

# 石炭火力発電所本館基礎の検討例（その1）

## Design of Soil Improvement for Liquefaction of Reclaimed Ground

齊藤 正忠\*  
Masatada Saitō

平野 孝行\*\*  
Takayuki Hirano

### 要 約

本文は、東北電力㈱と当社で行った東北電力㈱能代火力発電所第一号機土木工事の共同研究の内、本館基礎地盤の液状化に関する検討概要を示すものである。

液状化判定は、各種の基準及び提案手法について検討を加え、最終的に各種判定手法のもつ利点を多く兼ね備えている土木学会の方法を採用した。なお、当該地盤にはこれら従来の判定手法の適用対象外である礫まじり層が存在しているため、この層に対しては石原の方法を採用して液状化判定を行った。

また、液状化判定に必要な地震によるせん断応力の深度方向分布は、東京大学生産技術研究所と西松建設共同開発のERISA-Gによって得た基盤加速度（86gal）を入力条件として、2次元FEM解析することによって決定した。

液状化判定の結果、一部在来地盤を含む当該埋立層の液状化の可能性が大であると判断されたため、衝撃締固め工法の一つである動圧密工法によって、深度10mまでを $N \geq 20$ になるよう地盤改良を行うこととした。

### 目 次

- §1. まえがき
- §2. 土質条件
- §3. 地盤の液状化判定法
- §4. 設計地震力
- §5. 液状化の判定結果
- §6. 対策工の選定
- §7. 改良仕様の決定
- §8. あとがき

### §1. まえがき

東北電力株式会社は秋田県能代市に火力発電所を建設することになり、発電所本館基礎等の基本設計のために、当社と共同研究を行うことになった。

本文は、この共同研究のうち、本館基礎地盤の液状化に関する検討について報告するものである。

建設地点は、米代川河口近くの海浜地域を浚渫土により埋立てた人工地盤であり、埋立て地盤は緩い砂地盤である。先般の日本海中部地震により一部の地域において、地盤の液状化による被害が報告されており、発電所本館

という重要性から、基礎構造の選定にあたって地盤の液状化に関する検討が主要なテーマとなった。その検討の際、設計想定地震力は、当社と東京大学生産技術研究所片山研究室とで共同開発した「地震危険度解析のグラフィックシステムERISA-G」を用いて選定した（「地震危険度解析グラフィックシステム<ERISA-G>の適用例」P. 35 参照）。

### §2. 土質条件

埋立て後に行われた昭和60年度地質調査結果から、本館基礎築造位置の代表的な土質柱状図をFig.1に、埋立層及び第1層の代表的な粒径加積曲線をFig.2に示す。

これをもとにして設定した設計土質定数をTable 1に示す。

### §3. 地盤の液状化判定法

地盤の液状化は飽和した緩い砂地盤に、地震による繰返しせん断応力が作用することにより地中に過剰間隙水圧が蓄積され、有効応力がゼロ（動的せん断抵抗がゼロ）

\* 土木設計部副部長  
\*\* 土木設計部設計課

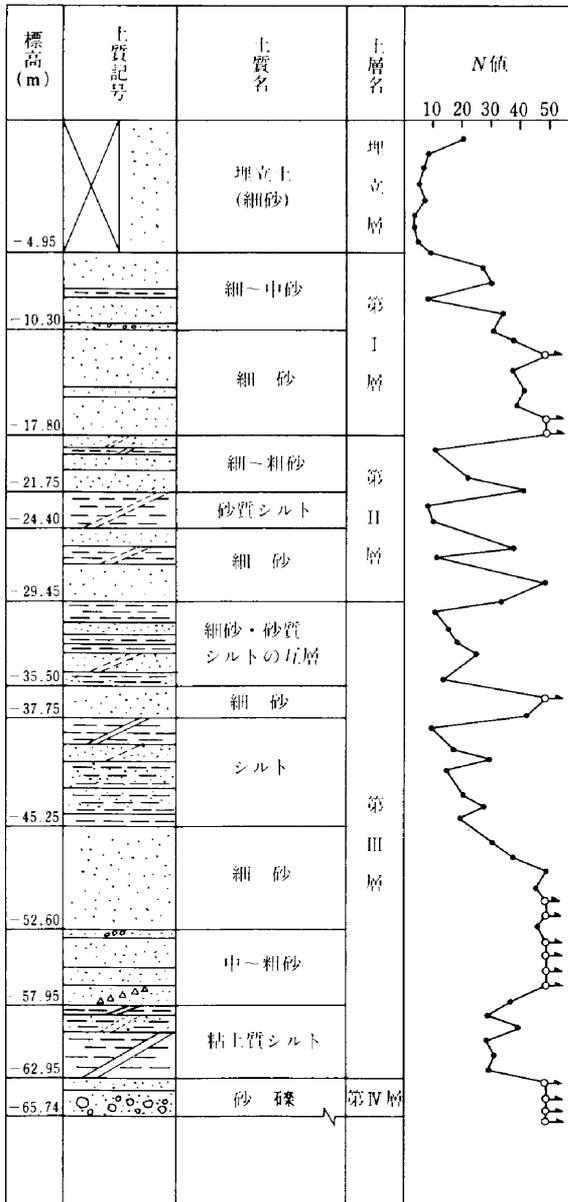


Fig.1 土質柱状図

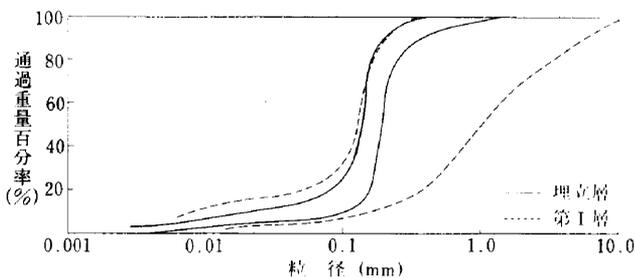


Fig.2 埋立層・第I層粒径加積曲線

となることにより発生する。

地盤の液状化を判定する方法は、規準等にいくつかの方法が提案されているが、その判定手法の原理は基本的

に、過去の液状化例と原位置試験との相関により判定するものである。

種々の判定法(土木学会、道路協会、港湾協会、建築学会、Seed-Idrissの方法)で検討を行ったが、最終的に「土木学会(電力中央研究所)による簡易判定法」を採用した。これは、現在迄に提案されている種々の簡易判定法がもつ問題点をカバーする形で提案されたもので、各々の簡易判定法がもつ利点をほぼ満足しているからである。

その判定法をTable 2に示す。

Table 1 単位体積重量

層区分		$\gamma_{sat}$ (tf/m <sup>3</sup> )
埋立層	地下水面上	1.80
	地下水面下	1.90
第I層	AS <sub>2</sub>	2.00
第II層	AS <sub>1</sub>	1.90
第III層	DC <sub>2</sub>	1.70
	DS <sub>2</sub>	2.10
第IV層	D <sub>g1</sub> , D <sub>s1</sub>	2.10

Table 2 土木学会(電力中央研究所)による簡易判定法

$FL = R \cdot L$   
 $R = a \{N_1\}^{1/2} + (b/N_1)^n + c - 14.8 \times f(D_{50})$   
 $L = \gamma_u \cdot k_s \cdot \sigma_v' / \sigma_v'$   
 $\sigma_v = \{\gamma_{11} \cdot hu + \gamma_{12} \cdot (x - hu)\} / 10$   
 $\sigma_v' = \{\gamma_{21} \cdot hu + \gamma_{22} \cdot (x - hu)\} / 10$   
 ここに、FL: 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  
 $\gamma_u$ : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数で、Fig.5をもとに決める。  
 $k_s$ : 液状化の判定に用いる地表面での水平震度  
 $\sigma_v$ : 全土載圧(kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_v'$ : 有効土載圧(kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $\gamma_{11}$ : 地下水位面より浅い位置での単位体積重量(tf/m<sup>3</sup>)  
 $\gamma_{12}$ : 地下水位面より深い位置での単位体積重量(tf/m<sup>3</sup>)  
 $\gamma_{22}$ : 地下水位面より深い位置での有効単位体積重量(tf/m<sup>3</sup>)  
 $x$ : 地表面からの深さ  
 $hu$ : 地表面から地下水位面までの深さ(m)  
 $a, b, c, d$ : 地震時の等価な繰り返し回数 $N_{eq}$ と軸応力ひずみ $\epsilon_{ax}$ によって決まる定数でTable 3による。  
 $N_1$ : 有効土載圧 $\sigma_v'$ に関して基準化した値で次式による。  
 $N_1 = 2.5N / (1.5 + \sigma_v')$   
 $f(D_{50})$ : 平均粒径 $D_{50}$ の関数で表される動的せん断強度比の第4項であり、次式による。  
 $f(D_{50}) = 0.225 \cdot \log(D_{50} / 0.35)$   
 (0.04mm  $\leq D_{50} \leq$  0.60mm)  
 $f(D_{50}) = 0.05$   
 (0.60mm  $\leq D_{50} \leq$  1.50mm)  
 $N_{eq}$ : 地震波の等価な繰り返し回数  
 $\epsilon_{ax}$ : 軸応力のひずみ(%)

#### §4. 設計地震力

基盤(第IV層)面における設計最大加速度は、地震危険度解析を行い、86 galとした。

Table 3 動的せん断強度比Rに関する定数

$\varepsilon_{D,1}$	$N_{eq}$	$a$	$b$	$c$	$d$
2%	10	0.0639	0.0346	0.312	3.12
	20	0.0584	0.0336	0.312	2.80
	30	0.0554	0.0318	0.312	2.78
5%	10	0.0760	0.0420	0.0	4.77
	20	0.0676	0.0368	0.0	4.52
	30	0.0631	0.0345	0.0	4.00

また、入力加速度の増幅率は使用する入力地震波により異なるため、震央距離とマグニチュードの大きさを考慮した種々の波形（秋田502NS, 秋田502EW, 仙台501EW, 十勝沖, EL-CENTRO）について検討した。その結果、設計入力地震波として「秋田502EW」を採用した。地盤の応答加速度の計算においては、地盤を水平な成層地盤にモデル化し、各土層を均質な弾塑性体とし、基礎から入射した地盤波を鉛直方向に伝播するせん断波として、本館基礎を含んだ地盤の応答計算を2次元FEMプログラム FLUSH にて行った。

Fig.3に解析モデル及び土質条件を示す。この内、土のひずみ依存性については、Fig.4に示す関係を用いた。また、土の剛性率Gは、PS検層結果より求まる弾性波速度 $V_s$ から式(1)を用いて算出した。

$$G = \gamma_t \cdot V_s^2 / g \tag{1}$$

ここに、 $\gamma_t$ ：単位体積重量 (tf/m<sup>3</sup>)  
 $g$ ：重力加速度 (9.8m/s<sup>2</sup>=980gal)  
 $V_s$ ：弾性波速度 (m/s)

深度方向の加速度分布をFig.5に示す。地表面加速度は236galとなり、地表面での設計地震震度は次のようになる。

$$\alpha_{max} / g = 236 / 980 = 0.24$$

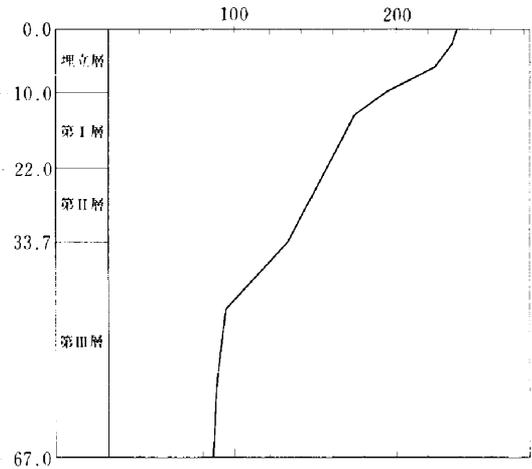


Fig.5 地震応答加速度分布図(地盤改良前)

深度(m)	72.5m	12.5m	29.5m	単位体積重量 (tf/m <sup>3</sup> )		土質	弾性波速度 (V(m/s))		ポアソン比	剛性率 (G(tf/m <sup>2</sup> ))	
				現状地盤	改良地盤		現状地盤	改良地盤		現状地盤	改良地盤
0.0	埋立層	改良地盤	4-粘り地盤	1.80	1.90	砂	130	20	0.32	2,480	7,500
10.0	第I層	改良地盤		1.90	2.00	砂	123	197	0.49	2,000	7,900
22.0	第II層					砂	205		0.48		8,600
33.7	第III層					砂	290		0.49		17,000
49.5	第IV層					粘土	198		0.49		7,600
62.0	第V層					粘土	250		0.49		13,600
67.0	第VI層					粘土	260		0.49		12,000

Fig.3 検討モデルと土質定数

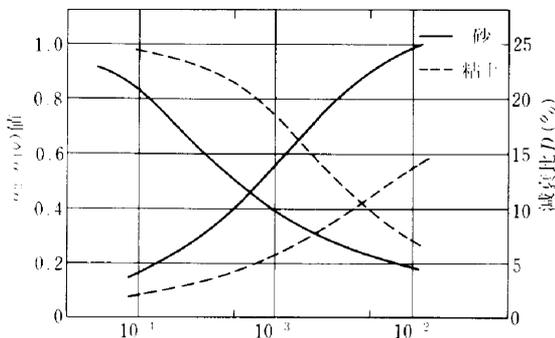


Fig.4 減衰比およびせん断定数とヒズミの関係

### §5. 液状化の判定結果

液状化の判定は、Table 2に示す液状化に対する抵抗率FLを求め、この値が1.0以下の土層について液状化するものとする。

当該地盤の第I層の上部において、礫を30%程度含む層がみられる。従来の液状化判定法は礫を含まない層に対して提案されたものであるため、本検討においては礫の含有が液状化に及ぼす影響を考慮する石原の提案する方法に従って補正を行うこととした。

礫を含んだ地盤で標準貫入試験を実施すると、先端のチューブが礫に会って貫入が困難になるため、判定されたN値が著しく大きくなることは周知の事実である。

そのため、まず一般的な方法で礫のN値に及ぼす影響を排除するためのN値の補正を行う。石原の方法は、この補正N値を用いて液状化抵抗強度を計算し、この値について礫の含有に応じた割増をしようとするものである。

液状化の判定結果を、Table 4に示す。この結果、埋立層において“液状化の危険性が大きい”と判断され、液状化防止のための対策工が必要になったことがわかった。

Table 4 液状化判定結果

層	No.60-2		No.60-3		No.60-4		No.60-5		No.60-6		
	深度	FL	判定	FL	判定	FL	判定	FL	判定	FL	判定
埋立層	1.30	1.66	○	2.43	○	1.16	○	1.26	○	1.36	○
	2.30	1.46	○	1.20	○	1.12	○	0.91	×	0.96	×
	3.30	0.70	×	0.90	×	0.75	×	0.90	×	0.92	×
	4.30	0.76	×	0.74	×	0.55	×	0.63	×	0.66	×
	5.30	0.89	×	0.78	×	0.52	×	0.66	×	0.55	×
	6.30	0.92	×	0.61	×	0.49	×	0.68	×	0.54	×
	7.30	0.87	×	0.56	×	0.77	×	0.72	×	0.69	×
	8.30	0.71	×	0.60	×	0.65	×	0.67	×	0.65	×
	9.30	0.75	×	0.75	×	0.99	×	1.09	○	1.08	○
	10.30	1.06	○	1.43	○	1.45	○	1.57	○	1.19	○
第1層	11.30	1.06	○	1.49	○	2.57	○	1.04	○	1.19	○
	12.30	1.06	○	0.69	×	3.63	○	1.24	○	1.66	○
	13.30	1.30	○	1.65	○	2.45	○	1.25	○	1.63	○
	14.30	1.86	○	1.46	○	1.28	○	1.21	○	1.27	○
	15.30	1.54	○	1.94	○	1.57	○	1.31	○	1.77	○
	16.30	2.10	○	2.77	○	2.05	○	1.26	○	1.45	○
	17.30	1.59	○	1.68	○	1.62	○	1.36	○	1.58	○
	18.30	1.72	○	2.05	○	1.63	○	1.69	○	1.62	○
	19.30	2.35	○	1.77	○	2.21	○	1.25	○	2.34	○

液状化対策は、液状化の発生を防止する方法と液状化の発生を許すが、構造物をその液状化に耐えられる構造にする方法の2通りに大別できる。

前者の原理とその方法をTable 5に示す。

一方、後者は、液状化が発生することを前提としたもので、杭基礎等によって代表される。

しかし、杭基礎の場合、液状化した層に水平抵抗を期待することができないため、重要構造物として許容されない大きな水平変位(今回の試算結果は100mm程度となった)が生ずる。その上、杭基礎とした場合の工費は莫大なものとなる。従って、本検討においてこの基礎形式を採用することは不相当と判断し、地盤改良によって液状化を防止した地盤上に直接基礎形式の基礎を構築するものとした。

Table 5を参考に施工の確実性・実績等から、比較の

§ 6. 対策工の選定

Table 5 地盤の液状化強度を増加させる方法の特徴

原理	工法	適用性	効果	公害性	実績	備考
密度増大	バイブフローテーション	GL-20m程度	N値15~20程度まで	水平振動が主体 比較的少ない	16	使用材料により排水性も期待
	サンドコンパクションパイル	GL-35m程度	N値25~30程度、40限界	鉛直振動が主体 比較的あり	123	同上
	爆破	GL-20mまでは可能か	相対密度70~85%程度まで	大きい	0	施工管理困難
	ロッドコンパクション	GL-20m程度	N値15~20程度まで	サンドコンパクションパイルと同等	9	現地砂使用が多い
	動圧密	GL-10m程度	施工結果から判定	衝撃	4	浅層締固め
	パイロダンパー	GL-3m程度	施工結果から判定	鉛直振動	17	表層締固め、併用が多い
	転圧	20~30cm程度	相対密度95%程度まで	比較的少ない	1	地下水位以下は止水対策
粒度改良又は固結	群杭	地下水位以浅 GL-10~-12m	施工結果から判定	比較的少ない	1	打込み杭
	生石灰パイル	GL-20m程度	施工結果から判定	ディーゼルパイルハンマーの振動・騒音少ない、粉じん	1	生石灰による吸水膨張
	置換	GL-5m程度までが一般的	砕石置換などにより有効	少ない	14	
飽和度の低下	注入固結	ボーリング深度に応じて可能	施工管理が重要	付近構造物への注入圧の影響と流出	9	セメントグラウトなど、施工管理が難しい
	表層混合処理 深層混合処理	GL-5m程度 GL-30m程度	配合量による	少ない	3 8	
間隙水圧の消散	ウェルポイント	5~6m程度の低下	透水性の不確かさ有	近隣の地下水位低下による障害	9	長期間の運転、維持管理
	ディープウェル	15~20m程度の低下	透水性の不確かさ有	同上	2	同上
せん断変形抑制	グラベルドレーン	GL-20m程度	密度の増加に対して改善の策	少ない	4	既設構造物にも適用、周辺対策でほかに数例
	シートパイル	GL-10m程度	拘束の定量化が難しい	シートパイル打設による振動	1	地中連続壁なども止水壁として使用

\* 昭和50年以降(昭和56年一部入る)建設業25社アンケート調査からのプロジェクト件数。

対象となる工法を選び出し、比較検討を行った。その結果、経済性を考慮して動圧密工法を採用した。

動圧密工法は、対象となる地盤の地表面に高所から重錘を落下し、それにより発生する衝撃力によって地盤内部を締め固める工法である。この方法はあらゆる地盤に対して適用可能であるが、砂地盤に対して特に有効である。原理的には、目新しいものではないが、打撃エネルギーが巨大で、かつ計画的に行われるため、大深度まで高密度に地盤を改良することができるものである。本工法の最大の特徴は、Terzaghiの提案する情報化施工を積極的に取り入れていることである。このため、施工中に得られた種々の情報によって、打撃エネルギーを増減させ、改良仕様を修正させることになる。振動・騒音といった公害性があるものの、適用条件を誤らなければ、本工法は従来の工法に比べて工費が大幅に安価であり、良好な工法であるといえる。

§ 7. 改良仕様の決定

改良地盤の液状化に対する基本の検討手順を、Fig.6に示す。

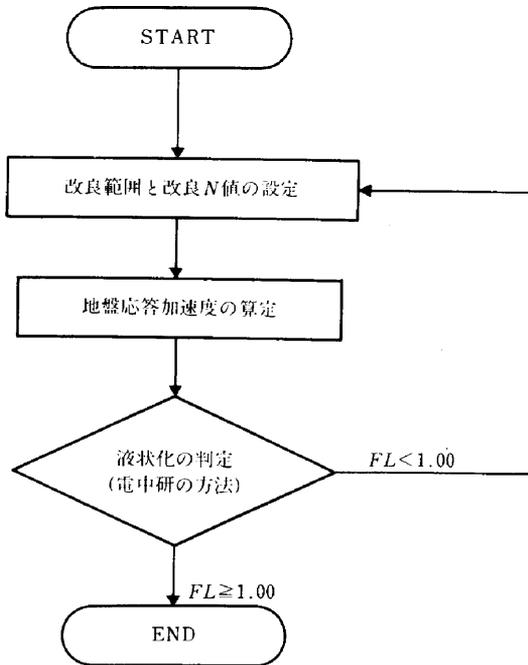


Fig.6 検討フロー図

改良地盤に対する解析方法は、「現状地盤の液状化に対する検討」と同様であるが、現状地盤の液状化に対する検討と異なる解析条件を示すと次の3点である。

- ① N = 2 ~ 10程度の層(埋立層)がN = 20程度に改

良されることにより、改良地盤の単位体積重量は経験的に0.1tf/m<sup>3</sup>増加するものとする。

- ② 埋立層の非改良部の剛性率Gは、二次元FEMモデルによる試算結果を参考にして、安全側に非液状化状態のG<sub>0</sub>に0.8を乗じた値を用いる。

- ③ 改良地盤部においては、改良N値より次に示す回帰式を用いて弾性波速度V<sub>s</sub>を求め、剛性率Gを算定する。

$$V_s = 56.7 \cdot N^{0.415}$$

改良N値20の場合について計算した深度方向の加速度分布をFig.7に示す。地表面最大加速度は、改良域の端部で238galとなった。

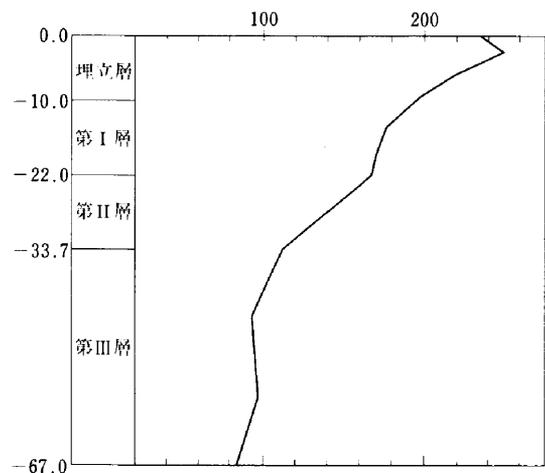


Fig.7 地盤応答加速度分布図(地盤改良後)

検討方法は現状地盤の液状化に対するものと同様である。最終検討結果をTable 6に示す。

Table 6 液状化判定結果

層	No	No60-2		No60-3		No60-4		No60-5		No60-6	
		FL	判定								
埋立層	1.30	3.44	○	1.95	○	1.74	○	1.55	○	1.64	○
	2.30	2.80	○	1.74	○	1.50	○	1.49	○	1.48	○
	3.30	2.24	○	1.46	○	1.29	○	1.27	○	1.26	○
	4.30	2.01	○	1.35	○	1.19	○	1.18	○	1.16	○
	5.30	1.83	○	1.27	○	1.13	○	1.12	○	1.11	○
	6.30	1.72	○	1.22	○	1.10	○	1.08	○	1.08	○
	7.30	1.62	○	1.13	○	1.08	○	1.06	○	1.06	○
	8.30	1.56	○	1.11	○	1.06	○	1.04	○	1.04	○
	9.30	1.51	○	1.06	○	1.05	○	1.09	○	1.09	○
	10.30	1.05	○	1.38	○	1.42	○	1.53	○	1.18	○
第I層	11.30	1.04	○	1.45	○	2.42	○	1.02	○	1.17	○
	12.30	1.04	○	0.68	×	3.32	○	1.21	○	1.61	○
	13.30	1.27	○	1.58	○	2.30	○	1.22	○	1.58	○
	14.30	1.78	○	1.04	○	1.25	○	1.18	○	1.23	○
	15.30	1.47	○	1.83	○	1.50	○	1.26	○	1.67	○
	16.30	1.96	○	2.56	○	1.92	○	1.21	○	1.38	○
	17.30	1.50	○	1.58	○	1.53	○	1.29	○	1.48	○
	18.30	1.60	○	1.89	○	1.53	○	1.58	○	1.52	○
	19.30	2.14	○	1.64	○	2.01	○	1.18	○	2.13	○

注) FL = 1.00をもって○とする。

改良 $N$ 値及び深度は、他のボーリング地点の土質条件についての検討の結果並びに発電所基礎の重要度を合わせ考えて、 $N=20$ 、深度10mと設定した。

地盤の液状化対策工として地盤改良を行う場合、その改良範囲を設定しなければならないが、本検討では土田による方法によりその範囲を設定した。この方法は、Fig. 8のような改良部分と非改良部分とに分けた槽実験の結果から、ICを受働崩壊面、BCを主動崩壊面として改良域を決定するものである。

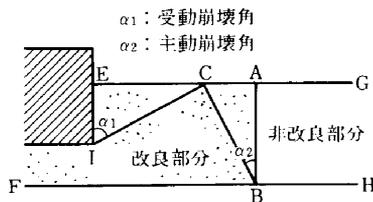


Fig.8 地盤改良範囲の考え方

- 10) 末松他；地盤の液状化7，液状化被害を軽減するための対策，土と基礎Vol.30, No.4, 昭和57年
- 11) 土質工学会編；特集耐震設計と補強，土と基礎Vol.31, No.5, 昭和58年
- 12) 土谷他；動圧密工法とその設計施工，第5回「軟弱地盤の改良」技術講習会テキスト，総合土木研究所，昭和55年
- 13) 山田正俊；動圧密工法，土と基礎Vol.29, No.5, 昭和56年
- 14) 土田他；液状化対策としての締固めの施工範囲について，第14回地震工学会研究発表会 pp.9～12, 1976
- 15) 岩崎他；地盤の液状化の対策範囲に関する数値解析，第17回土質工学研究発表会講演集，pp.1949～1952, 昭和57年
- 16) 古賀泰之；構造物における液状化対策，基礎工Vol.12, No.7, 1984

## §8. あきがき

地盤の液状化問題を単に規準に従うだけでなく、能代地点を特定して、設計地震震度を設定し、現時点で最も妥当と思われる判定手法により検討した。

現在、改良工事が行われており、次の機会に工事結果について報告したいと考えている。

### 参考文献

- 1) 土質工学会；土質調査・試験結果の解釈と適用例，昭和43年
- 2) 土質工学会編集；臨海地帯の埋立工事，土質工学ケースストーリー集第一集，pp.422～429, 昭和58年
- 3) 齊藤彰；軟弱海底地盤上の大規模埋立工事における土質基礎工学的研究，昭和52年
- 4) 吉見吉昭，砂地盤の液状化，技報堂出版
- 5) 岩崎他；地震時地盤液状化の程度の予測について，土と基礎Vol.28, No.4, 昭和55年
- 6) 国生他；密な砂地盤の動的強度と $N$ 値，第18回土質工学研究発表会，1983
- 7) 国生他；密な砂地盤の $N$ 値による液状化判定法，第19回土質工学研究会，1984
- 8) 土木学会；受託研究報告書 地盤の評価に関する研究（地盤の評価手法の標準化に関する研究）別冊第3編 地盤調査・試験法，昭和59年3月
- 9) 石原研而；動土質力学—礫および細粒分を含む土の液状化特性—，昭和60年度最近の土質・基礎に関する講習会講演資料，昭和60年7月