

III-466

シールドトンネルの軸方向解析モデルによる耐震設計について

中部電力 正会員 依田 真
 中部電力 正会員 西野健三 滝 英治
 日本工営 田中 弘 大槻康雄

1. はじめに

都市部の重要送電施設である地中線洞道などのシールドトンネルを設計する場合、地震時の安全性を考慮した設計が求められる。小泉・西野らはすでにセグメントの継手剛性を評価したシールドトンネルの軸方向解析モデルを提案しているが¹⁾、ここでは、この解析モデルを用いて行なった、実際のシールドトンネルの耐震設計について報告する。なお、本研究では、鋼製セグメントを用いたシールドトンネルを対象としている。

2. 解析モデルの概要^{1) 2) 3) 4)}

①継手部のモデル化：鋼製セグメントのリング継手部は図1に示すように、主桁・縦リブ（あるいは継手板）・スキンプレートおよびリング継ぎボルトで構成されており、この継手部を有効幅をもつ格子梁とボルトの直列ばねとして、リング継手部1箇所当たりの軸引張剛性を表すばねのばね定数 k_{ru} を求めることができる。^{1) 4)}

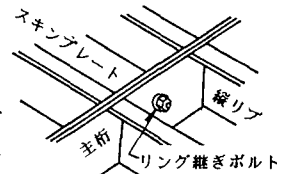


図1 鋼製セグメントのリング継手部

②シールドトンネルの立体構造モデル：鋼製セグメントを用いたシールドトンネルは図2に示すような立体骨組構造にモデル化できる。^{1) 2)} この立体構造モデルを用いればシールドトンネルの挙動を忠実に表現できるが、トンネル全体をこのようなモデルに置換することは計算機の容量・演算時間を考えると物理的に困難である。そこで、立体構造モデルを用いて、トンネル全体を棒構造モデルに置換する。

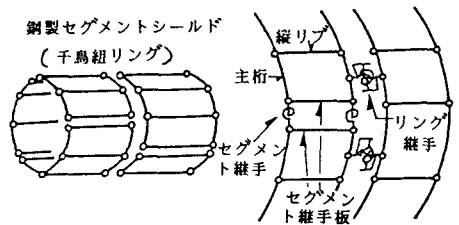
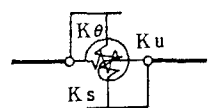


図2 立体骨組構造モデル

③シールドトンネルの棒構造モデル：図3は、シールドトンネルの棒構造モデルを示したもので、セグメントを棒部材に、リング継手部を K_u (軸方向), K_s (せん断方向), K_θ (回転方向) なるばね定数を持つばね部材にそれぞれ置換している。ここで、リング継手の剛性を表すばねのばね定数は、立体構造モデル (2リング分) とそれに対応する棒構造モデルとの比較検討により求めることができる。^{1) 3)}



リング継手部の拡大図

④地震波：線状地中構造物の耐震設計を応答変位法で行なう際に、一般によく用いられている正弦波にモデル化した地震波は、理論的な厳密性に対してやや不十分な部分があることや、トンネル軸方向に地層が変化する実際の地盤に対して適用が困難であることなどの問題点を有するが、ここでは便宜的に、地震波は水平面内を伝播する正弦波であるという仮定を用いた。

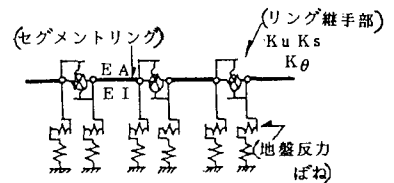


図3 シールドトンネルの棒構造モデル

3. ケーススタディ

ケーススタディは、図4に示す河川部横断箇所の洞道を対象とし、この開削洞道～立坑～シールドトンネルとなるルートのうち、立坑間のシールドトンネル部の耐震設計をシールドトンネルの軸方向解析モデルを用いて行なった。この区間の地盤条件は同図に示すとおりで、解析上の基盤面と見なされるN値50以上の洪積砂礫層は深度約44.5mに水平に位置し、それより上方の表層地盤もほぼ水平成層地盤となっている。地震時挙動解析は、開削洞道～立坑～シールドトンネルの全体系を3次元棒構造モデルと

して扱った。すなわち、開削洞道・立坑部も棒部材にモデル化して、全体の構造モデルに取り入れて計算した。シールドトンネル(洞道としては標準的なものである)の構造諸元は表1のようであり、立体構造モデルを用いて評価したリング継手部ばねのばね定数は、表2のように算定された。

入力地震波は、表層地盤条件より算定された表3に示す諸元の応答変位振幅を持つ正弦波を地盤反力ばねを介して与えた。この時、地震波の入射角度としてはシールドトンネル軸方向に対して $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の間で 5° 刻みで与え、また、シールドトンネル各位置に一波長分の正弦波が通過するように正弦波を進行させた計算を行なった。

計算結果のうち、図5に軸引張力と曲げモーメントのシールドトンネル方向分布図(入射角や波の進行を考慮した計算結果の最大値の包絡線)を、また表4にそれらの最大値(河川下のトンネル部分と、立坑端部)とその時のリング継ぎボルトに生じる引張応力度を示す。立坑付近のトンネル部分で、比較的大きな曲げ応力度を発生しているのがわかる。ここで用いた伝播波形の波長は、表層地盤と基盤との調和平均波長で規定した比較的小さい波長(曲率が大きい正弦波となっている)であることを考慮しても、地震時のシールドトンネルの挙動は、曲げ応力を無視しえない場合があることを示唆するものである。なお、このケースの場合、リング継ぎボルトに高張力ボルトを用いることで地震時許容応力度は満足される。

4. まとめ

シールドトンネルの耐震設計においては、地震波の設定方法にまだ多くの問題点を残しているものの、今回の軸方向モデルを用いれば、実際のシールドトンネルの耐震設計が具体的に行なえることを示した。また、埋設管路などと比べて口径が大きく、断面剛性が大きいシールドトンネルでは、地震時の曲げ応力度も完全には無視しえない場合も考えられ、曲げ剛性を正しく評価することがシールドトンネルの耐震設計を行なう上で、重要であることを示した。今回の検討では、鋼製セグメントを用いたシールドトンネルでは通常施工されている二次覆工を考慮していないが、シールドトンネルの剛性や耐力には、二次覆工も当然影響を与えると考えており、今後、二次覆工を考慮した実規模模型実験、解析モデルの検討をすすめてゆく予定である。なお、本検討を行なうに際しては、東洋大学小泉 淳助教授にご指導を頂いたことを記して感謝いたします。

表1 シールドトンネル諸元

シールド外径	3.90 m
鋼製セグメント桁高	15.45 cm
幅	1.0 m
主桁、継手板厚さ	14.0 mm
縦リブ厚さ	9.0 mm
リング継ボルト	M22, F10T
数	36 本

表2 リング継手部ばね定数

回転ばね K_{θ}	1.161×10^6 tf m/rad
引張ばね K_u	2.553×10^5 tf/m

*) 立体構造モデルで求めた値

表3 地震解析入力条件

表層地盤厚	44.5 m
シールド深度	16.5 m
表層地盤固有周期	2.35 sec
シールド位置最大応答変位	4.77 cm
地震動の波長	237 m
見かけの伝播速度	101 m/sec
トンネル軸に対する入射角度	$0^{\circ} \sim 90^{\circ}, 5^{\circ}$ 刻み

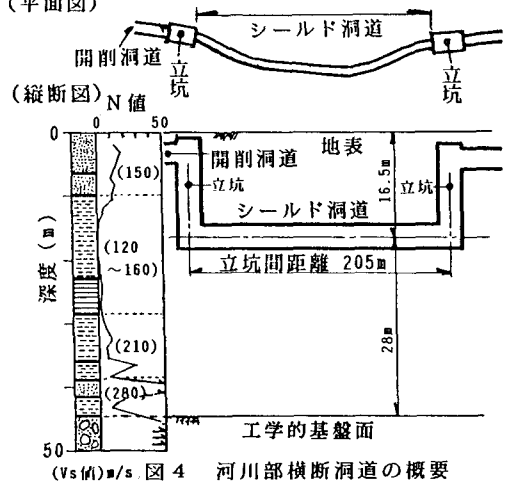


図4 河川部横断洞道の概要

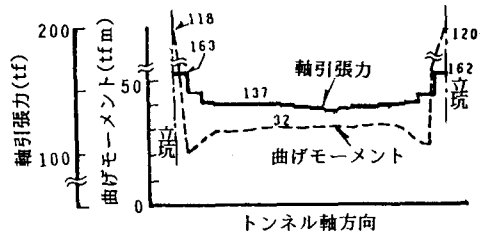


図5 軸引張力・曲げモーメント分布図

《参考文献》1)小泉ら:シールドトンネルの軸方向剛性のモデル化について,土木学会論文集(投稿中), 2)西野ら:シールドトンネルの軸方向挙動に関する模型実験とその考察,構造工学論文集,Vol.34A, 1988.3, 3)西野ら:シールドトンネル縦断方向の現場載荷試験とその考察,土木学会論文集,第376号/III-6,1986.12, 4)村上ら:シールド工事用の挙動について,土木学会論文報告集,第296号,1980,4

表4 解析結果(最大値)

	トンネル部		立坑端部
	軸引張力 tf	曲げモーメント tfm	
軸引張力 tf	137	32	163
(ボルト引張応力度kgf/cm ²)	2,287	355	2,721
曲げモーメント tfm	32	120	120
(ボルト引張応力度kgf/cm ²)	355	1,332	1,332