

梁ばねモデルにおける地盤反力荷重の考え方について

A CONSIDERATION OF THE DESIGN LOAD FOR THE BEAM-SPRING DESIGN METHOD ON THE SHIELD TUNNEL LINING

岩本 勲¹⁾・笠井克眞²⁾・田部井和夫³⁾・金井 正⁴⁾

Kaoru IWAMOTO, Katsumi KASAI, Kazuo TABEL, Tadashi KANAI

Recently the beam-spring design method (BSDM) has become to be applied to the shield tunnel lining design. The design loads that have fairly larger safety factors are adopted for usual conventional design method in order to simplify the designing and to be on the safe side. The design loads of BSDM should be different from usual design loads, because it is more practical than usual method. The lateral load and bottom-liner reaction load which are reduced by the ground reaction are discussed in this paper. The difference between the deformation mode of each design method have effects on the section force of segments.

Keywords : shield tunnel, beam-spring design method, ground reaction, design load

1. はじめに

シールドトンネル用セグメントの設計に用いられている「慣用計算法」では、設計法の簡便性やトンネルの安全性を重視して、作用荷重や解析モデルを設定している。近年、解析技術の発達に伴って、より合理的な設計手法である「梁ばねモデル」による設計が増加しつつある。しかし、梁ばねモデルを用いながらも地盤ばねを考慮せず、慣用計算法と同じ荷重を用いる場合があり、その解析手法の合理性を活かしていないことがある。梁ばねモデルは、セグメント継ぎ手やリング継ぎ手を解析に考慮できるのが大きな特長であるが、作用荷重についても、セグメントの変形に伴う地盤反力が評価できるので、これを適切に組み入れる必要がある。

設計荷重は、土水圧等のセグメントに作用する荷重と、セグメントが移動、変形することによって周辺地山から受ける地盤反力、そしてセグメントの自重とに大別できる。周辺地山からの反力は、慣用設計法では簡易的に求めているが、反力が設計断面力に与える影響の度合いは、土圧等による作用荷重と同じくらい大きく重要である。

ここでは、セグメント側方の地盤反力と、セグメント底面の地盤反力に着目し、地盤反力の考え方の相違が、断面力に与える影響について検討した。検討モデルは、セグメント全周地盤ばねによる梁ばねモデルとし、セグメント接線方向の地盤ばねは考慮せず、半径方向の地盤ばねだけを考慮した。

1) 正会員 工博 近畿コンクリート工業(株) 開発部

2) 近畿コンクリート工業(株) 開発部

3) (株)ユニック 構造解析研究室長

4) (株)ユニック 数値解析研究室

2. 解析方法

2.1 解析条件

解析に用いたセグメントは外径6.0m、厚み0.3m、幅1.0mで、剛性様なリングとした。トンネルはGL-60m、地下水位はGL-2mの所に位置している。土質はN値=35、内部摩擦角=40.0°と自立性の高い単一な砂質土の土層と仮定した。土圧の算定では、土は土水分離 ($\gamma=2.0\text{tf/m}^3$, $\gamma'=1.0\text{tf/m}^3$) として取り扱いTerzaghiの緩み土圧式により計算した。その際、側方土圧係数 (λ) 及び水平方向地盤反力係数 (k) についてはN値を参考にトンネル標準示方書¹⁾から、 $\lambda=0.45$, $k=3,000\text{tf/m}^3$ と定めた。また、上載荷重 (w) は建物の影響を考慮して 10.5tf/m^2 とした。

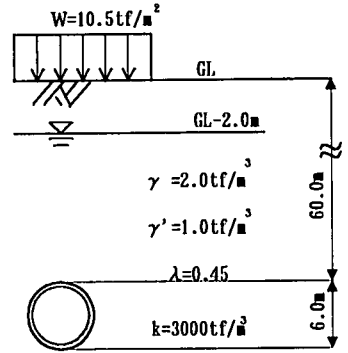


図 - 1 解析条件

2.2 慣用計算法

慣用計算法では、リングの剛性を低下させることにより継手の影響を考慮したり、曲げモーメントを割り増すことによりリング組みの影響を考慮することもあるが、ここでは、セグメント継手を含めて、セグメントを剛性様なリングとした。慣用計算法で考慮する荷重は、次のように整理される。(図2(a)参照)

①トンネル頂部に作用させる土圧と水圧による鉛直方向の等分布荷重 (PV)、②地盤変位を考慮しない自重を含めた鉛直方向荷重につりあう等分布地盤反力 ($PV+\pi g$)、③トンネル側方に作用させる土圧と水圧による水平方向の等変分布荷重 (PH)、④セグメントリングの左右対称に発生させる側方地盤反力 (q)

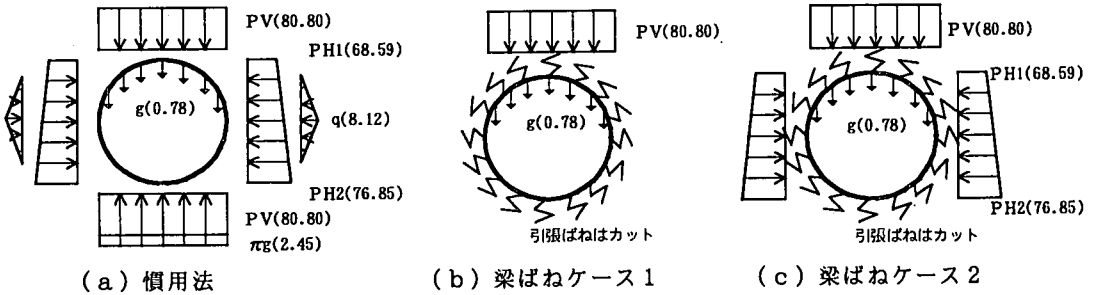


図-2 荷重図

2.3 梁ばねモデル

梁ばねモデルの構造モデルは、セグメント本体を梁に、セグメント同士のセグメント継手及びリング継手部をボルト等で結合していることから、この継手部をばね要素でモデル化した。具体的には、セグメント継手を回転ばねで軸方向のリング間継手をせん断ばねで表現した。ただし、本検討では両継手の影響をなくするため、ばね値はそれぞれ無限大 (剛結) とした。セグメントは、トンネル半径方向 (接線方向はなし) に作用する地盤ばねに支持されるものと考えて、セグメントリングの変位に比例して地盤反力が発生するものとした。トンネル断面の半径方向変位がトンネルの中心方向へ向かう節点ではばねを除去し (引張ばねをカット)、ばねのつく位置が収束するまで繰り返し計算を行った。鉛直荷重と自重による地盤反力は両者に釣り合う鉛直方向の等分布反力とはせずに、セグメントの地盤内への変位に応じて地盤反力が発生するものとした。地盤ばね定数は慣用計算法における地盤反力係数を用いた。

荷重ケースを2通り考え、ケース1 (以降、梁ばね1) は側方荷重 (PH)の影響を確認するために、鉛直荷重のみを載荷し、ケース2 (以降、梁ばね2) では鉛直土圧と水平方向の土圧を作用させた。図2に慣用計算法と梁ばねモデルで考慮する荷重を示す。なお、() 内数値は設計荷重値を示す。

3. 解析結果と考察

3.1 底版反力

底版反力を図3示す。これらの図は、セグメントに生じた反力を部材直角方向の分布荷重に展開したものである。また、図中の角度はトンネル天端を0°として時計回りに角度を表した。

慣用計算法で与えられる底版反力（等分布荷重）は分布している範囲は90°～270°であり、トンネル底部で83.2tf/m(max)の反力が発生している。分布長と分布荷重で囲まれる面積は等分布荷重で与えられる長方形の面積と等しい。梁ばね1は慣用計算法と同様に、底版反力に対して鉛直荷重のみを考慮しているので、両者は似通った分布形状と反力値を示した。しかし、実際の載荷状態である側方土圧を考慮した梁ばね2では、底版反力の分布幅が慣用計算法よりも狭くなり、最大反力値は慣用計算法よりも約30%大きくなった。当然のことであるが、梁ばねモデルによる2ケースとも分布幅と分布荷重で囲まれる面積は慣用法での底版反力と等しい。慣用計算法による底版反力は鉛直荷重のみしか考慮しておらず、側方土圧が作用する状態ではセグメントの変形によってより局所的な底版反力が発生していると考えられる。

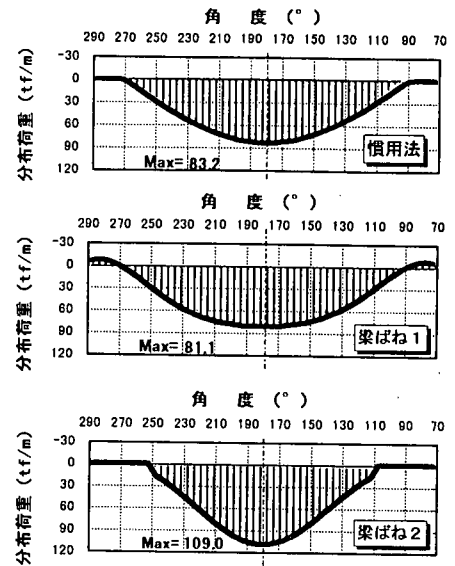


図-3 底版反力

3.2 側方反力

側方反力を図4に示す。ただし、各ケースとも左右対称であるので、右半分のみを表した。その最大値は慣用計算法で8.1tf/m、梁ばね1で10.2

tf/m、梁ばね2では6.6tf/mであった。梁ばね1は鉛直荷重のみによるセグメントの変形を考慮しているので、3ケースの中で最も大きな側方反力となり分布幅も大きくなった。水平荷重を考慮した梁ばね2と慣用計算法では、総側方反力、分布幅とも近い値となった。しかし、その分布位置は慣用計算法よりも下方に下がった。これは先の底版反力の分布形状の差と水平荷重分布がセグメントの変形に影響したことによると考えられる。本設計条件では慣用計算法による側方反力の値は妥当であるが、その分布位置を考慮していく必要があると思われる。

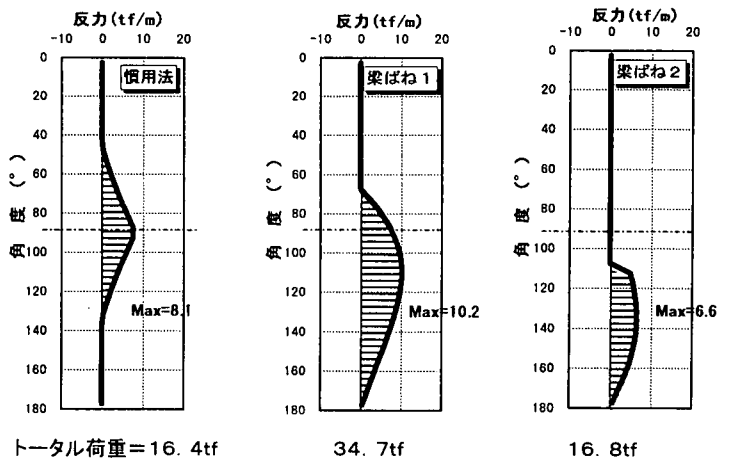


図-4 側方反力

3.3 断面力

慣用計算法と梁ばねモデルのケース 2 による断面力について検討を行った。各断面図力を図 5 に、それぞれの最大、最小値を表 1 に示す。図中の●は最大値、×は最小値の発生位置を示す。

表 1 最大断面力 (発生位置)

項 目	断面力	モーメント(tf・m)	軸 力 (tf)	せん断力 (tf)
慣 用 法 [———]	最大	12.1 ($\theta = 0^{\circ}$)	233.8 ($\theta = 95^{\circ}$)	6.8 ($\theta = 140^{\circ}$)
	最小	-9.2 ($\theta = 80^{\circ}$)	210.6 ($\theta = 0^{\circ}$)	-8.9 ($\theta = 35^{\circ}$)
梁ばね 2 [- - -]	最大	12.1 ($\theta = 0^{\circ}$)	341.9 ($\theta = 180^{\circ}$)	19.3 ($\theta = 110^{\circ}$)
	最小	-13.1 ($\theta = 75^{\circ}$)	208.1 ($\theta = 0^{\circ}$)	-19.3 ($\theta = 250^{\circ}$)

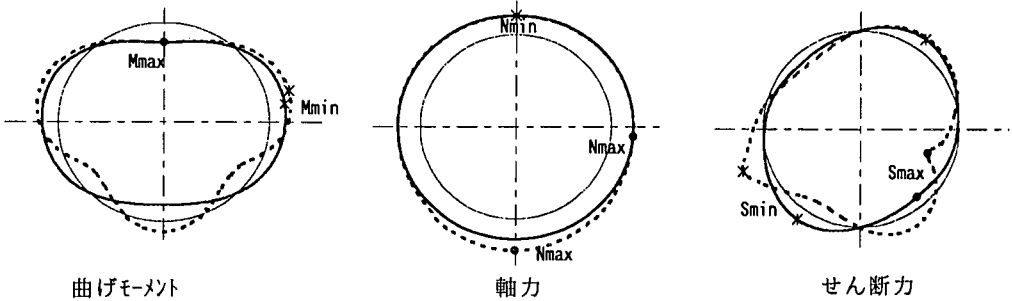


図 5 断面力図 (—慣用法, ---梁ばね 2)

最大曲げモーメントは慣用計算法、梁ばねモデルともにトンネル頂部で発生し、その大きさも12.1tf・mと等しくなった。しかし、梁ばねモデルでは側方地盤反力の影響により、トンネル底部で負の曲げモーメントが発生した。しかし、その大きさは-6.1tf・mであり、正の曲げモーメントの約50%であった。通常のRCセグメントは内外同一配筋とするので問題はないが、この場所にセグメント継手が位置する場合やインバートセグメント等を配置する場合は、負曲げモーメントの検討が必要となる。

軸力の最小値は、慣用計算法、梁ばねモデルともに最大曲げモーメントと同じくトンネル頂部で発生し、その値もほぼ等しかった。また、慣用計算法では95°、梁ばねモデルではトンネル底部で最大値となり、梁ばねモデルが約46%大きな値となった。

せん断力は、慣用計算法では最大値が8.9tfであるのに対して、梁ばねモデルは19.3tfと約2倍の値を示した。この差は底版と側方の地盤反力分布の違いにより生じたと考えられる。

4. まとめ

- 地盤ばねを考慮した梁ばねモデルでは、
- ①底版反力は、慣用計算法と比較すると分布幅が狭く、最大値が大きくなるが総反力は等しい。
 - ②側方地盤反力は、慣用計算法よりも下方に分布し、総反力はほぼ等しかった。
 - ③断面力は底部で負の最大曲げモーメントが発生し、また、せん断力の最大値は慣用計算法の約2倍となった。

【参考文献】

1) 土木学会：トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説、pp.42～44、1996年7月