

CRD工法の開発と駅部大断面NATMへの適用 DEVELOPMENT OF CRD METHOD AND APPLICATION TO LARGE STATION SECTION IN DILUVIAL SAND

藤井 浩*・榑崎元儀**・松橋貞雄***・登坂敏雄***

Hiroshi FUJII, Motonori NARASAKI, Sadao MATSUHASHI, Toshio TOSAKA

Japan Railway Construction Public Corporation is now constructing Kitanarashino Station in Narashinodai Tunnel on the Toyo Transit Railway Line, a new railway line directly connecting to center of Tokyo.

For the construction of this tunnel and large underground station, CRD(Cross Diaphragm)-NATM is developed and adopted to minimize influences on road traffic and activities in and around the shopping mall. Because it is excavated in unconsolidated sand stratum formed in the Diluvium and the earth covering is only about 10m.

As the result, the ground surface settlement could be restrained and minimized.

Keywords : development of CRD method, excavation of large station section, settlement of surface, NATM, diluvial sand

1. はじめに

近年のトンネル掘削技術は、十数年前のNATM導入以来目覚ましい進歩を遂げている。特に、その原動力となったNATMは、その合理性、経済性から山岳トンネル工法の標準工法として定着したのみならず、都市トンネルにも数多くの実績をあげ、さらには従来はシールド工法や開削工法の範疇とされていた都市部の含水未固結砂層におけるトンネル掘削にも適用されるようになってきている。

しかしながら、都市トンネルの最重要課題である地表面への影響の抑止という面においてはまだまだ改良の余地が残されているのが現状である。本文は、この地表面への影響の抑止という観点から、従来の地表面の抑止に有効とされていたCD工法(Center Diaphragm工法の略)を基礎に開発したCRD工法(Cross Diaphragm工法の略)の特性について述べるとともに、CRD工法を応用して施工した駅部大断面NATM(最大153m²)の施工結果について述べるものである。

2. CRD工法の開発経緯

図-1に営団地下鉄東西線の西船橋駅を起点とし、京成電鉄成田線の勝田台駅に至る東葉高速鉄道の中程

-
- * 正会員 日本鉄道建設公団 理事
 - ** 正会員 日本鉄道建設公団 関東支社長
 - *** 正会員 日本鉄道建設公団 関東支社 習志野台鉄道建設所

に位置する延長2,360mの習志野台トンネルの地質縦断面を示すが、このトンネルは船橋市東北部の洪積台地をを土被り10m前後で通過する典型的な都市トンネルであり、トンネル直上部は成熟した市街地の交通の輻輳する市道及び住宅地となっている。

トンネルの主な掘削対象地山は第四紀洪積世の成田砂層中のDs1層であり、未固結で細粒分の含有率が少なく均等係数が2前後と均質で崩壊しやすい地質である。そのうえ地下水位がトンネルクラウン部に位置することから流砂現象が懸念され地下水処理が不可欠であった。

このような地形・地質状況のなかでトンネルの施工は開削工法で計画したが、周辺状況から極めて困難と判断せざるを得ず、シールド工法若しくはNATMによる施工を選択することとなった。このため両者の施工性や経済性の比較検討を行い、総合的にNATMが有利と判断した。しかし、NATMにおける従来の施工法では地表面沈下は60mm程度に及ぶものと想定され周辺構造物への影響を考えた場合の許容沈下量30mmに抑えるのは困難と考えられたため、地表面沈下の抑止に有効な工法の開発が必要となり試験工区を設けてCD工法とCRD工法の試験施工を行ったものである。

3. 現場試験

3・1 CD工法、CRD工法の設計

CD工法及びCRD工法の設計を図-2, 3に、CD工法及びCRD工法の施工順序を図-4, 5に示す。

CD工法の基本設計は過去の事例を参考に、鋼製支保工は外周を150H、中壁を125Hとし、吹付けコンクリートは外周を20cm、中壁を15cmとした。

ここで、中壁は将来の二次覆工施工時には撤去する必要があることから、撤去時に柱としての機能が強く残らないよう湾曲させるとともに外周支保工より1ランク剛性の低い支保工としている。

掘削は、最初に先進坑を3段ショートベンチカット工法により掘削し、次いで後進坑を先進坑同様に3段ショートベンチカット工法で掘削することとした。この結果、最終閉合は先進坑上段から30m後方で行われることとなる。

一方、CRD工法の設計思想はCD工法の水平方向の耐力を向上させるとともに掘削断面の早期閉合を図ることを基本にしている。このため、上段及び中段に125Hのストラットを配し、さらに中段盤を吹付けコンクリートで仮覆工することとした。外周と中壁の支保工はCD工法と同一である。掘削は、最初にCD工法同様に先進坑の上段、中段を掘削した後、先進坑下段の掘削前に後進坑の上段、中段を掘削してトンネル上半部の仮閉合を行うこととした。次いで先進

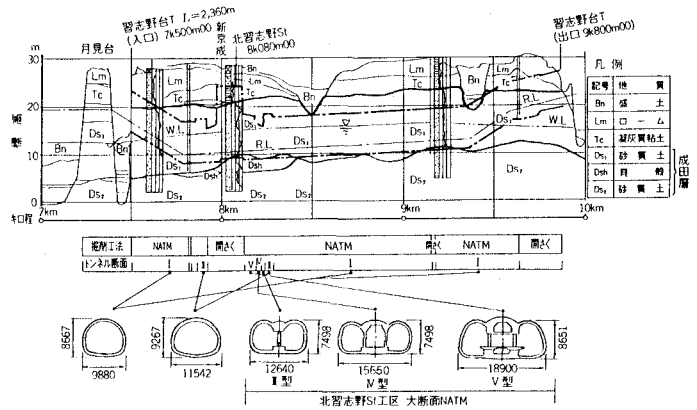


図-1 習志野台トンネル地質縦断面

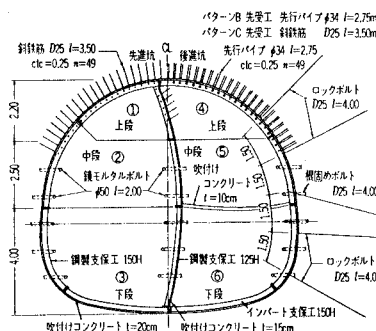


図-2 CD区間支保

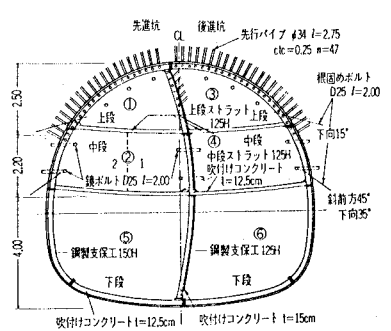


図-3 CRD区間支保

坑の下段、後進坑の下段と掘削することとし先進坑の下段掘削時に後進坑の下段部の地山が沈下に対する支えとなることを期待した。また、各切羽位置は相互干渉を考慮して離隔を最低2m確保するとともに最終閉合を出来るだけ早くすることとし、先進坑上段から15m後方の位置で最終閉合となるよう設定した。

3・2 地表面沈下特性

試験工区掘削終了時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を、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工法掘削による先方及び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間を取り上げることとする。

図に示すように、CD工法区間では60~85mmの地表面沈下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。両工法区間の地形・地質等の試験環境は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の差は両工法の特徴によるものと考えられる。

図-7, 8はCD工法とCRD工法の各断面到達時(掘削順序毎)の地表面沈下量をグラフに示したものである。

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の増加となっている。この値はCRD工法の最

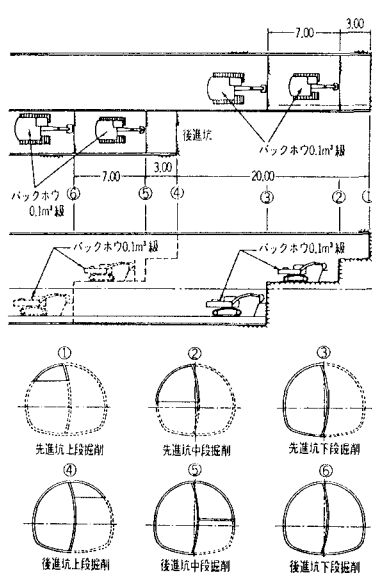


図-4 CD区間掘削順序図

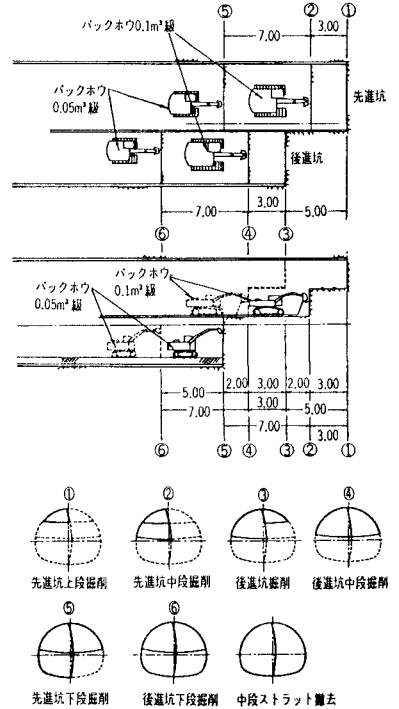


図-5 CRD区間掘削順序図

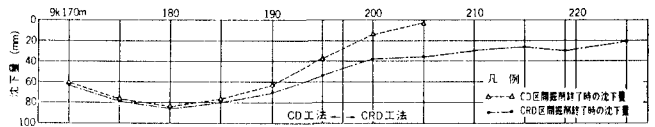


図-6 地表面沈下断面分布

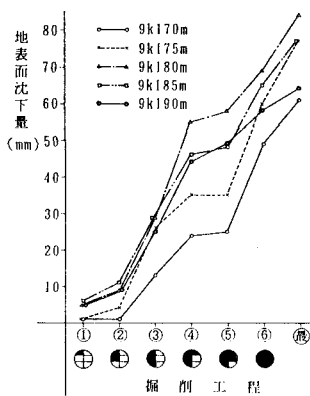


図-7 CD工法の掘削工程と地表面沈下量

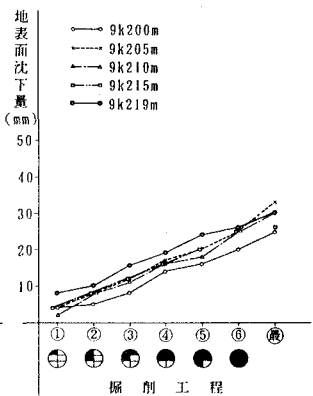


図-8 CRD工法の掘削工程と地表面沈下量

終値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、

- (a) 6分割施工ではあるが、施工段階毎の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。(各坑の下段掘削により始めて掘削断面が閉合される。)
- (b) 各坑の下段掘削により掘削断面は閉合されるが、縦長で側圧の影響を受けやすい形状であるため断面閉合による地山抑止効果の発生時期が遅くかつその効果も小さい。

等の理由により大きな地表面沈下量の発生を見ているものと考えられる。

一方、CRD工法においては各掘削断面毎に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。

このことは、CRD工法においては各断面毎に閉合していく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が減少しているものと考えられる。

図-9, 10はトンネル横断方向の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15~20mに及んでいるが、これは崩壊角(45° + φ/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 × 10⁻³radと周辺建物への許容沈下勾配である2.0 × 10⁻³rad(建築基礎構造物設計基準)をはるかに超えているのに対し、CRD工法では最大2.3 × 10⁻³radと滑らかな勾配となり、ほぼ周辺建物への許容沈下勾配に近い値となっている。

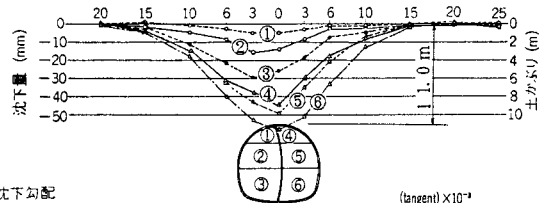
3・3 試験結果によるCRD工法の評価

前項ではCD工法とCRD工法に地表面沈下特性について述べたが、試験施工から得られたCRD工法の特性及び有用性について取りまとめると以下の様になる。

- (a) CRD工法は各加背割毎に閉合していくので地山に与える影響が小さく、地表面沈下量もCD工法の1/2~1/3に抑えることができる。
- (b) 掘削形状(閉合形状)の地山に与える影響は非常に大きいので、加背割にあたっては閉合形状の慎重な検討が必要である。
- (c) 断面の早期閉合は周辺地山の安定に極めて有効である。

なお、実際の道路下での施工においてはCRD工法を採用するとともに、さらなる地表面への安全性を考慮してディーブウェル工法とトンネル上半部外周への厚さ2mの薬液注入(水ガラス溶液型)を併用し25mm以内の地表面沈下量とすることができた。

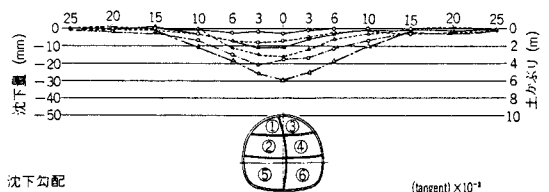
4. 駅部大断面NATMの施工



沈下勾配 (tangent) × 10⁻³

	左20m	左15m	左10m	左6m	左3m	CL	右3m	右6m	右10m	右15m	右20m
① 切羽到達時	0.2	0.2	0.5	0.3	0	0.7	0	0	0.6	0	0.3
②	0.2	0.4	1.0	0.7	0.3	1.3	0.7	0.5	0.2	0	0
③	0.4	1.2	3.5	1.5	1.3	2.3	2.3	1.5	0.8	0.2	0
④	1.2	2.0	4.3	2.3	1.7	5.3	4.0	2.5	1.4	0	0
⑤	0.6	2.4	4.5	3.3	2.0	5.0	4.7	3.8	1.2	0.2	0
⑥	0.8	2.6	5.5	5.0	1.7	2.3	6.0	5.0	2.2	0.4	0

図-9 9k 190m地点横断方向地表面沈下図(CD工法)



沈下勾配 (tangent) × 10⁻³

	左20m	左15m	左10m	左6m	左3m	CL	右3m	右6m	右10m	右15m	右20m
① 切羽到達時	0.2	0.4	0.5	0.3	0	1.0	0.5	0	0.2	0	0.2
②	0.2	0.4	1.3	1.3	0.7	0.7	1.0	0.3	0	0	0.2
③	0.2	0.4	1.3	1.7	1.0	1.7	1.0	0	0.6	-0.2	-0.2
④	0	0.6	1.8	2.0	0.3	1.0	2.0	1.3	0.8	0	0
⑤	0.2	0.6	2.0	2.3	1.0	0.3	1.7	1.3	1.0	-0.2	-0.2
⑥	-0.2	1.2	2.3	2.3	0.3	1.0	2.0	1.8	1.2	0.6	0

図-10 9k 210m地点横断方向地表面沈下図(CRD工法)

4・1 概要

習志野台Tは途中で新京成電鉄の直下を通過するが、この交差部には新京成との接続のため地下駅が計画された。都市部における地下駅等の大断面掘削は開削工法によるのが一般的であるが、当駅の新京成の駅前広場から続く道路下部の施工についても周辺環境から地下からの施工とならざるを得ず、最大153㎡にも及ぶ大断面のトンネル掘削となった。

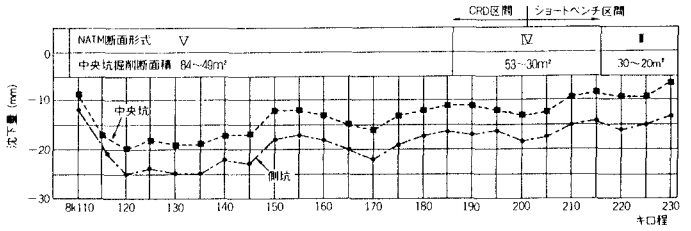


図-11キロ程（掘削断面積）ごとの地表面沈下量

地質状況は前述のとおり極めて軟弱で、加えて当区間ではトンネルの底部に透水性の極めてよい貝殻層（Dsh層）が出現することから、補助工法としてディープウェル工法とトンネル全周に亘る厚さ3mの薬液注入（水ガラス溶液型）を採用することとし、掘削方法はまず断面を高式ホーム構築部分の中央坑（84㎡）と両サイドの本線部分の側坑（34.5㎡×2）に大きく3分割することとした。そして施工順序は、最初に中央坑をCRD工法で掘削し、さらに中央坑の覆工を完了させたのち、すなわち中央部の剛性を高めたのち側坑を3段ショートベンチカット工法（上段、中段にストラット配置）で左右併進させることとした。

4・2 地表面沈下特性

駅部大断面区間のトンネルセンター直上の地表面沈下量を図-11に示す。

中央坑の施工完了段階では最大20mmの地表面沈下が生じ、側坑の掘削に伴い5~6mmの増加を見たが、累計で最大25mmと管理値30mm以内に収めることができた。また横断方向の沈下勾配も中央坑掘削時に最大で0.7/1,000程度、側坑掘削時に1/1,000（中央坑からの累計）程度であり周辺建物への影響のない範囲に十分収まっている。

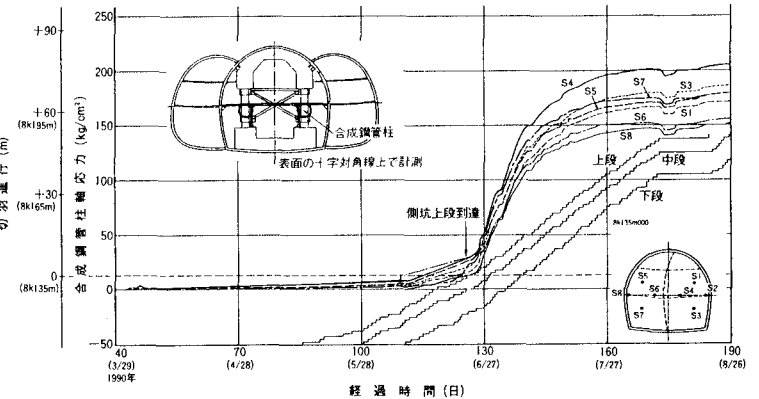


図-12中央坑合成鋼管柱軸応力の経時変化と切羽の進行

中央坑は島式ホーム構成部分で、トンネル掘削はホーム中央部から終端へ向かうため進行とともに断面は徐々に縮小していくが、掘削断面の減少に伴い地表面沈下量も減少していくという明瞭な相関がみられた。さらに、側坑の掘削断面はいずれの断面においてもほぼ同じ大きさであるが、側坑の掘削による増分は全区間をとおして6mm程度であった。なお、図-11において8k115m迄の地表面沈下が小さい値となっているが、この区間は発進防護のためのパイプルーフ施工区間である。

4・3 側坑掘削に伴う鋼製支保工、合成鋼管柱応力の経時変化

側坑の掘削により扁平な大断面が出現することになるが、この掘削により中央坑の完了に伴い安定した地山を再度緩めることになり、さらに側坑取り付け部以下の中央坑外周壁を切断することとなるのでトンネル及び周辺地山の挙動を把握することが極めて重要であった。このため側坑掘削前に合成鋼管柱にひずみ計を取り付けた。図-12, 13, 14は側坑の進行に伴う合成鋼管柱の軸応力と中央坑外周壁の鋼製支保工の軸力の経

時変化を示したものである。合成鋼管柱の軸応力は側坑の上段到達5m前から徐々に増加し、側坑の下段切羽の通過後20~30mで収束する。収束後の軸応力から合成鋼管柱の軸力を求めると500~600tf程度と考えられ、ほぼ中央坑直上の全上載荷重に相当している。

一方、中央坑外周壁の鋼製支保工には30tf程度の軸力が生じていたが、側坑の上段到達時から急減し始め下段が到達するときにはほぼ0となり、その後は安定している。これは合成鋼管柱の軸力の急増と全く反対の傾向を示すものであり側坑の掘削により中央坑外周壁が開放され、それに伴い合成鋼管柱に荷重が受け替わり、中央坑の外周支保工の役割が終了して安定した大断面が出現したことを示すものと考えられる。これは、その後の側坑覆工コンクリート施工時における中央坑外周壁撤去作業時に応力及び地表面沈下に全く変化が見られなかったことで実証されている。

5. おわりに

現場試験から判明したCRD工法の特徴とCRD工法を応用した駅部大断面NATMの施工結果について計測データを中心に述べてきたが、従来はシールド工法や開削工法の範疇とされていた都市部の未固結合水砂層においても適当な補助工法を採用することによりトンネルはもちろん大断面空洞掘削がCRD工法で十分可能であることが実証できたものと考えている。

これは今後益々増加すると考えられる都市部のトンネルや地下空間利用の要求に先駆的役割を果たすとともに施工法の選択の幅を大きく広げうるものである。特に、NATMの断面変化に容易に追従できるという特性は経済的にも施工的にも特筆に値するといえ、シールド工法との併用も十分考えられよう。しかし、適切な補助工法の選定という面においてまだまだ検討の余地が残されており、さらなる研究が必要と考えている。

最後に、本トンネルの施工にあたり多大なご指導、ご鞭撻を賜った習志野台T特別委員会の諸先生を始めとする関係諸氏にお礼を申し上げるとともに、本文が今後の施工の一助になれば幸いである。

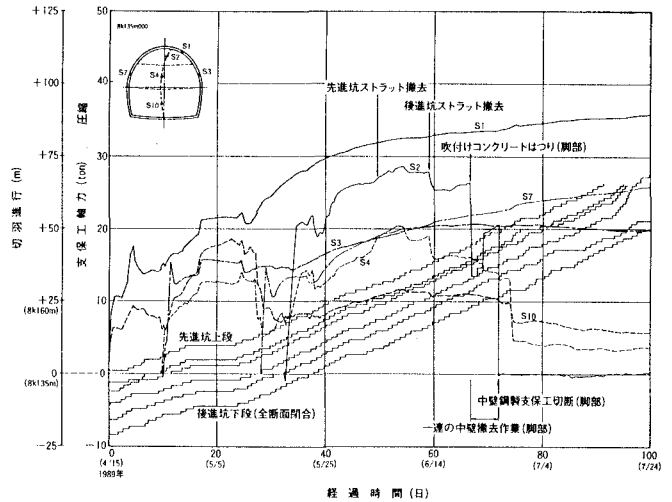


図-13 中央坑掘削時の鋼製支保工軸力の経時変化と切羽の進行

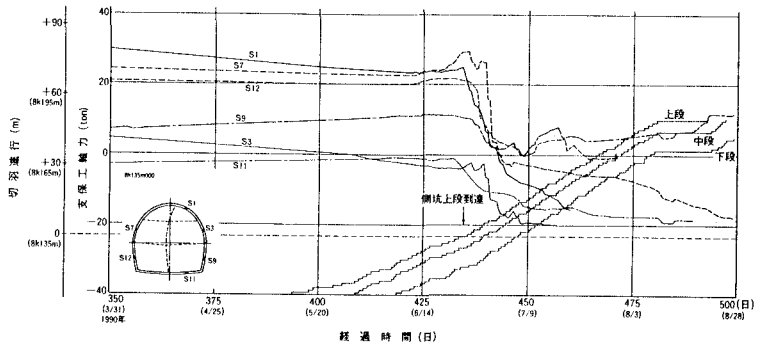


図-14 側坑掘削に伴う中央坑鋼製支保工軸力の経時変化と切羽の進行