

第 I 編

総説

第 I 編 総説

1.1 緒言

地中構造物は大地震の際、地上の構造物に比べて被害が少なく高い耐震性があるものとされている。このことは 1995 年兵庫県南部地震の時でも同様で、被害は極めて少なかった。しかし、今までに発生していなかった地下鉄道駅部の倒壊という厳しい被害が生じた。都市の地下の開発・利用が進んでいる現在、地中構造物の耐震性の重要性が改めて確認され注目されることになった。

さて、トンネルの力学的性状の研究が始まったのは 1940 年代後半であり、耐震設計に結び付く理論的研究が 1963 年に行われている。1965 年に始まった松代群発地震の際の地震観測の結果、地中埋設管の地震時の挙動が明らかになり、室内の模型振動実験でも確認され、1970 年代からは旧国有鉄道多摩川（沈埋）トンネルで地震観測が実施された。それらの結果は何れも、構造自体は固有振動を持たず、周辺の地盤の地震時の変位に対応して挙動する事を示すものであった。これらの成果は石油パイプライン事業法（1972 年）の制定に繋がり、1975 年には沈埋トンネル耐震設計指針（案）（土木学会）にまとめられた。その後多くの沈埋トンネルで地震観測が行われ、1975 年から始まった都内地下道トンネル（シールドトンネル、箱型トンネル）の地震観測、1978 年宮城県沖地震後のパイプラインの地震観測などでも同様の性状を示す結果が得られていて、地中構造物の地震時の一般的な挙動であると認められた。

この結果に基づいて地中構造物の耐震設計方法は急速に発展して、最近では前記の沈埋トンネル耐震設計指針（案）を超える程になった。このような背景の下に 1992 年 6 月より土木学会耐震委員会（現：地震工学委員会）の下にトンネル耐震性研究小委員会が発足したのである。主たる目的は、1975 年作成した沈埋トンネル耐震設計指針（案）を、その後の約 20 年間の調査・研究・経験を基に、現状の地下利用の進展状況とその将来を見据えて改訂することにあつた。内容的には前述の地中構造物の地震時の動特性に基づいて、耐震設計方法を統一的に再構築することが求められていた。出来れば大深度の地中構造物や地下街等の大規模空間を構成する構造などの耐震性の検討を含めるとする意見もあつた。

小委員会はこの目的を果たすべく研究上の基本課題として、機能、調査、設計の 3 個の主要項目を選んで並行して作業を進め、トンネル耐震設計の今後の方向性を示すガイドラインを作成することとした。これにより地中構造物の耐震性の研究が促進され、合理的な耐震設計方法が開発されることが期待されるからである。一方、それまでの調査・研究は地中構造物の地震時の挙動を定性的に非常にはっきりさせては来たが、設計に当たり定量的にどのようなレベルを考えるべきか不明の状況にあつたと言つてよいだろう。この時期に 1995 年兵庫県南部地震が発生し、耐震設計された RC トンネルが被災したのである。このことはトンネル耐震設計の考え方に大きな影響と示唆を与えるものであつた。倒壊した神戸高速鉄道大開駅の被災部分は、1)震度 7 の領域内にあり、2)RC 構造物が被災した 1968 年十勝沖地震の前の 1962～1964 年に建設されていて、3)特に建設が盛だった時期であつたこと、4)建設位置の地盤が通常地盤であつた事は重要である。この地震でトンネルに被害が生じたことにより、小委員会は耐震性の検討を再度行うことになった。1995 年 5 月並びに 1996 年 1 月に発表された土木学会耐震基準等基本問題検討会議の提言に基づいて、トンネルがレベル 1 地震動並びにレベル 2 地震動に対応し、機能の重要性に適應した耐震性を保持する事を基本として、調査と審議を実施してきた。以後 2 年余の検討結果をまとめたのが本報告書である。

内陸部では千年から数千年に1度という低頻度の大地震が直近にある場合、或いは百年から数百年に1度発生する近海プレート間大規模地震が近くに発生するという極限の場合を想定した上で、前述の地中構造物の動特性に基づいて、構造物の重要性を勘案して、適切な機能を維持するには多くの課題を解決しなければならず、長い年月が必要である。この報告書は現段階で進むべき基本的な方向を打ち出そうとするものである。

耐震設計において、トンネルが地中に構築される線状構造物であり、その通過経路で、極限状態として極めて希ではあるが、活動する断層との交叉は避けることのできない場合のあることを想定しないわけにはいかないこと、また周辺地盤が崩壊、液状化などにより大きな変位を生じ、構造的に厳しい状況になることも考えられることは、この構造の生来の特色というべきものである。構造的な対応が適切でない場合や不可能と判断されるケースでは、必要に応じソフトな面からの対策を採ることは承認されなければならない。

いわゆる山岳トンネルの耐震性については今まで多くの震害を経験し、その対策を検討し、その成果は現在の建設に生かされている。本委員会は近年都市における地下の利用の進展に伴い新たな課題とされているいわゆる都市トンネル—軟質地盤を含めた地盤内に建設されるトンネル—を主な検討対象とし、その他地下街などの地下施設を取り上げている。

本報告書の構成は次の5部分からなっている。

総説	(第I編)
トンネルの機能確保	(第II編)
耐震設計に考慮すべき荷重要素	(第III編)
耐震設計法	(第IV編)
付章・付表	

上記の第II編から始まる3編はそれぞれ機能、調査、設計の主要項目に対応し、それぞれのワーキンググループが担当したものであり、付章・付表は第II編のワーキンググループが作成している。その内容については各グループ間の密接な連絡と討議のもとでまとめられたものであることは言うまでもない。各編の冒頭には、内容の理解を容易にするため、グループの活動を含めた概要を置いている。また内容は、梓書きと解説の形式で記述されているが、これはそれぞれの項で、目的・趣旨・内容を得やすいようにと採用したものであり、一般の仕様書などの同じ形式による記述の趣旨とは異なるものである。詳細は各編に譲るものとし、以下に概要を列記する。

第II編は機能の視点から耐震性を検討したものである。トンネルの機能はそれぞれの目的・環境条件によって決定されているのが普通である。レベル1地震に対しては従来の仕様で対応してよいとされているが、極めて稀にしか発生しない強い地震動レベル2に対しては保持すべき機能の選択決定は非常に重要でかつ困難な課題である。平常時の機能については種別毎に永年にわたって検討されて来ていて、その詳細は末尾に付章として示してある通りである。保持すべき機能水準の選択に当たり、煩雑を排し、地中構造物の特徴を考慮して、基本的な条件としてA,Bの2群に分けることを提示している。Aはレベル2地震動に対してその機能を維持する最高のレベルであり、Bは機能の低下を認めるものでその回復のために工事を伴うレベルとしている。この他、これらの水準に該当しない或いは該当する必要のないトンネルもあることを認めなければならない。機能の重要性・確保については、判断の基準となる供用期間、設置環境などの構造的側面ならびに、災害時及

び災害復旧のための施設情報の整備，マニュアルの作成などソフト面からの対策，さらに付属設備の耐震性，維持管理などについて基本的な考えを提示している。

第Ⅲ編では地震，地盤の調査，設計の地震動の設定，構造物の安全性の評価等の検討をしている。地震調査については，レベル2レベルに対応して原子力発電所の建設に対する活断層調査を紹介しているが，トンネルを対象にしたとき，地質調査等の文献による場合もある。地質・地盤の調査では，面的，立体的な分布，形状，更に地盤構成の調査を重視し，基盤面の設定にあたっては従来の方式に加えて，トンネルに大きな影響を与える地盤の振動モードを考慮して選択する必要がある。トンネル周辺地盤の液状化はトンネルの安全に基本的要素であり兵庫県南部地震の際の液状化現象に関する研究の成果が俟たれる所であるが，必要に応じて液状化の危険性を低下させるための対策を実施することとしている。設計地震動については土木学会の提言並びに，地震荷重研究委員会の検討に従ってレベル1，レベル2地震を設定するものとしている。レベル2地震のうち，近海プレート境界での大規模地震については，発生の近いことが想定される場合，耐震性のレベルの決定に特に慎重な検討を行うべきであることを提言している。構造物の安全性の評価については，RC構造に対しては，コンクリート標準示方書によるものとした。特に開削トンネルの中柱は，せん断に対し安全率を高く取り，高軸力の作用する部材ではコンクリートの圧縮は破壊が生じない様適切な配筋を行わねばならない。

第Ⅳ編 耐震設計法については，A)前出の沈埋トンネル耐震設計指針（案）では，沈埋トンネルの横断面が高い強度を備えていることを勧告して，軸方向の耐震設計に応答変位の考えを導入しているのに対し，本報告書では，これを一般化して横断面の耐震設計にも動的な解析を行うよう統一したこと，B)レベル2の地震動を受けた場合，特に斜面のみならず緩傾斜地にも，液状化現象に基づくものも含めて，地盤のすべり，移動など不連続的な動きが発生することがあり，耐震性の解析に際しトンネル周辺地盤が連続的と見なされる（地盤状態1）か，否（地盤状態2）かにより対応を変えたこと，C)レベル1，レベル2の地震動と前述した地盤状態とに対応して耐震性照査の分類を行ったこと，D)応答変位法の適用に当たり構造物と周辺地盤を結ぶバネは従来静力学的に扱われてきたが，今回無限地盤内ではあるが，動力学的に検討を加えたこと，E)立坑の設計例，継手の実例を挙げると共に免震の考えを紹介してこれからの発展に資料を与えていることなどが挙げられる。

付章では，本小委員会が対象としたトンネルおよび地中構造物を目的別に分類し，それぞれに要求される耐震機能を，現在のマニュアル，検討資料などに基づいてとりまとめたものである。各種施設に特有の課題や特徴をわかりやすく示すことを意図している。これには必ずしも1995年兵庫県南部地震に対する検討結果が含まれているとは限らないが，列挙された事項は永年にわたって検討し蓄積された成果であって，第Ⅱ編と併せて今後の展開に有用である。

さらに付表では，非常用施設の地震時における機能の安定性確保のための検討例を道路トンネル，鉄道トンネル，地下街の3施設について示してある。

以上，第Ⅱ編から第Ⅳ編，そして付章・付表までの内容の概略を紹介した。本報告書は云うまでもなくトンネルの耐震設計を対象としているが，構造的には，冒頭にも述べたように，地中構造物の地震時挙動に基づいて検討していて，他の地中構造物にも適用されうるものであり，本小委員会設置の際のねらいにも適合しているものと考えられる。兵庫県南部地震で激震地にあった多くの地中構造物が無被害か又は軽い被害で済んでいることは重要である。本震設計法の発展に役立つことができるであろう。

1.2 重要な物理量および機能水準に関する指標について

トンネルの地震時の挙動は、想定される地震動に対して構造体本体のみならず周辺地盤の変形を考慮してなされることになる。したがって、(1.1)地震動の強さ、(1.2)構造体の変形、(1.3)地盤の変形といった、個別の重要な物理量を代表する指標が示される必要がある。これに加えて、これらの物理的な条件から定まる(2.1)トンネルシステムとしての耐震性能の尺度、さらに想定地震に対して維持されるべき耐震性能の程度を示すことで(2.2)構造物の重要度の概念の尺度を明確に規定することが重要である。

これらの概念を示す指標の解説は、報告書内部の個別の条文で散在しているため、相互の関連が必ずしも明確でない。そのためここに各指標の基本的な定義と相互の関連をまとめて示しておく。各指標の詳細な定義については関連する条文を参照されたい。

用語の解説

(1) 物理的な指標

(1.1) 地震動のスケール：レベル1，レベル2

(第Ⅲ編 4「設計地震動」)

当該地点での発生確率を勘案して地震動の強度を示す。
地域で異なる地震強度になる。

(1.2) コンクリート部材の損傷（ひずみ）の程度：部材損傷レベル1～4

(第Ⅲ編 6.1.4「部材損傷レベル」)

コンクリート部材の損傷度を部材内部に発生するひずみのステージで4段階に分類したものである。

(1.3) 地盤のひずみの程度：地盤状態1，地盤状態2

(第Ⅳ編 1「総説」)

地盤が連続体とみなせる領域は地盤状態1、地盤が破壊する段階は地盤状態2とされる。
土質によって異なるが概ね1%前後のせん断ひずみが地盤状態1と地盤状態2の境の目安になる。

以上の指標は設計・解析方法を規定する。

システムあるいは機能の指標

(2.1) 全体構造の機能保持度：耐震性能1～3

(第Ⅲ編 6.1.5「耐震性能と部材損傷レベル」)

構造物の機能保持の程度は主に構造体各部材の損傷状況を統合した構造物の安定性で支配される。補修が容易な部材とそうでない部材の損傷の程度によっても機能保持の程度は変化する。

(2.1) 重要度の尺度：機能水準A, B

(第Ⅱ編 2.1「機能水準の設定」，第Ⅲ編 6.1.2「機能水準と耐震性能の関係」)

L2で耐震性能2が期待される状況が機能水準A，L2で耐震性能3が期待される状況が機能水準Bである。

