

# FEMによる近接構造物(高架地下鉄)への影響検討

大阪第二建設部 西大阪工事事務所 伊勢 勝  
阪神高速道路管理技術センター 瀬戸口 嘉明  
大阪第二建設部 西大阪工事事務所 浜田 信彦

## まえがき

近年、土質・基礎工学において有限要素法(以下FEMという)を適用する事例は多く、掘削工事が行われた場合の土留壁の変形や背面地盤の変状についても、FEMによる予測計算が数多く行われている。これは、FEMの優秀な汎用プログラムの開発と大容量の電子計算機の普及により、設計・施工における構造物およびその周辺条件を加味した複雑な挙動の解析に有限要素法を使用できるようになったことが背景にある。

ここに紹介する大阪府道高速大阪東大阪線(大阪港線)は、地下鉄中央線高架区間と並走しており、西区本田から港区田中までの区間約3.3kmは、地下鉄中央線を間に挟んで上下線分離の構造であり、それぞれ、東行き(Aライン)、西行き(Bライン)のルートよりなっている(図-1参照)。

大阪港線と地下鉄中央線相互の基礎の離れは、最小1.0m程度まで接近しており、約3.3kmにも及ぶ近接施工の連続区間と見ることができる。

施工においては、国鉄の「近接橋台・橋脚の設計施工指針(案)」に準拠し、近接施工対策として、

### ①防護工の施工

### ②地下鉄構造物などの変状計測管理

を実施したものである。

本文では、3次元FEM解析を用いて評価し、地下鉄構造物に悪影響を及ぼさないよう、適切な防護工法を選定する経緯を中心に述べる。

なお、当工区は59年8月現在、掘削工に着手しておらず、計測管理データが得られないため、その報告については、別の機会を待つこととした。

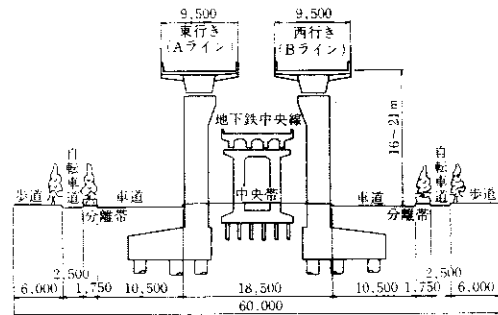


図-1 大阪港線標準断面図

## 1. 近接施工としてのアプローチ<sup>1)</sup>

### 1-1 近接施工の検討手順

近接施工の検討手順は、一般的に図-2のフローチャートで示される。本論文でも、この流れに従って検討を進めた。以下に主な検討項目を列記する。

- ①既設構造物管理者の有する近接施工指針などにより新設構造物の近接の程度を判定する(図-2①参照)。
- ②既設構造物の安全が確保できる指標として管理限界値を設定する(図-2②参照)。
- ③近接施工によって発生する既設構造物の変位の大きさをFEM解析などの方法により予測する(図-2③参照)。
- ④予測変位量が管理限界値を超える場合は、何らかの施工可能な防護工を考慮し、それを解析入力条件として定量化することにより、管理限界値内に収まるよう検討を行う(図-2④参照)。

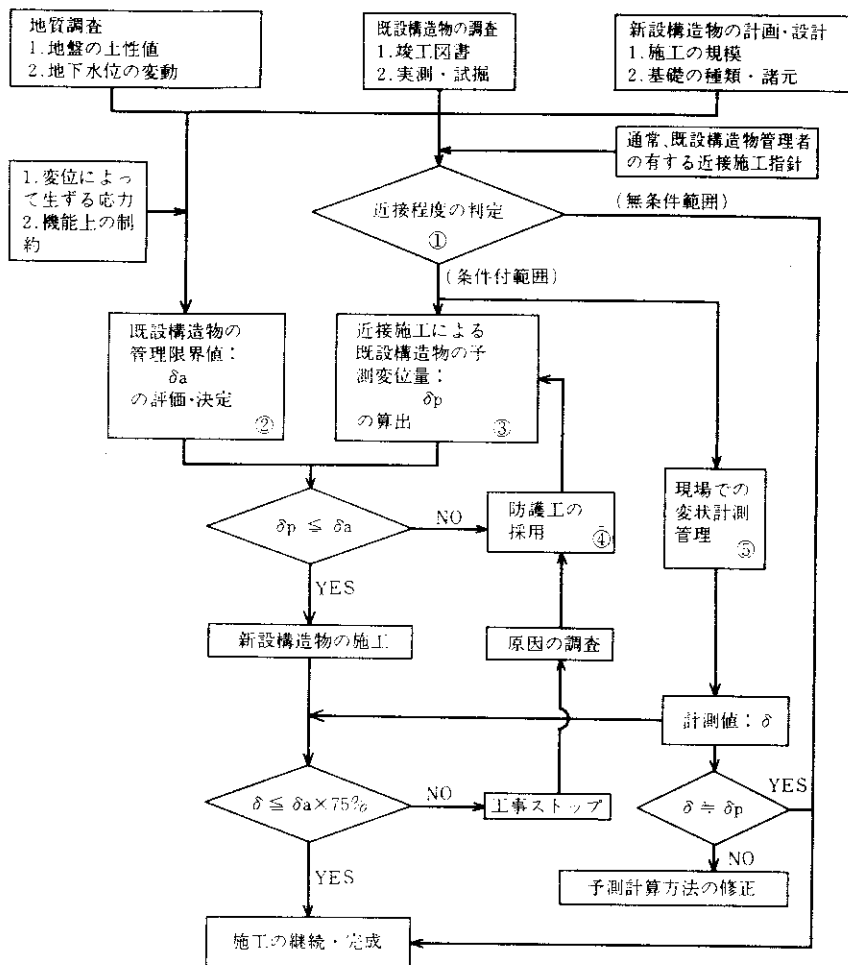


図-2 近接施工の検討手順

⑤既存構造物などに計器をセットし、変状計測値と管理限界値を照査しながら施工を進める（図-2⑤参照）。

### 1-2 近接施工の指針

ここでは、前節①に基づいて、公団構造物の地下鉄構造物への近接程度を、近接施工の指針として最もよく知られている国鉄の「近接橋台・橋脚の設計施工指針（案）」により判定する。表-1に近接程度を決めるファクター、表-2に近接程

度の区分を示す。これらは、公団構造物基礎がベント杭であることから、指針（案）の「新設構造物の基礎工法が場所打ち杭の場合」を適用した。この指針を、今回のFEM解析の対象とする橋脚（P-27）に適用すると、図-3ようになる。これによれば、掘削工は「要注意範囲」の一部入ることになり、表-2の定義に従って、施工時には変状観測などの注意を要し、必要に応じ防護工などの対策を考慮しなければならないことになる。

表一 近接程度を決めるファクター

記号	単位	意味	数値のとりかた
$D_{f1}$	m	既設構造物の根入れ深さ	基礎形式により区別し、先端支持杭の場合は、杭先端の根入れ深さの $\frac{3}{4}$ 。
$B_1$	m	既設構造物の基礎幅	長方形断面の場合は向きの如何にかかわらず、短辺長とするのを標準とする。
$D_{f2}$	m	新設構造物の根入れ深さ	
$b_2$	m	新設構造物の基礎幅	杭径
$B_0$	m	既設構造物と新設構造物の基礎間隙	
$\alpha$	度	土の内部摩擦角	N値からの計算式がある。 peck: $\alpha = 0.3N + 27$ など
C	$t/m$	土の粘着力	

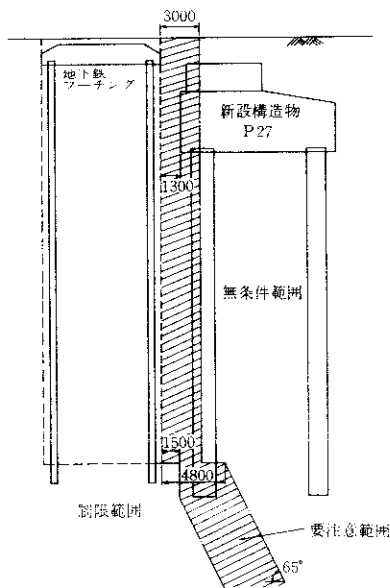
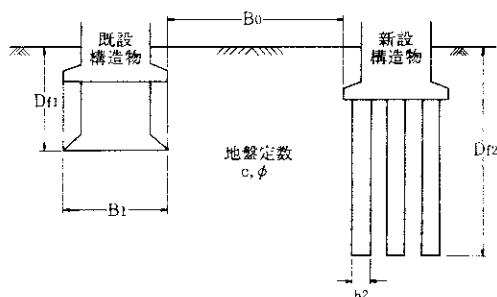


図-3 P 27 についての近接程度の判定

表-2 近接程度の判定

区分	定義	判 定 式		図 示
		条 件	式	
I	無条件範囲 新設基礎がこの範囲に入る場合は設計・施工に特別の考慮を一般的には要しない。	1) または2)を満足する範囲 (1) $B_0 > 2b_2$ かつ $D_{f2} < D_{f1}$ (2) $B_0 > (D_{f2} - D_{f1}) \tan(45^\circ - \frac{\alpha}{2}) - B_1$ かつ $D_{f2} > D_{f1}$		
II	要注意範囲 新設基礎がこの範囲に入る場合は設計に特別の考慮は要しないが、施工時には既設構造物の変状観測などの注意を要し、必要に応じ防塵工などの対策を考慮する。	1	■ どちらの条件にも該当しない範囲	
III	制限範囲 新設基礎がこの範囲に入る場合は設計・施工とも特別の考慮を要し何らかの防塵工を当初より計画する。	$D_{f2} \geq D_{f1}$ で次の3)または4)を満足する範囲 3) $B_0 < 2b_2$ (or $b_2$ or $3b_2$ ) 4) $B_0 < (D_{f2} - D_{f1}) \tan(45^\circ - \frac{\alpha}{2}) - \frac{2C}{\gamma} \cdot \tan(45^\circ - \frac{\alpha}{2})$		

### 1-3 既設構造物の管理限界値の決定

ここでは1-1の項目②の管理限界値の設定について述べるが、基本的な考え方として

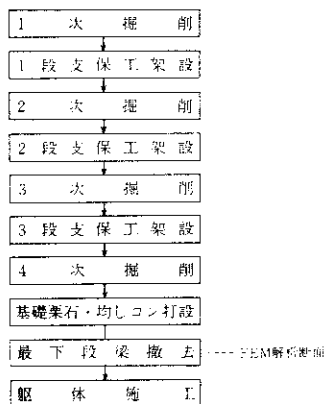
- ①地下鉄構造物の変位は地震時における杭頭の変位以内であること。
- ②地下鉄の列車走行に支障のないこと。
- ③地下鉄構造物の健全度に支障をきたさないこと。

の3点が挙げられる。この基本条件に従い、構造物の強度上から決まる変位量と、列車走行の機能性から決まる変位量を検討し、構造物健全度の低下を差し引いて、表-3の管理限界値を決定した。

表-3 地下鉄構造物の管理限界値など

対象	位置	項目	管理限界値	備考
地下鉄構造物	構造物中心	沈下	8 mm	現場での変状計測管理における指標
		傾斜	3 分	"
		水平変位	8 mm	"
周辺地盤	地下鉄フーチング中心下面	水平変位	10 mm	今回のFEM解析による対策工法の選定基準値

：地下鉄構造物基礎は、400のRC杭により支持され、地震時における杭頭変位量より、その管理限界値8mmを定めている。また掘削工事に伴い土留壁に変形が起こり、背面地盤および周辺地盤の変位により構造物そのものが変位することになり、したがってここでは構造物中心付近における周辺地盤をFEM解析の対象と考え、その規制値を10mmとした。



## 2. FEM解析による検討

### 2-1 概要

大阪港線の弁天工区下部工において、掘削工事による地下鉄構造物周辺地盤への影響を知るため、掘削に伴う土留壁の変位、地下鉄構造物周辺地盤の変位および支保工の応力を3次元FEMによる解析を用い、防護工別に検討した。防護工の選定は、表-3により地下鉄フーチング中心下面の地盤水平変位が、10mmに収まるよう決定するものとする。

### 2-2 検討対象橋脚の諸元と施工概要

計算の対象橋脚として、当工区で掘削深さ最大（掘削深さ：D=7.6m）のP27を選定した。P27の施工概要を図-4に、その一般構造図を図-5に示す。

### 2-3 防護工

今回の解析においては、先行工区の実績を踏まえると、少なくとも次の3種類の防護工を考慮する必要がある。

- ①切梁プレロード工法
- ②オーガー孔セメントミルク注入（地下鉄側矢板）
- ③鋼矢板頭部溶接（地下鉄側矢板）

しかし、この3工法によっても、10mmの選定基準値が満足されない場合、さらに防護工として、

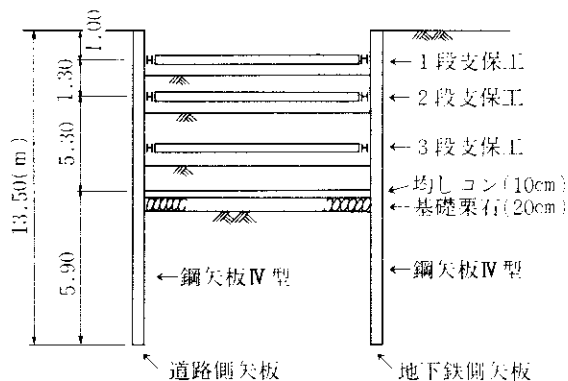


図-4 施工概要

④注入などによる地盤改良(地下鉄側矢板背面)を考えている。

これらの防護工の概略図を図-6に示す。

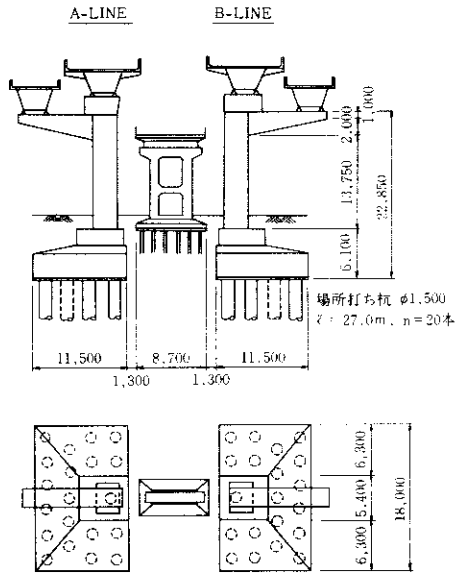


図-5 P27 一般構造図

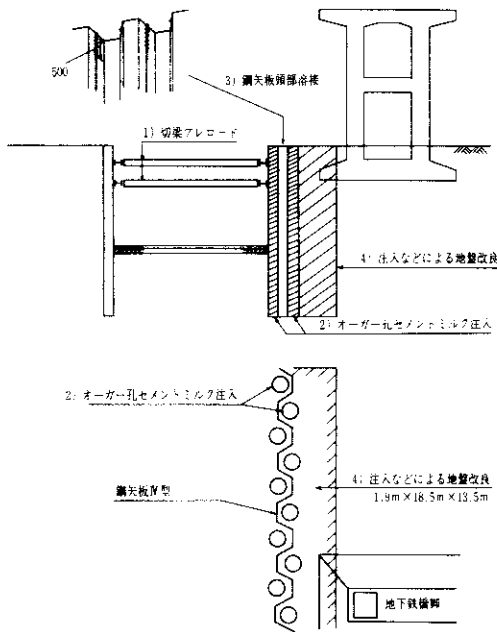


図-6 防護工の概略図

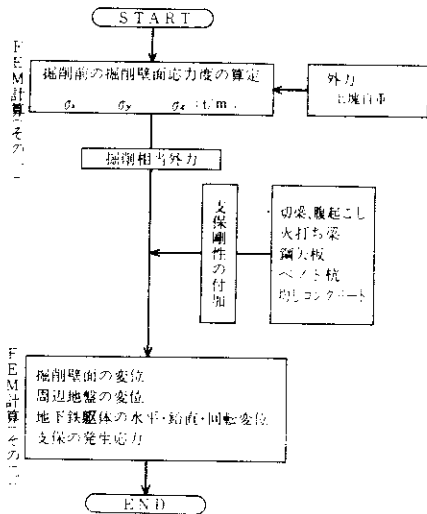


図-7 3次元FEMの計算フロー

## 2-4 3次元FEM計算

図-7の3次元FEMの計算フローに従い、土留壁の変位、地下鉄構造物周辺地盤の変位および支保工(切梁・腹起こし・火打ち・鋼矢板)の発生応力を算出する。解析断面は、既設構造物(地下鉄構造物)に最も悪影響を与える計算断面として、掘削後、均しコンクリートが所要の強度に達し、3段梁撤去時の断面を用いる。本計算は、均しコンクリートによる支保剛性を付加し、3段梁を撤去した時の断面で、外力として掘削相当外力を土留壁と掘削敷に作用させることにより求めるものである。ここでいう掘削相当外力とは、掘削前に掘削壁面が受けていた内部応力の負値である。

計算ケースを表-4に、要素分割図を図-8に示す。

表-4 3次元FEMの計算ケース

計算ケース	防護工の種類			備考
	切梁 プレロード	オウガー孔 セメントミルク	鋼矢板 頭部溶接	
ケース-1		○		
ケース-2		○		○
ケース-3		○		ベノト杭の剛性を除去

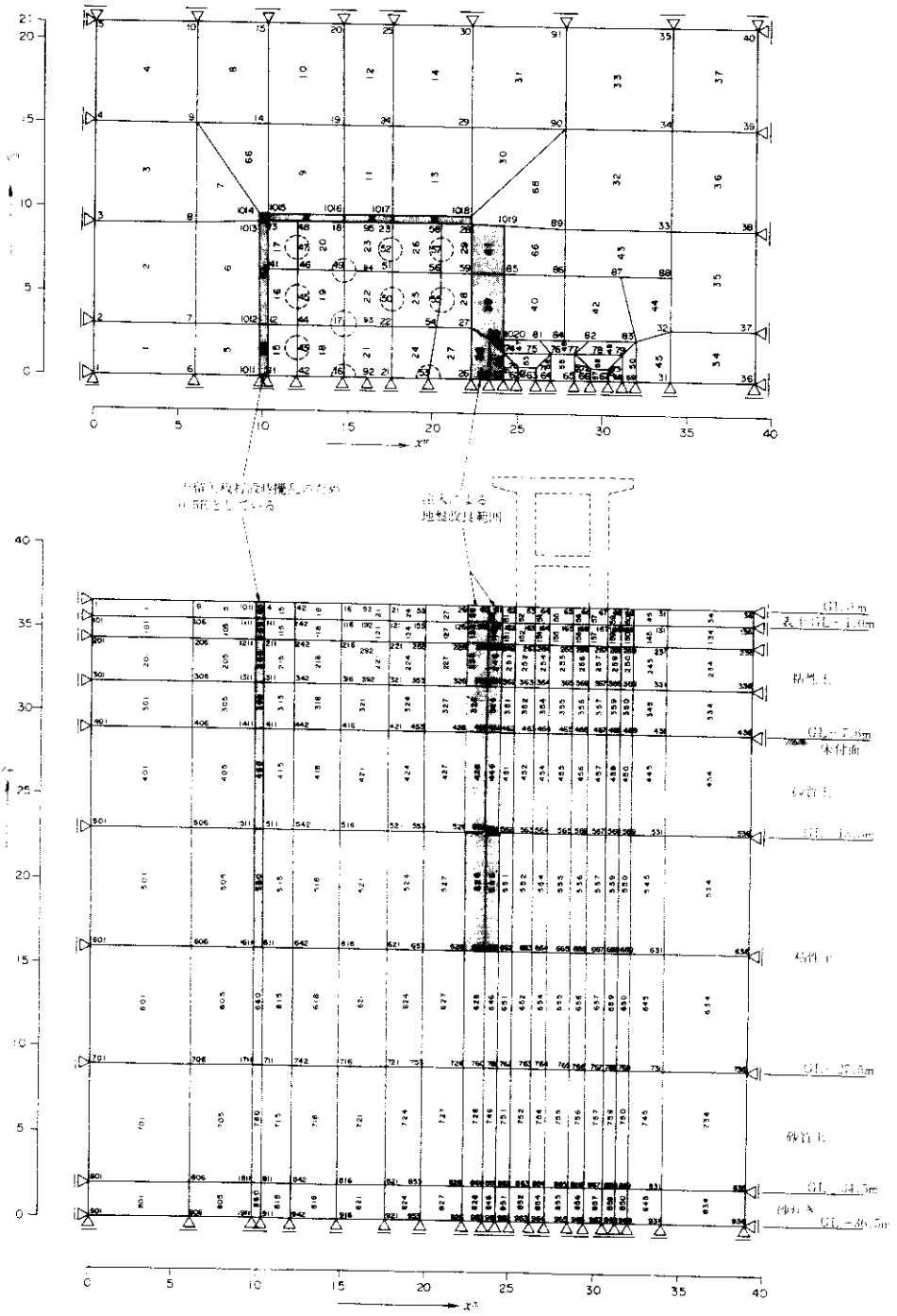


图-8 要素分割图 (要素番号と节点番号)

## 2-5 解析入力条件

FEMにおいては、入力条件の差が解析結果に与える影響は大きく、特に土質、施工、使用部材に関する情報については慎重な設定が必要である。

ここでは、土質条件、支保条件および荷重条件に分けて、入力条件は下記のように定めた。

### (1) 土質条件

P27付近の地盤状況を図-9に示す。支持層は天満砂礫層で不整合面を成し、層厚も4~7mと変化に富んでいる。

地盤の弾性係数  $E_s$  は、土木学会編「現場技術者のための仮設構造物の計画と施工」における  $E_s$  とN値の相関式によった。

ポアソン比  $\nu$  は、排水性のよい砂質土で0.33、排水性の悪いシルトで0.45とした。

また、注入後の地盤のN値は柴崎ら<sup>2)</sup>による下式によった。

$$\bar{N}' = 7\sqrt{\bar{N}}$$

ここに、

$\bar{N}$  ; 注入前のN値

$\bar{N}'$  ; 注入後のN値

上式により、注入後の地盤N値を推定し、そのN値より地盤改良後の地盤の弾性係数を評価する。

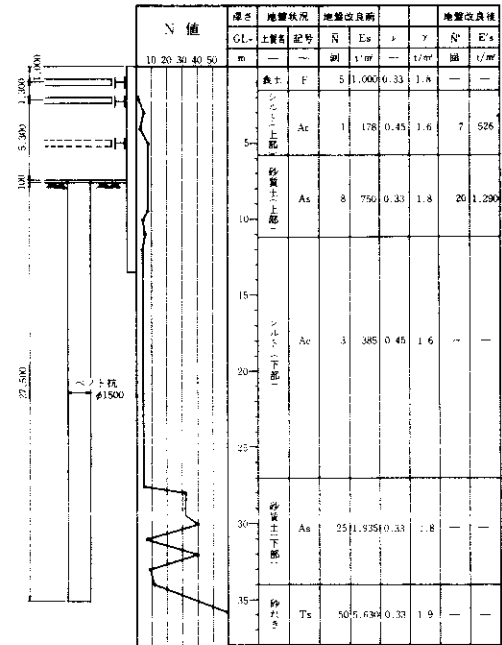


図-9 土質条件

### (2) 支保工条件

表-5に支保工条件の一覧表を示す。

表-5 支保工条件

	部材寸法	断面値			取り扱い方	支保構築図
		A (m <sup>2</sup> )	E (t/m <sup>2</sup> )	断面2次モーメント (m <sup>4</sup> )		
覆工1段	H-350×350×12×19	1.48×10 <sup>-2</sup>	2.1×10 <sup>7</sup>	3.43×10 <sup>-4</sup>	1.16×10 <sup>-4</sup>	
" 2段	H-400×400×13×21	1.86×10 <sup>-2</sup>	"	5.66×10 <sup>-4</sup>	1.90×10 <sup>-4</sup>	
切梁1段	H-300×300×10×15	1.02×10 <sup>-2</sup>	"	1.73×10 <sup>-4</sup>	0.57×10 <sup>-4</sup>	
" 2段	"	"	"	"	"	
火打ち1段	H-350×350×12×19	1.48×10 <sup>-2</sup>	"	3.43×10 <sup>-4</sup>	1.16×10 <sup>-4</sup>	
" 2段	H-400×400×13×21	1.86×10 <sup>-2</sup>	"	5.66×10 <sup>-4</sup>	1.90×10 <sup>-4</sup>	
鋼矢板 (H型)	W = 400 mm h = 155 mm t = 15.5 mm l = 13.5 m	9.74×10 <sup>-5</sup>	"	3.19×10 <sup>-4</sup>	縦手の影響および鋼矢板の縦横の剛性の相違を考慮し単体として取り扱う。FEMでは板要素として取り扱うためIを板厚tに換算する。ν=0.3	
ベント杭の剛性	≒ 1.5 m × 27.5 m	1.77	27×10 <sup>6</sup>	0.249	但し、対称軸上のベント杭のI、Aは、1/2とした。	
均しコンクリートの剛性	厚さ : 10 cm	"	"	"	板要素として取り扱う。t=0.1 m ν=0.167	

(3) 荷重条件

荷重としては、図-10に示すような掘削相当外力を掘削壁面と掘削敷に作用させる。

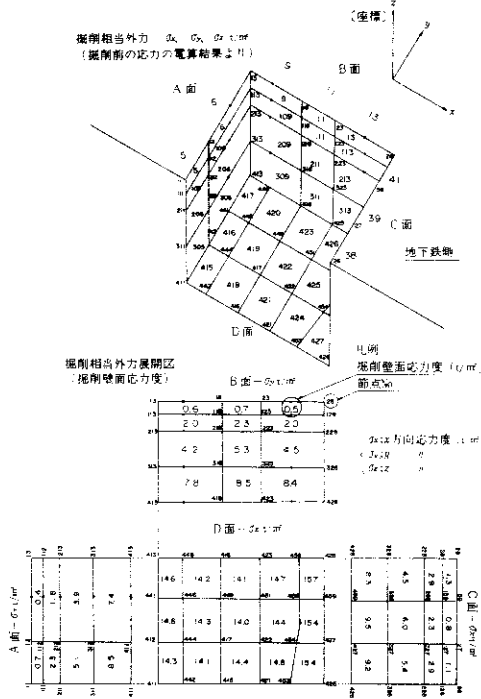


図-10 荷重条件（掘削相当外力）

2-6 解析結果

3次元FEM解析によって得られた橋脚P27の防護工法別（ケース1～ケース3）の地盤変位および支保工応力度を表-6に示す。また、図-11に地盤水平変位図を示す。数値は各節点の地盤の水平変位量（掘削側への移動を⊕、逆方向への移動を⊖とする）を示す。図-12に、GL-2.3m（地下鉄フーチング下面）とGL-4.8m（第3段支保工位置）における掘削壁面からの距離  $x(m)$  と地盤の水平変位量  $y(mm)$  の関係を示す。参考として、表-6に両者の相関関係式を示した。

解析結果によれば、地下鉄フーチング底面中心の地盤変位を選定基準値10mmに抑えるためには、切梁プレロード工法、オーガー孔セメントミルク注入、鋼矢板頭部溶接に併せて注入などによる地盤改良の4種の防護工が必要となる（ケース2）。

3. 考察および今後の課題

近接施工の検討手順に基づいて、橋脚P27の掘削工事における防護工を検討したが、考察および今後の課題として下記事項が挙げられる。

- ①注入などによる地盤改良が地盤水平変位の減少に及ぼす効果は大きく、矢板背面から離れるほど、地表面に近いほど、その傾向は大きい（図-13参照）。

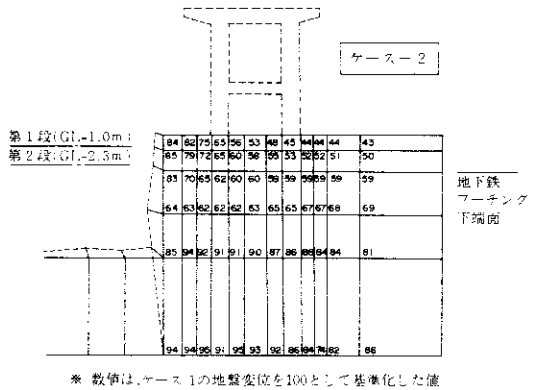


図-13 注入などによる地盤改良効果の伝播

- ②P27橋脚ベント杭の剛性を考慮するかしないかによって地盤変位は、10%前後の違いがあることが計算された。
- ③P27の解析結果をもとに、他の類似掘削工事における地盤変位量を推定する場合、どのようなパラメータを選定して評価するのが妥当かについては、今後の課題である。
- ④今回の解析は、3次元解析であり、たとえば掘削相当外力など橋軸方向の要因も入力でき、空間的には実状に近似するようにしたが、一般に掘削工法では、掘削の進行に伴って矢板の変形は蓄積されるものであり、支保工を架設するタイミング、すなわち施工段階を考慮した逐次解析の展開が望まれる。
- ⑤今後、“現場計測工法”<sup>3)</sup>（Terzaghi 称する Observational Method）により、掘削中の計測も実施するが、本解析の結果と実態との比較検討により、予測方法の修正・改善を検討する必要があると考えている。





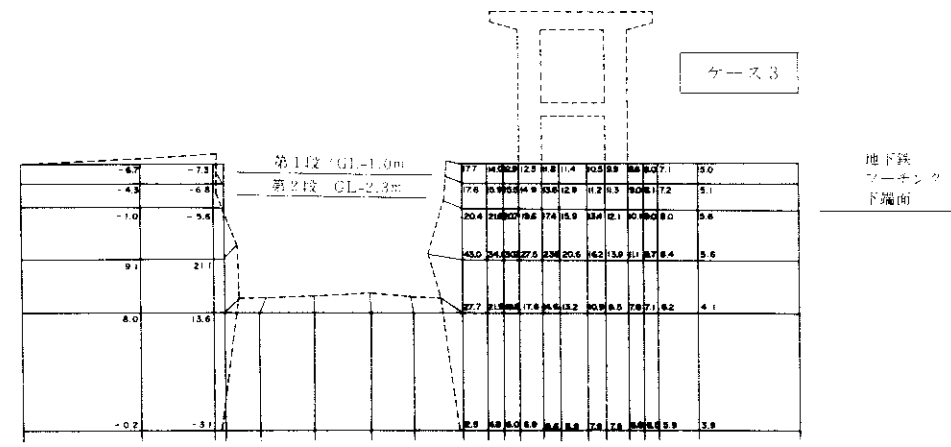
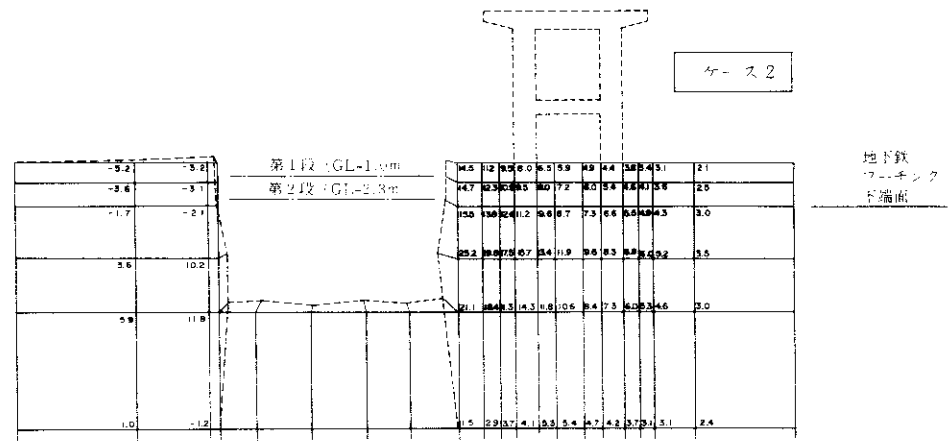
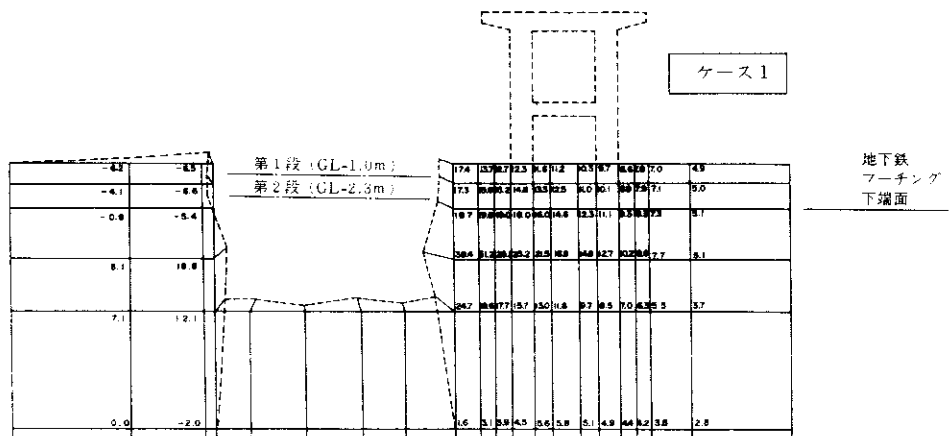


図-11 地盤水平変位図

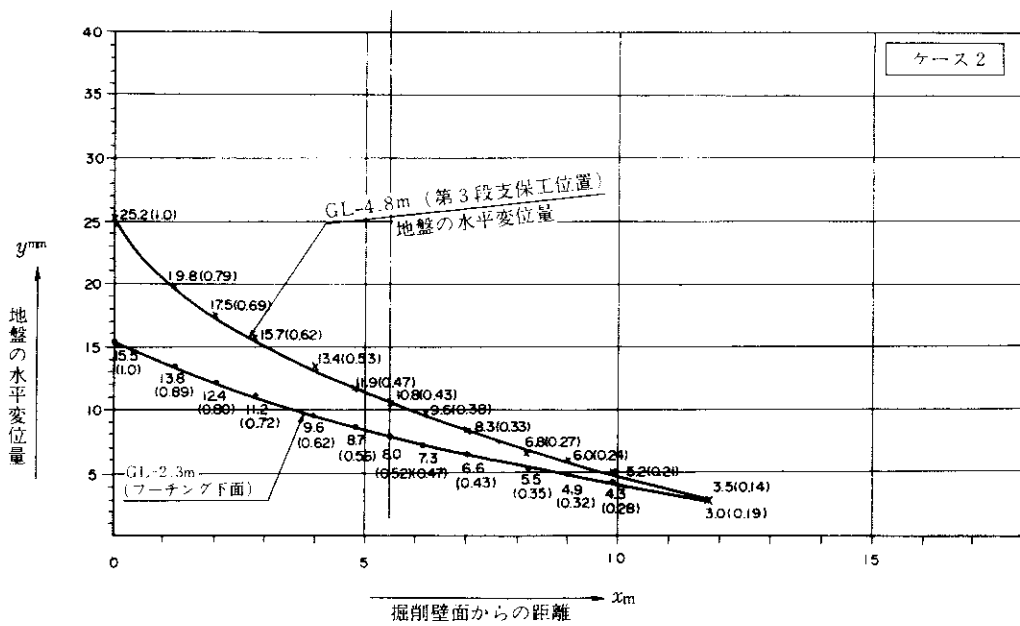
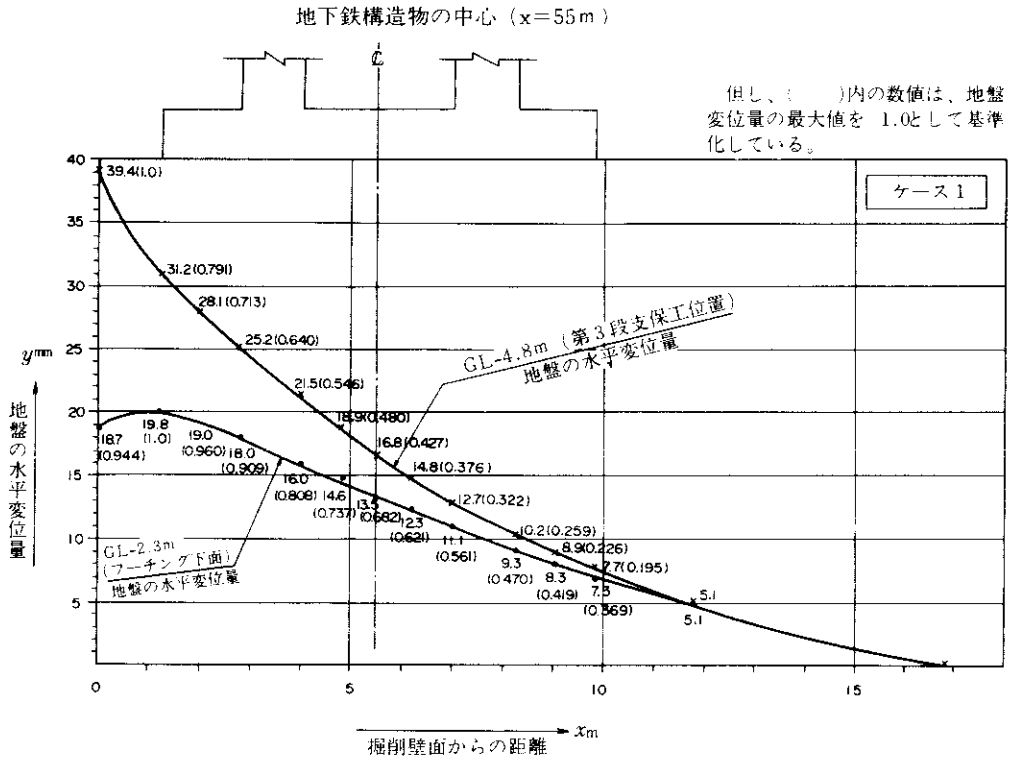


図-12 掘削壁面からの距離と地盤の水平変位量の関係

## あとがき

本来、近接施工の検討においては、施工前の変状予測と施工中の変状計測結果を対比してこそ、今後の展開に貴重な情報が得られる。本文では、前者の検討に終始したが、今後、現場での変状計測データを蓄積し、今回の成果と比較検討して、相互の関連を図りたいと考えている。

末尾になりましたが、本解析の検討に熱意を傾けていただいた当工区関係各位に深く感謝の意を

表します。

## 参考文献

- 1) 萩原他；現場技術者のための土木近接施工工事の設計と施工、昭和56年4月
- 2) 柴崎他；薬液注入工法の設計と施工、昭和52年7月
- 3) 柴田；建設技術者のための現場計測工法、昭和54年6月