

III-294 長手方向の剛性を考慮した局所偏荷重をうけるシールドトンネルのリング解析モデルについて

関西国際空港(株) 正会員 堀地紀行
 日本鉄道建設公団 正会員 松下芳亮
 東洋大学工学部 正会員 小泉 淳

1. はじめに

シールド工法は、セグメントと呼ばれるプレキャストブロックをリング方向と長手方向に継手によって接合し構築するトンネル工法で、こおしたシールドトンネルの覆工体の力学的特性は、¹⁾セグメント本体の剛性と継手の挙動に支配される。本論においては、近年の急激な都市部の開発によって、しばしば見つけられる既設シールドトンネル近傍の開削工事や新設トンネルの建設時に発生する既設トンネルの局所的偏荷重状態について、長手方向の剛性を考慮したシールドトンネルのリング解析モデルを提示し、あわせて併設トンネルを例とした場合の数値計算結果について報告する。

2. 解析手法

a) はり理論による長手方向の剛性(等価弾性バネ定数)の算出
 シールドトンネルのリング間継手の挙動に着目して、²⁾³⁾等価剛性を有する一様な中空円形断面のはりを考え、はりのたわみに関する基礎微分方程式より長手方向の剛性を算出する。

図-1に示す断面力と荷重の関係から、

$$EI \nu^{iv}(\eta) = P(x) \quad (1)$$

E : ヤング率 I : 断面二次モーメント $P(x)$: 荷重強度

x : 荷重の位置 η : たわみの着目点 $\nu(\eta)$: たわみ

(1)式は、線形の微分方程式であるのでたわみ $\nu(\eta)$ は、容易に

$$\nu(\eta) = K^{-1}(\eta, x) \cdot P(x) \quad (2)$$

と表わせる。

ここで、 $K(\eta, x)$ は、はりの曲げ剛性と境界条件より定まる等価弾性バネ定数と解釈できる。

図-1に示す曲げモーメントは、断面に対して垂直応力として作用し、⁴⁾周方向曲げモーメントに与える影響は少ないと思われるので、直交異方性三次元構造とみなされるシールドトンネルの解析においては、(2)式に現れる等価弾性バネ定数をセグメントをはり部材とした場合に、分布バネの形で荷重方向(一様方向)に作用させることにより、トンネル全体をはりとみなした時の長手方向の剛性を評価できる。(図-3参照)

b) シェル理論によるシェルの剛性(等価弾性バネ定数)の算出

はり理論で求められた等価剛性率を用いて、肉厚を減じた円筒シェルの局所偏荷重作用区間における解析モデルを考える。円筒シェルの曲げ理論より、基礎方程式は次式のように表わされる。

$$D \nabla^4 \omega + \frac{Et}{a^2} \omega^{iv} = 0 \quad (3)$$

D : シェルの曲げ剛性

∇^2 : ラプラス演算子

ω : たわみ

t : シェルの板厚

a : 円筒シェルの半径

E : ヤング率

(3)式より、a)と同様にして、たわみと荷重強度の関係から等価弾性バネ定数 $K(\zeta, x)$ が求められる。

c) 等価弾性バネのリング解析への適用

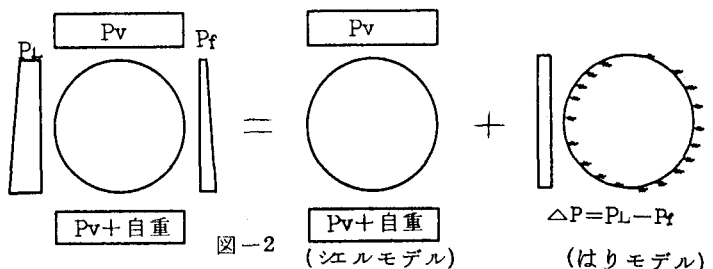
i) はり理論によって求められた等価弾性バネ定数 $K(\eta, x)$ は、セグメントの幅を考慮すると (t/m) で表され、その値をリング周長で除して一様分布バネ $k(t/m)$ として荷重方向に作用させる。

ii) シェル理論より求められる等価弾性バネ定数 $K(\zeta, x)$ は、リング法線方向に作用するので、荷重方向と直角方向とに座標変換し作用させる。

3. 等価弾性バネ定数を算出するための荷重のモデル化とリング解析モデル

a) 作用荷重を図-2のようにモデル化する。

b) リング解析モデルは、図-3に示すようにセグメントをはり部材、セグメント継手を回転バネ、リング継手をせん断バネとして、等価弾性バネを一様方向に作用させた骨組構造モデルとした。



図中（ k_θ ：セグメント継手の回転バネ， k_s ：リング継手のせん断バネ， k_E ：等価弾性バネ）

4. 数値計算例

先行トンネルに近接（純間隔0.5m）して後行トンネルが施工されるケースについて、偏荷重作用区間を12mとして図-4の荷重状態で数値計算を行った。（土被り25m，地下水位 GL-19m，N値50程度の硬質地盤）

尚、今回の数値計算にあたっては、はり理論より求められた等価弾性バネのみ作用させた。図-4は、はり理論による等価弾性バネ定数の算出のための構造モデルで、等価剛性率 $\alpha=0.2$ を用い、荷重としては、図-5の左右側圧の差分 ΔP を、シールド機長と前方ゆるみ範囲（トンネル直径D程度） $l_1=12\text{m}$ として作用させた。地盤バネは、原地盤程度とし、裏注未硬化域を $l_2=3\text{m}$ とした。その結果、 $\Delta P=160\text{t/m}$ で最大変位8mmを得たので、リング幅を考慮して、1リング当り $k_E=20,000\text{t/m}$ とした。

図-6には、図-5に示す荷重状態について、セグメント継手の回転バネ定数をパラメータとして数値計算を行った結果を示す。

単線状態における最大発生曲げモーメントが15 t・m程度であるのに対し、各ケースとも偏荷重状態における最大曲げモーメントは45 t・m程度と算出された。さらにセグメント継手の効果については、実設計上問題となる継手回転角の発生する $k_\theta=1,000\text{t}\cdot\text{m/rad}$ を除外すれば、 $k_\theta=5,000\text{t}\cdot\text{m/rad}$ と $k_\theta=15,000\text{t}\cdot\text{m/rad}$ を比較すると、 $k_\theta=15,000\text{t}\cdot\text{m/rad}$ の結果が、むしろ大きな曲げモーメントを生じた。

参考のため、 $k_\theta=5,000\text{t}\cdot\text{m/rad}$ で簡易的に両側圧を P とした場合について計算を行ったところ、165.0 t・mの曲げモーメントが発生した。

5. まとめ

既設トンネル近傍の開削工事や新設トンネル構築時に発生する側方地盤反力の逸散した局所偏荷重状態に対応したシールドトンネルのリング解析モデルを提示し、片側の側圧が静水圧程度に減少した併設トンネルを解析ケースとして数値計算を行った。

計算結果より、単線状態と比較して断面力の増大を確認した。併設時の曲げモーメントは、後行トンネル側（ $\theta=90^\circ$ ）が、山側（ $\theta=270^\circ$ ）に比べて10%程度大きく発生した。さらに、併設に伴うリング断面の剛性補強と同時にされるセグメント継手の強化については、必ずしも設計上有利なものとは、言明しきれない結果となった。

今後は、モデルの提示のみとしたシェル理論による等価弾性バネについて、さらに検討を計って行きたいと考えている。

最後に懇切丁寧な御指導をして下さった早稲田大学依田助教授に感謝致します。

（参考文献）

- 1) シールドセグメントリングの耐荷機構について：村上博智，小泉 淳（土木学会論文報告集 第274号 1978年4月）
- 2) 併設シールドトンネルにおける縦断方向の剛性を考慮した検討手法について：堀地紀行，鳥取孝雄，小泉 淳（第41回年講III-425）
- 3) シールドトンネルの縦断方向の現場載荷試験とその考察：西野健三，吉田和夫，小泉 淳（土木学会論文報告集 第376号 1986年12月）
- 4) 薄肉弾性ばりの理論：V. Z. ウラソフ（邦訳）

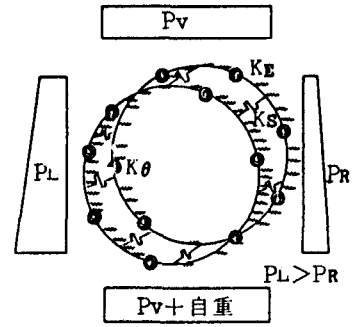


図-3

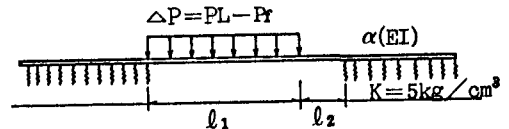


図-4 Kは地盤バネ

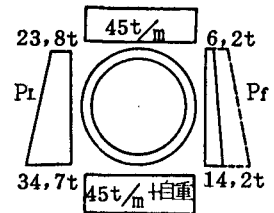


図-5

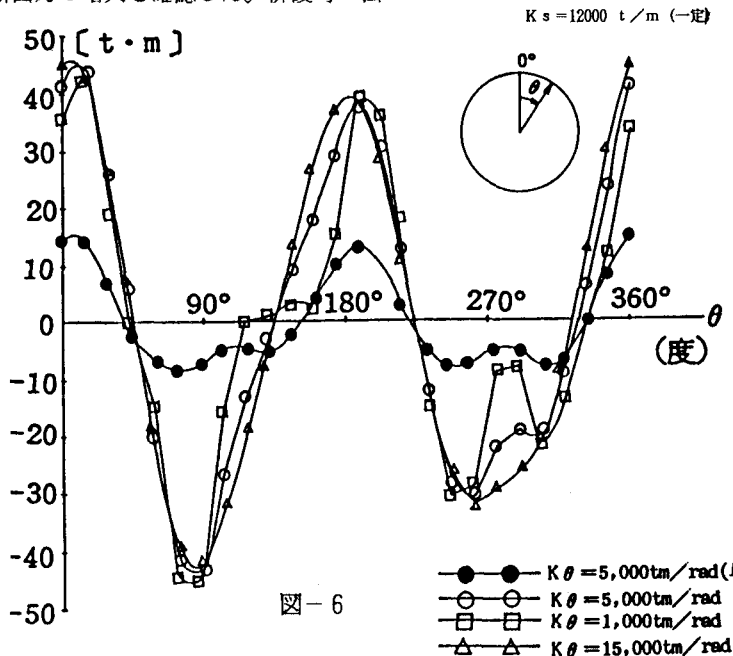


図-6