

FEMによる近接構造物(高架地下鉄)への 影響検討(その2)

大阪第二建設部 西大阪工事事務所 岸 谷 敏 正
同 部 同 所 榎 元 清 治
大阪第三建設部 設 計 課 浜 田 信 彦

要 約

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の両側を並走する上下線分離の構造で、特に掘削工事等下部工事の段階においては、地下鉄構造物に対する慎重な近接施工の検討が必要となる。

本論文では、近接施工の検討手順(「技報」第4号参照)に従い、掘削工事が地下鉄構造物に与える影響の予測評価として、有限要素法(FEM)を用い、矢板、周辺地盤等の変位を算出した。一方、下部工事の施工に伴う現場での変状計測管理として、電気的計測を行い、上記の予測値に対応する実測値を得た。

本論文の目的は、上記の予測値と実測値を比較検討することにより、FEM理論解析の有効性を判定し、今後の近接施工における事前予測手法を提案するものである。その1つとして、FEM平面(2次元)弾性逐次解析において、施工ステップをとばした簡易法は、地下鉄フーチング深さ近傍の変位予測においてよく一致すること、また、3次元FEMに比べ、側面矢板の剛性が考慮できない分だけ安全側の予測ができることから、比較的有効な事前予測手法であることが認められた。

まえがき

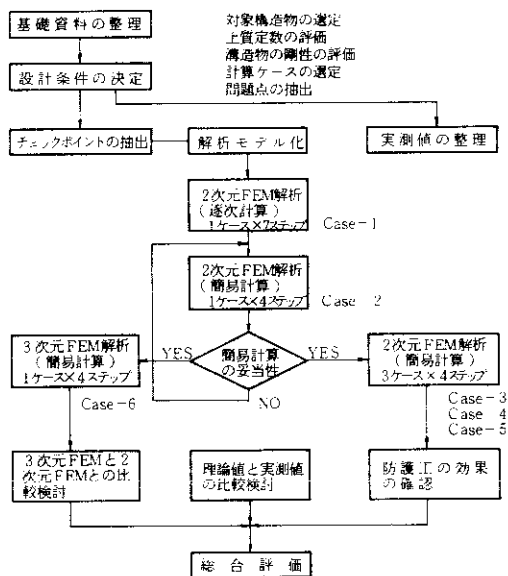
「技報」第4号で、3次元有限要素法(FEM)を用いた近接施工の影響検討について述べたが、本来、このような施工前の予測値は、施工中の変状計測結果と対比することによって、今後の類型施工の指針になると考えられる。今回、基礎工事段階の変状計測(電気的計測)結果が得られたので、その報告を行うとともに、両者(予測値と実測値)を比較することにより、予測手法の確立を図るものである。

なお、「技報」第4号で対象とした橋脚(P27)

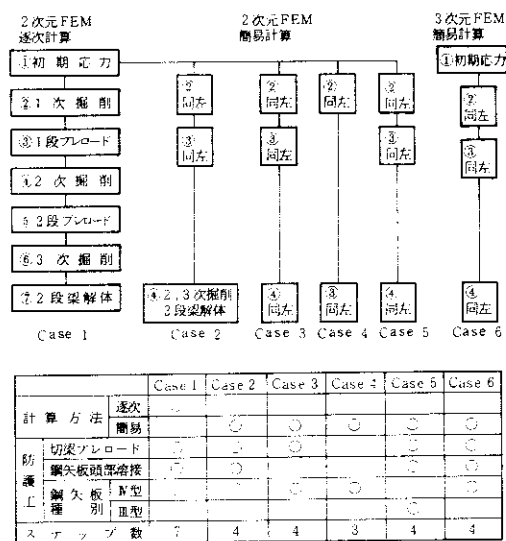
は、協議により電気計測対象橋脚に選定されなかったため、FEMによる予測と電気計測の両方を行った橋脚(AP33)について、述べるものとする。対象脚AP33は、大阪港線の中で地下鉄との近接度が最も高く、かつ標準的な構造形式を有するものである。

AP33に対する予測方法として、下記の3種類のFEMを用いたので、それぞれの概要を述べると共に、相互の関連にも言及した。

- 1) 2次元FEM逐次計算(7ステップ)
- 2) 2次元FEM簡易計算(4ステップ)
- 3) 3次元FEM簡易計算(4ステップ)



図一 1 検討作業のフロー



図一 2 FEMの検討ケース

1. 影響予測の検討

1-1 検討作業のフローとFEMの検討ケース

図一 1 に示すフローに従い検討を進めた。今回影響予測の方法として、3種類のFEMを用いた。第1は、掘削（3段階）、切梁プレロード（2段階）のすべての施工段階を考慮した2次元FEM逐次計算（Case 1）である。第2は、Case 1の施工段階のうち主要なものを4ステップ選び出した簡略法で2次元FEM簡易計算（Case 2）である。この際、Case 1とCase 2の比較により、ステップの簡易化の妥当性を確認した。第3は、Case 2と同一のステップを用いた簡易計算で、立体モデルを想定したもので、3次元FEM簡易計算（Case 6）である。このCase 6は、「技報」第4号で用いた3次元FEMに施工段階を考慮した逐次計算である。

今回、矢板には全応力に近似した応力を作用させた。これは矢板背面の地盤変位、特に水平変位を解析する場合、矢板の変形に大きく影響を受けるため、その矢板変位が土圧+水圧の全応力によって決まるからである。また、現在のFEMにおいて地下水による水圧をモデル化することは、

非常に煩雑であり正確な評価が難しいこと、本検討モデルの地下水位～床掘面の地層が粘性土で有効応力と全応力にはほとんど差がないことが背景にある。

前述の3種類のFEMを相互に比較した後、実際の施工で得られた電気的計測結果との照合を行った。また、Case 2のFEM簡易計算法により、本工事で用いたプレロード、矢板頭部溶接等の防護工の効果を確認した（Case 3～Case 5）。

FEMの検討ケースの一覧を図一 2 に示す。

また、逐次計算、簡易計算のFEM計算フローをそれぞれ、図一 3、図一 4 に示す。初期応力状態を求める時の地下鉄構造物の自重・剛性の与え方、逐次計算を簡易化するためのステップの選定、3次元メッシュの切り方等がFEM計算を進める前に考慮した点である。

1-2 対象構造物の概要

対象構造物はAP33（弁天第2工区）とし、構造一般図を図一 5 に示す。また、土質条件・支保工条件等は、「技報」第4号に詳細に記述している。

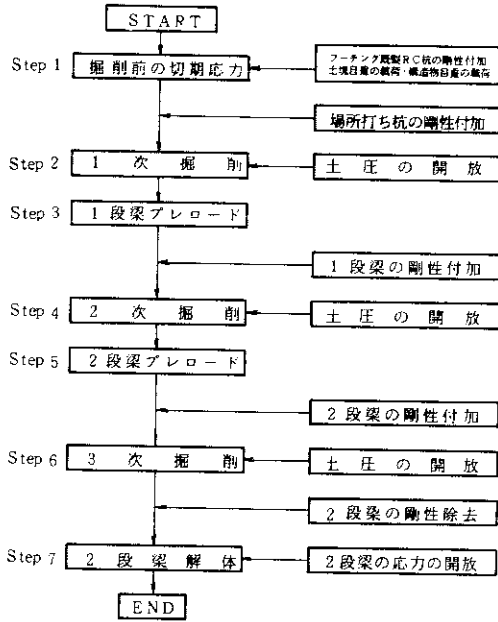


図-3 逐次計算の計算フロー (Case 1)

高速東行き (Aライン) 高速西行き (Bライン)

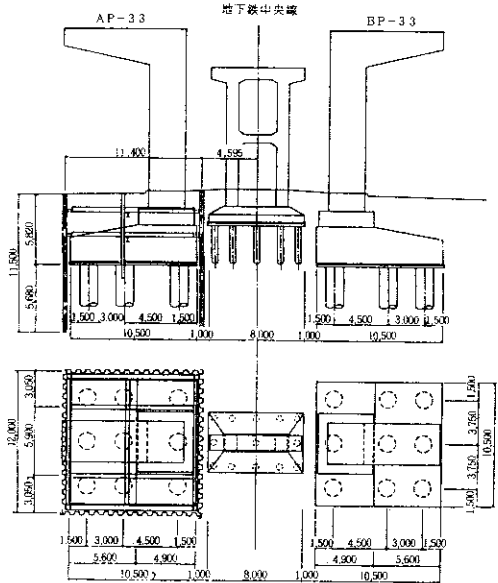
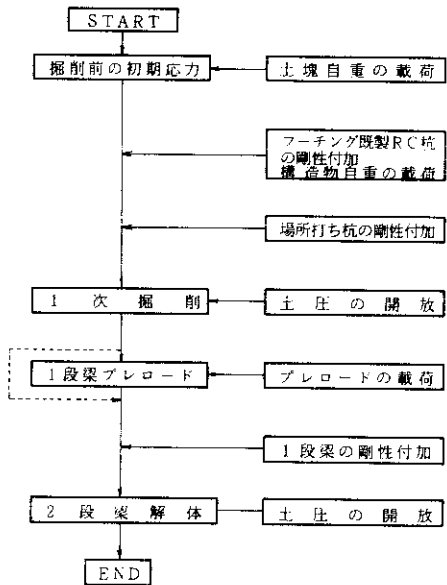


図-5 構造一般図



注)は切梁プレロード工法を採用しない場合 (Case 4) の流れを示す。

図-4 簡易計算の計算フロー (Case 2~6)

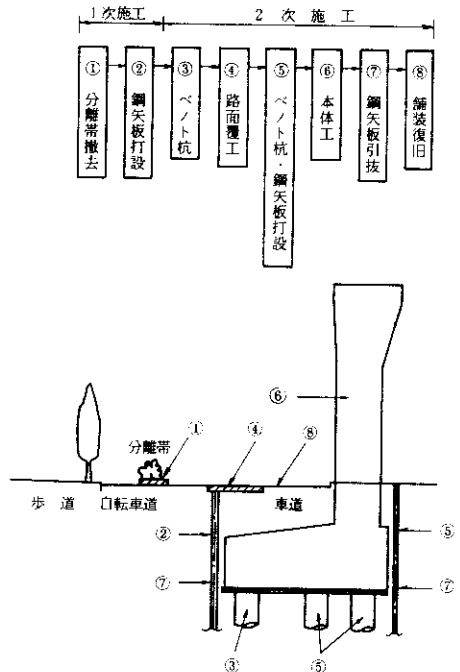


図-6 対象構造物の施工方法

1-3 対象構造物の施工方法

図-6 に下部工事全体の施工順序を示す。

- (1) 場所打ち杭はオールケーシング工法（ベント工法）にて施工する（図中③、⑤）。杭径は $\phi 1,500$ mmである。また、平面街路の車線確保の関係から2分割施工とした。
- (2) 鋼矢板打設も2分割施工（②、⑤）とし、地下鉄側の矢板（2次施工分）は、打設部分の土質劣化を極力防ぐため、また地下鉄高欄により施工空間が限られているため、コンパクトで継打ちの可能なサイレント・パイラーを使用する。サイレント・パイラーの特徴を以下に示す。
 - 1) 静荷重圧入による無振動・無騒音の全油圧式圧入引抜機である。
 - 2) 圧入した鋼矢板上を自走して施工できる。
 - 3) 機械の全長が小さく、狭い場所でも使える。
 - 4) 矢板の乗直度調整が容易なため、打設精度が高い。
- (3) ベント杭・鋼矢板の打設の完了した部分より掘削・山留・路面覆工を行う（④）。掘削は3回に分けて行う。1次掘削、2次掘削共、切梁より50cm下まで、3次掘削は床付面までとし、山留支保工を架設しながら、バックホー、クラムシエルで掘削する。切梁ジャッキは、すべて

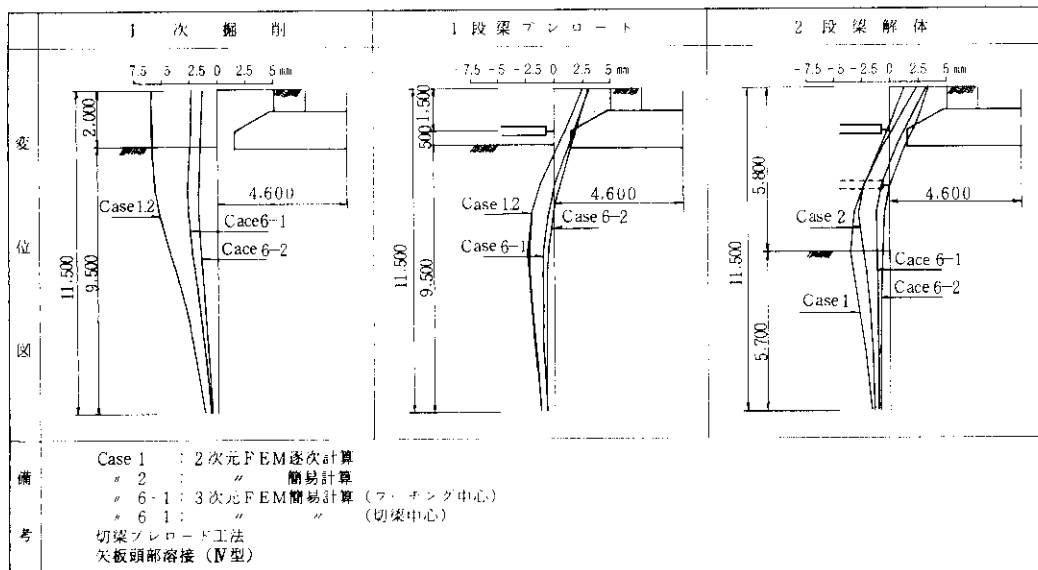
プレロード・ジャッキを使用し、土圧計を設置して1日2回（8:00, 14:00）測定し、土圧状態を管理する。ジャッキ設置時のプレロード値は、設計反力の70%を目安に、20 ton / 5 min. で軸力を導入するが、周囲構造物に異状が予想される場合あるいは既設ジャッキの反力が低下した場合はそれ以下でもプレロードを停止する。

- (4) 基礎栗石（20cm）、均しコン（10cm）を施工し杭頭はつり後、フーチングを施工する（⑥）。
- (5) フーチングの打設・養生が完了したところから逐次良質砂で埋戻しを行う。1次埋戻しはフーチング天端までとし、水締めにより締固める橋脚の柱1層を打上った後、覆工撤去・2次埋戻し・鋼矢板引抜きを行う（⑦）。鋼矢板は地下鉄側1面を埋殺し、他の3面はポーズで引抜く。なお、地下埋設物の近接部分はセメントミルクで抜跡注入を行う。

1-4 FEMの結果と考察

- (1) 2次元FEM逐次計算と簡易計算の比較
 逐次計算では初期応力から2段梁解体までを合計7ステップに分けて解析を行い、簡易計算では地下鉄フーチング変位等に大きな影響を与える施

表-1 矢板変位解析値の比較



表一 2 逐次計算と簡易計算の比較

(1) 変位 符号 ⊖ 掘削側 ⊕ 地下鉄側 (単位: mm)

項	目	1次掘削	1段梁プレロード	2段梁解体
矢板変位 (頭部)	逐次計算	-5.9	2.5	1.2
	簡易計算	-5.9	2.5	2.2
フーチング 水平変位	逐次計算	-5.15	0.47	-0.56
	簡易計算	-5.09	0.53	-0.15

(2) 反力

項	目	1次掘削	1段梁プレロード	2段梁解体
1段切梁(t)	逐次計算	-	30	33.2
	簡易計算	-	30	48.9
均しコンクリート (t/m)	逐次計算	-	-	1.5
	簡易計算	-	-	6.8

工段階である1次掘削、1段梁プレロード及び2段梁解体に着目し合計4ステップで解析を行った。

表一 1中のCase 1とCase 2が本項の比較対象である。逐次計算結果より、1次掘削の段階で矢板・フーチング変位が最大になっており、矢板頭部で-5.9mm、フーチング中心で-5.15mmである(表一 2参照)。1段梁プレロードの段階では各変位は掘削前の状態へほぼ戻っている。このあと、2次掘削等の施工が続くが、各変位は1mm程度の微小変位を生じているに過ぎない。

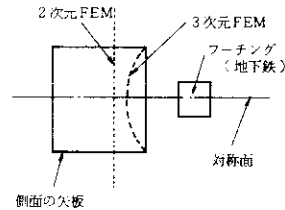
逐次計算を簡易化する目的で行った簡易計算はフーチング付近の変位(矢板を含む)で比較よく一致しており、今後の解析において十分な成果が得られると考えられる。

一方、支保工応力は、2段梁解体の段階で逐次計算と大差があるが、これは簡易計算では2段梁プレロードのステップを省略しているため、1段梁と2段梁の応力分担が正確に計算されなかったことに起因すると考えられる。しかし、支保工応力については別の検討(設計)方法で算出することができるので、簡易計算での支保工応力は参考値程度に考えたい。

(2) 2次元FEMと3次元FEMの比較

2次元FEM簡易計算と3次元FEM簡易計算の比較検討を行い、2次元FEMの有効性の判定を行う(表一 1中、Case 1とCase 6-1参照)。

1次掘削において、3次元FEM解析値は2次元FEM解析値に比べて、約2分の1の矢板変形、約3分の1のフーチング変位を生じているが、こ



図一 7 矢板変形図(平面図)

表一 3 2次元FEMと3次元FEMの比較

(単位: mm)

項	目	1次掘削	1段梁プレロード	2段梁解体
矢板変位 (GL-2.1m)	2次元FEM	-5.8	0.3	-0.7
	3次元FEM	-2.4	1.2	1.2
フーチング変位	2次元FEM	-5.09	0.53	-0.15
	3次元FEM	1.56	1.25	1.01

符号 - 掘削側 + 地下鉄側

れは2次元FEMでは考慮することのできない側面の矢板剛性による差であると考えられる。図一 7にその傾向を示すが、軌道方向の掘削幅が小さくなれば、この差はさらに大きくなるが、掘削幅を大きくすれば、この差はほとんどなくなると考えられる。

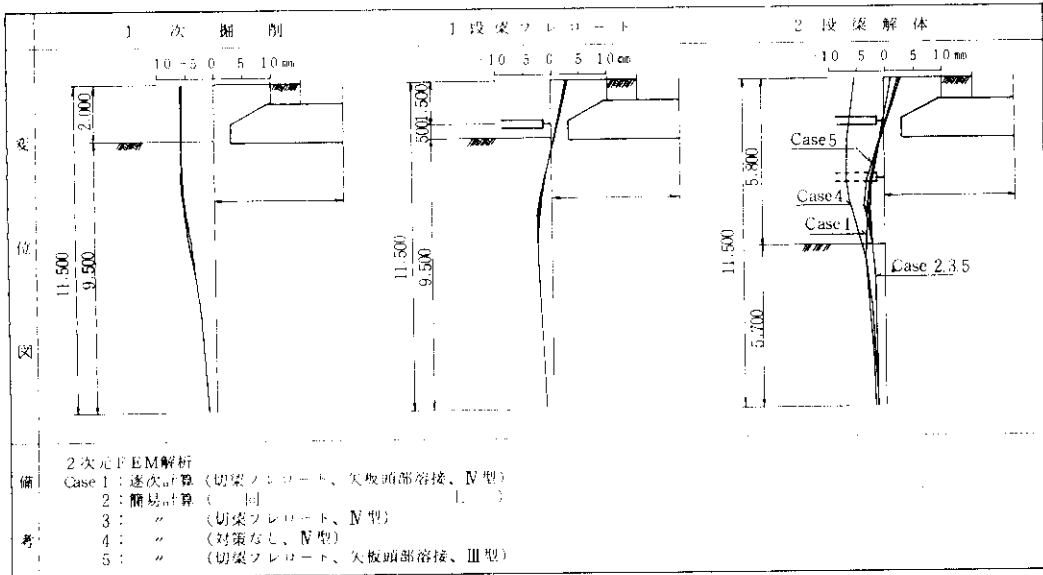
1段梁プレロードにおいて、全体的に2次元FEM解析値は3次元FEM解析値に比べて、掘削側へ約1mm大きい変位を生じており、これは1次掘削時の差が1段梁プレロード時にまで影響していると考えられる。2段梁解体時にも同様のことが考えられる(表一 3)。

2次元FEM解析値と3次元FEM解析値には相当な差があり、今後の変位予測に対して側面の矢板剛性を考慮できない2次元FEM解析を用いるのには問題が残るが、最大変位を生じる1次掘削において、2次元FEM解析値の方が大きくなっているため、地盤定数等の不確定要素による予測精度を考えれば、2次元FEMは安全側の変位予測ができるといえる。従って、側面の矢板剛性を念頭においた2次元FEM解析は、今後の変位予測において有効かつ簡易に行うことのできる解析方法である。

(3) 防護工の効果の比較

防護工として、切梁プレロード・鋼矢板頭部溶接・地下鉄側矢板型式を考慮した種々の検討を2

表一４ 防護工別矢板変位の比較



表一５ 防護効果の比較

(単位: mm)

項	目	1次掘削	1段梁プレロード	2段梁解体
矢板変位 (GL-2.1m)	Case 2	5.8	0.3	0.7
	Case 3	5.8	0.4	-0.7
	Case 5	5.9	0.5	-0.9
	Case 4	5.8	-	6.8
	Case 2	5.09	0.53	-0.15
フーチング変位	Case 3	5.09	0.57	0.15
	Case 5	5.10	0.65	-0.19
	Case 4	5.09	-	-5.64

矢板剛比 Case 2 : Case 3 : Case 5 : Case 4 = 1 : 0.75 : 0.5 : 0.75
 符号 - 掘削側、+ 地下鉄側

次元FEM簡易計算により確認した。なお、矢板打設にはサイレント・パイラーを用いたため、矢板周辺地盤の強度低下は考えないものとした。

表一４、表一５に防護工の効果の比較を示す。1次掘削では、全ケース共、矢板変位・フーチング変位に差異は見られない。次に1段梁プレロードでは、プレロードを考慮しないCase 4を除く全ケースで差異がない。また、2段梁解体ではCase 4のみで大きな矢板変位、フーチング変位を生じており、切梁プレロード工法を考慮しているケースはCase 4に比べて、矢板変位が5割程度、フーチング変位が3分の1程度であり、切梁

プレロード工法はフーチング変位を小さくするのに十分な効果があると認められる。また、矢板剛性については、Case 2 : Case 3 : Case 5 = 1 : 0.75 : 0.5の剛比になっているにもかかわらず、変位にそれ相応の差を生じていない。よって、今回のように地盤条件が悪い場合、ある程度の矢板剛性(Ⅲ型)があれば、フーチング変位には影響しないと考えられる。

2. 電氣的計測管理

2-1 計測方法

計測による地下鉄構造物の安全管理として、長期に渡る基本的な計測方法は、測量機器(トランシット、レベルなど)による機械的計測としたが特に近接施工による影響が大きくなると思われる基礎工事の段階では、計測器による電氣的計測を用い、基礎工事の影響度合を定性的・定量的に把握した。

表一６に計測項目を、図一８に計器配置図を示す。

第1章で述べた影響予測との対比という点に論点を置いているため、表一６の計測項目のうち、

表-6 計測項目

計測対象	計測項目	計測位置	摘要
地下鉄構造物	沈下 A-1	柱左右位置の沈下測定	図-中 ①~⑥
	傾斜 A-2	柱左右位置の傾斜測定	" ⑦~⑯
	水平移動 A-3	橋脚の水平変位量の測定	" ⑰
	ひびわれ -	-	目視観測による
周辺地盤	温度 A-4	部材表面温度測定	
	側方変形 B-1	深さ方向毎の地中変位測定	図-中・印No.1~No.3
仮締切構造物	沈下 -	-	目視観測による
	鋼矢板の変形 C-1	深さ方向毎の鋼矢板傾斜測定	図-中 ⑳~㉔
	切梁の応力 C-2	鋼材表面ひずみ測定	
	腹起しの応力 C-3	"	
地下水位	鋼材の温度 C-4	鋼材表面温度測定	
	水位 D-1	水圧の変化測定	図-中◎印No.1~No.5

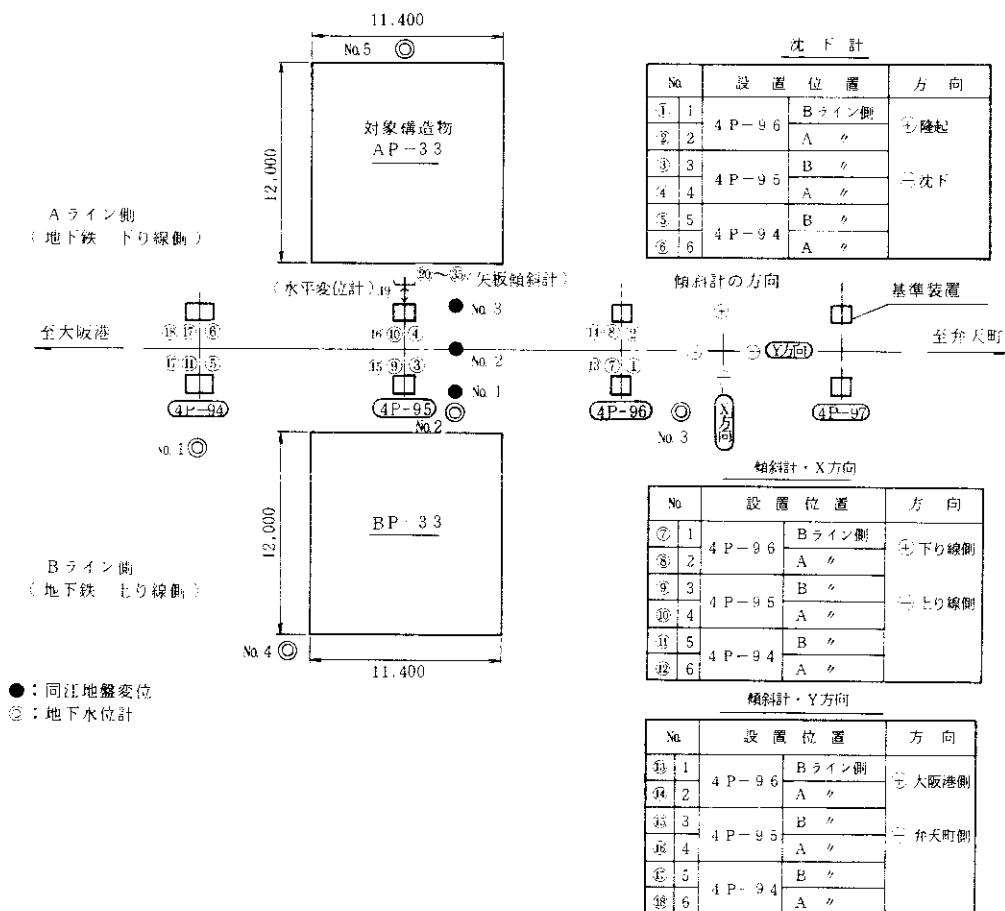


図-8 計器配置図

周辺地盤の側方変形と鋼矢板の変形の2項目について、計測方法を述べる。

(1) 矢板変位計測の原理

掘削による山留壁の水平変位量を把握するために、山留壁（鋼矢板Ⅳ型）背面側に1.0 m～2.0 mピッチに固定傾斜計（図一8中㉔～㉕）を設置し、各測点の傾斜計からの測定値を積分することによって変形曲線を求めるものである。

なお、ある測点*i*に設置している傾斜計が測定不能な場合、測点*i-1*及び測点*i+1*のデータより補間して求めることとした。

(2) 周辺地盤の側方変位計測の原理

矢板圧入、ベント杭施工による地盤の攪乱、掘削による応力開放などによる橋脚基礎周辺地盤の側方変位分布を把握するために、地盤内に建て込んだガイドパイプ（ $\ell = 38.0\text{m}$ ；支持層に定着）にローラー型傾斜計を挿入して、1 mピッチ毎に各測点の傾斜角をマニュアルで測定し、それらの測定値を積分することによって、変位分布曲線を求めるものである。

2-2 計測結果と考察

本計測箇所においては、Aライン側の施工とBライン側の施工をほぼ同時（AP-33の工種に対して、BP-33は約2週間遅れて施工）に行って

いるため、地下鉄構造物に対する近接施工の影響は、ほぼ左・右から受けている。

従って、地下鉄構造物の挙動については、片側施工（AラインまたはBライン）のような各工種ごとの顕著な動きは見られなかった。

(1) 矢板変位（図一9参照）

設計上は2段梁撤去時が最大変位量となっているが、実測値は1次掘削時に矢板天端で最大となった。1段目切梁プレロードによる変位の戻りが大きく、以後その変位形状を保っている。

(2) 周辺地盤の側方変位（図一10参照）

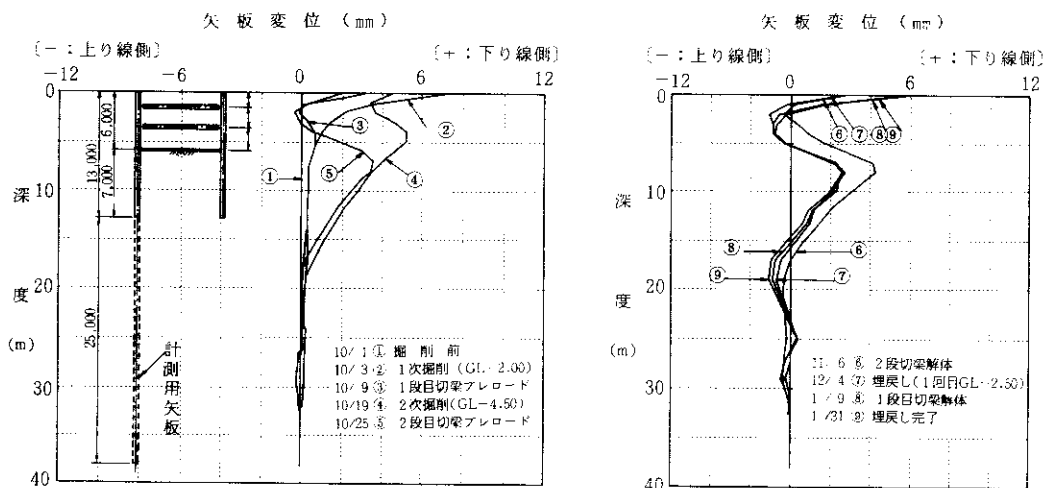
構造物の変状の最も大きな要因である地盤の動きは、施工工種と関連が深く、地下鉄構造物中心での地盤の動きは、即構造物の変状の誘因となる。

A、B両ラインがほぼ同時に施工されており、その施工効果から中心での地盤の動き（No.2）は両端（No.1、No.3）に比べて、かなり小さく、最大値は鋼矢板引抜時の3 mm前後である。

3. 総合評価と考察

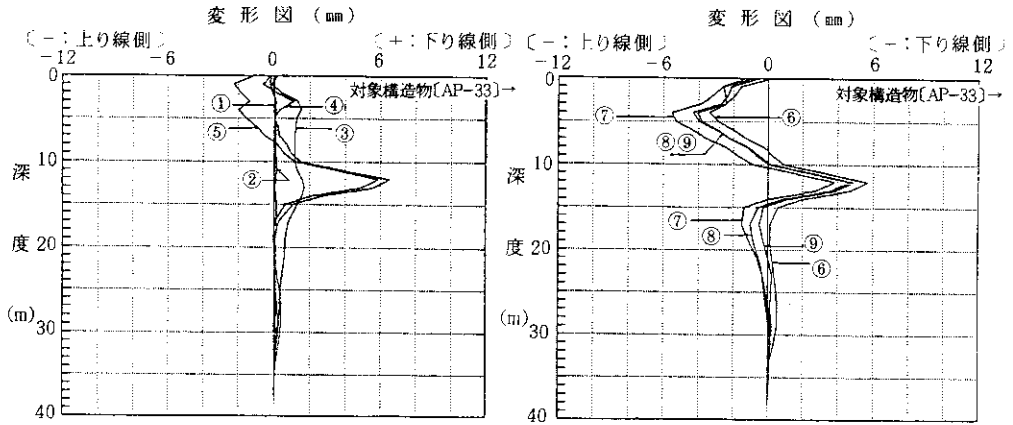
3-1 FEM結果と実測値の比較

図一11に、FEM結果（3次元FEM簡易法）と実測値の比較を示す。各図は、矢板変位と地盤変位を深度軸を取って示したものである。

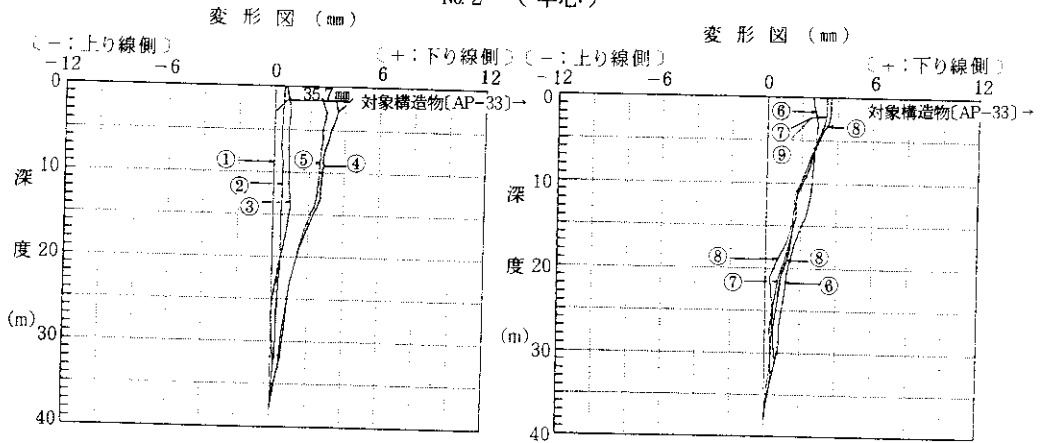


図一9 矢板変位

No.1 (B-LINE側)



No.2 (中心)



No.3 (A-LINE側)

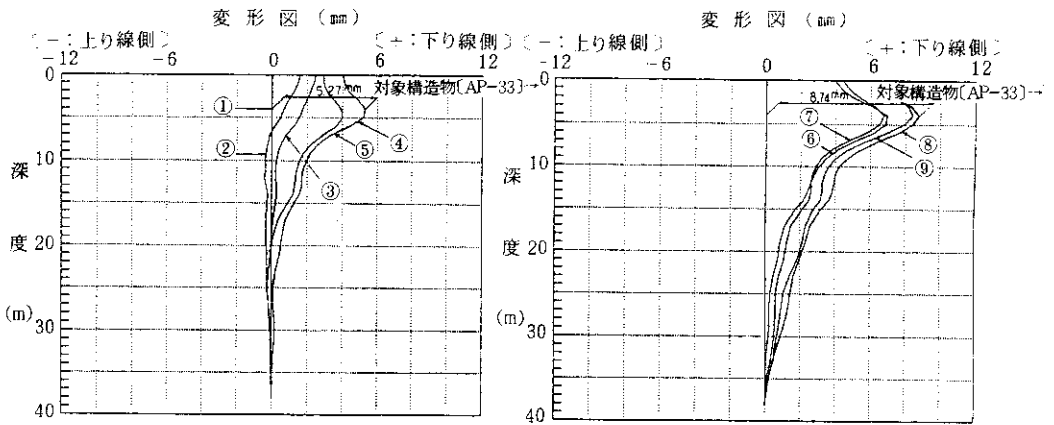
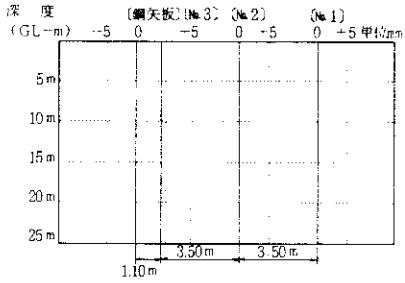


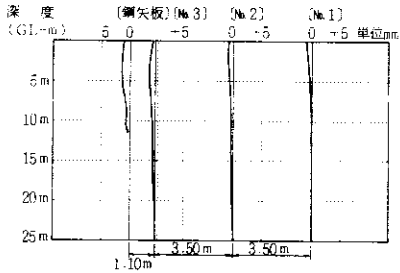
図-10 周辺地盤の側方変位

解析値

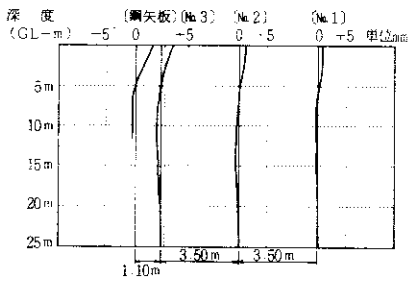
(1) 現場状況：掘削前



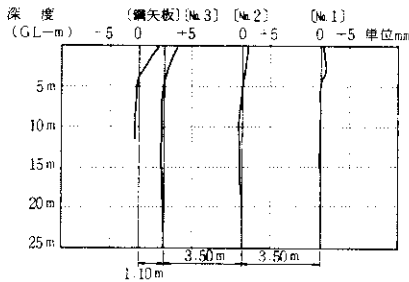
(2) 現場状況：1次掘削



(3) 現場状況：1段梁プレロード

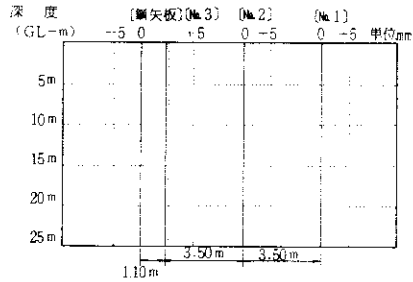


(4) 現場状況：2段梁解体

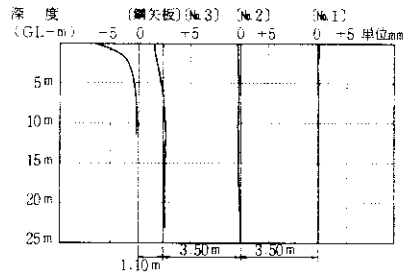


実測値

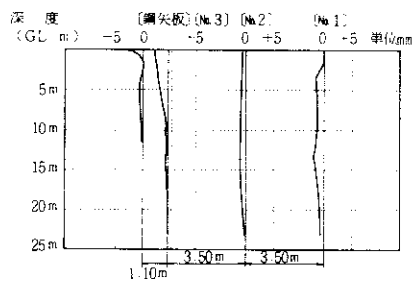
(1) 現場状況：掘削前



(2) 現場状況：1次掘削



(3) 現場状況：1段梁プレロード



(4) 現場状況：2段梁解体

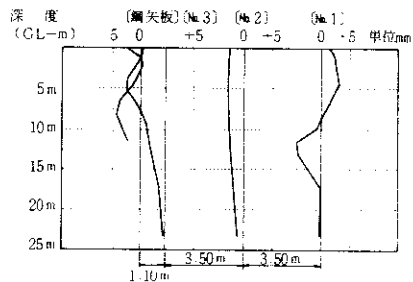


図-11 FEM解析結果と実測値との比較

(1) 矢板変位

矢板全体におけるFEM結果と実測値には相当な差が見られるが、フーチング変位に最も影響を与えると考えられる矢板頭部から2.1 mの位置（フーチング下面の高さ）においては、両者はほぼ一致している。

(2) フーチング変位

表一七に、フーチング変位の比較を示す。2次元FEM逐次解析値は、側面の矢板剛性が考慮されていないため1次掘削での実測値との差は大きいですが、その他の値はほぼ一致している。一方、フーチング鉛直変位については、掘削の進行に伴って、解析値は減少（沈下）する傾向にあるが、実測値は逆に増加（隆起）している。これには種々の要因が考えられるが、最も大きな要因としては、掘削による土中内応力の解放で掘削面がリバウンドし、徐々にフーチングまでも隆起させたものと推察される。

表一七 フーチング変位

(単位: mm)

項	目	1次掘削	1段プレロード	2段梁解体
		フーチング 水平変位	2次元FEM - 3.15 3次元FEM 1.56 実測値 - 1.68	0.47 1.25 0.11
フーチング 鉛直変位	2次元FEM	- 2.00	2.02	2.06
	3次元FEM	1.46	2.99	4.54
	実測値	0.95	0.35	1.45

符号 水平変位 ← 掘削側 → 地下鉄側
鉛直変位 ↓ 沈下 ↑ 隆起

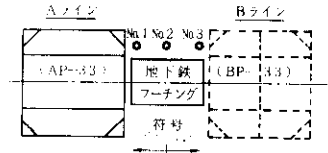
(3) 地盤変位

表一八に、地盤変位の比較を示す。

1次掘削において、地下鉄フーチングの周辺地盤は当然であるが、掘削側へ変位しており、フーチング下面（GL-2.1 m）では、解析値-1.2 ~ -0.9 mm、実測値-1.2 ~ -0.1 mmと比較的よく一致している。

しかし、1段プレロードにおいては、解析値は地下鉄側へ押し戻されているにもかかわらず、実測値は逆に掘削側へ変位している。これは、1次掘削による地盤変位が即時に変位せずに徐々に増加し、一段プレロード時にも時間的遅れを伴って進行しているためと考えられる。

表一八 地盤変位



(単位: mm)

項	目	1次掘削	1段プレロード	2段梁解体
		No.3	GL - 2.10m	3次元FEM 1.0 実測値 1.2
GL - 5.80m	3次元FEM 0.9 実測値 0.2		0.3 1.3	0.4 6.3
No.2	GL - 2.10m	3次元FEM 1.0 実測値 0.5	0.9 0.8	0.7 2.8
	GL - 5.80m	3次元FEM 0.6 実測値 0.4	0.0 0.8	0.1 2.8
No.1	GL - 2.10m	3次元FEM 0.9 実測値 -0.1	0.8 0.5	0.7 2.5
	GL - 5.80m	3次元FEM 0.4 実測値 0.1	0.1 1.2	0.1 2.2

GL - 2.10m: フーチング下面
GL - 5.80m: 最終掘削面

また、2段梁解体においては、実測値が解析値に比べて大きく掘削側へ変位している。これも前段と同様の原因が考えられるが、測点No.1の実測値については、Bライン側（BP-33）の施工の影響を受けているために解析値と大差を生じている。

3-2 今後の近接施工における留意点

(1) 構造物の変状に大きく影響する施工工程

AP-33の先行施工に合わせてBP-33の施工が約2週間遅れで続いており、ほぼ同時施工ということで不安定な均衡状態が保たれ、工種ごとの動きに大きな変化は見られなかった。

ただ、埋戻し時において、地下鉄構造物の水平変位が一時的に増加した（2.75 mm → 4.45 mm）ことが大きな変化であった。

また、今回サイレント・パイラーを用いた圧入工法により鋼矢板を打設したため、際立った動きは見られなかったが、既設の工区でオーガー圧入を用いたオーガー孔跡のセメント・ミルク注入時に大きな変化の見られるものがあった。

(2) A・Bライン同時施工について

地盤および構造物の横方向変位は、地盤内の応力あるいは水圧のアンバランスにより起こるものであり、理論的には片側施工よりもA・Bライン

同時施工が水平移動を小さくおさえることに有効であることが本工区で実証された。

(3) 計測システムの選定

センサーを含めた計測システムは、取付け、管理等を含めた全計測費用に占める割合が大きいため、計測規模とそれに対する投資効果のバランスを十分に検討し、計測のニーズに合った最小の規模でシステムを選定することが大切である。

(4) 今後の近接施工に対する挙動予測について

土木設計の分野では、難解な問題には安全率を大きく取ることによって対処している。しかし、現場計測に関しては安全率の考えが一切なく、構造物の挙動予測においては、真に近いモデルを選定しなければならない。特に、直接的な試験（ボーリング孔内での水平試験、三軸圧縮試験など）による地盤定数の決定、土圧・水圧の考え方、あるいはそれらが杭体にどのように作用するかの問題点等、今後に残されている課題も多いが、設計のレベルから一歩進んだ物の見方・考え方をを行い、構造物の挙動を予測することが必要である。

あとがき

本論文では、大阪港線の近接施工のうち最も標準的な橋脚について、FEMによる予測値と電気計測による実測値を比較するとともに、予測方法（FEM）の簡易化を試み、一応の評価を得たが、土質条件等、不確定要因の多いこの種の影響予測では、今後、統一した見解が望まれるところである。

末尾になりましたが、本論文を作成するにあたり、御協力いただいた関係各位に深謝の意を示しつつ、論文を結びたいと思います。

参考文献

1. 大阪府道高速大阪東大阪線（大阪港線）弁天第2工区近接施工に伴う変状観測業務 計測結果報告書、阪神高速道路公団大阪第2建設部 昭和60年5月
2. 近接施工実績検討業務 報告書 阪神高速道

路公団大阪第2建設部 昭和60年11月
3. 土質・基礎工学における有限要素法の適用
土質工学会