

| | |
|------------|--|
| 氏名 | 田中 努 |
| 博士の専攻分野の名称 | 博士 (工学) |
| 学位記番号 | 医工博甲第270号 |
| 学位授与年月日 | 平成25年9月26日 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項該当 |
| 専攻名 | 環境社会創生工学専攻 |
| 学位論文題目 | 継手の効果とひびわれの影響を考慮した 都市トンネル縦断方向の耐震設計法の研究 |
| 論文審査委員 | 主査 教授 鈴木 猛康 教授 杉山 俊幸 教授 平山 公明 准教授 齊藤 成彦 准教授 吉田 純司 准教授 高橋 良輔 |

学位論文内容の要旨

現行の耐震設計法では、地下の線状構造物が地震時に地盤変位に追随して挙動することから、トンネルを周辺地盤で支持された弾性床上の梁に置換える力学モデルに基づいて、耐震設計法が構築されている。都市トンネルの縦断方向の耐震設計に用いる地震応答解析では、トンネルは梁あるいは棒としてモデル化される。このような解析モデルでは、有限な長さを有するトンネル要素に大きなひずみが発生する場合は、その箇所に可撓継手や伸縮目地として弱いばねを導入すれば、ばねがこの要素の変位を吸収するため、トンネル躯体の断面力は低減され、トンネルの耐震性が確保されると考えられている。したがって、可撓継手の構造と配置を工夫することこそが、現行の耐震設計における主要な対策となっている。しかしながら、このように可撓継手の単純な剛性評価に問題があることが指摘されており、またトンネル躯体のひびわれによる非線形性を無視し、耐震対策として可撓継手の導入を優先するのは不合理と考えた。そこで、本論文では、これらの問題を明らかにし、より合理的な耐震設計法を提案したものである。

第1章では、研究の背景と目的を示し、第2章では、第1章で示したトンネル縦断方向の耐震設計法の課題を詳述した。対象とする都市トンネル縦断方向の耐震設計法の基本である「応答変位法」の考え方と技術基準、および現行のトンネル縦断方向の耐震設計の実例として、開削トンネルとシールドトンネルに適用された可撓継手導入による断面力低下の考え方、ならびに継手の構造と配置の設計結果を示した。最後に本研究に関わる既往の研究を示し、現行のトンネル縦断方向の耐震設計法の課題を整理した。

第3章では、最初の課題である継手周囲の地盤の抵抗を考慮した継手ばね定数の評価法を提案し

た。シールドトンネルについては鈴木が評価式を提案しているが、他の形式のトンネルへの適用については検討が行われていない。西岡は矩形断面のトンネルモデルにおいて、FEM モデルとばね質点系モデルによる断面力評価結果の相違を検討したが、トンネルの剛性評価については言及していない。そこで、本章で、鈴木や西岡が指摘する現象を、開削トンネルとシールドトンネルを対象として静的 FEM 解析によって確認した上で、継手周囲の地盤の抵抗を力学モデルによって定式化した。この提案式より、地盤の抵抗が継手周囲の厚さ 15cm 程度の範囲でしか生じないと考えられ、表層地盤の層構造やトンネルの形式や規模によらないことが明らかとなった。さらに、この提案式を多くの実トンネルに適用し、地盤の抵抗を考慮した継手ばね定数は、現状の実設計手法で評価している継手ばね定数に対して、小さい断面のトンネルでは 2 倍程度に、大きな断面のトンネルでは 3~5 割増し程度になることを示した。

第 4 章では、2 つめの課題であるトンネル躯体にひびわれが生じた場合のトンネル縦断方向の引張剛性の評価法を提案した。まず、マッシュパナコナクリートからの鉄筋の引き抜きにおける付着力の式を用いて、トンネル部材の圧縮引張実験の結果を再現し、ひびわれの発生位置が分かれば引張剛性の評価が可能であることを示した。次に、棒部材の引張における付着力を定式化するために実験を行ってひびわれ部の鉄筋の抜け出し量と鉄筋のひずみ分布から付着力を求め、その結果に基づいて剛性評価法を提案した。これらの剛性評価法は、個々の実験結果を概ね再現できるが一般化が難しく、現設計で定めている配筋に基いたトンネル躯体の剛性評価法として課題があることを示した。次に、近年、設計実務でも鉄筋コンクリート構造の橋脚やトンネル横断面の非線形応答を評価するために使われている「平均ひずみとテンションステイフネスの関係に基づく FEM 解析法」を用いて、実トンネルの配筋状態を模した棒部材を引張り、ひびわれ発生後の剛性変化を定量的に把握した。このトンネル躯体のひずみと剛性に基づいて、応答変位法を適用してトンネル応答を求め、地盤とトンネルのひずみの関係を図に表した。この図は、トンネル縦断方向の配筋量に応じたひびわれ後の躯体に生じるひずみと地盤ひずみとの関係を表すため、地震時に想定される着目点の地盤ひずみに対する対象トンネル躯体の状態を概ね想定できるものである。このトンネル躯体のひずみと剛性との関係を考慮して、応答変位法によりトンネルの応答を求め、地盤ひずみとトンネルのひずみの関係を図示して、トンネルの構造計画や、耐震設計に用いる手法の選択など、実務設計に有用であることを示した。

第 5 章では、3 つめの課題として挙げた「継手に全面的に依存せずにトンネル躯体のひびわれを考慮した合理的なトンネル縦断方向の耐震設計法」を提案した。対象トンネルとその地盤に想定されるひずみの関係図を作成し、トンネルひずみを次の 3 つの範囲に分け、そのひずみレベルに応じて耐震設計の流れを変える新しい考え方を提案した。

- ①地盤ひずみが小さくトンネル躯体にひびわれが発生しない範囲
- ②地盤ひずみが大きくトンネル躯体にひびわれが生じるが鉄筋が降伏に至る前の範囲
- ③トンネルひずみが鉄筋の降伏ひずみを上回る範囲

次に、実トンネルを対象にした試算を行い、提案した耐震設計手法の実務設計への適用例を示し

た。東京の平野部の実地盤において阪神淡路大震災級の大地震が発生したときの実トンネルに生じる断面力やひずみを示した。その結果、第3章で提案した継手周囲の地盤の抵抗を考慮した継手ばね定数の評価法を適用すると、現行の耐震設計の考え方では危険となり継手を増設する必要があること、ならびに第4章で提案したトンネル躯体のひびわれを考慮した剛性評価法を適用すると、縦断方向の配筋量によりトンネル躯体に生じる断面力とひずみの大きさが大きく変わり、継手を増設しなくても躯体の安全性が確保できることを示した。

第6章では、本論文の結論として得られた成果について要約し、また、実務設計に適用する上でまだ検討しなければならない課題を示した。

論文審査結果の要旨

都市トンネルの縦断方向の耐震設計では、トンネルに大きなひずみが発生する場合は、その箇所
に継手を設置して変位を吸収し、断面力を低減させている。ところが、継手を導入しても、トンネル外周に地盤による拘束がある限り、期待した変位吸収効果は得られないため、現行の耐震設計法では、継手による変位吸収を過大に評価している。

そこで本論文では、トンネル外周の地盤の抵抗を考慮して、継手のばね定数を評価するとともに、トンネル躯体のひびわれを考慮した剛性評価法を導入することによって、より合理的なトンネル縦断方向の耐震設計法の考え方を提案した。本論文で得られた主な成果は、以下の通りである。

1. 継手周囲の地盤抵抗を考慮した継手ばね定数の評価法

トンネル外周の地盤の抵抗によって継手の変位吸収効果が低減する現象は、鈴木や西岡が既に指摘していた。本論文では、開削トンネルとシールドトンネルを対象とした3次元静的解析に基づいて、継手周囲の地盤抵抗の評価式を提案した。この提案式によれば、継手の引張変形に対して地盤が抵抗するのは、トンネル外側の厚さ15cm程度の範囲に留まっており、トンネルの形式や規模によらないことがわかった。さらに、地盤抵抗の影響を考慮した場合の継手ばね定数は、現行の設計で用いている継手ばね定数に対して、小断面のトンネルで2倍程度に、大断面トンネルでは1.3～1.5倍になることがわかった。

2. トンネル躯体のひびわれを考慮したトンネル縦断方向の引張剛性評価法

「平均ひずみとテンションスティフネスの関係に基づくFEM解析法」を用いて、実トンネルの配筋状態を模した棒部材を引張り、ひびわれ発生後の剛性変化の特性を定量的に示した。このトンネル躯体のひずみと剛性の関係を考慮して、トンネルの応答を求め、地盤ひずみとトンネルひずみの関係を図示した。

3. トンネル躯体のひびわれを考慮した合理的なトンネル縦断方向の耐震設計法

対象トンネルに対して、地震時の地盤ひずみとトンネル躯体ひずみの関係図を作成し、トンネルひずみの3段階に応じて、耐震設計を実施する合理的な耐震設計法を提案した。

現行の耐震設計法では、トンネル躯体の非線形挙動を無視するため、対策としてはまず継手導入

が優先されることとなり、極めて不合理であった。したがって、本論文で提案された手法は、トンネル縦断方向の合理的な耐震設計法と評価できる。本論文では、提案された耐震設計法を適用した耐震設計の試算結果が示されており、提案手法の実務設計への適用を容易にしている。

以上のように本論文では、トンネル外周の地盤の抵抗を考慮して、継手のばね定数を評価するとともに、トンネル躯体のひびわれを考慮した剛性評価法を導入することによって、より合理的なトンネル縦断方向の耐震設計法の考え方を提案し、さらに耐震設計の試算結果を示して実務設計への適用を容易にした。都市トンネルの耐震設計の専門家として長年実務設計に従事してきた筆者だからこそ、取り組むことのできた研究課題であり、その成果は学術的に高く評価されるとともに、実務設計にも貢献するものと評価される。したがって、本論文は、全審査委員が一致して博士（工学）の学位論文として適格と判断し、合格と判断した。