

2. 3 ボーリングデータを用いた液状化危険度の推定手法

2.3.1 液状化危険度の判定方法

(1) 概要

システムにおける液状化判定の流れを図-2.23に示す。まとめると以下ようになる。

- ① 地震発生前に、ボーリングデータを用いて、判定の閾値である P_L 値が5.0および15.0となる加速度値を計算し、データベース化しておく。
- ② 強震計により地震観測がされたら、この地表加速度値と地震のタイプ分けを行う。
- ③ ①と②によって液状化危険度ランクを求める。

(2) 液状化危険度閾値の算出方法

液状化の判定方法は、1996年12月発刊の「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」¹⁾にある F_L 法を基本としている。この F_L 値を基に、深度20mまでの F_L 値分布に深度の補正係数をかけ、さらに積分した値として出てくる P_L 値を算出し、液状化危険度判定とする。 P_L 法の概要を表-2.17に示す。

F_L 値を求める式は、道路橋示方書にある式を変形し、以下に示す。

$$F_L = R/L \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

$$R = C_w \times R_L \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

$$L = r_d \times k_{hc} \times \sigma_v / \sigma_v' \quad \dots\dots\dots(2.17)$$

(2.15), (2.16), (2.17)式より、

$$F_L = \frac{C_w \times R_L}{r_d \times k_{hc} \times \sigma_v / \sigma_v'} \quad \dots\dots\dots(2.18)$$

$$= \frac{R_L}{r_d \times \sigma_v / \sigma_v'} \times \frac{C_w}{k_{hc}} \quad \dots\dots\dots(2.19)$$

$$= \left\{ \frac{R_L}{r_d \times \sigma_v / \sigma_v'} \times g \right\} \times \frac{C_w}{Acc} \quad \dots\dots\dots(2.20)$$

ここで、 F_L : 液状化に対する抵抗率

R : 動的せん断強度比

L : 地震時せん断応力比

C_w : 地震時特性による補正係数

R_L : 繰返し3軸強度比

r_d : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数

k_{hc} : 地震時保有水平耐力法に用いる設計水平震度

σ_v : 全上載圧

σ_v' : 有効上載圧

g : 重力加速度

Acc : 地表水平加速度

式(2.20)は { } 内の式が定数となるので、地震力 (Acc) と地震タイプが入力されれば、 F_L 値が求まる式となっている。

一方、 P_L 値を求める式は以下の式である。

表-2.17 P_L 法の概要

〔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_L : 流動化指数, $W(Z)$: 重み係数, Z : 深度 (m)	
判定基準	$P_L = 0$: 液状化危険度はかなり低い。液状化に関する詳細を調査は一般に不要。
	$0 < P_L \leq 5$: 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。
	$5 < P_L \leq 15$: 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。
	$15 < P_L$: 液状化危険度が極めて高い。液状化に関する詳細を調査と液状化対策は不可避。

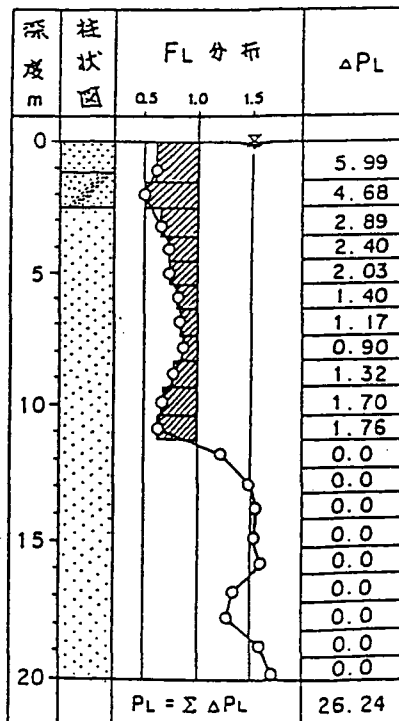
P_L の算出例

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。

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



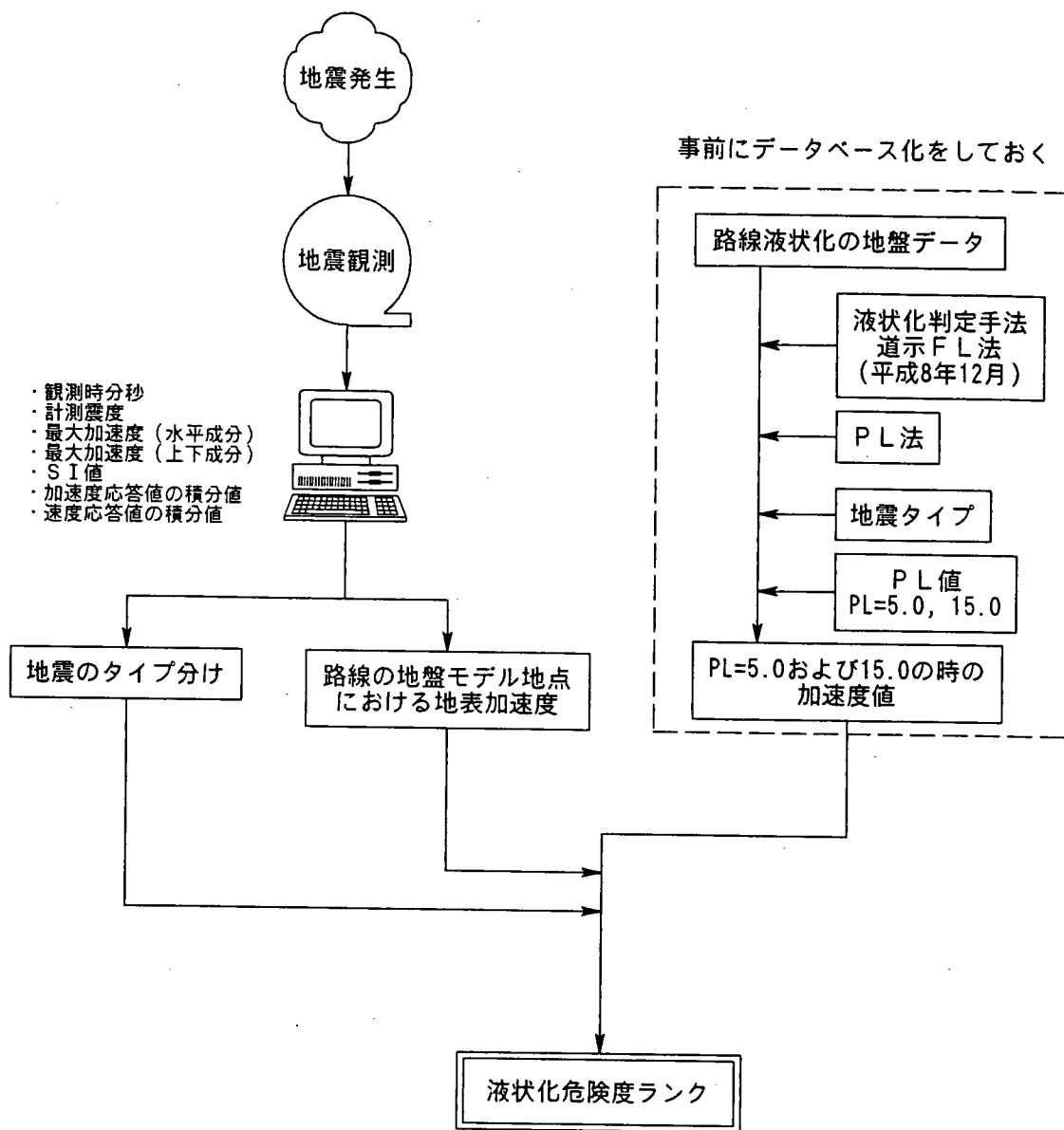


図-2.23 液状化判定の流れ

$$P_L = \int_0^{20} F \times W(Z) dZ \quad \dots\dots\dots(2.21)$$

$$F = \begin{cases} 1 - F_L \\ 0 \end{cases}$$

$$W = 10 - 0.5Z$$

ここで、W(Z) : 重み係数

Z : 深度(m)

液状化の判定は、 P_L 値で行うが、表現は表-2.17に示す岩崎ら(1980)²⁾の判定を用いる。

$P_L = 0$ ……液状化危険度はかなり低い

$0 < P_L \leq 5$ ……液状化危険度は低い

$5 < P_L \leq 15$ ……液状化危険度が高い

$15 < P_L$ ……液状化危険度が極めて高い

本システムでは、システム上で簡易に液状化の判定を行うために、式(2.20)と式(2.21)を用いて各地点ごとに、 P_L 値が5と15となる時の加速度の値を事前に計算しておきデータベースとしてデータを持っておく。そして、地震発生後、地震動の計算で地表の最大加速度が計算されれば、直ちに液状化危険度が判定できるという流れを採用した。この手法により、短時間に液状化の判定ができるようになった。

具体的なデータベースの作成は、まず、各地盤モデルごとに加速度(Acc)の項に1galから2000galまでを1gal刻みで入力し、地震タイプⅠの場合とⅡの場合に分けて P_L 値を計算する。そして、この P_L 値が5ないしは15に最も近くなる加速度値を抽出することにした。

2.3.2 路線液状化危険度の検討

(1) 関東地整の既存資料の調査

2.3.1の手法に従い液状化危険度の閾値を求めるために、関東地方整備局管内の既存のデータベースについて、調査を行った。その結果、当時の建設省関東地方建設局関東技術事務所では、平成6年度から平成8年度にかけて直轄管理道路の路線液状化危険度マップ作成業務を実施していた。この業務の内容を調査し、以下のデータが整備済みであることが得られた。なお、以下のデータは、電子データとして、ファイル化されている。

1) 地盤データ

地盤データは以下の3項目で構成されている。

①地形地質区分ごとの代表柱状図データ

代表柱状図データは、図-2.24に示すファイル構成をとっており、地形地質区分1区間ごとに一つのデータファイル(個別ファイル)となっている。各断面図ごとには、始点および終点の距離程、使用柱状図名などをまとめたファイル(マスターファイル)を作成している。それぞれのファイル名の付け方は図-2.25のとおりである。マスターファイル、個別ファイルの項目は、以下の通りである。データの詳細を、マスターファイルは図-2.26に、個別ファイルについては図-2.27に示す。また、参考資料-2も参照されたい。なお、マスターファイルは、そのままSATURNの道路の座標データとして用いている。

○ (マスターファイル) [MAST****.IDX]

- ・ 路線名
- ・ 断面図番号
- ・ 区間番号
- ・ 距離程 (始点) [km]
- ・ 距離程 (終点) [km]
- ・ 区間中央の緯度 [°]
- ・ 区間中央の経度 [°]
- ・ 代表柱状図名

○ (個別ファイル) [J*****.BOR]

- ・ 代表柱状図名
- ・ 地表からの深度 [G.L. -m]
- ・ 地下水位 [G.L. -m]
- ・ 地表の標高 [m]
- ・ 層情報の数
- ・ 層境界の深度 [G.L. -m]
- ・ 地層記号
- ・ 単位体積重量 [t/m³]
- ・ S波速度 [m/sec]
- ・ 採用G/G0, h~ γ 曲線番号
- ・ N値情報の数 (G.L. -20mまで)
- ・ N値の深度 [m]
- ・ N値
- ・ 細粒分含有率 Fc [%]
- ・ 平均粒径 D50 [mm]

② 柱状図データ

断面図作成のために収集した柱状図データをまとめてファイル化している。図-2.28に柱状図ファイルの仕様を示し、項目を以下に示す。また、土質区分コードについては、図-2.29に示す。

(柱状図ファイル) [B*****.BOR]

- ・ 柱状図No.
- ・ 地表標高 (TP±m)
- ・ 緯度・経度
- ・ 地表境界深度 (m)
- ・ 土質コード (11参照)
- ・ N値深度 (m)
- ・ N値

③ 物性値データ

N値、S波速度などの標準的な物性値を都道府県別にまとめた物性値一覧表を作成し、ファイル化をしている。また、盛土層については、N値によって細粒分含有率および平均粒径を変化すると見なし、別にデータを作成し、ファイル化している。仕様を図-2.30に、

項目を以下に示す。

(物性値ファイル) [CHIBA. TBL, TOKYO. TBL, SAITAMA. TBL, IBARAKI. TBL, KANAGAWA. TBL]

- ・地層記号
- ・採用N値
- ・単位体積重量[t/m³]
- ・平均粒径D₅₀ [mm]
- ・細粒分含有率F_c [%]
- ・S波速度[m/sec]
- ・採用G/Go、h~ γ 曲線番号

(盛土ファイル) [F. TBL]

- ・N値
- ・細粒分含有率F_c [%]
- ・平均粒径D₅₀ [mm]

2) 評価結果データ

上述の地盤データを用いて解析された路線液状化評価結果データのファイル化を行っている。液状化評価結果については、各断面図ごとに一つのファイルを作成している。項目を以下に示す。

(液状化評価結果データファイル) [LIS*****.DAT]

- ・距離程 (始点) [km]
- ・距離程 (終点) [km]
- ・区間番号
- ・代表柱状図名 (ないときは空白)
- ・地盤種別
- ・加速度[gal] (東海地震・南関東地震・直下地震)
- ・震度 (東海地震・南関東地震・直下地震)
- ・PL値 (東海地震・南関東地震・直下地震)
- ・液状化判定 (東海地震・南関東地震・直下地震)
- ・直下地震断層モデル番号

(2) 液状化危険度閾値の計算

(1) で調査した結果より、個別のデータであるJ*****.BOR及びその管理ファイルであるMAST****.IDXのデータを用いて、国道の液状化危険度の閾値および座標データなどを設定した。

上述の解析方法を用い、道路路線区間ごとに液状化判定のPL値が5ないしは15になる時の加速度値を計算した。関東地方建設局管内直轄道路の路線区間の数(地盤パターン数)を示す。全対象路線で合計6,028の区間数(地盤パターン数)がある。

解析結果としては、路線、断面図、区間ごとに加速度を求め、ファイル化を行った。なお、このファイルの中の数字には、以下の注意点がある。

- ・計算した加速度値は、1galから2000galの1galピッチ
- ・加速度値が-99.9またはP_L値が-99.99となっているのは、液状化判定対象外を意味している。
- ・加速度値が2000となっているのは、P_L値を2000galまで計算したが、P_L値が5ないしは15に至らなかったもの。

(マスターファイル)

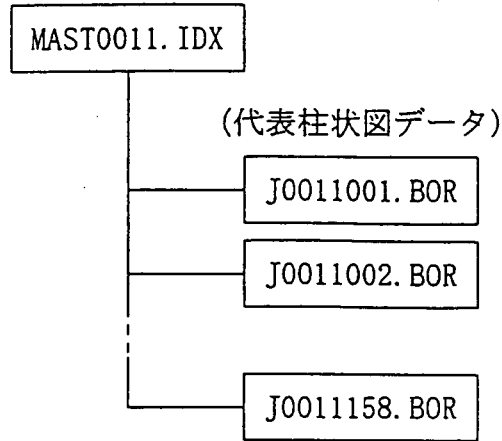
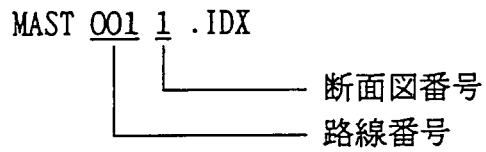


図-2.24 地盤データのファイル構成

[マスターファイル]



[個別ファイル]

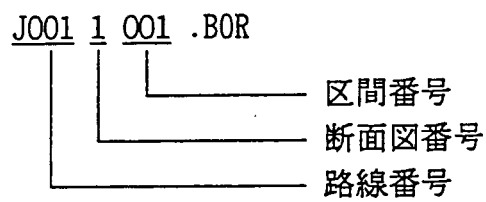


図-2.25 マスターファイル名および代表柱状図データ名

路線名	断面図		距離程 (始点) [km]	距離程 (終点) [km]	区間中央の		代表 柱状図名
	No.	区間 No.			緯度 [°]	経度 [°]	
1	1	1	0.000	0.210	35.67990	139.77715	TK-1
1	1	2	0.210	0.410	35.68018	139.77486	TK-2
1	1	3	0.410	0.640	35.68102	139.77217	TK-3
1	1	4	0.640	0.830	35.68163	139.76947	T2-7
1	1	5	0.830	1.270	35.68152	139.76634	T2-8
1	1	6	1.270	1.650	35.67874	139.76547	T2-9
1	1	7	1.650	1.780	35.67701	139.76492	T2-10
1	1	8	1.780	2.180	35.67522	139.76434	T2-11
1	1	9	2.180	2.610	35.67234	139.76295	TK-4
1	1	10	2.610	3.000	35.67346	139.75925	TK-5
1	1	11	3.000	3.320	35.67427	139.75659	TK-6
1	1	12	3.320	3.600	35.67217	139.75513	TK-7
1	1	13	3.600	3.880	35.67020	139.75377	T2-17
1	1	14	3.880	4.150	35.66802	139.75296	TK-8
1	1	15	4.150	4.440	35.66476	139.75114	
1	1	16	4.440	4.600	35.66209	139.74991	T2-20
1	1	17	4.600	4.800	35.66013	139.74844	T2-22
1	1	18	4.800	4.960	35.65823	139.74686	T2-24
1	1	19	4.960	5.380	35.65571	139.74638	T2-26
1	1	20	5.380	6.180	35.65164	139.74835	TK-11

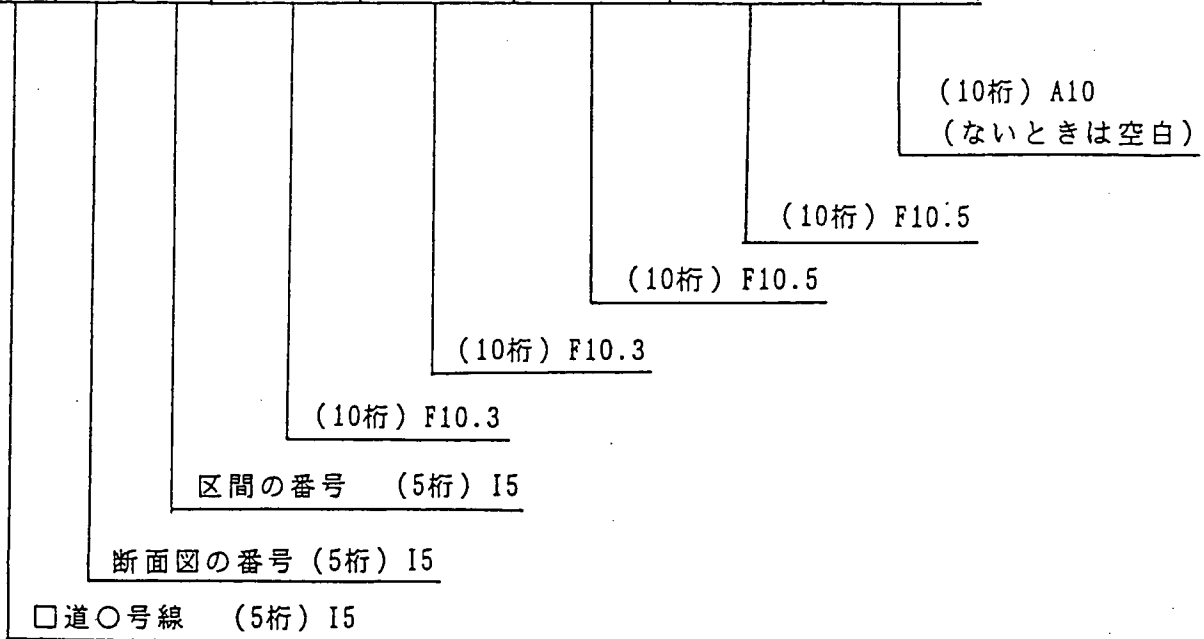


図-2.26 マスターファイルの仕様

不確定・わからないもの
 F6.2タイプ -9.00
 F10.3タイプ -9.000

図-2.27 個別ファイルの仕様

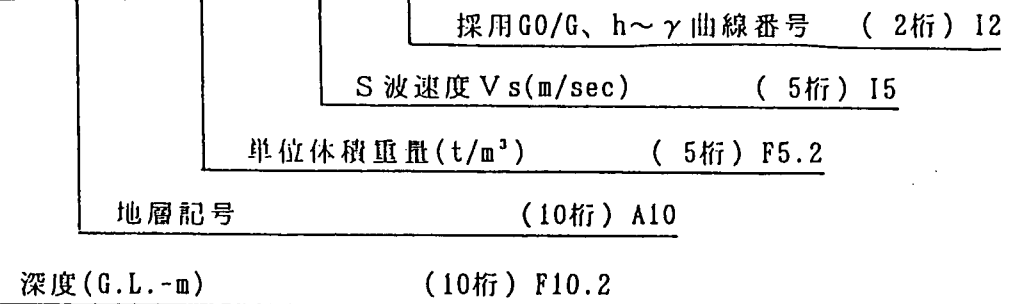
TK-1	代表柱状図名	1X+A10
27.50	地表からの深度(G.L.-m)	(10桁) F10.2
1.00	地下水位(G.L.-m)	(10桁) F10.2
3.20	地表標高(m)	(10桁) F10.2
8	層情報の数n1	(5桁) I5

0.00f	1.60	160	3
3.00Als1	1.70	150	4
4.50Alm1	1.50	120	1
8.60Als1	1.70	150	5
10.00Tks2	1.90	240	5
17.90Tkm2	1.75	230	2
25.30Tkg2	2.00	350	6
27.50Eds	2.10	500	

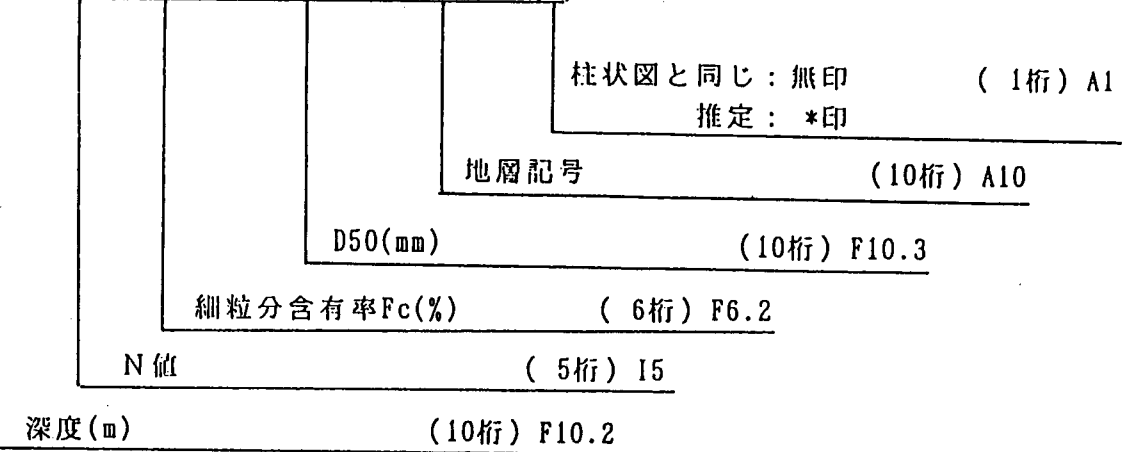
3.20	地表標高(m)	(10桁) F10.2
20	N値情報の数n2	(5桁) I5

0.30	4	60.00	0.040	f	*
1.30	4	60.00	0.040	f	*
2.30	4	60.00	0.040	f	*
3.30	6	20.00	0.250	Als1	*
4.30	6	20.00	0.250	Als1	*
5.30	1	-9.00	-9.000	Alm1	
6.30	2	-9.00	-9.000	Alm1	
7.30	2	-9.00	-9.000	Alm1	
8.30	2	-9.00	-9.000	Alm1	
9.30	25	20.00	0.250	Als1	
10.30	50	-9.00	-9.000	Tks2	
11.30	24	-9.00	-9.000	Tks2	
12.30	15	-9.00	-9.000	Tks2	
13.30	28	-9.00	-9.000	Tks2	
14.30	42	-9.00	-9.000	Tks2	
15.30	48	-9.00	-9.000	Tks2	
16.30	31	-9.00	-9.000	Tks2	
17.30	20	-9.00	-9.000	Tks2	
18.30	19	-9.00	-9.000	Tkm2	
19.30	18	-9.00	-9.000	Tkm2	

0.00f	1.60	160	3
-------	------	-----	---



4.30	6	20.00	0.250	Als1	*
------	---	-------	-------	------	---



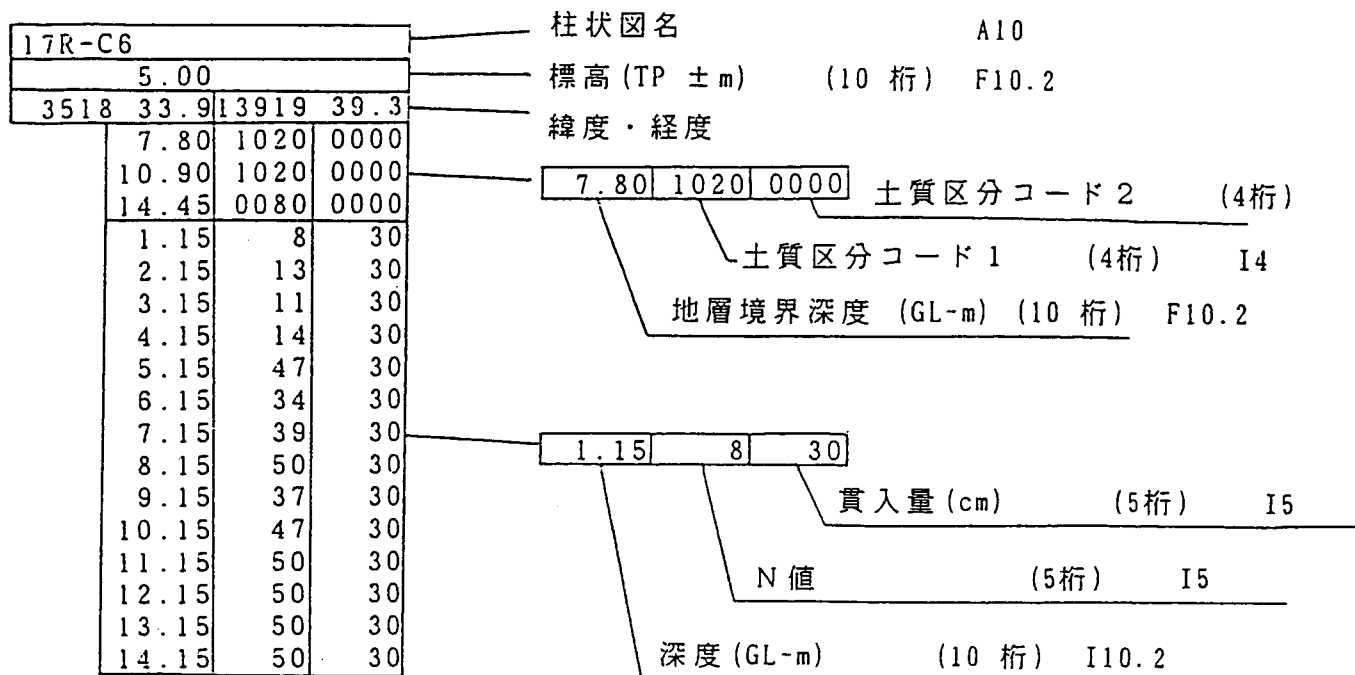


図-2.28 柱状図ファイルの仕様

コード	混り	コード	基質	コード	基質	コード	基質
01	礫	10	礫	70	まさ土	90	玉石
02	砂	11	粗礫	71	軽石	91	空洞
03	シルト	12	中礫	72	スコリア	92	改良土
04	粘土	13	細礫	73	しらす	93	コンクリート
05	火山灰	14	砂礫	74	珊瑚	94	アスファルト
07	有機質土	20	砂	75	貝殻	95	廃棄土
08	玉石	21	粗砂	76	浮泥 (ヘドロ)	96	瓦礫
		22	中砂	80	固結シルト	97	表土
コード	質	23	細砂	81	礫岩	98	埋土
		30	シルト	82	砂岩	99	盛土
02	砂	40	粘土	83	シルト岩		
03	シルト	50	火山灰	84	泥岩		
04	粘土	51	ローム	85	凝灰岩		
05	火山灰	52	凝灰質	86	硬岩		
06	凝灰	60	黒ボク	87	中硬岩		
07	有機	61	泥灰 (ビート)	88	軟岩		
		62	黒泥	89	風化岩		
		63	腐植土				

(例)

シルト質細砂
⇒ 0323

砂混じり粘土
⇒ 2040

図-2.29 土質区分コード一覧表

物性値データファイル[例：CHIBA.TBL]

地質記号	採用N値	S波速度 Vs [km/sec]	単位体積 質量 [t/m ³]	平均粒径 D50 [mm]	細粒分 含有率 Fc[mm]	採用G0/G、 h~γ曲線 種別
f	4	160	1.60	0.04	60.00	As
Als1	6	150	1.70	0.25	20.00	As
Alm1	1	120	1.50	-9.00	-9.00	Ac
Alp1	1	100	1.30	-9.00	-9.00	Ac
Alg1	20	220	1.95	2.00	0.10	As
Als2	10	200	1.80	0.15	30.00	As
Alm2	2	150	1.60	-9.00	-9.00	Ac
Alp2	2	130	1.40	-9.00	-9.00	Ac
Alg2	25	250	1.95	2.00	0.10	As
Als _f	25	240	1.80	0.15	30.00	As
Nns	20	220	1.80	-9.00	-9.00	Ds
Nnm	8	200	1.60	-9.00	-9.00	Dc
Nnp	5	170	1.40	-9.00	-9.00	Dc
Nng	30	300	1.95	-9.00	-9.00	Ds
lm	5	170	1.40	-9.00	-9.00	Dc

(10桁) (5桁) (10桁) (10桁) (10桁) (10桁) (2桁)
 A10 I5 I10 F10.2 F10.2 F10.2 A2

不確定・わからないもの

Aタイプ 空白

Iタイプ -99

F6.2タイプ -9.00

F10.3タイプ -9.000

盛土データファイル[F.TBL]

採用 N値	平均粒径 D50 [mm]	細粒分 含有率 Fc[mm]
0	-9.00	-9.00
1	-9.00	-9.00
2	80.00	0.02
3	70.00	0.03
4	60.00	0.04
5	50.00	0.07
6	40.00	0.10
7	30.00	0.15
8	20.00	0.25

(10桁) (10桁) (10桁)
 I10 F10.2 F10.2

図-2.30 物性値および盛土データファイルの仕様

(3) 液状化危険度の考え方

本システムにおいては、道路関連施設について管理道路沿いの液状化及び橋梁被害を、また河川関連施設について堤防の液状化を予測し、結果を管理者に提供する。このうち橋梁の被災危険度は、2.2.5 に示しているように大・中・小・なしの4段階で表すこととしている。これらの道路の状態は以下の状態であることを想定している。

- ・大：長期間車両の通行が不可となる可能性がある。
- ・中：応急対策を施すことにより、ある程度の期間で車両の通行が可能。
- ・小：応急対策を施すことにより、比較的短期間で車両の通行が可能。
- ・なし：車両の通行のために対策を施す必要なし。

液状化危険度を評価するための指標として、先述のように本システムでは P_L 値により分類を行うが、これにより上記の4段階の評価を行うためには、 P_L 値がいくらであれば液状化危険度がどの段階に相当するのかの判断基準をあらかじめ設定する必要がある。本システムにおいては、既往の事例分析に基づき、判断基準として表-2.18 のように P_L ～液状化危険度マトリックスを設定した。なお、表-2.18 において危険度大と判定するための P_L 値が未設定なのは、既往の地震において道路区間が液状化によって長期間通行不可となった事例が存在しないことによる。

表-2.18 P_L 値と液状化危険度の関係

液状化危険度	大	中	小	なし
P_L の範囲	—	$P_L > 15$	$15 \geq P_L > 5$	$5 \geq P_L$

2.3.3 河川液状化危険度の解析手法

(1) 概要

河川の液状化予測についての基本的な考え方は、2.3.2 示した道路の液状化の考え方と同じである。対象範囲は、関東地方整備局管内直轄河川の内、「河川堤防耐震点検マニュアル 平成7年3月 建設省河川局治水課」に準拠して実施された点検区間（堤内地盤高さが朔望平均満潮位+1.0m よりも低い区間）であり、データ作成にあたっては、国道のように既存の地盤データがなかったため、ボーリングデータを基に新たに作成している。

(2) 検討対象範囲

河川の液状化危険度の予測対象区間は、関東地方整備局管内直轄河川の内、「河川堤防耐震点検マニュアル 平成7年3月 建設省河川局治水課」に準拠して実施された点検区間である。対象区間は表-2.19 に示す 564 カ所である（図-2.31 参照）。各区間は、地盤条件が同一な範囲として設定しており、この区切られた区間が、被害予測単位である。

(3) データ作成

河川については、道路のように整備済みのデータがなかったため、564 カ所それぞれのボーリング資料を用いて、道路と同じ形式で、個別のデータである J*****.BOR 及びその管理ファイルである MAST****.IDX を作成し、判定式の閾値である 5 と 15 に最も近く大きい P_L 値となる加速度を計算により求めた。計算に用いる加速度を、1～2000gal を 1gal 刻みで、直下型とプレート境界型のそれぞれに対して計算しているのも同じである。河川堤防液状化予測の評価についても、道路との整合を考慮して表-2.18 のマトリックスを用いている。

2.3.4 地震動種類に関する検討

2.3.2 に示したように、液状化判定の閾値は、プレート境界型のタイプ1と内陸直下型のタイプ

表-2.19 河川液状化危険度評価対象区間

工事事務所名	河川名	岸	対象区間距離 [km]	地盤パターン数	平均朔望満潮位
利根川下流工事事務所	小貝川	左岸	5.50	14	Y. P. +1.49m
		右岸	5.50	16	
	利根川	左岸	29.00	77	Y. P. +1.49m
		右岸	29.50	74	
江戸川工事事務所	江戸川	左岸	4.70	12	Y. P. +1.8m
		右岸	6.90	27	
	中川	左岸	6.10	24	Y. P. +1.8m
		右岸	7.00	29	
	綾瀬川	左岸	1.20	3	Y. P. +1.8m
		右岸	0.50	3	
荒川下流工事事務所	荒川	左岸	11.90	40	A. P. +2.1m
		右岸	20.40	64	
	中川	左岸	6.40	24	A. P. +2.1m
利根川上流工事事務所	利根川	左岸	5.00	11	Y. P. +23.2m
		右岸	4.00	14	
下館工事事務所	小貝川	左岸	9.00	47	9.5~12.6km Y. P. +10.1m 27~30km Y. P. +14.7m
		右岸	9.00	51	
京浜工事事務所	多摩川	左岸	1.60	8	A. P. +2.0m
		右岸	1.20	3	
	鶴見川	左岸	2.00	17	T. P. +0.87m
		右岸	1.00	6	
	合計			167.40	564

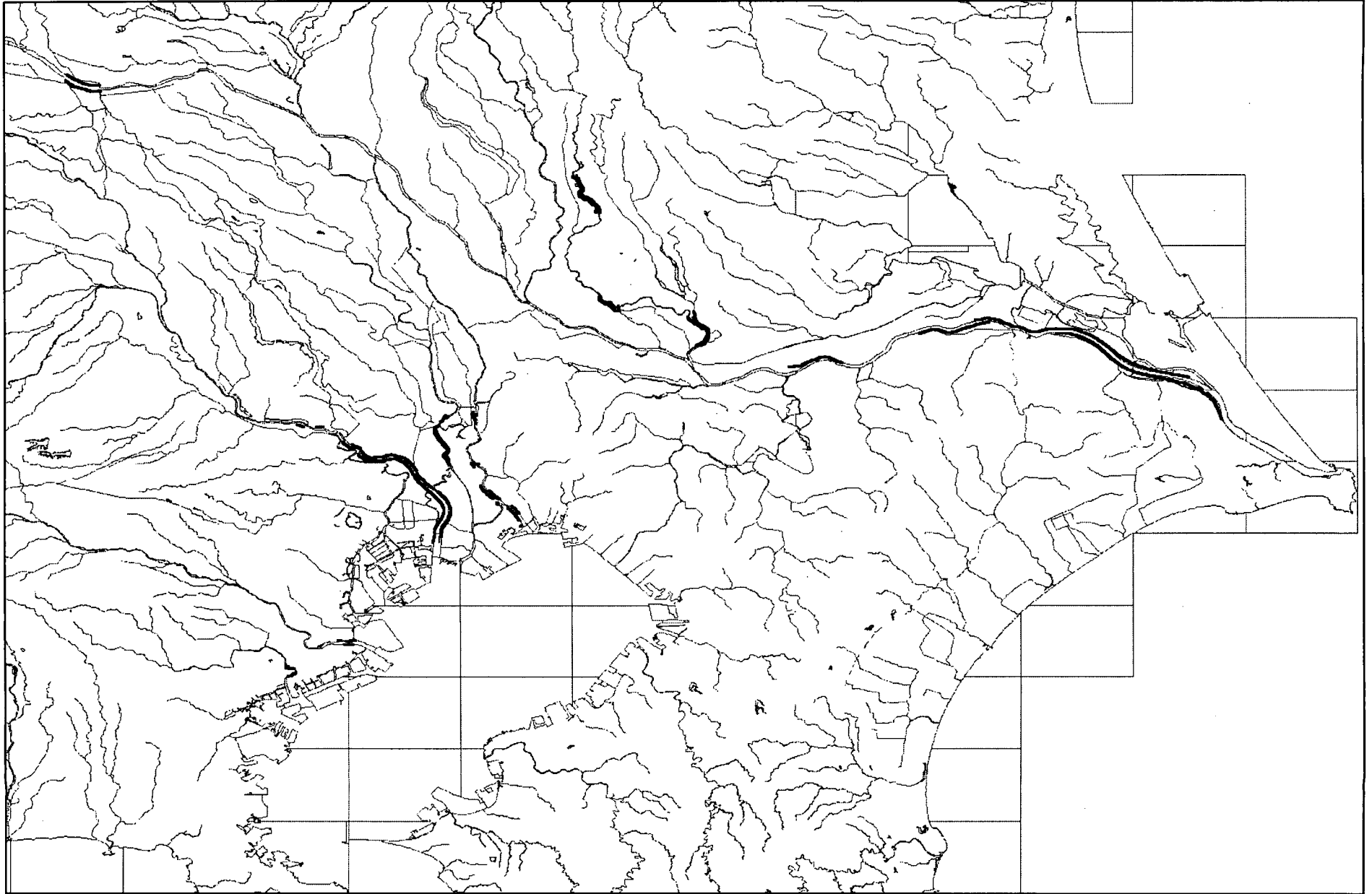


図-2.31 河川堤防の液状化危険度判定区間

2の2つが設定されている。判定時にどちらかを判断すればよいが、実際の地震のタイプが内陸直下型であっても、震源から遠い予測値点では、受ける地震波はプレート境界型と同様と考えられる。よって、地震のタイプは、各予測点ごとに判断するものとした。各予測地点において、プレート境界型か内陸直下型かのその使い分けは、次のように判断するものとした。

予測される加速度が 400gal を越える場合 : 内陸直下型

予測される加速度が 400gal を越えない場合 : プレート境界型