



# 地下鉄工事に用いたアンダー ピニング

—— 京阪電鉄天神橋下の横断工事 ——

近 藤 和 夫  
加 納 次 郎

## 1. ま え が き

大阪市およびその周辺における都市交通緩和対策の一環としての京阪電鉄淀屋橋延長線が、現終端駅である天満橋駅から、地下で淀屋橋まで延長するについて、計画路線が天神橋の橋台下を通ることとなったが、工事の施工に起因して橋台が沈下、あるいは横移動をした場合には、主構アーチに悪い影響をおよぼし、ひいては不測の事故の原因ともなるおそれがある。

したがって、その施工計画については市、会社が共同して種々検討を行ない、さらに斯界の権威者を招請して検討会をもつなど、慎重審議の結果その計画が決定された。

工事は昭和36年1月10日着工、途中計画の一部変更があったが、ほぼ順調に推移し、心配された沈下や横移

動もなく、昭和37年5月23日無事竣工を見た。

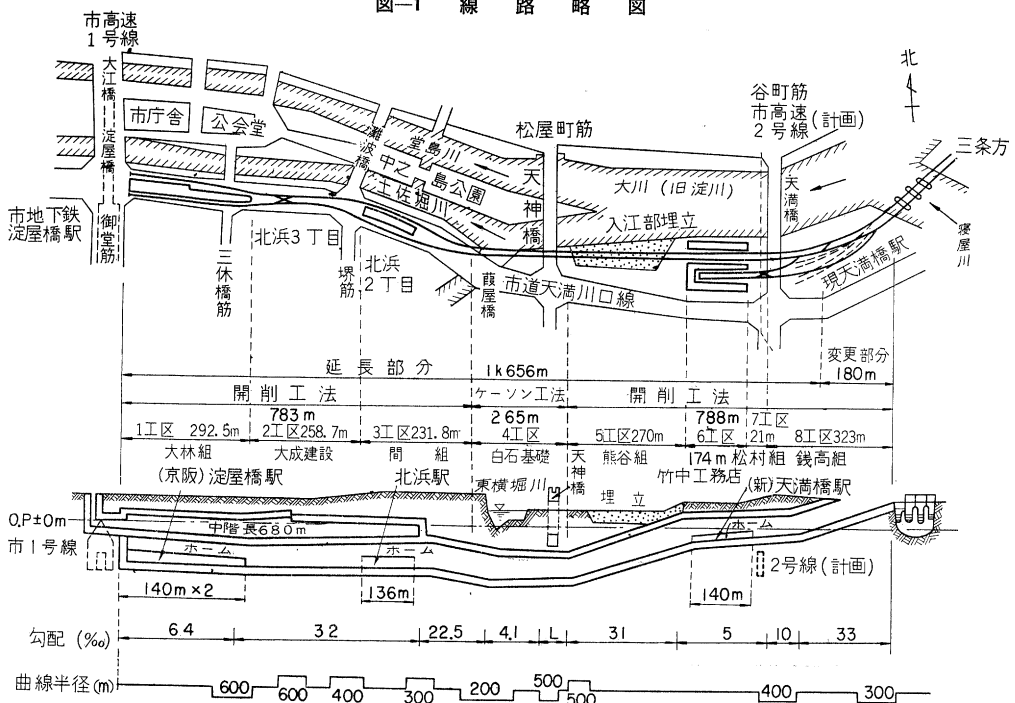
ここに、本工事の問題点、施工計画と実績などを要約して報告する。

## 2. 施工計画とその検討

延長線は各種ルートについて検討の結果、図-1のごとく天神橋の南側橋台をかねた第5径間（以下橋台という）下を通すことになり、施工中はもちろん完成後も橋にも、トンネルにも支障を与えることなく、地下鉄を建設することが大きな課題となった。

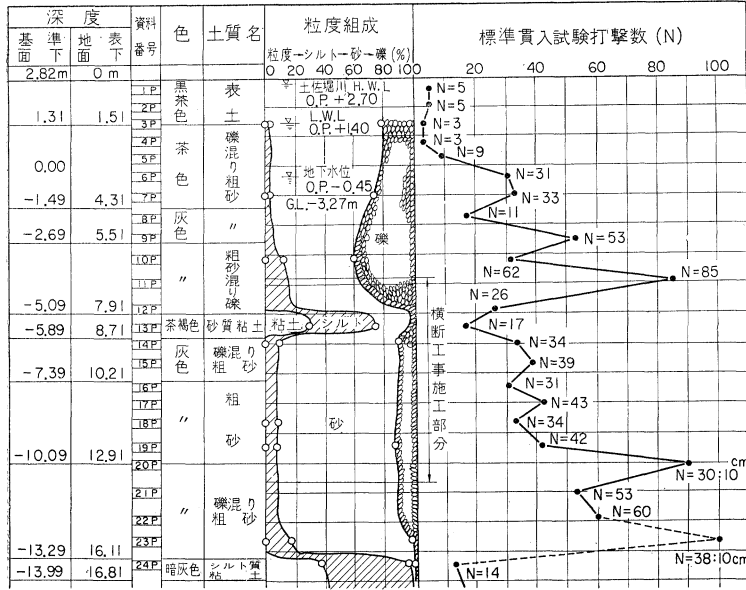
天神橋は堂島川および土佐堀川（旧淀川が中之島によって分流されたもの）に架けられた道路橋で、橋長210.7m、有効巾員22m、5径間からなり、中央3径間は2ヒンジメタリックアーチ、側径間は橋台をかねた鉄筋コンクリートアーチであって、大阪の代表的な橋である。

図-1 線 路 略 図



カット写真：淀屋橋延長線全景

図-2 現地盤地質柱状図 (昭和34年7月調査)



(1) 基礎地盤の状況

橋台付近の高水敷で行ったボーリング結果によると、地盤の状態は 図-2 のようである。

なお、本地点に見られる粘土層は、市内上町台地で地表近く出現する洪積粘土層と同一のもので推定され、そうとう過圧密の影響を受けている。また、この付近は比較的地盤沈下は少なく、年間約 10 mm 程度であり、昭和 34 年 11 月の実測によれば、第 4 径間の建設時からの沈下量は、支点において 100~125 mm であり、不等沈下は橋の横断方向に 25 mm、縦断方向に 10 mm であって、問題となるような値ではなかった。

(2) 施工計画と検討

a) 路線の選定

路線は前後の線路勾配の関係からどうしても橋台基礎にかかることは避けられず、これをどの程度におさえるかは、橋ならびにトンネルの構造、施工の問題、さらに前後の施工計画、工事費などに関係し、きわめて重大な課題であった。

橋の構造からはこの厚さの基礎コンクリートは必ずしも必要ではないこと、また、トンネル構造上の不安が無ければ、支持条件についてはトンネルをできるだけ浅くした方が橋軸方向の支持面の変化が少ないこと、また、本地点前後の取付部も浅くなり、隣接建物の沈下についての不安も減ずるなどの主な理由から、橋台基礎コンクリートをできるだけ浅く、トンネルをできるだけ浅くすることとした。

b) 施工法のあらし

工法としては、掘削箇所以外の地盤を絶対ゆるめない

ことを目標とし、㊸トンネル工法、㊹シールド工法などを考えたが、いずれも満足できず、当初の掘削巾をできるだけ少なくして、しかも強固な土留壁または、これに代るものを作り、しかるのちに本体部を掘削する考えのもとに、㊺地盤固結工法、㊻横矢板圧入工法、㊼トレンチ工法、㊽縦矢板工法を比較検討した。

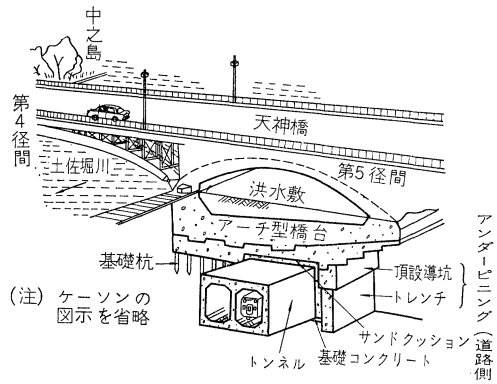
以上のうち、㊺案は現地盤注入試験の結果から見て、中央部の掘削にあたって、注入だけでは十分土圧に耐えられる確信が得られなかった。

また、㊻案は橋台巾が 25 mm あるので、15 m 程度のシートパイルを水平方向に圧入しなければならず、橋台との接合部についても施工上難点があり、㊼、㊽案のごとく縦方向に圧入した方が、シートパイル圧入長さも短くなり、施工が容易であると思われた。

㊺案は橋台下の掘削巾が少なくなり、その点では有利であるが、トンネル本体の鉄筋コンクリート構築をすべて圧気のもとで行なわねばならず、施工上難点があると思われ、その他技術的に種々検討を加えた結果もっとも安全で確実な工法として、㊽案を採用することとした。

詳細は後述するが、概要としては橋台をはさんだうえ、下流側に圧気ケーソンを沈める。ケーソン内部は 4 ブロックからなり、中央 2 ブロックはトンネル、両側は作業室とし、この作業室から頂設導坑を掘進し、導坑から橋台下面を支台にして鋼矢板を圧入する。鋼矢板 1 枚の長さは 1.7 m 前後とし、圧入にしたがって順次継ぎたす。鋼矢板間を掘削し、導坑をふくめてコンクリートを打ち込み側壁 (アンダーピニング) を完成する。

図-3 工法説明図



側壁完成後、地盤に対する載荷状態を急激に変えないため区分ごとに掘削、地下水の低下およびヒービングに対処するため原則として圧気掘りを行なう。

底部敷コンクリート打設後トンネル本体の構築を行なう（図-3 参照）。

### c) 横断工事にともなう問題点

横断工事施工にともなう基礎地盤の攪乱、あるいは支持条件の変動による影響、またトンネルの受ける荷重状態など、橋、電鉄側双方とも考慮を要する問題が少なくない。要約すると次のようであり、これらについてそれぞれ必要な検討を行なった。

なお、鋼矢板の圧入は施工に際し試験の結果困難であり、木矢板縫地工法に変更したが、以下の検討については、その条件は変わらない。

1. 施工中および施工後における橋台の沈下
2. とくに施工中における極限支持力および橋台の滑動に対する安定性
3. 施工法、とくに圧気工法にともなう空気ブローの地盤に対する影響、すなわち上記の計算条件の確保
4. 第4径間主構の応力増加
5. トンネル構造におよぼす橋台荷重の影響

### d) 問題点の検討

① 施工中の橋台反力変化：トンネル部分を掘削すれば当然地盤反力が変化する。安全のため全断面を同時に掘削するものとして計算すると、地盤反力の最大値は約  $32 \text{ t/m}^2$  で現在にくらべて  $8 \text{ t/m}^2$  程度の増加である。

② 橋台の沈下：地盤反力の増加による圧縮沈下量は橋台前部で  $7.5 \text{ mm}$ 、後部で  $14.5 \text{ mm}$  程度で問題になるような値ではない。

③ 下部粘土層応力：この地点の洪積粘土層は  $55 \sim 80 \text{ t/m}^2$  の先行圧密強度を示しており、最大反力に上載砂層有効荷重を加えても  $39 \text{ t/m}^2$  程度であり、圧密沈下については心配ないと思われる。

④ 滑動に対する安定：橋は中央3径間が2ヒンジメタリックアーチであるため、橋台が万一横移動を起こした場合、第4径間のアーチ主構に応力増加をきたし、はなはだしくなれば連続して3径間とも破壊を生じるおそれがある。現在主構の応力は多少の余裕があり、許容応力に達するときの変位量を限界変位量とすると、その値は計算によれば  $5.2 \text{ cm}$  である。

橋台の背面土圧を無視した場合の摩擦係数を求めると  $0.352$  となったが、実際問題として極限摩擦係数は  $0.7$  くらいあると見てよく、自然土圧を考慮すると安全側となり、本工事施工によって橋台が移動するとは考えられない。

⑤ 極限支持力：本橋では前述のように橋台前部に最大反力を生じ、かつ水平力は橋台を後方に押す形をとる

から、前部がめり込むような回転をすることが想像される。また、橋台の形状もその底面深さが前・後部で異なるなど、地盤に対する極限支持力の解析は複雑であるので、仮定を設けて、橋台下を掘削する場合の横断方向、橋軸方向および施工中のヒービングについてその安全率を求めたが、施工中については  $5.3$ 、同地震時については  $5.1$  と大きい値を示している。

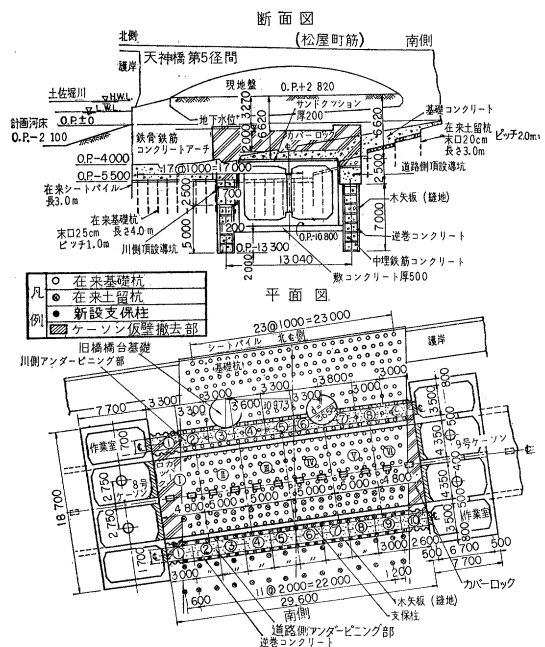
### e) トンネルの設計条件

橋台下トンネルの設計については、次の3つの載荷状態を想定し、それぞれの条件のうち、もっとも大きい応力が生ずる場合により断面決定を行なった。

① 垂直荷重のみを考え、土圧を無視する場合：完成後長期間経過し垂直荷重が作用しても、土留壁によって側土圧が直接作用しない場合が考えられる。

② 側壁に土圧のみを考え、上載荷重を無視する場合：完成直後は上載荷重である橋台荷重はほとんど受けないわけである。一方側壁は水、土砂などにより側圧を受けることも考えられる。

図-4 天神橋下横断工事施工図



③ 地震時：設計にあたって、地震時の影響をできるだけ少なくするために、橋台下面とトンネル構造物および側部土留壁と構築側壁の間は、応力的に空けきを設けるようにサンドクッションを考えたが、応力検討の場合には、トンネルと橋台が剛結されているものとした。

## 3. 工事状況

### (1) 8, 9号ケーソンの設置

本工事の基幹として、まず天神橋をはさんで8号（下

流側), 9号(上流側) ケーソンを設置した。ケーソンの大きさは長さ 18.9×巾 7.7×高さ 18.6 m で、それぞれ 4 ブロックからなり、中央の 2 ブロックはトンネル本体用、両側のブロックは作業用とし、竣工後はポンプ室などに利用する(図-4 参照)。

(2) 橋台、ケーソン間の処理

頂設導坑およびトンネル本体部掘削時の漏気防止のため、橋台、ケーソン間に厚さ 2 m の鉄筋コンクリートのカバーロックを設けた。なお、この部分に将来のコンクリート打設用の径 6" および 4" の管をあらかじめそう入しておいた。

(3) アンダー ピニング

a) 頂設導坑

ケーソン内を圧気のうえ、仮壁を破って頂設導坑(巾 23×高さ 2.6 m)を掘進した。橋台基礎杭は約 30 年の経年にもかかわらず健全であり、これを支保工として利用した。土質はよく締った粗砂混り礫および細砂で、圧気の状態ではほとんど垂直に掘削できるほどで、側圧に対してもあまり懸念することもなかったが、縫地工法を採用し、掘削に追従して平均 30 cm 厚の側壁コンクリートを巻立て、背面にセメントおよび薬液を注入し、地山のゆるみと漏気に対処した。

b) アンダー ピニング

アンダー ピニング形成のために、導坑から鋼矢板を圧入することが果たして可能であるかどうか問題であったので、その試験を行なったが、圧入予定長 7 m に対し 2 m 前後にとどまった。その結果、当初の計画によるアンダー ピニングを変更し、1. 施工が容易かつ迅速にでき、しかも外圧に十分な耐力を有すること。2. 地盤の弛緩を生ぜず、かつ漏気に対して万全であること。3. できるだけ作業面積が広くとれること。という条件のもとに種々の工法を比較検討の結果、導坑部と同じく縦の木矢板による縫地法をとることとし、次の点を加味し必要な応力照査を行ない、安全度を確認した。

① 掘削は全体を 10 ブロックに分割し、1 ブロックの大きさは、巾 1.7×長さ 3.0×深さ(道路側)7.0、(川側) 5.0 m とする。

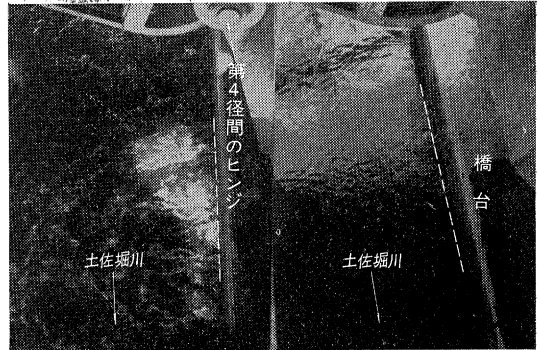
② 縫地法による木矢板背面には、コンクリート中埋後、注入を行なう。

③ アンダー ピニング部はトンネル 本体部の掘削の際、単独で外圧に対抗させるため筋鉄コンクリート造とする。

トレンチ部掘削深さの増大にともない、漏気の増大が見られたので、必要のつど厚さ 25 cm 程度のコンクリートで側壁を巻き立て漏気に備えた。アンダー ピニングの施工に関して最も考慮を払ったのは漏気の問題であり、送気圧と函内圧との関係を測定したが、その圧力差

写真-1 川側アンダーピニング中のブロー状況

(a) トレンチ部掘削中 (b) 側壁巻立て薬液注入



は漏気量に比例し、切羽面積と土の透気係数との関数と考えられよう。工事中橋台ぞいの土佐堀川水面に見られたブロー(写真-1)は内壁の巻立てや、注入による漏気防止上の影響が明らかに現われている。

各ブロックごとの構築につづいて、頂設導坑をコンクリートで中埋填充し、アンダー ピニングを完了した。作業気圧、速度などは表-1のとおりである。

表-1 アンダー ピニング諸元

		川 側	道 路 側
頂設導坑	作業気圧 掘進速度(巻立てを含めて平均)	0.4~0.5 kg/cm <sup>2</sup> 1.5日	0.5 kg/cm <sup>2</sup> 1.1日
トレンチ部	深 さ 作業気圧 1ブロックの作業日数	5.0 m 0.4~0.8 kg/cm <sup>2</sup> 5~6日	7.0 m 0.4~0.75 kg/cm <sup>2</sup> 5~14日

(4) 軌道部の掘削と構築

アンダー ピニングが完成しているのので、橋台下部を全面に掘削しても計算上は問題ないのであるが、支持条件の急激な変化により予測しない事態が生じないよう、万全を期するため区分施工を行なうこととし、全長を 6 ブロックに分割し、1 ブロックの長さは 5 m 前後とした。

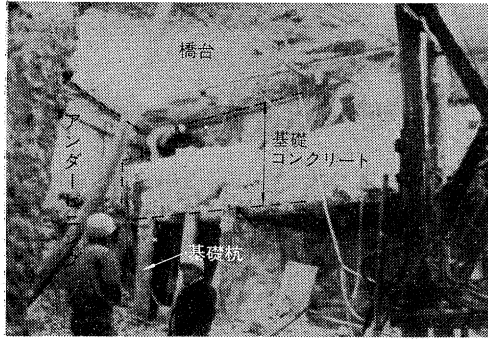
また、橋台基礎コンクリートは施工上から本体コンクリートの境界面まででけずることとし、トンネル構築完了後、その上床版上部に 20 cm 厚のサンド クッションを設け、これと境界面との空間はコンクリートを填充し、当初の設計条件に合うよう考慮した(3.(2)参照)。

なお、側壁とアンダー ピニングとの空げきは、アンダー ピニング施工時の縦矢板で、一応縁が切られているのと、施工上からサンド クッションを設けず、そのままコンクリートを填充することとした。

橋台基礎コンクリートのけずりにともなって、両ケーソン側からブロックごとに掘削とトンネル本体鉄筋コンクリートの構築を行なった。

コンクリート打設にはコンクリート ポンプを使用し、カバー ロック構築時にあらかじめ配管しておいた径 6"

写真-2 基礎コンクリートはり



の曲管を通じて好成績を得た。

構築上、床版上は 20 cm 厚のサンドクッション層を設け、ルーフィングを敷いたうえ、コンクリートポンプ出入口にフレキシブルホースを取りつけて動作を容易にし、さらにホース中に圧縮空気を送り込んでコンクリートを噴射し、填充の完全を期した。なお、本工事の工程は表-2のとおりである。

表-2 工程表

工事種目	昭和36年												昭和37年				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5
現場仮設																	
8号構築掘さく																	
ケーソンカバーロック																	
9号構築掘さく																	
ケーソンカバーロック																	
道路側アンダーピニング																	
川側アンダーピニング																	
軌道部構築																	

#### 4. 橋の移動測定

橋の限界変位量は計算によると水平方向では 5.2 cm、鉛直方向では 237 cm となったが、たとえ移動がこの限界内であっても、移動の程度やその進みの度合によっては、臨機の対策をとる必要があり、この目的のため常にその状態を監視し、移動測定を継続して行なったが、工事を通じて橋軸方向、横断方向ならびに鉛直方向とも、その移動は認められなかった。

#### 5. 応力の測定

はじめに述べたように、本工事は橋になんらの変状を生じないように施工することはもちろん、そこに造られるトンネル構築物も十分安全でなければならず、横断工事ともなる基礎地盤の攪乱、支持条件の変動あるいはトンネルの受ける荷重状態に対して種々の検討を加えたうえで工事を始めたのである。

しかし、これら安定計算に用いた数値には仮定値もあり、計算と実際との間には若干の相違は避けられない。

したがって、工事の完全な管理をはかる一助とするとともに、将来この種の工事がなされる場合の設計、計画の資料ともするために、応力を測定することとした。

計器としては測定方法、測定時期に対する計器製作の可否などから、共和無線製カールソン型のものを使用することとし、図-5に示すように橋台中心位置に設置した。

工事進捗とこれに対する計測結果の例は、図-6、7のようであって、これらについて現在までに知り得たところを述べてみたい。

図-5 計器設置位置図

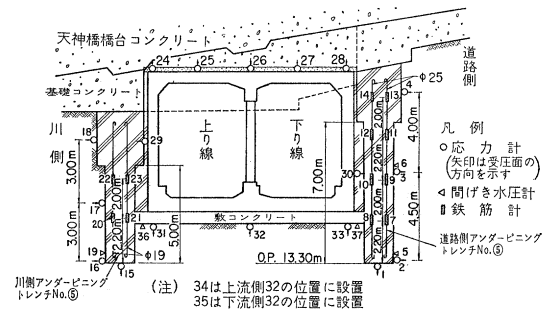


図-6 アンダーピニング部応力変化図

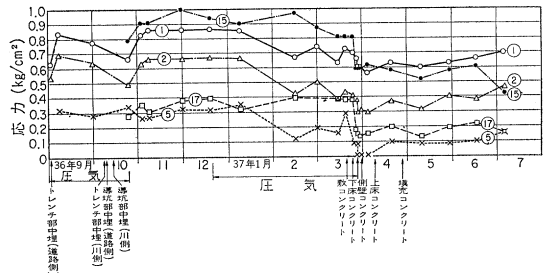
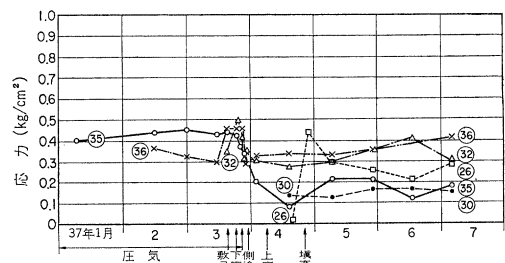


図-7 トンネル部応力変化図



##### (1) アンダーピニング側壁部にかかる応力

側壁部の(土圧+水圧)値はコンクリートの中埋め後は増加するが、その後は減少している。応力の最大値はアンダーピニングが完了し、送気の中止後に見られた

が、これはエアーフにもなう水圧の増加ならびに周辺のゆるんだ土の回復によるものと考えられる。

トンネル部の圧気掘削にともない上記応力は減少し、もっとも危険視されていたトンネル部の掘削完了時においても、その増加は見られない。

トンネル部下床版の構築完了時にエアーフしたが、その前後に $0.1\sim 0.2\text{ kg/cm}^2$ の減少を示した。これは一時的に水圧が減少したもので、以後水圧の増加に示がって増加を示し、現在はほぼ一定値を示している。

水圧の増減は地下水水位の変動によるものと思われ、河川水位の影響はとくに認められなかった。

側壁部にかかる応力は、砂層におけるランキン公式から出した値に近似しているが、実測最大応力値を示したアンダー ピニング構築完了時(エアーフの状態)においても、橋台反力を考慮して出した理論値の50%程度の値を示し、このことから計画時に想定した橋台反力の載荷状態はかなり安全度を見た状態であったといえる。

## (2) アンダー ピニング部の底面反力

底面反力についても側壁部と同様の傾向が認められ、最大値はアンダー ピニング部の構築が完了し、エアーフした状態において記録されている。そして橋台反力を考えた理論値と実測値を比較すると、実測値は理論値の35%程度と非常に小であり、計画時に想定したような反力値はおこらなかった。これは載荷重としての橋台反力の影響が小であることを示すものであろう。

## (3) トンネル部の底面反力

トンネル部の底面反力は大体において小さい値を示している。一般的には漸増の傾向にあるが、これは水圧の増加によるものと思われる。なお、トンネルの縦断方向については、上・下流側でトンネル中心線に応力計を設置して計測したが、いずれも計算値に対してかなり小さい値を示しており、橋台反力がトンネル構築を通してかかってきているとは認めがたい。

## (4) トンネル部の頂部応力

現在のところ値も小さく、単に填充コンクリートの自重程度の値にすぎない。

## (5) 鉄筋応力

鉄筋計は設置後2カ月間は変動するが、以後は大体において値も小さく、一定値を保っている。

道路側鉄筋計の動きについては、アンダー ピニング部が側圧に対して両端を固定されたはりとして働いているように考えられるが、少ないデータで結論はできない。

## (6) 橋台がトンネル本体に与える影響

地震時そのほか急激な荷重変化があった場合などを考えると、トンネルと橋台とは応力的に絶縁されていることが望ましいと考え、サンド クッションなどを設けたのは既述のとおりであり、応力の計測に際してはおおのトンネル側壁部背面に、アンダー ピニング側壁部に設置の計器に対応して計器を設置(計器番号29, 30)し、その動きを知るようにした。

計測の結果、トンネル側壁に生じる応力は、同一深さにおけるアンダー ピニング側壁部にかかる応力の60%程度の値を示し、これらの値はいずれも理論値をはるかに下まわる小さい値である。

また、トンネル頂部に生じた応力もきわめて小さい値で、今のところ橋台反力の影響は直接認められない。

## (7) 今後の課題

今までの計測結果から、工事の推移にともなう応力の変化の傾向と、現状における橋台荷重の影響などを考察したが、未解析の点もあり、計測値にもかなりのバラツキがあり、これだけのデータで結論をうることは早計であろう。

また施工にあたってトンネルと橋台とを応力的に絶縁したことの意義と効果、すなわち橋台反力の経年による構築物への影響、さらにトンネル縦方向すなわち、両側ケーソンとの接合による影響など、理論的にも現場施工の点からも研究すべき事項も多い。

今後さらに継続して計測を続け、これらをふくめて解析のうえ、時期を見てその結果を報告したい。

## 6. む す び

今日まで施工例もなく難関といわれた本工事も、関係各位の適切なお指導と、施工を担当せられた白石基礎工事KKのご努力によって、橋梁になんらの支障を与えることなく、かつ無事故で完成することができ感謝にたえない。ここに、東亜港湾工業KK社長 岡部三郎氏、山口大学助教授 川上暢夫氏、京都大学 村山朔郎教授、大阪市立大学 橋 善雄教授、元大阪市交通局長 橋本敬之氏、同 辻井富之助氏、大阪埠頭倉庫KK社長 後藤憲一氏、大阪大学 伊藤富雄助教授ならびに種々ご協力を得た大林組の各位に深く謝意を表すものである。

〔筆者：近藤・正員 大阪市土木局道路部橋梁課長  
加納・正員 京阪電鉄新線建設事務所建設部長〕

(原稿受付：1962.8.16)

## 地下自動車道路(数寄屋橋～日比谷間)着工決定

首都圏整備委員会では、かねてより都心部の交通難緩和のため、運輸、建設、東京都と協議中であったが、このほど銀座数寄屋橋わきの阪急デパート前から日比谷交差

点にいたる500mの地下自動車道路(地下1階2車線)の建設を決定、2年間の懸案を解決した。工費5億円で都が施工しオリンピックまでに完成の予定である。