

博士(工学) 竹内幹雄

学位論文題名

地下構造物の地震対策に関する研究

学位論文内容の要旨

1985年3月チリ地震が発生し、土木学会第1号の海外地震被害調査として埼玉大学・渡邊啓行教授と共にチリの地を踏んだ。この地震で当時専門分野としていた橋梁以外の浄水池の導流壁のスロッシングによるせん断破壊や上下水道の管路の損傷が目立つのが気になっていた。同年9月メキシコ地震が発生し、デンバーでの国際会議参加の後、メキシコで伯野元彦東大教授の調査に合流した。数々の被害の中で半地下の下水カルバートの被害、メキシコ・クレイ内シールドトンネルの被害、内部に地下鉄を抱き込んだ超高層ビルの倒壊に心がひかれた。「東京で建設した同じものが相当な被害を受けている。」この時に抱いた映像が専門分野の変更に多大な影響を与えた。これは1995年の阪神大震災で現実のものとなり神戸高速鉄道等地下鉄が崩壊し、「地下は安全」との神話はなくなった。この1年前の土木学会論文集に「地下構造物に免震は成立する。」との事を発表していたので思いはより深かった。地震後1ヶ月ほどして当時の建設省土木研究所・耐震構造室・大塚久哲室長(後、九大教授)より要請を受け「地下構造物の免震に関する官民共同研究」に携る事になった。やや、数か月遅れて家村浩和京大教授より要請を受け、土木学会の地下構造物地震対策委員会も立ち上げることになった。これらの公的な成果品として「地下構造物の免震設計マニュアル(案)」、「減震・免震・制震構造設計法ガイドライン(案)」、「地下構造物の耐震性能照査と地震対策ガイドライン(案)」等の出版に関与してきた。一方で建設会社のリーダーの業務として我が国初の免震ビルの建設とその振動実験、初めての制震桟橋の建設等の他に、東京湾横断道路耐震化検討、東京港トンネル併設沈埋函建設計画、首都圏外郭放水路耐震性能強化DB等に直接関与してきた。コンサルタントに転職してからは地震・津波のダブルパンチ、マンホールの浮上防止対策、札幌駅前通公共地下道と沿道超高層ビルの免震ジョイントを介した接続等に携ることができた。これらの業務を通じて得られた思いを地下構造物に託し、林川俊郎北大教授のお勧めとご指導により、その設計思想を纏めたのが本論文である。

第1章では、上下水道を例に取り「施設の経済的建設の意義」について話題を提供し、都市文明の原罪軽減のために、「自然の力と共存する建設」と「何も存在しない空間の必要性」「無の空間の建設」について紹介する。

第2章では、直接目にしてきた世界の地震被害を紹介し、何を考えるべきかを提供する。特に、自己の存在が他にいかなる影響を及ぼすのか、他の存在が自己の挙動にいかなる制限を与えるのかを考えるテーマを提供した。

第3章では、地盤と等価な剛性を持つトンネルをとりまく諸条件の変化に対して地下構造物はどのような応答をするのかを取りまとめている。「自らを解放し周囲に身を任せること」、「自らの周囲にできるだけ無に近い空間を創出すること」、「自らの周囲に堅固な空間を築造すること」等の建設コストの順番で効果があることを示している。

第4章では、1985年初めて免震ビルが誕生して9年後、土木学会論文集に地下構造物の免震に関

する設計思想とその実証実験結果を発表した。その1年後に阪神大震災が発生し、免震ビルの建設が180棟/年、制振ビルが65棟/年と飛躍的なスピードで増大した。地下構造物についても建設省の官民共同研究がスタートしたが、その普及はやや緩やかである。しかし2004年横浜市営地下鉄で柔性地中壁による免震補強工事が実採用され、2005年関東地建で最初のDBとなる新型相対変位吸収継手が首都圏外郭放水路の立坑・トンネル間で採用され、2006年札幌市札幌駅前通公共地下道の沿道ビルとの接続工事で免震継手が本格的に採用され地下免震構造の幕開けが開始された。これらの構造の設計思想と、耐震性能の向上およびコスト縮減の応用事例を紹介している。取り分け、地下道と沿道超高層ビルとの間口全面にわたる直接接続は、今後の人の居住空間の利便性にかかわると共に、自己と周囲の構造物の安全性に配慮した耐震設計の先例となるものである。

第5章では、各種柔構造を紹介すると共に、この種の構造では要となる地盤剛性急変部における具体的な線状地下構造物の地震時断面力算出法を誘導・提案し、東京湾横断道路の振動台実験結果と共に紹介している。

第6章では、首都圏外郭放水路No.5立坑とシールドトンネルの接合部を取り上げ、新型相対変位吸収継手の効果と劇的な建設コスト低減(1/10)に触れ、耐震補強効果の向上と経済効果の実状を示している。特に、従来の一点集中型ひずみ解放は地盤の拘束効果を断ち切れず、分散型との併用が望ましいとの見解は今後の線状地下構造物設計の重要な道標となるものである。

第7章では、損傷制御構造の代表例として、すべり支承の採用により、2径間ボックスカルバートの中柱への応力集中を防ぎせん断破壊を防止し、ラーメン偶角部のじん性を利用し粘り強さで地震に対抗する構造を提案・紹介している。特に、飛躍的な耐震性能の向上とトータルコストの大幅な低減は、今後の構造物設計への目指すべき道標となると思われる。

第8章では、地下構造物に応用できる実例として、基礎杭の水平・鉛直現位置実験と理論解・解法の誘導を紹介している。構造物の挙動解明にあたり、正しい力学モデルとは何なのか、それはどのように表示され、応用できるのかを示している。

第9章では、本論文執筆中に発生した2011年・東日本大震災を教訓として、震災発生以前から繰り返し警告し続けていた2つの課題について、現段階での我が国の実情を紹介し、今後の検討課題として提案している。第1の課題は、地盤の広域液状化に伴う地下構造物の被害の軽減である。沿岸域コンビナート諸施設を除き、地下構造物が広い地域で建設されている代表例は上下水道の諸施設である。この内、被害が目立つのは、1993年釧路沖地震で目を奪ったマンホール群の地震時浮上であり、この震災でも千葉県・浦安地区、茨城県・神栖地区での被害へと続いている。これらに対する現状並びに新しい開発技術とその実証実験の紹介と、今後の提案を行っている。第2の課題は、巨大津波による沿岸域諸施設に対する被害軽減対策である。特に、浄化センターの諸施設は津波に対して全く無防備である。ここでは、2007年に発表した東海地震・津波発生時の静岡市の浄化センターの被害予測例の紹介と共に、今後の対応について提言を行っている。

第10章では、本論文で提案、提供、紹介された技術について総まとめをすると共に、1985年チリ・メキシコ地震より2011年東日本大震災まで、1/4世紀の地下構造物地震対策技術の変遷を辿り、耐震性能の飛躍的な向上とトータルコストの低減を実現し、自然と共に存する技術-免震・制御制震技術-が巨大都市文明の原罪救済のために必要な一つの技術であることをもって、本論文の結論とした。

学位論文審査の要旨

主査 教授 林川俊郎
副査 教授 三浦清一
副査 教授 蟹江俊仁
副査 准教授 松本高志

学位論文題名

地下構造物の地震対策に関する研究

1995年兵庫県南部地震は、鉄道、道路、港湾などの社会基盤施設や住宅、高層建築物などに甚大な被害を与えた。その直後、各種都市機能の停止により市民生活に与えた影響は非常に大きいものがあった。鉄道や道路の高架橋や建築物などの地上構造物に比較して、山岳トンネルや地下街などの地下構造物は従来から地震に強いと考えられていた。しかし、神戸市営地下鉄の三宮駅や神戸高速鉄道の大開駅などの地下構造物では大きな被害が発生した。被災した箇所はいずれも開削工法で施工された区間であり、鉄筋コンクリート製函型断面の中間支柱のせん断破壊が数多く認められた。とくに、駅舎上スラブの崩壊も重なり、駅舎のみならず上部の道路まで陥没させる壊滅的な被害となった。また、地下河川や都市施設としての上下水道、電力・ガス・通信基幹幹線などの地下構造物にも被害が認められた。これらの地下構造物の地震被害は1995年兵庫県南部地震のみならず、1985年メキシコ地震、1997年台湾集々地震、2004年新潟県中越地震などでも認められており、地下構造物の地震対策は急務な課題となっている。

本論文は地下構造物の耐震性能向上を目指し、新しい耐震構造、免震構造、損傷制御構造などを提示し、その有効性および適用性について検討し、地下構造物の地震対策について考察したものである。本論文は全10章から構成されており、各章の内容は以下のようである。

第1章では、地下構造物の耐震性に関する検討課題と既往の研究成果をまとめ、本研究の目的を明確に示し、各章の構成について記述している。

第2章では、近年の地震および津波による地下構造物の被害事例を取り上げ、その耐震技術の変遷について記述している。建設中のシールドトンネルの被害、やや深度の深い水道管のジョイント部の被害、駅舎の中間支柱のせん断破壊、浄化センター地下施設の被害、地盤の液状化に伴うマンホールの浮上現象などを提示し、地下構造物の地震対策について考察している。

第3章では、トンネル・地盤系の基本的な構造特性を把握するために、いくつかのFEM解析モデルを構築し、トンネル外周の地盤剛性および接触条件による影響に関する数値計算を実施している。トンネル外周に免震層またはすべり層を設けることにより、トンネル内に発生する断面力を低減できることを提示している。

第4章では、地下構造物の免震構造を異なる3種類のソフトコーティング構造、すべりコーティング構造、免震継手構造に分類し、その適用範囲を明確に示している。とくに、大量のダイナマイトを連続爆破した大規模人工地震実験により液状化を再現し、異種地下構造物における免震継手構

造の有効性を実物大実験により確認している。また、アスファルト・ポリマー系免震材を封入した繊維補強ゴム製伸縮継手を開発し、高層ビルと地下歩行空間との接続部に適用し、その継手性能を明確化している。

第5章では、不均質地盤からなる地盤剛性急変部を有する線状地中構造物の実用的な地震応力算定式を提示し、模型振動実験および三次元FEM解析結果との比較から、その算定式の有効性を検証している。地盤剛性急変部に設けた柔構造の発生応力を十分な精度で算定でき、耐震設計への適用が可能であることを明示している。

第6章では、地下放水路立坑とトンネル接合部に相対変位吸収構造を適用し、その耐震性能について検討している。アスファルト・ポリマー混合材を用いた相対変位吸収構造は従来のシールドトンネル用可とう継手と比較して、耐震性能が向上し大幅なコストダウンにも成功している。

第7章では、中柱の曲げ破壊とせん断破壊を防止し、地下構造物全体の崩壊を防ぎ耐震性能を向上させる損傷制御構造を提案している。中柱の上端または下端にすべり支承を設置し、レベル2地震動に対し地下構造物の損傷を限定された損傷にとどめるものである。従来の鋼板巻き立てによる補強補修対策に比較して、コストが削減され、早期復旧に有効であることを提示している。

第8章では、杭周辺摩擦力と杭底面反力を考慮した多層系地盤における杭基礎の支持力算定式を提示している。また、せん断型地盤上梁の基礎微分方程式の解を用いて、地表面近くの地盤における杭基礎の支持力を算定し、その適用性を明らかにしている。

第9章では、2011年東日本大震災による被害事例から、新しく地震対策が必要とされる課題について提示している。地盤の広域液状化に伴う地下構造物の被害軽減対策と巨大津波による沿岸域諸施設に関する被害軽減対策である。

第10章では、各章で得られた知見を総括し、今後の展望と課題を述べている。

これを要するに、著者は地下構造物の地震被害を詳細に調査し、地震被害を低減するために新たな免震構造、柔構造、相対変位吸収構造、損傷制御構造を提案し、その有効性および適用性について考察し、地下構造物の耐震性能の向上と高度化を行う上で有益な知見を得たものであり、地震工学、トンネル工学に貢献するところ大なるものがある。よって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。