

シールドトンネルの断面形状に関する研究

on the cross sectional shapes of shield tunnels

花房 幸司*, 小林 正典**, 井口 均***, 小泉 淳****

Koji HANABUSA, Masanori KOBAYASHI, Hitoshi IGUCHI, Atsushi KOIZUMI

This study was carried by analysis for purposes of finding out a mutual relation between each parameter and shapes of cross section of shield tunnel for which it is possible to reduce a section force, especially bending moment, with respect to elliptical and rectangular shapes.

In case of elliptical shapes, there are elliptical ratios which reduce bending moment to minimums.

In case of rectangular shapes, there is a deference tendency between the case width-height ratio is under 0.8 and the one it is over 0.8.

keywords: shield, tunnel, shapes of cross section

1. はじめに

従来、シールドトンネルの断面形状は主として円形が用いられてきた。これは、未固結の滞水土砂地山においては円形が力学的に優位であることや、機械掘削に適していることなどによる。

しかしながら、トンネルの断面形状を考えると、その本来の使用目的に適したものが望ましいことは言うまでもない。特に過密化した都市地域では、既に多数の地下構造物が存在し、そのため占有できる地下空間はますます狭くなり、占有面積の問題に加えて掘削発生土の処理の問題など、地下空間のより有効な利用に対する要求が高まってきている。このような事情から、トンネルの用途に応じて不要な断面を減らし掘削断面積を小さくすることのできるトンネルの開発が進められている。楕円形断面や矩形断面のシールドトンネルもその一部である。

表1. 使用材料の性能およびセグメント寸法

本研究は楕円形および矩形断面シールドトンネルを対象に、それに作用する荷重と楕円形の偏平率および矩形の縦横比との関係を数値実験に基づき調べたものである。

セグメント幅 b	100	cm
セグメント厚さ h	30	cm
コンクリートの単位体積重量 γ_c	2.35	tf/m ³
コンクリートの弾性係数 E	3.60×10^5	kgf/cm ²
断面積 A	3.00×10^3	cm ²
断面二次モーメント I	2.25×10^5	cm ⁴

2. 計算条件および検討方法

計算の対象とした楕円形断面および矩形断面

面トンネル用のセグメントは表1に示した寸法と物性を持つRC平板型セグメントとし、これにより組み立

* 学生会員：早稲田大学大学院理工学研究科

** 正会員：西松建設(株)技術研究所主任研究員

*** 正会員：日本道路公団名古屋建設局長野工事事務所

**** 正会員：工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

てられるセグメントリングは曲げ剛性一様リングと仮定した。楕円形断面および矩形断面トンネルは高さ8.0mと一定とし、各々のトンネルの横幅を変え、縦と横の比を楕円形では偏平率e、矩形では縦横比b/aと定義し、また矩形トンネルの場合は隅角部に曲率rを設けることとした。それらのトンネルの形状は表2および表3に示す。図1はそれらのうち楕円形の偏平率e=0.8のものを、図2は矩形の縦横比b/a=0.8で隅角部に円弧部を付けないもの(r=0m)、図3は円弧部を付けたもの(r=2m)をそれぞれ示している。

地盤条件は、ゆるみ土圧は考慮せず、図4のように鉛直方向には等分布荷重が、水平方向には等変分布荷重がそれぞれ作用するものとし、トンネルに作用する鉛直荷重PVと側方荷重の平均値PHの比(PH/PV比と呼ぶ)、土被りH、地盤反力係数kの3つのパラメータを用いて評価した。なお、土の単位体積重量γはγ=1.8tf/m³とし、土と水は一体として挙動するものとして取り扱っている。また、地下水位は地表面にあると仮定し単純化した。

計算はセグメントは曲がりはり部材および直線はり部材に、またトンネルの変形に伴って生じる抵抗土圧は、Winkler形の地盤ばね(トンネル接線方向および半径方向)にそれぞれ評価している(図4参照)。

数値実験は楕円形の偏平率eおよび矩形断面の縦横比b/a、矩形断面隅角部の半径rと地盤条件の計5つをパラメータにして行い、最大曲げモーメントMを指標として検討を加えた。

表 2. 楕円形断面トンネルの断面形状

偏平率 e	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
縦径 a (m)	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
横径 b (m)	5.6	6.4	7.2	8.0	8.8	9.6

表 3. 矩形断面トンネルの断面形状

縦横比	0.5			0.8			0.9			1.0			1.1			1.2			1.5		
縦径 a (m)	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
横径 b (m)	4.0	6.4	7.2	8.0	8.8	9.6	12.0														
隅角部の半径 r (m)	0.0	1.0	2.0	0.0	1.0	2.0	0.0	1.0	2.0	0.0	1.0	2.0	0.0	1.0	2.0	0.0	1.0	2.0	0.0	1.0	2.0

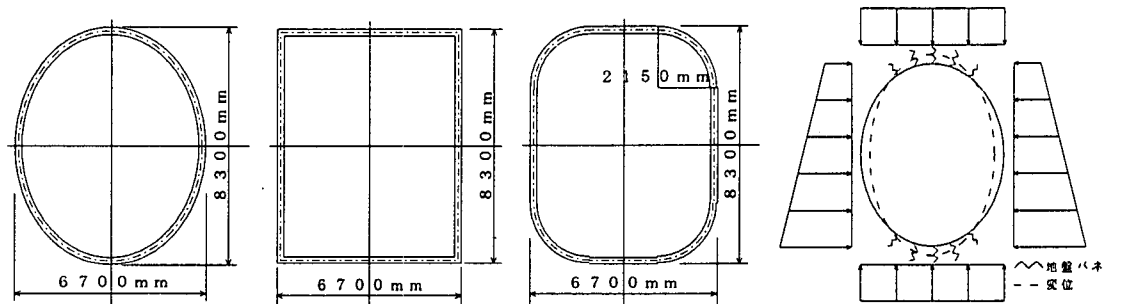


図 1. 楕円形断面 図 2. 矩形断面(曲率なし) 図 3. 矩形断面(曲率有り) 図 4. 荷重図

3. 計算結果と考察

1) 土被りと曲げモーメントとの関係

図5および図6は土被りと計算された最大曲げモーメントとの関係を示した一例である。これらの図から、楕円形断面および矩形断面のいずれの場合にも、その断面形状や地盤条件に関わらず、土被りの増加に従って最大曲げモーメントはほぼ直線的に増加しており、土被りHと最大曲げモーメントMとの間には、

$$M=aH+b \quad (a, b \text{ は定数}) \cdots \cdots \cdots (1)$$

が成り立つことがわかる。実際にはこの定数bは1t・m程度であるので、曲げモーメントは土被りと比例して増加すると考えてよい。これは偏平率eおよび縦横比b/aが異なる場合でも同じであった。

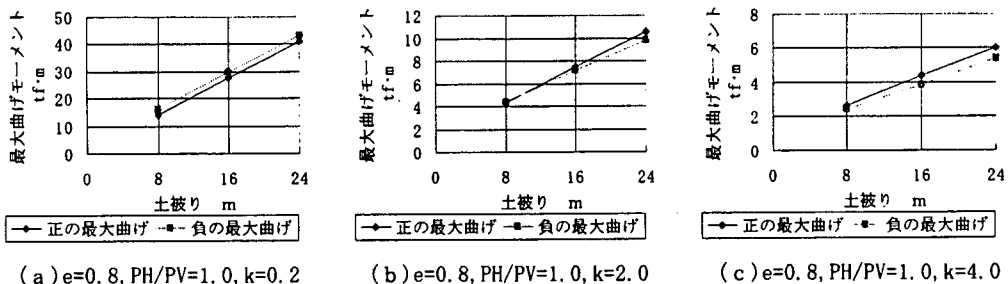


図5. 最大曲げモーメントと土被り（楕円形断面）

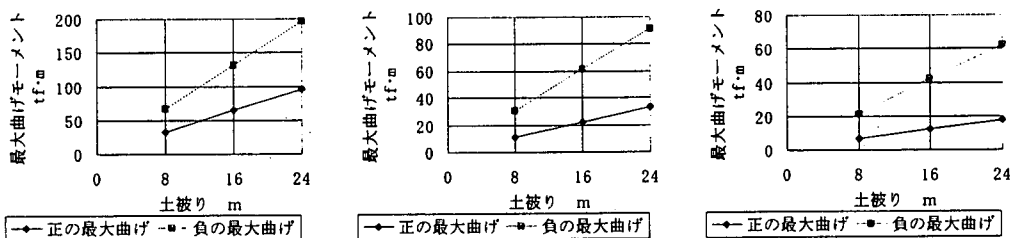
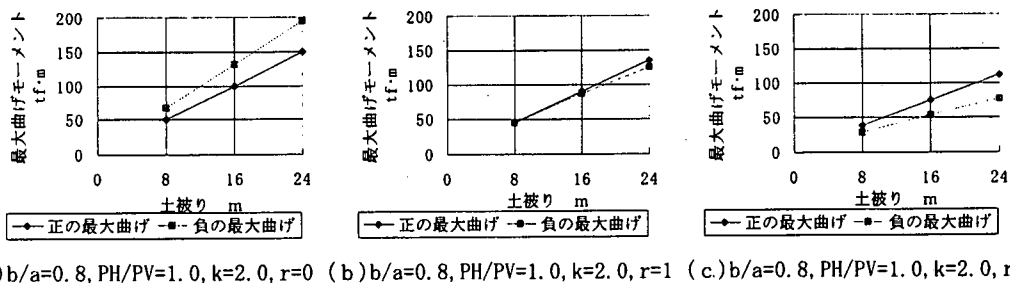


図6. 最大曲げモーメントと土被り（矩形断面）

2) 地盤反力係数と曲げモーメントとの関係

図7および図8は計算された最大曲げモーメントと地盤反力係数との関係を示した一例である。これらの図から、楕円形および矩形断面の場合は、一般的に両対数グラフ上ではその断面形状や地盤条件に関わらず、地盤反力係数の増加に従ってほぼ直線的に最大曲げモーメントの値が減少することがわかる。したがって、地盤反力係数 k と最大曲げモーメント M との間には、おおよそ

$$M = c k^d \quad (c, d \text{ は定数}) \dots \dots \dots (2)$$

の関係が成り立つ。

しかし、楕円形断面のすべてのケースと矩形断面のうち縦横比が0.8を越えるケースでは、地盤反力係数が増加する、すなわち地盤が良くなるに従って最大曲げモーメントの値も小さくなるのに対して、縦横比が0.8以下のケースでは、地盤反力係数の増加に対する最大曲げモーメントの増加量は非常に小さく、ほとんど変化していないケースも見られ、地盤の良し悪しによらないことがわかる。矩形断面で縦横比が0.8以上の場合はトンネルの一部が地盤側へ変形し、地盤反力が発生する。このため地盤反力係数が大きい場合には、発生する曲げモーメントが小さくなり、地盤反力係数が小さい場合には、周辺地盤の支持が期待できないため曲げモーメントが大きくなる。しかし縦横比が0.8以下の場合には、ほとんどの節点がトンネル内側に変形し、トンネルの地盤側への変形に伴う地盤反力がほとんど発生しない。したがって、地盤反力係数の増加に従って最大曲げモーメントは若干減少しているものの、地盤反力の影響はほとんどないため、最大曲げモーメントが変化しないもの

と考えられる。

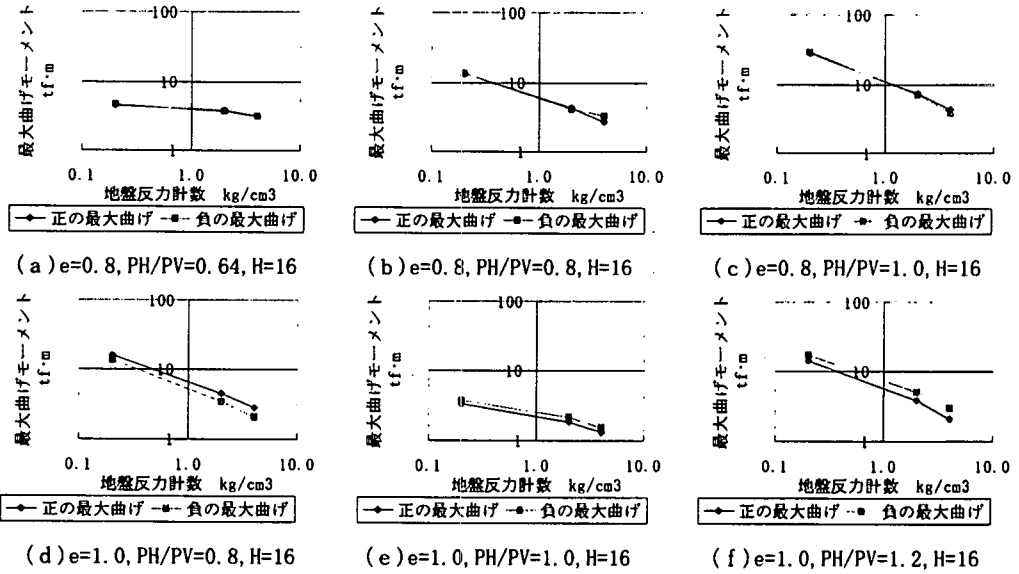


図 7. 最大曲げモーメントと地盤反力係数 (楕円形断面)

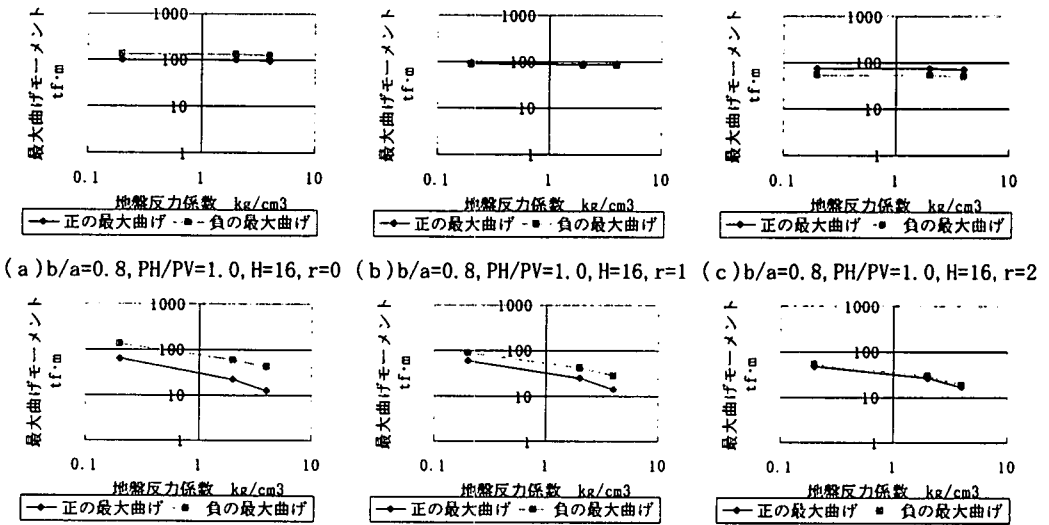


図 8. 最大曲げモーメントと地盤反力係数 (矩形断面)

3) 荷重条件に対する最適偏平率

図 9 は楕円形断面の場合の PH/PV 比と最大曲げモーメントとの関係を示した一例である。この図から楕円形断面の場合には、偏平率や地盤条件に関わらず発生する最大曲げモーメントを最小にするような PH/PV 比が存在し、それは偏平率を二乗した値が PH/PV 比にほぼ等しくなるときであることがわかる。すなわち、最大曲げモーメントを最小にする PH/PV 比と偏平率 e との間には、

$$PH/PV = e^2 \dots \dots \dots (3)$$

が成り立つ。

一方、図 1 0 は矩形断面の場合の同様な図である。矩形断面の場合には、縦横比や地盤条件の組み合わせによって以下に述べるように傾向が異なる。

①負の最大曲げモーメントは、縦横比や地盤条件に関わらず、 PH/PV 比が大きくなるとほぼ直線的に増加する。

②正の最大曲げモーメントは、縦横比や地盤条件によってさらに以下のように区分される。

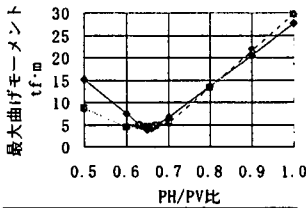
a) 軟弱地盤である $k=0.2\text{kgf/cm}^3$ の場合には、正の最大曲げモーメントを最小にするような PH/PV 比が存在し、それは

縦横比 ≤ 1.0 の場合、 $(PH/PV\text{比}) = (\text{縦横比})^2$ の時、

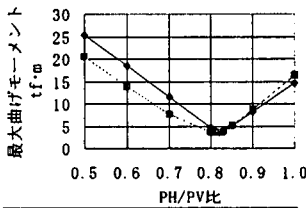
縦横比 > 1.0 の場合、 $(PH/PV\text{比}) = (\text{縦横比})$ の時、

である。

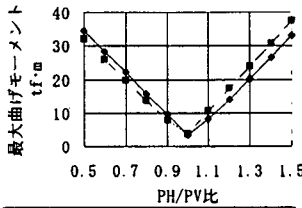
b) 比較的良好な地盤である $k=2.0, 4.0\text{kgf/cm}^3$ の場合には、縦横比の値によって傾向が異なり、
 縦横比 ≤ 0.8 の場合、 $(PH/PV\text{比}) = (\text{縦横比})^2$ の時、最小値をとり
 縦横比 > 0.8 の場合、最小値をとらない。



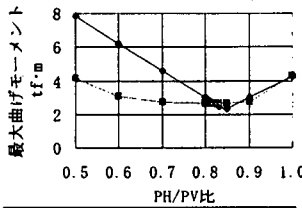
(a) $e=0.8, k=0.2, H=16$



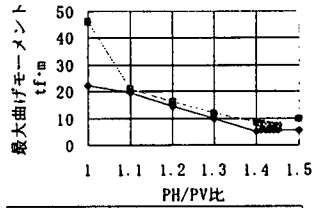
(d) $e=0.9, k=0.2, H=16$



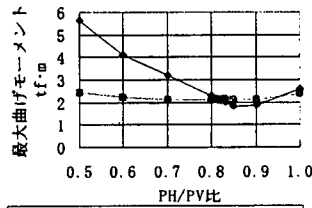
(b) $e=1.0, k=0.2, H=16$



(e) $e=0.9, k=2.0, H=16$

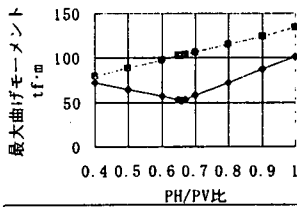


(c) $e=1.2, k=0.2, H=16$

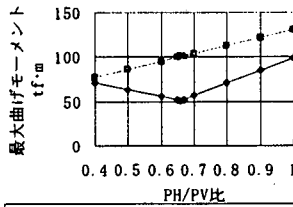


(f) $e=0.9, k=4.0, H=16$

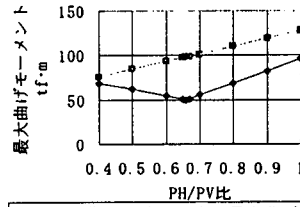
図 9. 最大曲げモーメントと PH/PV 比 (楕円形断面)



(a) $b/a=0.8, k=0.2, H=16$



(b) $b/a=0.8, k=2.0, H=16$



(c) $b/a=0.8, k=4.0, H=16$

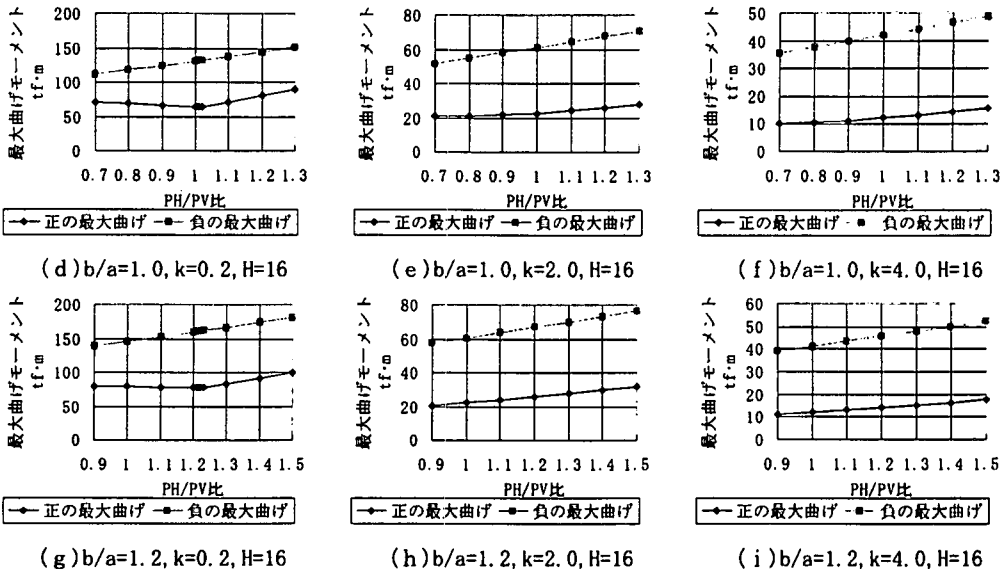
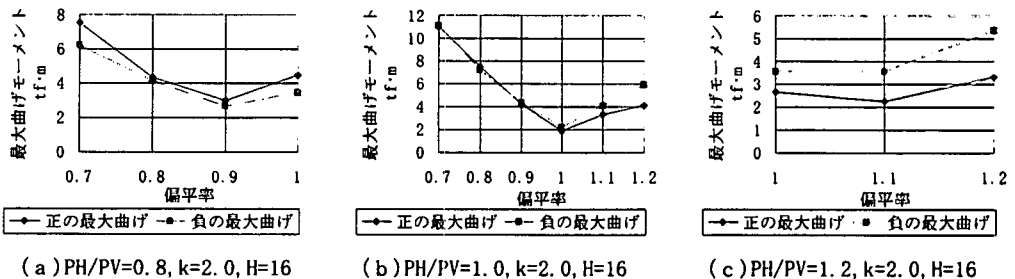


図 10. 最大曲げモーメントと PH/PV 比 (矩形断面)

4) 偏平率および縦横比と最大曲げモーメントとの関係

図 11 は楕円形断面の場合の最大曲げモーメントと偏平率との関係を示した一例である。この図から楕円形断面の場合には、地盤条件に関わらず PH/PV 比一定の条件のもとで、発生する最大曲げモーメントを最小にする偏平率が存在し、それは PH/PV 比の値の平方根が楕円の偏平率にほぼ等しくなるときであることがわかる。これは土被りや地盤反力係数の大小に関わらず、最大曲げモーメントを最小にする荷重条件と楕円形の偏平率との間に成り立つことを示している。このことから、PV が PH より大きくなる一般的な場合には、円形断面のトンネルが必ずしも構造的に有利なわけではなく、荷重条件に応じて楕円形断面を選択すれば、最大曲げモーメントを最小にする断面が決定できることがわかる。

図 12 は矩形断面の場合の同様な図を示した一例である。この図から矩形断面の場合には、地盤の良し悪しによって傾向が異なっていることがわかる。地盤反力係数の増加、すなわち地盤が良好になるに従って、縦横比 0.8 と 0.9 の間に発生する曲げモーメントが急激に減少する不連続点が存在することが確認される。これは前述したとおり地盤反力が発生するか否かによるものと考えられる。また、地盤が良好である場合、最大曲げモーメントの値は縦横比 0.8 を越えると、縦横比の値によらずほぼ一定の値をとることがわかる。一方、地盤反力係数が小さいとき、すなわち地盤が軟弱な場合には、一般的には縦横比 0.9 付近で曲げモーメントが極小値をとっていることがわかり、縦横比 0.8 から 0.9 でグラフの傾きが大きくなっていることもわかる。以上のことから、基本的に地盤の良し悪しに関わらず、縦横比 0.8 と 0.9 の間に最大曲げモーメントの発生傾向を大きく変える点が存在することが考えられる。



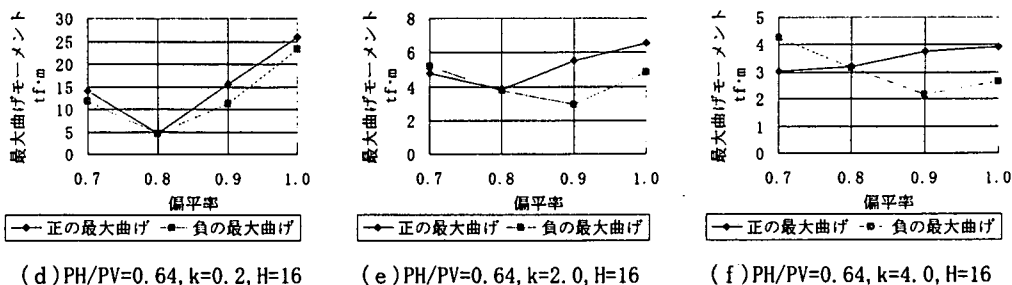


図 1.1. 最大曲げモーメントと偏平率 (楕円形断面)

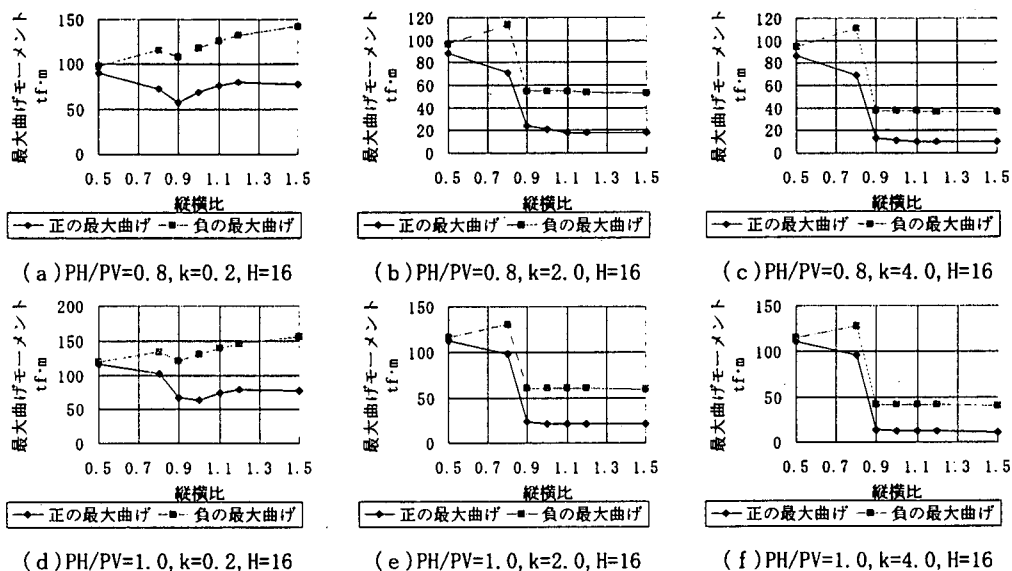


図 1.2. 最大曲げモーメントと縦横比 (矩形断面)

5) 断面形状の変化と最大曲げモーメントとの関係

図 1.3 は矩形断面において、その隅角部に付ける円弧部の曲率半径を楕円形断面まで増加させた場合に、発生する最大曲げモーメントを示した図の一例である。

この図から、負の最大曲げモーメントは円弧部の曲率半径が大きくなると、正の最大曲げモーメントと異なり、ほぼ一様に減少することがわかる。これは、トンネルの隅角部に発生する大きな負の曲げモーメントが円弧部を設けることによって緩和されるためと考えられる。一方、正の最大曲げモーメントは、地盤が良い場合、曲率半径が大きくなると最大曲げモーメントが若干増加する場合が見受けられる。これは、曲率によっては隅角部が地盤側へ変形し、それによって発生する地盤反力が曲げモーメントに影響を与えるためと考えられる。断面形状を矩形から楕円形へと変化させると、最大曲げモーメントの値はかなり低減できることがわかる。発生する断面力を考えると、矩形よりも楕円形の方がかなり有利であることは間違いないが、矩形断面の場合でも、 PH/PV 比や地盤条件に応じて隅角部に適切な曲率を与えれば、隅角部に曲率を有しない完全な矩形断面に比べて発生する断面力を相当に低減できることがわかる。

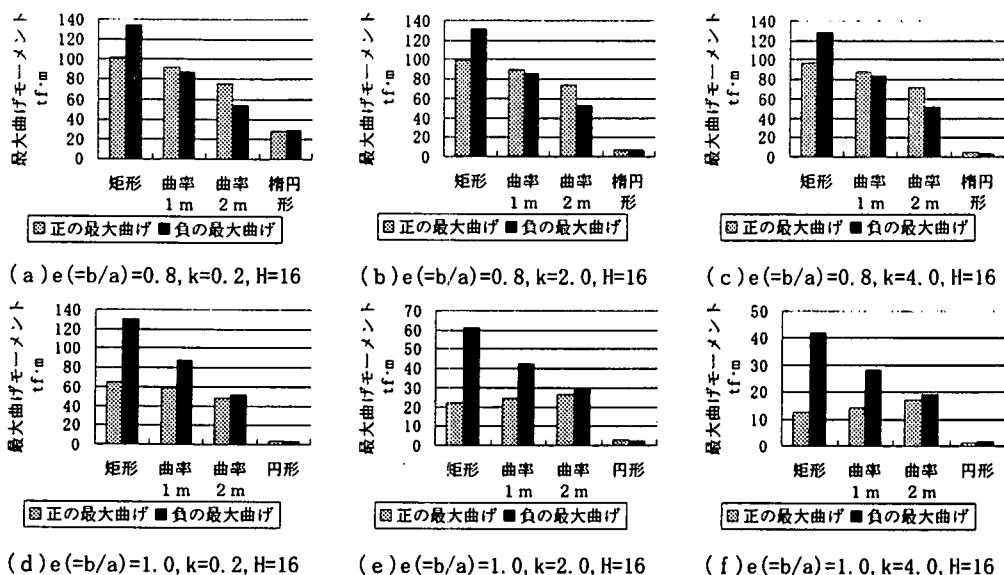


図 1.3. 最大曲げモーメントと断面形状

4. まとめ

本研究によって得られた知見は以下の通りである。

- ①楕円形断面の場合、最大曲げモーメントを最小にする偏平率が存在し、荷重条件とその偏平率の間には、 $PH/PV=e^2$ が成り立つ。
- ②矩形断面の場合、縦横比0.8を境に発生する曲げモーメントの傾向が異なり、縦横比0.8以下の場合は地盤の良し悪しの影響を受けず、最大曲げモーメントを最小とする PH/PV 比は認められないが、軟弱地盤の場合は正の最大曲げモーメントを最も小さくする PH/PV 比が存在する。一方、地盤が良好な場合には、縦横比0.8を越えると最大曲げモーメントの値はほぼ一定である。
- ③両断面に共通な傾向として、土被りと最大曲げモーメント、地盤反力係数と最大曲げモーメントの間には、条件によらず一定の傾向がある。
- ④矩形断面の隅角部の曲率半径を増加させ、その断面を楕円形に近づけていくに従って、負の最大曲げモーメントを大きく低減できる。

今回は楕円形断面および矩形断面シールドトンネルについて、剛性一様なリングと仮定した計算を行ったが、今後は継手を回転ばねで評価した場合の検討を行うとともに、これらの数値実験の結果を踏まえた上で、実際に模型実験等を行いより詳細な検討を加えていく予定である。本研究を進めるにあたって、早稲田大学の卒論生、藤田晋君（現鹿島建設(株)）にお手伝いいただいたことを付記し、感謝する次第である。

【参考文献】

- 1) 小泉淳、村上博智、東出成記：楕円形シールドトンネルの解法に関する研究，トンネルと地下，1991.8
- 2) 北原陽一、木戸義和：シールドトンネルの施工技術(16)・断面の多様化(1)，トンネルと地下，1993.12
- 3) (財)先端技術センターなど：特殊断面シールドの設計・施工技術に関する研究，昭和63年、平成2年
- 4) 東京都下水道局自由断面シールド広報研究会：合理的断面シールド工法の開発に関する共同研究(平成3年度)報告書
- 5) 花房、井口ら：楕円形シールドトンネルの断面形状に関する研究，第49回年次学術講演会概要集Ⅲ-683，1994.9