

立坑・杭を考慮した地盤変位が沈埋トンネル縦断方向の応答に与える影響

九州大学工学部 学生会員○矢野 恵美子 九州大学大学院 フェロー 大塚 久哲
(株)オリエンタルコンサルタンツ 正会員 橘 義規 九州大学大学院 正会員 宮森 保紀

1. はじめに

一般に沈埋トンネル縦断方向における耐震設計は、立坑接合部などでの耐震性確保が問題となる。現行の応答変位法による耐震設計では立坑を考慮して地盤変位を算定するには3次元モデルとなることから、従来は立坑を考慮せずに地盤のみの2次元モデルからトンネルへの入力変位を算出することが多い。本研究では、3次元モデルによる有限要素法より立坑を考慮して求めた地盤変位と立坑を無視して求めた地盤変位を弾性床はりモデルに入力して解析を実施し、トンネルの応答に与える影響について比較する。このモデルは函体間と立坑接合部共に可撓継手を有する。また可撓継手の柔度と応答量の関係を把握するために函体間の可撓継手のみを剛結とした場合と函体間と立坑接合部の両方を剛結とした場合についても解析を行う。

2. 解析手法

(1) 対象構造物：本研究は一端が立坑と接続された沈埋トンネルを対象とし、図-1のような鉛直方向2次元の弾性床上的はりとしてモデル化した。トンネルは29節点、立坑は16節点とし、函体間の可撓継手は、二重節点にすると共に3方向のばね要素でモデル化した。地盤ばねはトンネル軸方向と鉛直方向の2方向を考慮する。可撓継手を剛結にした場合の解析は、図-1の函体間の可撓継手②、③を剛結とした「トンネルのみ継手なしモデル」と、立坑接続部の可撓継手①も剛結とした「継手なしモデル」に対して行う。解析モデルにおける各要素の物性値を表-1に示す。

(2) 解析条件：本研究では、構造物とその周辺地盤を弾性床上的のはりにモデル化し、各時刻の地盤の地震時変位を地盤ばねを介して構造物に静的に作用させる応答変位法を採用している。解析モデルには表-2のような4ケースの地盤変位を入力する。Case1とCase2は立坑における杭基礎の有無を表している。これより立坑の支持条件による結果の差異を検討する。Case1-1とCase2-1は立坑を考慮せずに地盤のみで算定した地盤変位をトンネルに入力する現行の設計法の場合、Case1-2とCase2-2は立坑を考慮した地盤変位をトンネルに入力する場合である。これより立坑を考慮した地盤変位がトンネルの応答に与える影響を検討し、自由地盤で求めた地盤変位を入力する従来の方法と比較する。解析時間は0.01秒刻みで30秒間である。

(3) 地盤変位：図-2のような立坑と地盤からなる3次元FEMモデルに対して動的応答解析を行い、図-1のモデルに入力する地盤変位を算定した¹⁾。解析はNewmarkの β 法($\beta=1/4$)による直接積分法で行った。入力地震波は、道路橋示方書V編のI種地盤タイプIIの標準波形例(II-I-1)を用いた。加振方向はトンネル軸方向である。また、表-3に立坑と地盤の諸元を示す。地盤変位は、立坑なし(自由地盤)、立坑あり・杭なし、立坑あり・杭ありの3ケースに対して構造物の水平方向変位と鉛直方向変位を算定した。例としてトンネル中心深度における地盤の最大鉛直方向変位を図-3に示す。凡例は表-3の弾性床上的はりモデルに対する解析ケースに対応している。図-3について、自由地盤の場合は、不整形地盤の影

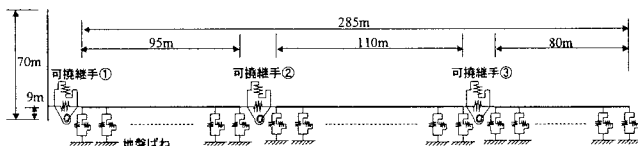


図-1 立坑・トンネルの構造モデル

表-2 地盤変位の組合せ(3次元FEMモデルの解析結果)

	立坑の入力変位	トンネルの入力変位
Case1	立坑あり・杭なし	Case1-1 立坑なし
		Case1-2 立坑あり・杭なし
Case2	立坑あり・杭あり	Case2-1 立坑なし
		Case2-2 立坑あり・杭あり

表-3 地盤変位算出用解析モデル諸元

地盤定数	$\gamma_s=17 \text{ kN/m}^3$, $V_s=50 \text{ m/s}$
立坑躯体条件	躯体地上部 $\gamma=3.8 \text{ kN/m}^3$, $E=5.4 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$
	躯体地中部 $\gamma=11 \text{ kN/m}^3$, $E=1.7 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
杭	$\phi=1500 \text{ mm} \times 225 \text{ 本}$

表-1 構造モデルにおける物性値

トンネル	ヤング係数	$E=3.19 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$
	断面定数	$A=148 \text{ m}^2$, $I=2,260 \text{ m}^4$
継手ばね	軸方向	$5.6 \times 10^6 \text{ kN/m}$
	鉛直方向	$5.4 \times 10^7 \text{ kN/m}$
地盤ばね	水平直角方向	$2.4 \times 10^8 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$
	軸方向	$3.9 \times 10^4 \text{ kN/m/m}$
	鉛直方向	$4.9 \times 10^5 \text{ kN/m/m}$

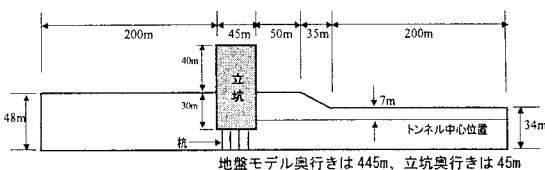


図-2 地盤変位算出用解析モデル

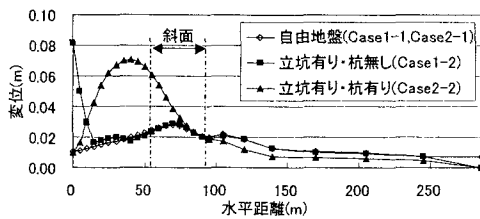


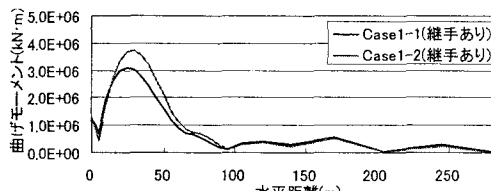
図-3 地盤の最大鉛直変位(トンネル中心位置)

響を受ける斜面途中で最大値が生じる。立坑あり・杭なしの場合は、立坑のロッキングの影響を受けて立坑取付部において変位は最大となり、自由地盤と同じ斜面途中で極大となる。立坑・杭ありの場合は、杭支持された立坑が地盤の水平変位を拘束するため、斜面手前で鉛直方向に大きな変位が発生する。

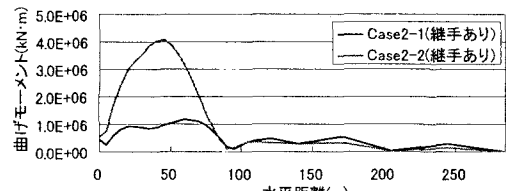
3. 解析結果

(1) 継手あり：結果の一例として、図-4に最大曲げモーメント分布を示す。図-4は、入力地盤変位を反映した分布で、立坑近傍で応答が大きく立坑から遠ざかるにつれて小さくなる。Case1-1とCase1-2はほぼ等しいが、最大値を比較すると前者は後者の約0.8倍である。従って、立坑が杭で支持されていない場合は、トンネルの応答は立坑の有無の影響が小さいことがわかるが、立坑を考慮しない従来の方法では危険側の評価になると考えられる。Case2では、Case2-1とCase2-2で異なる分布をしており、図-3の入力変位の特徴が強く現れている。これは、立坑が杭で支持されて変位が拘束されるために、トンネルの応答は地盤変位の影響を大きく受けたと考えられる。従って、立坑が杭で支持されている場合は、立坑を考慮した地盤変位を入力する必要がある。

(2) 継手の変形量：可撓継手に関して、引張力が作用した時の継手の変形に起因する止水性確保が問題となる。そこで、継手の最大伸び変形量を図-5に示し各解析ケースについて継手の変形量を比較する。



(a) Case1



(b) Case2

図-4 最大曲げモーメント分布

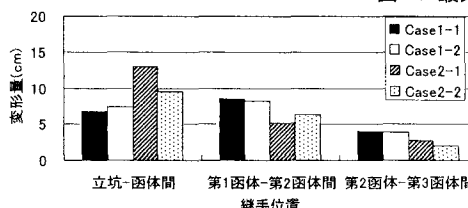


図-5 継手の最大伸び変形量

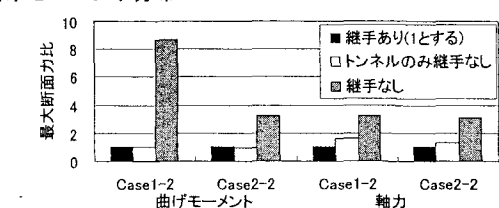


図-6 継手の有無による最大断面力比

Case1-1とCase1-2は全ての継手でほぼ等しい変形量である。よって、立坑が杭支持されていない場合は、立坑の考慮の有無は継手の変形量に関しては影響が小さい。Case2について、Case2-1とCase2-2を比較すると、第1函体と第2函体間の継手の変形量が前者は後者の約0.8倍と過小評価されている。また、立坑とトンネルの接合部では、前者は後者の約1.4倍で、過大評価される。これらの差異は、トンネルに入力する地盤変位と立坑変位が連続していないためと考えられる。

(3) 継手の効果：立坑を考慮したより正確な地盤変位を入力する場合の可撓継手の効果を調べるために、曲げモーメントと軸力の継手ありの場合の最大値をそれぞれ1とし、トンネルのみ継手なしと継手なしの場合の最大値の比の比較を行った。図-6より、トンネルのみ継手なしと継手ありを比較すると、曲げモーメントでは前者は後者の約1.5倍の大きさだった。一方、継手なしと継手ありを比較すると、曲げモーメントでは前者は後者の3～9倍、軸力は後者の約3倍であった。これより、可撓継手によって断面力が低減され、特に立坑とトンネルの接合部での可撓継手の効果が非常に高いことがわかる。

4. まとめ

以上の結果より、立坑が杭で支持されていない場合は、従来の入力方法では発生断面力は過小評価された。杭で支持されている場合はさらにその度合いが高く、継手の変形量に関しても過小評価される箇所があった。従って、沈埋トンネル縦断方向の耐震性検討に際しては、地盤と構造物の相互作用を考慮した、より正確な地盤変位を入力する必要がある。

参考文献 1) 橋義規, 大塚久哲, 吉村茂: 立坑取付部のトンネル耐震設計に用いる地盤変位の評価法に関する研究, 地震工学論文集, Vol.1. 27, CD-ROM, 論文番号34, 2003.