

圧密沈下対策の実例と考察

A Consideration on the Countermeasures Consolidation

福岡幸雄^{*} (Yukio Fukuma)

キーワード：圧密沈下／地盤改良／道路／軟弱地盤 (IGC: E-2)

1. まえがき

松江市内でも有数の軟弱地盤上に全幅員12.0m、延長約375mの都市計画街路が計画された。この付近の地盤は極めて圧縮性に富む約10mの軟弱粘土が堆積しており、近隣の道路や宅地に大きな圧密沈下が生じていることから相当地盤の悪いことが予想された処である。このため街路計画では圧密沈下対策を重点として、施工環境を含めた現地条件、工期(完成時期)および供用後の残留沈下量 $\Delta S \leq 10\text{cm}$ と言う設計条件を満足すべく慎重な工法検討を行い、総合比較の結果、施工ブロック毎に①杭支持工法、②深層混合処理工法、③ドレーンと段階盛土の併用工法、④生石灰パイル工法の4種工法を採用した。これは施工ブロックによって工事期間や周辺地盤の状況が異なっているためである。

以下本文では、地盤状況、工法設計の概要、施工経過の3点を中心に、昭和58年から63年まで約5年間にわたった工事結果を記し、問題点と今後の留意点についてまとめる。なお調査設計と施工の経過は次のようである。

昭和57~58年	Cブロックの調査設計	昭和58年末	Cブロックの施工開始…ドレーン+段階盛土
昭和60~61年	A, Bブロックの調査設計	昭和61~63年	地盤処理工を含む街路築造工事
昭和63年4月	供用開始		

2. 地盤状況と街路計画

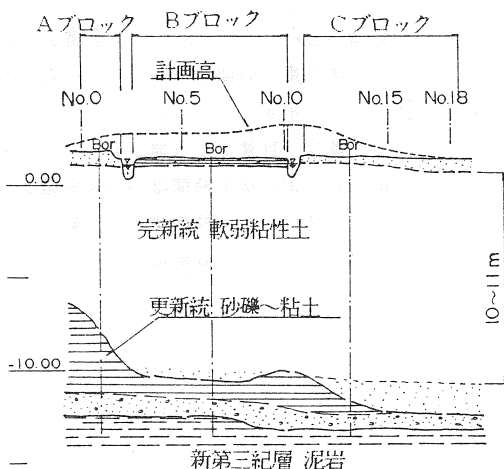


図2-1 模式縦断面図

地盤は新第三紀の泥岩類を基盤岩とし、これを第四紀更新統の砂礫および硬質粘土が覆い更に完新統の軟弱粘土が10~11mの層厚で堆積して沖積低地を形成している。最上位には造成ほかで行われた1.0m内外の盛土がある。

道路計画は最大盛土高 $H=2.6\text{m}$ 、平均高 1.5m で、車道幅員 6.0m 、全幅員 12.0m の都市計画街路である。

検討対象となる粘土層は、含水比 $W_n=80\sim 140\%$ 、間隙比 $e_n=2\sim 3$ を示す高圧縮性の軟弱土で、非常に微細な粒子で構成される。

軟弱土の土性をまとめると次のようになり、高含水比、高圧縮性、低強度の土層であることが示される。

○物理定数

・真比重 $G_s=2.55\sim 2.65$ ・粒度分布 砂…5%以下, シト…50~70%, 粘土分以下…30~50%

* 間 土質設計

- ・コンスタンス $W_n=80\sim 140\%$, $W_L \approx W_n$, $W_p=40\sim 50\%$ ・湿潤密度 $\rho_t \approx 1.45 \text{ tf/m}^3$ ・初期間隙比 $e_n=2\sim 3$
- 力学的定数
- ・一軸強度 $q_u=0.2\sim 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ ・変形係数 $E_{50} = 5\sim 10 \text{ kgf/cm}^2$
- ・圧密特性 $P_c = P_e \approx 0.45 \cdot Z \text{ tf/m}^2$, $C_c=1.0\sim 2.2$, $m_v=(2\sim 3) \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{kgf}$, $C_v=20\sim 50 \text{ cm}^2/\text{day}$

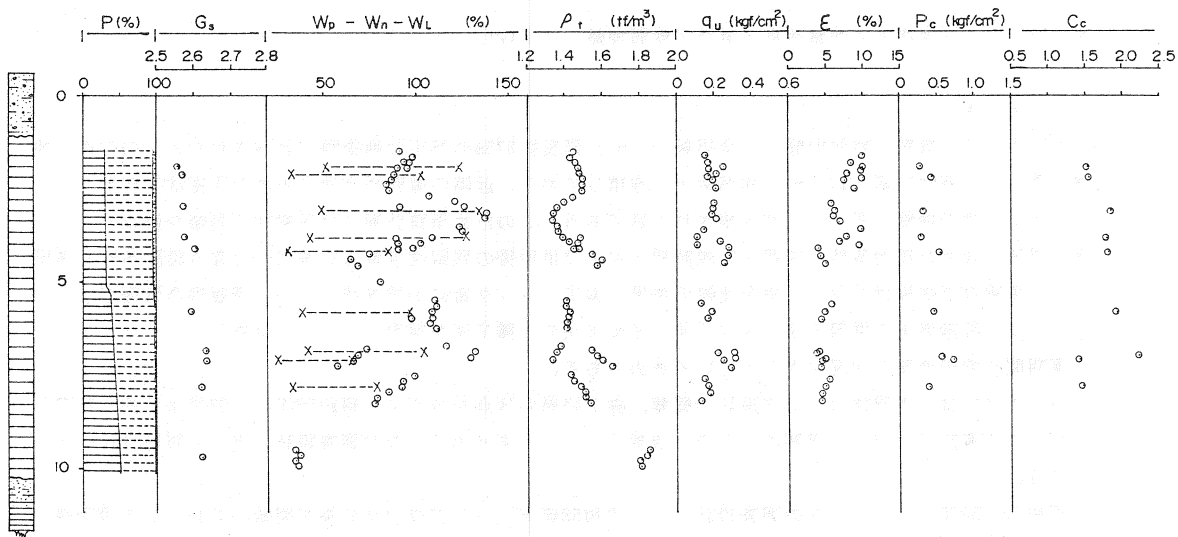


図 2-3 軟弱土の土性一覧図

3. 沈下量の分布

3.1 盛土高と沈下量の関係

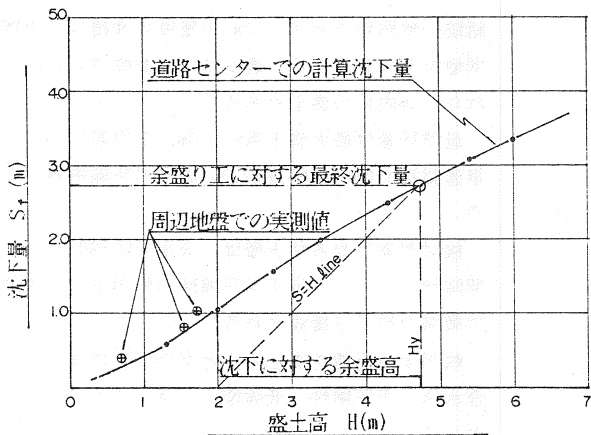


図 3-1 盛土高と沈下量

$S_f = m_v \cdot \Delta P \cdot H$, $t = T_v \cdot H^2 / C_v$ の計算式を用いて、沈下量と時間計算を行った。結果を図 3-1 に示す。

沈下量は、計算上では盛土高の 1/2 程度に達する。また沈下時間は $U=90\%$ 到達まで

- ・ A ブロック (片面排水) …約 50 年
- ・ B, C ブロック (両面排水) …約 10 年

である。

3.2 施工ブロック毎の沈下量

A, B ブロックは低盛土のため供用開始後の交通相当荷重⁽¹⁾を考慮して沈下量を求めた結果、沈下量はセンターライン上で 1.0m にも達し、このままでは街路としての機能維持が難しいため、沈下対策を必要とする。

Cブロックは段階盛土工により盛土厚が大きくなるので交通荷重は加えていない。またA、BブロックのmはCブロックの沈下状況から求めた修正値を用いている。

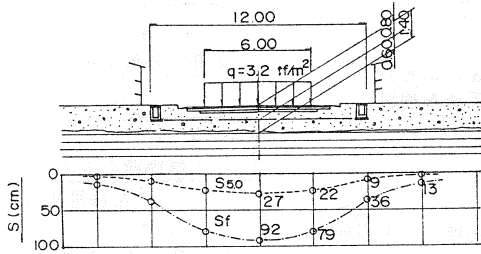


図3-2 Aブロックの沈下量分布

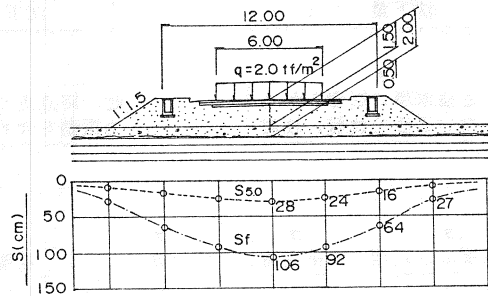


図3-3 B、Cブロックの沈下状況

4. 対策工法設計

検討工法と採用理由、検討フローチャートを表4-1、図4-1にまとめる。

表4-1 検討工法と採用理由

検討ブロック	現況と街路計画	検討工法と採用工法	採用理由
Aブロック (起点部区間)	<ul style="list-style-type: none"> 宅地跡で両側に民家が接している。 盛土高0.5～0.9mで、土留め擁壁を計画。 	深層混合処理工法 杭支持工法	<ul style="list-style-type: none"> 0.5～0.9mの低盛土区間ではあるが、盛土荷重と供用後の交通荷重によって相当量の沈下が生ずる。 工法は、施工時、施工後とも近隣家屋に与える影響の少ないものとし、経済性を比較の結果から当工法を採用した。 地下埋設物は、この区間に限り歩道内に入れることを条件としている。
Bブロック (グラント部区間)	<ul style="list-style-type: none"> 過去田圃であった所を近年造成されたもので、田面より0.5m程度高い。 計画盛土高は、1.5～2.0mで土羽構造。 	カートレットドレン + 段階盛土工法 深層混合処理工法 生石灰パイル工法	<ul style="list-style-type: none"> 無処理地盤では長期に亘って多大な沈下が生ずる。 ドレンによる圧密促進工法も検討したが、施工工期に余裕がないため確実性の点から計画が難しく、信頼性の高い当工法を採用した。 地下埋設物が計画されてもソイルセメント杭のため、掘削等の施工は可能である。 生石灰パイル工法は、当地地盤では経済性と信頼性で採用工法に劣る。
Cブロック (終点側区間)	<ul style="list-style-type: none"> 空地で、南側にRC構造のアパートがある。 周辺には問題となるような障害物はない。 盛土高は0～2.5mで、土羽構造。 昭和58年末より段階盛土工を開始する。 	カートレットドレン + 段階盛土工法 補助工法として 生石灰パイル工法	<ul style="list-style-type: none"> 設計時点では4～5年の余裕があったことから経済的工法として採用した。 沈下量の継続観測、データ解析および次段階盛土高の調整を重要管理項目として実施することを条件とする。 生石灰パイル工法は、段階盛土が不可能になった部分について計画した。採用条件としてはドレン材があっても施工が可能で、沈下抑制効果が得られるものである。

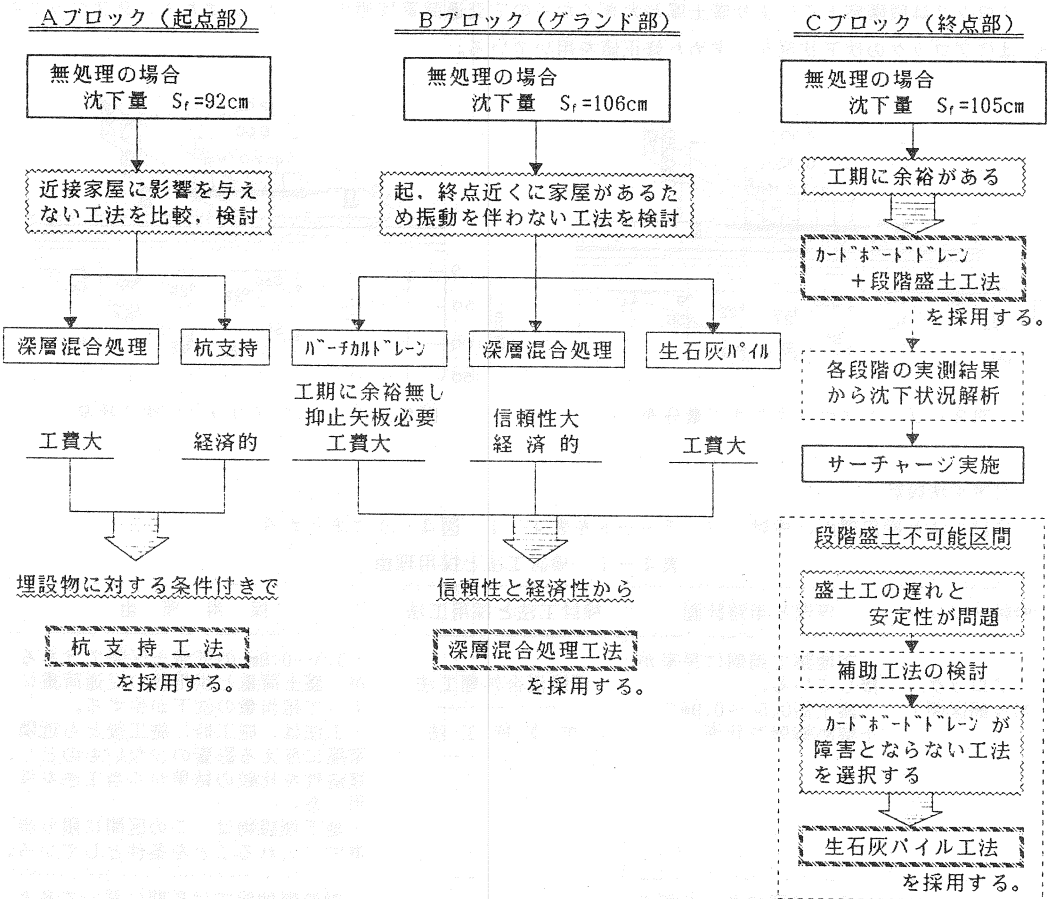


図4-1 工法検討フローチャート

4.1 杭支持工法

「⁽²⁾パイルネット工法による泥炭性超軟弱地盤の改良」の設計手法を用いて、H型鋼と鉄筋網による圧密沈下防止工を計画した。

1) 杭間隔の計算

群杭効果が得られる間隔

$$L = 1.5\sqrt{D \cdot D_f} \cdot 1/2$$

D : 杭の直径 D_f ; 地中の杭長(m)

2) 群杭としての極限支持力

$$R_d = \{A(q_d - P) + U \cdot D_f \cdot S\} \cdot 1/n$$

$$P = \gamma \cdot D_f + n \cdot W_p / 1/A, \quad q_d = C \cdot N_c + \gamma_1 \cdot D_f \cdot N_q + 1/2 \cdot \gamma_2 \cdot B \cdot N_r$$

R_d ; 杭1本当たりの極限支持力(tf/本)

n ; 群杭中の杭数(本)

A ; ブロック底面積(m²)

W_p ; 杭1本当たりの重量(tf)

U ; ブロックの周囲の長さ(m)

q_d ; ブロック底面での極限支持力 (tf/m²)

S ; 杭に接する土のセン断低杭 (tf/m²)

C ; 杭先端地盤の粘着力(tf/m²)

γ_1 ; 杭先端までの土の単位体積重量(tf/m³)

γ ; 杭間の土の平均単位体積重量

γ_2 ; 杭先端から下の土の単位体積重量

P ; ブロック底面に作用する杭と土の単位体積重量

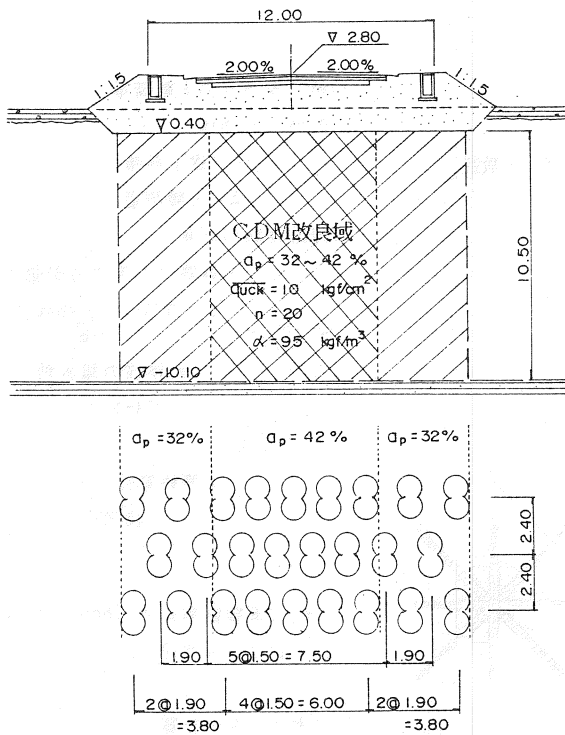


図4-3 深層混合処理工法概要図

であり、固化材添加量は $\alpha=95\text{kgf/m}^3$ である。以上の結果より改良仕様は次のようになる。

○杭造成

- ・改良率 … $a_p=42\%$ および 32%
- ・改良杭長 … $L=10.50\text{m}$

○固化材

- ・使用材料 … 普通ポルトランドセメント
- ・添加量 … $\alpha=95\text{kgf/m}^3$
- ・水セメント比 … $W/C=0.6$

○設計基準値

- ・現場必要強度 … $q_{uk} \geq 10\text{kgf/cm}^2$

($W_L \neq W_n$ で非常に軟弱なため水量を少くした)

※応力分担比 n は、高圧圧密試験結果から $n = m_{v0}/m_{vr}$ として求めた。

(m_{v0} :非改良土の体積圧縮係数, m_{vr} :改良土の体積圧縮係数)

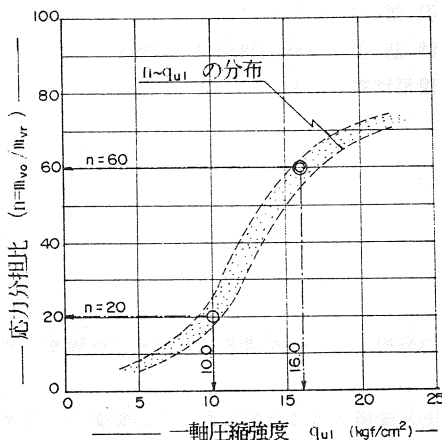


図4-4 $\alpha \sim q_{u1}$ 関係図

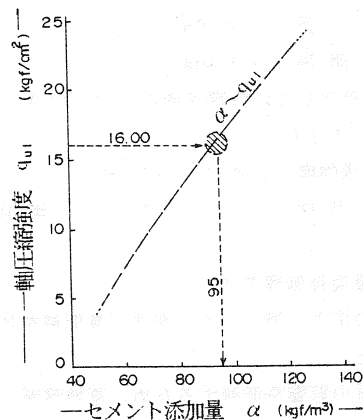


図4-5 $n \sim q_{u1}$ 関係図

・改良後の沈下量計算

$$S = \beta \cdot S_0$$

$$\beta = \frac{1}{(n-1)a_p + 1}$$

β : 応力低減係数

S_0 : 無処理地盤での圧密沈下量

n : 応力分担比

a_p : 改良率

経済性の観点から、応力分担比を上げ、改良率を50%以下に押さえることにした。

応力分担比は一般的に10~20の範囲とされており、ここでは $n=20$ に設定した。

改良杭の配置は、圧密沈下量の分布状況と $\Delta S \leq 10\text{cm}$ の条件から、沈下量の大きい車道下は $a_p=42\%$ 、その他は $a_p=32\%$ である。

$n=20$ に見合う杭強度は、室内配合試験による一軸圧縮強度と高圧圧密試験の結果である図4-4、4-5から求めた。

室内試験では、 n に対して3倍の安全率を見込み目標値は $n=60$ とした。これに対応する一軸圧縮強度は $q_{u1}=16\text{kgf/cm}^2$

4.3 カードボードドレーン+段階盛土工法

盛土高と沈下量関係図から沈下量に対する必要盛土高を求め、ドレーンによる沈下促進と安定対策としての段階盛土を計画した。

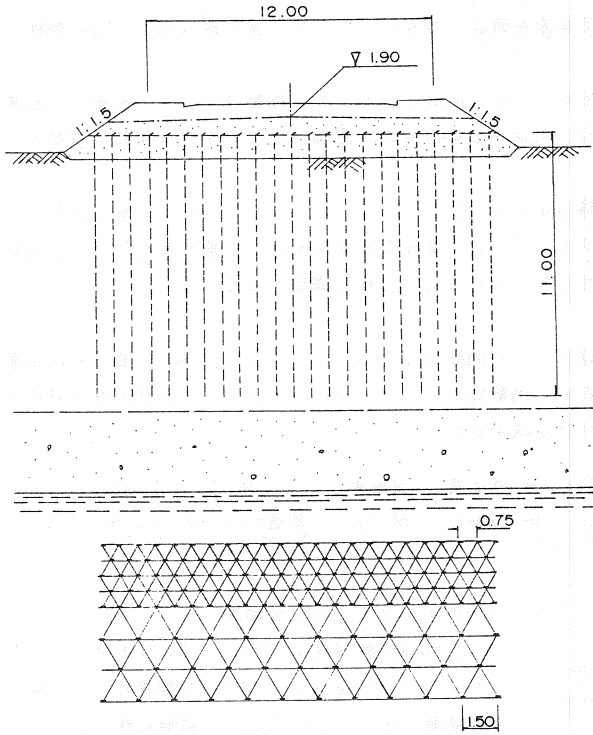


図4-6 カードボードドレーン工法概要図

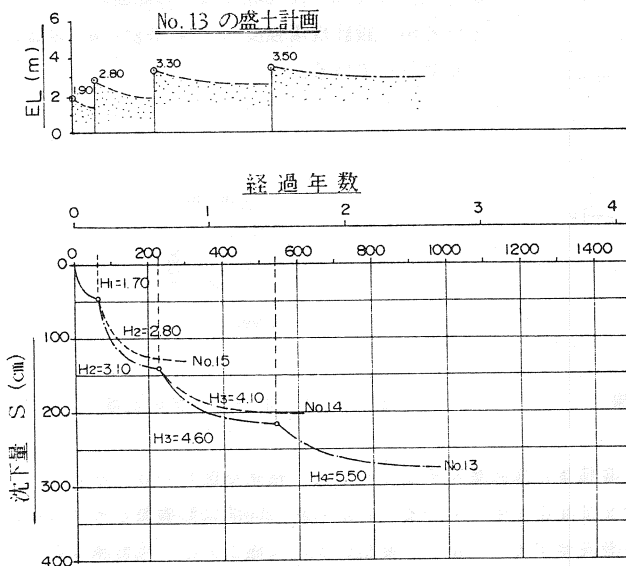


図4-7 沈下曲線と段階盛土の計画

このCブロックの設計は昭和58年7月で、この時点では完成まで約4年（当初完成予定S62.3）の工期があったためドレーン工法が採用でき、工期内に十分治まるように3年の工期で計画した。

1段階毎の盛土の安全率は、仮設条件であること、両サイドは畑や水田であり重要構造物がないことから $F_s \geq 1.05$ で安定とした。

前述のように盛土高の1/2程度が沈下量となる地盤であるため非常に大きな盛土が必要となり、測点 No. 13, 14, 15の最終必要高は次のようである。

No.13 ... $H_f=5.50m$

No.14 ... $H_f=4.10m$

No.15 ... $H_f=2.80m$

このため、圧密沈下による地盤の強度増加によって安定を計りながらの盛土とし、4段階に分割した。なおサンドマットは $t=1.00m$ である。

ドレーン材は、経済性からプラスチックポットとし、ドレーン換算径5cmで、バロン理論により時間計算を行った。この時の地盤の圧密係数は $C_v=C_v$ とし、圧密圧力に応じた係数を用いた。

ドレーン長が比較的短いことから時間の遅れは見込まず、施工工期に若干余裕を持たせるようにした。

○計算結果

ドレーン長... $L=11.00m$

打設間隔... $\Delta ctc=750$ および

$\Delta ctc=1500$

($\Delta ctc=1500$ 区間は、終点部で盛土高の低い現道摺付け周辺部の配置)

5, 施工

施工状況と問題点についてまとめる。

5.1 杭支持工法

杭の打込みは、極力振動を出さないようにバイプロは避け、W=1.0tfのモンケンを使用した。

杭は作成したガイドに沿わせてランシットで垂直を確認しながら、モンケン落下高 0.3~1.0mの範囲で注意深く打ち込んだ。

民家に最も近いものは基礎から約2mの位置であったが、問題となるような振動は生じず、無事に全数量の杭打ちを終えた。(杭打ちよりもダンプトラックほか工事用車両や重機の走行で生じる振動の方が大きく感じられた。)

杭頭部の鉄筋の連結は、加工鉄筋 D_{19} を現場溶接する方法で、うまく仕上がっているが、施工延長が長い場合は溶接数量が増し、工期的な問題も生ずるので、より簡単な方法を考える必要がある。また小規模な杭頭キャップとジオテキスタイル等の組合せも考えられるので今後の課題である。

5.2 深層混合処理工法

当工法は全国的に施工実績も多く施工面ではさしたる問題はなかったが、 $\alpha=95\text{kgf/m}^3$ という低添加量故の混合むらが施工の初期段階で確認されたため、試験施工とチェックボーリングにより仕上がりが確認したうえで最良と考えられる下記の施工仕様が決定された。

撈拌回数	W/C	貫入速度	引抜速度	スラリー吐出量	回転数	固化材 (kgf/m ³)
往復 1回	0.8	0.8 m/min	0.8 m/min	68 l/min	60 rpm	普通セメント…95、ホゾリス…0.25

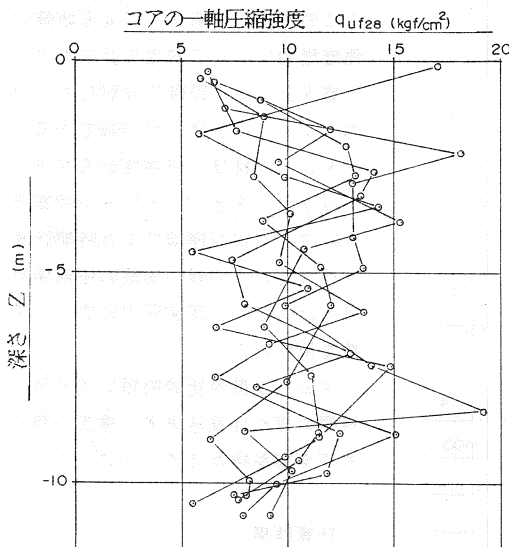


図5-1 チェックボーリング結果

(1)チェックボーリング結果

φ66mmの軟岩用コアチューブによりオールコアサンプリングを行い、1点/1mを標準として一軸圧縮試験に供した。材令28日の試験結果を図5-1に示す。

土質の変化や機械撈拌では避けえない混合むらから $q_{ur28}=5.5\sim 19.0\text{kgf/cm}^2$ の範囲にバラついているが、設計現場強度 $q_{urk}=10\text{kgf/cm}^2$ はほぼクリアしている。

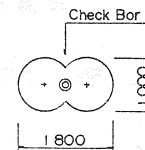


図5-2 ボーリングの位置

(2)地盤変位置

一部の施工ブロックで、地盤の水平変位置と降起量をチェックした。結果を図5-3に示す。

当地の場合、改良杭端から 18m付近まで変位が生じていることから約 20m間は影響圏と考えられるので近接して構造物のある場合には注意を要する。しかし、変位の状況は施工方法、地盤構成および土質によっても異なるため、慎重な判断が必要である。

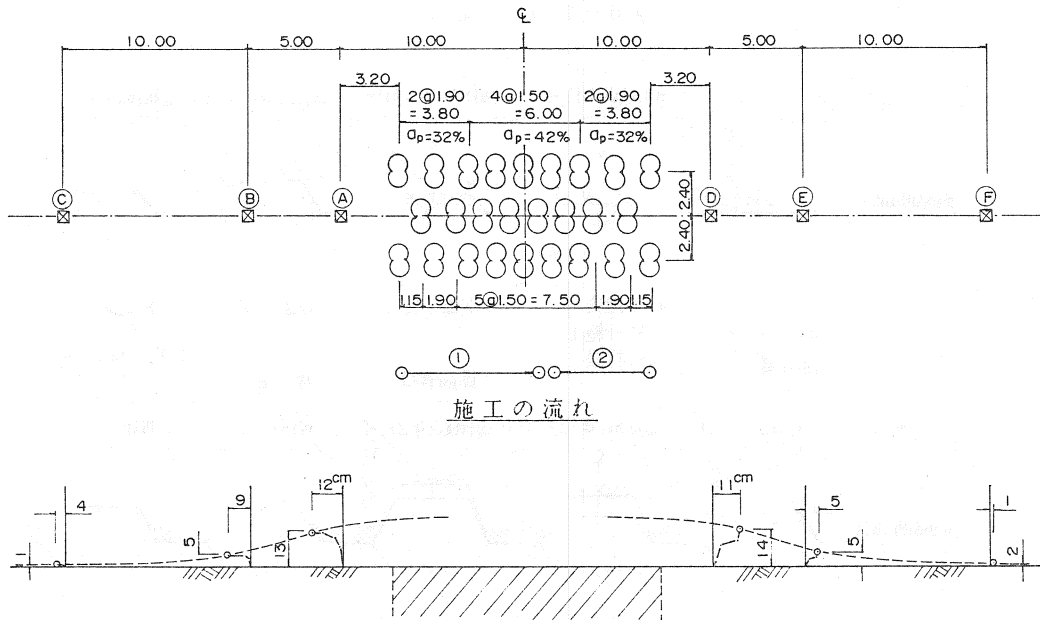


図5-3 杭の配置と変位量

5.3 カードボードドレーン+段階盛土工法

昭和58年末にドレーン打設と第1段階盛土を行い、その後沈下量観測と資料解析、地盤強度のチェックなどから次段階盛土の調整、施工時期についての検討を加え、昭和62年10月までの約4年間を圧密促進に費やした。

(1) 工事期間

当初は施工工期約3年で完了の予定であったが、沈下の遅れのためサーチャージを計画のうえ約4年の工期を要した。沈下実績から余盛土量やサーチャージ量を調整しながら実施したが、2次盛土の段階で小規模な円弧すべり破壊が発生したこともあって大幅な計画修正を余儀なくされたことも、工期の遅れの一因となっている。

(2) 地盤の強度増加

2次盛土ですべり破壊を生じたことを踏まえ、3次盛土以降の盛土高検討を行うため、不攪乱試料による一軸圧縮試験と一軸強度との相関性の良い二重管コーン試験を実施した。結果を図5-4に示す。

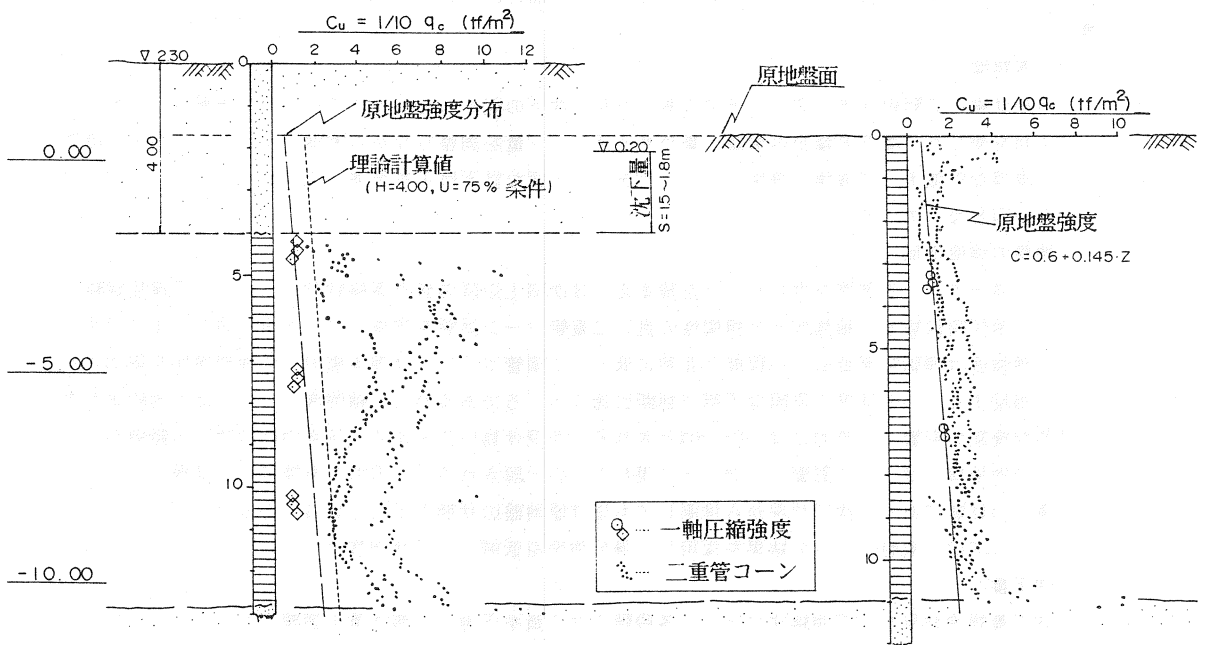
一軸強度は理論計算値の1/2程度と非常に低く、二重管コーンでは理論値以上の強度増加が認められた。相反する二つの結果の原因は不明で判断に迷うところであるが、一軸強度については人為的また機械的な攪乱の影響（一般的には20~30%とされる）を受け易いことから、圧密中($U=75\%$)の鋭敏な土である当地地盤では、この影響が予想以上に現れたものと解される。一方の二重管コーンは攪乱のない原位置での試験であり、沈下状況から推測してもほぼ原地盤の状態を示しているものと考えられる。よって、ここでは二重管コーンの結果を採用し、幾分強度を低減して設計強度とした。

(3) 沈下量

沈下量観測結果から双曲線法によって各段階の沈下量を予測し、盛土量の調整を行った。

表5-1 施工経過

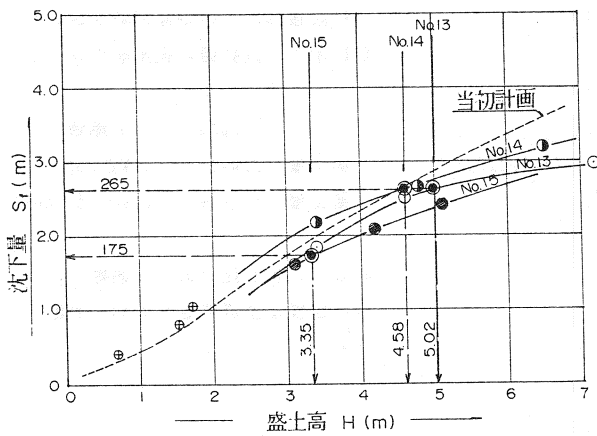
施工時期	昭和52年頃	昭和58年12月	①昭和59年1月中旬	②昭和59年3月末	③昭和60年10月
概略断面図					
記事	捨土による部分盛土	捨土撤去 サドマツ施工 トル打設	1次盛土完了 (標高管理)	2次盛土完了 (厚さ管理)	暫定盛土 (均し程度の施工)
施工時期	④昭和61年2月	⑤昭和61年12月中旬	⑥昭和62年2月中旬	⑦昭和62年10月	⑧昭和63年3月
概略断面図					
記事	3次盛土完了 (標高管理)	4次盛土完了(1) 両サド造成土 (標高管理)	4次盛土完了(2) (標高管理)	サドマツ撤去	街路完成 { 供用開始



盛土下地盤の試験結果

自然地盤での試験結果

図5-4 地盤強度



実測値による盛土高と沈下量の関係、
 図5-5から沈下量について設計値と実測値の関係をまとめると下記のように
 なり、サーチャージによって必要な沈下量
 が得られたものと判断できる。

沈下量の設計値と実測値			
測 点	No.13	No.14	No.15
修正設計値	265cm	265cm	175cm
実 測 値	266cm	280cm	207cm

図5-5 盛土高と沈下量

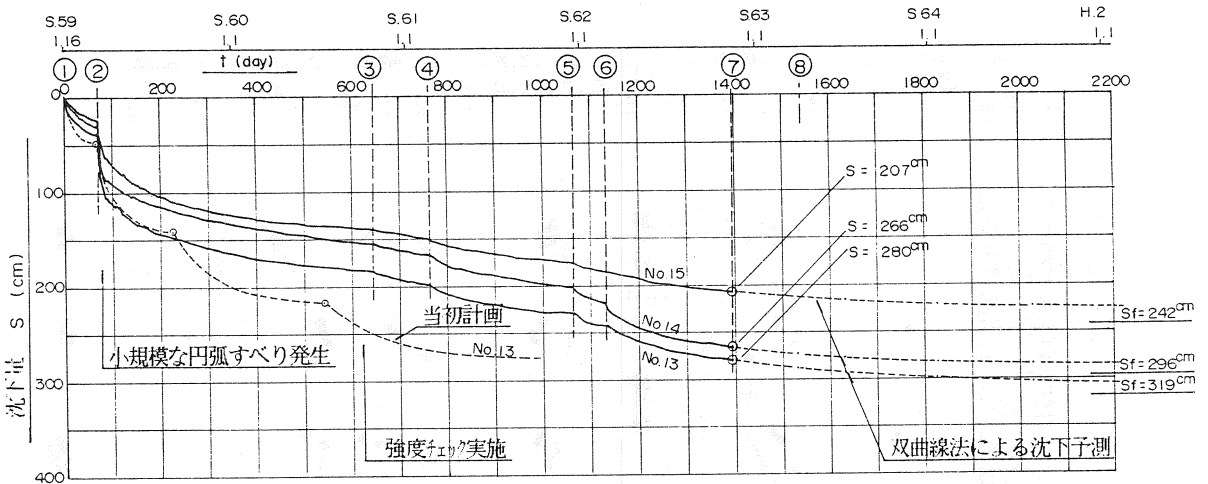
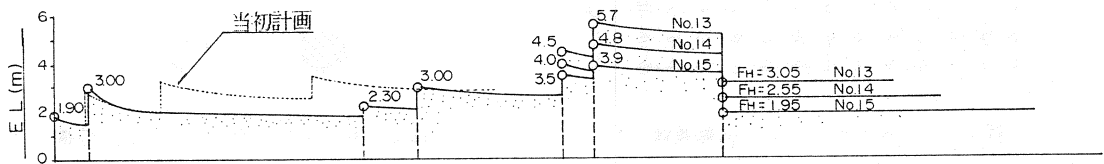


図5-6 沈下量実測図

5.4 生石灰パイル工法

Cブロックの河川周辺部については安定性の問題から3次盛土以後の施工が困難となったため、沈下対策として生石灰パイル工法を計画した。改良計画は今後の沈下量予測値を基に必要な脱水量を求め、これに見合う打設間隔とした。抑制すべき沈下量は $S=85\text{cm}$ である。

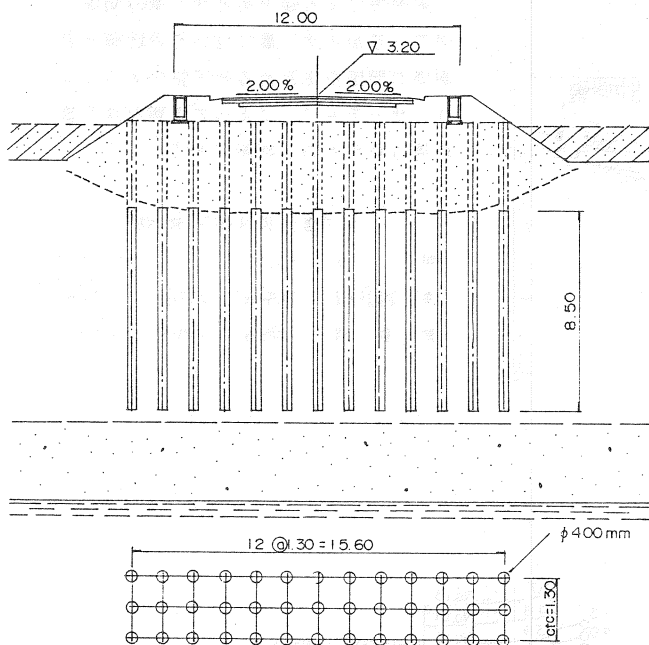


図5-7 生石灰パイル工法概要図

打設後28日での地盤定数を図5-9に示す。設計値と実測値の関係は、

	設計値	実測値
第①層	$\Delta W=12.2\%$	$\Delta W \geq 15\%$
第②層	$\Delta W=14.3\%$	$\Delta W=15 \sim 30\%$

のように含水比の低下が明瞭であり、改良目標は達成できたものと判断される。

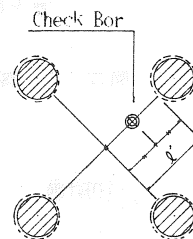


図5-8 チェックボーリングの位置

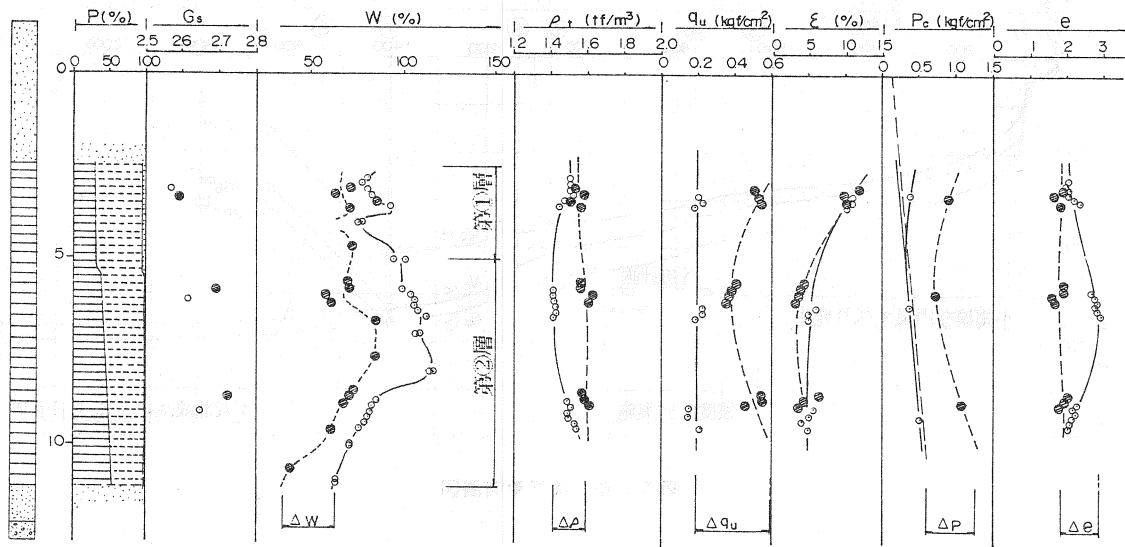


図5-9 チェックボーリング結果

施工終了後の各工法の配置を図5-10に示す。

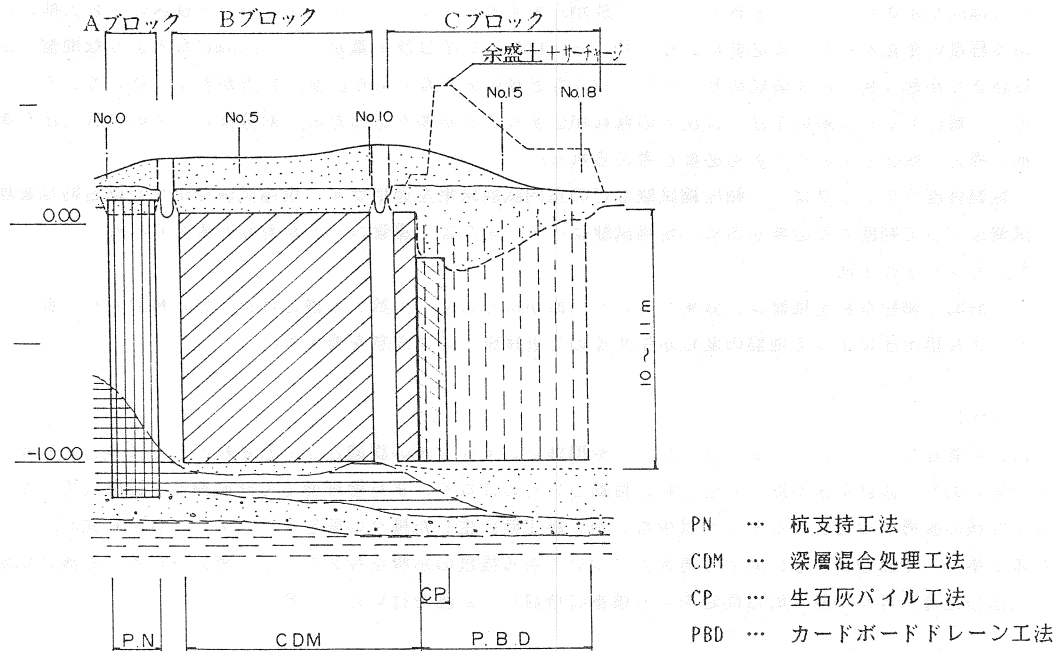


図5-10 工法の縦断方向配置

6. 考察

(1) 杭支持工法

現段階では確立された設計手法がなく工事例を基に計画施工したが、さしたる問題もなく工事を完了した。供用開始から1.5年を経過しているが沈下や変形もなく安定している。経済的にも安価であり、条件しだいで多用が期待できる工法と言えるが、地震時の問題を合わせて設計手法の確立が待たれる。

(2) 深層混合処理工法

改良率は全国的には40~50%での施工例が多いが、当地の場合は沈下の対策であり経済性から30~40%で計画した。今後はより経済的効果を高めるためジオテキスタイルとの併用で20%程度の低改良率とすることも可能と考えられる。現実には併用工法での試験施工が行われているようであり、今後の動向に注目したい。

杭造成では、対象地盤が $W_n \times W_L$ の軟弱土であり均質な攪拌混合が可能と考え $W/C=0.6$ としたが、固化材の添加量が少ないこともあって混合むらがかなり生じたのが現状であり、土質を考慮したうえで $W/C=0.8 \sim 1.0$ での施工が良いであろう。また杭強度のバラツキは土質の変化とともに施工機自体の混合精度も要因にあげられるので、入念な事前調査と施工精度の向上により均質な杭が造成されるよう努力が必要である。

地盤の変位は、当地の場合予想以上の広範囲におよび、施工端から20m付近までは要注意の結果が得られた。しかし、バカ穴を設けたり施工順序を工夫するなどの慎重な施工を行った結果、変位が抑制できた現場もあるなど、地盤条件や施工方法によって状況は異なるので計画段階での判断が重要である。

(3) カードボードドレーン

極めて細粒な軟弱粘土地盤であったため、ドレーンの目詰りと圧密による地盤の透水性の低下によって沈下の遅れが生じたものと考えられる。実績資料⁽⁴⁾によれば、施工深度が10m以上になると時間の遅れが現

れる傾向が示されており、土質やドレーン長から生ずるウェルレジスタンスについて検討のうえ工期にもある程度の余裕をもたせる必要がある。ドレーン材については沈下量が1.5～2.0mになるような地盤では目詰まりが起り易いので袋詰めサンドドレーンなど径の大きなものを計画した方が安全と言えるようである。一般にドレーン系の工法では沈下の遅れが生ずることが多々あるため、対応策としての代替工法を事前に考え、明記しておくことも必要と考えられる。

地盤強度のチェックは、一軸圧縮試験などの室内試験結果を過信せず、現場試験を併せた総合的な管理試験によって判断する必要がある。現場試験はベーンまたは二重管コーンが有効と考えられる。

(4)生石灰パイル工法

一般的に細粒な粘土地盤ほど効果を得にくい面があるので、土質との適合性を十分に検討する必要がある。また排土圧によって地盤の変位が生ずるので近接施工では注意を要する。

7. むすび

設計と管理を行った約5年間に感じたことや問題点および今後の課題として残されたものについて私見としてまとめた。設計手法や施工方法に特に目新しいものはなく、また管理面でも計測機器を設置していないので今後の参考となるようなデータは少ないが、施工時に生じた種々の問題をクリアしながら完成に至った本工事は、地盤改良工法に対する考え方についてある程度の示唆を与えたように考えられる。今後は地盤と工法の適合性ほかの基本的な問題をより慎重に検討し、計画を行いたいと思う。

[謝 辞]

本文をまとめるに際し、心よく資料を貸与され助言を頂いた松江土木建築事務所工務課福井係長並びに株式会社エイトコンサルタント松江支社地質調査部の各氏に感謝の意を表します。

[参考文献]

- (1)久楽勝行, 三木博史: 軟弱地盤上の低盛土道路の沈下挙動とその予測
第26回土質工学シンポジウム, 昭和56年度発表論文集 P23～30
- (2)奈良 章, 工藤 昇: パイルネット工法による泥炭性超軟弱地盤の改良
土木施工23巻6号(1982.5) P27～34
- (3)現場技術者のための土と基礎シリーズ「軟弱地盤対策工法」第9章 補強土工法 P311～314
- (4)岡林郁夫, 市川宣明: プラスチックを利用したバーチカルドレーン工法の設計・施工の問題点と留意点
基礎工 1988, Vol.16, No.12 P92～96