

洪積地盤におけるシールドトンネルの現地計測結果と考察

IN-SITU MEASUREMENT AND CONSIDERATION ON SHIELD TUNNEL IN DILUVIUM DEPOSIT

小山幸則*・岡野法之*・清水 満**・藤木育雄***・米島賢二***

Yukinori KOYAMA, Noriyuki OKANO, Mitsuru SHIMIZU, Ikuro FUJIKI and Kenji YONESHIMA

Interaction between ground and tunnel behavior is not clear, because the mechanism is very complicated. We measured about earth pressure, water pressure and sectional force acting on tunnel lining, at in-situ slurry shield driven tunnel in diluvium deposit. Then, we investigated about design load for tunnel lining.

Overburden at measured point is about 19m. Segments are corrugate type made of ductile cast iron and they are 350mm in height and 1,000mm in width.

Keywords : shield tunnel, slurry shield, in-situ measurement, diluvium deposit

1. まえがき

セグメントの設計法は各種のものが提案されており、特にセグメント構造自体のモデル化の研究については、多くの成果が発表されている。しかしながら、地盤とトンネルの相互作用モデルについての研究は、施工過程を考慮する必要があることをはじめ、シールドトンネルで生じる現象が複雑であり、現地計測や実験の困難さもあって、十分に進んでいないのが現状である。

そこで、シールドトンネルに作用する土圧および水圧を明らかにするための基礎データを収集する目的で、特に計測データの少ない、密閉型シールドにより施工された洪積砂層中のシールドトンネルにおいて、トンネルに作用する土圧、水圧および発生する断面力を測定し、作用荷重に関する検討を行った。

2. 現地計測の概要

2.1 計測工区

計測は帝都高速度交通営団7号線の本郷工区で行った。当工区のトンネルはセグメント外径9.8m、シールド外径10.0mの泥水式シールドにより施工された。計測地点は平面的には曲線半径 $R=180\text{m}$ の緩和曲線中であり、縦断的には35‰の勾配中にある。シールドの総推力は8,700tfで、裏込め注入はセメント系の水ガラス系可塑状型のものを半同時注入方式により施工された。

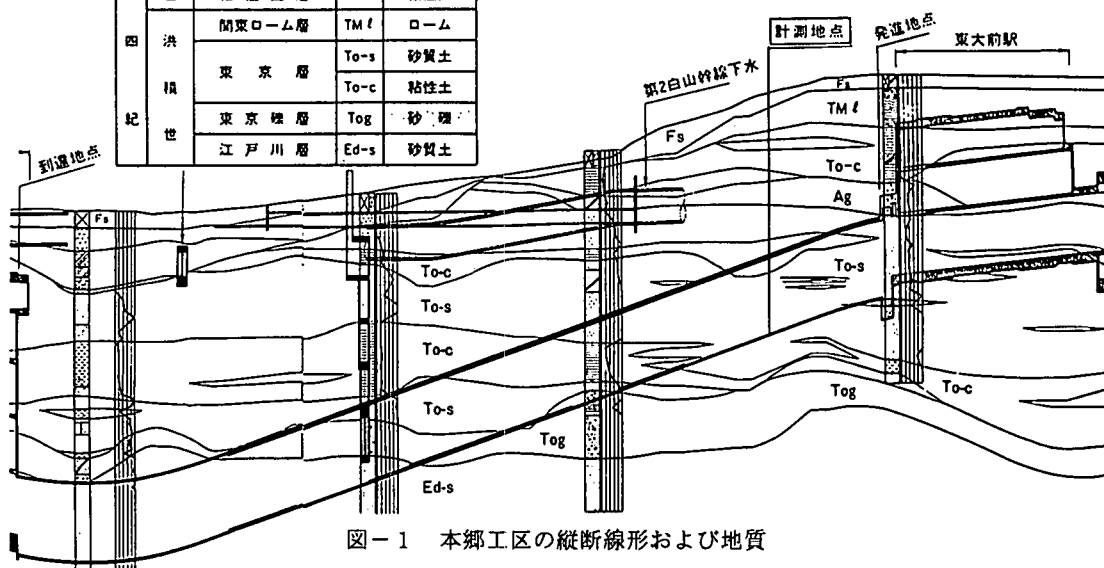
* 正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部

** 正会員 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部

***正会員 帝都高速度交通営団 建設本部

土質区分凡例

地質時代	地質名	記号	構成土質
第三紀	埋土層	Fs	粘性土 砂質土
	腐植土	AP	腐植土
	粘性土層	Ac	粘性土
第四紀	関東ローム層	TM l	ローム
	東京層	To-s	砂質土
	東京層	To-c	粘性土
	東京層	Tog	砂・礫
第四紀	江戸川層	Ed-s	砂質土



図－1 本郷工区の縦断線形および地質

2・2 地質

計測地点のトンネルの土被りは約19mであり、図－1に示すように、トンネルはクラウン部の東京層の粘土層（To-c）およびその下部の東京層の砂層（To-s）中に構築されている。トンネル切羽における地下水圧はシールド中心において約1.2kgf/cm²であった。表－1に東京層の粘土層および砂層の物性値を示す。

2・3 セグメント

計測地点のセグメントは桁高350mm、幅1,000mmのダクタイル鋳鉄製のコルゲート形セグメントであり、その断面寸法を図－2に示す。また、セグメントは10分割で、Kセグメントは半径方向挿入型である。

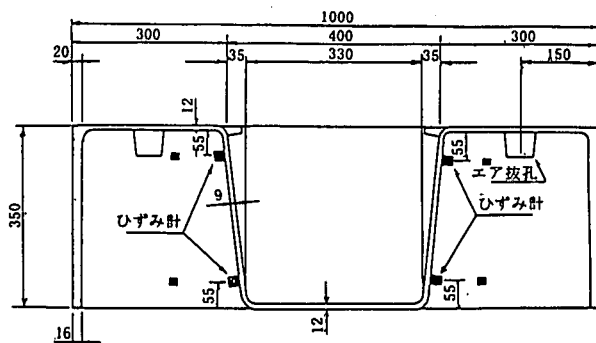
2・4 計測内容

計測項目を表－2に示す。

計測は、図－3に示すように3リングで行っている。No.1リングでは土圧計測および周方向と縦断方向の断面力測定を行い、No.2リングでは周方向の断面力測定を行い、さらに、No.3リングでは水圧測定を行った。トンネルの変形計測は各リングにおいて実施した。なお、断面力測定のためのひずみ計は図－2に示す位置に取り付けた。

表－1 東京層の物性値

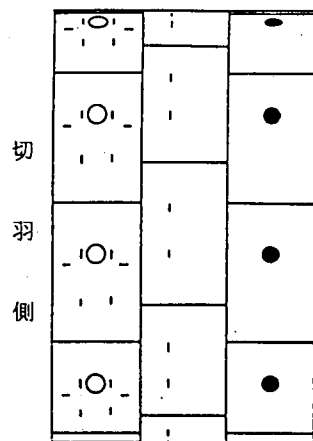
	東京層（To-c）	東京層（To-s）
含水比（％）	40～80	15～35
比重	2.64～2.68	2.67～2.78
湿潤密度（g/cm ³ ）	1.50～1.65	1.90～2.20
礫分（％）	0～1	0～17
砂分（％）	0～40	76～94
シルト＋粘土分（％）	60～100	6～24
粘着力（kgf/cm ² ）	0.90～1.85	—
内部摩擦角（°）	0～16	—
N値	10～15	20～50+



図－2 計測位置のセグメント寸法とひずみ計取付位置

表-2 計測項目および計測機器

計測項目		目 的	計測機器
外 荷 重	土 圧	・ 裏込め注入圧の作用状況の把握 ・ 地山荷重（全土圧）の作用状況の把握	ひずみゲージ式 土圧計
	水 圧	・ 地下水圧の作用状況の把握および 土圧計の検出値からの有効土圧の算出	ひずみゲージ式 水圧計
セ グ メ ン ト	主 桁	・ 裏込め注入圧および地山荷重による 主桁の発生応力度の把握 ・ 荷重とトンネル挙動の関連性の把握	箔ひずみゲージ
	縦リブ	・ ジャッキ推力の作用状況の把握 ・ 地盤剛性の推定	箔ひずみゲージ
トンネル 変 形		・ 荷重-応力度関係の照合 ・ セグメント組立精度の把握	スチールテープ



No.1リング* No.2リング* No.3リング*

	数量	No.
土 圧 計○	9 台	1
水 圧 計●	9 台	3
ひずみ計ー	72ヶ	1, 2

図-3 測定リングの配置
および計器の数量

3. 計測結果

3.1 セグメント組立時のセグメントリングの挙動

(a) セグメントリングの支持状態

シールド内のセグメント組立スペースには、クリアランス確保のためのスペーサーが設置されている。スペーサーは鋼製のプレートをテール部に溶接したものであり、これによりクリアランスは12~14mm程度確保されることになる。組立後の計測結果では、セグメントリングのクリアランスは約70mm程度であり、従って、セグメントリングはスペーサーには接しておらず、先行の隣接セグメントリングとシールドジャッキに支えられていると考えられる。

(b) トンネル周方向断面力

セグメント組立時のトンネル周方向の断面力を図-4に示す。

曲げモーメントをみると、ほとんどの測点で正の曲げモーメントが発生しており、分布はクラウンおよびインバート付近が大きく、スプリングライン付近ではゼロに近い値を示している。一方軸力は、1リングの断面内でも坑口側と切羽側で傾向が異なり、坑口側で引張力が卓越し、切羽側ではやや圧縮力が卓越している。

(c) トンネル軸方向断面力

セグメント組立時のトンネル軸方向の断面力を図-5に示す。

曲げモーメントは正曲げが卓越して

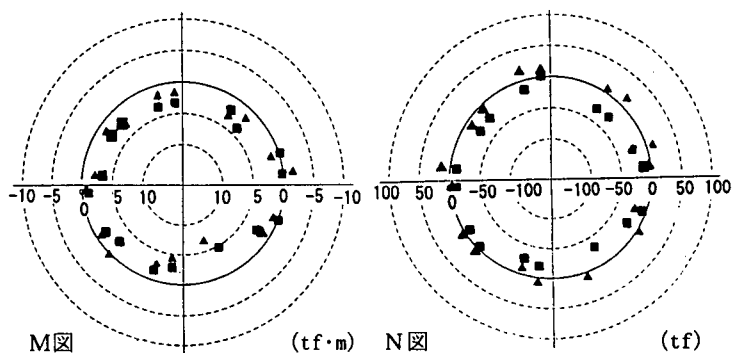


図-4 セグメント組立時のトンネル周方向断面力

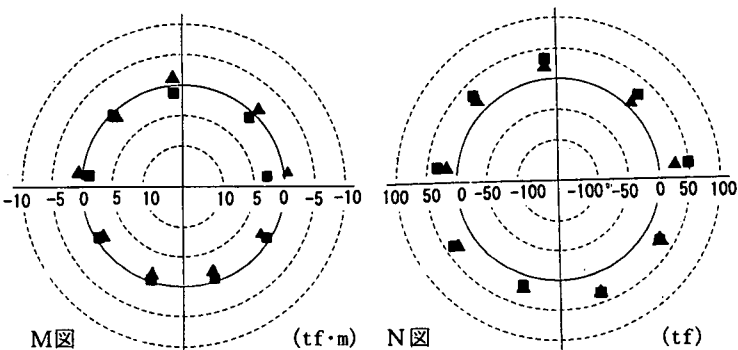
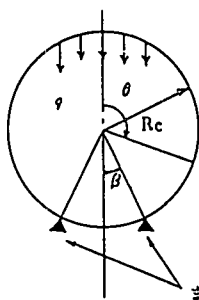


図-5 セグメント組立時のトンネル軸方向軸力

おり、また、坑口側ではほぼ均一な正曲げが発生しているのに対し、切羽側ではトンネル上半部に負曲げが発生していることが特徴的である。それに対し、軸力の分布は坑口側と切羽側の間に大きな差はなく、ほぼ均一な圧縮力が作用している。縦リブ1本当たりの平均軸力は26.65tfであり、縦リブ本数よりトンネルに作



g : リング周長当たりの自重
 R_c : リングの軸心半径
 β : テール内まぐら位置の中心間隔 (一般に 30°)

図-6 テール内におけるセグメント自重に対する従来の検討モデル

用している軸力を算出すると1,758tfとなる。これはこの時点でのジャッキ総推力 (1,883tf) にほぼ等しい。

以上のように、シールドテール内において、セグメントリングはテール脱出まで外荷重を受けず、シールドジャッキによる推力だけが作用していると考えられる。また、セグメントリングの支持状態は従来考えていたような状態 (図-6) ではなく、組立リングとシールドジャッキに挟まれ、テールから浮いた状態になっていると考えられる。

3.2 掘進および裏込め注入時のセグメント断面力¹⁾

(a) トンネル周方向断面力

計測リングより4リング先を掘進中に、計測リングの注入孔を使用して裏込め注入を行っているときの断面力を図-7に示す。曲げモーメントの分布形状は全体に正曲げが卓越している。特に大きな正曲げが発生している位置は裏込め注入位置とほぼ一致しており、注入圧の影響が顕著に現れていると考えられる。なお、このときの裏込めの注入位置は左右のスプリングライン上部であり、注入圧は注入位置で右が 3.0kgf/cm^2 、左が 3.8kgf/cm^2 であった。

軸力の分布形状は左右がほぼ対称で、インバート付近が大きく、クラウンに向かって小さくなっており、ほぼ静水圧分布となっていた。

(b) トンネル軸方向断面力

計測リングの4リング先を掘進中のトンネル軸方向断面力を図-8に、その掘進終了後のセグメント組立時のものを図-9に示す。シールド掘進時の曲げモーメントの分布形状は、全周にわたってほぼ正曲げが発生している。この時点の軸方向軸力はクラウン付近を除き、ほぼ均等な軸力が発生してい

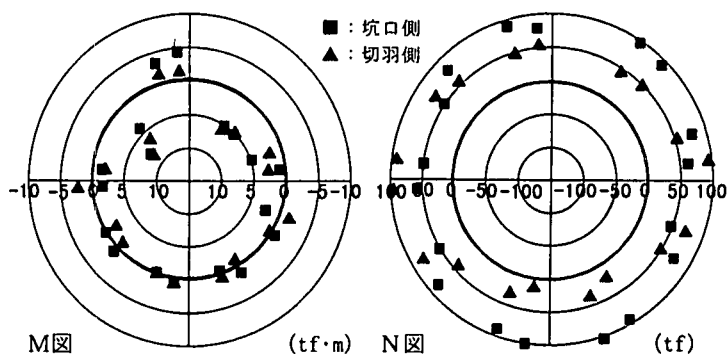


図-7 掘進および裏込め注入時のトンネル周方向断面力

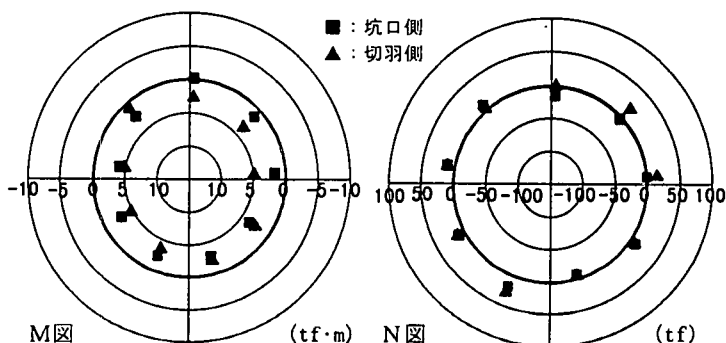


図-8 掘進中のトンネル軸方向断面力

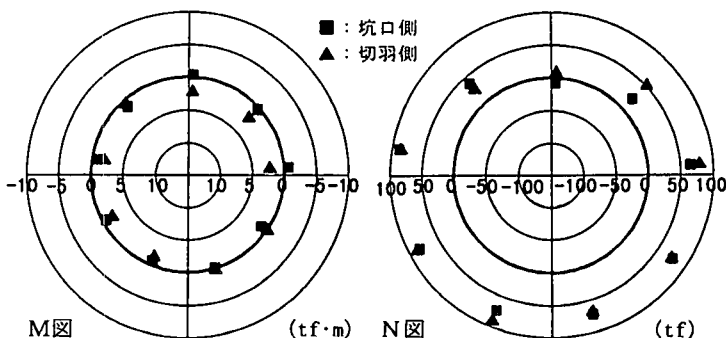


図-9 掘進停止中のトンネル軸方向断面力

る。掘進停止中の曲げモーメントの分布形状は、掘進時と同様、ほぼ全周にわたり正曲げが発生しているが、その大きさは掘進時と比較してかなり小さい。また、軸力も推力を作用させていないため、掘進時に比べかなり小さな値となっている。なお、掘進中および掘進停止中のジャッキ推力は、それぞれ約2,400tfおよび約1,100tfである。

3.3 長期計測結果

(a) 土圧計の経時変化

トンネルに作用する全土圧は、セグメント組立後10～30日以降ほぼ安定した状態で推移しているが、200日以降から若干の上昇がみられる。なお、計測地点での施工状況はセグメント組立後192日目に二次覆工コンクリートを打設しており、この施工の影響により土圧計に変化が生じたものと考えられる。

(b) 水圧計の経時変化

水圧計の経時変化は、計器設置時より大きな変動はなく、ほぼ一定の値を示しているが、土圧計の経時変化と同様に200日以降から若干の上昇がみられる。このことは、わずかに生じていた漏水が二次覆工の打設により止められたためと想定される。

また、その大きさは土圧計と同程度の値であり、トンネルに作用している土圧はほとんど変化しないことを示している。

(b) ひずみ計の経時変化

ひずみ計は組立後1～2日程度ではほぼ安定した状態で推移しており、これは土圧計の変動に比べ短時間であり、組立後の早い段階でトンネルが安定状態に入ったといえることができる。

(d) トンネル周方向の断面力

セグメント組立から30日後および最終計測時の500日後 最終の周方向曲げモーメントおよび軸力を図-10に示す。

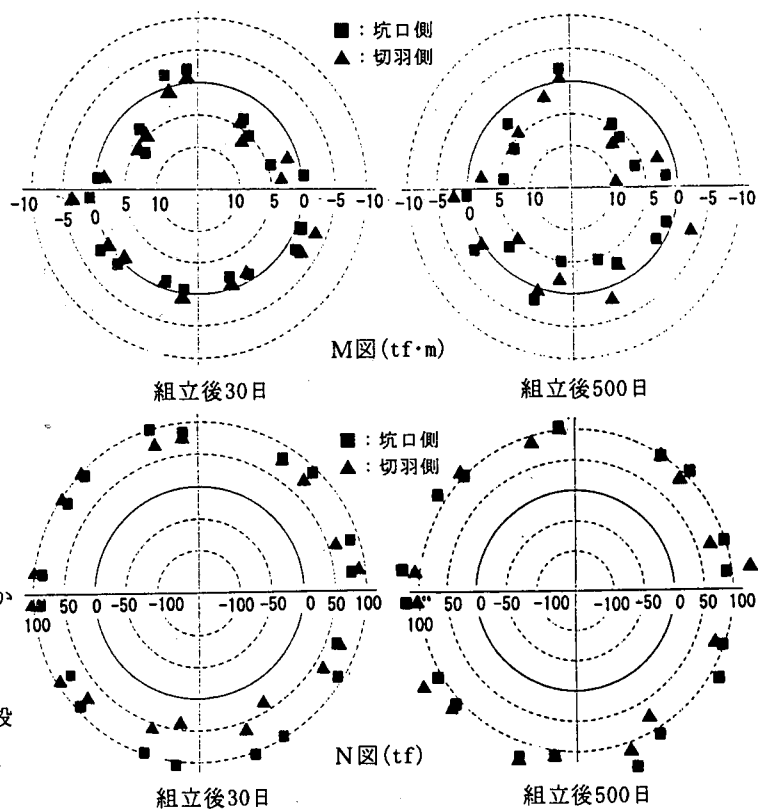


図-10 セグメント組立後30日と500日のトンネル周方向断面力

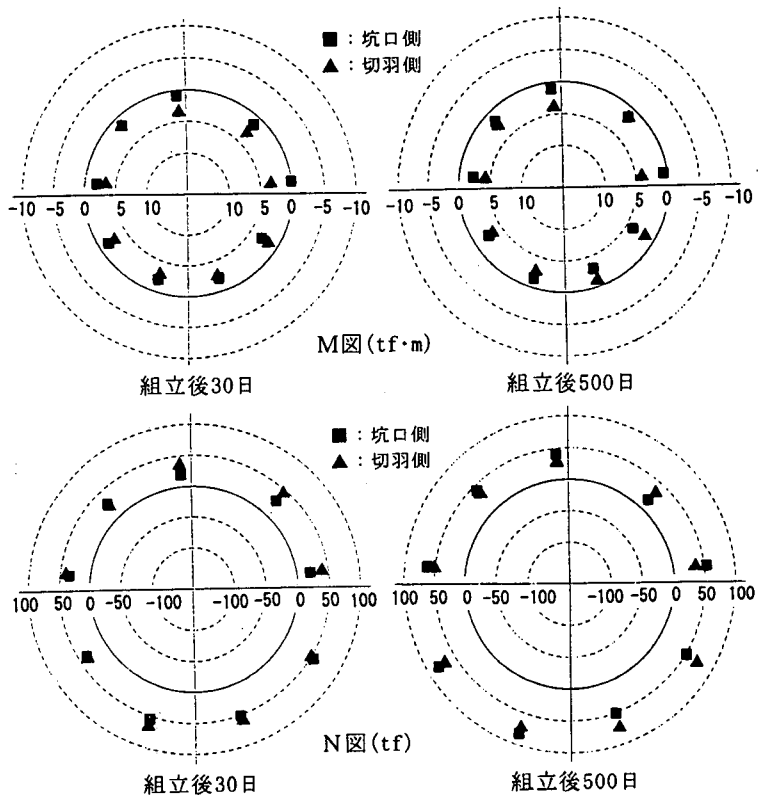


図-11 セグメント組立後30日と500日のトンネル軸方向断面力

曲げモーメントを比較すると、全体的に正曲げ側に变化しているようであり、負曲げが発生していた計測点も正曲げ側に变化している。特に、インバート付近の正曲げの増加が顕著である。なお、曲げモーメントの絶対値に着目すると500日後の曲げモーメントは最大でも $10\text{tf}\cdot\text{m}$ 程度以下の大きさであった。

軸力の変化をみると、どの計測点においても増加しており、その増加量を平均すると $20\text{tf}\cdot\text{m}$ 程度である。これは30日後の軸力が約20%程度上昇したことになるが、これは水圧が増加したためであると考えられる。

(e) トンネル軸方向の断面力

セグメント組立から30日後および最終計測時の500日後の軸方向曲げモーメントおよび軸力を図-11に示す。

曲げモーメントの分布形状は若干変化しているが、軸力の分布の傾向はほとんど変わらない。大きさに着目すると、曲げモーメントおよび軸力はそれぞれ、約10%および約25%増加しており、軸力の増加率の方が大きい。

4. 計測結果に対する考察

以上の現地計測結果を考察すると以下のとおりとなる。

- ① セグメントリングはシールドテール内において、テール脱出まで外荷重を受けず、シールドジャッキによる推力だけが作用していると考えられる。また、セグメントリングの支持状態は組立リングとシールドジャッキに挟まれ、テールプレートには接していない状態になっていると考えられる。
- ② トンネル周方向の曲げモーメントは、通常イメージする分布形状と大きく異なり、値もかなり小さい。このような曲げモーメントは、洪積粘性土にあるトンネルクラウン部を除く部分で計測された水圧を作用させ、クラウン部周辺で水圧による浮き上がりに抵抗していると仮定した解析(図-12)で比較的良好に表現でき、トンネル作用土圧としてはトンネル頂部の抵抗土圧のみであったものと考えられる。
- ③ トンネル周方向ならびに軸方向の曲げモーメントの分布は正曲げが卓越したが、これは添付されている2段のシール材が図-13のようにセグメントの外縁側に偏心配置されており、その点に軸力が集中した結果となったためと考えられる。
- ④ トンネル軸方向の軸力(シールド掘進中の推力)はセグメント組立500日後も減少することなく、逆に増加の傾向を示しており、シールドトンネルは完成後も軸方向に大きな圧縮力を受けている状態になっている。

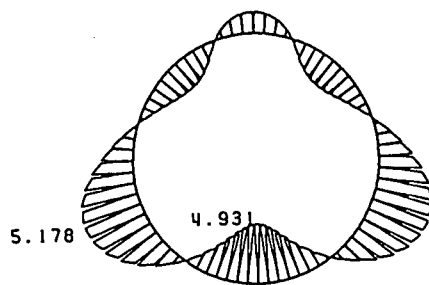


図-12 今回の計測結果を踏まえた解析結果

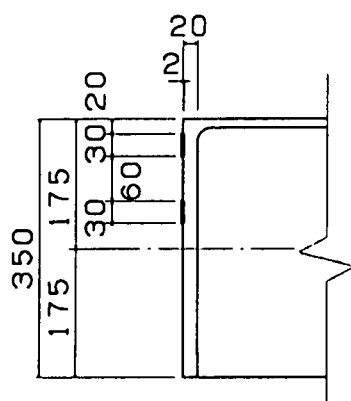


図-13 セグメント継手面の構造

[参考文献]

- 1) 小山幸則・清水 満ら：シールドトンネルの現地計測における発生断面力に関する一考察，第30回土質工学研究発表会講演集，pp.2013～2014，1995.7.