

内99-2

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

シールドトンネル縦断方向の
地震時挙動に関する研究

A Study on the Seismic Behavior in
the Longitudinal Direction of Shield Tunnels

申請者

何川

Chuan HE

建設工学専攻・構造設計研究

1999年7月

一般に地中構造物は地上の構造物に比べて地震の影響を受けにくいと言われている。事実 1995 年に発生した兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）の際にも、シールドトンネルを含む地中構造物が受けた被害は、地上の構造物に比べて軽微なものであった。その一方で、シールドトンネルは交通、電力、通信、上下水道などいわゆるライフライン施設として利用されていることが多いので、これらの施設が地震で被害を受けた場合、地域の生活機能や経済活動および都市機能に大きな影響を与えるとともに、被災後の救援・救急活動や復旧活動などに支障が生じることも事実である。また、現在シールドトンネルは大型化し、複雑な断面形状を有するものも増えてきている。このため、社会環境上の観点からも、シールドトンネルの耐震設計は避けて通れない状況にある。

シールドトンネル縦断方向の地震時挙動を支配する要因には、地震動の特性、地盤の特性、構造物の特性などが挙げられる。地震時には地盤との相互作用によってシールドトンネルには、変形や断面力が生じる。地盤条件や構造条件が変化する部位などでは、地盤や構造物間の振動特性の違いにより特に大きな変形や断面力が生じやすい。これは 1985 年のメキシコ地震、1995 年の兵庫県南部地震などでも指摘されている。また、1923 年の関東大震災や 1978 年の宮城県沖地震などから、シールドトンネルと似たような埋設管などの地震被害が地形条件や地盤条件の変化部に発生しやすいという知見も得られている。

一方、シールドトンネルに関する示方書、設計標準および指針類などをみると、シールドトンネル縦断方向の耐震計算法では、応答変位法を採用し、地震動を表面波動や位相差をもつ実体波動と考え、均質な地盤中に発生する変位や変形について検討することになっている。しかし、不整形地盤に発生する変位や変形についてはあまり検討されておらず、その基礎的な研究も実務的な研究もいまだ不十分と思われる。またトンネル軸線に沿う地盤の地震時挙動や、軸直角方向と軸方向とに地震動が作用する時のトンネルと地盤との相互作用および、適切なシールドトンネルの構造解析モデルなどもいまだ明確にされておらず、シールドトンネル縦断方向の合理的かつ経済的な設計を考える上で、これらを解明することは緊急の課題となっている。

本研究ではまず、覆工構造の特徴を考慮したシールドトンネル縦断方向の構造モデルを基に、実物の鉄道単線トンネルを相似則を用いてモデル化した。そしてセグメントリングのみで構成されたトンネル模型と、これに二次覆工を施したトンネル模型とを用いて、特にトンネル全体の剛性の違いによる挙動に着目し、トンネルの通過地盤が急変する場合と基盤からの層厚が急変する場合との 2 通りの不整形地盤中にトンネルが構築された場合を想定して模型振動実験を行った。

次に、不整形地盤模型の条件を考慮し、地盤の三次元（または一次元）動的時刻歴応答解析により得られたトンネル軸線に沿った地盤変位の時刻歴、または模型地盤の振動実験によるトンネル軸線に沿ったある時間断面の地盤変位を用い、

広義の応答変位法による解析を行った。

最後に、模型振動実験の結果に考察を加えるとともに、それと広義の応答変位法による解析結果との比較を行って、不整形地盤の地震時挙動、トンネルと地盤との相互作用、トンネルの構造解析モデルの妥当性、入力変位の計算方法の違いが解析結果に与える影響を検討した。

本論文は 6 章より構成されており、その概要は次のとおりである。

第 1 章は序論であり、本研究の背景と目的、シールドトンネル縦断方向の地震時挙動に関する従来からの研究の概要と問題点、本研究の概要および論文の構成について述べている。

第 2 章は、本研究で行ったシールドトンネルの模型振動実験について述べたものである。実験の対象として想定したシールドトンネルは外径 7.0m、仕上がり内径 5.8m の鉄道単線トンネルで、セグメントは幅 1m のコンクリート平板形セグメントである。地盤は大都市における実測のボーリング調査結果を参考に、固有振動周期が急変する地盤として、トンネルの通過地盤が洪積層から沖積層に急変する場合と基盤から地表までの沖積層の層厚が急変する場合とを想定している。

まず、密度と弾性係数とを独立のものと考え、長さの相似比および弾性係数の相似比を 100 分の 1 とした。シールドトンネル模型は、その製作上の精度および測定機器の設置等を考慮し、10 リング分のセグメントを剛性が一様に低下したリングと考えてモデル化することとした。セグメントリングは天然ゴム管で、二次覆工リングは低密度ポリエチレン管でそれぞれモデル化し、一次覆工と二次覆工との隙間にはシリコーンゴムを注入して両覆工間の力の伝達ができるようにした。また、リング継手の軸圧縮特性は軸引張特性と同じにし、セグメントリングと同じ断面形状を有する幅 3mm の円環状の合成ゴム部材に置換してこれをモデル化した。一方、模型地盤は、長さ 200cm、幅 80cm、厚さ 28cm で、長さ方向の中間部で洪積層から沖積層へ急変する地盤、および長さ 200cm、幅 80cm、薄い層の厚さ 28cm、薄い層の厚さ 21cm で、長さ方向の中間部で基盤からの層厚が急変する沖積層地盤を想定したものであり、地盤は弾性体と仮定し、地盤材料にはシリコーンゴムを用いた。なお、シリコーンゴムは自立性が高いため、模型地盤の境界面は自由面としている。

次に、上述した 2 種類の模型地盤を対象として振動実験を行った。模型地盤には正弦波と 4 種類の実地震波をそれぞれトンネルの軸直角方向と軸方向に入力した。一次覆工のみのトンネル模型を埋設した振動実験および二次覆工されたトンネル模型を埋設した振動実験に先立ち、トンネル模型を埋設しない地盤のみの場合の振動実験も行っている。

第 3 章は、解析手法について述べたものである。まず、線状地中構造物の縦断方向の耐震検討に用いられる解析手法、特に応答変位法の体系とその評価について述べた。次に、本研究に用いた広義の応答変位法の解析手法と特徴について、

地盤変位の算出方法、シールドトンネル縦断方向の静力学的構造モデル、各種ばねのばね定数の算定方法などについて詳述した。

シールドトンネルの質量は、一般にもともとそこに存在した土の質量に比べてはるかに小さいため、トンネルの地震時挙動は周辺地盤の動的な挙動に支配されると考えられる。したがって、地震時の地盤の変形挙動が把握できれば、それをはり一ばねモデルのような静力学的構造モデルのばね先に変位を与えることによって評価できるものと考えられる。このため解析には広義の応答変位法を用いた。

地盤の時刻歴応答解析には、三次元動的有限要素法と重複反射理論との2通りの方法を用い、地盤の減衰定数などは地盤のみの振動実験から得られたものを、また、解析用の入力波には、実験から得られた振動台の時刻歴加速度を用いている。応答変位法に用いたトンネル縦断方向の静力学構造モデルには、セグメントの構造的特徴、覆工間の相互作用およびトンネルと地盤との相互作用などを十分に考慮したモデルを用いるとともに、そのモデルに用いられる各種ばねのばね定数の算定方法を明示した。

解析は2種類の模型地盤のそれぞれについて、軸直角方向加振と軸方向加振とに分け、一次覆工のみのトンネルの場合と、これに二次覆工を施したトンネルの場合とを対象として行った。

第4章は、地震動が軸直角方向に作用する場合の模型振動実験結果と解析結果およびその考察をまとめたものである。まず、模型振動実験結果に考察を加えるとともに、それと広義の応答変位法による解析結果との比較を行い、次に、地震動が軸直角方向に作用する場合に、地盤が急変するケースと層厚が急変するケースとについて、不整形地盤の挙動、トンネルと地盤との相互作用、トンネルの構造解析モデルの妥当性、入力変位の計算方法の違いが解析結果に与える影響を検討した。

第5章は、地震動が軸方向に作用する場合の模型振動実験結果と解析結果およびその考察をまとめたものである。まず、模型振動実験結果に考察を加えるとともに、それと広義の応答変位法による解析結果との比較を行い、次に、地震動が軸方向に作用する場合に、地盤が急変するケースと層厚が急変するケースについて、不整形地盤の挙動、トンネルと地盤との相互作用、トンネルの構造解析モデルの妥当性、入力変位の計算方法の違いが解析結果に与える影響を検討した。

第6章は、本研究で得られた結論をまとめたものであり、シールドトンネル縦断方向の地震時挙動に関する知見を総括して述べている。