

帝都高速度交通営団 正員 小林 光
帝都高速度交通営団 正員 ○片山 弘

1. まえがき

近年の地下鉄の路線は、都市構造の立体化が進むにつれて、その施工法が、オープンカット工法、シールド工法あるいは、その他の工法のいずれを選択するにしても、高層建物、または鉄道、高速道路、河川、下水道、水道、洞道等の施設物と立体交差または、近接する個所が、大変多くなつてきており、将来この傾向は益々増加するであろう。一方路面または、敷地の占用位置の見地からでは、都心部における路線が、道路以外の民地内を通過せざるを得ない場合も、多くなっている。従来民地内を路線が通過するに際しては、(1)土地所有者と建物の載荷重契約を結び、予め家屋荷重を考慮したトンネルに、補強設計しておき、既設建物は取りこわし、工事完了後復旧する。(2)将来の建物の築造を想定して耐え得る地下鉄トンネルの構造に、設計しておく。といった方法が一般的であつた。しかしながら、路線の選定条件に加えて、施工条件、支障物の形態等を考え合せると、既存の高層建物下をも通過せざるを得なくなつた。ここに述べる工法も、このような条件のもとに、高層建物を、下受けして地下鉄トンネルを築造する大規模な、アンダーピニング工法を、採用するに至つた。以下その施工例について、概要を述べるものである。

2. 工事概要

現在、営団地下鉄8号線の一期工事は、すでに池袋へ銀座1丁目間10.9キロが、49年秋開通を目ざして建設工事を進めており、池袋から護国寺、江戸川橋を通り、神田川に沿つた路線が、大曲付近で、民地内を通過するに当り、地上7階建のビルの直下を、通るもので、ビルの営業機能を、全く阻害することなく、施工することが、要求され、種々検討の結果、地下鉄トンネルの掘さく内および、影響範囲内の基礎ぐいに替る新設基礎ぐいを施工して、ビル荷重を盛替える。この作業完了後地下鉄トンネルを、築造しようとするもので、ビル下受工事、トンネル築造工事、民地復旧工事を含め、47年4月着手し、約27ヶ月で完成するよう、現在施工中である。

3. ビルの概要

ビルの用途は、主として書庫と、事務所となつており、地下室のない、地上7階建の鉄骨、鉄筋コンクリート構造である。建物面積は、940㎡、地表からの高さ30m、総重量12,200tで、建物の基礎は、直径1.6m、深さ10mの現場打の鉄筋コンクリートの深礎ぐい、36本で支持され、ぐい1本当たりの最大荷重は、650tとなつている。

4. アンダーピニングの設計方針

既設基礎ぐいの深さは、10mであるが、地下鉄の掘さく深さが、1.8mにもおよぶので、トンネル内および、トンネル近接部の既設基礎ぐいから、新設の基礎ぐいに、ビル荷重を、盛替える必要を生じた。すなわち、既設ぐい(φ1,600)13本を撤去し、トンネル掘さくによる影響をうけると考えられる(支持力の低下が考えられる)既設ぐい9本を、対象に、盛替用新設ぐい(φ2,000)15本を築造する。設計方法の要点としては、①作業空間となる、ビル下掘さくによる、露出した、既設基礎の補強に、仮設耐震壁を、採用するとともに、これらの施工範囲を、3分割をして行う。②ビル荷重盛替用基礎ぐいは、トンネルの外側の他に、トンネル中央壁の中にも築造し、深礎ぐいとする。③既設地中梁の下部に、新たに鉄筋コンクリート受梁を設ける。④新設受梁下に、更に新設深礎を、結ぶ中間梁を設け、門型ラーメン構造の補強とする。

⑤受梁と基礎ぐい間の、ジャッキアップには、フラットジャッキを使用し、プレロード完了後は、埋殺しとする。⑥従来アンダーピニングによく用いる、仮受ぐいによる方法が、困難であるため下受工事施工中ビル変状の絶無を期して、既設基礎先端地盤を、ポリウレタン系薬液で、強固に改良する。等を、基本的な考え方として、ビル荷重の盛替工事を完了させる。ビルと地下鉄トンネルの関係および、下受横断面の概要は、図-1、図-2、に示す通りである。

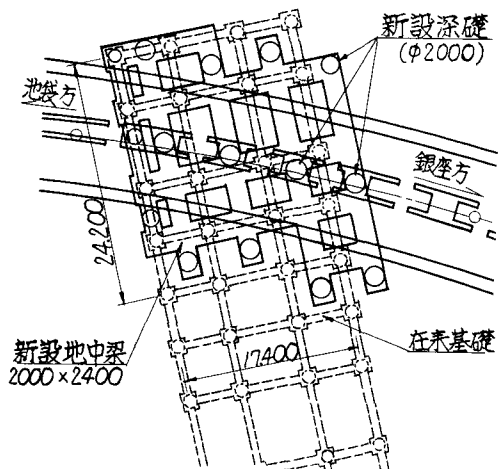


図-1 ビルと地下鉄トンネルとの関係平面図

5 アンダーピニングの施工順序

前述の、設計方針に従って、施工に着手することとなつたが、実際には、建物の施工中の安全を、考えると、ビル下でしかも、すき取り範囲も狭くし、また掘さく深も、できるだけ浅くしたいのは言うまでもないが、これらは、益々作業性を悪くするという逆現象となるので、施工のすすめ方を如何に克服するかが、現場での大きな課題であつた。以下施工順序を述べると

(1)「ビル下4.0mのすき取り(1次掘さく)」既設地中梁より4.0mの深さまで、下受範囲を、3ブロックに分け、施工時期をずらして、掘さくする。

(2)「耐震壁の築造」すき取りにより、露出した既設基礎頭部に、作用する水平力に抵抗させるため、鉄筋コンクリート壁厚さ25cmで連結する。

〔(トンネル工事大口径ボーリングマシン(B.H.くい)による土留継ぐい(3本継)の建込)〕

(3)既設基礎先端の地盤補強注入ビル荷重を、支えている、既設深礎ぐいは、近接して施工される新設深礎の掘さくによつて、周辺地盤の弛みが、考えられ、また支持力の低下、沈下の危険まで考え

られるので、地盤中の水と反応固結するポリウレタン系薬液で、既設基礎ぐい底面下1.0mの地盤改良を行う。ウレタン系注入の詳細については、後述したい。

(4)新設深礎囲りの薬液注入深礎掘さくの安全のための、止水、地山の安定と、既設ぐいの周辺地山をも弛めないため、尿素系薬液を主に、使用した。注入率は、改良土量に対して、約20%で、総注入量は、897000ℓにおよび注入範囲の一部を示すと図-5の通りである。

(5)新設深礎掘さく本施工個所の砂層は、かなりの水が、あることは、地質ボーリング資料等で報告されていた。しかしアンダーピニング工事が、周辺トンネル工事よりも、着手が大巾に遅れたため、前後の掘さくの進行により、かなりの水位の低下があると考え、敢て、デイベウエル等による、水位低下工法は、採用せず前述の薬液注入のみによつて、掘さくを行うことができた。ただ下部の拡巾の施工には手間どつたのであるが、当初考えていたよりむしろ注入の効果によつて施工を可能にしたのは成功であつた。

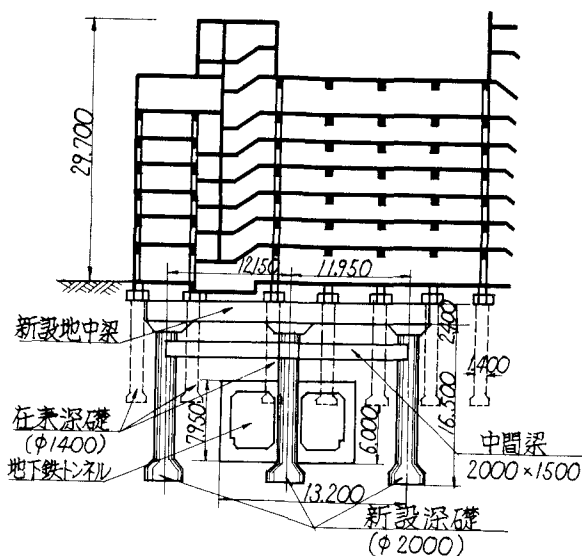


図-2 ビル下受横断面図

(6)「深礎ぐいの鉄筋組およびコンクリートの打設」掘さく完了後、直ちに鉄筋を組み立て、土留用ナマコ板は、取りはずさないまま、コンクリートを、打設する。深礎ぐいの配筋は図-3に示す。

(7)「プレロード用受台および、フラットジャッキの設置」深礎ぐいのコンクリート打設時、ジャッキ用鋼製受台を、埋込み取付けて、加圧完了後、ジャッキとともに、埋殺しとする。

(8)「受梁の築造」仮設耐震壁を取りこわし、既設地中梁下に、新たに受梁（高さ2.4 m）を築造する。断面および配筋は図-4に示す。

(9)「1次プレロード載荷」受梁と深礎ぐい頭部との間にセットされたフラットジャッキ2枚のうち1枚で、1次掘さく完了時に、ビル荷重の鉛直力を、等分布に、予め盛替えておく。

(10)「新受梁下約5.0 mの掘さく（2次掘さく）」受梁の築造を終えて、更に掘り下がり、既設深礎ぐいの、大部分が露出されている状態である。

(11)「2次プレロードの載荷」2次掘さく完了後、直ちに、フラットジャッキの残り1枚を加圧し、フラットジャッキ内にエポキシ樹脂を送り込んで固結する。この1次、2次プレロード載荷に当り、変位量として考えられるものに、受梁のたわみ、深礎ぐいの弾性変形、ぐい底面地盤の沈下等であり、これを、考慮して、既設の基礎から新しい基礎へ建物荷重を、移行していく必要がある。そしてこの変位量から、想定して、受梁と受台間のジャッキストロークの決定をした。

これら各要因による、変位量の計算値と、施工条件を考えて、フラットジャッキの最大ストローク36 mmを、2枚重ねで使用した。

(12)「受梁と深礎ぐい頭部固定」2次プレロード完了後直ちにジャッキ本体を、埋込み、コンクリートを打設し、ビル荷重の盛替作業は完了する。

(13)「深礎を結ぶ中間梁の築造」深礎ぐいの継ぎとなる、鉄筋コンクリート構造の中間梁（高さ1.5 m）を打設する。〔（トンネル工事）地下鉄トンネル掘さく、構造物のコンクリート打設、トンネル上部の埋戻し。〕

上記作業順序によつて、アンダーピニングは、終るのであるが、ビルに対する地下鉄の振動防止には、硬質ゴムを、トンネルの側壁外面および、近接する深礎には、包囲貼付する。また更に道床部には、古タイヤ等を敷いた上に、バラスト道床とすることによつて、万全を期している。

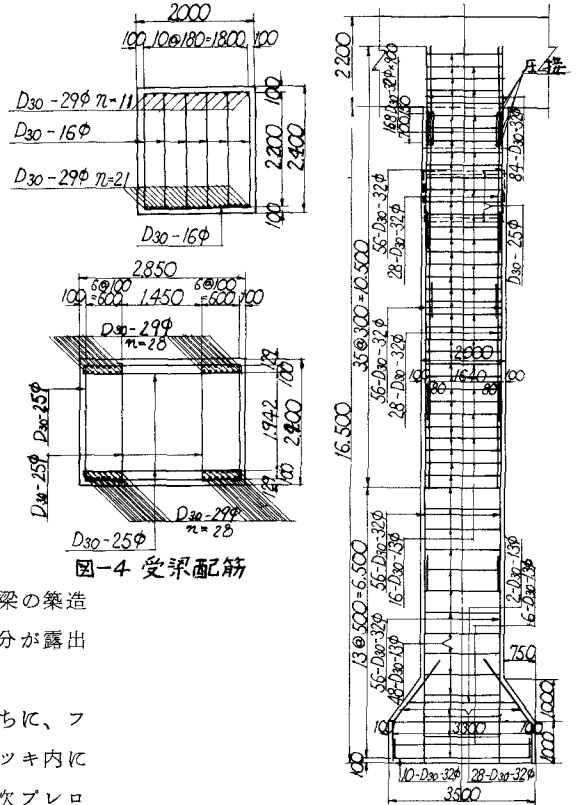


図-4 受梁配筋

図-3 深礎ぐい配筋

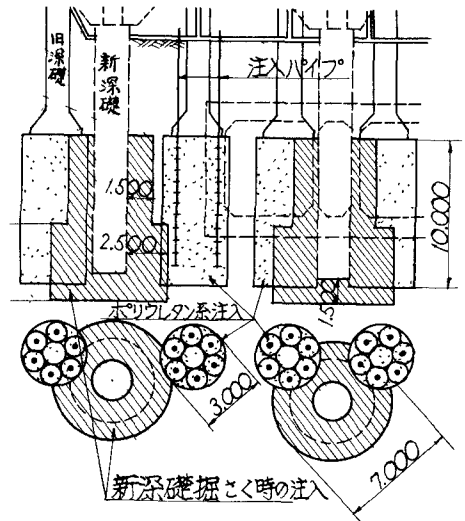


図-5 注入詳細図

6 新設深礎ぐいの支持力の検討

基礎が浅い時の適用式 $T e r z a g h i$ 式により、 N_c 、 N_r 、 N_q を支持力係数、 r_1 、 r_2 を、ぐい先端からの上部および、下部の単位重量、 r をぐい底面の半径、 D_f を掘さく面からぐい先端までの深さ、 C を粘着力（＝0 とする）とすると、 $q_d = 1.3 C N_c + 0.6 r r_1 N_r + r_2 D_f N_q$ で表わされる。 $\phi = 40^\circ$ とすると、 $N_c = 95.7$ 、 $N_r = 114.0$ 、 $N_q = 81.2$ から、 $q_d = 564.2 \text{ t/m}^2$ また底面積は $A_p = 9.62 \text{ m}^2$ となり、ぐいの極限支持力 $R_u = 564.2 \times 9.62 = 5427.6 \text{ t}$ である。従つて新設深礎ぐい 1 本当りの許容支持力 $R_a = \frac{1}{3} R_u = 1800 \text{ t}$ となる。一方ビル荷重盛替後の新設深礎ぐいの、最大軸力は、 $N_{\max} = 1238 \text{ t}$ となり、支持力は、安全である。又現場において、実際に深礎掘さく完了後、平板載荷試験を実施した結果から、最大荷重強度より、 $q_t = 1/3 \times 455.5 = 151.8 \text{ t/m}^2$ 降伏荷重強度より、 $q_t = 1/2 \times 324.0 = 162 \text{ t/m}^2$ が得られた。この値のうち、小さいものを採用すると、深礎底面地盤の支持力は、 $R = 151.8 \times 3142 \times 1.75^2$ から $R = 1460 \text{ t}$ で試験結果からも十分安全であることがわかる。

7 水和反応型ポリウレタン系薬液注入の施工詳細について

一般に用いられている注入材は、大別してセメント系、セメント薬液系、水ガラス系、高分子系に分けられるが、主な薬液の性能比較は表一で示す。そこで均等浸透で且つ、高強度を得るために、高分子系のうち、水和反応型ポリウレタン系薬液を選定し、既設深礎を地盤改良し、建物の変位の絶無を期した。薬液の単価が、尿素系との比較で 10 倍以上ということもあり、過去大規模な施工実績が、少ないので室内実験および、現地盤注入試験により、薬液の性能の確認と、地盤に適用した、注入方法を決定することにした。その結果薬液は水と反応する、発泡性によつて均等且固結注入が可能で、砂層に於ては、特に顕著である。また改良土で $100 \sim 150 \text{ Kg/cm}^2$ の高強度が得られる。等が確認された。試験結果は、表一2、

に示す通りである。次にこの水和反応薬液は、従来の注入方法の 2 ショット、あるいは 1.5 ショット方式と異なり、1 ショット方式で且多少の水でもすぐ固結してしまうため、施工管理には、細心の注意を払わなければならない。そこで、前述の現場実験より、図一6 に示す通り、二重管のロットによる、ステップダウン方式によるのが最も適合している、という結論に達した。すなわち注入方法では、最初にグルタイムの早い（20 秒～30 秒）のウレタン系薬液でパイプ先端を、強固に、バック注入し、カバーロックの役割をしておき、本注入（グルタイム 7～10 分）を行つた。浸透径は、実験結果から 0.8～1.0 m とし、注入率を α とすると、 $\alpha = n \times \frac{100}{p r} = 4.2\% \times \frac{100}{250} = 1.68\%$ となり、この値は、試験注入の固結土容積から、算出したものと差がないことも確認された。上式に於て、 n ：間隙率、 $p r$ ：有効固結率を示す。総注入量は、259000 l である。

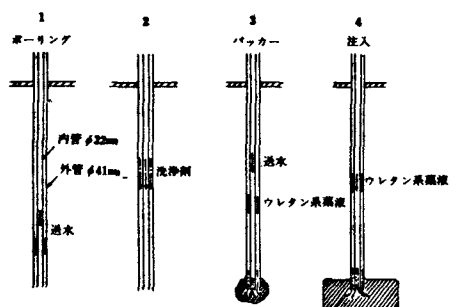
第1表 各種薬液性能比較表(静水地盤)

	ウレタン系	アクリルアミド系	尿素系
粘度	10~15	1.2	1.2
透水系数 Kg/cm^2	$10^{-6} \sim 10^{-7}$	$10^{-6} \sim 10^{-7}$	10^{-4}
圧縮強度 Kg/cm^2	150~200	5~7	10
*有効固結率%	200~550	130	130
注入孔間隔 cm	60~80	80~150	80~150
ゲル化反応時間	水和反応型	重合性	重合型

*実測した固結土体積と理論固結土体積との比を百分率

第2表一軸圧縮試験結果

採取場所	区分	注入前		注入後
		強度 Kg/cm^2	圧縮ヒズミ (%)	強度 Kg/cm^2
G.L-12.2m	中心部	2.82	0.05	132.7
〃	中心部より50cm	〃	〃	99.5
G.L-13.0m	中心部	3.16	0.06	138.5
〃	中心部より40cm	〃	〃	104.4



ボーリングにより、内、外管ともに、内管透水、外管には、内管に洗浄剤を通り、二重管ロッド挿入、洗浄剤を通り水を、グルタイム系グラウト、水を封鎖後、内管、外管を洗浄する。グルタイム系グラウトともウレタン系グラウト

図一6 ロッドステップ注入順序図(グルタイム系)