⑤入力データ

必要なデータは、要素地震波としての条件を満足している小地震波形とそのモーメント、断層モデル、破壊伝播速度、S波伝播速度である。

⑥特徴および注意点

- ・要素地震波としては、想定する大地震の震源域内で発生し、メカニズムも大地震のメカニズムと同等と見なせる地震で、対象とする帯域においてシグナルがノイズより十分大きい必要がある。
- ・小地震記録のS/N比に注意し、有効な周波数範囲を調べる必要がある。
- ・重ね合わせる個数は大地震と小地震のモーメントから定めるため、小地震のモーメントを評価することが重要である。
- ・重ね合わせ回数は、多すぎると、中間周波数で ω^2 モデルからのずれが大きくなってしまふ。重ね合わせ回数が多くなってしまふ場合(10程度以上)は、2回に分けて計算することによって、問題を解決できる。
- ・断層が大きい場合、一つの小地震記録を全要素での要素波として用いてよいか、吟味が必要で

ある。

- ・結果が小地震の震源特性の影響を受ける。

⑦これまでの検証実績

- ・1983年日本海中部地震 秋田港
- ・1980年伊豆半島沖地震 川奈、中伊豆

⑧文献

- ・Irikura K.(1983);Semi-Empirical Estimation of Strong Ground Motions during Large Earthquakes, Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ., Vol.33.
- ・Irikura K.(1986);Prediction of Strong Acceleration Motions Using Empirical Green's Function, Proc.7th Japan Earthquake Engineering Symposium.
- ・Irikura K.(1988);Estimation of Near-Field Ground Motion Using Empirical Green's Function,Proc.9th World Conference on Earthquake Engineering,Japan.
- ・入倉ほか(1992);強震動予測の実用化における問題点,地震学会,1992,No.2.
- ・入倉ほか(1997);経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良,日本地震学会講演予稿集,N0.2,B25.
- ・三宅ほか(1999);経験的グリーン関数法を用いた1997年3月26日(MJMA6.5)及び5月13日(MJMA6.3)鹿児島県北西部地震の強震動シュミレーションと震源モデル,地震2,Vol.51,1999.

6-1-2. 地表面加速度の推定

前節で算出された工学的基盤面における入射加速度波形を用いて、今回検討対象の4工業団地での地表面加速度を算出する。

ここでは、S波の重複反射理論に基づいて工学的地震基盤面に入力された場合の地震応答解析「SHAKE」を実施する。

(1) 地震応答解析

図6-1-2. 1にSHAKEの応答解析の概念図を示す。

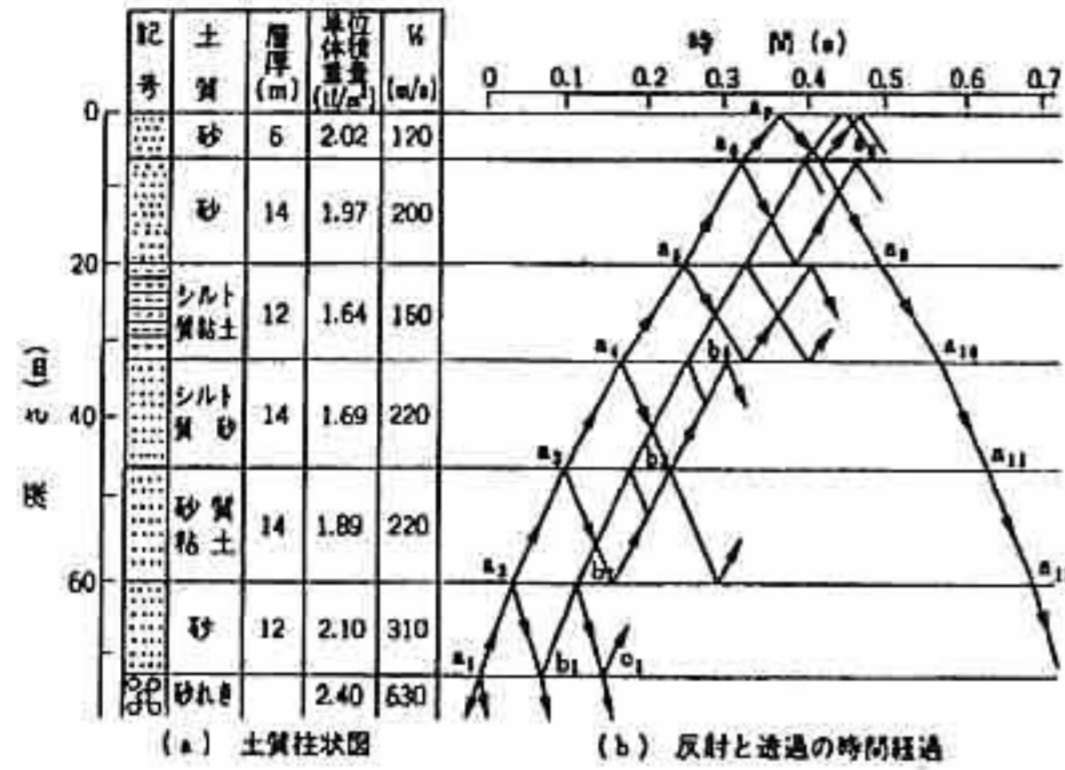


図6-1-2. 1 地震応答解析「SHAKE」の概念図

また、図6-1-2. 2にSHAKEにおける地震応答解析の流れを示す。

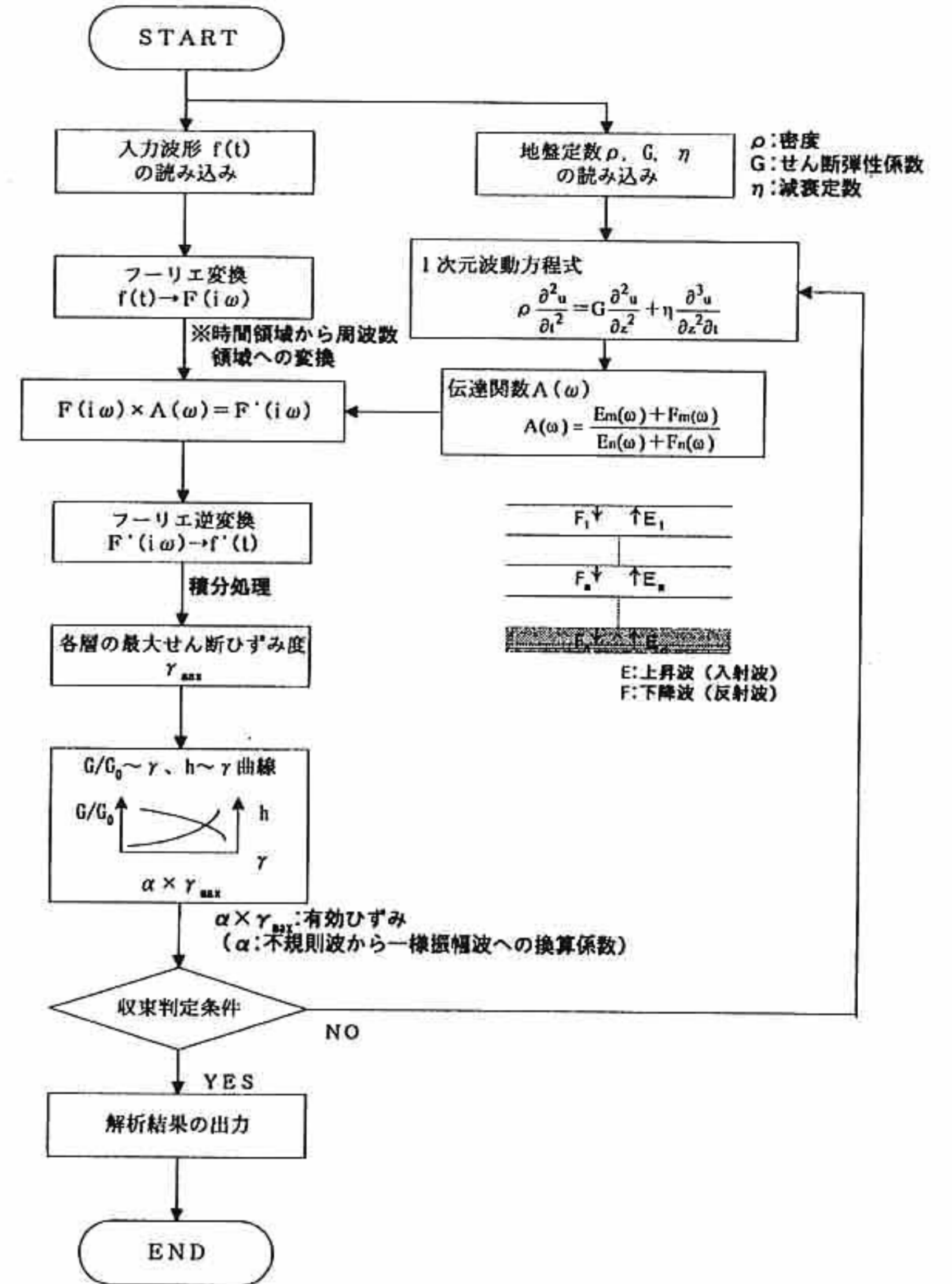


図6-1-2. 2 SHAKEにおける地震応答解析の流れ

(2) 地盤モデルの設定

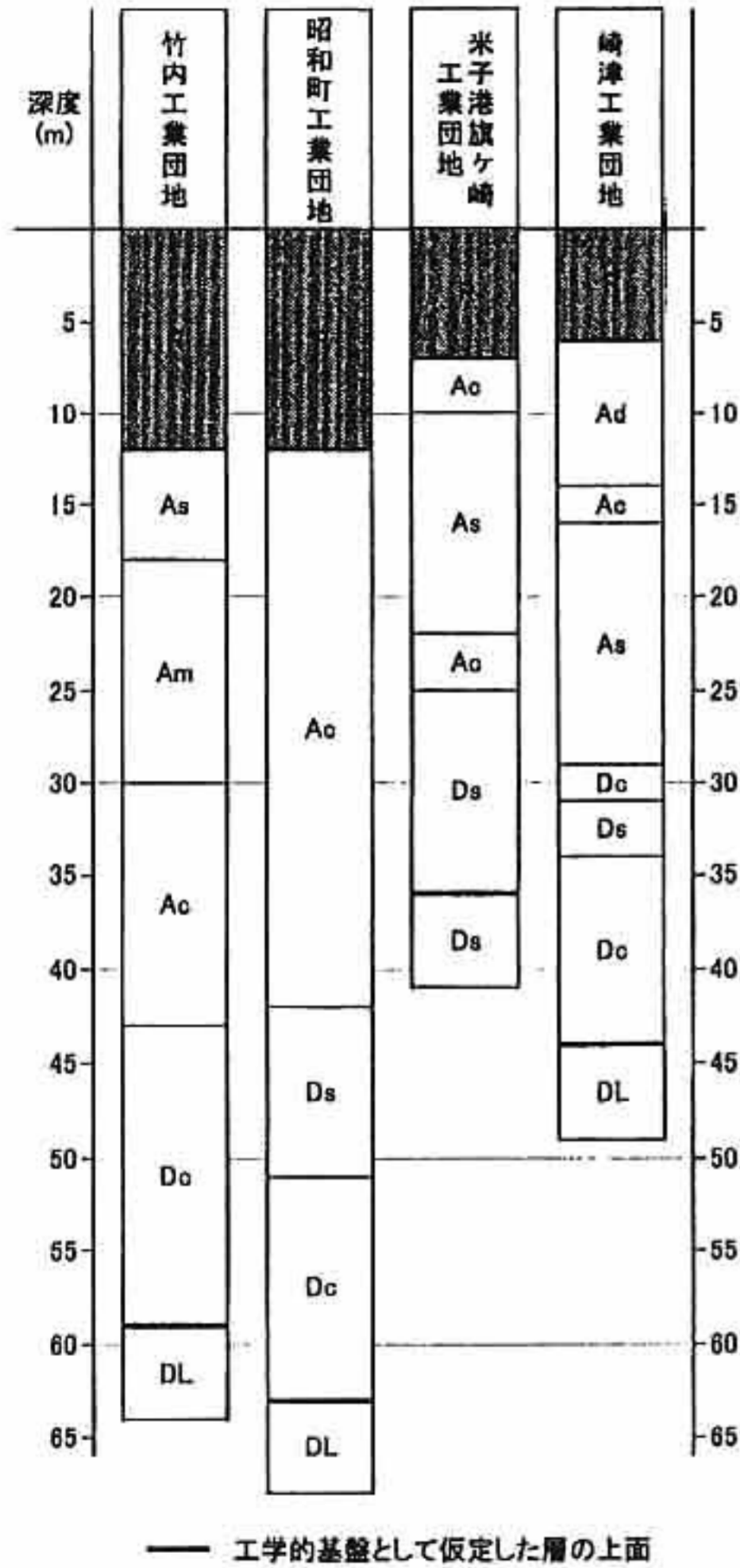


図6-1-2.3 設定した地盤モデルの概要

(3) 土質定数

表6-1-2.1 設定した土質定数の一覧表

地区名	地層名	記号	地盤モデル		入力データ				一次固有周期 (s)
			上面深度 G.L.-(m)	層厚 (m)	減衰定数 (%)	Vs (m/s)	密度 (t/m ³)	層厚 (m)	
竹内工業団地 (竹内-1)	埋土	R	0.00	11.90	5	180	1.70	11.90	1.385
	沖積砂	As	11.90	8.10	5	180	1.85	8.10	
	沖積シルト	Am	18.00	12.00	5	180	1.80	12.00	
	沖積粘土	Ac	30.00	13.20	5	180	1.50	13.20	
	洪積粘土	Dc	43.20	16.00	5	210	1.70	16.00	
	洪積下部砂	DL	59.20	(基礎)	2	320	2.00	1.00	
昭和町工業団地 (昭和-1)	埋土	R	0.00	11.70	5	170	1.70	11.70	1.300
	沖積粘土	Ac	11.70	30.10	5	170	1.50	30.10	
	洪積砂	Ds	41.80	9.50	5	290	1.80	9.50	
	洪積粘土	Dc	51.30	11.80	5	250	1.70	11.80	
	洪積下部砂	DL	62.90	(基礎)	2	340	2.00	1.00	Ⅲ種地盤
米子港旗ヶ崎工業団地 (米子-1)	埋土	R	0.00	7.35	5	160	1.70	7.35	0.838
	沖積粘土	Ac	7.35	2.85	5	130	1.50	2.85	
	沖積砂	As	10.00	12.23	5	170	1.85	12.23	
	沖積粘土	Ac	22.23	3.00	5	170	1.50	3.00	
	洪積砂	Ds	25.23	11.00	5	220	1.90	11.00	
	洪積砂	Ds	38.23	(基礎)	2	300	1.90	1.00	
崎津工業団地 (B-12-16)	埋土	R	0.00	6.00	5	180	1.70	6.00	0.813
	砂丘砂	Ad	6.00	7.70	5	280	1.85	7.70	
	沖積粘土	Ac	13.70	2.10	5	140	1.50	2.10	
	沖積砂	As	15.80	12.70	5	190	1.85	12.70	
	洪積粘土	Dc	28.50	2.30	5	270	1.70	2.30	
	洪積砂	Ds	30.80	3.00	5	280	1.90	3.00	
	洪積粘土	Dc	33.80	9.80	5	250	1.70	9.80	
	洪積下部砂	Ds	43.60	(基礎)	2	320	2.00	1.00	

※各層の動的変形特性は以下の基準をもとに設定した
 運輸省港湾局監修、(社)日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成11年4月
 ※Vsは以下のデータをもとに設定した。
 竹内工業団地:地震後に実施されたPS検層結果
 その他:各土層の代表N値(計算地点および付近の地盤調査をもとに設定)

(4) 地震応答解析結果

表6-1-2. 2に、地震応答解析における基盤最大加速度および地表面最大加速度の一覧を示す。また、図6-1-2. 4には、地震応答解析により得られた各解析地点の地表面加速度波形を示す。

表6-1-2. 2を見ると、地表面最大加速度値にかなり大きなばらつきが認められ、特に軟弱層が厚い地区で加速度値が大きくなっている。このような大きな加速度値は実現象と整合しないが、ここでやっている地震応答解析では液状化に伴うせん断波速度の低下を考慮していないため、パルス的な波形により大きな加速度値となっている。

表6-1-2. 2 最大加速度値一覧

	開放基盤加速度 (gal)	地表面最大加速度 (gal)	地表面最大速度 (kine)
竹内工業団地	207	202	13.1
昭和町工業団地	192	230	13.6
米子港旗ヶ崎工業団地	325	280	22.4
崎津工業団地	265	272	16.8

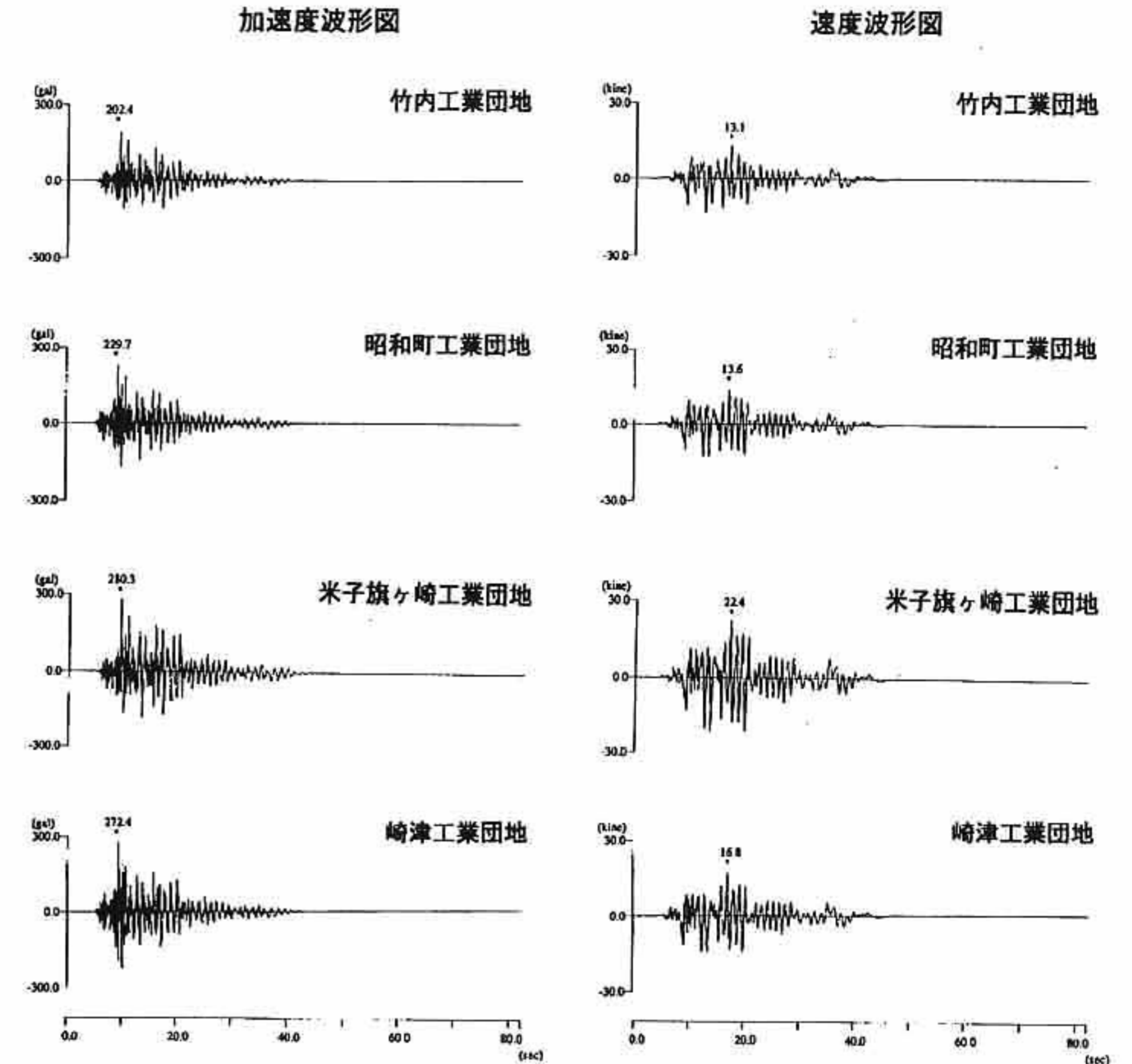


図6-1-2. 4 地表面における各地点の加速度波形および速度波形

6-1-3. 今回の地震による液状化程度の検証

ここでは、今回再現（推定）した地表面最大加速度を用いて、液状化判定を実施し平成12年鳥取県西部地震でどの層がどの程度液状化したかを検証した。

(1) 液状化の判定方法

液状化の判定は次の2種類の方法で行った。

①「建築基礎構造設計指針」日本建築学会 1988

②「道路橋示方書・同解説V（耐震設計編）」（社）日本道路協会 1996.12

これらにより求められる判定値は次のものである。

・ F_L 液状化抵抗率

・ P_L 液状化指数

F_L および P_L の算定方法を図6-1-3. 1、図6-1-3. 2に示した。

ここで、 P_L 値を用いた地盤の液状化危険度は次のようにランク付けされる。

$P_L > 15$: 液状化危険度が極めて高い。液状化に関する詳細な調査と液状化対策は不可避

$5 < P_L \leq 15$: 液状化危険度が高い。重要な構造物に対してより詳細調査が必要

$0 < P_L \leq 5$: 液状化危険度は低い。特に重要な構造物にたいしてより詳細な調査が必要。

$P_L = 0$: 液状化危険度はかなり低い。液状化に関する詳細な調査は一般に不要。

(2) 液状化判定結果

各地区で設定した地盤モデルを基に、推定された地表面最大加速度の時の各方法による F_L 計算結果を図6-1-3. 3~6-1-3. 6に、推定加速度発生時の各方法の P_L 値を一覧として表6-1-3. 1に示した。

以下、判定結果について述べる。

○ 竹内工業団地

埋土層は細粒分（シルト・粘土）の含有率が非常に高くなっている（90%以上）が、埋土層のN値は他の地区より小さい。しかし、本地点においての地表面加速度は202galと他の団地に比べ小さな地表面最大加速度となっている。この要因として、竹内工業団地では入射する工学的地震基盤が深く地盤の歪み依存における軟化の影響が大きいことが挙げられる。その結果、この時の P_L 値は建築基礎・道路橋とも概ね15を示し、「液状化危険度が極めて高い」との判定となり実際の被害と整合的である。ただし、ここでの建築基礎での液状化判定においては、細粒部含有率に対する補正N値増分は50%以上の設定が無く判定が不可能となるが、本判定においては、50%以上の場合には50%の値を用いて判定している。

○ 昭和町工業団地

本地点の液状化判定に用いた地盤モデルは昭和町工業団地の東西方向のほぼ中央に位置する調査ボーリングである。被害状況図から見ると今回の地震において噴砂等の液状化現象

が認められる箇所と認められない個所の境界に位置する。

ここで推定された地表面加速度は230galであり、昭和町工業団地内に設置されている国土交通省（旧運輸省）の境港管理事務所に設置された観測された地震観測結果（EW=302gal）よりも小さくなっている。地表面加速度を230galと見積もると、加速度が小さい分 P_L 値も5前後となる。調査ボーリング結果のN値を見ると他の団地と異なり、埋立土層のN値が大きいこと（あたかも地盤改良したようなN値）も特徴として挙げられる。

○ 米子港旗ヶ崎工業団地

今回の地震においても噴砂が確認された位置に近い箇所に当たるが、推定された地表面加速度はEW=280galであり、 P_L 値も15以上にあり被害状況とも整合的である。

○ 崎津工業団地

崎津工業団地において地震後2本の調査ボーリングが実施されている。今回用いたボーリング柱状図はその内の南側のNo.B-12-16である。埋立土層のN値は10以上あり比較的大きいことから、平成12年鳥取県西部地震で推定された272galにおいても P_L 値は5未満となっている。実際の被害においても、一部団地内で亀裂及び噴砂は認められたものの敷地全体としては液状化現象も少なく被害と整合的であると言える。

表6-1-3. 1 推定地表面加速度発生時の P_L 値一覧

地区名	地表面最大 加速度 (gal)	判定手法	
		道路橋示方書	建築基礎
竹内工業団地	202	16.30	13.59
昭和町工業団地	230	7.52	1.71
米子港旗ヶ崎工業団地	280	19.05	15.35
崎津工業団地	272	2.62	2.16

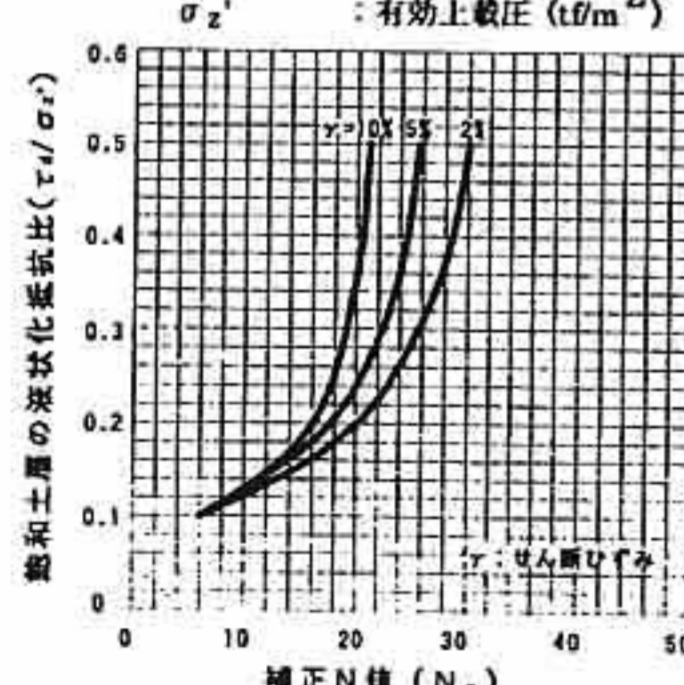
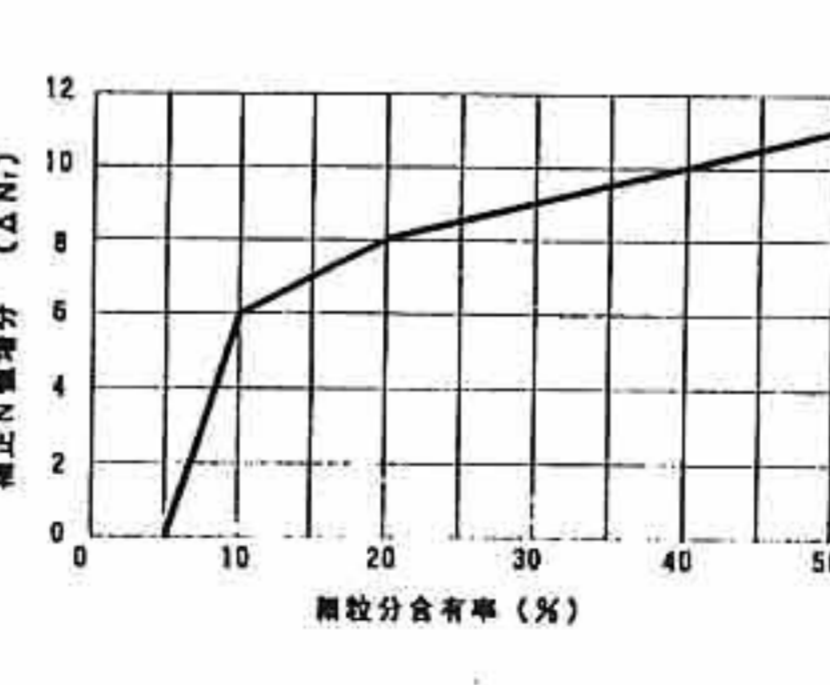
基準・指針名	建築基礎構造設計指針 日本建築学会 1988
液状化判定の対象土層	<ul style="list-style-type: none"> 20m以浅の飽和土層 細粒分含有率FCが35%以下の土層 FCが35%であっても粘土含有率が10%以下、または塑性指数が15%以下の低塑性のシルト層 ※粘土含有率が20%を超える土層は判定対象から除外してよい。
液状化抵抗率	液状化に対する抵抗率 F_L を次式により算出し、この値が1.0以下の土層については液状化するとみなすものとする。 $F_L = \frac{R}{L} = \frac{\tau_d / \sigma'_z}{\tau_d / \sigma'_z} = \frac{R}{\tau_d / \sigma'_z}$
繰返しせん断応力比 L の算出	繰返しせん断応力比 $L = \tau_d / \sigma'_z$ は次式によって求める。 $L = \frac{\tau_d}{\sigma'_z} = r_n \frac{\alpha_{max}}{g} \frac{\sigma_z}{\sigma'_z} \cdot \gamma_d$ ここに、 <ul style="list-style-type: none"> τ_d : 水平面に生じる等価な一定繰返しせん断応力振幅 (tf/m²) σ'_z : 検討深さにおける有効土被り圧 (鉛直有効応力) (tf/m²) r_n : 等価な繰返し回数に関する補正係数で、$r_n = 0.1(M-1)$ ただし、Mは地震のマグニチュード α_{max} : 地表面における設計用水平加速度 (gal) g : 重力加速度(980gal) σ_z : 検討深さにおける全土被り圧 (tf/m²) γ_d : 地盤が剛体でないことによる低減係数で (1-0.015Z)、Zはメートル単位で表した地表面からの検討深さ α_{max} は200gal程度を想定しておけばよい。しかし、地域係数を考えることや、構造物の重要度に応じて重要度係数を考慮することが必要となる場合も生じる。
液状化抵抗比 R の算出	液状化抵抗比 $R = \tau_d / \sigma'_z$ は図-1に示す $\gamma = 5\%$ の曲線を用いて求める。 図-1に示す補正N値 (N_a) は次式より算出する。 $N_a = N + \Delta N_f$ $N_f = C_N \cdot N$ $C_N = \sqrt{10 / \sigma'_z} \quad (\sigma'_z \text{も単位は } tf/m^2)$ ここに、 <ul style="list-style-type: none"> N_1 : 換算N値 ΔN_f : 細粒分によるN値補正項 (図-2)。 C_N : 換算N値係数 N: とんび法または自動落下法による実測N値。ただし、コーンブリー法を用いたときは、ロープをブリーから外してハンマーを自由落下させる努力をした場合 1割程度、自由落下の努力をしなかった場合 2割程度割引くこととする。 σ'_z : 有効土被り圧 (tf/m ²)  

図6-1-3-1(1) F_L の計算方法 (建築基礎構造設計指針)

基準・指針名	道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (社) 日本道路協会 平成8年12月												
液状化判定の対象土層	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位が現地盤面から10m以内にあり、かつ現地盤面から20m以内の深さに存在する飽和土層。 細粒分含有率FCが35%以下の土層、またはFCが35%を越えても塑性指数Ipが15以下の土層。 平均粒径 D_{50} が10mm以下で、かつ10%粒径 D_{10} が1mm以下である土層。 												
液状化抵抗率	液状化に対する抵抗率 F_L を次式により算出し、この値が1.0以下の土層については液状化するとみなすものとする。 $F_L = R/L$												
繰返しせん断応力比 L の算出	$L = r_d \cdot k_{bc} \alpha / \sigma'_v$ $r_d = 1.0 - 0.015x$ $\alpha = \{ \gamma_1 h_w + \gamma_2 (x - h_w) \} / 10$ $\sigma'_v = \{ \gamma_1 h_w + \gamma_2 (x - h_w) \} / 10$ (タイプIの地震動の場合) $c_w = 1.0$ (タイプIIの地震動の場合) $c_w = \begin{cases} 1.0 & (R_L \leq 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \leq 0.4) \\ 2.0 & (0.4 < R_L) \end{cases}$ ここに、 <ul style="list-style-type: none"> L: 地震時せん断応力比 r_d: 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数 k_{bc}: 地震時保有水平耐力法に用いる設計水平震度の標準値 K_{bc} <table border="1" data-bbox="2184 344 2679 560"> <thead> <tr> <th>地盤種別</th> <th>タイプI</th> <th>タイプII</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>I種</td> <td>0.30</td> <td>0.80</td> </tr> <tr> <td>II種</td> <td>0.35</td> <td>0.70</td> </tr> <tr> <td>III種</td> <td>0.40</td> <td>0.60</td> </tr> </tbody> </table> C_2: 地域別補正係数 α: 全土被り圧 (kgf/cm²) σ'_v: 有効土被り圧 (kgf/cm²) x: 地表面からの深さ (m) γ_1: 地下水位面より浅い位置での土の単位体積重量 (tf/m³) γ_2: 地下水位面より深い位置での土の単位体積重量 (tf/m³) γ_3: 地下水位面より深い位置での土の有効単位体積重量 (tf/m³) h_w: 地下水位の深さ (m) c_w: 地震動特性による補正係数 R_L: 繰返し三軸強度比 ※1) タイプI: 大きな振幅が長時間繰り返して作用する地震動 (プレート境界型の大規模な地震) を表したものの。 ※2) タイプII: 継続時間は短いが高めて強度を有する地震動 (兵庫県南部地震のような内陸型地震) を表したものの。	地盤種別	タイプI	タイプII	I種	0.30	0.80	II種	0.35	0.70	III種	0.40	0.60
地盤種別	タイプI	タイプII											
I種	0.30	0.80											
II種	0.35	0.70											
III種	0.40	0.60											
液状化抵抗比 R の算出	$R = c_w R_L$ $R_L = \begin{cases} 0.0882 \sqrt{N_a / 1.7} & (N_a < 14) \\ 0.0882 \sqrt{N_a / 1.7} + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (N_a - 14)^{0.45} & (14 \leq N_a) \end{cases}$ ここで、 <ul style="list-style-type: none"> <砂質土の場合> $N_a = c_1 \cdot N_1 + c_2$ $N_1 = 1.7 \cdot N / (\alpha + 0.7)$ $c_1 = \begin{cases} 1 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC + 40) / 60 & (10\% \leq FC < 60\%) \\ FC / 20 - 1 & (60\% \leq FC) \end{cases}$ $c_2 = \begin{cases} 0 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC - 10) / 18 & (10\% \leq FC) \end{cases}$ <礫質土の場合> $N_a = \{ 1 - 0.36 \log_{10} (D_{50}/2) \} N_1$ ここに、 <ul style="list-style-type: none"> R: 動的せん断強度比 c_w: 地震動特性による補正係数 R_L: 繰返し三軸強度比 N: 標準貫入試験から得られるN値 N_1: 有効土被り圧 1kgf/cm² 相当に換算したN値 N_a: 粒度の影響を考慮した補正N値 c_1, c_2: 細粒分含有率によるN値の補正係数 FC: 細粒分含有率 (%) (粒径75μm以下の土粒子の通過質量百分率) D_{50}: 平均粒径 (mm) 												

図6-1-3.1(2) F_L の計算方法 (道路橋示方書・同解説)

液状化判定の対象土層

① 「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」 日本道路協会 平成8年12月

- ・ 地下水位が現地表面から 10m 以内にあり、かつ地表面から 20m 以内の深さに存在する飽和土層
- ・ 細粒分含有率 FC が 35%以下の土層、または FC が 35%を越えても塑性指数 IP が 15 以下の土層
- ・ 平均粒径 D50 が 10mm 以下で、かつ 10%粒径 D10 が 1mm 以下である土層

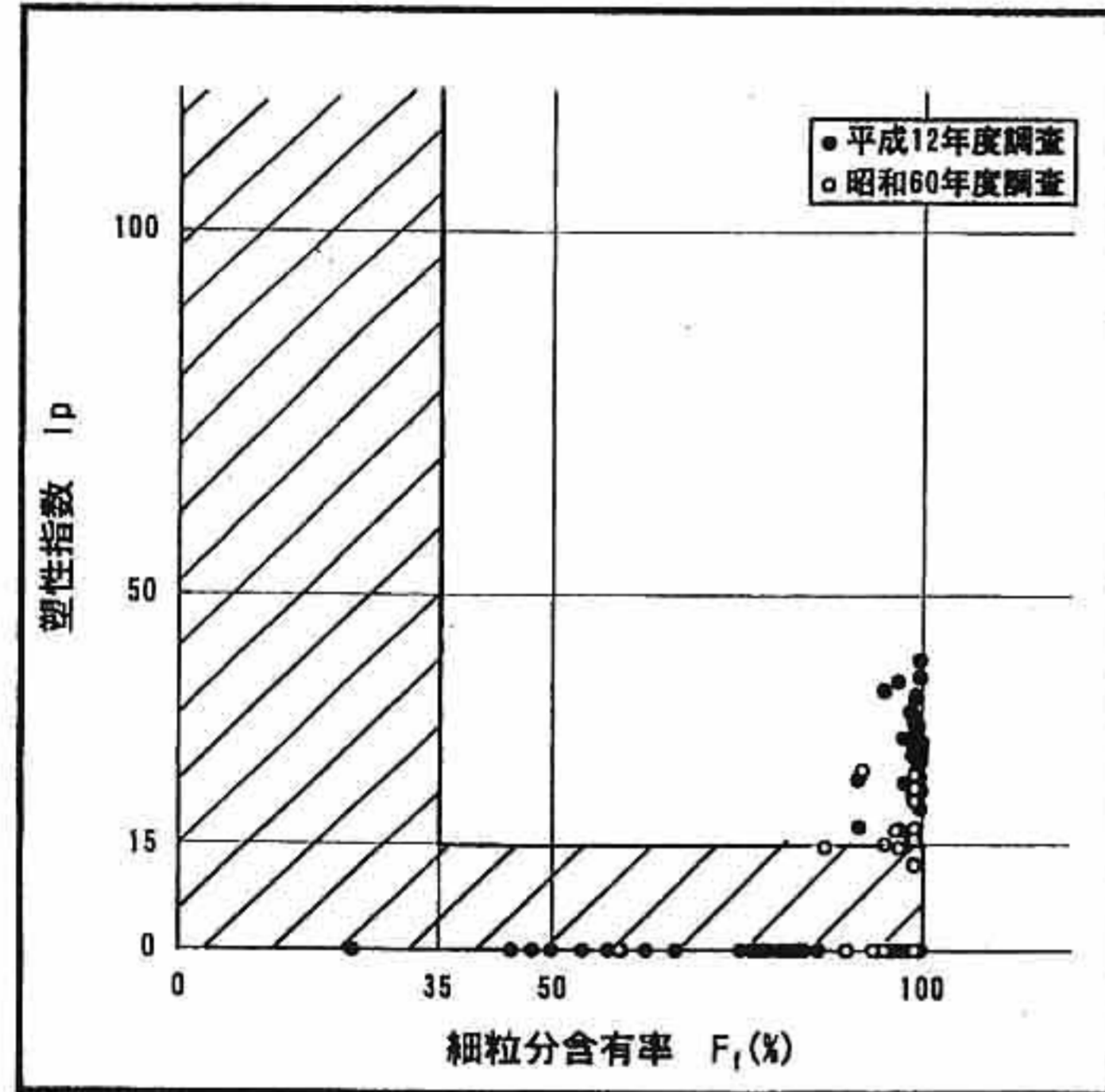


図6-1-3.1(3) 道路橋の対象土層範囲図

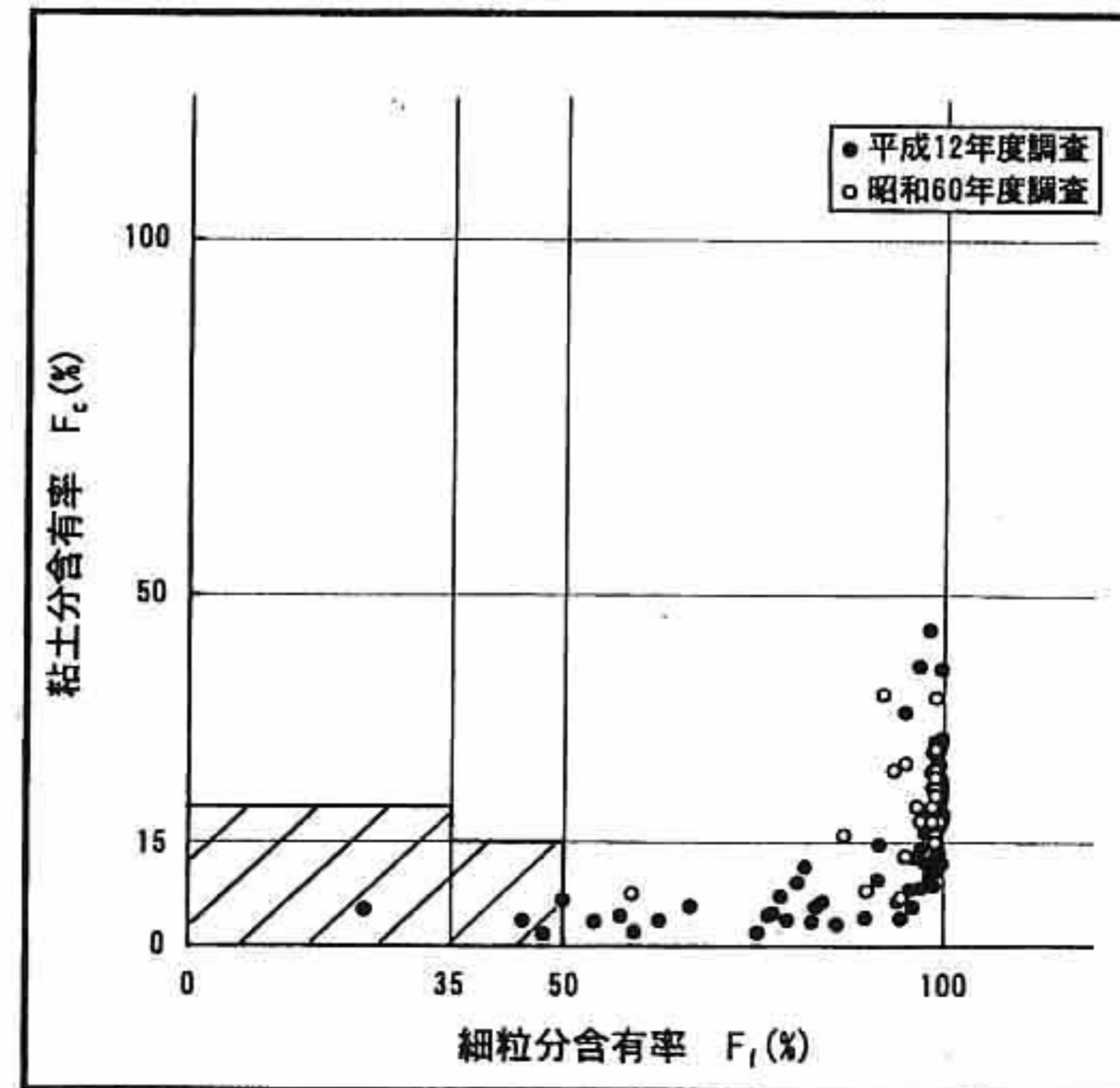
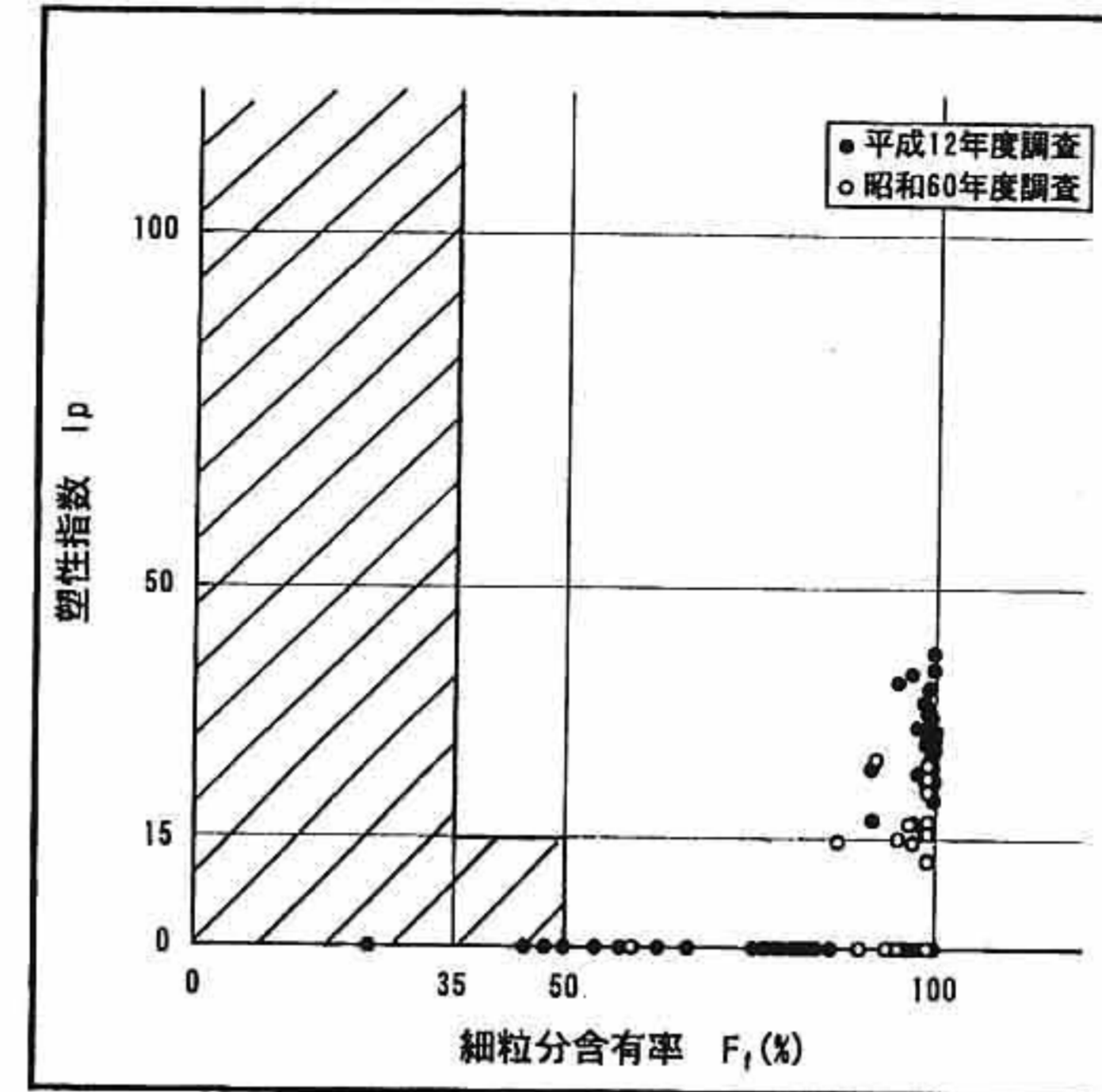


図6-1-3-1(4) 建築基礎の対象土層範囲図

② 「建築基礎構造設計指針」 日本建築学会 1988

- ・ 20m 以浅の飽和土層
- ・ 細粒分含有率 FC が 35%以下の土層
- ・ FC が 35%以上であっても粘土分含有率 10%以下、または塑性指数 IP が 15 以下の低塑性のシルト層
- ・ 粘土分含有率が 20%を越える土層は判定から除外してよい

〔岩崎他, 地震時液状化の程度の予測
について, 土と基礎 vol. 28, No. 4〕

項目	内容
定義式	$P_L = \int_0^{20} F \cdot W(Z) dz$ $F = \begin{cases} 1 - F_L & (F_L < 1.0) \\ 0 & (F_L \geq 1.0) \end{cases}$ $(P_L = \sum_{i=1}^n F \cdot W(Z) \Delta z)$ $W(Z) = 10 - 0.5Z$ <p>P_L : 液状化指数, $W(Z)$: 重み係数, Z : 深度 (m)</p>
判定基準	<p>$P_L = 0$: 液状化危険度はかなり低い。液状化に関する詳細な調査は一般に不要。</p> <p>$0 < P_L \leq 5$: 液状化危険度は低い。特に重要な構造物に対して、より詳細な調査が必要。</p> <p>$5 < P_L \leq 15$: 液状化危険度が高い。重要な構造物に対してより詳細な調査が必要。液状化対策が一般に必要。</p> <p>$15 < P_L$: 液状化危険度が極めて高い。液状化に関する詳細な調査と液状化対策は不可避。</p>

P_L の算出例

右の例は F_L が連続的に求められないため、以下の式を

$$P_L = \int_0^{20} F \cdot W(Z) dz$$

次のように変形して求めたものである。

$$P_L = \sum_{i=1}^n F \cdot W(Z) \Delta z$$

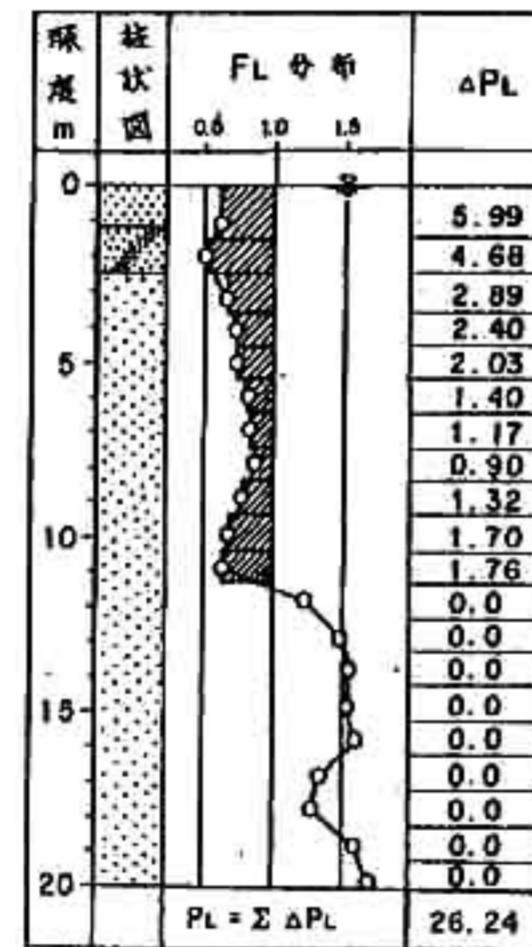


図6-1-3. 2 P_L (液状化抵抗率) の算定方法

(参考) 平成7年兵庫県南部地震を受けて改訂された液状化の判定 (道路橋示方書)

砂質土地盤の液状化判定法および液状化した場合の基礎構造設計の方法については、昭和55年改訂版以降道路橋示方書において、それらの定量的な取り扱い方法が述べられてきた。周知のように、平成7年兵庫県南部地震では沿岸埋立地をはじめとする広範な地域で液状化が発生し、側方流動など液状化に伴う被害が見られた。この地震を契機として、液状化判定法に関しては強い地震動の下では礫を多く含む土や低塑性のシルトでも液状化が生じること、また、比較的密な砂質土でも液状化し得るように各種構造物の液状化判定法が改定された。平成8年12月の改訂の中で、液状化の判定を行う必要がある土層の粒径分布の範囲が表6-1-3. 2のとおり改訂された。表6-1-3. 2の内容を粒径分布で表現したものが図6-1-3. 1(5)である。

今回の地震で液状化現象が顕著に認められた竹内工業団地における埋立土層の粒径分布は、平成7年兵庫県南部地震を契機に広げられた粒径分布よりさらに細粒側であっても低塑性(盛土材の液性・塑性試験の結果からは殆どの試験結果がNPとなっている。〈現在試験中〉)な土質であれば液状化の可能性のある土層であることが検証されたことになる。

また、「6-1-3. 今回の地震による液状化程度の検証」において、再現(推定)された地震動により液状化に対する抵抗率(F_L)が1.0を下回り液状化したと推定される土層の殆どが埋土層であったことも当地震の液状化における最大の特徴と言える。

表6-1-3. 2 平成8年12月の改訂内容 (道路橋示方書)

	改定前	改定後	改訂による影響
粒度の下限值	①平均粒径 $D_{50} \geq 0.02\text{mm}$	①細粒分含有率 $F_c \leq 35\%$ または ②塑性指数 $I_p \leq 15$	礫質土が新たに追加される
粒度の上限值	②平均粒径 $D_{50} \leq 2.0\text{mm}$	③平均粒径 $D_{50} \leq 10\text{mm}$ かつ ④10%粒径 $D_{10} \leq 1\text{mm}$	

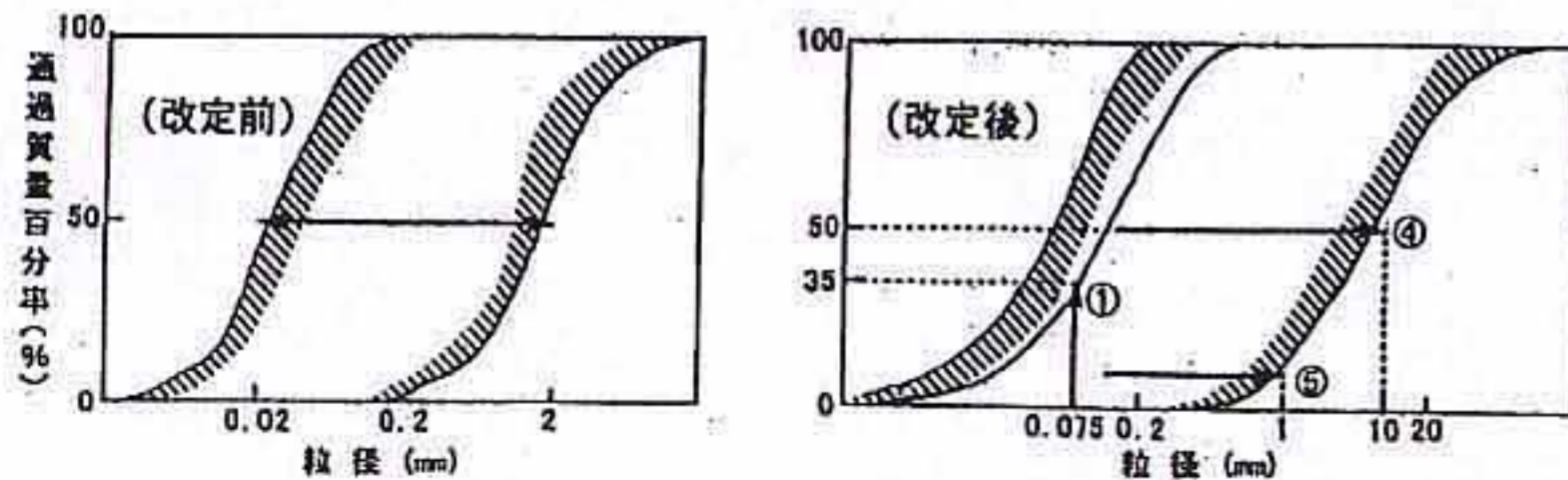


図6-1-3. 1(5) 液状化の判定を行う必要がある土の粒径分布

地点名 竹内工業団地ほか地質調査委託 60-2

PL値 11.318
 水の単位体積重量 1.00 (11/m³)
 土の単位体積重量 2.00 (11/m³)
 設計水平荷重 $\gamma = 8$ (k)
 設計加振数 101.49 (rad)
 マグニチュード 7.3

基準名 建築基礎設計用土質調査と、実測N値
 判定方法 建築基礎設計用土質調査と、実測N値

(注) 011 判定外

深 尺 (m)	層 厚 (m)	土質 種類	土質特性				せん断係数		液状化の判定				土 質 調 査 者		
			実測N値	平均粒径	標準偏差	上層土	平均せん断力	標準偏差	判定係数	判定係数	判定係数	判定係数			
0	2.1	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.1	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.3	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.5	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11.7	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14.9	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.1	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21.3	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24.5	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27.7	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

PL値

	条件仮定	正規
建築	($F_c \leq 50\%$) 16.35	—
道路	(IP無視) 21.57	13.57

地点名 竹内工業団地ほか地質調査委託 60-2

PL値 11.318
 水の単位体積重量 1.00(11/m³)
 土の単位体積重量 2.00(11/m³)
 地下水位 1.35(m)

設計水平荷重 $\gamma = 8$

基準名 道路橋示方書・同解説(タイプII)
 判定方法 設計調査と、実測N値

(注) 011~012 判定外

深 尺 (m)	層 厚 (m)	土質 種類	土質特性				せん断係数		液状化の判定				土 質 調 査 者	
			実測N値	平均粒径	標準偏差	上層土	平均せん断力	標準偏差	判定係数	判定係数	判定係数	判定係数		
0	2.1	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.1	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.3	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.5	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11.7	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14.9	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.1	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21.3	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24.5	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27.7	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

地点名 竹内工業団地ほか地質調査委託 60-2

PL値 12.571
 水の単位体積重量 1.00(11/m³)
 土の単位体積重量 2.00(11/m³)
 地下水位 1.35(m)

設計水平荷重 $\gamma = 8$

基準名 道路橋示方書・同解説(タイプII)
 判定方法 設計調査と、実測N値、IP

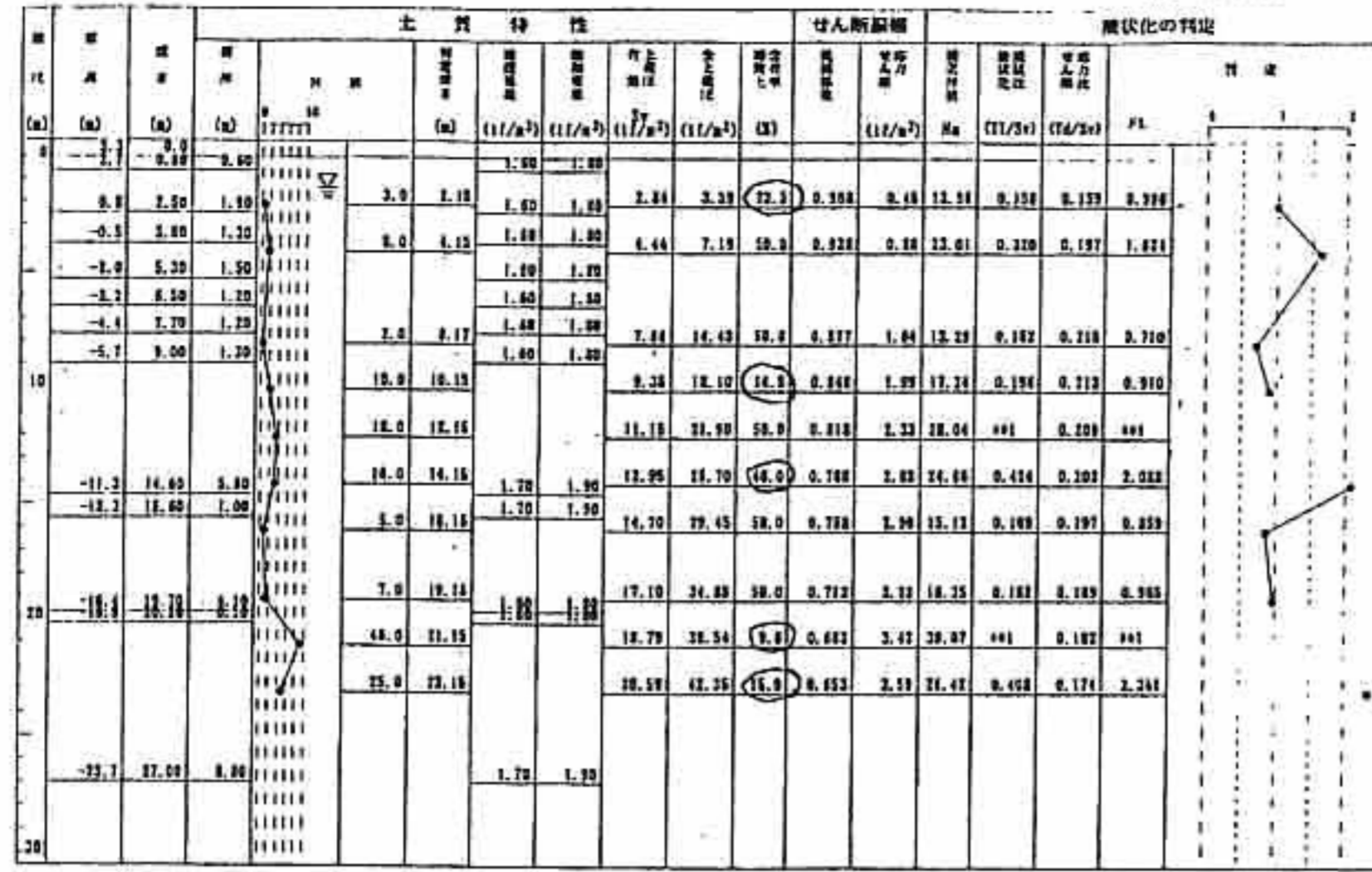
(注) 011~012 判定外

深 尺 (m)	層 厚 (m)	土質 種類	土質特性				せん断係数		液状化の判定				土 質 調 査 者	
			実測N値	平均粒径	標準偏差	上層土	平均せん断力	標準偏差	判定係数	判定係数	判定係数	判定係数		
0	2.1	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.1	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.3	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.5	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11.7	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14.9	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.1	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21.3	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24.5	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27.7	3.20	砂質土	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

図6-1-3. 3(3) 既往調査の液状化判定結果図(竹内工業団地,60-2)

地点名 竹内工業団地ほか地質調査委託 60-3
 基準名 透水路示方書・同解説 (タイプB)
 判定方法 地質調査設計用水平加速度と、実測N値

PL値 3.81
 水の単位体積重量 1.00 (t/m³)
 上載荷重 0.00 (t/m²)
 設計加速度 7~5 (g)
 マグニチュード 101.60 (ml)
 7.3 (注) **1 判定外



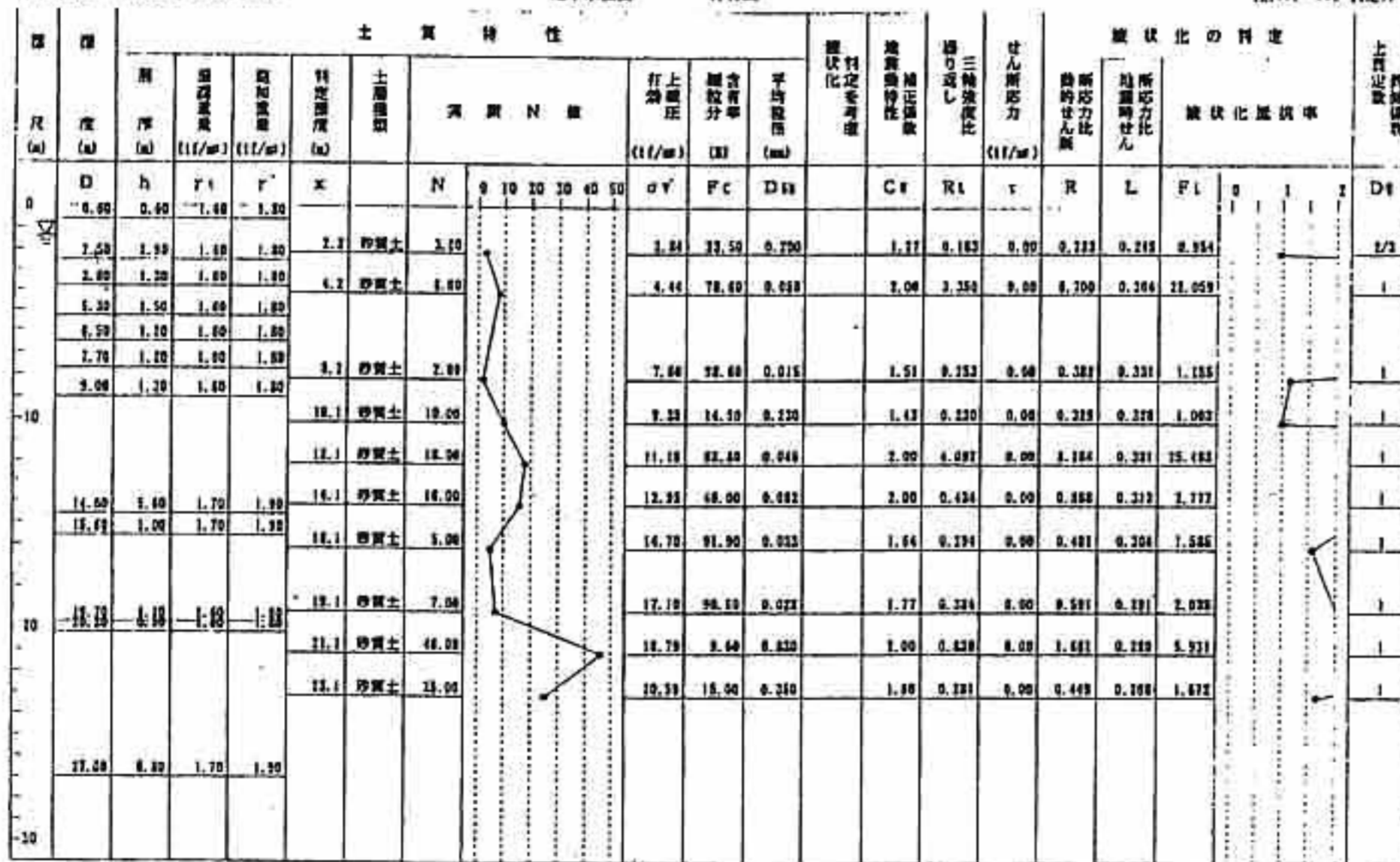
PL 値

	条件仮定	正積
建築	(F _c ≤ 50%) 3.81	—
道路	(IP Ⅲ 視) 0.45	0.62

地点名 竹内工業団地ほか地質調査委託 60-3
 基準名 透水路示方書・同解説 (タイプB)
 判定方法 設計加速度と、実測N値

PL値 0.450
 水の単位体積重量 1.00(t/m³)
 上載荷重 0.00(t/m²)
 地下水位面 1.40(m)

設計水平加速度 0.10 (注)**1~**2 判定外



地点名 竹内工業団地ほか地質調査委託 60-3
 基準名 透水路示方書・同解説 (タイプB)
 判定方法 設計加速度と、実測N値, IP

PL値 0.817
 水の単位体積重量 1.00(t/m³)
 上載荷重 0.00(t/m²)
 地下水位面 1.40(m)

設計水平加速度 0.10 (注)**1~**2 判定外

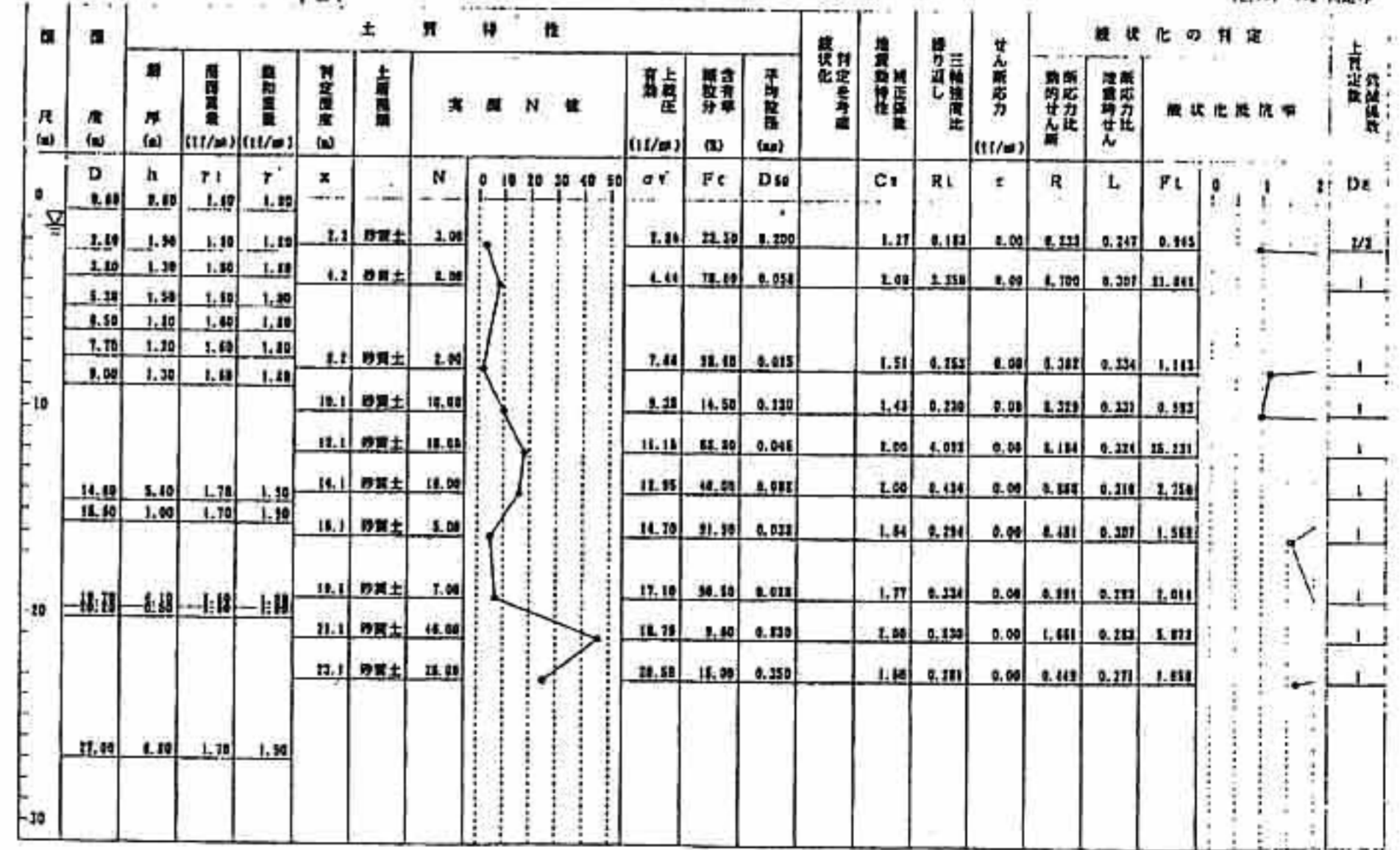
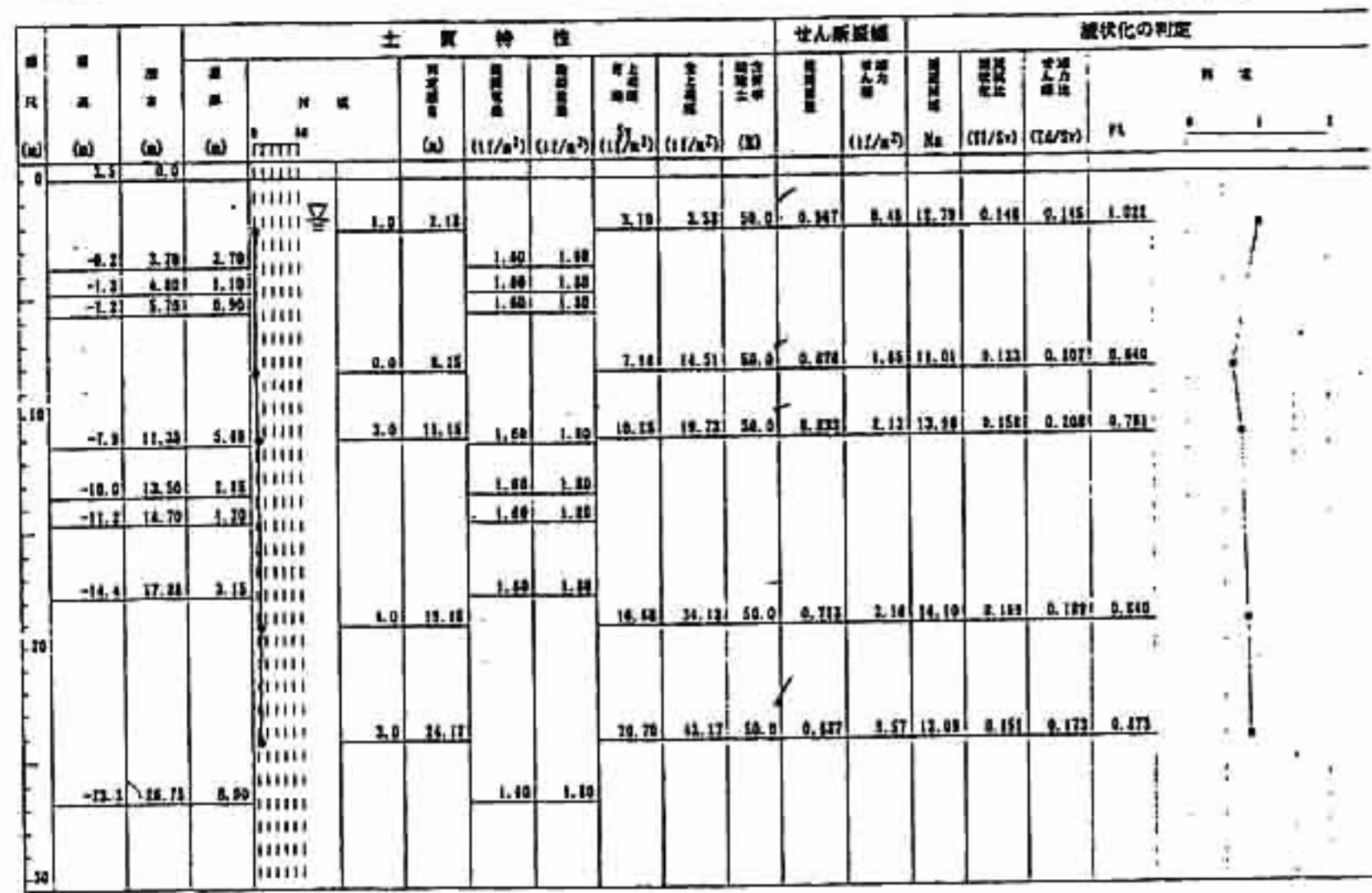


図6-1-3. 3(4) 既往調査の液状化判定結果図(竹内工業団地,60-3)

地点名 竹内工業団地ほか地質調査委託 60-5
 基準名 建築基礎構造設計用土質調査結果と、実測N値
 判定方法

PL値 10.48
 水の単位体積重量 1.00 (t/m³)
 土質調査 0.08 (t/m³)
 上覆荷重 γ = 5 (kN/m³)
 設計加速度 102.00 (cm/s²)
 マグニチュード 7.1 (注) 特記外

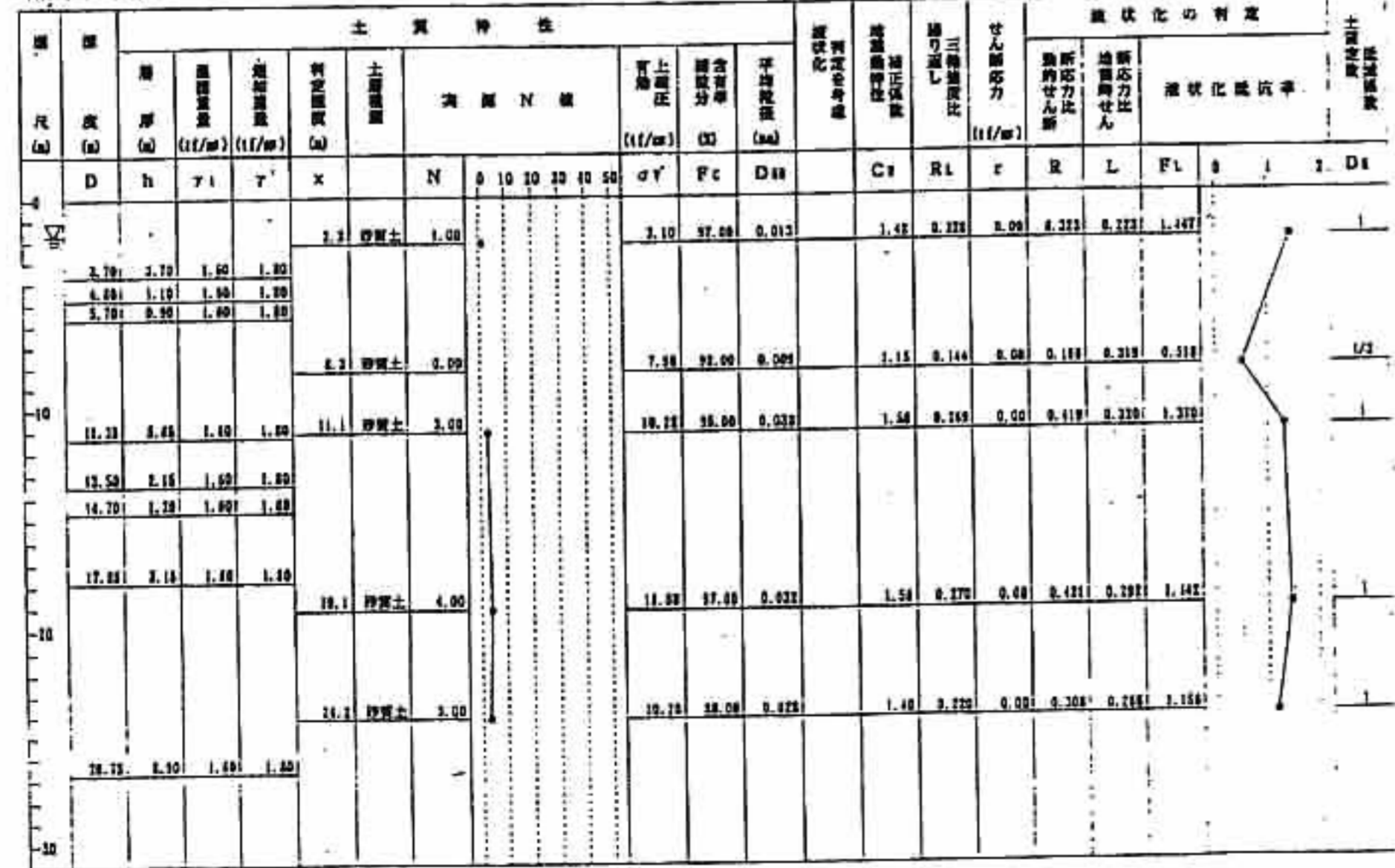


PL値

	条件仮定	正統
建築	(Fc ≦ 50%) 10.46	— (0.00)
道路	(IP無視) 11.32	0.00

地点名 竹内工業団地ほか地質調査委託 60-5
 基準名 道路橋示方書・同解説 (タイプII)
 判定方法 設計加速度と、実測N値

PL値 11.322
 水の単位体積重量 1.00 (t/m³)
 土質調査 0.06 (t/m³)
 地下水位 1.70 (m)
 設計水平加速度 0.20 (注) 特記外



地点名 竹内工業団地ほか地質調査委託 60-5
 基準名 道路橋示方書・同解説 (タイプII)
 判定方法 設計加速度と、実測N値、IP考慮

PL値 10.000
 水の単位体積重量 1.00 (t/m³)
 土質調査 0.08 (t/m³)
 地下水位 1.70 (m)
 設計水平加速度 0.20 (注) 特記外

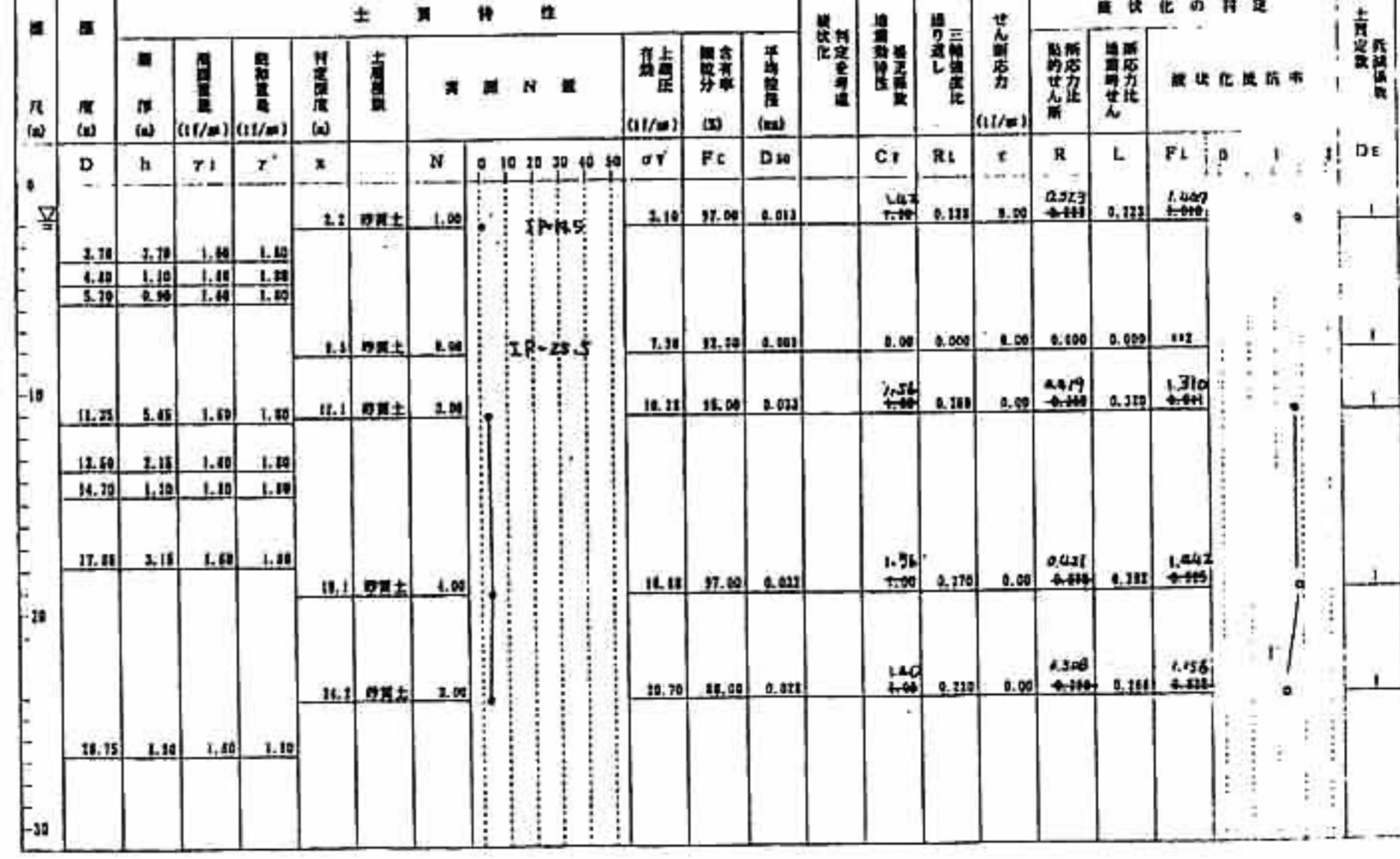
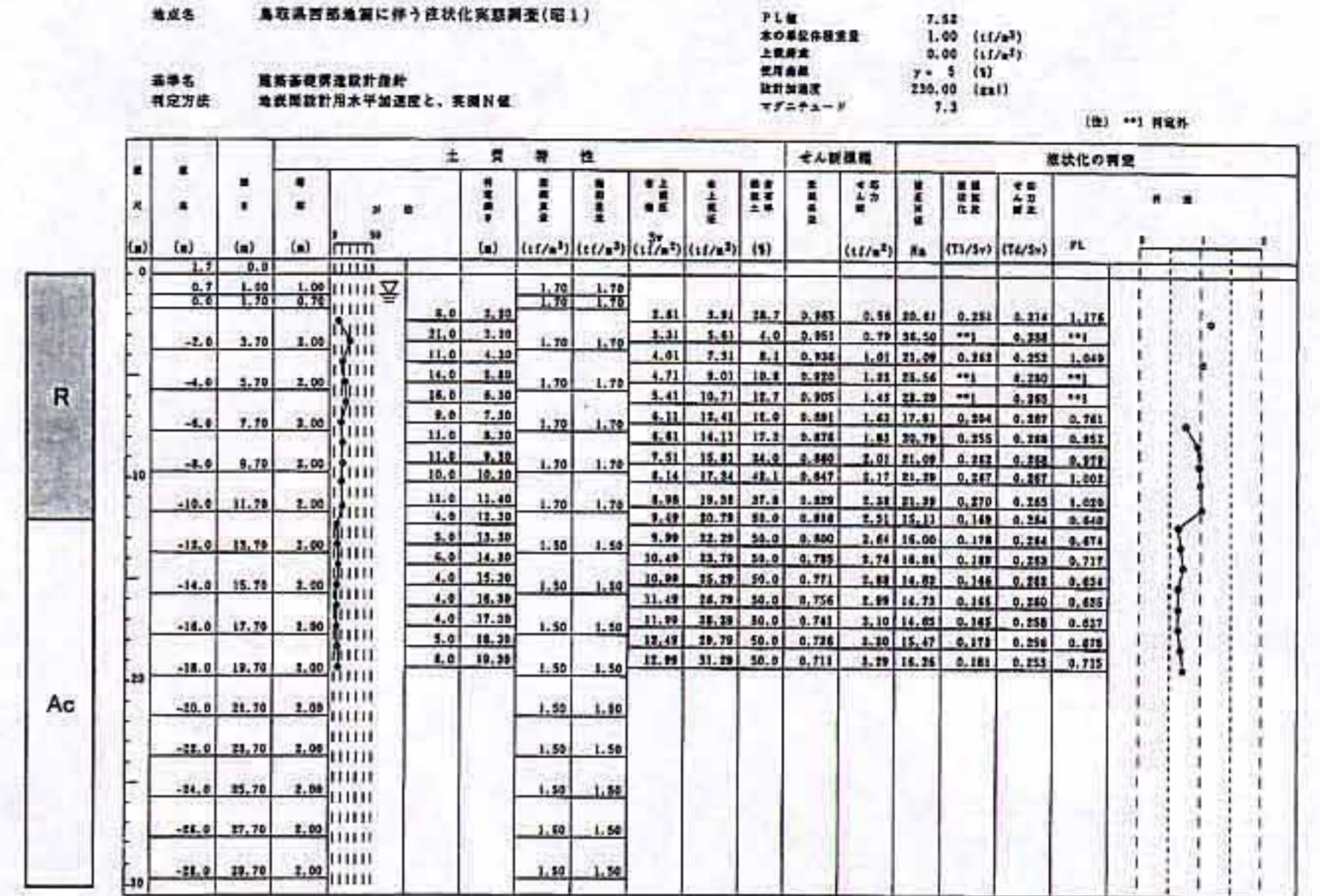
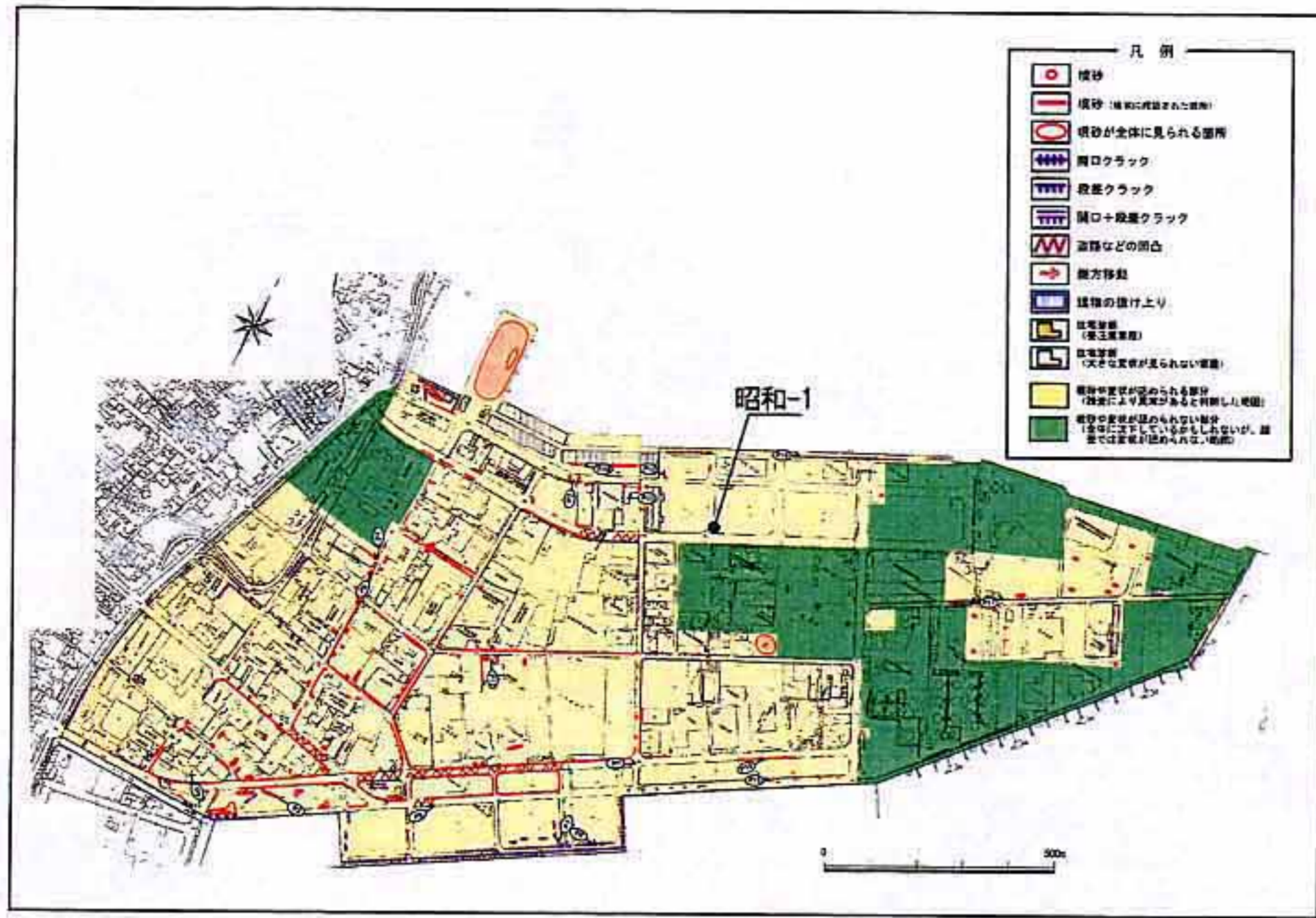


図6-1-3. 3(5) 既往調査の液状化判定結果図(竹内工業団地, 60-5)



最大応答値深度分布図

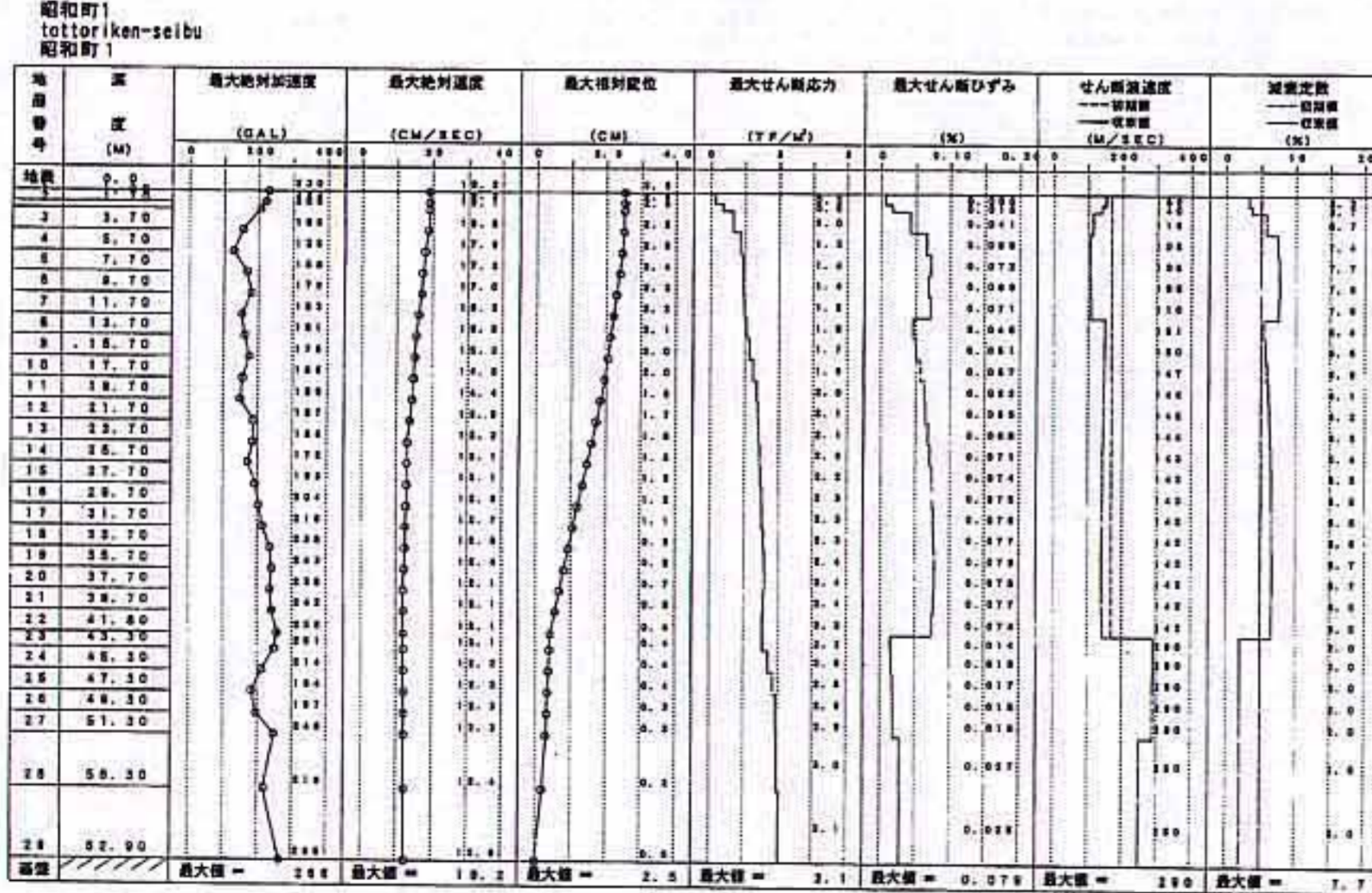


図6-1-3. 4(1) 被害状況と一次元応答計算結果図(昭和工業団地)

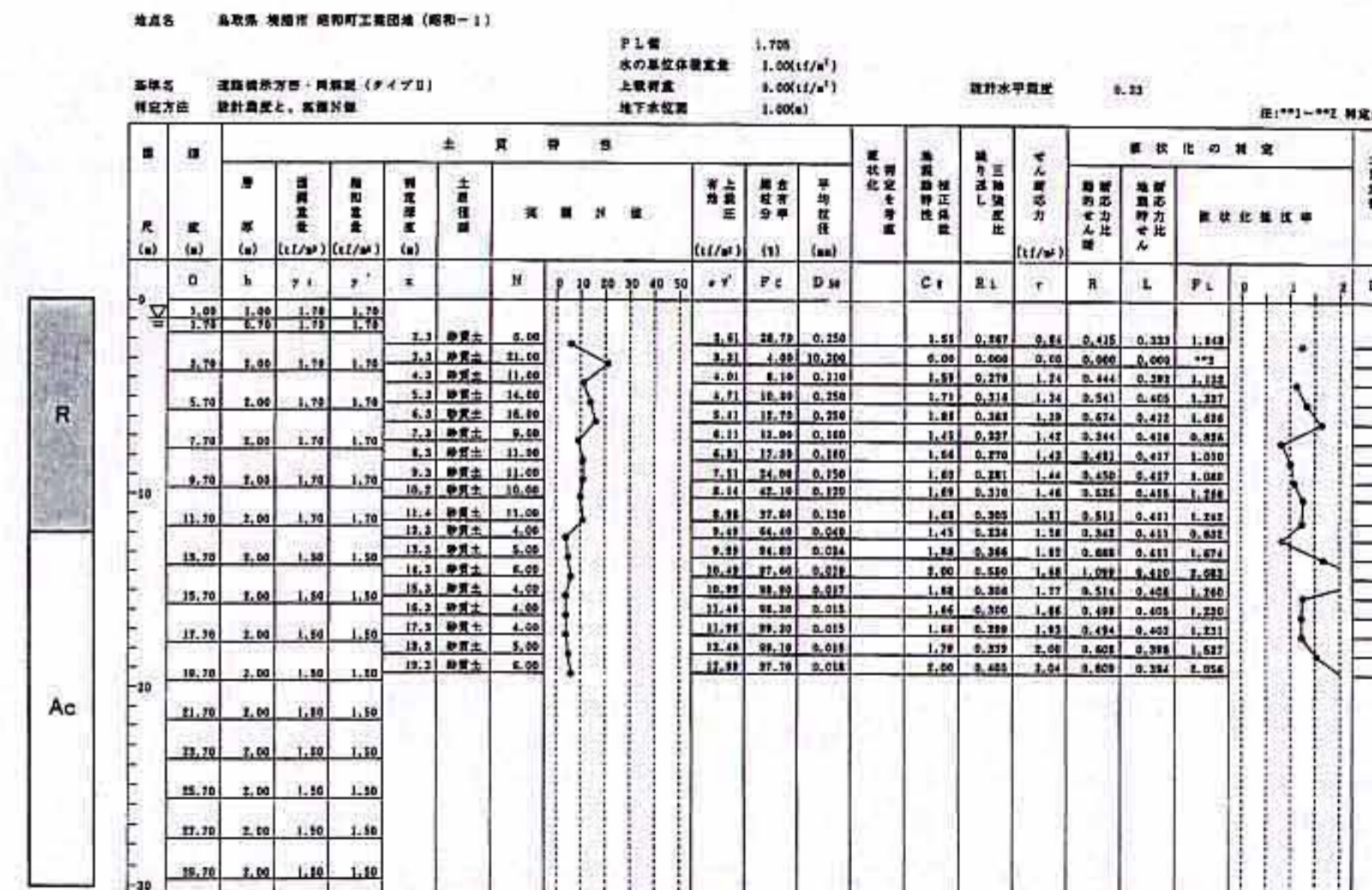
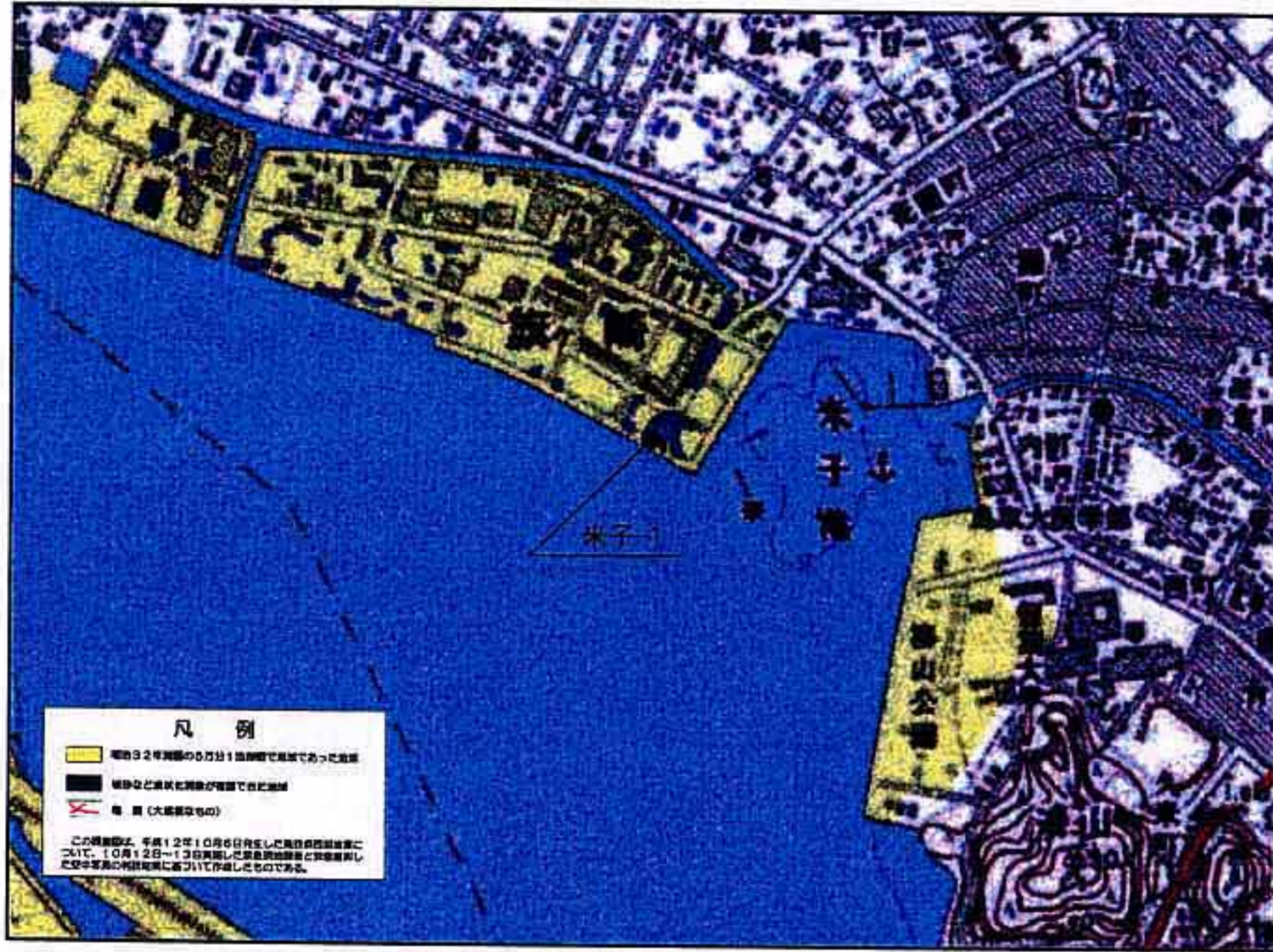


図6-1-3. 4(2) 液状化判定結果図(昭和工業団地)



最大応答値深度分布図

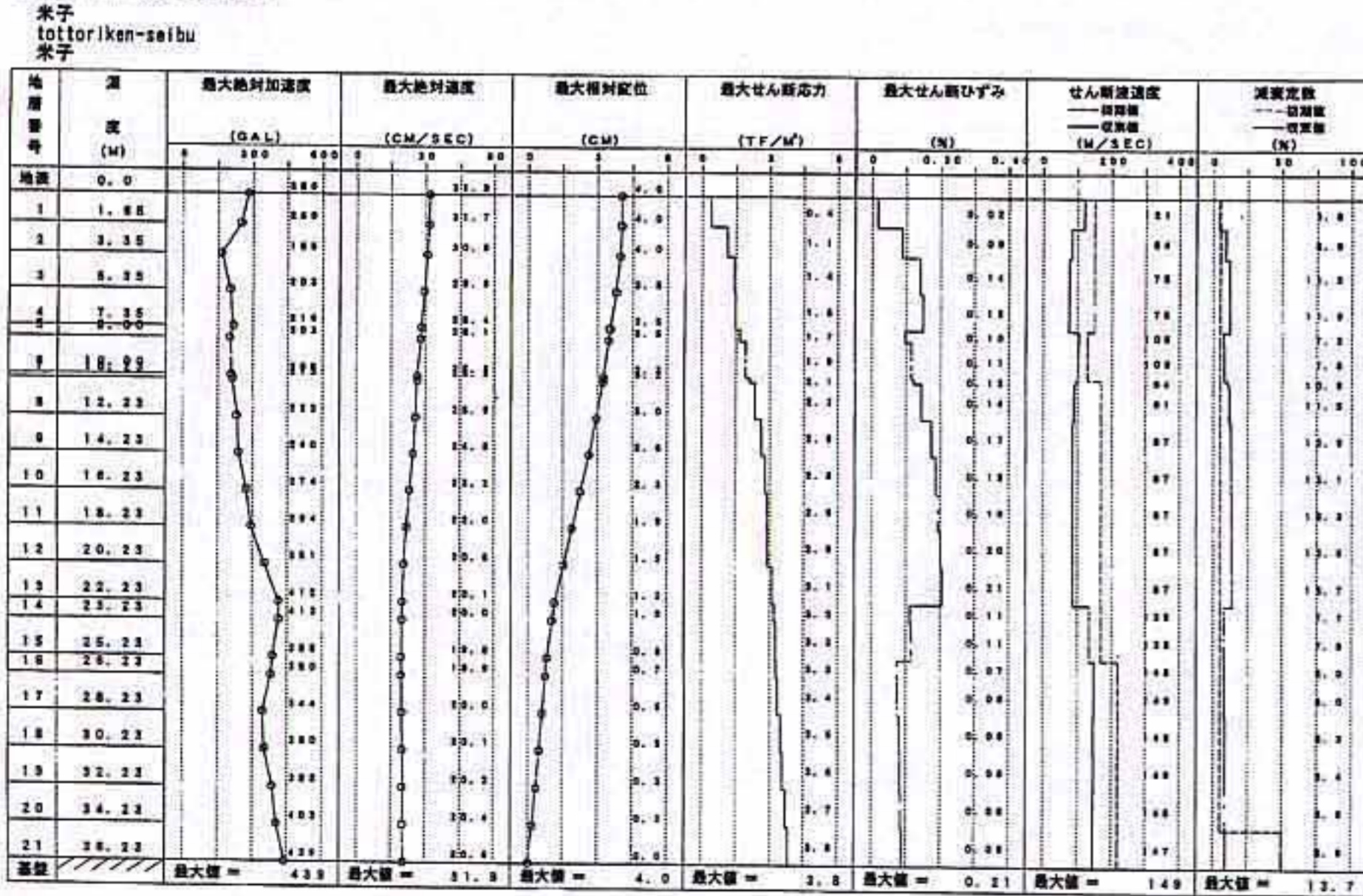


図6-1-3. 5(1) 被害状況と一次元応答計算結果図(旗ヶ崎工業団地)

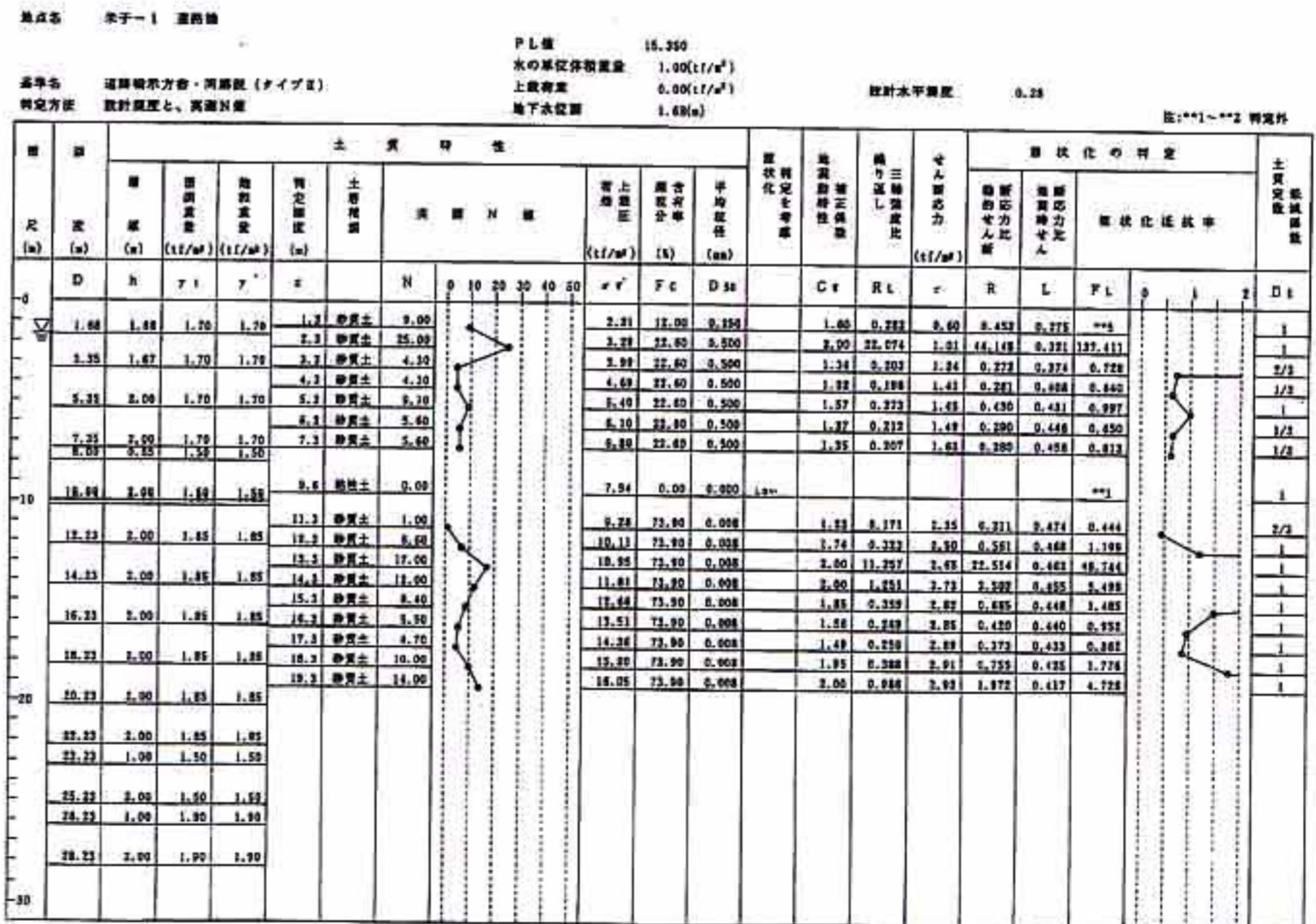
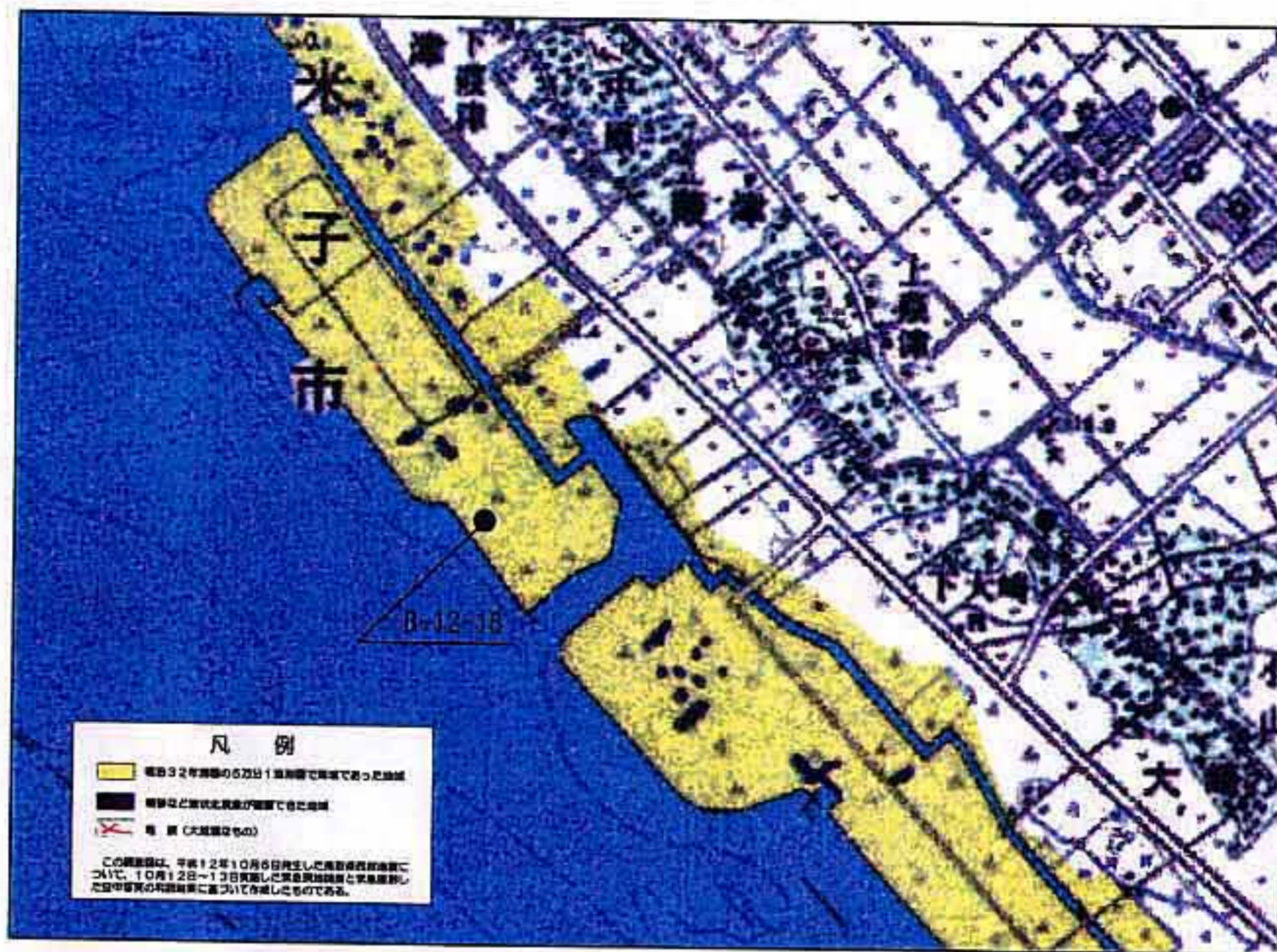


図6-1-3. 5(2) 液状化判定結果図(旗ヶ崎工業団地)



最大応答値深度分布図

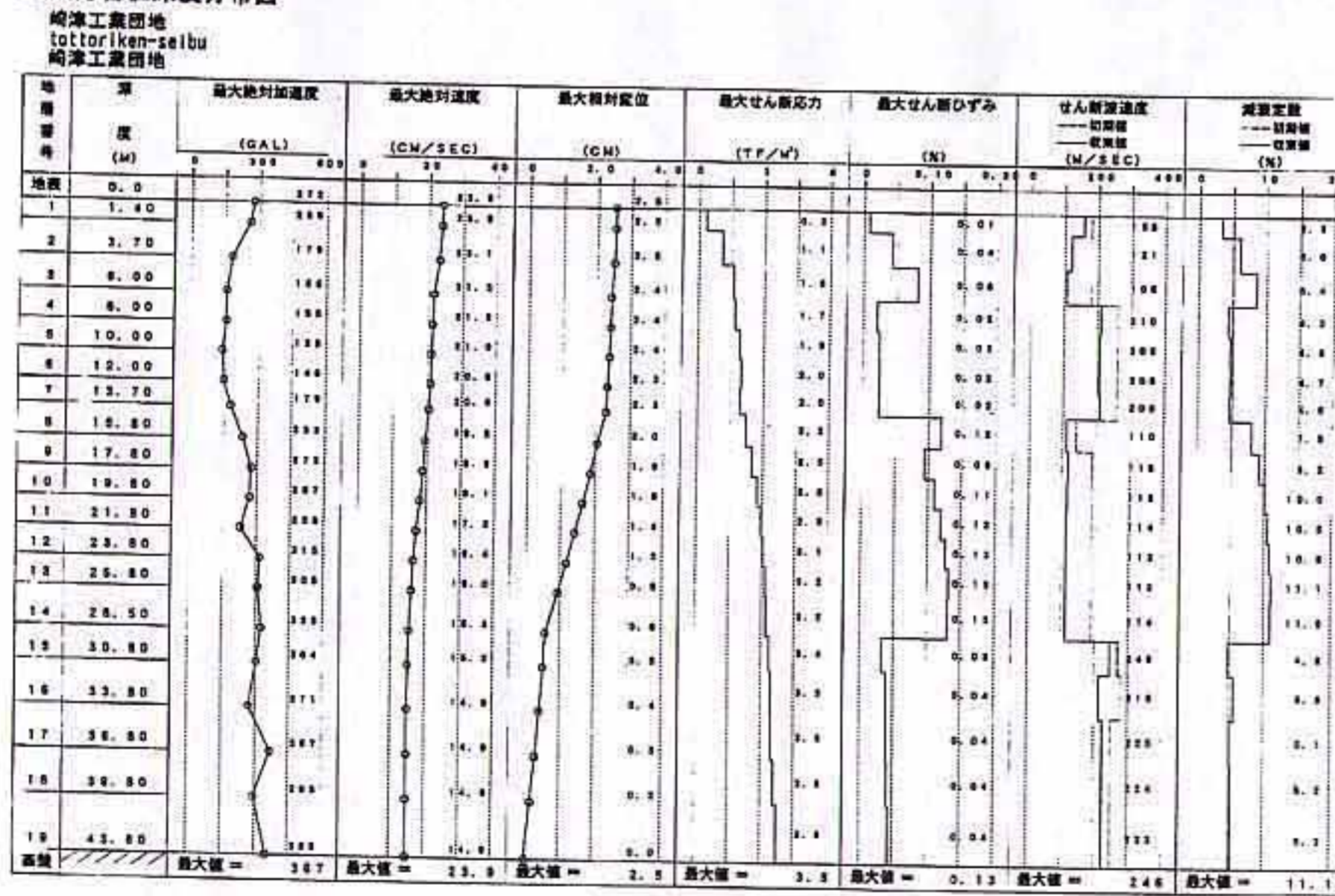
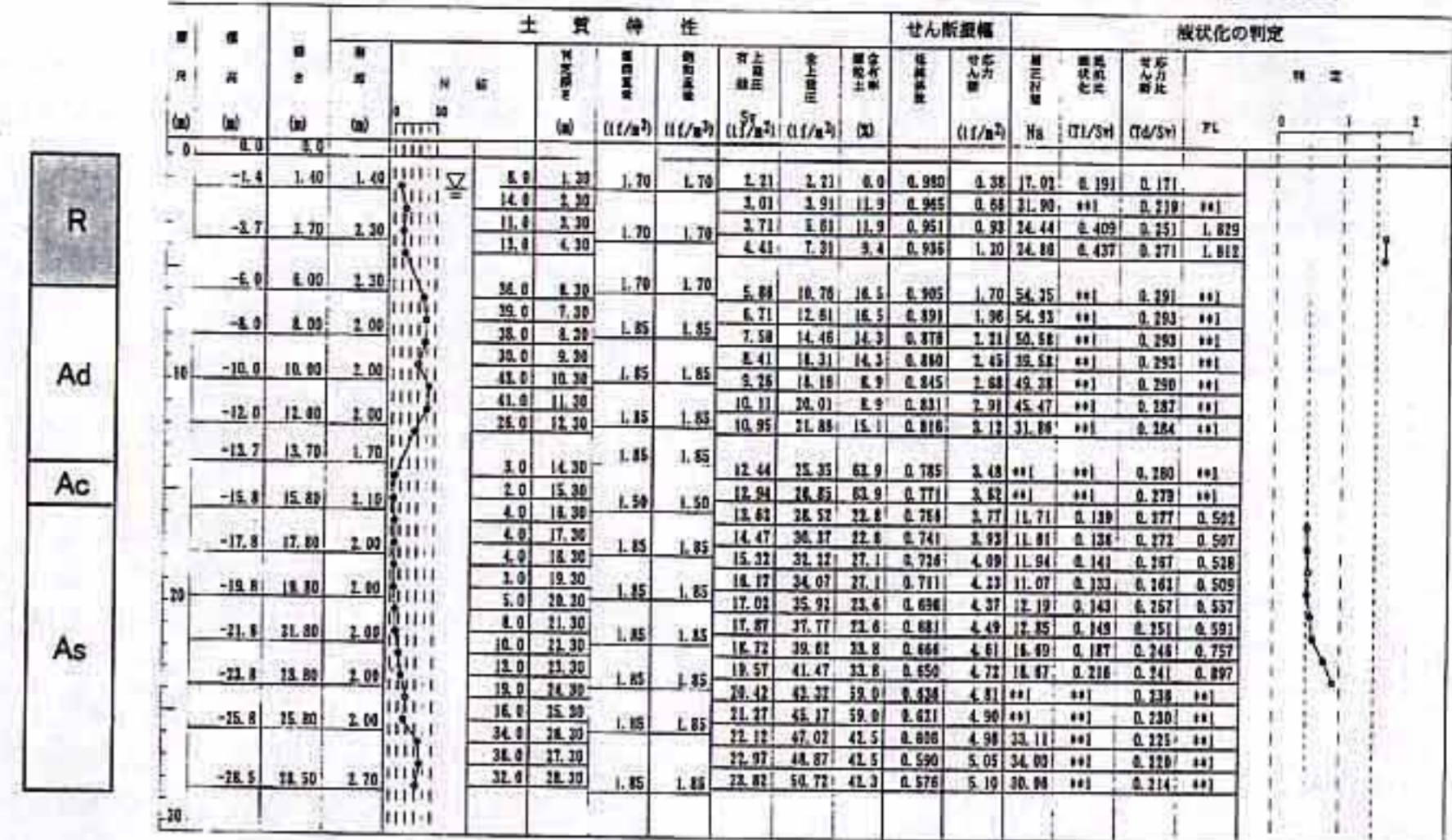


図6-1-3. 6(1) 被害状況と一次元応答計算結果図(崎津工業団地)

地点名 崎津工業団地
 基準名 建築基礎構造設計指針
 判定方法 地震面設計用水圧加減度と、実測N値

PL値 2.16
 水の単位体積重量 1.00 (t/m³)
 土の単位体積重量 1.70 (t/m³)
 設計加速度 0.27 (g)
 マグニチュード 7.3



PL値 2.424
 水の単位体積重量 1.00(t/m³)
 土の単位体積重量 1.70(t/m³)
 設計加速度 0.27
 地下水水位 1.40(m)

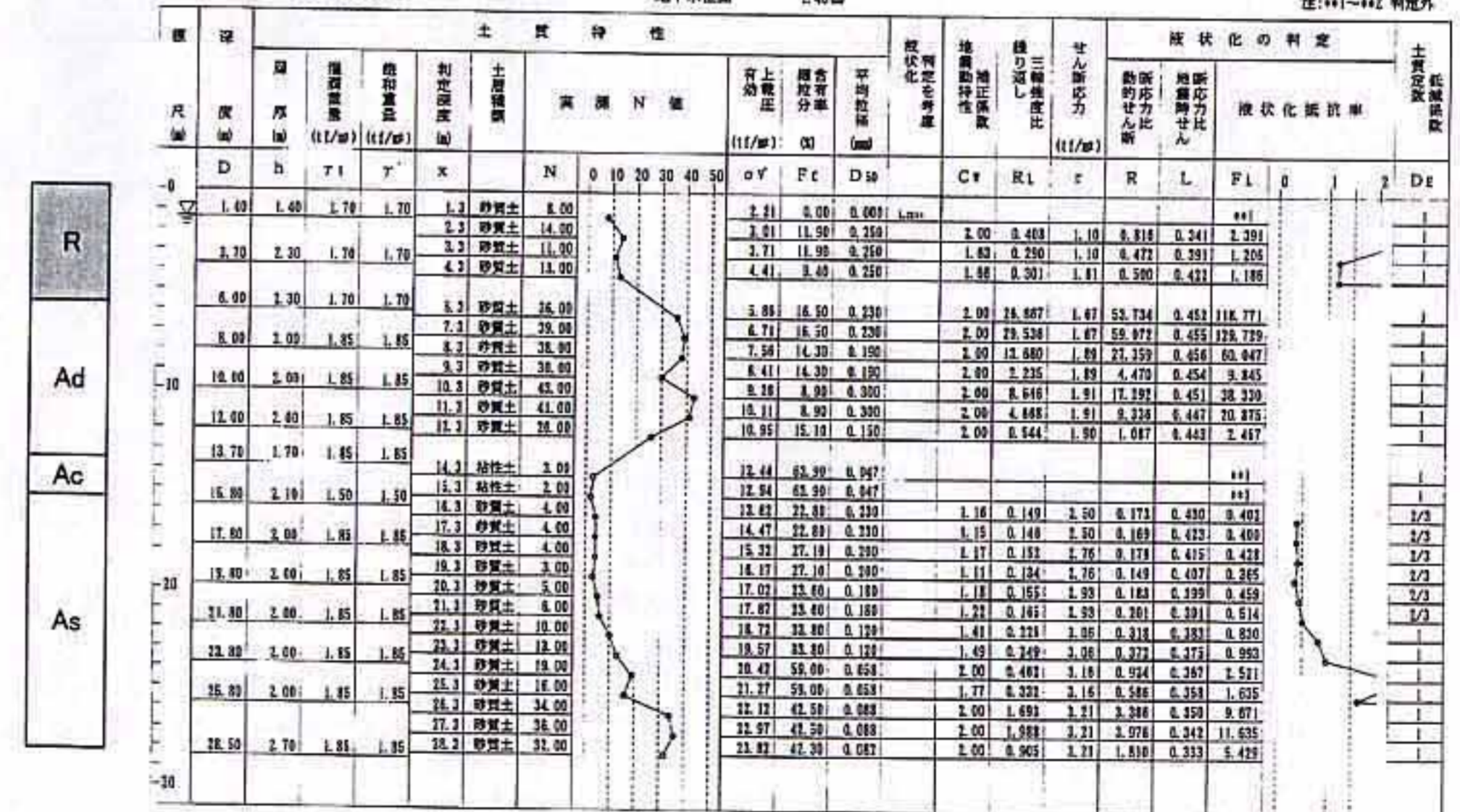


図6-1-3. 6(2) 液状化判定結果図(崎津工業団地)

6-1-4. 弓ヶ浜半島周辺の地震環境

表6-1-4. 1に、昭和45年以降に弓ヶ浜半島周辺に被害を与えた地震の一覧を示す(出典:宇佐美(1996))。このうち推定最大加速度は、弓ヶ浜半島地点における最大加速度を距離減衰式(土木研究所(1992))を用いて推定したものである。

表6-1-4. 1 昭和45年以降に弓ヶ浜半島周辺に被害を与えた地震一覧

年月日	震源地域	M	推定最大加速度	被害の概要
平成元年10月27日	鳥取県西部	5.3	79(gal)	震源は日野町付近。道路への落石2ヵ所(日野町)、棚の商品落下(松江市・米子市)
平成元年11月2日	鳥取県西部	5.4	82(gal)	震源は日野町付近。棚の商品の落下(米子市)があり、日野町に小亀裂1本(長5m)。日野町の震度はIVと推定される。
平成3年8月28日	島根県東部	5.9	133(gal)	最大震度はIV(松江・米子)、震央付近の能義郡・平田市などでは落石、公共施設や住家の亀裂などの小被害があった
平成12年10月6日	鳥取県西部	7.3	286(gal)	最大震度は溝口町で6強を記録し、中国地方の広い範囲で強い揺れを観測している。震央付近の溝口町などでは落石被害、弓ヶ浜半島の埋立地で液状化による被害があった

(1) 期待値分析

調査地の地震環境を把握するために、有史以来の地震資料を整理し、過去の地震が調査地付近にどのような影響を及ぼしたかを調べた。

今回用いた地震データは以下の資料から収集した。

1. 1600年～1995年 : 宇佐見(1996)、新編 日本地震被害総覧
2. 1951年～1997年 : 気象庁、地震月報
3. 1997年～2000年 : 気象庁、地震・火山月報(カタログ編)
4. 2000年～2001年 : 気象庁、気象(暫定値)

以上の資料から西暦1600年～2001年までの1553地震を収集・整理し、基礎データとした。これらの基礎データをもとに、距離減衰式(土木研究所(1992))を用いて調査地の地盤上の加速度を算出し、推定最大加速度が25gal以上のものを抽出した。

抽出された影響地震は125地震である。抽出された影響地震のうち、影響の大きいもの上位100地震のリストを表6-1-4. 2に示す。また、これらの影響地震の震央分布を図6-1-4. 1に示す。図中の丸印の大きさはマグニチュードを表しており、その中の数字は、表6-1-4. 2のデータNo.と対応している。

期待値分析の結果を図6-1-4. 2に示す。50年、100年期待値は、図6-1-4. 2よりそれぞれ約100gal、140galと求められる。

今回算出された地表面加速度(286gal)は地震の再来年数(期待値)としては、統計年間上最大となったことから約400年程度に1度の地震と想定される。

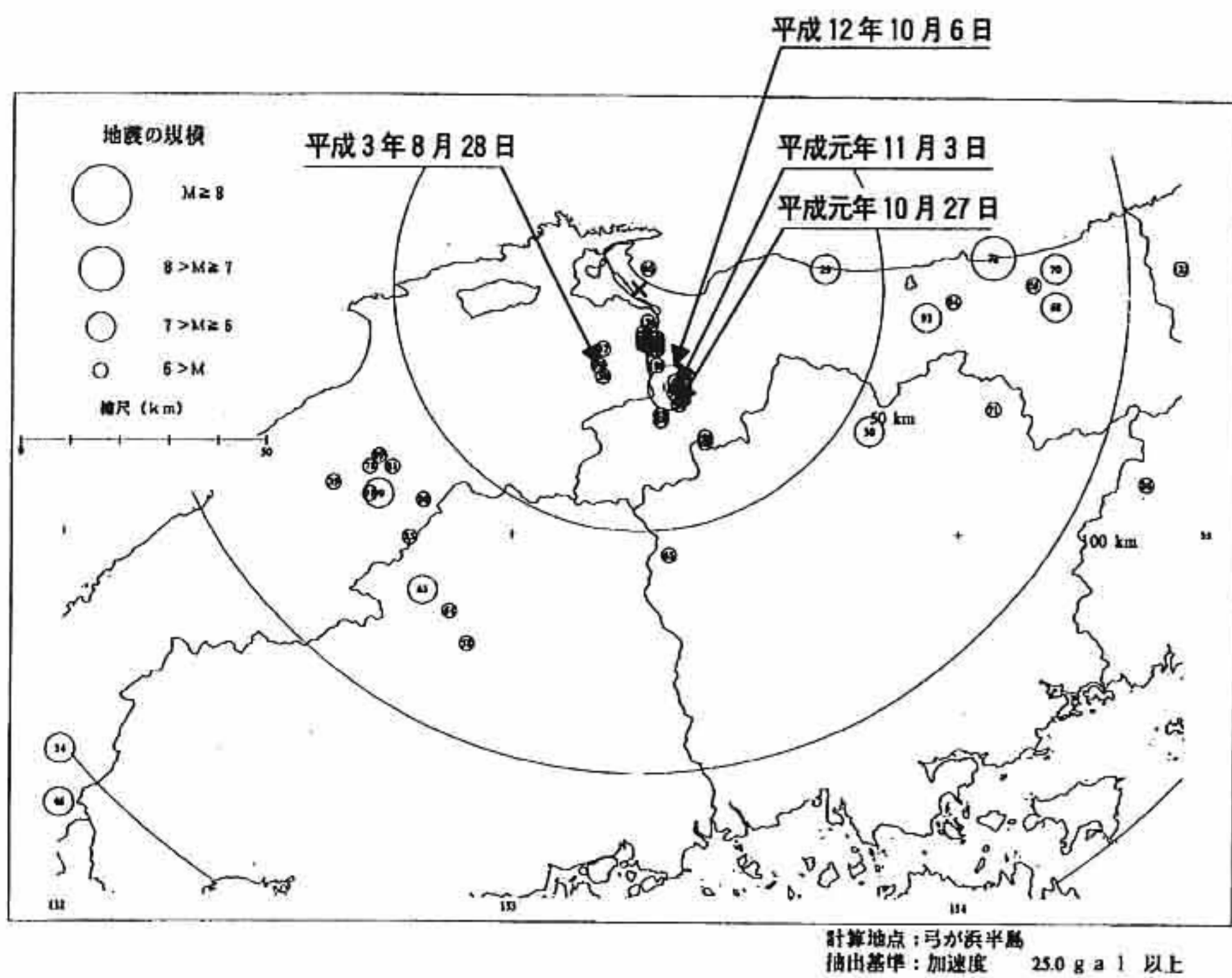


図6-1-4.1 影響地震の震央分布

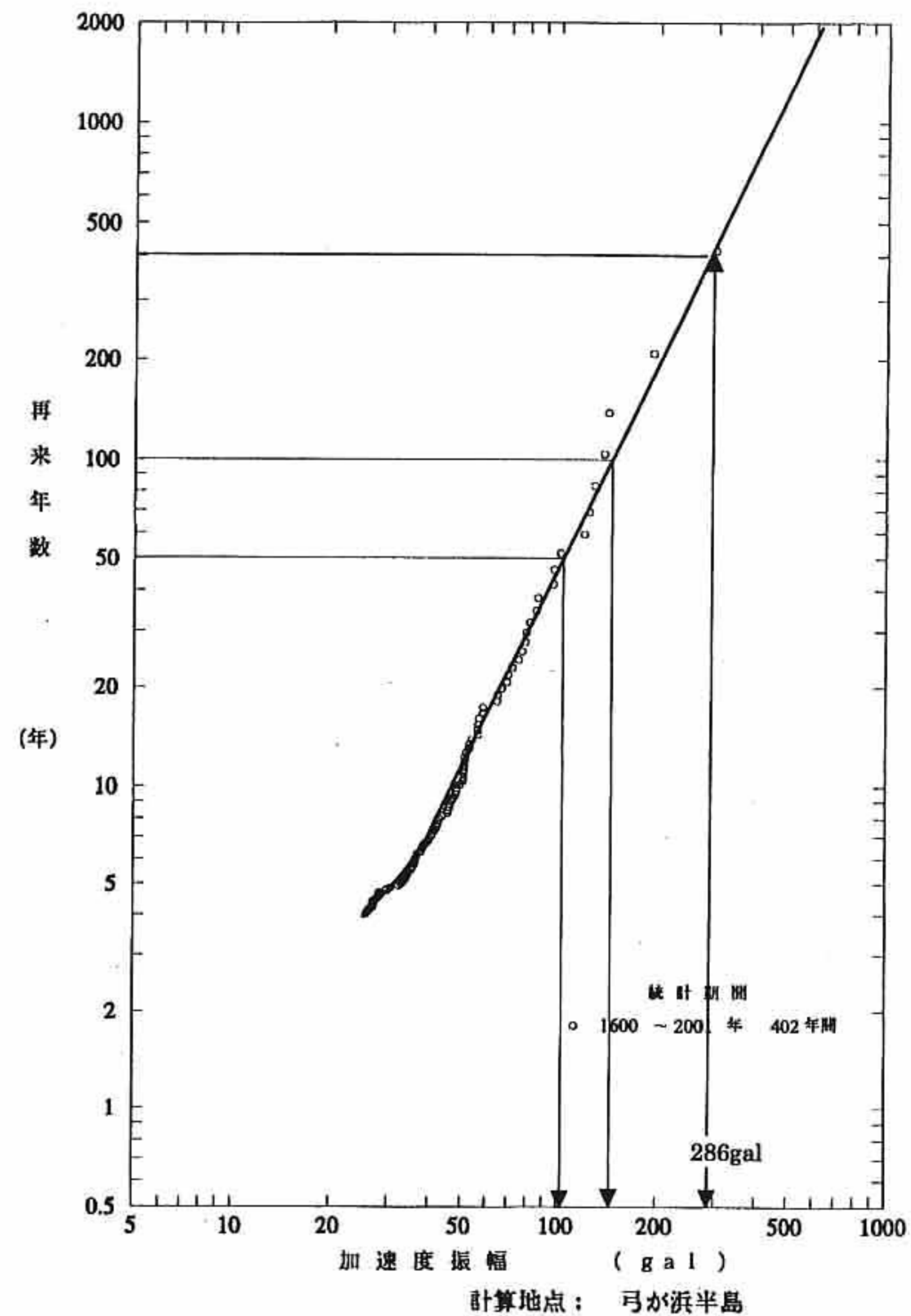


図6-1-4.2 期待値分析結果

表6-1-4. 2(1) 地震統計解析結果一覧

順位	統計年間/順位	加速度振幅 (gal)	データ No.	年	月	日	マグニ チュード	緯度 (度)	経度 (度)	震央距離 (km)	震源地域[地震名]
1	402.00	288.20	103	2000	10	8	7.3	35.28	133.35	21	鳥取県西部
2	201.00	188.90	80	1925	7	4	5.8	35.50	133.30	4	美保湾
3	134.00	138.30	57	1914	5	23	5.8	35.35	133.20	14	出雲地方
4	100.50	132.60	89	1991	8	28	5.9	35.32	133.19	17	鳥取県西部
5	80.40	124.10	29	1710	10	3	6.5	35.50	133.70	38	伯耆・美作
6	67.00	119.70	51	1904	8	8	5.8	35.30	133.20	19	宍道湖付近
7	57.43	115.60	72	1943	9	10	7.2	35.52	134.08	72	鳥取付近[鳥取]
8	50.25	97.85	83	1955	8	23	5.5	35.30	133.38	20	鳥取県西部
9	44.67	93.81	50	1904	6	8	5.4	35.30	133.20	19	宍道湖付近
10	40.20	93.21	112	2000	10	8	5.0	35.37	133.31	10	鳥根県東部
11	38.55	83.48	30	1711	3	19	6.3	35.20	133.80	55	伯耆
12	33.50	82.45	97	1989	11	2	5.4	35.25	133.37	25	鳥取県西部
13	30.92	78.82	98	1989	10	27	5.3	35.28	133.38	24	鳥取県西部
14	28.71	77.03	98	1990	11	23	5.2	35.27	133.38	22	鳥取県西部
15	26.80	78.51	122	2000	12	7	4.5	35.40	133.30	7	鳥根県東部
16	25.13	74.59	93	1983	10	31	6.2	35.41	133.93	59	鳥取県沿岸
17	23.85	72.99	48	1872	3	14	7.1	35.15	132.10	112	石見・出雲[浜田]
18	22.33	69.78	102	1997	9	4	5.1	35.28	133.38	24	鳥取県西部
19	21.18	67.72	123	2000	12	19	4.3	35.40	133.30	7	鳥根県東部
20	20.10	67.12	115	2000	11	3	4.5	35.38	133.29	11	鳥根県東部
21	19.14	64.84	113	2000	10	10	4.4	35.37	133.31	10	鳥根県東部
22	18.27	62.87	90	1978	6	4	6.1	35.08	132.70	67	鳥根県中部
23	17.48	62.62	105	2000	10	8	4.4	35.38	133.31	11	鳥根県東部
24	16.75	58.79	83	1930	12	20	6.1	34.90	132.80	78	三次付近
25	16.08	58.78	110	2000	10	7	4.2	35.37	133.32	11	鳥根県東部
26	15.48	54.91	42	1854	12	24	8.4	33.00	135.00	315	[安政南海]
27	14.89	54.75	81	1927	3	7	7.3	35.53	135.15	189	京都府北西部[北丹後]
28	14.38	54.60	70	1943	3	5	6.2	35.50	134.22	85	鳥取県沖
29	13.88	54.59	88	1943	3	4	6.2	35.43	134.22	85	鳥取県沖
30	13.40	52.33	44	1857	10	12	7.3	34.00	132.50	177	伊予・安芸
31	12.97	51.58	85	1938	1	2	5.5	34.97	133.35	55	岡山県北部
32	12.56	51.32	94	1983	10	31	5.7	35.44	133.99	84	中国地方北岸
33	12.18	50.28	27	1686	1	4	7.2	34.00	132.80	173	安芸・伊予
34	11.82	49.79	64	1930	12	21	5.9	34.86	132.88	77	三次付近[余震]
35	11.49	49.74	109	2000	10	7	3.9	35.38	133.29	9	鳥根県東部
36	11.17	49.68	108	2000	10	7	4.4	35.29	133.38	20	鳥取県西部
37	10.86	49.60	59	1925	5	23	6.8	35.80	134.80	138	但馬北部[北但馬]
38	10.58	49.27	28	1707	10	28	8.4	33.20	135.90	348	五畿七道[宝永]
39	10.31	49.25	82	1955	8	23	4.6	35.23	133.33	28	鳥取県西部(前震)
40	10.05	48.91	106	2000	10	8	4.2	35.32	133.32	16	鳥根県東部
41	9.80	48.10	121	2000	11	13	3.9	35.37	133.29	10	鳥根県東部
42	9.57	46.98	71	1943	3	13	5.8	35.24	134.08	76	鳥取県沖(余震)
43	9.35	46.98	124	2000	12	20	3.7	35.40	133.30	7	鳥根県東部
44	9.14	48.58	100	1995	1	17	7.2	34.60	135.04	187	[平成7年兵庫県南部地震]
45	8.93	45.83	111	2000	10	8	3.9	35.38	133.32	12	鳥根県東部
46	8.74	45.31	49	1891	10	28	8.0	35.60	138.80	301	愛知県・岐阜県[濃尾]
47	8.55	44.68	58	1919	11	1	5.8	34.80	132.90	81	広島県三次付近
48	8.38	44.64	31	1711	12	20	6.7	34.30	134.00	144	讃岐中部
49	8.20	44.08	78	1949	1	20	6.3	35.82	134.53	114	兵庫県北部
50	8.04	44.05	81	1954	5	16	5.4	35.13	132.73	62	鳥根県中部
51	7.88	42.30	69	1943	3	4	5.7	35.47	134.17	80	鳥取県沖
52	7.73	41.70	80	1954	5	8	5.3	35.07	132.80	61	鳥根県中部
53	7.58	41.22	33	1769	8	29	7.8	33.00	132.10	294	日向・豊後
54	7.44	41.13	23	1805	2	3	7.9	33.00	134.90	311	東海・南海・西海諸道[慶長]
55	7.31	40.93	89	1977	5	2	5.3	35.15	132.70	63	三瓶山付近
56	7.18	40.52	39	1835	3	12	5.5	35.10	132.60	73	石見

表6-1-4. 2(2) 地震統計解析結果一覧

順位	統計年間/順位	加速度振幅 (gal)	データ No.	年	月	日	マグニ チュード	緯度 (度)	経度 (度)	震央距離 (km)	震源地域[地震名]
57	7.05	40.08	84	1955	6	23	4.3	35.22	133.33	27	鳥取県西部(余震)
58	6.93	39.53	25	1862	6	18	7.4	35.20	135.95	244	畿内・東海
59	6.81	39.35	118	2000	11	4	3.7	35.35	133.32	13	鳥根県東部
60	6.70	38.93	74	1946	12	21	8.0	33.03	135.62	345	南海道沖[南海]
61	6.59	38.57	52	1905	6	2	6.7	34.10	132.50	167	安芸灘[芸予]
62	6.48	37.90	34	1778	2	14	6.5	34.60	132.00	151	石見
63	6.38	37.35	41	1854	12	23	8.4	34.00	137.80	444	東海・東山・南海諸道[安政東海]
64	6.28	37.18	78	1950	8	22	5.2	35.13	132.68	65	三瓶山付近
65	6.18	36.79	24	1849	3	17	7.0	33.70	132.50	208	安芸・伊予
66	6.09	36.66	117	2000	11	4	3.4	35.38	133.29	9	鳥根県東部
67	6.00	35.67	91	1978	6	4	5.2	35.08	132.68	69	鳥根県中部(余震)
68	5.91	35.54	88	1981	5	7	5.9	35.10	134.42	111	兵庫県西部
69	5.83	35.24	73	1944	12	7	7.9	33.80	138.82	357	東海道沖[東南海]
70	5.74	35.24	35	1789	5	11	7.0	33.70	134.30	216	阿波
71	5.68	35.15	43	1854	12	26	7.4	33.25	132.00	272	伊予西部
72	5.58	35.05	119	2000	11	4	3.5	35.35	133.31	12	鳥根県東部
73	5.51	34.74	40	1854	7	9	7.3	34.75	136.00	260	伊賀・伊勢・大和および隣国
74	5.43	34.33	47	1885	2	24	6.3	35.00	134.80	147	播磨・丹波
75	5.38	34.20	116	2000	11	3	3.4	35.38	133.30	11	鳥根県東部
76	5.29	33.48	104	2000	10	8	4.2	35.19	133.43	33	鳥取県西部
77	5.22	33.48	114	2000	10	17	4.2	35.19	133.43	33	鳥取県西部
78	5.15	33.11	28	1878	7	12	6.5	34.50	131.80	172	石見
79	5.09	33.04	82	1927	4	1	6.5	35.65	135.17	172	京都府北西部(北丹後 余震)
80	5.03	32.73	45	1859	1	5	6.2	34.60	131.80	145	石見
81	4.98	32.57	37	1819	8	2	7.3	35.20	136.30	278	伊勢・美濃・近江
82	4.90	31.98	38	1796	1	3	5.5	35.70	134.30	98	鳥取
83	4.84	31.96	46	1859	10	4	6.3	34.60	132.00	158	石見
84	4.79	31.38	87	1963	3	27	6.9	35.78	135.77	228	福井県沖[越前岬沖]
85	4.73	29.88	85	1957	6	29	4.9	35.00	132.77	69	鳥根県中部
86	4.67	29.00	77	1949	7	12	6.2	34.07	132.68	184	安芸灘
87	4.62	28.93	75	1948	6	28	7.1	38.17	136.20	275	福井平野[福井]
88	4.57	27.81	55	1906	1	21	7.6	34.00	137.00	377	三重県沖
89	4.52	27.41	88	1968	4	1	7.5	32.28	132.53	359	[1968年 日向瀬]
90	4.47	27.37	53	1905	12	8	6.1	34.10	132.60	163	安芸灘(余震)
91	4.42	27.34	107	2000	10	8	3.9	35.18	133.43	34	鳥取県西部
92	4.37	27.09	101	1997	8	25	6.3	34.44	131.67	185	山口県
93	4.32	26.73	87	1941	4	6	6.2	34.73	131.55	177	山口県須佐付近
94	4.28	26.31	125	2001	1	12	5.4	35.50	134.50	110	兵庫県北部
95	4.23	26.24	79	1952	7	18	6.8	34.45	135.78	254	奈良県中部[吉野]
96	4.19	26.23	38	1830	8	19	6.5	35.10	135.80	214	京都および隣国
97	4.14	26.23	120	2000	11	5	3.8	35.19	133.43	33	鳥取県西部
98	4.10	26.15	54	1905	12	8	6.2	34.00	132.40	181	安芸灘(余震)
99	4.08	25.77	32	1749	5	25	6.8	33.20	132.60	258	伊予宇和島
100	4.02	25.52	58	1909	11	10	7.6	32.30	131.10	404	宮崎県西部

6-1-5. 今後の液状化対策検討のための地震動について

「6-1-3. 今回の地震による液状化程度の検証」に用いた地盤モデルにおいて、地表面加速度を変化させて P_L 値との関係で整理したものが、図6-1-5. 1(a)~(b)である。

○ 竹内工業団地

埋土層は細粒分(シルト・粘土)の含有率が非常に高くなっており(90%以上)、埋土層のN値の小さな土層が厚く堆積している。このため、地表面加速度の増加に対する P_L 値の増加は著しく急激な勾配を示している。ここでの液状化の生じる限界加速度の算出基準を P_L 値=5の時と設定すると概ね150galとなる。

○ 昭和町工業団地

本地点の液状化判定に用いた地盤モデルは昭和町工業団地の東西方向のほぼ中央に位置する調査ボーリングである。このため今回の地震においても噴砂が認められた箇所と認められない箇所の境界の位置となる。

ここでの地盤モデルにおける、地表面加速度と P_L 値の関係で限界加速度(P_L 値=5となる加速度値)を求めると200~270galとなる。本地点は埋土層のN値も大きいことから限界加速度も大きくなった。

○ 米子港旗ヶ崎工業団地

本地点の液状化判定に用いた地盤モデルは米子港旗ヶ崎工業団地の東南東側に位置する地震後の調査ボーリングである。同様に算出された限界加速度(P_L 値=5となる加速度値)を求めると170~190galとなる。

○ 崎津工業団地

本地点の液状化判定に用いた地盤モデルは、崎津工業団地の南側に位置する地震後の調査ボーリングである。同様に算出された液状化の生じる限界加速度の算出基準を P_L 値=5の時と設定する限界加速度は350~450galとなる。被害状況とも整合して限界加速度はかなり大きくなっている。

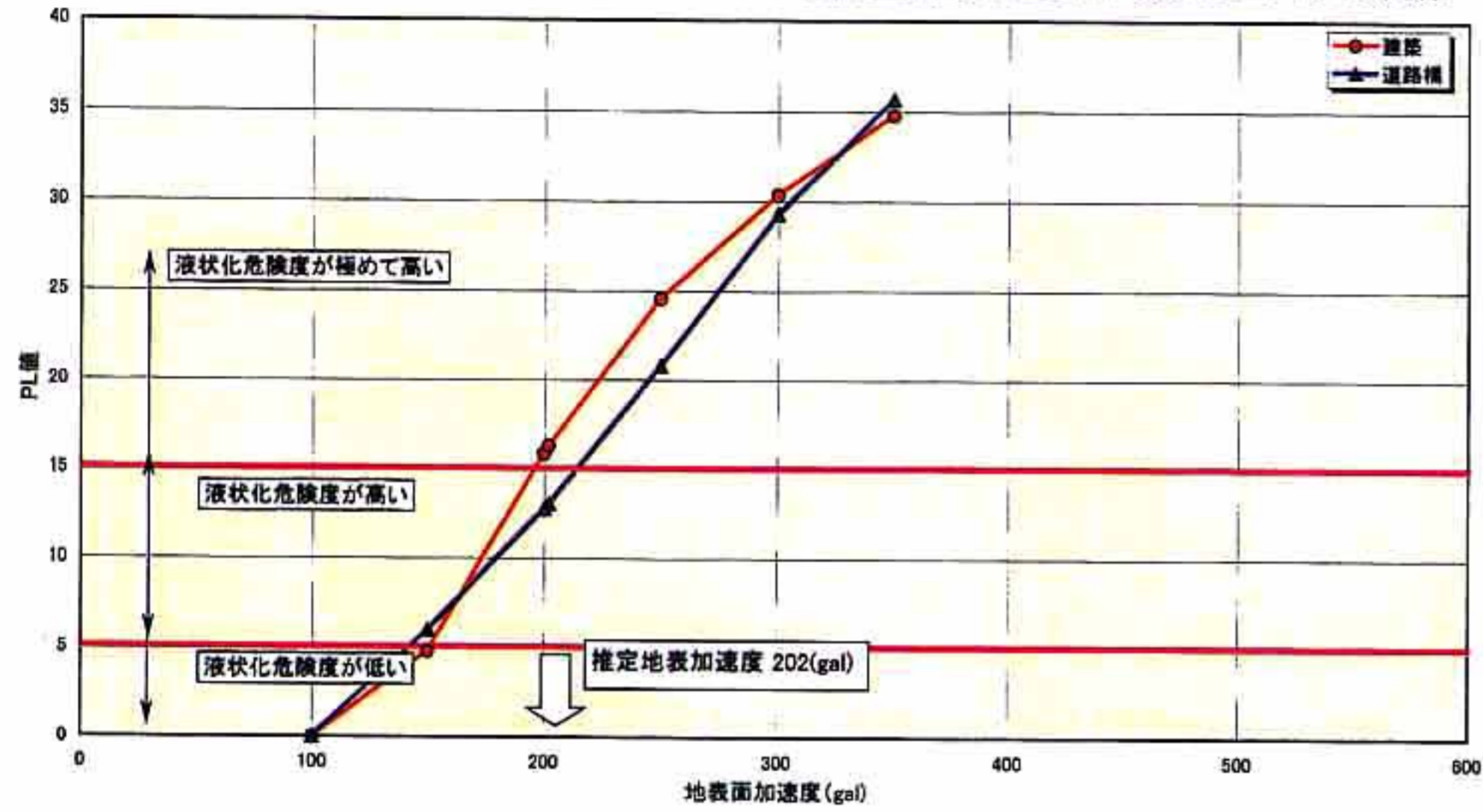
今後の液状化対策検討の基準とする地震動としては、以下の事を考慮して設定する。

- ①. 工学的地震基盤面を設定して平成12年度鳥取県西部地震の再来を考慮すると4つの工業団地では202~280galの地表面最大加速度が得られた。
- ②. 弓ヶ浜半島周辺の地震環境から50年~100年の期待値からは、地表面の最大加速度は100~140galとなる。
- ③. 平成12年鳥取県西部地震は弓ヶ浜半島周辺の地震再来年数(期待値)から見ると過去最大であり、統計年間に相当する400年程度に1度の地震と想定される。

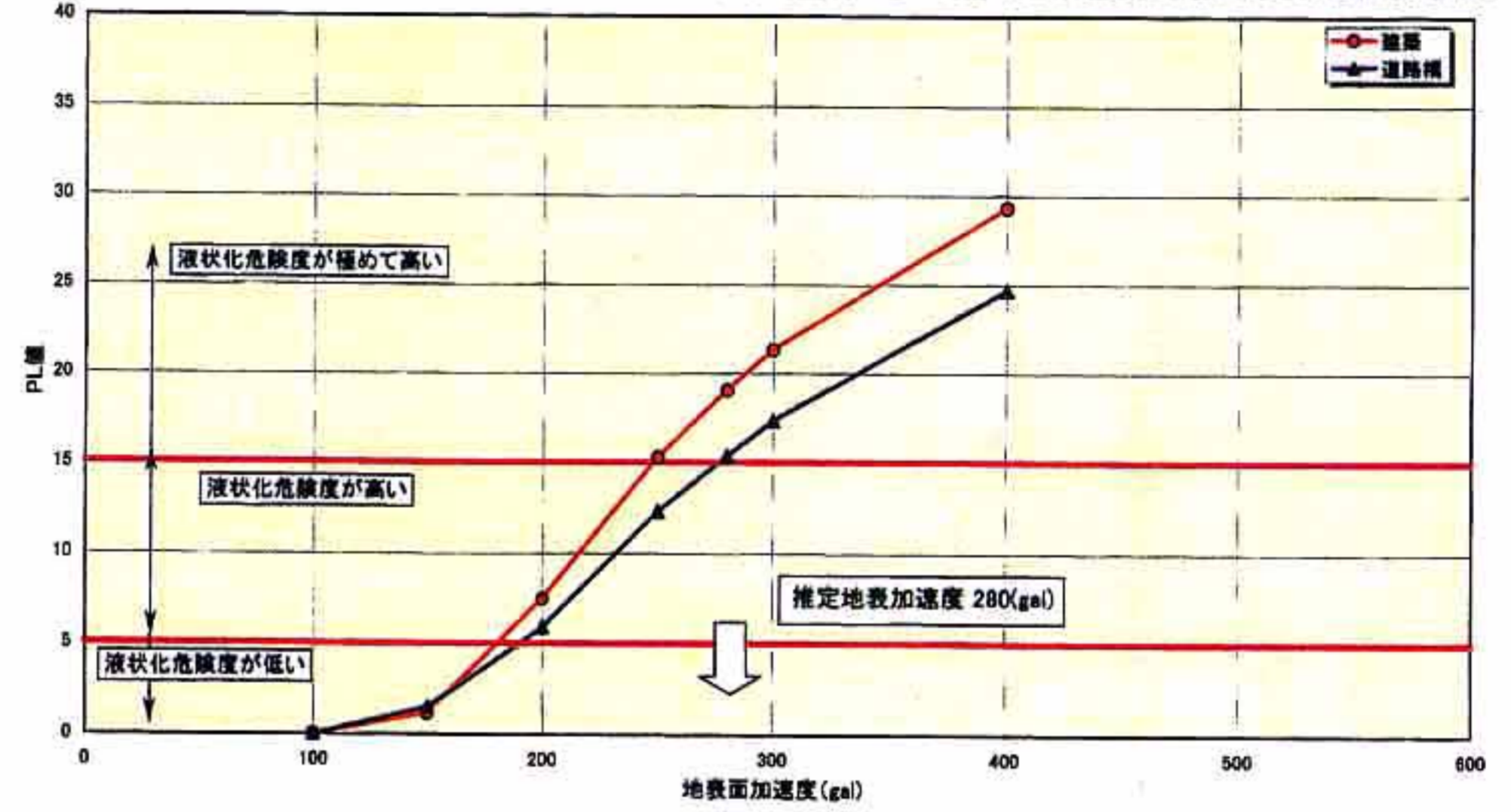
○ 今後の液状化対策検討のための地震動

これまでの検討結果を踏まえるとともに、「建築基礎構造設計指針」で示されている $\alpha_{max}=200gal$ を考慮し、今後の液状化対策を検討するうえでの基準地震動は200galを設定する。

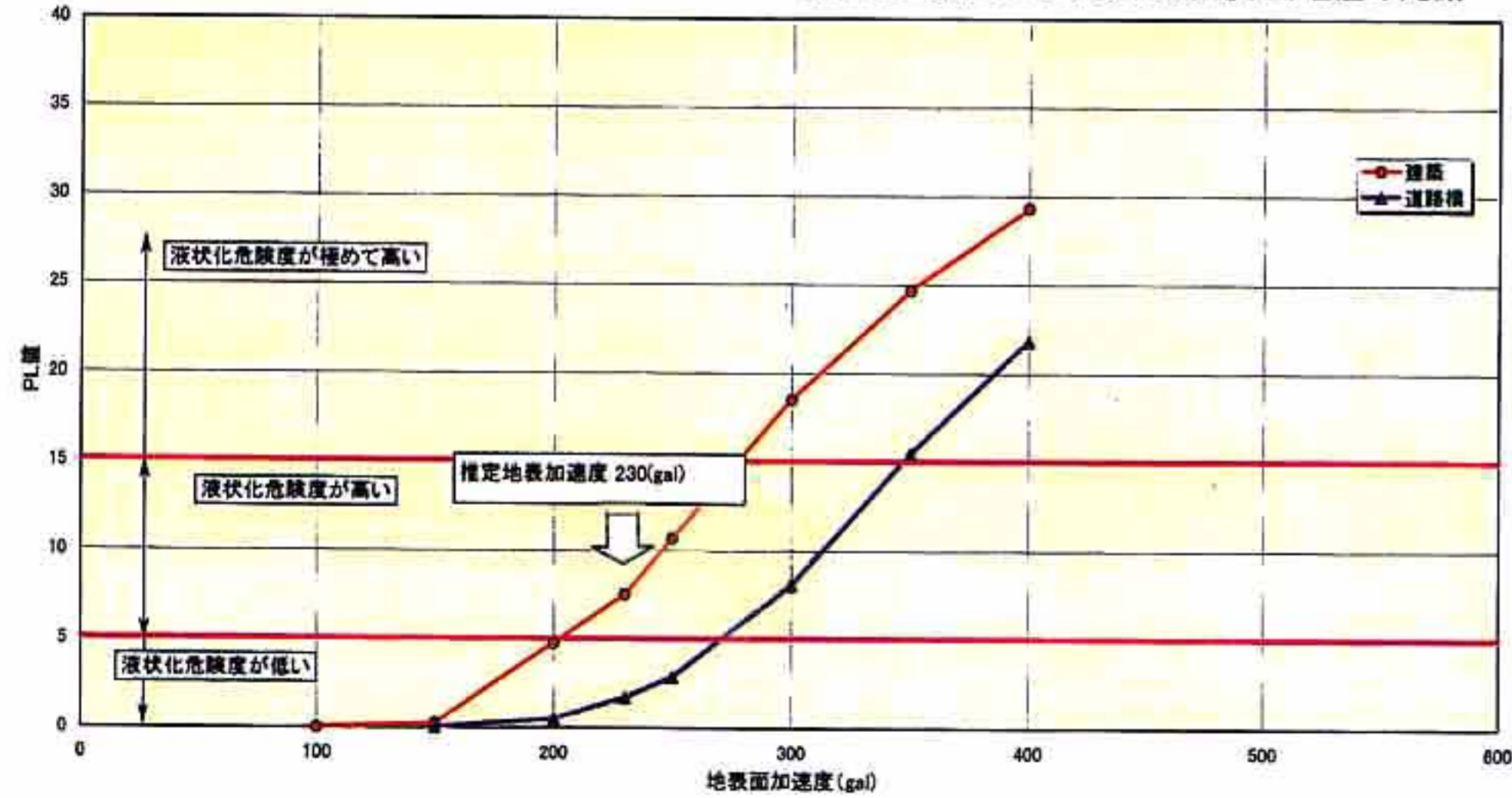
竹内工業団地の地表面加速度とPL値の関係



米子港旗ヶ崎工業団地の地表面加速度とPL値の関係



昭和町工業団地の地表面加速度とPL値の関係



崎津工業団地の地表面加速度とPL値の関係

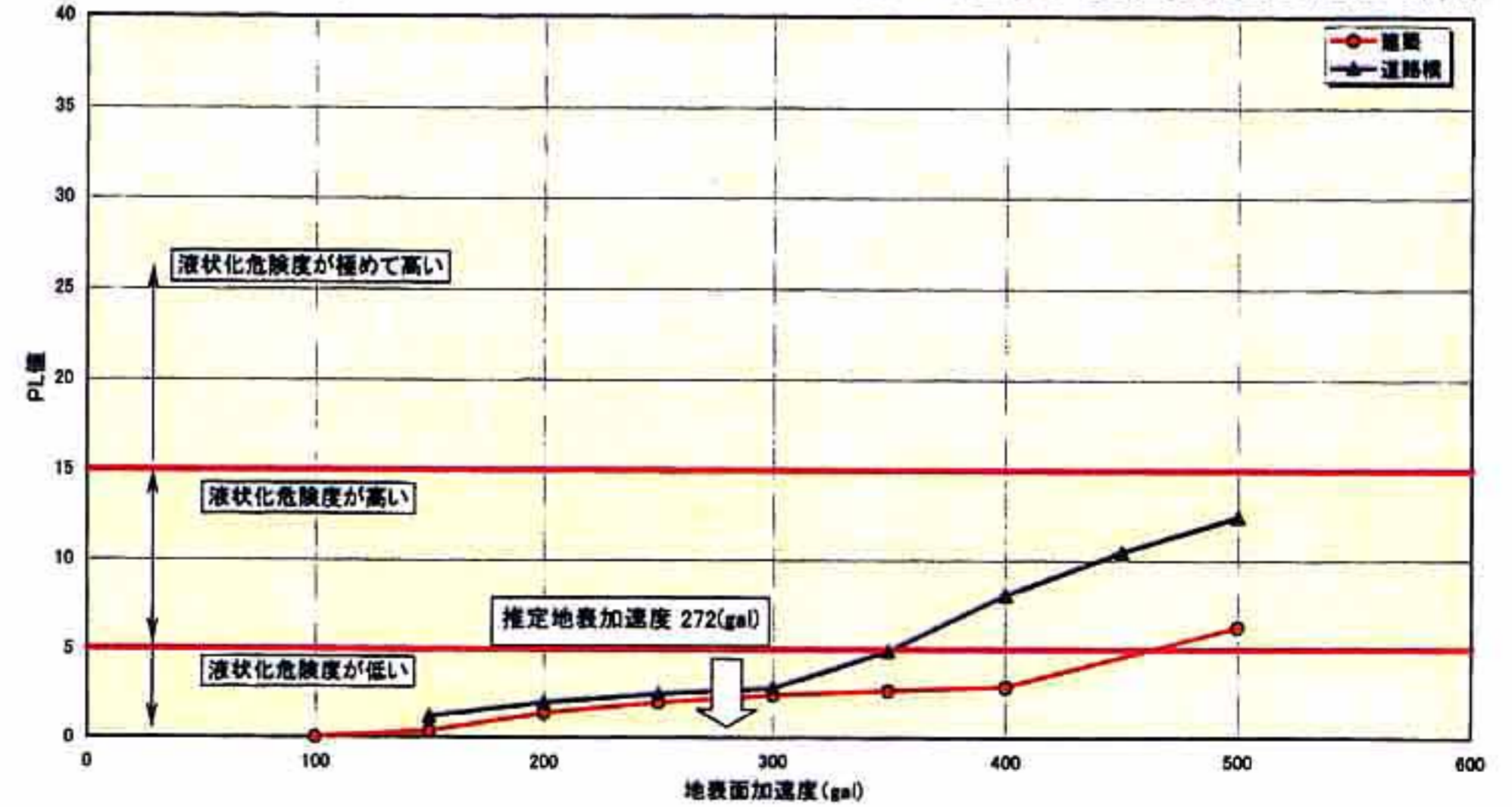


図6-1-5. 1(a) 液状化指数 P_L 計算結果

図6-1-5. 1(b) 液状化指数 P_L 計算結果