

III-378 土砂層における NATM トンネルの 縦断面に関する動的解析

九州大学工学部 学生員○相川 明

九州大学工学部 正 員 樗木 武

清水建設（株） 正 員 高崎英邦

1. はじめに 本研究は、砂質地盤中に施工される NATM トンネルの耐震安定性を検討するものであり、トンネルの施工条件および地山条件の変化がトンネルの動的応答特性に及ぼす影響を把握し、NATM トンネルの耐震設計法のための諸基礎資料を得ることを主たる目的とするものである。前報までにおいて²⁾、ある水路トンネルを一例にとりあげ、軟弱な砂質地盤中に施工される NATM トンネル横断面の地震時の挙動を二次元解析し、その結果より、本トンネルに限ってではあるが、静的に安全な設計であれば、耐震上も問題はないとの結論を得た。しかるに、トンネルおよびその周辺地山の挙動は三次元的であると想定されることから、今回は、トンネル縦断方向に斜め下方より地震波が入力する場合について Newmark の β 法を用いて時刻歴解析を行うものである。すなわち、自由地盤とトンネル施工後の 2 つの場合について二次元モデルを作成し、本地盤の 1 次の固有振動数である 0.7Hz の正弦波をモデル下端に入射角 30° で入力（水平加振）し、その応答を比較した。入力波は変位波形を用い、基盤での入力加速度の最大値が 100gal になるように換算した。

図-1 解析モデル [幅 2200m, 深さ 100m, 節点数 296, 要素数 504]

2. 解析条件 解析に用いたモデルを図-1に示す。実際のトンネル断面は中空の馬蹄形をしており、トンネル周辺部と中心部では、その挙動が異なると想定される。しかし、二次元的なモデルにおきかえる場合は、中空であることを表現できないので、本解析では、トンネルを一樣な棒状物質で近似するものである。図中の第 3 層がトンネル縦断面であり、それ以外の部分が周辺地山を表している。解析対象領域は中央付近の幅 600m の領域であり、地盤構成にあわせて幅 30m の三角形要素で要素分割した。さらに、境界での拘束条件および反射の影響を排除するために、領域の両側にそれぞれ 800m の緩衝領域を設け、無限遠での変位を 0 と仮定し、側方の境界を固定端とした。モデルの深さは 100m であり、下端は鉛直方向の変位を拘束した。モデルの物性値を表-1に示す。これは、地盤調査結果をもとに、本モデルの各層の厚さにあわせて重みづけ平均を行い、できるだけ実際の地盤構成を反映するように決定したものである。表層から第 4 層までは地盤区分 1~4 の値を用い、それ以深については地盤区分 4 の値を用いた。地盤の減衰定数は 0.15 と仮定する。トンネル縦断面の解析では、覆工断面にあたる第 3 層の物性値として、地盤区分 5 の値を採用した。入力波は、モデルの基盤の中央の幅 600m の区間に、時間間隔 0.005 秒で水平成分のみ入力した。本地盤の地表付近の縦波速度はおおよそ $V_s=400\text{m}$ であるから、本モデルの大きさにて 1 波長が十分入ることがわかる。

表-1 モデル地盤の動的物性値

地盤区分	密度 ρ (t/m^3)	動ポアソン比 ν_a	動弾性係数 E_a (tf/m^2)	動せん断弾性係数 G_a (tf/m^2)
1	1.71	0.326	3.08×10^4	1.17×10^4
2	1.92	0.361	4.83×10^4	1.77×10^4
3	1.94	0.479	9.24×10^4	3.14×10^4
4	1.95	0.469	1.57×10^5	5.38×10^4
5	2.30	0.167	2.10×10^5	1.04×10^5

3. 解析結果 (1) 自由地盤縦断面の解析結果 図-2は自由地盤モデルの中央地点について、深さの異なる 6 点の応答変位を示したものである。地表に近くなるにつれて、波動が増幅され、しかも、ピークを与える時刻が少しずつ遅れる様子がよくわかる。図-3は、覆工施工位置について、水平距離の違いによる応答変位のずれを示したものである。モデルの右になるにしたがって、ピークを与える時刻がずれており、しかも、その値が大きくなる傾向がみられる。図には、応答の水平成分の他に鉛直成分も示してあるが、鉛直

成分は、時刻や場所により異なるものの、水平成分のおおむね 3分の 1 以下である。時刻歴における最大値はモデルの中央から右側に 240m 離れた地表面で発生し、発生時刻は 3.2秒前後である。最大応答加速度は 330gal であり、最大変位は 18cm を示している。それに較べ、モデル中央の地表では、応答加速度が 140gal であり、変位が 9.8cm を示している。また、覆工施工位置でも最大応答値の発生地点およびその時刻は地表と同一であるが、地表に較べてかなり小さい値である。

(2) トンネル施工後の解析結果 図-4はトンネル縦断面モデルの中央について、深さの異なる 6点の応答変位を示したものであり、地表に近くなるにつれて応答が増幅され、位相が遅れる傾向が認められる。ただし、覆工の剛性が大きいことから、覆工の上端と下端ではほぼ同一の挙動をしているので、図では 2本の曲線が重なって見える。自由地盤の解析結果と較べるならば、トンネル施工後のほうが応答も小さく、周期も短くなっている。これは、剛性の大きい覆工の施工により地盤全体の剛性が高まり、波動が自由地盤より速く伝達されるものと考えられる。また、図-5に覆工施工位置における応答変位の時刻歴を示す。この場合も自由地盤と同様に、モデルの右側になるほど、応答が大きくなる傾向があるものの、全体的に自由地盤に較べて応答が小さく、図には示していないが、隣接する節点間の変動も小さく滑らかである。応答の最大値は自由地盤の場合と同様にモデルの中央から右側に 240m 離れた地表面で発生し、発生時刻は 3.2秒前後である。最大応答加速度は 260gal であり、最大変位は 13cm である。モデルの中央では、最大加速度が120 gal であり、最大変位が 8.9cmである。自由地盤と較べて約 10%ほど低減している。トンネル施工位置での最大応答値も、自由地盤よりは小さく、最大値は加速度が 170gal であり、変位は 11cm である。地表面と較べると、変位については約 10%ほど、また、加速度についてはおよそ 1/3も小さい。

4. まとめ 自由地盤でもトンネル施工後でも、地表に近くなるにつれて、また、モデルの右側になるにつれて波動が増幅され、しかも、位相が遅れる傾向がある。また、トンネル施工後は、自由地盤に較べて全体的に応答が小さく、隣接する節点間の変動も小さい。これは、本解析例の覆工は周辺地山に較べて剛性が大きいことから、覆工の施工により地盤全体の剛性が高まり、挙動が制限されることが原因しているものと考えられる。

<謝 辞> 本研究を行うにあたり御指導下さった九州大学工学部平田助教授および清水建設(株)熊坂氏に感謝致します。

<参考文献> 1)相川, 阿部, 樗木, 鳥野, 高崎:二重殻構造NATMの地震時挙動について, 土木学会西部支部研究発表会, 1985 2)阿部, 相川, 樗木, 平田, 高崎:二重殻構造NATMの動的挙動について, 土木学会第40回年次学術講演会, 1985 3)阿部, 相川, 樗木, 平田: NATMの振動特性について(1), 土木学会西部支部研究発表会, 1986

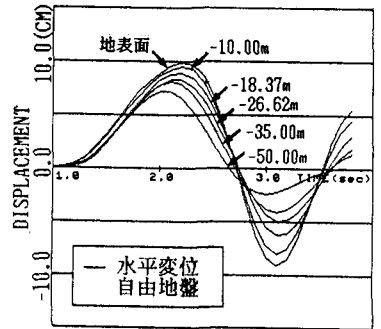


図-2 自由地盤の応答変位時刻歴の深さによる差異(モデル中央)

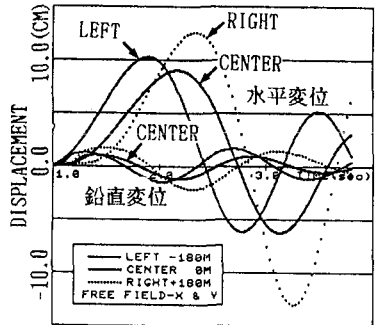


図-3 自由地盤の応答変位の水平位置による差異(地中-18.37m)

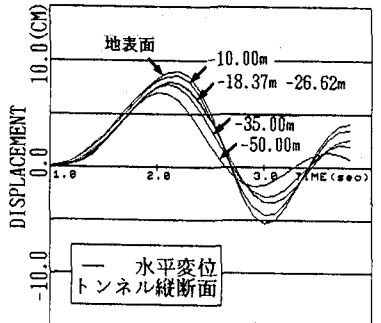


図-4 トンネル施工後の応答変位時刻歴(モデルの中央での値)

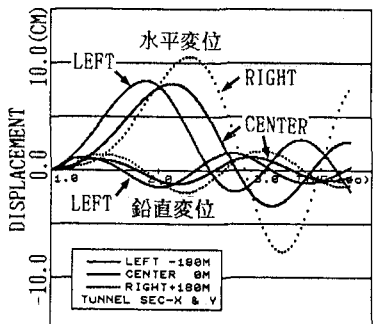


図-5 トンネル縦断面の応答変位時刻歴(覆工の上端-18.37m)