

軟弱地盤シールドの掘進管理

とセグメント組立品質について

The Relation between Shield Machine Control

and the Setting-up Quality of The Tunnel in Soft Silt Layer

浦沢義彦*・大塚幸男**・吉本正浩**・阿部昌明***

yoshihiko URASAWA, sachio OHTUKA, masahiro YOSHIMOTO and masaaki ABE

The shield tunnel constructed in Ichikawa city was suffered with many cracks especially on the K-segments. To find out the reason of this, first we investigated a lot of past construction data in similar soft silt layer. Then, we examined several countermeasures to prevent from the crack and maintain the setting-up quality. As a result, we finally found that the cracks were due to the vertical contact of the segments with the machine tail, and this phenomenon tended to happen when a machine excavated along a vertical slope. The estimated vertical force caused by this contact was around 100tf, which we should appropriately consider into the segment designing.

Keywords: K-segment with a crack, soft silt-ground, a plan to prevent K-segments from cracks

1. まえがき

東京電力では、安定した電力を首都圏に供給するための地中送電線網の建設を行っており、その施工方法はシールド工法が主体となっている。今回、千葉県市川市においてもシールド工事(φ2.95m)を行ったが、掘進初期よりセグメントのアーチクラウン

(Kセグメント)に横断方向のクラックが発生した。一般的にセグメントのクラック発生は縦断方向の場合が多い。また、クラック発生原因としては曲線施工時のマシンテールとセグメント間のせり、多大な推力等が考えられるが、今回のクラックは、直線施工時でしかも推力が設計推力の60%程度で発生した特異な例であった。

本稿は今回のクラック発生原因を解明し、セグメントのクラック発生原因のメカニズムと防止対策について設計施工の両面より考察することを目的としている。

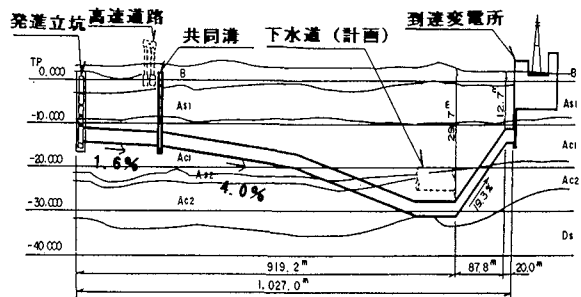


図-1 工事概要

* 正会員 東京電力(株) 地中線建設所
** 正会員 東京電力(株) 地中線建設所船橋工事事務所
*** 正会員 清水建設(株) 千葉支店土木部

2. 工事概要および掘進管理基準

2・1 工事概要

本工事は軟弱なシルト層（下部有楽町層）を泥土加圧式シールド工法により施工するものである。図－１に工事の概要図を示す。シールド線形については各種構造物との安全な離隔を確保するため、平面的には最小曲率半径150m、縦断的には下り 4%～上り19%と複雑であり、N値が 0～ 2と軟弱な地盤中の難易度の高いシールド工事となった。

2・2 掘進管理基準

一般的にセグメント組立の品質管理項目には、目開き量、目違い量、真円度の計測等があり、今回の工事でも管理基準値を設定し各リング毎の計測を行った。（表－１セグメント組立品質管理基準値）

しかし、当工区は掘進対象地盤の大半が軟弱シルト層であるため、縦断線形が最大 4%の下り勾配での軟弱な地盤中をシールドマシンが掘進する場合、地盤反力が十分にとれないこと、マシン重心位置が前方となっていることから、シールドマシンが掘削面以下に沈下して計画線形を維持することが困難であった。このマシンのノーズダウン防止のために、以下の点に注意して掘進管理を行った。

- ①推力をセグメント下半に偏心させマシンを持ち上げることで、マシンのレベル管理を常に計画線より上側で行う。
- ②管理限界を設定しピッチング管理を行う。
- ③上下の中折れにて $0.2 \sim 0.3^\circ$ の角度を効かせ下がろうとするマシンに対し抵抗を持たせる。

図－２に軟弱地盤中での掘進管理方法の概念図を示す。

以上の掘進管理方法によりセグメント組立精度ならびに掘進精度は管理基準値内での施工ができた。

3. クラック発生原因の推定

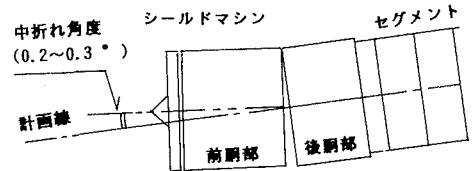
掘進初期段階より組立セグメントのうちのKセグメントに、横断方向のクラックが生じた。図－３および表－２にクラック発生状況を示す。クラック発生箇所としては、Kセグメントの構造上弱部である発進側のボルトボックス間に生じていることが多かった。

クラック発生原因を推定するために、テールクリアランス、推力等の掘進データを分析するとともに、セグメント表面にクラックが発生する時点でのひずみの発生状況およびクラック発生時期と施工状況の関係を把握することを目的として計測を行った。図－４に計測概要を、図－５にクラックが発生した場合のセグメントとマシンテールとの関係を示す。この結果、クラック発生時期はボルトボックス部がテール端部にきた時であることが分かった。

結論として、クラック発生原因は、シールドマシン頭部の沈下を防止する目的で行った図－２に示す掘進方法によりマシンテール後部とセグメント上部との間にせりが発生したためと推測される。

表－１ 管理基準値

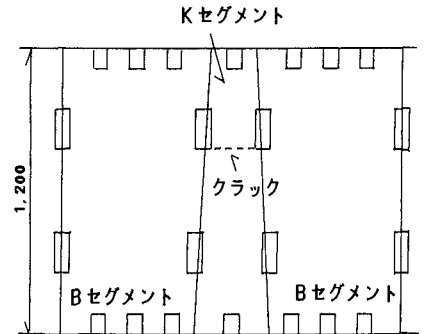
真円度	24mm以内
目開き量	3mm以内
目違い	3mm以内



図－２ 軟弱地盤における掘進管理方法

表－２ クラック発生状況

直線部総リング数	200
クラック発生リング数	30
クラック発生割合	15%



図－３ クラック発生状況

4. クラック発生メカニズムの解明(1)

4・1 検討モデルの作成と解析概要

クラック発生要因である、せりの反力とセグメント間に発生する摩擦力を求めるため、シールドマシンに作用する力を2次元の面内骨組モデルに置き換え解析を行った。(図-6)なお、解析はクラック発生が著しい300リング付近を対象にした。300リング付近の掘進データを表-3に示す。表-4に解析における入力荷重を示す。

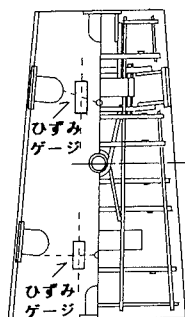


図-4 計測概要

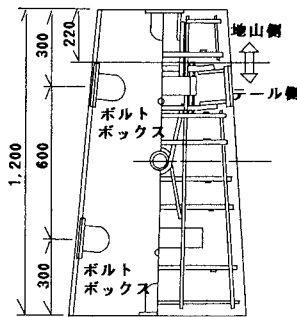


図-5 クラック発生時マシンテール位置

表-3 300 リング付近のデータ

リングNo.	クラック有無	推力(tf)	切羽土圧(tf)	推力作用位置鉛直方向(m)
303	発生	500	300.1	-0.39
304	発生	550	289.8	-0.39
305		500	289.8	0.00
306	発生	500	289.8	-0.16
307	発生	500	289.8	-0.84
308	発生	500	289.8	-0.84
309	発生	500	289.8	-0.39
310		450	289.8	-0.34
311	発生	450	300.1	-0.71
312		550	289.8	-0.79
313	発生	550	310.5	-0.67

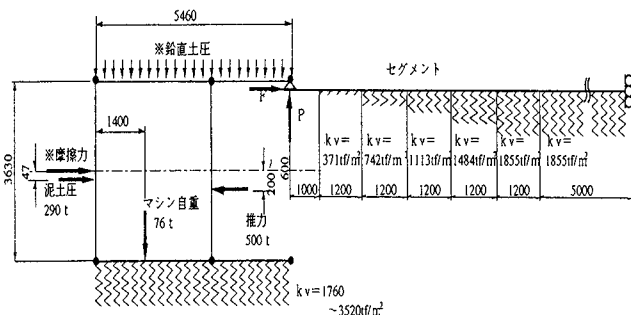


図-6 2次元面内骨組みモデル

解析を行う前にセグメントとマシンテール間のせりによる摩擦力(F)について考える。今回のモデルでは水平方向の力の釣合いより以下の式が成立する。

$$\text{推力} = \text{切羽土圧} + \text{マシンと地盤間摩擦力} + F \quad (1)$$

300リング付近での掘進データより、推力=500ton、切羽土圧=290tonで一定であることから、

$$\text{マシンと地盤間摩擦力} + F = 210\text{ton} \quad (1')$$

FとP(せりによる反力)の関係は、鋼とコンクリートとの動摩擦係数を考え、一般的に動摩擦係数は静止摩擦係数(0.55)より低いことより下式で仮定する。

$$F = \mu P \quad (\mu \leq 0.4) \quad (2)$$

(1')、(2)より、Pとマシンと地盤間摩擦力との関係において以下の関係が成立する。

$$P \geq (210 - \text{マシンと地盤間摩擦力}) / 0.4 \quad (3)$$

4・2 面内骨組みモデル解析結果

図-7(1)と(2)は地盤反力係数が3,520kgf/cm²、推力作用位置がマシンセンターから20cm、60cmの場合で鉛直土圧の大きさを0,40,80tf、かつシールドマシンに作用する地山の摩擦力を140~200tf/mと変化させた時のPおよびFの値を示したものである。図-7(3)と(4)は地盤反力係数が1,760kgf/cm²の時に同様の検討を行いPならびにFの値を示したものである。また、図には式(4)で与えられた条件を破線で示している。Pが式(4)の条件式を満たさない場合、μは0.4以上となってしまう前述の仮定に反する。今回の検討モデルにおいては、マシンが地山から受ける摩擦力は、地盤反力係数が3,520kgf/cm²のとき180tf以上であり、地盤反力係数が1,760kgf/cm²のとき165tf以上であることが必要である。以上の検討の結果、せりによる反力Pは

項目	設定根拠	入力荷重
P: せりによる反力	出力変数	—
Pc: マシン側面に作用する摩擦力	入力変数	140~200tf
Pd: マシン全面の泥土圧		290 tf
Pj: ジャッキ推力	表-3の平均値	500 tf
ジャッキ能力の作用位置		0.2, 0.4, 0.6m
Pv: 鉛直土圧の合力	算定値MAXまで段階的に増加	0, 40, 80 tf
Kv1: シールドマシン地盤反力係数	1) 鉛直方向地盤反力係数	3,520 tf/m²
	2) 地盤が低減された場合	1,760 tf/m²
W: シールドマシン自重	メーカー資料	76.0 tf
前脚からの重心位置		1.4 m
El.α: 掘削機とセグメントリングの等価剛性	参考文献3)	2,041,703 tf/m²
Kv2: セグメント地盤反力係数	鉛直方向地盤反力係数	0~1,855 tf/m²
	シールド通過後段階的に増加	

表-4 解析における入力荷重

最大で 110tf (図-7(4))、最小で26tf (図-7(1)) となる。また、解析結果より①推力の作用位置がマシンセンターから離れるほど、②マシンと地山の摩擦力が小さいほど、③鉛直方向地盤反力係数が小さいほど、Pは大きくなるという傾向が得られた。

4・3 ひび割れ発生モーメントを用いた反力Pの算定
 コンクリート断面にひび割れが発生するモーメント M_{cr} は下式により算定できる。²⁾

$$M_{cr}=f_b \cdot I_g / y_t \tag{4}$$

ここに、 f_b : コンクリートの曲げ強度 ($0.9 f'_{ck}{}^{2/3}$)

I_g : コンクリート断面の図心に関する断面2次モーメント

y_t : 中立軸から引張縁までの距離

式(4)より今回使用したKセグメントにクラックが発生する場合のモーメントを求め、今回、Kセグメントにひび割れが発生したことから、発生したモーメントは M_{cr} 以上であると仮定し反力Pの最小値を逆算する。

$$M_{cr}=183,353\text{kgf}\cdot\text{cm}$$

$$M=q \times 0.3 > M_{cr}=1.83$$

(ここに、0.3; テール後部からリゾ 間継手までの距離)

$$q > 1.83 / 0.3 = 6.1\text{tf}$$

せりによる反力P によって各リング間ボルトに発生したせん断力qが等しいと仮定するとせりによる反力Pの最小値は以下となり、この値は2次元面内骨組モデルによる値の範囲内となっている。

$$p=16q > 1.83 / 0.3 \times 16= 6.1 \times 16=97.6\text{tf}$$

上記の仮定に基づくとテール後部とセグメントとのせりによる反力Pは、98tf～ 110tfと推定される。

5. クラック発生メカニズムの解明(その2)

2次元骨組みモデルを用いた解析よりせりによる反力は、98tf～110tf であると推測された。しかし、Kセグメントを縦断方向の梁と仮定していたため、平面応力分布を把握することができず、クラック発生方向は説明できなかった。

ここでは、Kセグメントにせりによる反力が作用した場合のクラック発生前後でのKセグメントの平面的応力状態について3次元FEM解析を用いて解明する。

5・1 解析条件

解析条件および解析モデル図を図-8に示す。

解析ケースを表-5に示す。

5・2 解析結果

(a)クラック発生前(ケース1)

図-9(a)より以下のことがわかる。

- ・引張応力はボルトボックス間およびボルトボックス近傍に集中している。
- ・ボルトボックス間の主応力の方向は縦断方

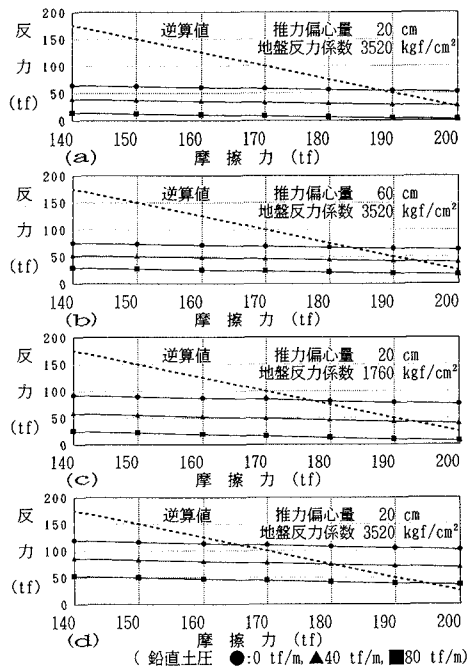


図-7 解析結果

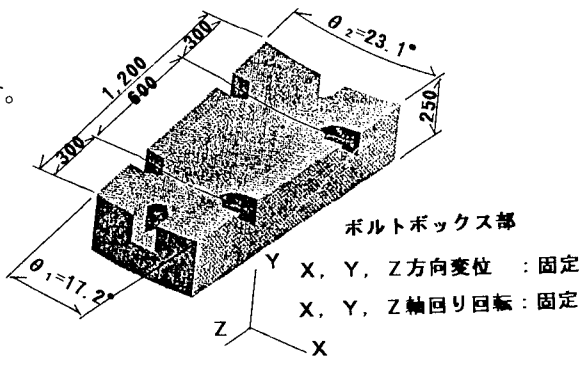


図-8 解析モデルおよび境界条件

向のみである。

以上の傾向は、横断方向にクラックが発生するという実現象と一致する。

(b)クラック発生後（ケース2）

図-9(b)よりクラックが発生したことによる応力状態の変化について以下のことがわかる。

- ・ボルトボックス間に発生していた応力は、縦断方向については50～80％に減少し、横断方向については変化していない。
- ・ボルトボックス間に発生する主応力の方向が縦断方向より横断方向に傾いている。

(c)考察

Kセグメントボルトボックス間縦断方向に、せりによって引張力が集中して発生し、横断方向にクラックを発生させている現象を3次元FEM解析より確認できた。また、クラック発生に伴いボルトボックス間に発生していた縦断方向の引張応力は解放され減少することが確認された。また、これにより応力は、横断方向に再配分されず周辺の各要素に広く分配されている。

6. クラック発生に対する対策案の検討

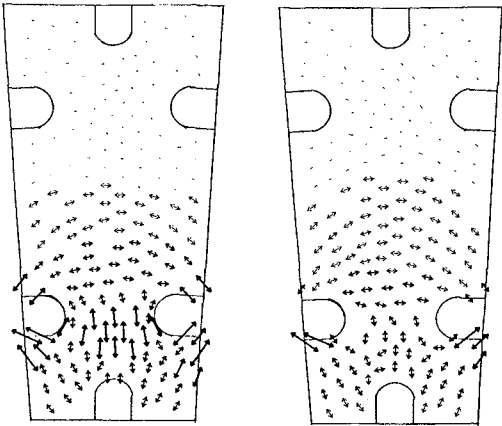
Kセグメントにクラックが発生する現象に対し、今回の推定を通じて考え得る抑制対策をセグメント設計面とシールド施工面の2つの観点から検討する。

6・1 セグメント設計上の対策案

セグメント設計上のクラックを抑制する対策としてはセグメントの平面形状を変更する案が考えられる。現設計におけるKセグメントは、1本のリング間ボルト当たり左右2箇所の断面欠損（セグメント間ボルト取付のため）が存在するため、リング間ボルト1本あたりにより伝達されるせん断力に対し断面形状が不利である。そこで、セグメントを図-10に示す6等分割（3A+2B+1K）としKセグメントを、3本のリング間ボルト（6ピースで18本）を有する断面で設計した。この断面に対しK型セグメントとマシントールにせりによる反力110ton（今回の検討における最大値）が作用した場合のひび割れ

表-5 解析条件

項 目			設 定 値
部	設計基準強度		420 kgf/cm ²
材	ヤング係数	クラック発生前	3.14 × 10 ⁵ kgf/cm ²
		クラック発生後	1.57 × 10 ⁵ kgf/cm ²
数	ポアソン比		1/6
入	作用荷重		1.0 tf/mの線荷重
	荷重の作用位置		セグメント 地山より220 mm 内側
解	ケース 1		クラック発生前：等方性要素
	ケース 2		クラック発生後：異方性要素



矢 印：主応力方向、↔：4.0～1.0
↔：10.0～7.0、↔：1.0～0.0
↔：7.0～4.0、単位：tf/cm²

(a)ケース1主応力図 (b)ケース2主応力図

図-9 解析結果

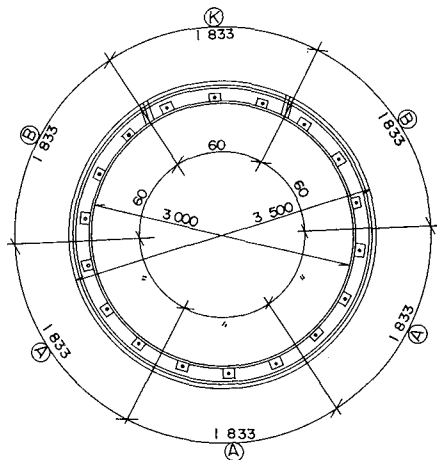


図-10 6等分割セグメント設計例

発生を検討を行う。

K型セグメントを図-11に示す細長断面で仮定する。等分割されたKセグメントのひび割れ発生モーメント M_{cr} は(4)式により算定できる。

$$M_{cr} = 8.53 \text{ tf} \cdot \text{m}$$

せりによる反力 P が110tfの場合リング間ボルト(18本)に発生したせん断力が等しいと仮定してKセグメントに作用するモーメントを求めると、

$$q = 110 / 18 = 6.1 \text{ tf}$$

$$M = 3 \times 6.1 \times 0.3 = 5.49 \text{ tf} \cdot \text{m} \quad (< M_{cr})$$

$M_{cr} > M$ より計算上クラックは発生しない。

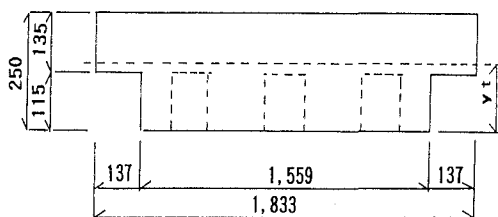


図-11 細長断面

6・2 シールド掘進上の対策案

クラックの発生原因がマシンテールとセグメントのせりによるものであることから、せりを生じさせないようにするための施工管理上の対策を以下に示す。

(a) テールクリアランスの管理

ジャッキ側のテールクリアランスを自動計測し、鉛直方向のシールドマシンの位置およびセグメント組立位置と測定されたテールクリアランスからテール後部のクリアランスを常に監視できるようなシステムにする。また、マシンの自動方向制御を採用する場合においてもテール後部のクリアランスを情報のひとつに必ず加えるようにする。

(b) その他の対策

せりを防止する対策として、一般的に考えられる対策を以下に示す。

- ・セグメント幅を短くする。(テール部に収まるセグメント長を短くする。)
- ・掘進対象地盤に応じた裏込め注入材の強度を十分検討する。

7. まとめ

本工事中において発生したKセグメントの横断方向のクラックについて、発生原因を検討した結果、軟弱地盤特有の掘進管理方法によるセグメントとマシンテール後部のせりが原因であり、楔型Kセグメントの弱部であるボルトボックス間に縦断方向の引張応力が集中していることが分かった。また、具体的な防止対策としては、Kセグメントの拡幅を目的とした6等分割セグメントを提案した。今回の検討において、事象のモデル化を行う際に現場データの不足から推定や仮定が多く、定量的な見解を導くことができなかったため、設計面での対策は一例のみであったが、セグメントに作用する荷重(せりの荷重、コンクリート及び鉄筋のひずみ等)やリング間継手ボルトに作用する荷重等を計測し、解析することで施工時荷重として評価し、設計に反映させることが必要と考えられる。また、軟弱地盤におけるセグメントの形状やシールドマシンの設計手法についてもこうした現場計測データから検討を進める必要がある。

8. 参考文献

- 1) 支波由紀夫, 川島一彦: シールドトンネルの耐震設計に用いる長手方向覆工剛性の評価法, pp.319~327, 1988.10.
- 2) 岡村甫: コンクリート構造の限界状態設計法, 共立出版株式会社.
- 3) 工藤泉: 大口径・等分割のセグメント組立性能に関する研究, トンネルと地下, 24-1, pp44~pp50, 1993.1.