

ニューマチックケーソンによる 高速道路トンネルの建設

CONSTRUCTION OF THE HIGHWAY TUNNEL FOR THE PNEUMATIC CAISSON METHOD

廣井 利行^{1*}・桑原 清²・三丸 英壽³・横山 真也⁴

Toshiyuki HIROI¹, Kiyoshi KUWABARA², Hidetoshi SANMARU³,
Shinya YOKOYAMA⁴

The Tokyo Outer Ring Road is about 85km road to which an area about 15km in radius is connected from the downtown of Tokyo. This project constructs the underground road tunnel (58m of extension) of the Tokyo Outer Ring Road which passes under the railway viaducts with pile foundation structures of the JR Sobu Line between Ichikawa and Motoyawata. To minimize the influence of railway viaducts, the construction of road tunnel were adapted the pneumatic caisson method. The underground road tunnel construction content is as follows. On both side of the railway viaducts, the caisson which is concrete box (width in 35.35m, length in 19.75m) as a underground tunnel is sunk. After receiving a existing viaduct in supporting piers based on a caisson box, a tunnel box is constructed under a viaduct and connects it with an existing caisson box. This paper describes the construction results of the pneumatic caisson under neighboring construction for railway structures.

Key Words : Pneumatic caisson, underground road tunnel, neighboring construction

1. はじめに

東京外かく環状道路は、都心から半径約 15km の地域を環状に結ぶ全長約 85km の道路となる。本工事は、千葉県区間のうち総武線交差部（市川～本八幡間）において、延長 58m のアンダーパスを新設する（図-1）。工事内容は高架橋両側の地中にニューマチックケーソン工法による函体（幅 35.35m, 延長 19.75m）をそれぞれ沈設し、この函体より既設高架橋を受替後、高架橋直下の函体を構築する（図-2）。

本稿では、ニューマチックケーソン（図-3）によるトンネルの設計施工の特徴的な事項と、営業線近接施工の影響検討および施工実績について報告する。



図-1 工事場所位置図¹⁾

キーワード：ニューマチックケーソン, 道路トンネル, 近接施工

¹ 非会員 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所 (E-mail:hiroi-t@jreast.co.jp)

² フェロー会員 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所

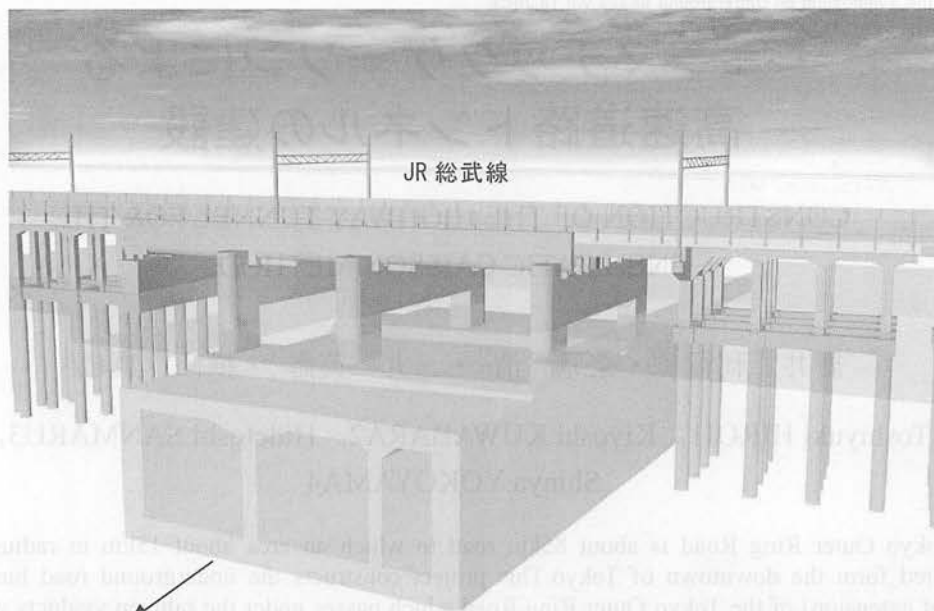
³ 非会員 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所

⁴ 非会員 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所

東京方面

JR 総武線

千葉方面



高谷方面

図-2 完成予想パース

平面図

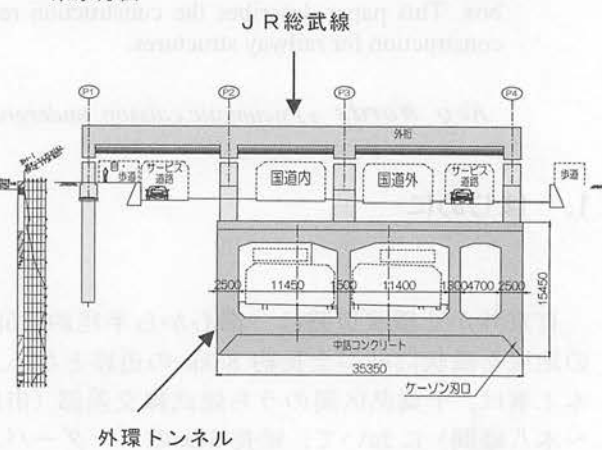
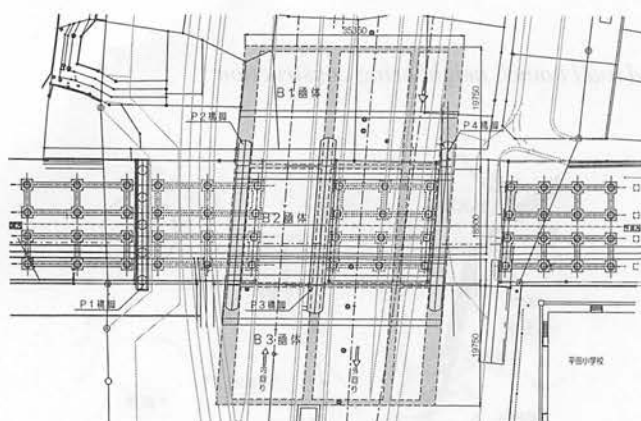
縦断面図

東京方面

千葉方面

東京方面

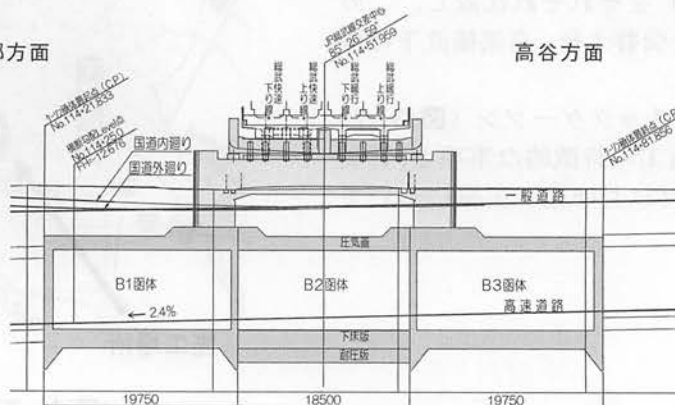
千葉方面



横断面図

三郷方面

高谷方面



ニューマチックケーソン工法
(対象箇所)

圧気工法

ニューマチックケーソン工法
(対象箇所)

図-3 工事概要図

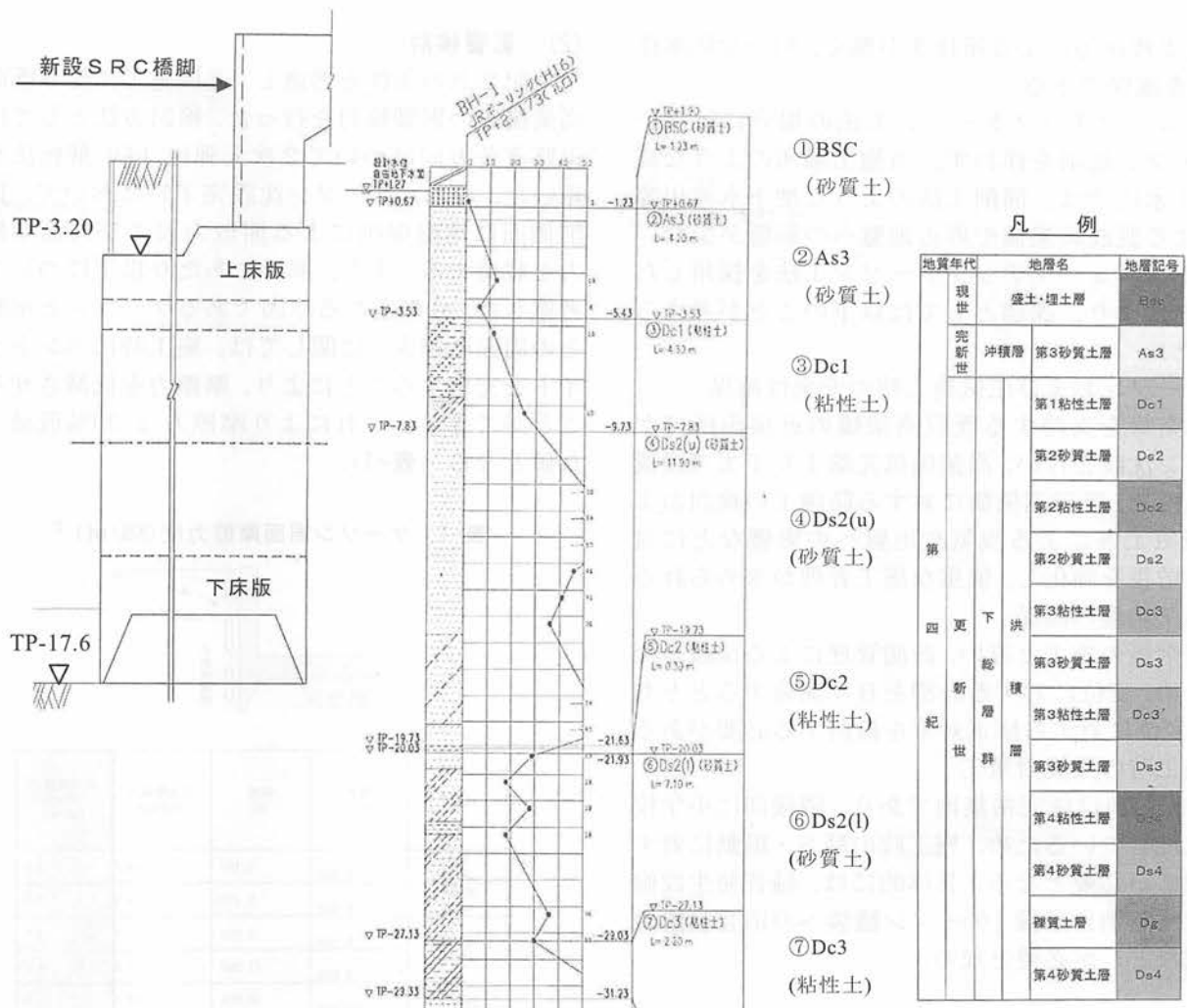


図-4 地質柱状図

2. 施工条件および設計

(1) 地質概要

施工位置の地質概要は、図-4の地質柱状図に示すように、GL-1.2m程度までは軟らかい盛土・埋土層、GL-5.4m程度までは沖積層で、シルトを不規則に混入する砂質土、それ以深は上総層と呼ばれる洪積層であり、硬い粘性土層と相対密度が中位～極密の砂質土層の互層となる。全般に貝殻片が混入している。また、地下水位はGL-0.8m付近にあり、上部のBSC層以外はいずれも被圧されている。

(2) 工事施工条件と比較設計

本工事の施工条件は次の事項である。

- 延長 60m にわたり鉄道構造物を大規模改築するため、営業線の安全性に与える影響が懸念される。
- 地下水位が高いため、地盤変状や地下水流出に伴う周辺への影響が生じやすい。

以上の施工条件に対し、鉄道高架橋の受替方法および地下函体構築方法の比較検討を行った。まず、鉄道高架橋の受替方法として、工事桁工法とアンダーピニング工法とを比較検討した。その結果、下記の理由によりアンダーピニング工法を採用することにした。

- 高架施工基面内作業がほとんどなく列車運行の安全性に優れる。
- 昼間作業が主体となり施工性、工期短縮性に優れる。

次に、地下函体構築工法として開削工法とニューマチックケーソン工法とを比較検討した。その結果、下記の理由によりニューマチックケーソン工法を採用することにした。

- 施工性において、地盤改良、仮土留壁、支保工等の仮設物の規模が小さい。
- 函体構築前に先行して既設高架橋を受替えるため、高架橋基礎杭の突出もなく（開削の場合には基礎杭が22m突出する）、近接する鉄道営業線への影響が少ない。

③仮支持杭等による箱抜きが無く、均一な防水性能を確保できる。

④ニューマチックケーソン工法の場合には深いオープン掘削を伴わず、当施工場所のような高地下水位では、開削工法のような地下水流出等による既設高架橋や周辺地盤への影響が少ない。なお、ニューマチックケーソン工法を採用したことにより、課題としては以下のことが考えられた。

①ケーソンおよび圧気施工時の安全性確保

営業線を支持する既設高架橋の近接箇所でケーソン沈設を行い、高架橋杭先端より下まで設置するため、既設高架橋に対する防護工の検討および圧気工事による洩気や地盤への影響などに対する監視を強化し、慎重な施工管理が求められる。

②施工精度の確保

開削後の施工と違い、計測管理による沈設となるため、変位に対する計測を日々実施するとともに、変位に対する修正対策を検討する必要がある。

③施工時の環境対策工

施工箇所は住宅密集地であり、隣接部に小学校が立地しているため、施工時の騒音・振動に対する配慮が必要となる。具体的には、騒音発生設備に対する消音設備（ケーソン艀装への消音装置の設置など）が必要となる。

3. 近接施工の影響検討

当該新設構造物は高架橋基礎との離隔が約2.0mであり、近接度合いの高い施工となる。よって、高架橋とケーソンの間に防護工（図-5）を行い、近接工事を行うことによる高架橋への対策工とした。但し、防護工自体は高架橋に対し注意範囲（Ⅱ）（図-6）であり、高架橋の計測を行い慎重に施工するものとする。本検討では、事前に施工時の高架橋の挙動を解析により把握し、健全性を確認した。

(1) 想定される既設構造物への影響

ケーソンの沈下が既設構造物に影響を与える要因としていくつか考えられるが、次の2点について検討を行った。

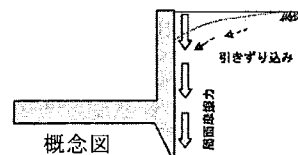
a) ケーソン沈設時の周面摩擦による周辺地盤の引き込み沈下。

b) フリクションカットによる周辺地盤の緩み。

(2) 影響検討

上記2点の条件を考慮し、近接施工に伴う既設高架橋への影響検討を行った。検討方法としては、線路直角方向について2次元弾性 FEM 解析法を用いた。なお、ケーソン沈設完了時において、掘削側面に地盤掘削による開放力および周面摩擦力を載荷する。また、解析にあたり以下について考慮した。a)の主たる原因であるケーソンと地盤との周面摩擦力²⁾に関しては、施工時にベントナイトを充填することにより、摩擦力を低減させることができる。これにより摩擦力は30%低減した値となる（表-1）。

表-1 ケーソン周面摩擦力度 (KN/m²)²⁾

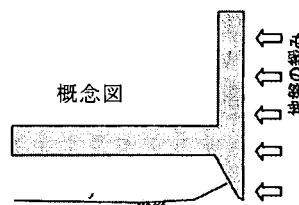


地層名	標高 (OP. m)	深度 (m)	周面摩擦力 (kN/m ²)	周面摩擦力 × 70% (kN/m ²)
細土 (Bsc)	0.000	2.100	14.0	9.8
砂質土 (As3)	-3.000	5.100	14.0	9.8
粘性土 (Dc1)	-5.900	8.000	5.0	3.5
	-9.500	11.600	5.0	3.5
砂質土 (Ds2)	-13.900	16.000	17.0	11.9
	-17.650	19.750	20.0	14.0

※基準地表面高はTP+2.100mとした。

次に、b)のフリクションカットによる周辺地盤の緩みについては、本ケーソンのフリクションカット幅は19mm（図-7）であるが、ケーソン沈設中はフリクションカットによる地盤との空隙に砂を入れることにより水平方向の地盤の緩み（空隙量）が低減される。普通土の体積変化率を表-2に示す。

表-2 普通土の体積変化率³⁾



分類名称	地山に対する体積比	
主要区分	ほぐした土量の 変化率A	締め固めた土量の 変化率C
レキ質土	1.20	0.90
砂および砂質土	1.20	0.90
粘性土	1.25	0.90

以上を踏まえ、ケーソン沈設に伴う影響検討として、高架橋軌道部の変位および縁切り防護工に対する強度検討を行った(図-8)。

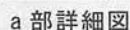


図-5 縁切り防護工図

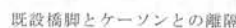
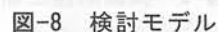
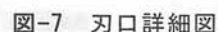


圖-6 近接影響区分圖⁴⁾



- 27 -

但し、無筋コンクリートの場合は、変状が発生した場合に土中であるために、確認および補修が困難である。よって、防護工全長にわたり、BH 杭（芯材 H-300×300×10×15）を配置した。また、芯材引き抜きの施工性を考慮し、セメントミルクの代わりに流動化処理土または泥水固化処理とした。

(3) 対策

先に述べた影響要因を低減させるための対策として、防護工を行った。防護工は既設高架橋橋脚より約 2m、ケーソンより 0.7m の位置に BH 杭（φ500mm、芯材 H300×300×10×15、L=19m）にて縁切りを行う。また、補助工として、ケーソンの傾斜を抑制し必要以上の緩みを防止するために、圧入アンカー工法を併用した。圧入装置は圧入姿勢制御用圧入桁を組立て、グラウンドアンカー（PC 鋼線 φ21.8mm、L=55.75mm、4 箇所／函体）を設置した。さらに、図-9 に示すように防護工による対策では、ケーソン沈下に伴う周辺地盤の引きずり込み防止（縁切り効果）を目的として、防護工の頭部をタイロッド（φ32mm、L=18.1m、全 15 本）で繋ぎ既設高架橋の変位を抑えることとした。

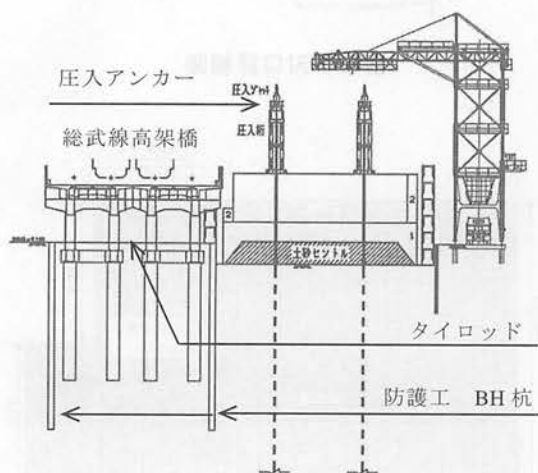


図-9 橋脚防護工断面図

4. 施工実績

(1) 施工設備

ケーソンの主要設備の概要は以下の通りである。ケーソンの掘削は、天井走行式ケーソンショベル（0.15m³ バケット）により行った。配置台数は、設備配置及び作業スペースの特性から 5 台とした。掘削土砂の搬出は、マテリアルロックが 2 基配置されることから、1 基は定置式（AB キャリ

ア）を配置し、もう 1 基は、艀装及び構築にも併用できるよう 90t クローラークレーンを配置した。図-10 に全体設備配置図を、表-3 に主要設備の数量を、写真-1 には設備配置状況を示す。

ニューマチックケーソンの沈設は、全沈下荷重と全沈下抵抗力のバランスを崩すことにより行う。ケーソン工法を計画するとき、沈下関係図を作成し全沈下荷重が全沈下抵抗力より常に大きくなる関係となるよう設計した。

ニューマチックケーソン工法の場合、刃口近傍までの掘削が可能なので、刃口抵抗力を考慮しないが、実際にケーソンを静止の状態から沈下運動に至らしめる過程は、掘削範囲を拡げ、徐々に刃口部の地盤抵抗力を減少させ、刃口部の地盤破壊と周面摩擦力を静止摩擦状態から動摩擦状態に変化させ沈下させる。これによりケーソンの姿勢は地盤の状態や掘削範囲に大きく影響を受ける。地盤が均一でなくとも、沈設時の姿勢の微細な制御をすることは、様々な方策（刃口支持部の掘削幅の調整、ケーソン外周への滑材の注入による周面摩擦力の低減）により可能となるが、沈設作業に多くの時間を要する。沈設時のケーソンの微細な挙動でも、周辺地盤を変形させ、その結果構造物変位を生じさせるため、極力挙動を制御しなければならない。このため本工事では、圧入システムを採用した。

圧入システムにより、ケーソンの沈下力を瞬時に変化させることが可能になり、自重（偏荷重）を短時間に变化させ、ケーソンの沈設制御を実施することが出来た。写真-2 に示す圧入システムは、①反力を得るためにケーソン側部に設けたグラウンドアンカー②センターホール式油圧ジャッキ（2940kN）、③圧入力をケーソンに伝達する鋼桁から構成されている。各ケーソン隅角部付近 4 点に設置した。

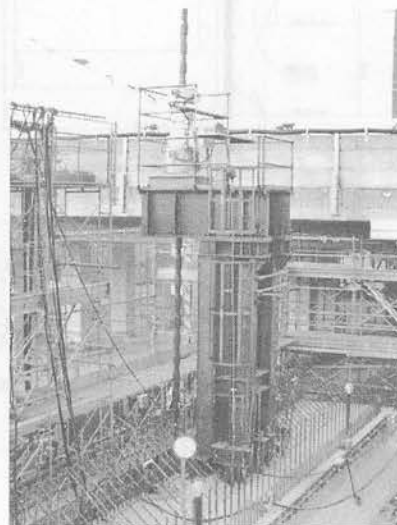


写真-2 圧入システム

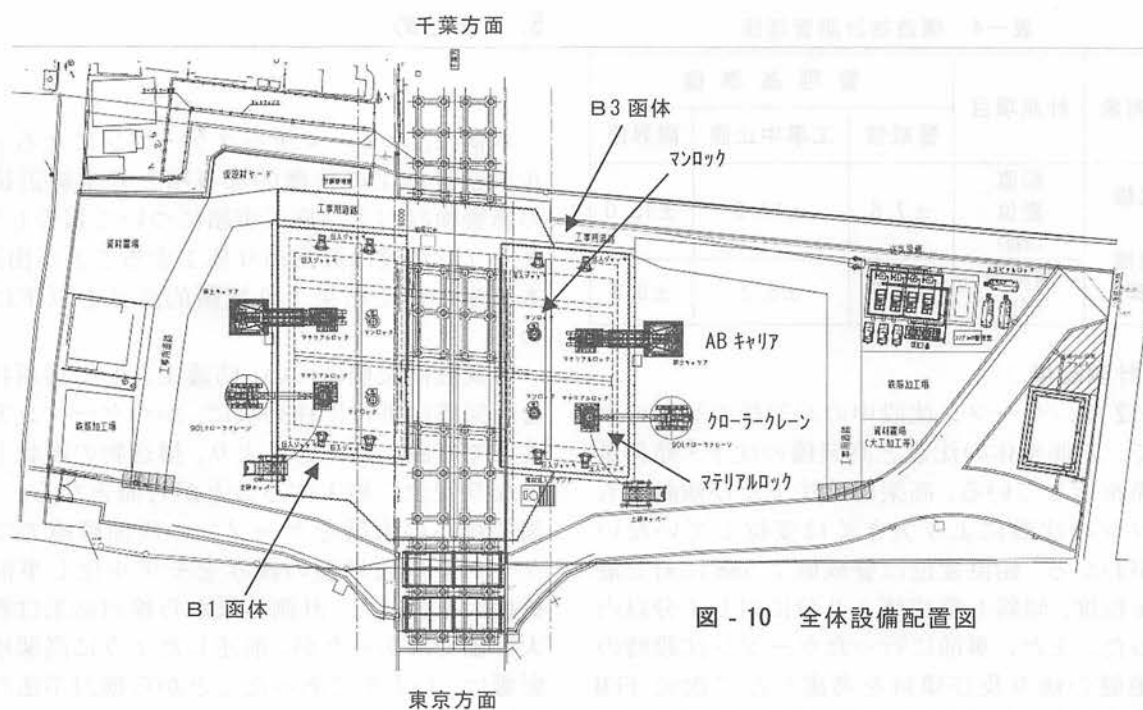


図 - 10 全体設備配置図

表 - 3 全体設備一覧

	函内ショベル(台)	マテリアルロック(基)	マンロック(基)	キャリア(基)	クローラークレーン(基)
B1 ケースン	5	2	2	1	1
B3 ケースン	5	2	2	1	1
合計	10	4	4	2	2

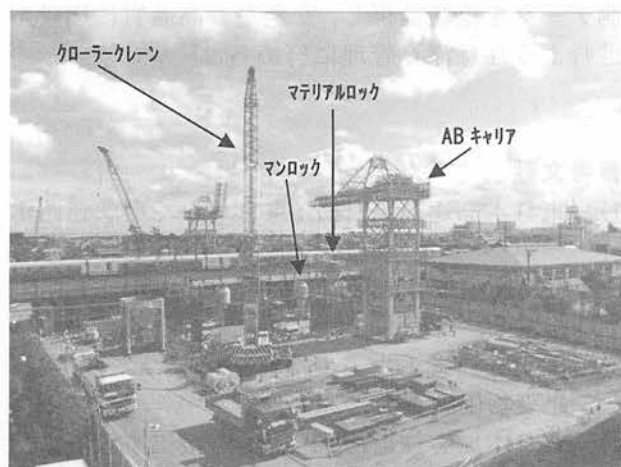


写真 - 1 設備配置状況

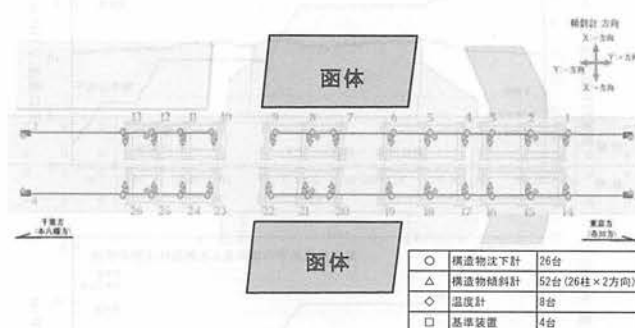


図-11 構造物計測計器配置図

総武線高架橋の両側でケースンが沈設されるため、隣接する高架橋の柱毎に計測器を配置した。沈下計は、水盛式とし、傾斜計は、橋軸方向、橋軸直角方向を計測するため、各計測点に2点設置した。計測は、計測の精度向上と影響要因の区別(温度等の影響)を明確にするため、ケースン施工より半年ほど前から計測を開始し、ケースン沈設完了まで3分毎にデータ収集を行った。

表-4 に計測管理基準一覧表を示す。沈下・傾斜の計測管理値は、軌道の整備基準値を基に定め、工事中止値＝整備基準値×0.8、警戒値＝整備基準値×0.5とした⁴⁾。

(2) 計測管理

ケースン沈設にともなう近接構造物の挙動を管理し、影響を与えないことを目的とし近接構造物の挙動計測を実施した。

なお、総武線の軌道変位を確認するための計測は、高架橋変位が軌道の変位に近似するとし、高架橋に沈下計と傾斜計を設置し測定を行った。図-11 に計測器の配置位置図を示す。

表-4 構造物計測管理値

計測対象	計測項目	管理基準値		
		警戒値	工事中止値	限界値
総武線 高架橋 橋脚	鉛直 変位 (mm)	±7.5	±12.0	±15.0
	傾斜量 (分)	±3.2	±5.2	±6.3

(3) 計測結果

図-12は、ケーソン沈設中の高架橋の挙動の例として、北側函体の沈設と高架橋の沈下・傾斜量の関係を示している。高架橋の沈下及び傾斜ともケーソンの沈設により大きくは変位していないことがわかる。鉛直変位は警戒値7.5mmに対し最大2mm程度、傾斜も警戒値3.2分に対し1分以内であった。また、事前に行ったケーソン沈設時の周辺地盤の緩み及び傾斜を考慮した二次元FEM解析の結果と計測結果を比較すると、実際の沈下量は1/3、傾斜量は1/4程度であった。これらの計測結果からケーソン沈設時の高架橋縁切り防護工として施工したH鋼芯材の柱列杭(H-300×300×10×15@500mm)の有効性がうかがえる。

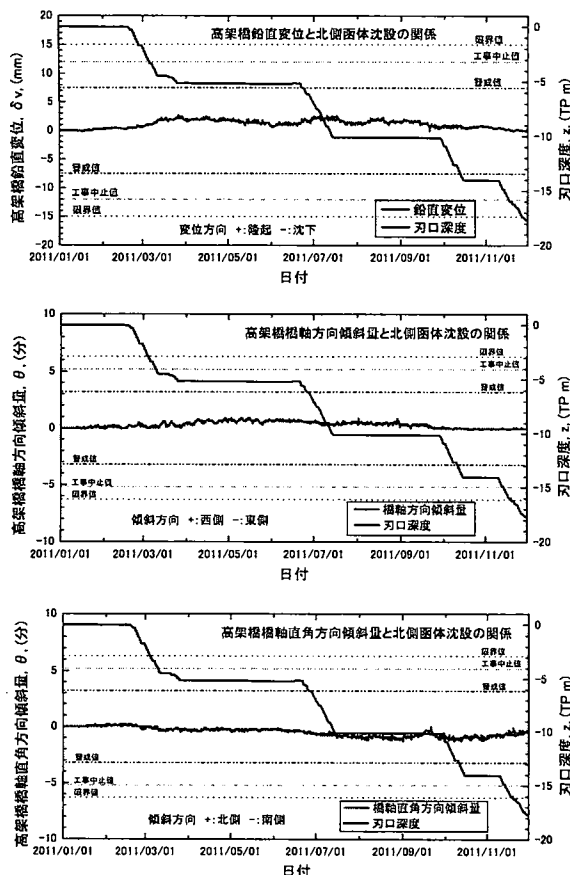


図-12 ケーソン沈設と構造物変位の関係

5. まとめ

本稿は、ニューマチックケーソンによるトンネルの設計施工の特徴的な事項と営業線近接施工の影響検討および施工実績について報告した。ケーソン沈設は計画通り施工することが出来た。本工事の施工結果より技術的所見を以下にまとめる。

a) 既設高架橋に沿い、防護工として場所打ち杭を高架橋に併行に柱列状に、かつケーソン刃口深度まで打設したことにより、構造物の変状も僅かとなり安全に施工することが可能となる。また、高架橋への影響をケーソンの周面摩擦力に加えケーソン周辺地盤の緩みをモデル化し事前に解析検討を行った。計測結果から検討結果は若干過大評価ではあったが、前述したように高架橋への影響は、わずかであったことから検討手法の妥当性が確認できた。

b) ケーソンの沈設制御を圧入システムで行うことで変位をコントロールすることが可能となり、計画位置での沈設を無事完了することができた。

今後は高架橋をアンダーピニング工法にて受け替え、両サイドの函体間を圧気工法にて掘削し、躯体を構築する。引き続き既設高架橋への影響観測データを継続監視し、安全かつ高品質に建設が進むよう注意深く管理に努める。

参考文献

- 1) 東日本高速道路(株)：東京外かく環状道路ホームページ
- 2) 道路橋示方書，下部構造編，PP. 300，日本道路協会，2002。
- 3) 国土交通省土木工事積算基準，2章，PP. 131，建設物価調査会，2005。
- 4) 東日本旅客鉄道株式会社，近接工事設計施工マニュアル，2008。