

1. まえがき

シールドトンネルのリング継手は、地震時にトンネル軸方向の引張りずみを吸収し、いわゆる免震効果を発揮することが期待されている。この効果を等価軸剛性の形で耐震設計に生かすため、継手部を含む交番載荷実験が行われ、また弾性ワッシャーの導入により、さらに変位吸収を向上させる方法が開発されている。筆者はシールドトンネルの実地震時挙動観測<sup>1)</sup>およびシールドトンネル模型の振動実験<sup>2)</sup>により、地中では周辺地盤とトンネルとの相互作用により、継手がそのバネ定数から期待されるほどは変形を吸収しないことを指摘してきた。本論文では、軸対称FEM解析によるパラメトリック・スタディーによって継手の変位吸収を定量的に示し、これを用いて周辺地盤との相互作用を考慮したシールドトンネルの等価引張剛性算定式を導いたので報告する。

2. 軸対称FEM解析

図-1に示すように、シールドトンネルとその外周を覆うようにトンネル外径の6~7倍の周辺地盤を解析対象とし、トンネル軸方向の変形のみに着目する。トンネルが存在しない場合には周辺地盤はr方向に作用する地震慣性力に応じて変形するが、トンネルが存在する場合には地盤はトンネルの剛性によって変形が一部拘束され、一方トンネルは地盤からの変位を外力として受ける状況となる。このような周辺地盤とトンネルの間の相互作用を再現するために、図-2のようなシールドトンネル4.5リング分について軸対称FEMでモデル化し、地盤節点に慣性力を与えることによる静的応力解析を実施した。

解析に用いたシールドトンネルは表-1に示す3タイプとした。また周辺地盤としてはせん断波速度  $V_s = 100, 300, 500 \text{ m/sec}$  の3種類とした。ただし、地盤のポアソン比  $\nu$  を0として、トンネル軸直交方向の地盤境界が無限の状態を擬似的に作った<sup>3)</sup>。

3. 土のせん断抵抗と等価引張剛性算定式

軸対称FEM解析によって得られたシールドトンネル1リング間の継手部の変形量  $d_{jt}$  とセグメント部の変形量  $d_{seg}$  より、両者の比  $r = d_{jt} / d_{seg}$  を計算して表-2にまとめた。地盤が硬くなるにしたがい、各トンネルのセグメント部と継手部のバネ定数の比  $r_k = K_{seg} / K_{jt}$  よりも小さくなり、継手がバネ定数から期待されるほど、変位を吸収してないことがわかる。これを説明するために、図-3に示すように継手部に継手バネと並列に土のせん断抵抗バネ  $K_{gs}$  を仮定する。このとき変位比  $r$  は、次式で与えられる。

$$r = \frac{d_{jt}}{d_{seg}} = \frac{K_{seg}^{gs}}{K_{jt} + K_{gs}} \dots \dots (1)$$

表-1 解析に用いたシールドトンネルの諸元

タイプ	外径 (m)	けた高 (cm)	幅 (cm)	$K_{seg} / K_{jt}$
1	5.1	27.5	90	34.3
2	7.0	30.0	90	15.0
3	13.9	65.0	150	20.0

表-2 rの解析結果と推定値の比較

$V_s$ (m/sec)	シールドトンネルのタイプ								
	1			2			3		
	FEM	0.08	$\alpha$	FEM	0.08	$\alpha$	FEM	0.08	$\alpha$
100	25.6	25.2	0.074	13.0	13.1	0.086	15.3	16.0	0.091
300	6.9	6.4	0.073	5.5	5.5	0.080	4.7	5.0	0.088
500	2.7	2.4	0.070	2.4	2.4	0.080	2.1	2.0	0.084

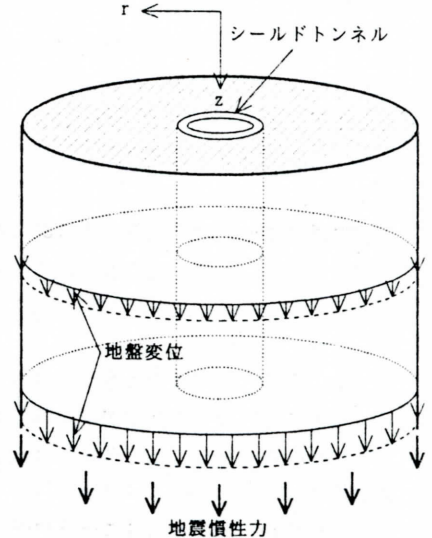
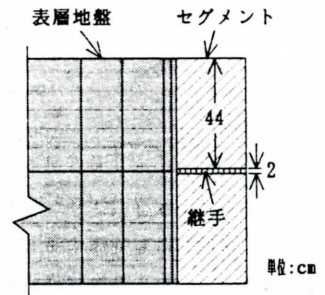
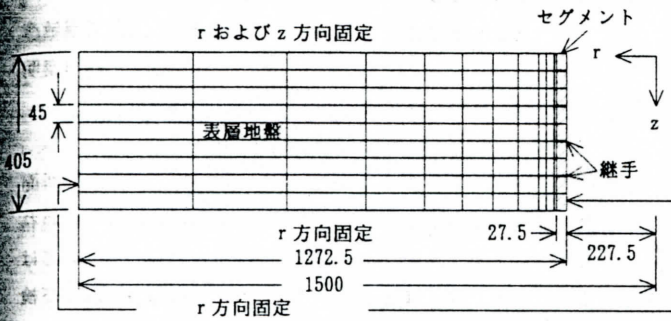


図-1 トンネルの地震時変形概念図



(a) 全体図 (b) 継手部周辺詳細図  
 図-2 FEMメッシュ (トンネルタイプ1の場合)

土のせん断抵抗バネ  $K_{gs}$  を構成する因子としては、地盤のせん断弾性係数  $G$ 、トンネル外径  $D$ 、セグメント幅  $L_{seg}$  等が考えられる。これらの既知の定数と未知数  $\alpha$  によって、 $K_{gs}$  を次式で定義する。

$$K_{gs} = \alpha \cdot \pi G D L_{seg} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\pi$  は円周率であり、 $\pi D$  によってトンネル外周長を表している。表-2中には(3)式によって未知数  $\alpha$  を逆算した結果がまとめられているが、0.07~0.09という非常に狭い範囲に入っており、(2)式が土のせん断抵抗としての物理的な意味を有していることが認められる。すなわち、継手からトンネル軸方向およびトンネル軸直交方向のある範囲にある土が、継手の伸びに対して抵抗する図-3の考え方の妥当性を裏付けている。

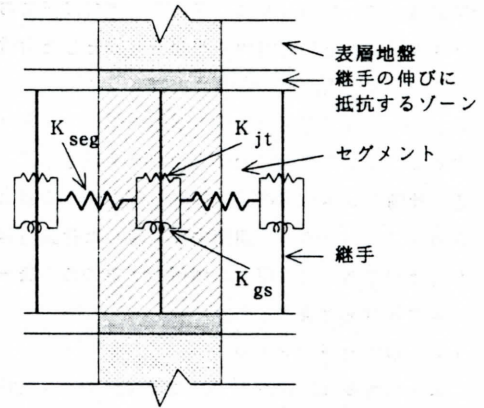


図-3 土のせん断抵抗バネ  $K_{gs}$  の模式図

$$\alpha = \frac{K_{seg} - r \cdot K_{jt}}{r \cdot \pi G D L_{seg}} \quad \dots \dots \dots (3)$$

そこで、セグメント部の軸剛性を  $(EA)_{seg}$  とすれば、(1)式と(2)式より、シールドトンネルの等価引張剛性  $(EA)_{eq}$  は次式を用いて算定することが可能となる。

$$(EA)_{eq} = \frac{K_{jt} + \alpha \cdot \pi G D L_{seg}}{K_{seg} + K_{jt} + \alpha \cdot \pi G D L_{seg}} (EA)_{seg} \quad \dots \dots \dots (4)$$

例えば(2)式において  $\alpha = 0.08$  とし、表-2の“0.08”の欄に示すように推定した  $r$  はほぼFEM解析値と一致しており、 $\alpha = 0.08$  で固定した場合でも、この程度のトンネルおよび表層地盤に対しては等価引張剛性算定式として十分使えることがわかる。

4. まとめ

軸対称FEM解析を用いたパラメトリック・スタディーにより、トンネル外周の土のせん断抵抗を  $K_{gs} = \alpha \cdot \pi G D L_{seg}$  の形で考慮したシールドトンネルの等価引張剛性算定式を提案した。係数  $\alpha$  は外径5m~15m級のシールドトンネル、 $V_s = 100 \sim 500 \text{m/sec}$  程度の表層地盤に対して  $0.07 \leq \alpha \leq 0.09$  の範囲に設定すれば良く、また  $\alpha = 0.8$  で固定したとしても、十分耐震設計に使用できる精度を有していることが示された。

5. 参考文献

- 1) Tamura, C., Hinata, Y. and Suzuki, T.: Earthquake Observation and Response Analysis of A Shield Tunnel, Proc. 9WCEE, Vol. VI, 1988, pp. 563-568
- 2) 鈴木猛康: シールドトンネルの耐震性評価と免震化手法に関する研究, 東京大学工学部博士論文, 1991, pp. 204
- 3) 鈴木猛康: シールドトンネル軸方向の耐震性評価に関する考察, 土木学会論文集, No. 44/I-18, 1992, pp. 137-146