

平成7年度防災研究所公開講座「阪神・淡路大震災に学ぶ」 パネルディスカッション—ライフラインと地盤災害—

自然災害による最大の被害をもたらした阪神・淡路大震災の特別企画として平成7年8月24日(木)・25日(金)の両日、大阪市の日本生命中之島研究所において公開講座「阪神・淡路大震災に学ぶ」を開催した。

この公開講座では、都市を災害の脅威から守るために行われている研究の最新の成果と、そこから見出される総合防災の在り方を提案し、地震による人的災害や建築物・社会基盤施設の被害、危機管理や被災者のメンタルケアなど幅広い話題を提供した。

パネルディスカッション—ライフラインと地盤災害—は、第2日目に行われ、最初にそれぞれのパネラーから報告があり、それらに基づいて討論がされた。以下については、その報告概要及び討論の記録を著したものである。

コーディネーター：池淵周一（京都大学防災研究所教授）

パネラー：安藤雅孝（京都大学防災研究所教授）

亀田弘行（京都大学防災研究所教授）

佐藤忠信（京都大学防災研究所教授）

三村 衛（京都大学防災研究所助教授）

報告概要

兵庫県南部地震の断層運動

安藤 雅孝

地下に加わる力がだんだん増して行き、岩石の強さを越えると壊れる。これが地震である。地下で起こる壊れかたは、ぐっしょりとつぶれるような壊れかたではなく、断層と呼ばれる破壊面に沿って両側の壁がすべる、そんな壊れ方である。さらに、断層による破壊は、小さな破壊開始点（震源）からおよそ毎秒3 km程度のスピードで拡大して行く。破壊が停止したときが、地震の終わりである。

1月17日5時46分に、明石海峡の真ん中の、深さ17 kmの部分にまずヒビが入った。それが、地震の始まりである。そこから、南東と北西に一直線に割れ目は伸びた。長さ50 kmを越える破壊に成長し、地震は終わった。これが兵庫県南部地震で、始まりから終わりまで10秒程度であった。地震の大きさはマグニチュード7.2と言われている。長さ50 kmの破壊も大きく壊れた所、小さく壊れた所といろいろである。地震計の記録を調べてみると、淡路島側の方が神戸側より、地下では大きく壊れたことがわかった。

いったいそれほど大きな破壊ではなかった神戸側に、なにゆえあのような被害が集中したのだろうか？地震が特別に大きかったのではないかと考えられたが、その証拠はない。中規模の普通の地震であった。結局都市直下に起きたことが被害を大きくした最大の理由であった。日本では昭和23年の福井地震以来47年間、都市直下で大きな地震を経験していない。都市直下で地震が起きたらどんなことが起こるか、あまり理解せずに今日までできてしまった。

今回の地震の場合、大被害の帯が海岸に沿って現れた。大きな被害はほとんどこの帯の中で起きた。何故このような帯が現れたのだろうか。二つの考えが提出された。一つは、帯に沿って地下に破壊した（つまり断層が走った）、もう一つは帯に沿って特別な地下の構造が分布し、これが被害を大きくした、との考えで

あった。詳しく調べると、後者の考えが正しいことがわかった。六甲山系は急傾斜で南に向かい、瀬戸内海の下にもぐり込む。海岸付近ではこの斜面の上にやわらかい地層が積み重なり、平坦な土地ができあがっている。阪神地域の発展のもとである。じつは、この地下構造が被害を大きくする原因であったことが次第にわかった。この地下の構造は、揺れを大きくする増幅器のような役割をしていたのである。

この地震後、活断層が注目され始めた。活断層がどこを走っているかが、大変な関心事になった。しかし、活断層のそばにいると危険で、そこからわずかに離れば安全であるかのように考えるのは間違いである。さらに、活断層の上で繰り返される大地震は、ある程度の間隔がある。これを見極めて、現在は危険期にあるのか、比較的安全期にあるのかを判断する必要がある。その上で、活断層が動いた場合にどんな被害が起きるかを予測する必要がある。今後の被害の予測には、地下の構造をよく調べて地震の際にどのように揺れるかを考えなければならない。関西は断層に周囲を囲まれてできた都市ばかりである。そこは山と平野の境になっていて断層に近く、神戸のような地下構造がある。地震の時に被害の集中する可能性も大きい。これから西日本の地震活動が高まる可能性も高い。地震に強い街と心構えとを、一つずつ作っていく必要がある。

ライフラインの被害

亀田 弘行

ライフライン（供給—処理：電力・上水道・下水道・ガス；通信：電話・コンピュータ通信；交通：鉄道・道路）の被害について、都市防災とシステム論的な観点から報告した。はじめに、現代の都市活動はライフラインへの高度の依存によって支えられていることの認識のもとに、阪神・淡路大震災におけるライフラインの被害の特徴を示し、それを i) 広域的被害, ii) ライフラインシステム間のカスケードの被害波及, iii) 長期の復旧期間による社会的影響, iv) ライフライン地震工学への全面的なテスト（耐震管, ネットワーク, バックアップ, 復旧戦略）の4点にまとめた。つづいて、具体的な被害の説明とともに、今後の耐震化の課題を論じた。内容は、i) 耐震管路の挙動, ii) 地中電線と架空線の被害, iii) 上下水道の目地離れによる漏水, iv) システムの緊急操作の問題（水道の緊急遮断弁による緊急給水資源の確保, ガスのブロック化による被害波及の局限化など）, v) システム間の相互連関・被害波及（水道の上位システムの被害によるカスケード効果, 倒壊家屋の道路閉塞による復旧困難, 埋設管内への差水, 停電による屋内受水層の機能喪失, 長期停電による非常電源の機能停止など）, vi) 鉄道・高速道路崩壊による交通困難, 物流・人流への影響, などに及んだ。今後のライフラインの耐震化の基本的方向として、i) 震度VIIへの対応—戦略的強化, ii) ネットワークリダンダンシーとバックアップの強化, iii) システム代替性の多様化, iv) 相互連関による悪循環の防止, v) ユーザーの自助努力の普及とそのための技術開発を挙げ、そこではシステム間でバランスのとれた耐震強化が達成されること、都市の安全性に向けての社会的合意（コスト負担の構造）の形成が不可欠であることを論じた。

強震域における地盤震動強度

佐藤 忠信

1995年兵庫県南部地震は、ごく普通の中型地震であったにもかかわらず、都市直下に発生する内陸型地震による災害の厳しさを示し、電力・ガス・上下水道などの供給網の機能障害、電話やコンピュータに代表される情報機能の混乱など、ライフライン施設に大きな被害を生じた。この地域では六甲山地から海岸線までの十数キロの間で地盤条件が露頭岩盤から堆積層の厚さが数百メートルとなるような急激な地盤条件の変化が

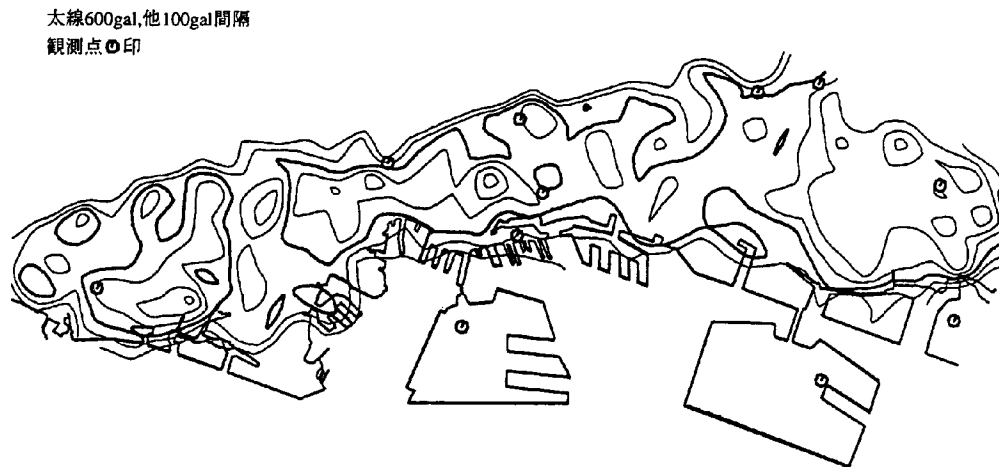


Fig. 1 計算値を観測値で補正した後の最大加速度分布

ある。地盤振動の際だった特徴としては、沖積層厚が数メートルから十数メートルの比較的浅い地盤層上に幅 2 km、長さ 30 km にわたって震度 7 の帯が出現したことである。また、阪神地域の広い範囲にわたって地盤の液状化現象が発生し、埋設管、地下構造物、建物の基礎などに大きな被害を及ぼした。特に、神戸市域の人工島を含む埋立地盤には液状化に基づいて地盤に大きな変状が発生した。

パネルディスカッションでは、震源近傍の地震動強度がどの程度のものであったかについて説明した。まず、最大水平加速と震源断層からの最短距離の関係で説明を加えた後、絶対最大加速度スペクトルの概念を説明し、構造物が地震時にどの程度揺れたかについて解説した。その過程で、震度 7 は木造家屋の倒壊率が 30% を越える領域として定義されていること。震度 7 の帯が出現した理由として考えられることについて説明を加えた。さらに、中圧ガス管の被害は震度 7 の帯の周辺に分布すること、電柱の被害は震度 7 の帯内で著しいこと、水道管の被害の分布は震度 7 の帯と比較的よい一致を示していることなどを示した。

震度 7 の帯の中には強震観測点が無かったため、実際にどの程度の地盤振動強度があったかは各種の状況証拠から推定せざるをえない。また、統計解析に基づいたマグネチュードと震央距離に関する地盤種別ごとの既存の最大加速度の距離減衰則だけでは、今回の地震の際に発生した震度 7 の帯の中でどの程度の地盤振動強度があったかを推定することは困難であるので、断層の広がりや破壊過程を考慮できる最大地動の推定法を用いて、1995年兵庫県南部地震の地盤振動強度がどの程度予測できるかについての計算例を示した。

断層の破壊過程や表層地盤の増幅特性を考慮して解析的に推定した最大加速度の推定を観測値により補正した図 1 のような結果を示した。得られた最大加速度の分布特性は、木造家屋の倒壊率から決定された震度 7 の帯に比べて幅が 2 倍ほど広がっているが、振動の強かった地域の全体的な分布特性は良く説明できることを明らかにした。また、震度 7 の帯内で被害を受けた構造物がどの程度揺れたかを明らかにするために、断層の破壊過程や表層地盤の増幅特性を考慮して理論的に加速度応答スペクトルを計算し、それを観測記録から計算された観測点における加速度応答スペクトル値で補正した結果を示し、場所によってスペクトルの形状がかなり異なること、また地球の重力の 2 倍以上になる加速度応答があったことを明らかにした。

兵庫県南部地震による地盤災害について

三村 衛

兵庫県南部地震による地盤災害は、大きく分けて以下の 3 つに分類できる。すなわち、(1) 地盤の液状化、

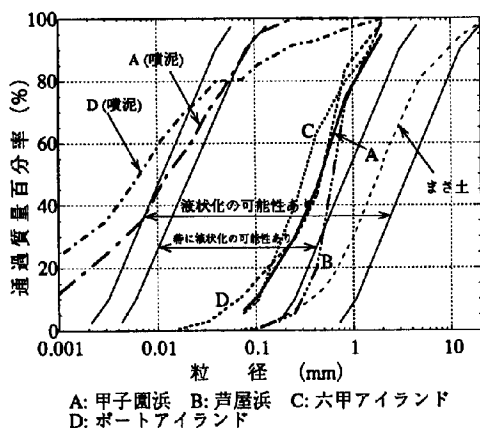


Fig. 1 填砂痕から採取した土の粒度分布

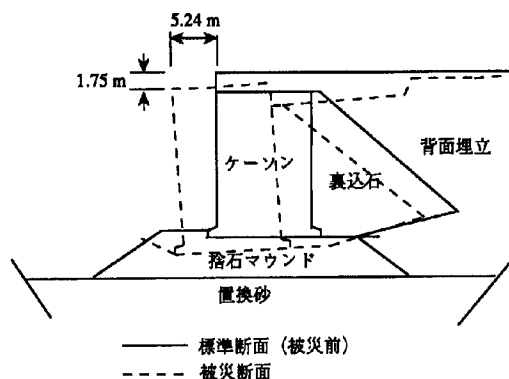


Fig. 2 典型的な重力式岸壁の被災断面

(2) 重力式岸壁の崩壊, (3) 斜面の崩壊である。

まず、地盤の液状化については、神戸・阪神間に展開している埋立地や人工島を中心に広範囲において発生している。また内陸部でも旧湿地のような地下水位が高く、埋立しを行うことによって造成されたような箇所でも多く認められている。さらに特徴的なことは、従来液状化し難いとされてきた粒径の大きなマサ土や、逆に粒径の細かい細粒土なども噴砂痕から採取されている。(図-1参照) ことである。粒度分布のみによる液状化危険度評価は非常に簡便で分かり易い反面、外力や地盤の変形に関する要因が含まれていないという問題があり、その見直しを含めた取り組みが必要となる。液状化対策工の効果については、サンドコンパクションやロードコンパクションといった密度増大型の地盤改良が極めて効果が大きく、次にサンドドレーンやプレローディングといった地盤の強度を増大させるタイプの方法が効果的であったことが報告されている。ここで、サンドドレーンやプレローディングは本来液状化対策工ではなく、圧密促進のためのものであることに注意する必要がある。しかしながら、特に、埋立後に陸上からサンドドレーン (SD) を打設した箇所で地盤の沈下がかなり抑制されていることから、SD 打設時に埋立土層が締固められた可能性もあり、今後そのメカニズムについての検討が必要である。

第二に神戸港を中心に重力式岸壁の大半が被災した。神戸は海底面表層に軟弱な沖積粘土が堆積しているため、マサ土による置換を行い、捨石を設置した上にコンクリートケーソンを置くという重力式岸壁が多くなっている。図-2に典型的な標準断面と被災断面として六甲アイランドコンテナバースの事例を示す。地震による慣性力によって支えのない海側にケーソンが滑動し、その影響で背面地盤に大きな陥没が発生し、クレーンをはじめとする港湾施設が使用不能となるという共通の被災パターンが見られた。この時、置換砂、背面埋立地盤の液状化によるせん断抵抗の低下と土圧の増大が岸壁の崩壊を助長したものと考えられる。

斜面の崩壊については、大規模なものは数ヶ所で、地震によるせん断を受けて弱層のせん断抵抗が低下し、崩壊に至ったものと考えられる。仁川の斜面崩壊についての解析結果によれば、平常時の内部摩擦角がせん断によって低下することにより、静的な状態ではすべりに対する安全率が1以上で安定している斜面が地震時の動的荷重によって安全率がかなり低下し、場合によっては崩壊に至る可能性があることがわかった。この場合、地下水位の位置、過剰間隙水圧の上昇に伴うせん断抵抗低下の可能性のある地層の存在がキーポイントであり、こうした情報を詳細に知ることが重要である。

討 論

池淵 それではただいまから防災研究所の公開講座の最終プログラムでございますパネルディスカッションを始めさせていただきますと思います。昨日から公開講座をやらせていただいておりますが、昨日の講演者の方々から、例えば河田先生のお話では、生態と都市の連関として、血管、神経系に相当する都市のライフラインというものは、一ヶ所やられますとすべてだめになる。そういった特性をもっておりますというようなご指摘でございました。また入倉先生からは、活断層と地震動に伴う地盤の水平上下振動のふるまい等についてのお話もございました。さらには中島先生からは、都市の建物の被災要因には、都市のもつそれぞれの建物の建設年代の違いが関わっているというようなご指摘もいただきました。

ライフライン、ここでは電気、電話、ガス、水道、道路、鉄道等の交通施設、あるいは港湾施設、そういったものを含めてライフラインというふうに言われたと思いますが、そういったものはあるものは地上に、あるものは地下に埋設されておまして、いずれもが地震時の地盤のふるまいがもたらす形で被災をしますし、また都市であるがゆえに、その建設年代を異にする視点でもございます。そういったことを考えますと、いままで若干取り扱ってこなかったライフラインというものをとりあげたい。そしてこのライフラインというものは、社会経済活動はもとより、われわれの生活そのものの基盤にもなっておる、非常に重要な施設でもございます。

そういった意味で、ライフライン、地盤災害、こういうテーマでパネルディスカッションを始めさせていただきます、また公開講座の実行委員会としても、そういった側面からの話題提供をいただく形で、パネルディスカッションを企画した次第でございます。

私今年度の公開講座実行委員会の委員長ということで、このパネルディスカッションのコーディネーターという役を務めさせていただきます。こういったテーマにつきましては門外漢の間でございますので、各パネラーの先生方のご協力を得て、皆様方にとって実りのあるパネルディスカッションをすることができることを期待したいと思います。

それでは各パネラーの先生、いずれも京都大学防災研究所の先生でいらっしゃいますので、略歴等は割愛させていただきます、専門分野、そういったもののみをご紹介させていただきますと思います。

安藤雅孝先生でいらっしゃいます。先生は地震学のご専門で、トップバッターとして、話題提供をいただくと思っております。

それから、佐藤忠信先生です。耐震工学、特に最近では構造物の基礎の地震時の初動特性、あるいはライフラインの耐震性の研究に焦点をあてておられる方でいらっしゃいます。

次に亀田弘行先生でいらっしゃいます。都市地震防災、ライフライン、地震工学、こういった分野をご専門にいらっしゃる先生です。

それから三村衛先生でいらっしゃいます。土質力学、地盤工学のご専門でいらっしゃいます。この4人のパネラーの先生とともに、ライフラインと地盤災害というテーマで、約2時間弱、パネルディスカッションを進めていきたいと思っております。

まず進め方でございますが、最初に問題提起、このテーマにからむ形のものを含めてでございますが、各パネラーの先生方が、そういった意味で今回の地震の実態、被災の実態並びにライフラインの構造及び状況を踏まえて、それぞれの専門的な立場から話題提供をいただき、そのあとそれぞれの内容、ご指摘、問題等についてコメントしながら論を深め、最後にそういったものを踏まえた今後の取り組み等に収斂していくような形で進められればというふうに思っております。従いまして、最後の後半におきましては、会場の皆さん方からも、そういった話題提供、問題点等を踏まえたご指摘、コメント、ご質問をいただければ幸いです。

それでは最初に安藤雅孝先生のほうから、今回の地震の実態、被災の大きさ、そういったものを引き起こした背景要因、そういったことについての話題提供をお願いしたいと思います。

安藤 被害の問題ですと、被害を受けたライフラインそのもの、それから被害を起こす源になった震源で何が起きたかということ、もうひとつ震源と被害をつなぐ地盤になにが起きたかという問題の3つに大きく分けられると思います。私は震源で何が起きたかというお話をさせていただきたいと思います。どちらかという、直接被害に結びつくものではございませんが、今回の地震がどんな地震だったかという問題になります。

まず、今回の地震が起きまして、なぜ関西に地震が起きたかと、いろんな方から言われました。実は関西は、昨日もお話いただいたかと思いますが、活断層の大変多いところでもともと地震の多いところだったんですが、この数十年少なかったということがいえます。

その前に、地震とはなんぞやということ、ここでちょっと見ていただきます。

地震というのは、例えば地球の中にある場所をとってきますと、そこに破壊が起きるのが地震です。この破壊はご存じのように剪断破壊で、こういうふうな割れ目が起きてすべる。これが地震であります。地震は地面の中で見てみますと、小さい地震ですと破壊の広がりも小さいものですから、これは地表まであがってこない。それからだんだん大きくなっても、なかなか地表まで上ってくる勢いが無い。大きくなりますと、地表面まで現れてきて、地面までが切れます。地表で切れるのが繰り返されると活断層というふうになって地形に残ります。

今回の地震は、異常な地震だったのか、あれほど大きな被害を起こすものは、震源でとんでもないことが起きたのだろうか？という疑問を中心にお話をさせていただきたいと思います。断層は淡路島の北淡町の地表に勢い余って現れました。

ここに断層により田畑が切られています。断層が動いた跡を見ますと右にずれております。これは大変基礎的なことですが、断層は左に動いたり右に動いたり気ままなことは決してしません。というのはこれは、大きな力で、関西のこの地域に加わっております東西の力の結果できておりますから、向きは断層ができた時にすでに決まっています。断層は右にずれて切れています。よく見ますとこれは縦にもずれております。このお宅はスパッと塀が切られておりますが、見た限りでは大きな被害を受けては無いようです。従って断層が近くにあるかないかだけで被害は決まらないということがわかります。

実際にずれている地表付近を撮ったところを見ると、断層面上に筋がついておりまして、確かに2つのブロックがずるずるっとすべったことがよくわかります。大体推定ですけれども、すべる速度は1秒間に1mぐらい。従って、とんでもない速さで動いているということではないと思います。多分見た方は一人もいらしゃいませませんが、もし地面を見ていたとしたら、比較的ゆっくり動いているというような現象です。

このようにずれることは、地震が起こりますといくらでもあります。これは1990年のフィリピンの断層でも、やはりこのようなずれが生じ道路等がずれております。これは先ほどの地震を上から写したものです。畦道がずれております。地震というのはこういうふうにずれる現象であるというのがおわかりいただけると思います。

今回の地震を次に見てみます。図には淡路島から神戸へ向けて直線が引いてありますが、今回の地震の断層です。ほとんど面です。完全な平面のようなところに地震が起きた。地表で見ますと、あちらこちら屈曲しているようですが、私どもの決めた余震分布からみますと、ほとんどまっすぐの面からできております。それでこの破壊面はどのようなようだったかというのを、次にお見せします。

これは余震分布で、ここからみても比較的ほとんど直線であるというのをおわかりいただけると思います。これについて、入倉先生が昨日詳しくお話されたと思いますが、もう一度私どもの大学院生の堀川春央君がいたしましたものをみていただきたいと思います。図は映画の1秒1秒のコマだと思ってください

い。明石海峡の深さ17キロの所が最初の破壊になります。これを時間的にずっと映画でとっていただきますと、大体この付近までで10秒です。0から始まりまして、刻々とこの赤いところが大きく破壊している所の先端です。こちらが淡路島、この付近が西宮になると思いますが、こういうふうに広がって壊れていく様子がわかります。このようなことはどのように復元するかは、昨日入倉先生からお話があったと思います。日本では現在まで10グループぐらいがこのような解析をいたしました。共通していることのひとつは、大きな破壊はすべて淡路島側で起きていることです。神戸側の破壊は小さいという結論がでています。

それから、すべての破壊が終わるまでは、これを見ていただきましても、ここで10秒です。ピシッと小さな破壊が始まって、地震が終わるという間隔が大体10秒です。従って、非常に短い自然現象ということが言えると思います。

それで全部まとめますと、こちら側が淡路島の北淡町、このへんが明石海峡で、深さ17 km に最初の破壊。この付近が宝塚、西宮はこのへんだと思いますが、こうしてみますと、非常に大きな被害とは必ずしも地震の大きさが結びついていないということが言えると思います。大きな地下岩石の破壊は淡路島側におきながら、大被害は大会の阪神地区とか、神戸、西宮、芦屋、そういったところに集中しているということがいえると思います。

質問として、「兵庫県南部地震は特別な地震か」に対しては、答えとしては、地面の中でなにか起きたかだけを考えますと、地震は中規模で、決して大規模ではない。大地震と言われていますが、これは被害の規模という意味で大地震には間違いないんですが、地震の規模では決して大地震ではない。さらに地震の性質をみてみますと、これもまた実に普通の地震で、どこにでもある、どこにでも起こる可能性のある地震ということはいえるんです。

それで、最後にどうしてこんな大きな被害かという、私どもの立場から見ると、もうそれは地面の下深くには原因は求められないのです。つまりこれは地盤、地表の直下の問題、それから建物の問題。この問題以外には考えられないと結論できます。やはり直下ではこういうことが起きる可能性があるという地震の調査研究から言えると思います。

「岩波の科学」という雑誌がございまして、9月号に菊池さんという方が、コンビニエンスストアの防犯カメラを使いまして、断層がどこに走ったかというのを再現しています。これはなかなか直感に訴えて、かつ便利な方法で、断層の位置をきちんと押さえることができます。断層の位置は、やはり昨日お話があったと思いますが、震災の帯、震度7の帯とはちょっと離れております。むしろ余震域に近いということで、今回の断層、被害というのは、やはり断層の周辺に帯ができたというよりは、やはり地下地盤の影響であると結論がはっきりでたと思います。

神戸側では断層は地表まで現れておりませんが、やはり地下2～3キロのところまでには生じたと考えられます。ただし、ずれが小さく勢いがあまりにも小さいために、地表まであがってくるができなかったと、これらの解析からわかってきました。もし興味お持ちの方は、岩波の科学、黄色い表紙の薄い雑誌がありますが、今月号にでています。

活断層ですが、次のスライドをお願いします。

大阪付近を人工衛星の写真で見ますと、大阪平野というのはどうみてもこれは非常に四角な形をしています。普通雨風で浸食しますと、こんな形はできません。原因は全部断層であります。有馬高構造線、六甲の断層、中央構造線、熊野断層と、写真には直接見られませんが上町断層という、大阪の真々中に断層が走っています。これが主な断層でありまして、大阪というのは断層でつくられた町だといっても過言ではない。こういうところに同じような条件、多分次の佐藤先生のお話があるかと思いますが、先ほどの帯ができたような同じ条件が、こういう断層の近くに、これは地形的にできております。やはり我々は阪

神大震災規模の被害が今後起こりうることも考慮する必要があると思います。

活断層というのは実はとんでもなく、専門家が勝手にあちこちひいているわけではなくて、皆さん見ていただきますといっぱい見られますよというので、これはかつて、ここには中国自動車道が走っていますが、活断層に長崎断層という、よく見ますとよくわかりやすい地形がいっぱいありますということで、地形付近をちょっと眺めてみると、活断層を見つけるのはわりと容易です。

こういうことでまとめますと、この大阪周辺だけ見ますと、もともと活断層の多いところでありまして、地震の少ないところで決してない。少なかつたのは、たまたまこの数十年だけということをここで表現したものでありまして、ただ断層もむやみにあるわけではなくて、非常に決まったところにありますので、対処の仕方はあると思われまます。

いずれにしても、結論として今度の地震に関して申し上げますと、地震、地下の中でなにが起きたかというお話では、これはある意味では中規模な地震であって、都市直下に起きたということがこれだけのことを引き起こしたのではないかということをお話のほうからご説明いたしました。

池淵 どうもありがとうございます。安藤先生のお話にもありましたように、地震の現象面としては普通の地震だったということですが、被災、あるいは災害は非常に大きかったということもまた事実でありまして、ライフラインでもしかり。そこで次に佐藤先生のほうから、震動7の地域とライフラインの被害及びその背景、特に埋設管に焦点をあててお話をいただきたいと思ひます。

佐藤 安藤先生のほうから地震のメカニズムが特別なものではないというお話ですが、今回のような都市直下地震が起きますと、非常に大きな地震被害が起きます。今回の地震では震度7の帯がでてきました。これは気象庁の定義では木造家屋の崩壊率が30%を越える領域ですので、地震被害の集中した状態の領域ができたわけです。スライドをお願いします。

これは地震度が記録された観測点で、地盤の大きく動いている方向を書いたものです。安藤先生が示された断層にほぼ直交する方向に、大きな振動があったということがわかります。

この図は、距離減衰といっているものなのですが、縦軸に観測点における最大速度をとり、横軸に断層からの一番短い距離をとったものです。この○印の記号で示してありますが、観測点の最大加速度の大きさを示したものです。図中の実線はアメリカの地震記録に基づき、ジョイナーとブワーが、アメリカの地震記録に基づいて作った経験的な最大加速度の距離に対する軽減の特徴を書いたものです。今回の神戸の地震による記録は、彼らの経験式で表現できることがわかりました。こうした結果を見ましても、日本国内だけではなくて、外国の地震と比べてもそう特殊な地震ではなかったということがわかります。ただ、断層からの距離が数キロ、10キロ以内なんですけど、たくさんのデータがとれたということが非常に大事なことです。日本ではこれまでこういうデータはありませんでした。これは今後の耐震設計の有り方を決める上で重要な役割をはたすと思ひます。データをみればわかりますが、大体600ガルから800ガルぐらいの最大地動が、断層の付近で発生しており、ほぼ7～8キロまではその値がかわらないということです。

これは、記録された水平の最大加速度に基づき最大加速度の等高線を書いたものです。大体400から600ガルの等高線がこのへんにあり、震度7の帯がこのへんにでているんですが、震度7といひますのは、木造家屋の倒壊率が30%を越える領域と定義されているんですが、最大加速度と対応もとっておりまして、大体400から600ガルの越える揺れは震度7の揺れになるということになっています。

これは、応答スペクトルといひているものですが、建物の揺れの大きさを現す指標です。ここは神戸の海洋気象台、ここは神戸大学で、ここは関西電力の新神戸の変電所、これは東神戸大橋、これは大阪ガ

ス、これはポートアイランドで取れた観測記録を用いて構造物がどのぐらいゆられたかという計算をしたものです。見ていただいたらわかりますが、神戸の海洋気象台の記録を入れまして計算いたしますと、横軸が建物の固有周期で建物がどのぐらいの周期で揺れるかということが書いてあるんですが、大体0.3秒から1秒ぐらいの間で、2000ガルということですから、地球の重力の2倍ぐらいの大きさに建物が揺れたということがわかります。神戸大学のところは少し小さいんですが、ほかのところでとれた記録を用いて計算した結果を見ていただくとわかりますが、地球の重力の加速度よりも大きな加速度で建物が揺れたというようなことが良くわかります。

これらは震度7の帯の周りでとれた記録ですが、相当大きな揺れであったということがわかるわけです。

これは今回の地震だけではなくて、これまで外国でとれた記録とか、わが国の釧路沖の地震とか、米国で昨年起こったノースリッチ地震で取れた記録を比べてみましても、今回の地震による地盤の揺れはかなり大きかったことがわかります。

この赤い線は土木構造物、特に一般橋梁の設計に使っております応答スペクトルなんですが、今回の地震記録で応答スペクトルを計算してみますと、設計に用いている値よりも大きな値になるということもわかりました。

これは震源断層と震度7の帯の関係を示したのですが、先ほど安藤先生がおっしゃっておられましたように、断層より2～3km南側に震度7の帯ができました。震度7の帯の中に、少し切れこんでいるところがあります。

この震度7の帯と地質の図をならべて書いてみますと、ちょっと見にくいですが、黒く塗りつぶしてある所は玉砂利が堆積しているところと、沖積層のところの固い岩盤が山側からつきだしているところなんですが、そういうところと先ほど示しました震度7の切れ目とが対応しております。したがって地盤の堆積構造が震度7の帯の発生に非常に大きく影響しているということがわかります。

この図はガスの供給が停止された領域を現したものです。大阪ガスではスーパーブロックが8つあり、これをさらに55のミドルブロックに分割してた。この中の5つのミドルブロックでガスが停止されたんですね。この領域もほぼ震度7の領域とされていることがわかりました。

これはもう少し被害と震度7の帯の関係を詳細に見たものなんですが、中圧導管、これは皆さんのお家のほうにガスを供給しているガス管ではなくて、ガス圧にしますと0.1から3km/cm²のガス管に被害のあった場所を書いたものなんですが、見ていただくとわかるのですが、被害の有った箇所は震度7の帯の中にあるわけじゃなくて、ちょうど境界のところに位置していることがわかります。

震度7の帯の南側にあります黄色い部分は、あとで三村先生のお話があると思いますが、液状化の現象が見られた領域です。ですから、地盤の条件が急激に変化するところでは埋設管に大きな被害のでもということもわかりました。

一方、これは関西電力の方々がまとめられたものでして、電柱の倒壊、折損、傾斜などの被害の分布図なんですが、1つの矩形が500mの正方形なんですが、その中で25本以上の電柱が被害を受けた領域はほぼ震度7の帯と一致しています。電柱の被害なんかで見ますと、やっぱり震度7の帯の中で大きな被害があったということがわかります。

どうして震度7の帯がでたかという話はライフラインの被害と非常に大きく関係いたしますので、考え

てみたのが、これからの説明図です。これは昨日入倉先生のほうからお話があったと思いますが、入倉先生のグループでも、やはりそのことを検討されておられまして、本震ではないですが、余震の時にこの位置で余震観測をされました。ご注意いただきたいのは、この KMC というのは岩盤の露頭のところで、だんだん海側に行くにしたがって堆積層が厚くなります。FKI というのはかなり堆積層が厚いところです。余震記録の KMC に対する倍率を見ますと、FKI のところで最大になっており、観測された余震記録により倍率は異なっていますが、12倍ぐらいから16倍ぐらいになることがわかります。

神戸の南北方向断面で地盤構造がどのように変化するかを調べてみた例がこの図です。この部分は沖積層で、ここが洪積層です。地盤が北から南に向かって急激に深くなるのがわかります。一方、木造家屋に大きな被害がありましたところは国道2号線から阪神電鉄、阪神高速道路にかけての狭い領域でした。山側に行くと被害がなくなり、堆積層が厚くなります六甲アイランドでも液状化に起因する被害はあるんですが、地盤震動による建造物の被害は少ないということがわかります。これはいくつかの断面にとっても同じでございまして、国道2号線から阪神高速道路の間で非常に大きな被害になっています。

そこで、地盤の不整形構造をモデル化して地震動の増幅特性を計算してみました。国道2号線から阪神高速にかけて、被害が非常に大きかったところで地震波の卓越周期により地震動の増幅率がどのように変化するかを示しているのがこの図です。0.5ヘルツの波が卓越する地震の波ですと、国道2号線から阪神高速道路にかけてはほとんど地震動は増幅されていません。1ヘルツぐらいになりますと海岸周辺での増幅は大きくなってきますが、震度7の帯内での増幅はあまり大きいものではありません。1.5ヘルツから2ヘルツになりますと、ちょうど国道2号線から阪神高速ぐらいにかけて、大きな増幅をすることがわかります。

昨日中島先生のほうからお話があったと思いますが、木造家屋の揺れやすい周期帯域は大体0.5から0.8秒ぐらいのところにあります。地盤震動の卓越する周期がそのへんにありますと、ちょうど木造家屋の固有周期と一致して、木造家屋が非常に大きな被害を受けるということになります。これは先ほどの沖積層と洪積層を二層系に分けて、地盤震動としてどのぐらいの周波数の波が卓越するかを描いたものです。下のラインを見ていただくと、国道2号線の少し南ぐらいから、1ヘルツから2ヘルツの波が卓越することがわかります山から海にかけてのいくつかの断面で地盤の卓越周期を計算しますと、大体被害の大きかったところあたりで、1ヘルツから2ヘルツからの周期帯の波が卓越しているということがわかります。

地震断層が破壊することにより、地震の波が発生するんですが、堆積地盤の中で、特定の周期の波が増幅して、それが建造物の被害に大きく影響したということがわかります。ちなみに観測された記録でどのぐらいの増幅があがるのかということ調べてみたのが、あとの2枚のスライドです。これは関西地震動観測研究協議会で観測した地表面での最大速度です。そこで、ここに示しましたような地震断層を考えて、基盤での最大速度を計算いたしまして、観測された記録を割って地盤の増幅度を求めました。

この棒グラフを見るとわかるんですが、沖積層の厚いところだと速度で7倍ぐらいの増幅があったということがわかり、地盤条件が今回の地震の被害に大きく影響していると言えます。特にライフラインにつきましては、ガス管でも水道管でもそうなんですが、地盤の中に埋まっておりますので、地盤が大きく揺れますと被害が増大するというので、地盤構造と地震波の増幅との相関性を考慮した上で、これからいろいろ細かい被害データの集積をはかっていかなければいけないんじゃないかと思っております。

池淵 どうもありがとうございます。佐藤先生から特にライフラインがエリアとしての地盤条件、そこでの

地震波の増幅、そういった形のもので被災を大きくしたというようなお話がございましたが、亀田先生のほうからは、ライフラインの被害の実態、とりわけ都市というものでございますので、システムの視点で見なければならぬというふうに思っておりますので、そういった意味で、ライフラインについての被害の実態をそういった視点からご説明等をお願いできればと思います。

亀田 ライフラインの被害を、少し違う観点から見てみたいと思います。現代の都市構造の特徴の中で、今回の震災と特に関係の深い要素を取り出しますと、人口や活動が極度に集中した大都市圏が形成されていること、その中では、空間が地上に高く、あるいは地下深く高密度に利用されていること、そしてライフライン系に高度に依存しているということがあげられます。

ライフラインというのは、その種類が沢山ありまして、供給処理施設としては、電力、上水道、下水道、ガスがありますし、通信施設としては電話であるとかコンピューター通信、それから交通施設として鉄道・道路といったものがあるわけです。都市が巨大化し、かつ活動が高度化してくる中で、都市が拡大していくことによる時間と距離のハンディキャップを、こういう施設を使うことによって我々は克服して、活動の支えにしているというわけでありまして。このように、ライフラインへの高度依存というのが現代都市の大きな特徴であるわけですが、それが逆に地震時には弱点となる。特にいま申しましたライフラインの性格からして、都市のすみずみまでネットワークとして張り巡らされるという性質がありますので、非常に細かいネットワーク、各家庭にまで届くようなネットワークは、構造的にはなかなか丈夫にするのが難しいというようなことがございます。

それで、過去二十年ぐらいの地震では、都市災害の重要な問題として、ライフラインの防災が取り上げられてきたわけですが、今回の震災の中でも、種々の問題がでてまいりました。そういう観点から、すべてのことをお話するのは大変時間がかかりますので、少し重点的にお話をさせていただきたいと思えます。あとはスライドでみたいと思います。

はじめに要点を全部言ってしまって、そのあと時間が許すかぎり事例をご紹介したいと思います。阪神淡路大震災におけるライフラインの被害については、4つぐらい特徴があると思います。これまでになかったような、広域的な被害であったということ。広域的というものは、一つの自治体範囲ではとても対応しきれないような状況。それがたくさん市の町にまたがって起こってきたということで、全体の対応に非常に困難な状況をもたらしたということ。

それからライフラインシステム間の系統カスケード的被害波という、ちょっと聞きなれない言葉ですが、カスケードというのは、滝をあらわしているんですね。華厳の滝のようにどさっと落ちる滝ではなくて、急流が急勾配を、一方的にだーっと流れていくようなものをカスケードといいます。あるシステムが機能障害を起こすと、次のシステムに必然的に影響が及んでいくというような状況を言います。そういうことがたくさん起こったということです。

こういうことによって、復旧に、最近の地震災害と比べて、非常に長期間を要しました。ある意味では広域的とか長期というのは、単に量的に大きかったということの意味するかもしれませんが、例えば復旧が長期間に及ぶことによって、社会的にはこれまでにないような状況が出現したという意味で、量的な被害の拡大が、やはり質的な被害の様相の変化を生み出したんだろうと思います。

ライフライン地震工学というのは、最近20年間の間に発達してきた分野です。その間に例えば埋設管はそれ以前よりはるかに耐震的なものが開発されてきました。また、ライフラインというのは、都市を覆うネットワークを形成していますが、このネットワークをいかに耐震的に、地震に対してしなやかに柔軟に耐えるものにするかというネットワーク技法も発達してまいりました。

それから、ライフラインのシステムすべてが無被害で生き残るということを、ある程度は諦めるといえますか、なんらかの被害が生じた場合には、いかに対応をするかという技術として、1つは被害を受けた

場合のバックアップの機能を持つことである。それから一旦痛んだライフラインネットワークをいかにすばやく復旧させるかという、復旧上の戦略思考。こういったものが発達しています。

こういう技術は、構造物1個1個をいかに耐震的につくっていくかという、いわゆる耐震構造学とはかなり違う要素をたくさん含んだもので、ライフライン地震工学でひとつの分野を形成しているわけですが、そういうものが今回一斉にテストを受けたということになろうと思います。いろいろ問題点がでてまいりましたし、一方ライフライン地震工学の蓄積が生きた部分もあります。そういったことを、正確に仕分けして今後に生かしていくことが大切であろうと思う次第です。

それで、システム間の相互連関、被害波及、これが先ほどではカスケード的被害波及という言い方をしたんですが、違うシステム間で、ある被害が他の被害にどう影響を及ぼしたかということ。例えば阪神水道企業団からの送水不足によって、各自自治体が経営する水道の漏水検査が非常に困難な状態になって、そのために復旧に時間がかかったというような、あるいは倒壊家屋が道路をふさいで復旧作業が非常に困難になった。あるいは水道の漏水から、ガス管のほうへ逆に水がはいりまして、それが復旧作業を困難にした。あるいは停電することによって、今度は集合住宅など屋内に住む人が機能を喪失する。それから長期停電によって、非常電源の機能が停止してしまう。非常電源装置というのは、バックアップシステムとして発達していったのですが、停電というのは最近の地震被害ではそんなに長期間かからなかったのが、今回はそれが非常電源の燃料の備蓄を上回るような長期停電によって、機能停止になったというふうな、いろんな相互の関係もあります。

それから先ほどの耐震管について、埋設管については、佐藤先生から少しお話がありましたが、この十数年にわたって開発されてきた耐震管の中に、例えば耐震継手をもったダグマイル鋳鉄管であるとか、あるいは溶接鋼管といったような最新の技術があります。こういうものは、今回は概して非常に優秀な強度を示したとあってよろしかろうと思います。

それから耐震継手を持たないダグマイル鋳鉄管というのも、一応耐震的なパイプであるという位置づけがされていたのですが、こちらのほうは継手がたくさん抜けるという被害がありました。それ以前の、もっともろい材料、塩化ビニール管、ネズミ鋳鉄管、あるいはガスでたくさん使われていたネジ式の鋼管、割合としては少なくなっていたんですが、こういう残されたものが、やはり大被害を受けるということになりました。

この1番と3番というのは、我々としては当然そうなる、あるべきだと、あるいはそうなるだろうと考えられていたところがその通り起こっている。しかし2番については、これほど大量に起こっているということは、これは今回新しい経験です。そういうところが、今後の問題として残っていると思います。

それから地中線、通信であるとか電力では、地中電線を使って情報やエネルギーを運ぶか、あるいは架空線を使うという2つの方法があるわけですが、これもいろんな問題を起こしておりまして、どちらのほうがいまいかと言うのは、現在のところ少し評価が違うようです。このようにいろんな議論があるんですけども、こういう問題があるということだけで、今日は時間の関係でとりあえず先にいきたいと思えます。

それから上下水道では、水に直接接している水槽の部分に、伸縮目地を使っておりまして、そのところの目地が離れて漏水して機能停止するという被害がいくつか報告されております。

そういうことと同時に、ライフライン地震工学のひとつの成果として、これまで発達してきたものに、いざ地震が起こった時のオペレーションに便利な方法、いかに緊急に早くできるかというような工夫が行われているのでございます。これも後ほどご紹介しますが、二池式の配水置の緊急遮断弁というものは、大部分正常に作動した。それからガスのブロック化による被害の局限化、こういうものも確実に効果をもったと思えます。

それからさらに今回は、鉄道、高速道路の崩壊による交通困難、物流における影響、これは日本の震災では初めての経験です。道路、鉄道構造物そのものをもっと強化しなければならないという問題は当然ありますし、それは今後行われていく、すでに行われつつあるわけですが、それと同時に、地震時の交通の問題ということが非常に大きな課題としてクローズアップされてきております。今後十分な研究が必要であらうと思います。

今後のライフラインの地震対策ということになりますと、1番の問題に尽きるかと思えます。震度7への対応ということになるかと思えます。戦略的評価という言い方をしておりますが、震度7というこういう地震は、例えば神戸という特定の場所にもってきますと、500年から1000年に1回という頻度の災害です。しかしいざ来ると非常に大きな影響を及ぼすというわけで、典型的な「低頻度巨大災害」ということになります。

これは全国どこにでも起こりうる地震である。これは先ほど安藤先生が言われたとおりです。しかし、特定の地域、場所等をとってみますと、これは低頻度巨大災害であります。そういうものに対して社会をどこまで強化しておくのかということが、安全性の合意形成と、防災投資のコストをどれぐらい許容するかという、非常に重要かつ高度な、困難な議論を伴う問題があるわけです。

そういう意味で、万一こういうことになっても、これだけは絶対壊せないんだという戦略的なアピールを我々必要とすると思います。ライフラインについても、やはりそれと同様でありまして、例えば、非常に重要な管だけは、これは絶対に壊さない。例えば震災時に避難所になるようなところ、あるいは病院、そういうところへつながっている埋設管は戦略的に耐震化する。我々はそういう手段をすでにもっているということも、今回の地震の中で我々も確かめております。それをいかに組み合わせていくかという問題であると思えます。

以下、ネットワークのリダンダンシーとか、バックアップの強化、システム代替制の多様化、それから需要家における自助努力、例えば水を普段から溜めておくとか、そういったことが非常に役にたつということが今回はっきりしました。しかしそういうことがやりやすいような技術開発ということも一方では望まれているだろうと思えます。

そして現在いろんなところで耐震基準の強化が議論されております。各ライフラインシステムについても同様であります。しかしこれは個々のライフラインのシステムだけ、単独に自分ところはこれだけやるんだということをやっても、なかなか都市全体がレベルアップしたということにつながらない可能性があるわけですし、やはりシステム間のバランスということが重要であります。

ライフラインというのは、管轄しているお役所が全部違いますので、よほどそういうことの議論といえますか、連絡を密にとりながら、社会全体の耐震性向上の努力をすべきじゃないかと考える次第です。

これは、上水道が復旧していった経過を示します。0%から100%までですが、兵庫県南部地震による全体の水道の復旧がこういうカーブであります。最近の数年間の地震による水道の復旧というのは、大体地震後1週間ぐらいで達成されています。それと比べていかに時間がかかったかということがおわかりかと思えます。

これにはいろんな原因があるわけですが、例えば先ほどのカスケード的被害を申し上げますと、阪神地域は自己水源が少なく、大部分を淀川に依存しているわけです。神戸市は自己水源率が24%、尼崎が25%という率ですが、そこへ残りの水を供給する阪神水道が淀川からとって、浄水場を経て、各市に送水路、あるいは送水トンネルで送り込んでいるわけですが、阪神水道の施設が今回はいろいろと被害を受けてしまったということがあります。

阪神水道からの水供給は、地震でいったんドンと下がって、こういう、割合低水準で経過して、こうい

うところでようやくあがってきています。で、水道が断水して、漏水を直していくためには漏水箇所を見つけるわけですが、そのためには上流からたくさん水を送り込んでやらなければなりません。普段より水圧をあげることによって水が噴き出して、それで漏水場所を見つけるわけですが、上流からの水が少なくなることによって、漏水検査に非常に複雑な手間を要するような手段をとらざるをえなかったということがあります。

例えばこれは神戸市全体の水道の復旧工事ですが、あるところで急にずっと立ち上がり早くなる部分があります。こういうところがやはり阪神水道のいくつかの被害箇所が、修理が終わるとそこから先は末端部分の復旧につながって早くなるというふうに対応して、カスケード的被害波の影響を示すひとつの典型的な例であろうと思います。

これはライフラインがお互いにどう影響を及ぼしあうかということをもマトリクスにしたものです。しかしこれは、こういったいろんなことがあるんだということで、次お願いします。

今回の阪神大震災の中でも、いろんなことがでてまいりましたが、空間的な場所での相互作用。例えば高架橋が崩壊して、路面を覆う、塞いでしまう、あるいは機能的な被害。停電による機能マヒ。それからフローというのは導水からガス管に差水がいくとか、あるいは復旧段階では、倒壊家屋によって復旧作業が難しい等々のいろんなことがでてきております。

これは復旧作業が非常に困難であったという状況。

これはガス管なんですけれども、ガス管から水が噴き出すという非常に不思議な現象で、こういうことが復旧を非常に困難にしたと。

というようなことがあります。それ以外にもたくさん例がありますが省略いたしまして、そういう相互連関をもっているようなライフラインの地震の被害波及を防ぐのは、2つの対照的な方法で、システムをできるだけ関係なくしてやるか、あるいはいっそ一体化してやって、その一体化したものの耐震性を格段に向上してやる。一見反対のようですが、それぞれの効果がある。そういうことを今後きちっと追求していくべきではないかと考えます。

埋設管のことですが、さきほどダグタイプ鋳鉄管で、優秀なものと、継手が抜けたというのがありますが、この優秀な機能を示したという、S型という、こういう継手をもったパイプであります。ここがつかない目ですが、地盤が動いてこのパイプが抜け出そうとしますと、ここにストッパーがあって、止まるようになっています。こういうものが数mの管長でつながっていると、ちょうど鎖のような構造になります。地盤が相当へんな動き方をしても大丈夫。こういうものは地盤が大きく動く埋立地を中心に使われていたわけですが、このタイプのパイプの被害は、いまのところゼロであるというふうに報告されています。

これに対して、管体の材料としてはいいですが、継手としてはこういうふうにストッパーを持たないようなA型とK型。こういうものが、わりあい地盤がいいと言われている場所でも抜け出すという被害が今回は大きく起こりました。これが今回の新しい問題であろうと思います。それだけ地盤の相対変位が大きくてたということ、これはおそらく震度7といえますか、震源断層近傍の地震動や地盤の挙動の特徴として、今後考えていかなければならない問題だろうと思っています。

それをいうために、これも先ほど佐藤先生が見せましたと同じですが、応答スペクトルの中で、震源断層近傍の地震動というのは、従来は短周期のほうに大きなエネルギーがあると言われていたんですが、今回は短周期の加速度も大きかったけれども、長周期の1秒位ところに非常に大きなエネルギーがあって、

これが地盤の変位を大きくします。30センチとか40センチとかいう過渡的な変位をもたらす。こういうものが地盤の変形を大きくして、管の被害に結びついたのではないかと考えておりますが、そういったことを今後きちんと研究していくべきだと思っています。

悪いことばかりいいましたけれども、いいこともあるということで、例えば神戸市ですと、こういう配水池は二池式になっております。そのうちの一つは、ある強さを越える地震動が起きますと、遠隔操作で自動遮断するというようなシステムになっております。

今回の地震までに、全部で21ヶ所そういうシステムになっておりまして、そのうちの18ヶ所が正常に作動しました。そしてそれによって4万tの水を確保できて、それが地震直後から必要になった、緊急給水には非常に役に立った。ただしもう一方のほうは漏水覚悟で流したわけですが、上流からの水量が低下したり、下流での漏水が激しいこともあって、1時間ないし8時間で空になってしまって、消防水利としては結局役にたたなかったということがありまして、これは地震時の消防水利の問題、それと浄水場の構造をどうすべきかという、非常に重要な問題をいま提示していて、各方面で議論がされているところです。

これは先ほど佐藤先生と同じものですが、ネットワークをブロック化するというのは、いざという時にはある程度の地域を遮断してしまって、ほかの地域から隔離する。地震前からそういう考えで、バルブ等の装置をつけておいて初めて有効に働くものです。これは1978年の宮城県沖地震以後発達してきた方法で、今回も53個のミドルブロックの、実際には5つだけを閉じて、これ閉じることも重要なんですが、それ以外のところに供給を続けるということも重要であります。結局被災地をこの5ブロックに局限するというのをすばやくできたということも、これもやはり地震前の対策を実施した成果であると考えております。

これは神戸市の水道がどういう対応をとったかというのを、復興へ向けてのひとつの考え方ですが、これはまたディスカッションの時にでもと思いますので、これで終わらせていただきます。

池淵 それでは最後に三村先生のほうから、山側とか海側、特に低地で非常に問題になっておりました液状化、そしてそれに伴ういろんな地盤変状、それがひいてはライフライン、港湾等に大きな被害をもたらしたということで、そういった岸壁、斜面崩壊。そういったいまままで扱ってこなかった部分をお話していただきたいと思います。

三村 ではさっそくスライドをお願いします。

まず最初に、典型的な地盤災害としてここにあげたようなものが考えられます。いまコーディネーターからもお話がありましたように、第一に地盤の液状化でございます。特徴的なことは、広範な粒度の土で発生したという点であります。新聞等でもご覧になったと思いますが、従来は非常に液状化し難いといわれていたような細粒土から粗粒の砂礫のようなものまで液状化しています。

それから埋立地において大規模な沈下が生じています。緩い砂が液状化しますと、空隙が圧縮し、そのために大きな沈下が起こります。この地盤変状に伴ってライフライン等も当然大きな影響を受けるということが懸念されます。

また内陸部でも液状化が発生しています。沿岸部の埋立地が液状化に関しては危険であるということは共通認識として比較的知られていたと思いますが、内陸部でもかなりの液状化の被害があったことがわかっています。元々池や水田であったところを埋め立てたような箇所や地下水位の高い所はたとえ内陸部であっても液状化の可能性が大きいと考えられます。

第二に護岸、岸壁の崩壊があげられます。神戸、阪神間の岸壁のほぼ9割方は被災してしまったのですが、その被災パターンとしては、前面側、つまり海側、河川側にケーソンや重量構造物が大きく移動する側方移動という現象が主なものです。それから護岸背面は埋め立てられているのが通例ですが、この部分

がケーソンの側方移動によって支えを失って大きく陥没したり沈下したりしています。被害のメカニズムの話をしていただきますと、護岸の下は通常粘土の部分に砂で置き換えておりますが、この置換砂および背面の埋立地盤が実際に液状化したのかしていないのかといった点について、現在のところ意見が分かれておりまして、岸壁の被災に液状化は関係ないという人と、液状化が大きな影響を及ぼしたという人があり、いまま少しの検討が必要ではないかと思えます。

それから第三に斜面の崩壊があります。六甲山系におきましても表層の剝落とか大きな石が落ちてきたという例はありますが、大規模な斜面の崩壊というのは数カ所に限られています。ここで問題となるのは、一見硬そうであるが深層部に弱い層があるような地盤です。またこうした弱い層は、粘土化した土であることが多いので、水を含んでいることが多いのです。問題になる軟弱層は、ただ単に強度が小さいというよりはむしろ平時は比較的安定した構造を保っているものが、地震によってせん断を受けると強度低下を起こすタイプのものです。静的な状態では十分な強度を有している土が、地震で揺すられた時に急激に強度低下を引き起こして流動化し始めますと、後は進行的に破壊が生じて大規模な斜面崩壊に至るわけです。

この写真は細かい土粒子が液状化で噴出したという一例です。場所はポートアイランドの神戸大橋をわたってすぐ東側の道路沿いで、撮影日は1月21日です。したがってこの時点では地震後降雨はありませんので、噴出した状態でそのまま残っていたものと考えられます。非常に細かい成分が噴砂の中心部にたまっているのがおわかりになると思います。

この図は液状化の可能性を土の粒径によって規定した港湾の基準です。粒形加積曲線がこの範囲にはいる土は液状化の危険度が高いと判断されるわけです。西宮浜、芦屋浜、六甲アイランドそしてポートアイランドから採取した土を調べますと、ご覧のように、液状化可能な範囲にはいっており、これらの地点で液状化が発生したという事実と整合致します。ところが先ほどのスライドでお見せ致しましたポートアイランドの噴泥や西宮浜から採取した噴泥試料は、このように従来の基準からはずれた粒度分布を示していることがわかります。ここにはあげておりませんが、逆に粗粒側の土にも液状化した例が見つかっており、従来の液状化の基準をどのように考えるかということが現在我々に投げかけられた深刻な課題であります。

この写真は西宮浜の液状化で、上に高速道路が通っており、その下は駐車場になっています。ここに写っている側溝のような地盤と構造物との境界は、強制的に人間が不連続面を作っているようなもので、こうした部分から液状化した砂が噴出することが多く、この写真はまさに典型的な液状化被害のパターンといえます。

この写真は甲子園浜の西宮港大橋の橋脚を上から見たものです。これを見ますと、橋脚の周囲にひび割れがあります。こちら側はすぐに護岸になっているのですが、これがかなり海側に動いています。側方流動という言葉が今回かなり社会的な認知を受けたように思いますが、地盤は液状化致しますと支えのない方へ流動化しようとしていきます。そうすると当然基礎にも側方流動圧が作用いたしますので、場合によっては基礎が傷んでしまうこともあります。これは芦屋浜の住宅地における液状化の状況を写したものです。ここにひっくり返っているのは車止めです。車止めですから元々は当然このような格好ではなかったわけですが、液状化によって地盤内の砂が噴出してこのような惨状になったわけです。道路の部分もおよそ元道路であったとは思えないような状態になっているのがわかります。

これが六甲アイランドにおける液状化の状況です。

これがポートアイランドにおける液状化の状況です。

この写真はポートアイランド中埠頭脇の駐車場を写したのですが、このような状態になっています。典型的な噴砂痕です。

この写真は淀川河口付近の左岸堤防ですが、ここでも非常に大規模な液状化による堤防の崩壊がありま

した。崩壊のパターンとしましては、地盤が地震力によってせん断を受け、液状化を起こして前面側（河川側）に流動したというものです。背面側にはカウンターメジャー、すなわち支えてくれる地盤があるのですが、前面側にはなにもありませんので、液状化した土は前面側に流動し、背後に大きな陥没ができるわけです。

この写真は西宮北高校のグラウンドです。内陸にある地点なのですが、このように大きなひび割れとともにかなりの量の砂が噴出していることがわかります。つまり内陸部にあるからといって液状化しないと安心はできないということです。先ほども申し上げましたように、旧地形、すなわちかつてそこは何だったのか、また地下水位は高くないかといった情報を知って液状化の危険性について考えておく必要があると思います。

単に砂が噴出しただけの場合、例えば今の例のようなグラウンドであれば、たとえ砂が噴出してもそれを掃除すればまた使用できるのですが、これが上部構造物に悪い影響を与えたりするようなケースでは、供用に大変深刻な問題が生じて参ります。今度は液状化に起因する基礎の沈下の話をしたと思います。この写真は甲子園浜の西宮港大橋の取り付け部です。橋脚の方には深い基礎がありますがアプローチの方にはありません。両方の構造物を比較してみますと、段差が生じていることがわかります。これは地盤が液状化によって圧縮、沈下することにより、地盤に直接設置されている構造物は地盤とともに挙動し、深い基礎が打ってあるような構造物はたとえ液状化が起ころうと沈下しないので、両者の間に段差が生じてしまったわけです。さらにこれがおそらくオリジナルの地盤面なのですが、構造物直近の地盤は周囲の地盤より一段と沈下しているのがわかります。これは地盤と構造物との境界部からどんどん砂が噴出し、周囲の地盤以上に境界部での沈下が卓越したものと考えられます。

この写真はポートアイランドにおけるポートライナーの基礎ですが、一見すると基礎が浮き上がっているように見えます。ところがこれは基礎が浮き上がっているのではなく、周辺地盤が沈下してしまい、見かけ上基礎が抜け上がったように見えているというのが真相です。杭等のいわゆる深い基礎を打っている構造物、高層ビル等が好例ですが、こうした構造物は沈下を起こさずに残っており、無処理の地盤の側が液状化によって沈下しているわけです。

次に液状化対策の話をしていきます。液状化対策に関しては、何もなされていなかったのではなく、数多く実地されています。この図は六甲アイランドの地盤改良域の分布を示しています。斜線をつけた箇所はサンドドレーンによる改良が施されたことを表しています。それからサンドコンパクションパイルによる改良が一部見られます。ロッドコンパクションによる改良域もごくわずかですが存在します。六甲アイランドにおきましてはこのような地盤改良が行われています。そして結論から申し上げますと、こうした地盤改良を行ったところでは、液状化による被害があったとしても極めて軽微であったということです。

この図はポートアイランドの地盤改良実績を示したものです。六甲アイランドと同様、サンドドレーン、振動締め固め工法、そしてプレローディング工法が実地されていることがわかります。プレローディング工法とはあらかじめ地盤に荷重を載荷することによって地盤を強化するという工法です。そして六甲アイランドの場合と同様、こうした地盤改良を実地した箇所は液状化の被害がない、もしくは非常に軽微であったという結果が得られています。

この図は東京大学の石原先生がまとめられたもので、縦軸に埋立地盤の沈下量を取り、横軸に対策工法の種類をとって対策工法の効果を判定したものであります。まずサンドコンパクションパイル工法についてですが、これは施工例がないのではなく沈下がゼロであることを示しています。つまりサイドコンパクションパイルを打設した箇所は全く沈下していないということです。同様にロッドコンパクションによる改良も効果的であることがわかります。次にサンドドレーンプラスプレローディング工法、サンドドレーンのみ、プレローディングのみの順に沈下量が増加し、無処理の場合は40～50 cm の沈下が生じています。ここでサンドドレーンについてですが、これは元来液状化対策工ではありません。人工島の建設や埋立に際しては基礎地盤上に土を盛りますので、かなり大きな荷重が粘土層の上に載荷されます。この粘土

層の圧密を促進するためにサンドドレーンが敷設されます。埋め立てが完了してから陸上打ちでサンドドレーンが打設されますと、打設時の振動によって埋立地盤そのものがかなり締固められた可能性があるようです。このためいわゆる怪我の功名で液状化対策のような効果が得られたのではないかと考えられています。

次に岸壁の被害についてお話ししたいと思います。この写真は六甲アイランドの岸壁で1月21日に撮影したものです。ここに人が立っているのでおわかりになると思いますが、1 m から1 m 50 cm 程度の割れ目が生じています。また岸壁が海側にかかなり激しく動いているのがわかります。それに伴って後背部分が陥没するという被災パターンになっています。

これは同じく六甲アイランドですが、私が比較のために立っています。私の身長が約1 m 80 cm ですからこの地点ではほぼこれくらいの沈下が生じていることがわかります。この部分は岸壁のケーソンで向こう側が海になります。

この写真は前の写真の地点をを長手方向に写したものです。

この写真は六甲アイランド南東角の被害状況です。舗装のないところではこういう惨憺たる状態になっており、ケーソンがずれて海水がどンドン侵入してきています。目視で南側に約2 m、東側に約1.7 m ケーソンが側方移動していることがわかりました。

これはこの隅角部から北側を向いて撮影した写真で、東側岸壁を長手方向に見た状況です。これはコーナーのブロックですが、これだけは隅角部にあつて拘束が強いので動きがやや小さくなっていますが、その他のケーソンはほとんど一線に揃って側方移動していることがわかります。

この写真は燈台とそれにアクセスするためのコンクリート製の防波堤型の構造物を写したものです。コンクリートのアクセス部は当然歩いて燈台に行けるようになっていたのですが、地震によって海中に完全に沈んでしまいました。岸壁と違って防波堤の場合は両側にカウンターメジャーがないので、被災の形態が異なっており、このように沈下してしまった例がいくつかあるようです。

さて続きまして復旧について簡単にお話ししたいと思います。復旧にもいくつかのパターンがあります。今申し上げましたように、破壊の形態はほとんど共通のものとなっています。すなわちケーソンが前面に動いて背面埋立地が支えを失って陥没するという形です。岸壁前面に余裕の水域がある場合、栈橋を前面に新規に建設し、鋼管杭や鋼管矢板を打ってこれを支持し、栈橋式の岸壁にしてしまうという方法がとられています。次に別のパターンを紹介します。この図には2つのことが同時に含まれています。まず傾いたケーソンを、前面に水域の余裕がない場合には、そのまま使うことになります。この時傾いたケーソン上に新たにパラペットを作製し、元のケーソンを傾いたまま安定させて使うという方法です。その場合さらに、付加措置といたしまして、背面の埋立部をセメント改良して固化させるという方法を採用することもあります。こうすることによって、液状化の発生を難しくし、かつ土圧も軽減させるという効果を狙っているわけです。ところが、この時セメント改良によって地盤を固くしてしまうと、慣性力が大きくなるので、本当に地震に対して効果的なのかという疑問がわいてきます。この点については、さらに研究が必要になると思います。

次にこれは特異な例ですが、N値50以上という洪積砂層上にケーソンを直置きした岸壁の被災事例を紹介します。ここでは岸壁のケーソンが14.6 m 前面に移動しています。これが旧護岸法線で、こちらが新護岸法線です。下が硬い地盤なので先程の例のように捨石マウンドはありません。したがってケーソンが捨石マウンドにめりこむという現象もないわけです。そのまま滑動するように前面に動いてしまったと考えられます。復旧の方法は、前面を鋼管杭と鋼管矢板で支持した栈橋を建設して新岸壁とする方法をとっています。液状化していない洪積層で捨石マウンドがないといういわゆる良質地盤で大きな変位が生じているという事実は、基礎を硬くすればいいとは必ずしもいえない可能性を示唆しています。捨石マウンドへのケーソンのめりこみ現象、埋立土層の液状化、置換砂の液状化等が岸壁の移動量にどれだけ影響するのかといった点についてはきちんとした定量化がなされていないのが現状であり、このあたりのメカニズ

ムの解明が我々に課せられた重大な課題であると考えております。

この写真は仁川で発生した斜面崩壊の事例です。ここに元々土構造物があったのですが、全く原型をとどめないほどに壊れてしまっています。フェンスの名残が若干見られる程度です。この断面を例にとって簡単な安定計算をしてみました。地震力を静的荷重に置き換えて力の釣り合い問題として解いてみたものです。計算結果を見ていただきますと、内部摩擦角 ϕ' が 30° であっても、せん断を受けて強度が低下しますと平均安全率が1をきってしまいます。例えば、これは実際にも起こりうることなのですが、斜面内部にある層の土の内部摩擦角が 30° であったものがせん断によって 20° になってしまうと、この斜面は簡単に崩壊してしまうことがわかります。ところが斜面の問題の難しさは事前にそのような地下の詳細な情報が容易に得られないということにあります。崩壊すれば、その地点を調査して崩壊のメカニズムに関係した要因分析を行うことができるのですが、それでは防災という観点からはあまり意味のないことになってしまいます。平時には健全な斜面と何ら変わらない様相を呈しているだけに、事前予測は極めて難しいと言わざるをえません。