

洪積層における地表面沈下量を抑止した山岳トンネル工法の開発・適用に関する実験的検証

藤井 浩*・奥田 庸**・登坂敏雄***・阿部敏夫****

本文は、未固結地山のトンネル掘削工法の一手法として、地表面沈下量の抑止を目的として開発した CRD 工法の特徴を示し、次にその現場試験結果について述べる。その結果、地表面沈下量は、CD 工法と比較して 1/2 程度に拘束できることがわかり、沈下に対する抑止効果が大いことがわかった。また、水平変位からも耐側圧性に優れており、CRD 工法が、都市部の土被りの浅いトンネルに十分適用可能であることが明らかとなった。

Keywords : restrain settlement of surface, development of CRD method, excavation in diluvium, shallow tunnel of the city part

1. はじめに

近年の地下構造物構築技術は、山岳トンネル工法の標準工法として既に定着した NATM の導入等によりめざましい発展を遂げている。

特に、我が国の大都市圏においては、人口、経済の集積が著しく、都市機能の維持、増進を一層図るべきであるところから地下空間の有効利用がますます強く求められる状況にある。

我が国の大都市圏におけるトンネル構築工法としては、従前から開削工法とシールド工法が一般的であり数多くの施工実績を見ることができる。しかし、トンネルが構築される箇所の地形、地質、地下水位および土地利用状況等によっては、開削工法あるいはシールド工法が必ずしも最適な工法とは言い難い場合があり NATM 等による自由度の高い山岳トンネル工法が求められることがある。また、大都市圏において山岳工法を適用する場合、比較的浅い地層を掘削するケースが多く未固結地山を安定して掘削する必要がある。

この様な状況において近年、山岳¹⁾および都市部において先進的な施工事例が見受けられるようになってきた。特に、都市部においては制約される環境条件に合わせてサイロット工法²⁾、ショートベンチカット工法^{3),4)}あるいは CD 工法^{4),5)}等が採用され良い結果が得られている。また、モデル実験および数値シミュレーションにより未固結地山(砂層)におけるトンネルの挙動を明らかにする試み⁶⁾⁻⁸⁾がなされており、工法を研究する上で貴

重な資料を与えている。

しかし、未だ山岳工法による「都市トンネル」の標準工法と言える確立した工法は無いのが現状であり、密集した市街地直下において周辺環境に影響を与えることなく安定した掘削が行える工法の開発が求められている。

本研究は、都市における未固結地山を山岳工法により安全にしかも周辺に影響を与えることなく掘削するための工法として、主に地表面沈下量を抑止することを目的とした新しいトンネル掘削工法を提案し、その有効性を現場実験により検証するものである。

2. CRD 工法の基本的な考え方

CRD (Cross-Diaphragm の略) 工法は、地表面沈下量を極力抑えることによって、直上に住宅等が密集する都市特有の環境においても安定した掘削を行うことを目的として開発された工法であり、次に示す点を基本的な考え方としている。

① 掘削断面を分割し切羽断面を小さくすることによって先行沈下量を相対的に小さくし、地表面沈下量を抑止する。

② 耐側圧性を考慮して各掘削断面の高さと幅の比を適正なものとするとともに、トンネル全体における導坑のバランスを考慮し掘削順序を決定する。

③ 分割したトンネル掘削断面毎に閉合せせる事を基本とする。(先進坑の閉合、後進坑の閉合、掘削途中の上部半断面の閉合、さらに全断面閉合と各段階毎に順次閉合を繰り返して地山と一体化した支保効果を確保する。)

④ 掘削断面の早期閉合を図る。(分割した掘削断面の相互干渉を生じない程度まで導坑間距離を短縮する。)

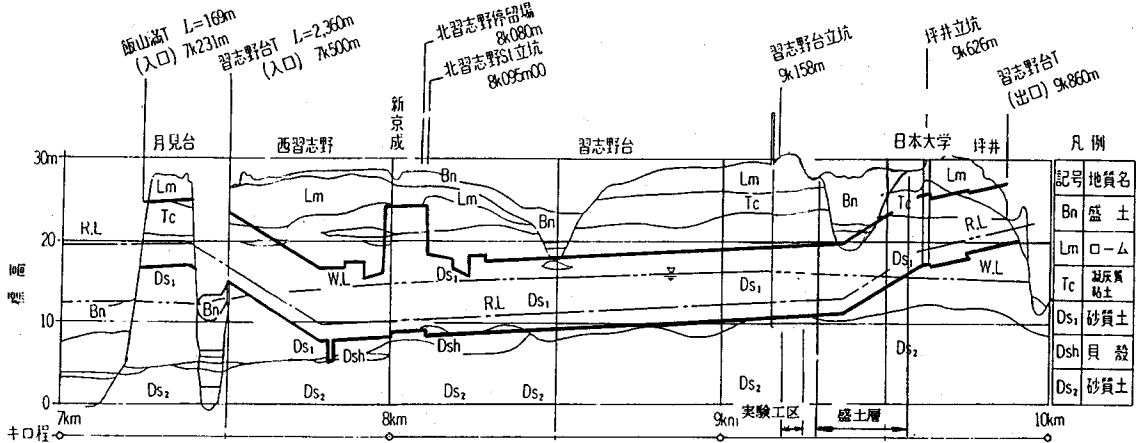
本論文の一部は、第 1 回トンネル工学研究会において発表(論文・報告集)

* 正会員 前・日本鉄道建設公団理事
(〒277 柏市加賀 1-13-13)

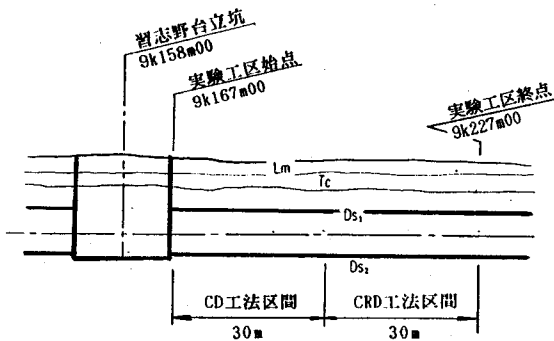
** 正会員 日本鉄道建設公団関東支社工事第一部長

*** 正会員 日本鉄道建設公団関東支社工事第二課補佐

**** 日本鉄道建設公団関東支社工事第二課係長



図一 (a) 習志野台トンネル地質縦断面図



図一 (b) 実験工区地質縦断面図

表一 物性試験結果

土質分類	乾燥密度 ρ (g/cm ³)	粘着力 C (kg/cm ²)	せん断抵抗 角 ϕ (°)	透水係数 K (cm/s)	変形係数 E (kgf/cm ²)
Tc 凝灰質粘土	1.53	0.20 ~0.50	17.35 ~27.88	-	61.7 ~81.2
Ds1 砂質土	1.72 ~1.90	0.0 ~0.30	31.7 ~41.1	1×10^{-5} ~ 1×10^{-3}	217 ~599

※変形係数は、L.L.Tによる

ローム (Lm) がそれぞれ 3 m 程度の厚さで堆積している。このようなほぼ均一な地形・地質条件下で CD 工法により 30 m を掘削し、ついで CRD 工法により 30 m を掘削して両工法の特性的比較を行うこととした。

なお、図一 (a) に示すように地下水位がトンネル断面内に存在するため共通の補助工法として地下水位低下工法 (ディーブウエル工法) を採用している。

Tc 層及び Ds1 層の土質試験結果を表一に示す。

(2) CRD 工法の設計

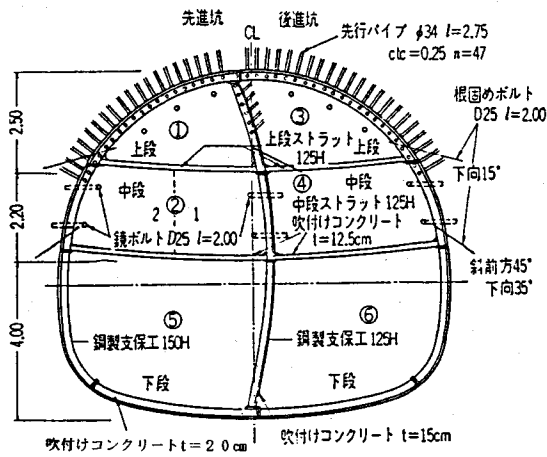
CRD 工法の支保パターンおよび掘削順序をそれぞれ図一2、3に示す。図に示すように掘削は六分割断面として、先進坑の上段、中段と各掘削断面毎に吹付けコンクリートや鋼製支保工等により掘削断面外周を閉合する、いわゆる、仮閉合を繰り返しながら進め、後進坑上段、中段まで掘削した時点で上半全体が閉合するような導坑配置としている。また、最終掘削断面の閉合は、各導坑切羽の相互干渉を考慮し先進坑上段切羽から 15 m 後方と比較的早期に閉合出来るように設定した。このように CRD 工法では、掘削断面を外周支保、中壁支保およびストラットを利用して閉合することを基本としていることから、中壁支保とストラットの取扱が重要となる。中壁支保およびストラットは導坑自身の閉合による地山との一体化を図る外、掘削過程を通して外周支保を内側から十字に支える形となるため支保自身相当安定した構造となる。しかし、二次覆工の施工時には断面内の支

3. 現場実験

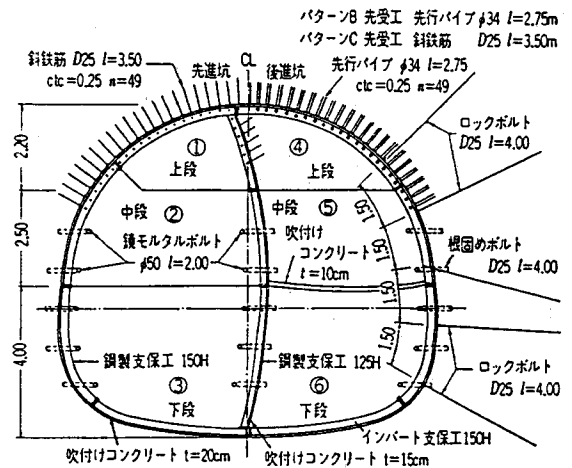
(1) 検証の方法

本文では著者らが提唱する CRD 工法の有効性をより客観的に判断するため、都市部において施工実績のある CD (Center-Diaphragm の略) 工法との比較の中で有効性を検証することとした。

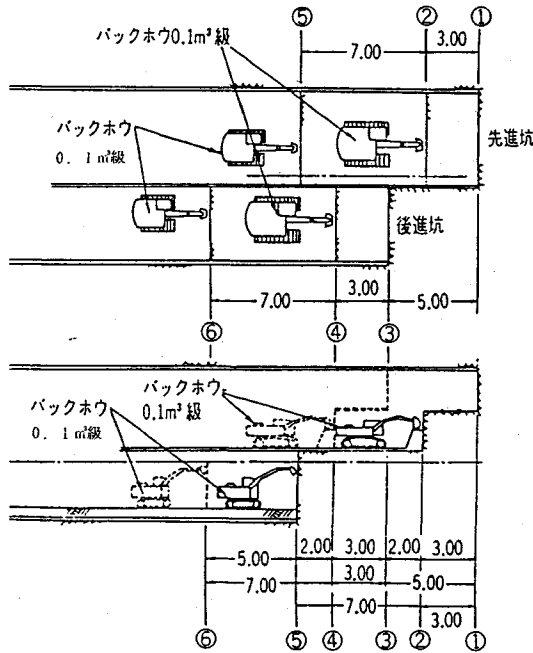
このため実験場所は、工法による特性を明瞭に捕らえ判断出来るよう同一条件の環境を選定するとともに掘削規模も実物大トンネルとして実験結果から直接、工法の有効性を比較できるよう配慮した。実験を実施した東葉高速線習志野台トンネルの地質は図一 (a) に示すように未固結の第四紀洪積世、成田砂層中の Ds1 層で構成され、トンネルは土被り 10 m 前後で通過している。また、トンネルの直上部はほぼ全線に渡り成熟した市街地で交通の輻輳する市道及び住宅地で構成され実験環境としてあまり恵まれていないが、幸いにも 9 k 200 m 付近に平坦で、しかも地質の成層状態がほぼ均一な空地が有りここを実験工区に選定した。実験工区のトンネルは図一 (b) に示すように水平な Ds1 層中に土被り 10 m で位置しており、Ds1 層の上部には凝灰質粘土 (Tc)、



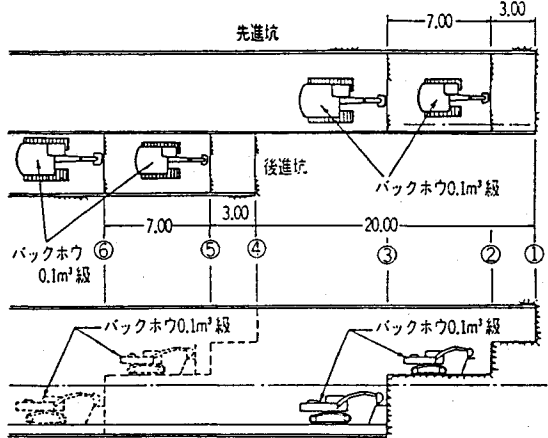
図—2 CRD 支保パターン



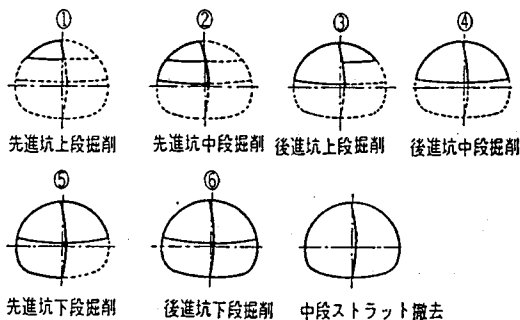
図—4 CD 支保パターン



図—3 CRD 掘削順序図



図—5 CD 掘削順序図



保工を撤去する必要があり構造系が急変することから、これらに過度の応力を作用させた場合、問題を残すことになる。このため外周支保、中壁支保およびストラットは、剛性バランスを考慮する必要がある。このことから外周支保は150 H 鋼製支保工および20 cm 厚の吹付けコンクリートとし、これに対して中壁支保は、1 ランク剛性の低い125 H 鋼製支保工と15 cm 厚の吹付けコン

表-2 測定項目一覧表

	測定項目	測定位置	略図
C D	地表面沈下(横断)	9k210m00 9k220m00	
	地表面沈下(縦断)	5mピッチ	
	地中変位(鉛直)	9k210m00	
	地中変位(水平)	9k210m50	
	内空変位	10mピッチ	
C D	支保工応力	9k210m00	
	地表面沈下(横断)	9k190m00	
	地表面沈下(縦断)	5mピッチ	
	地中変位(鉛直)	9k190m00	
	地中変位(水平)	9k190m50	
	内空変位	10mピッチ	

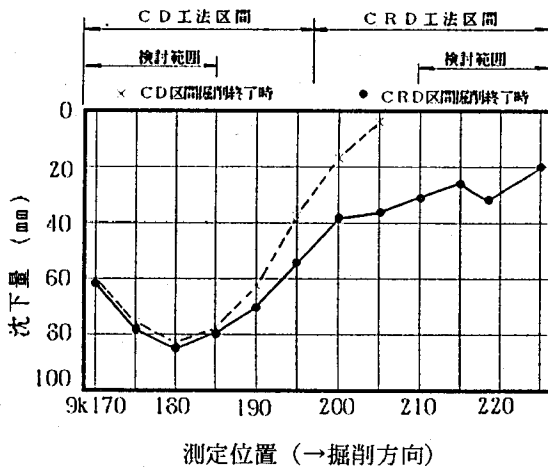


図-6 地表面沈下縦断面図

クリートとした。更に撤去過程での応力の再配分を円滑にするため、わん曲させた構造としている。この考え方はストラットも同様で、図-2に示す構造とした。また、先受け工はフォアパイプφ34mmとし、鏡の防護は鏡ボルトによって行った。

一方、比較となるCD工法の基本設計は図-4、5に示すようにCRD工法と同様の支保剛性としているが、補助工法は地山に適応したものを選定するためフォアパイプφ34mm、L=2.75m、25cmピッチと、斜鉄筋D25、L=3.5m、25cmピッチの2パターンを使い分け、それぞれ延長10mの実験工区を設けた。さらに各パターンとも、CRD工法と同様に鏡ボルトを配置した。

また、掘削順序は図-5に示すように最初に先進坑を三段ショートベンチカット工法で掘削し、次いで後進坑を先進坑と同様に三段ショートベンチカット工法で掘削することとしている。この結果、最終閉合は先進坑上段切羽から30m後方となった。

4. 実験結果とその考察

(1) 計測工の種類と配置

計測項目および位置を表-2に示す。実験は地表面沈下量の抑止効果の把握を目的とした変位測定を主体に行った⁹⁾。

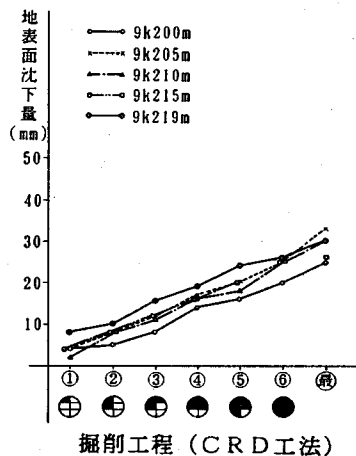
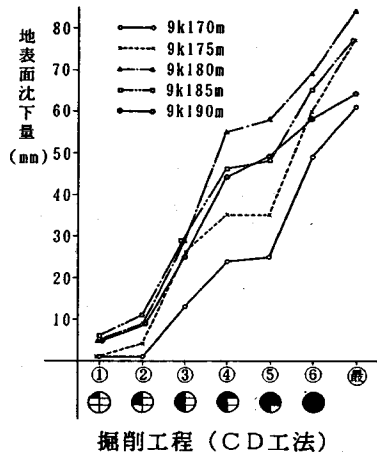


図-7 掘削工程と地表面沈下図

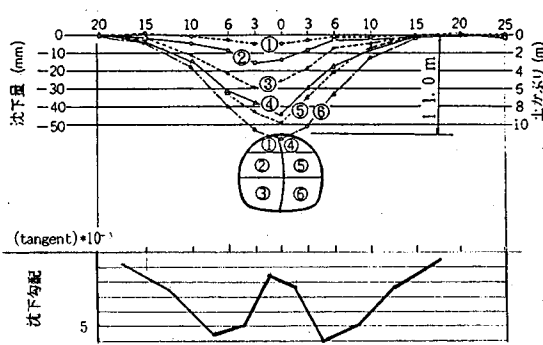
計測は、実験工区（CRD工法区間30m、CD工法区間30m）全体の挙動を把握する意味で天端沈下を含む内空変位と地表面沈下を全区間、等間隔に測定することとし、さらに両工法の比較検討を行うため、それぞれ一断面づつ地中変位を計測した。

また、CRD工法区間では、中壁の挙動を検討するため支保工の応力測定も合わせ行うこととした。

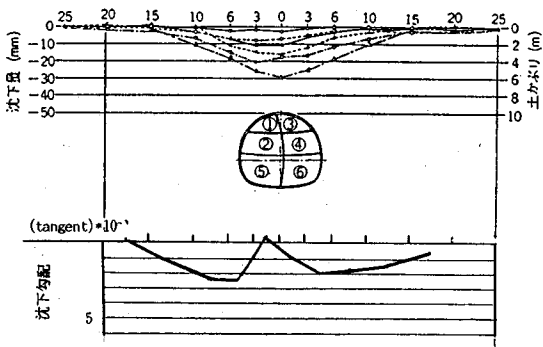
(2) 地表面沈下特性

実験工区全体のトンネルセンター直上の地表面沈下量を図-6に示す。図中の9k170m～195m間がCD工法による施工区間の地表面沈下量、9k200m～225m間がCRD工法による施工区間の地表面沈下量を示している。このうち、9k190m～205m間はCD工法及びCRD工法の掘削による先方あるいは後方への影響をそれぞれ受けていると考えられるので、CD工法による沈下量としては9k170m～185m間を、CRD工法による沈下量としては9k210m～225m間を採り上げることとする。

図に示すように、CD工法区間では60mm～85mmの



9k 190m地点横断方向地表沈下図 (CD工法)



9k 210m地点横断方向地表沈下図 (CRD工法)

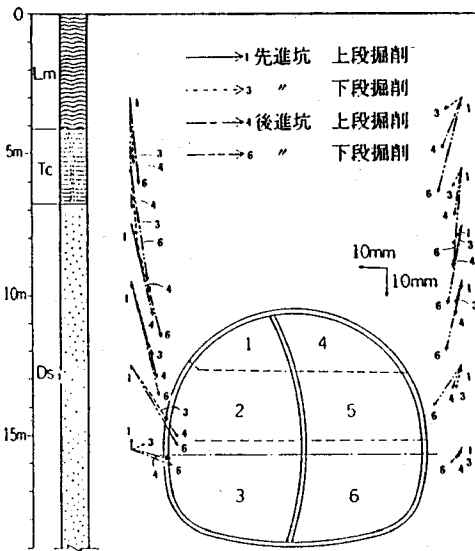
図-8 横断方向地表面沈下図

地表面沈下量が発生しているのに対し、CRD工法区間では30mm程度とCD工法区間の1/2~1/3に減少している。両工法区間の実験環境は前述のとおりほぼ同一と考えられることから、両工法による地表面沈下量の差は工法の特性的差と考えられる。

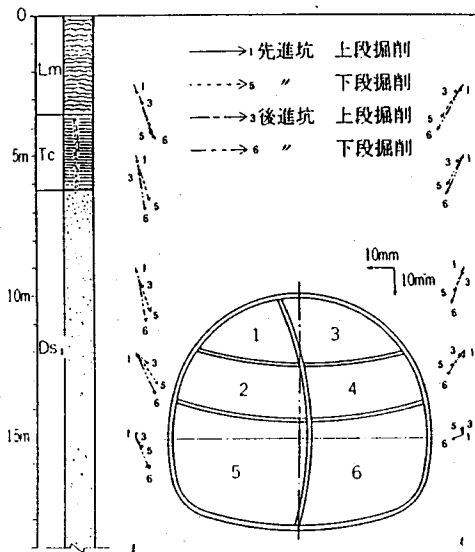
図-7はCD工法とCRD工法の各掘削断面到達時における地表面沈下量をグラフに示したものである。横軸は最終閉合までの掘削工程を示しており、掘削形状、閉合形状及び掘削断面積の複合関数と考えて両工法の比較を行うものとする。

測定結果によると、CD工法区間の地表面沈下量は緩急の増加を繰り返して最終値に至り、かつその絶対値も大きい。特に先進坑及び後進坑の下段(③、⑥)掘削時に急激な増加を示し、最大25mm程度の増加となっている。この値はCRD工法の最終地表面沈下量にほぼ匹敵している。また先進坑下段掘削時から後進坑上段掘削(③—④)にかけて急激な増加を示しているのも大きな特徴である。これらのことからCD工法では、

- i. 六分割施工ではあるが、掘削段階毎の仮閉合がなされないことから周辺地山に与える影響が大きい。(各坑が下段まで掘削されて始めて掘削断面が閉合される。)
- ii. 掘削段階において、左右に分割された縦長の形状



地中変位(ベクトル図) 9k 190m (CD工法)



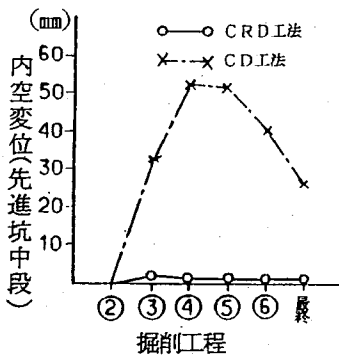
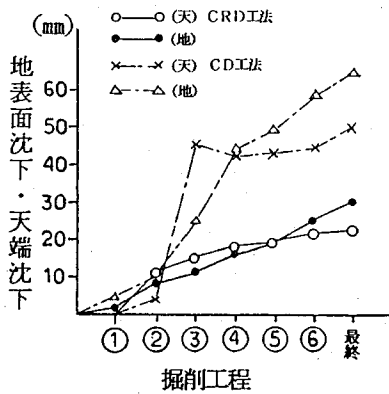
地中変位(ベクトル図) 9k 210m (CRD工法)

図-9 地中変位(ベクトル図)

となるため、側圧の影響を受けやすく地山抑止効果が小さい。

等の理由により大きな地表面沈下量の発生を見たものと考えられる。

一方、CRD工法区間の地表面沈下は各断面の掘削毎にはほぼ直線的に増加して最終値に至り、その絶対値も小さい。これは各掘削断面毎に仮閉合するため支保の内圧効果が早期に発揮され、掘削に伴う周辺地山の応力再配分がスムーズに行われることにより地表面沈下量が減少



図一〇 掘削工程と天端沈下及び内空変位

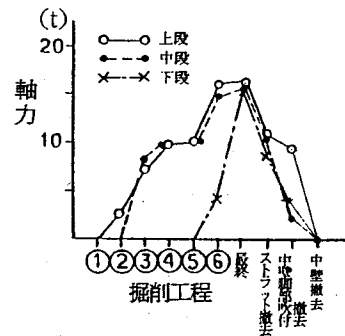
しているものと考えられる。

さらに CRD 工法では地表面沈下量は各断面の掘削毎に直線的に増加することから、掘削の初期段階で最終沈下量が予測できることになり、支保の増減や補強が早期に行えることとなる。このことはトンネルの安全かつ経済的な施工に大きく寄与するものと考えられる。

図一八は、トンネル横断方向の地表面沈下曲線及び測点間の沈下量の差から求めた沈下勾配を示している。掘削による地表面への影響は、絶対値にかかわらず両工法ともトンネルセンターから左右 15 m～20 m に及んでいるが、これは崩壊角 ($45^\circ + \phi/2$) による影響範囲とほぼ一致している。しかしながら沈下勾配について見ると、CD 工法では最大 6.0×10^{-3} rad と周辺建物の沈下勾配の許容値¹⁰⁾である 2.0×10^{-3} rad をはるかに超えているのに対し、CRD 工法では最大 2.3×10^{-3} rad と滑らかな勾配となり、ほぼ周辺建物の沈下勾配の許容値に近い値となっている。

(3) 地中変位特性

図一九は多点式地中変位計と傾斜計より求めたトンネルセンターから左右 6 m 離れた地点での地中変位を示したものである。鉛直変位は絶対値にかかわらず両工法ともトンネル肩部より上部の地山で大きく発生しており、トンネル上部の地山が変位していることを示している。



図一〇 掘削工程と中壁支保工の軸力

水平変位は両工法ともトンネル中段付近が大きくなっているが、CD 工法では約 20 mm 発生しているのに対し CRD 工法ではその 1/2 程度となっている。このことは CRD 工法が耐側圧性に優れ、地中変位の抑止効果が大きいことを示している。

(4) 天端沈下・内空変位特性

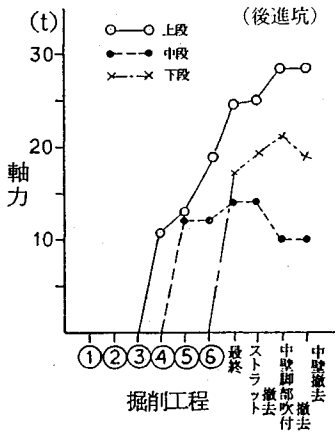
図一〇に両工法の代表断面における計測結果を示す。図の内、天端沈下の測定結果を見ると、掘削段階に従ってスムーズに天端沈下が進行する CRD 工法に比べ CD 工法は、先進坑の掘削の範囲内、特に下半③断面の掘削時点で大きく沈下が進行する特異な傾向を示している。また、沈下量の絶対値も大きく異なっており、CRD 工法の 21 mm に対して CD 工法は 2 倍以上の 51 mm となっている。

図一〇の内空変位は先進坑中段での水平相対変位を示しているが、数 mm オーダーにとどまる CRD 工法に比べ、CD 工法では 50 mm 以上にもおよぶ変位が計測されており耐側圧性の違いを見る事ができる。このように掘削断面毎に閉合を繰り返す CRD 工法では、掘削による応力再配分がスムーズに行われるのに対して、CD 工法では、天端沈下を含む内空変位の内、特に水平成分の有効な制御が行えないため周辺地山のゆるみを誘発し、これに起因して地表面沈下が増大するものと考えられる。

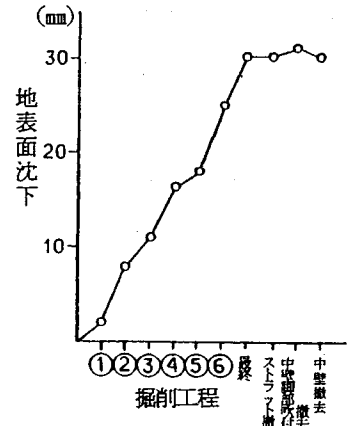
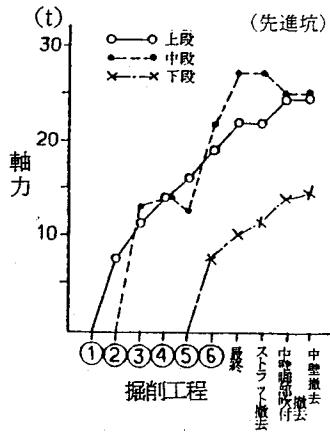
(5) CRD 工法による中壁の挙動と特性

掘削段階および中壁撤去手順毎に発生する中壁鋼製支保工の軸力は、図一〇から明らかなように、中段④や下段⑥の仮閉合で一時的な定常状態に達するが全体として、掘削最終時まで各掘削断面毎にはほぼ直線的な増加傾向を示している。また、図一〇に示す外周支保工軸力と掘削工程との関連、さらに図一〇に示す地表面沈下量と掘削工程との関連をみても、これと同様な傾向が認められる。

中壁と外周支保工に作用する軸力を掘削最終時の値と比較すると、先進坑側では上段、中段、下段の平均値で 20 t (196 kN)、同様に後進坑側の平均は 18 t (177 kN)、



図一12 掘削工程と外周支保工の軸力



図一13 掘削工程と地表面沈下

これに対する中壁の平均は16t (157 kN), と全体的にみて、ほぼ三等分された軸力がそれぞれの支保工に作用する結果が得られている。これは、中壁の撤去時の応力再配分を考慮して、中壁に過度の応力を与えないという設計思想を満足するものである。しかし、この応力バランスが適正であったかどうかの判断は、次に述べる中壁撤去実験に伴う支保工および地表面沈下の反応によって判断されるべきものと考えられる。

撤去実験は除荷に伴う応力再配分の影響を確認しながら安全に進めるため中段ストラット撤去、中壁脚部の吹付けコンクリート撤去さらに中壁支保工撤去と3段階で計測を行いながら実施した。図一11に従い撤去過程を追うと、掘削終了時に中壁に作用していた軸力の平均値16t (157 kN) が、ストラットを撤去することによって10t (98 kN), 次に脚部の吹付けコンクリートを撤去する事によって5t (49 kN), さらに中壁を撤去する事によって零となる除荷過程を確認できる。この中壁撤去による外周支保工への影響を図一12で見ると、中壁支保工の平均軸力16t (157 kN) の除荷に対して、先進坑側の外周支保工の軸力増分は、上, 中, 下段の平均で1t (10 kN), 後進坑は同じく2t (20 kN) と中壁の除荷軸力に比べて微増にとどまっている。この傾向は図一13に示す地表面沈下量と掘削工程との関係においても同様で、中壁撤去に伴う地表面沈下の進行は、ほとんど認められない。このように、外周支保工が完全に閉合された安定した構造系で仮設材である中壁の撤去を行うことによって、トンネルの安定および地表面沈下に懸念されるような影響を与えないことがわかった。

以上の結果から CRD 工法における中壁の機能をまとめると次のようになる。

- ①各掘削断面毎に仮閉合することにより支保と地山は一体化して作用し、変位を抑止する効果をもつ。
- ②中壁およびストラットは掘削過程の変位を引き起こし

やすい状態で荷重を分担し、全断面閉合後の安定した構造系で撤去することにより地山の安定性の増加と変位の抑止に大きく寄与する。

③外周支保と中壁支保は、剛性比および形状を考慮することによって適正な軸力バランスを設定することができる。また、適切な撤去手順を踏むことにより応力の再配分を確認しながら安全に撤去作業を進めることができる。

5. 盛土層下における CRD 工法の適用

(1) 地質概要

洪積砂層中における CRD 工法の有効性について前章までに検証してきた。本章においては極めて劣悪な地質条件下における CRD 工法の適用性を論述するものである。

盛土区間中の地質は図一14に示すように下部からDs1層、沖積砂層、沖積粘土層と続きこの上に極めてルーズな盛土層が覆っている。トンネルはこの区間を4~8.5m程度の土被りで通過することとなり、この土被りの上部3~5mが盛土層となる。

ここで、各層の地質性状を記述すると次のとおりである。

盛土層: ローム層を主体としたN値5程度の層であるが、木根、ヒューム管、コンクリートがら、ブリキ片等を混入しており、全体的にはルーズでかなりの空隙を有するものである。

沖積粘土層: 黒色で多量の草木根を混入する含水比の高い、いわゆる腐食土層と凝灰質粘土からなり、厚さは2m程度である。また、変形係数は小さく、凝灰岩質粘土部分では40 kgf/cm² (3.9 MN/m²)程度、腐食土部分では15 (1.5)~20 kgf/cm² (2.0 MN/m²)程度となっている。

沖積砂層: 含水比が高く、粘土分の多い砂層であり谷

部低部に位置し、洪積砂層に連なる。N値は6~8程度、変形係数は150 (14.7)~200 kgf/cm² (19.6 MN/m²)程度であり、洪積砂層に比しその値はかなり小さい。

また、9k420m付近から起点方は閑静な住宅地で終点方(立坑方)は日大グラウンドとなっている。

(2) 補助工法の併用によるCRD工法の採用

CRD工法が地表面沈下量の抑止に有効な掘削工法であるとは言え、前述のような地山性状と土被りの区間では、何らかの有効な補助工法との併用が必要と考えられた⁶⁾。補助工法は地山の改良を第一義に考えた結果、薬液注入を実施することとしたが、十分な変形係数を有する下部については注入を省略した。

グラウンド下の区間に比し、より制約の厳しい住宅地区間の施工にあたってはトンネル直上部にある家屋の一時移転を基本条件に、開削工法についても検討を行ったが幹線街路のない閑静な住宅地内での施工となるため大型機械を用いた地上部での工事施工が困難であり、基本的にCRD工法を用いたNATMとすることとした。

なお、同区間で実施する補助工法は施工が先行するグラウンド下区間での結果をもとに決定することとした。

(3) グラウンド下区間の施工と沈下量

トンネルの一次支保パターンを図-15に示す。基本的には実験工区のCRD工法と同様であるが、地山改良を目的にトンネルの上半部の外周に厚さ2.0mの薬液注入工法を採用している。粘性土には水ガラス系懸濁液型を砂質土には水ガラス系溶液型を使用している。

図-17は、グラウンド下の施工に伴う地表面沈下と天端沈下の収束値をトンネル位置毎に図示したものである。図の左端がトンネルの発進立坑であり右方向に進行したことを示している。この図から明らかなように、掘削の進行に伴い地表面沈下および天端沈下とも徐々に進行し、9k490m付近でそれぞれ98mm、50mmの最大値を記録している。このように、測定結果は弾性地山の挙動とは逆に、地表面沈下の方が天端沈下よりも大きな値を示している。このことは、この付近の地形地質の特殊性によるものと判断される。図-14に示した地質図から明らかなように9k570m付近から開析谷の斜面部に入り、9k530m付近では最大厚5mの盛土に覆われる開析谷となっていることから、天端沈下に比べて地表面沈下が大きいのは、盛土層の圧縮によるものと考えられる。このことは、地表面沈下の値が、概ね20mm~30mm以内となっている実験工区や他工区の実績と比較して、大きく異なる値を示す点からも想定される。

(4) 住宅団地下区間の施工と沈下量

グラウンド下の施工においては最大100mmにもおよび地表面沈下量を記録したが、地表部がグラウンドとして使用されていることから、土地利用上の影響はほとんどなかったが、グラウンドから起点方の住宅地下の施工

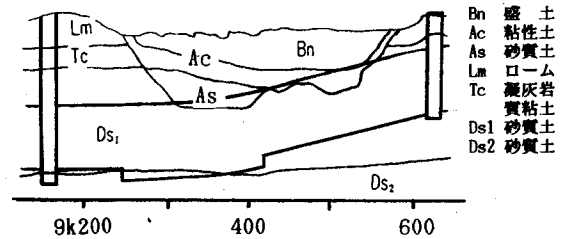


図-14 盛土層区間地質縦断面図

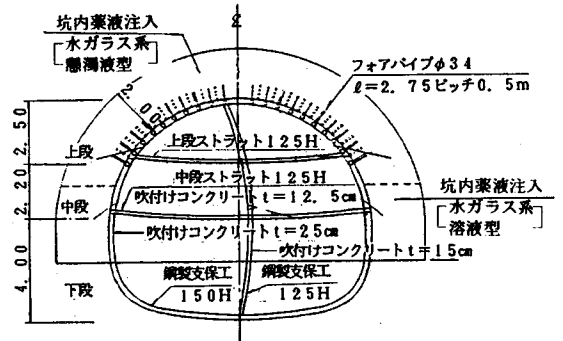


図-15 グラウンド下の一次支保の設計

においては多大な地表部への影響が懸念された。このような状況から補助工法としてより信頼性の高い地表部からの坑外薬液注入に加え縫地ボルトを併用しCRD工法により施工することとした。この縫地ボルトはトンネル上方の地山の体積収縮の抑止を目的としたものである¹¹⁾。

図-16に、トンネルの一次支保および補助工法の設計を示す。縫地ボルトはトンネル縦横断方向とも1mピッチとし、断面内に8本配置している。さく孔はφ120mmとし、モルタル充填後φ32mmの鉄筋を挿入することとしている。深さは、上段掘削までの圧縮による地表面沈下をボルトの杭効果により抑止することと、上段掘削時の鏡の安定を目的に中段盤に30cm以上挿入することとした。また、ボルトは切断後吹付けコンクリート内に定着されることとなるので、切断によるボルト下端の解放直後に一時的に発生する状況下でのいわゆるボルトの吊り下げ効果による地表面沈下の抑止を目的とし、地表面に厚さ20cmの鉄筋コンクリート床版を設置し、縫地ボルトの頭部をプレートでこの床版に固定することとした。

薬液注入は、トンネル外周に厚さ2mで施工する他、盛土層内にも厚さ2.0mの注入ゾーンを設置している。また、この区間の施工管理値は、地表の構造物が全て木造住宅であることから、許容沈下勾配は5/1000radとし、トンネルセンター直上の許容沈下量を60mmと設定した。

a) 地表面沈下および天端沈下特性

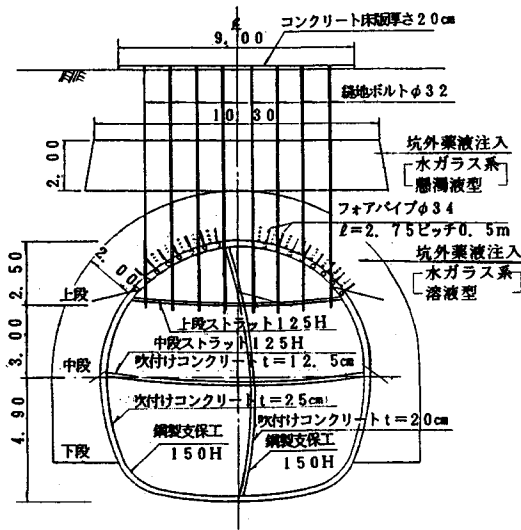


図-16 住宅地直下の一次支保の設計

図-18は、地表面沈下および天端沈下の収束値をトンネル縦断方向に示したものである。

地表面沈下量は、9k400mで最大55mmを記録したが、進行に従い小さくなり9k370m以降は40mm以内に収まっている。天端沈下も9k410mで最大39mmを記録したが、進行に従い小さくなり以後25mm以内に収まっており、Ds1層中のCRD工法とほぼ同等の値となっている。

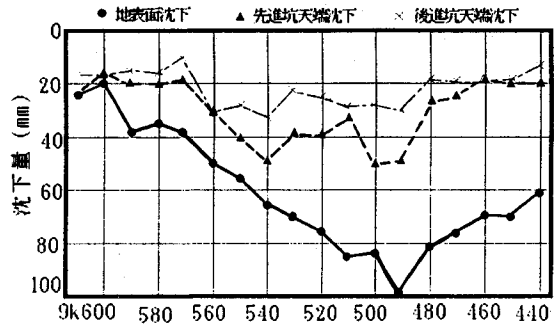
これらの値を、主たる圧縮層と考えられる盛土層厚と対比してみると、盛土層厚は9k420m付近から同400m付近までが約4mで以後徐々に薄くなり、9k350mで3mとなっている。これを図-17に示される9k520m付近から同470m付近の盛土層厚が5m程度の区間の平均地表面沈下量80mmと比較すると、地表面沈下量が盛土層厚に比例するものと仮定すれば、盛土層厚4mで $80 \times 4/5 = 64$ mm、盛土層厚3mでは $80 \times 3/5 = 48$ mm、両者平均では56mmの地表面沈下量が生じたものと推定される。これを実績と比較すれば縫地ボルトは6mm~20mmの地表面沈下量の抑止効果を発揮したものと考えられる。

なお、地表面への影響については、トンネルセンターから15m離れた位置のブロック塀に若干のクラックを生じた以外は、殆ど影響は見られていない。

以上のことからCRD工法は、極めて圧縮性の高い盛土層においても適用可能なことが明らかとなった。

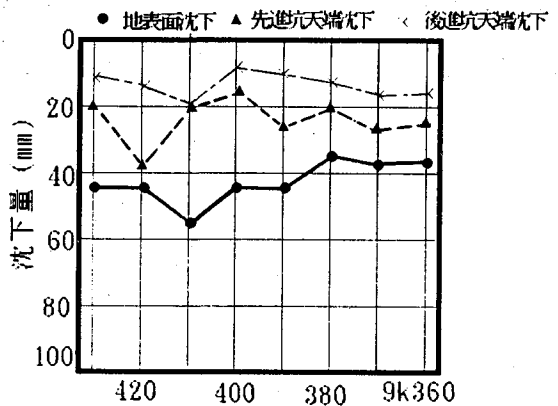
6. 結 論

本研究では、都市トンネルにおける最も重要な課題の一つである地表面沈下量の抑止を目的にCRD工法の開発を行い、詳細な現場計測を実施して同工法の有効性及



測定位置 (→掘削方向)

図-17 沈下図 (注入併用区間)



測定位置 (→掘削方向)

図-18 沈下図 (注入・縫地ボルト併用区間)

び現地適用性の検証を行った。実験はCRD工法開発の基礎モデルとなったCD工法と比較する形で進め、結果を取りまとめた。さらに、都市トンネルにとって極めて劣悪な地山条件と考えられる盛土層下において縫地ボルト等の補助工法を併用した施工を行い、CRD工法を適用しうることを検証した。

以下、本研究で明らかとなった点を列挙する。

① 洪積砂層におけるCRD工法による地表面沈下量は30mm程度であり、これはCD工法の1/2~1/3にあたる。

② 地表面沈下の分布から求められる横断方向の沈下勾配は最大でも 2.3×10^{-3} rad (CD工法では 6.0×10^{-3} rad)であり、建物の沈下勾配の許容値である 2.0×10^{-3} radをほぼ満足している。

③ 掘削段階毎の地表面沈下特性から、掘削断面の早期閉合が地表面沈下の抑制に極めて有効であることが確認できた。

④ 体積の圧縮性の著しい盛土層下においても、縫地ボルト等の補助工法を併用することにより地表面へ顕著

な影響を与えることなく施工できることが確認できた。

⑤ NATMでの施工は自由度が高く経済的であるとよく知られているところであるが、CRD工法においてもシールド工法等と比較してより経済的であり、断面変更にも容易に対応できた。

7. あとがき

以上述べてきたことから、都市トンネルの施工においてCRD工法は合理的で経済的な施工法の一つであることが実証された。そして適切な補助工法の併用によりその適用範囲はさらに広がっていくものと思われる。また、駅部等の大断面掘削においても中壁の挙動を応用した拡幅工法を採用することにより、より経済的で安全な施工が可能であろう。

本研究で明らかとなった点を総括すれば都市トンネルの施工において最も重要なことは「いかに掘削断面の早期閉合を図るか」、「いかにトンネル上部の地山を補強するか」に帰結すると考えられる。この観点からみればCRD工法もこの命題を克服するための一工法であり、今後、一層の技術開発により、より合理的で経済的な都市トンネルの施工法が生まれてくるものと考えられる。

おわりに、本論文の取りまとめにあたり貴重なご意見を頂いた神戸大学桜井春輔教授並びに山口大学清水則一助教授に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 斉藤公男・山本美博・堀田和久：未固結砂山におけるNATMの施工「奥羽本線大釈迦トンネル」, トンネルと地下, pp. 37~46, 1982年9月.
- 2) 高山博文・吉田義雄・木村光夫：未固結砂層を土かぶり浅くNATMで掘る「北総開発鉄道線栗山トンネル」, トンネルと地下, pp. 7~14, 1986年3月.
- 3) 藤森富雄・内山千代長・門倉邦雄：都市部の帯水砂層をNATMで挑む, 「千葉県国分川分水路トンネル」, トンネルと地下, pp. 17~26, 1984年12月.
- 4) 本多正人・坂田茂夫・岡野成敏：わが国初の中壁式(CD)NATM「都・町田市道真米トンネル」, トンネルと地下, pp. 29~37, 1984年3月.
- 5) 益田顕稀・菊池晋・林正彦：中壁工法による3車線トンネルの施工「東名改築の鳥手山トンネル」, トンネルと地下, pp. 15~19, 1987年10月.
- 6) 桜井春輔・足立紀尚：都市トンネルにおけるNATM, 鹿島出版会, pp. 7~9, pp. 25~57.
- 7) 足立紀尚・田村武・八嶋厚・上野洋：砂質地山トンネルの挙動と解析に関する研究, 土木学会論文集, 第358号, pp. 129~136, 1985年.
- 8) 横山章・高瀬昭雄：土被りの薄い未固結地山におけるトンネル掘削時の地山挙動, 土木学会論文報告集, 第352号, pp. 79~88, 1983年.
- 9) 土谷幸彦・高瀬昭雄：CRD工法で都市NATMに挑む「東葉高速線習志野台トンネル」, トンネルと地下, pp. 7~13, 1988年2月.
- 10) 建築基礎構造物設計指針：日本建築学会, pp. 156~163.
- 11) トンネル標準示方書(山岳編)同解説：土木学会, pp. 191~193.

(1992.5.28 受付)

EXPERIMENTAL INVESTIGATION WITH DEVELOPMENT AND APPLICATION OF TUNNEL EXCAVATION METHOD TO RESTRAIN SETTLEMENT OF SURFACE IN DILUVIAL FORMATIONS

Hiroshi FUJII, Mitsugi OKUDA, Toshio TOSAKA and Toshio ABE

In this paper, the characteristic of the CRD method developed to control the subsidence on the surface as one technique for loose ground was shown. And, the site experiment was clarified. As for the result and the amount of the site experiments, it has been understood to be able to restrain the subsidence on the surface to about 1/2 compared with the CD method. It has been recognized that the effect of control concerning the subsidence is large successfully. This method should be able to be applied to a shallow tunnel of the city part enough.