第１章　はじめに

1995年1月17日早朝に発生した兵庫県南部地震は、社会資本の集中した大都市直下で発生したもので、土木構造物ならびに各種都市機能、市民生活に甚大な被害をおよぼした。

従来、地下構造物は耐震性に優れていると考えられていた。実際に、周辺地上構造物が目を覆うような被害を受けているのに対し、地下構造物の大きな被害が報告されていないケースがほとんどである。また、山岳トンネルの被害も軽微であった。非常に激しい直下型の地震ではあったが、地下構造物は比較的耐震性に優れていると考えられる。しかし一方で、“安全神話”の崩壊と新聞などで大きく報じられた神戸高速の大開駅、あるいは市営地下鉄上沢駅および三宮駅のように、かなりの被害を受けた個所も見られる。これらの個所に共通することは、開削工法で施工したもので、被害はRCの中柱に集中している。震災の被害の調査および分析をする場合、被害の有無にかかわらず、地形・地質、内陸型も考慮に入れた地震動、地下構造物の形状・寸法・材質、施工法（山岳工法、開削工法、シールド工法）を考慮に入れた総合的な分析を行い、地下構造物の耐震性について考えていく必要がある。

地下構造物分科会では、耐震性に優れていると考えられていた地下構造物の実際の被害を詳細に調査し、構造物ごとの被害状況、被災構造物の位置と地盤との関連性をまとめることに精力を注いだ。これらに関しては、当初、（社）地盤工学会の阪神大震災調査委員会（委員長　足立　紀尚　京都大学教授）と合同で調査活動を行っている。このようにして得られた調査活動結果に基づき、先にも述べたような点を考慮に入れて総合的な分析を行ってきた。

地下構造物分科会は、４つのワーキング・グループを設置し、精力的に活動を行っている。各ワーキング・グループの活動概要は以下の通りである。

W.G. 1　地下構造物の被害実態の把握

地震に遭遇した地下構造物の状況のデータベース作りを目指して、従来の調査結果に、位置、地形・地質、地盤条件、構造物の形式・寸法、掘削工法などの情報を加える作業を行っている。また、構造物の種別ごとに被害のマップやその被害の特徴などが簡単に得られるような資料整理の方法などの検討を行った。

W.G. 2　被災構造物周辺での地震動特性の把握

地震の被害を受けた地下構造物は、大きな地震動を受けたと考えられる。なぜそのような地震動がその構造物を襲ったのかを明らかにするためには、地下構造物に作用した地震動予測が必要となる。本ワーキングでは、地下構造物周辺に作用する地震動の予測法について検討を行い、地震被害状況の調査結果から構造物被害と地盤振動特性の関係の把握、推定した地震動の妥当性の検討を行った。

W.G. 3　被災要因の検討および復旧工法と復旧過程の検討

土木の専門家にとっても、また、一般の人々にとっても、同じような地下鉄の駅を比べた場合、なぜ一方の駅では崩落するような大きな被害を受け、他方では全く被害を受けていないような状況が生じたのか、その理由の解明には興味がある。W.G. 3 では、なぜ地下構造物の被害に差が出たのか、現地の調査結果や数値解析手法を駆使して原因究明を行う。

また、併せて復旧工法と復旧過程についての検討も行った。地下構造物がインフラとして必要不可欠であるため、震災の後、非常なスピードで復旧が行われた。こうした復旧の過程やその時どのような工法が検討され、実際に施工されたかを記録に残すことは、今後の補強や次の地震に備える意味からも重要と考える。

W.G. 4　地下構造物の耐震設計計算手法の現状と課題

地下構造物の耐震解析法に対する関心は、今回の地震までは重要構造物以外ではほとんど無かったといってよい。大部分の地下構造物に対しては、耐震設計を行わないか、行っても静的水平震度のある割合を作用させる程度であった。現在、重要地下構造物に対する耐震設計の方法には、動的解析法、応答変位法、地震時保存耐力法、震度法などがあるが、それぞれの方法の関係については詳しく吟味されておらず、また、どのような条件でどの方法を適用するのが妥当なのかも未解決のままである。本ワーキングでは、このような耐震設計計算手法の現状と課題をまとめた。

分科会に所属する委員は、各ワーキングに所属して調査・研究を進めた。委員名と所属および所属ワーキングを**表-1.1**に示す。

表-1.1　地下構造物分科会構成委員一覧表

種別	氏　名	所　属	W.G.	種別	氏名	所　属	W.G.
主査	櫻井　春輔	神戸大学		代表幹事	大西　有三	京都大学	
委員	青柳　計太郎	銭高組	4	幹事	芥川　真一	神戸大学	3
委員	朝倉　俊弘	鉄道総合技術研究所	1	委員	池浦　友則	鹿島建設	2
委員	石橋　貢	西松建設	1	委員	井上　晋	大阪工業大学	4
委員	大保　直人	鹿島建設	1	委員	奥村　一郎	ＮＴＴ	1
委員	兼島　方昭	神戸市港湾整備局	3	連絡幹事	岸田　潔	京都大学	2
委員	小池　章久	関西電力	1	委員	小林　範之	フジタ	1
委員	佐藤　信雄	日本道路公団	1	委員	志波　由紀夫	大成建設	4
委員	嶋村　貞夫	鴻池組	3	委員	竹脇　尚信	清水建設	3
委員	田尻　勝	神戸市交通局	4	委員	田中　誠	京都大学	4
委員	田村　武	京都大学	1	委員	東田　淳	大阪市立大学	1
委員	中島　一夫	大阪ガス	1	委員	中村　晋	佐藤工業	2
委員	中山　学	奥村組	3	委員	橋本　正	大阪土質試験所	1
委員	堀田　光	建設企画コンサルタンツ	4	委員	松本　正毅	関西電力	1
委員	南野　寿造	CRC 総合研究所	4	委員	宮崎　達雄	神戸市交通局	4
委員	元田　良孝	建設省近畿地方建設局	1				

表-1.2　分科会の開催状況

回数	日時	場所	参加者数
1	平成７年８月１日	鴻池組　本館６階　第２会議室	13
2	平成７年１１月７日	鴻池組　本館７階　D 会議室	17
3	平成８年１月１６日	鴻池組　本館７階　D 会議室	15
4	平成８年４月１７日	奥村組　本社　会議室	18
5	平成８年５月２９日	大阪工業大学　八幡工学実験場	15
6	平成８年８月１６日	京都大学　工学部５号館　Rm.317	19
7	平成８年１２月１０日	奥村組　本社　会議室	15
8	平成９年４月９日	鴻池組　本館９階　第３会議室	17
9	平成９年９月９日	清水建設　和泉研究室　会議室	18
１０	平成９年１２月２２日	京都大学　工学部５号館　Rm.315	17

分科会は、全体会議を 3 年間で 10 回開催した。**表-1.2** に開催日時、場所および参加者数を示す。

分科会では、各ワーキングの活動報告だけでなく、様々な話題提供を頂き、活発なディスカッションが行われた。ここに、分科会で話題提供された内容の概要を記すとともに、話題提供を頂いた諸氏には本報告においてあらためて謝意を記す。

◎　神戸高速鉄道大開駅崩壊解析結果の検討（3 件、第２回分科会）

中村委員

先ず、神戸高速鉄道・大開駅における被害状況、また被害機構を把握する上で必要な構造特性、周辺地盤特性を示した。次に、構造物の損傷モードや損傷に至る過程を２次元動的地震応答解析と静的弾塑性解析を組合せた２段階解析により推定した。その結果、中柱は他部材に降伏等の損傷が見られる前にせん断破壊または曲げせん断破壊に至ったと推定され、被害状況と良く対応していることを示した。以上の被害状況と解析に基づき、大開駅上床版の陥没は中柱の破壊により上載土荷重を上床版が支えられなくなり生じたものと推測される。

竹脇委員

兵庫県南部地震で崩壊した大開駅のプラットフォーム部分について、その破壊のメカニズムを解明するために動的応答解析を行った。2 次元動的解析で中柱および側壁の地震時断面力を求め、

それらを断面の終局耐力を表す相互作用曲線に照らしたところ、側壁の上端あるいは下端部がまず破損して、それに起因してつぎに中柱が破壊したとの結論を得た。また、３次元非線形動的解析コードを用いて２方向入力の影響も検討したが、この影響は少ないことも分かった。さらに、上下動の影響についても検討したが、中柱で常時軸力の 25%が発生する程度で、崩壊の主因ではないことも分かった。

志波委員

大開駅を模したＲＣ函型地下構造物を対象として兵庫県南部地震に対する応答解析を実施し、被災メカニズムを調べた。解析には２次元ＦＥＭを用い、躯体についてはＲＣ部材の曲げ剛性の非線形性（$M \sim \phi$ 特性）を考慮した。上下動の影響および水平動の大きさをパラメーターとして解析した結果、水平動による函型断面のせん断変形が主要因となってＲＣ中柱がせん断破壊し、その結果として天井スラブが崩落したと推定された。

また、神戸の地盤資料に基づいて市街地の地盤の硬軟分布を調べ、これと被害・無被害の地下構造物の位置関係を対比してみた。いくつかの例外はあるが、大局的には、地盤の軟らかい地域での地下構造物の被害率が高い傾向が見られた。

◎　山岳トンネルにおける震災の被災状況と問題点（第３回分科会）

朝倉委員

1995 年兵庫県南部地震の被災地域内には 100 を超える山岳トンネルが存在する。このうち軽微なものも含めて 30 余本のトンネルが地震の影響を受け、補強・補修を要するような被害を受けたトンネルは、約 10 本であった。代表的被害として、新幹線の六甲トンネルでは、アーチ天端のせん断クラックが多数生じた。盤滝道路トンネルでは、アーチ肩部から側壁にかけての覆工コンクリート塊が崩壊した。塩屋谷川放水路トンネルでは、断層の活動により、覆工に約 *8cm* のずれが生じた。全体的には、地上部の甚大な被害に比較して、トンネルの被害は軽微なものであったこと、トンネルの被害箇所は、断層破砕帯に多いことがいえる。

◎　神戸市営地下鉄上沢駅・三宮駅の崩壊解析結果について（第３回分科会）

長光弘司　氏（神戸市交通局：元委員）

神戸市営地下鉄において被害の大きかった上沢駅と三宮駅について被災状況ならびに、その被災メカニズムについての検討結果を紹介した。

解析には、ＲＣ部材の曲げ剛性の非線形特性（$M \sim \phi$ 特性）を考慮した応答変位法を用いた。等価線形化法を用いた１次元の地震時応答解析により、地盤の応答値および地盤の等価剛性を求めた。その結果、ＲＣ中柱が他の部材に降伏以上の損傷が見られる前にせん断破壊に至ったと推定され、ＲＣ中柱の変形性能が他の部材に比較して劣っていたことが主な被災原因であることが分かった。

また、今回の被災を再現するためには、地盤変位をはじめとする地盤の応答値を的確に評価することが大切であり、そのためには、基盤の設定等地質・地形条件を適切に評価する必要があることがあらためて分かった。

◎　阪神・淡路大震災によるＮＴＴとう道の被災状況と復旧工事（第４回分科会）

梅田弘幸　氏、鳥越寿彦　氏（ＮＴＴ）

講演の要旨は以下のとおりである。

阪神・淡路大震災により、ＮＴＴとう道は、本来の機能である通信ケーブルを保護するという目的は果たした。しかし、地下構造物としては、シールド式とう道は、被災しなかったが、開削式とう道は被災した。

被災は、ビル取付部等に設置した伸縮継手部に集中し、一部、特殊断面部で上床版が曲げ破壊した。伸縮継手部は、最大で 18 *cm* 変位し、地下水が流入した。伸縮継手部の復旧は、止水効果の高い「油性ウレタン注入」を行い、「可とう継手」を設置し、曲げ破壊した部分には、「炭素繊維シート」を設置する等様々な補修技術を駆使し、平成８年３月８日に復旧を完了した。

◎　大開駅周辺地盤の地盤震動特性の推定及び中柱の変形性能（第４回分科会）

中村委員

大開駅復旧に際して、駅及びトンネル部周辺地盤の掘削により駅の約 7.0 *m* 東方に位置する換気塔が約 4 *cm* ほど山側にずれていたことが分った。換気塔周辺地盤の１次元地震応答解析より、少なくともポートアイランドの地中観測波より求めた入射波成分の振幅レベル以上の入力波が入射しなければその様なずれは生じないことが明かとなった。

また、大開駅の崩壊機構を把握する上で重要な中柱の変形性能を求めるため実大規模の模型を用いた水平方向の交番載荷実験を実施した。実験で用いた柱は被災を受けた柱とコンクリート強度や付着強度が異なるため被災柱の挙動とは異なっているため、今後実験結果に基づき実被災柱の変形挙動の推定を行う予定である

◎　ライフライン系地下構造物の被害（第６回分科会）

嶋村委員

地盤種別Ｉ～Ⅲに位置する地下構造物と地上構造物の地震応答解析により、構造物の被害と地盤種別との関係について比較検討した。その結果

① 地表面の最大応答加速度は、Ｉ種地盤で大きいが、最大セン断ひずみはⅡ種とⅢ種地盤で大きく、入力地震動の卓越波長の 1/4 に当たる地表面から深さ 10 *m*付近で発生した。

② 検討対象に選定した橋脚のようなトップヘビーの地上構造物では、慣性力の影響が支配的になるため変位や断面力の応答量は地表面の応答加速度が大きいＩ種地盤で大きくなった。

③ 地下構造物は周辺地盤の地震時変形に追随して変形するため、構造物上下間の相対変位、曲げモーメント、セン断力の応答量は、地盤のせん断ひずみが大きいⅡ種やⅢ種地盤で大きい値を示したが、軸力は地盤が異なってもほとんど変化しなかった。

④ 今回の設定条件において、地上構造物の被害はⅡ種、Ⅲ種地盤よりもＩ種地盤の方が大きく、これに対し、地下構造物はＩ種地盤よりもⅡ種、Ⅲ種地盤の方が大きくなり、地上と地下の構造物でその傾向が異なることが解析上確認できた。

◎　応答変位法の合理的な考え方について（第７回分科会）

志波委員

応答変位法は地中構造物の耐震計算法として設計実務で広く用いられている。しかし、応答変位法と称される計算法は一通りではなく、各種の設計指針ごとに地震力の作用のさせ方が少しずつ異なっている。そこでここでは、２次元ＦＥＭを用いた地中構造物・地盤一体解析による耐震計算の結果に最も近い結果を出す地震力の作用方法について考察した。

カルバートの矩形横断面を対象とした応答変位法解析で、地震力の作用方法として、①地盤変位のみを作用させる、②地盤変位のほか上下面にせん断力を作用させる、③地盤変位のほか上下面および両側壁にせん断力を作用させる、の３ケースを実施した。それらによるカルバート応力の結果を２次元動的ＦＥＭによる解析結果と比較してみると、③の結果が最もＦＥＭの結果に近く（ほとんど一致）、次が②の結果であり、①の結果はＦＥＭによる応力のおよそ 1/2 の大きさにしかならない。

応答変位法での合理的な地震力の作用のさせ方は、動的サブストラクチャー法の考え方を援用することによって、明らかにできる。これによると、構造物に作用させる地震時地盤変位を切欠き地盤（構造物部分を空洞とした地盤）の地震応答によって求めた場合は上述の①の方法でよい。しかし、一般に地震時地盤変位は自然地盤（構造物設置前の原地盤）の地震応答によって求めるのが普通で、その場合は、地盤変位のほかに、構造物・地盤間の接触面位置に生じる地盤応力も地震力とするのが力学的に正しく、③が最も合理的である。この力学原理は矩形断面のみならず、円形断面の耐震計算においても成り立つ。

以上の議論は、地中構造物と地盤とが完全に密着して挙動することが前提となっていることに注意する必要がある。また、応答変位法では力学モデルに地盤ばねを用いるが、そのばね定数の設定法が大きな課題である。

◎　地表面における応答スペクトルで地下構造物の入力地震動を規定する方法（第７回分科会）

澤田純男　氏（京都大学大学院工学研究科）

(Ⅰ)　強震動予測による入力地震動を現行の耐震設計体系に組み込むためには、各種設計基準に規定されている設計スペクトルから、純粋な入力地震動の部分と、構造物の特性や設計法による部分とを分離する必要がある。

(Ⅱ)　地下構造物の耐震設計に用いる応答変位法の設計スペクトルは、地表面における変位地震動の最大値に、角振動数 w を掛けることによって速度振幅に変換したものを示していると考えることができる。

(Ⅲ)　地表面における応答スペクトルから、応答スペクトルを求めるために計算した１自由度の振動系の応答を取り除き、地震動そのものを評価する手法を示した。本手法を用いて地表面における応答スペクトルを地震動変位の最大値に変換することができる。

(Ⅳ)　地表面の応答スペクトルから、地盤の共振の影響と地震動の非定常性、および地震波の伝播速度影響を考慮して、応答変位法で用いている設計スペクトルに変換する手法を示した。本手法を、道路橋示方書の設計スペクトルと、強震観測記録を統計解析して求められた平均加速度応答スペクトルに適用し、これらが共同溝設計指針に規定されている設計スペクトル、および駐車場設計・施工指針に規定されている設計スペクトルに、ほぼ一致することを示した。

(Ⅴ)　地下構造物の設計スペクトルを地表面の加速度応答スペクトルで規定し、これから構造物に作用する地盤内変位分布を求める方法を提案した。これによって、強震動予測で求められた入力地震動スペクトルから直接設計することが可能となった。

(Ⅴ)　液状化簡易判定法としては、岩崎・龍岡らの方法がよく用いられているが、これは地表面の最大加速度 a_{max} を入力地震動のパラメータとして用いている。しかしながら、地震動は周波数特性を持つものであるから、最大加速度だけで地震動の大きさを規定することは、かなり無理があると言わなければならない。

(Ⅶ)　地盤の固有周期に対する変位波形の最大値から、地盤内応力分布をサイン関数で近似することにより、多層系地盤に対しても重複反射法で求められる応力分布を簡単に推定する方法を示した。

(Ⅷ)　地盤の固有周期に対する変位波形の最大値を、地表面の応答スペクトルから求めることにより、地震動の周波数特性と地盤の固有周期および液状化に至るまでの繰り返し回数の効果を考慮した液状化判定を簡便に行なう方法を示した。

◎　ＲＣ構造物の耐震設計と変形性能の評価（第８回分科会）

井上委員

コンクリート分科会では、日本コンクリート工学協会近畿支部と共同して種々の検討を行っており、その中でコンクリート構造物の耐震設計の現状と今後の課題について検討を行っているW.G. ２の内容をメインに、以下のテーマについて紹介を行った。

１.試設計による各国設計基準の比較検討

震災前の日本の耐震設計基準がどのような位置づけにあったのかを確認する目的で、ＲＣ単柱式橋脚を対象として、国内３基準（コン示、道示、鉄標）および国外３基準（AASHTO、CALTRANS、NZS）を用いて試設計を行い、その傾向を調査した。その結果以下のような知見が得られた。

a) 国外基準では、コンクリートにより負担されるせん断力は、塑性ヒンジが形成されることが予想される部材端部で、軸方向圧縮力が小さい場合にはゼロとしている。

b) 国外基準では、構造細目的に多くのせん断補強筋を密に配置することを規定している。

c) 道路橋復旧仕様による変形性能の照査結果では、国外基準によって得られた配筋は、国内基準によるものと比較して柔な構造、すなわち大きな変形性能が得られるような配筋となっている。非線形動的応答解析による結果も同様である。

２.材料強度の超過が破壊モードに及ぼす影響

材料強度の超過、特に鋼材強度の超過により、ＲＣ橋脚の破壊モードが曲げからせん断に移行

する可能性があり、その影響を検討しておくことが耐震設計上重要である。ここでは、鋼材強度、コンクリート強度、断面寸法がそれぞれ設計値よりも大きくなることを想定してその影響を帯鉄筋比との関連において検討した。得られた主な結果は以下のとおりである。

a) 鋼材の降伏強度が超過するとせん断耐力比が低下する。特に主鉄筋のみ強度が超過するとせん断耐力比の低下が著しい。

b) コンクリート強度が超過した場合はせん断耐力比が高くなる。また、部材寸法の超過はさほど影響しない。

c) 帯鉄筋比が 0.6%程度以上の場合には、材料強度の超過は破壊モードに直接影響はしない。

d) 震災後改訂された基準では、せん断耐力に余裕のある設計を行うようになっており、材料強度の超過が及ぼす影響は小さいと考えられるが、改訂前の基準を用いて設計した構造物にはせん断耐力比に余裕のない場合が多く、そのような場合、材料強度の超過、特に鋼材強度の超過によりせん断破壊が先行する可能性があり、補強対策等が必要である。

３.繰返し荷重下のせん断耐力の低下

地震荷重のような正負交番繰返し荷重下では、せん断耐力、特にコンクリートが負担するせん断力が低下することが従来より指摘されており、設計においてそのことを如何に考慮するかが今後の課題である。震災後改訂された国内基準においてもそのことがようやく考慮されるようになり、例えば、土木学会コンクリート標準示方書耐震設計編においては、部材じん性率算定の際に、コンクリートのせん断抵抗を一方向荷重下の 1/2 まで低下させることが解説に記述され、間接的には繰返し荷重によるせん断耐力の低下を考慮して設計が行われるようになったと言える。しかしながら、塑性ヒンジ部に要求される変形性能に応じてその部分のせん断耐力を低下させるような、より直接的かつ合理的な設計法が提案・採用されている。ここではその代表的なものとして、日本建築学会の方法および Priestley らが提案する手法を紹介した。

４.せん断変形を考慮した動的解析手法

現在行われている一般的な動的解析においては、せん断変形を考慮しても橋脚天端の変位応答にはほとんど影響が出てこないという結果が得られる。しかしながら、大変形領域においてはせん断変形の影響が無視できないのではないか、特に曲げ降伏後せん断破壊するような部材においては、その影響が大きくなるのではないかと考え、せん断変形の影響を考慮できるよう武田モデルを改良したモデル（すなわちせん断の影響を別個に考えるのではなく、曲げの復元力モデルに組み込んでしまうという考え方）を用いて動的解析を行った。その結果、せん断の影響を考慮した場合、橋脚天端の変位応答が大きくなるという結果を得ている。ただし、このテーマについては、その妥当性や適用性について現在検討中である。

第 3 編に相当する地下構造物分科会報告は、7 章で構成される。第 2 章から第 6 章までが各ワーキンググループが担当して執筆した部分に相当する。各省の見出しと担当ワーキングを以下列挙する。

第１章	はじめに	(担当：櫻井、大西)
第２章	地下構造物の被害実態の把握	(担当：W.G. 1)
第３章	地下構造物の耐震計算手法の現状と課題	(担当：W.G. 4)
第４章	被災構造物周辺での地震動特性の把握	(担当：W.G. 2)
第５章	被災要因の検討	(担当：W.G. 3)
第６章	復旧工法と復旧過程の検討	(担当：W.G. 3)
第７章	結言	(担当：櫻井、大西)

特に、第 6 章の復旧工法と復旧過程の検討については、ご多忙中のところ神戸市交通局計画課　宮崎氏、西日本旅客鉄道徽式会社鉄道本部施設部　乾氏、神戸高速鉄道株式会社技術部　藪下氏にそれぞれ直接執筆を頂いた。分科会として感謝の意を表したい。