

審査の結果の要旨

氏名 西山 誠治

一般に地下構造物は地上構造物に比べ耐震性が高いとされている。これは地下構造物が周辺地盤に拘束され、その動きに追随して変形するためであり、事実、地盤が断層や斜面崩壊などで、地下構造物を巻き込んで大きく破壊した事例を除いては大きな被害の報告はなかった。しかし1995年の兵庫県南部地震は、直下地震の強い揺れによっては、これまで安全と考えられていた地下構造物にもその内空を維持できないほどの被害が生じることを示す結果となり、これまでの安全神話に大きな警鐘を鳴らすことになったのである。一方で数百年から千年に1回程度の発生確率の低い強震動に対して、従来のように構造物の損傷を許容しない設計法もまた合理的ではない。損傷を許容しつつ、地下構造物の内空が維持され、その重要な機能を損なわないことを目指した耐震設計法の確立が強く求められるようになったのがこの論文の背景である。

本論文は、強震時における地下構造物の挙動の実際を把握し、それに対応した耐震設計法を確立することを目的としている。まず第1章では、上記のような研究の背景と目的についてまとめている。

第2章では、1995年兵庫県南部地震における開削トンネルの地震被害の実態とその特徴を明らかにし、耐震設計法で留意すべき以下の事項をまとめている。すなわち、構造物としての機能を損なうに至った原因はRC中柱の損壊であり、この損壊した中柱が、トンネル上床版上部の土荷重を支えきれなかったことがトンネル内空を潰すことにつながったとしている。またかろうじて内空が維持できた個所でも、中柱がせん断破壊を受けた区間はその補修に多大な経費と手間がかかっていること、一方、中柱が曲げで破壊した区間では、柱が破壊後も上部の土の荷重を支え続けられたため、補修の作業も比較的容易に済んでいることを示している。ただし、側壁に大きな曲げクラックが生じた区間では多大な復旧時間を要しており、曲げ破壊であっても部材の機能によっては過大な変形は許容できないことがあることにも触れている。さらにこのような被害の発生パターンは周辺地盤が地震時にどのように変形したかに密接に関連していることを、地表面に残留した地盤変位を調査することで示している。そして、神戸のトンネルの軸方向と地表面の残留変位の方向は直交する位置関係にあったこと、地震動の卓越方向が残留変位の方向と概ね一致することなどを確認している。

このような知見は地震時の地盤の変形に追随して地下構造物が大きく変形する可能性があることを示しており、設計の基本概念を決定付ける重要な意味を持つ。そしてそれは、地盤と地下構造物の非線形相互作用をいかに合理的に設計に取り込むかという困難な課題を課している。そこで第3章では、特に著しい非線形化の進行するであろう地盤と構造物の境界面で、剥離や滑りなどの影響をどのように評価すべきかについて解析的および実験的な検討を実施している。

その結果、これらの非線形性の進行は、構造物と地盤の剛性比に強く支配されることが明らか

になった。ここでいう構造物の剛性は、周辺地盤の存在を考慮しない状態で箱型トンネルの上床版に水平方向に载荷したときの、下床版に対する変位から求められる等価せん断剛性 G_s であり、このトンネル断面部分を土に置き換えた時の土の剛性 G_g に対する比をとれば、 G_s/G_g はトンネルそのものが土に対して相対的にどの程度固いのかを示す重要な指標になる。 G_s/G_g が 1.0 以上の範囲では、トンネル・地盤の協会部分での非線形性を無視することが安全側の結果を示すこと、そのメカニズムは構造物の負担する層せん断力の変化で説明できることが示された。この結果は、シリコン地盤とトンネル模型の間にテフロンシートを挿入して剥離や滑りを模擬した模型振動実験によっても確認された。これらの非線形挙動の影響程度をもとに、各種の解析方法の非線形挙動への適用方法が検討された。

第4章では、“トンネル・地盤間に生ずる相対変位”によって生じる反力を表現するための相互作用ばねの実用的な表現方法を、サブストラクチャー法に基づく精度の高い解析解をもとに検討している。

その結果、相互作用ばねは、やはり構造物・地盤の剛性比 G_s/G_g に大きく支配され、これに構造物の幅や高さ、土被り、基盤までの深さなど長さの次元を持つ諸量から得られる、形状に関わる無次元化パラメータを加えることで、精度の高い予測値を簡易に算定することが可能になった。さらに、床版と側壁など、対象とする面と直行する面の影響についても明らかにしている。これらは、従来の設計基準の簡便式には積極的に評価されることのなかった重要なパラメータであり、したがってこれらの相互作用ばねを介して、トンネルに周辺地盤の変位を加えることで、地震時のトンネルの応答を合理的に評価すること（応答変位法）を可能にしている。

第5章では、簡易でかつ合理的な応答変位法についての提案を行っている。この中でも地下構造物と地盤の剛性比 G_s/G_g が重要なパラメータとして位置付けられている。

まず様々な箱型地下構造物断面を類型化し、それぞれについて2次元動的 FEM 解析を行い、構造物がない場合の構造断面該当部分の水平変形量 (δg) を、構造物が存在する場合の層間変形量 (δs) と比較し、 $\delta s = \alpha \delta g$ と表現した場合の α を応答係数と定義した。この応答係数は地下構造物と地盤の剛性比 G_s/G_g に強く支配されることは容易に推測できるが、 G_s 、 G_g のそれぞれが変形の進行とともに変化していくことを念頭におかなければならない。したがって地盤のみならず構造物の等価剛性 G_s の変化について検討し、静的非線形解析方法による強制変形法によって部材の安全性を確認する手法の提案を行っている。この手法ではおおむね合理的な評価値を得ることができるが、せん断力については過小評価する可能性があることから、部材を曲げ破壊先行型とできるように常時の設計の情報を用いた簡易な最大せん断力の推定法をも併せて提案している。さらに、耐震設計を簡略化するために数種類の構造物について静的非線形解析を実施し、曲げ破壊部材で構成される一般的な構造物では構造物全体の変形角にして 1/100 程度までは耐震性能を満足すると考えられ、簡易応答変位法において変形角がこの範囲であれば耐震設計を省略できることを示した。

第6章では、第5章で提案された簡易応答変位法、および従来手法などによって、第2章で検討した実際の被害事例の再解析を行っている。その結果は、いずれの手法でも、RC 中柱を有する大開駅と一般軌道部の RC 中柱の破壊形態の差、側壁の曲げクラックの形態が矛盾なく説明できるものの、特に提案手法の持つ、簡便さ、合理性、L2 地震動という強烈な地震動への適用性を示している。加えて、神戸市営地下鉄の被害解析では鋼管柱のモデル化の重要性を指摘している。

第7章では、開削トンネルに対する耐震設計法をとりまとめている。この中で地下構造物についても、上部構造物と同様に、プッシュオーバーアナリシスが重要であることを指摘し、構造物の損傷程度や破壊過程を表現するために必要な荷重変位曲線の作成方法についての検討を行っている。さらに、地震前の荷重である静止土圧が耐震性能に及ぼす影響についても調査し、曲げ損傷については、部材が終局状態となる曲率に比較して静止土圧による発生曲率の小さいことから、その影響の小さいことを指摘している。

第8章では、以上の成果を要約するとともに、今後の課題について述べている。

以上、要するに、本研究は実際の地下構造物の地震被害の実態とその破壊プロセスを綿密に検討し、それをもとに変形過程を記述する重要なパラメータを絞込み、地下構造物、特に箱型の断面を有するトンネルの耐震設計を合理的に再編成することに多大な貢献をなしたものである。事実、この提案手法は改訂された鉄道設計標準に取り入れられ、実務の面からも高い評価を得ているものである。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。