

## パネルディスカッション

### 「巨大地震時に要求される災害拠点建物の耐震性能と実地震での応答モニタリングの利活用について」

- パネリスト 壁谷澤寿一（首都大学東京 准教授）
- 脇山 善夫（国土技術政策総合研究所 建築研究部 材料・部材基準研究室 室長）
- 深井 悟（株式会社日建設計 エンジニアリング部門 技術センター 技師長）
- 西谷 章（サブプロ (c) 統括／早稲田大学 教授）
- 梶原 浩一（サブプロ (c) 統括／国立研究開発法人 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター長）
- 向井 智久（サブプロ (c) 課題 2 分担研究者／国立研究開発法人 建築研究所 構造研究グループ 主任研究員）
- 日比野 陽（サブプロ (c) 課題 2 分担研究者／広島大学大学院 工学研究科 准教授）
- モデレーター 楠 浩一（サブプロ (c) 課題 2 分担責任者／東京大学地震研究所 教授）

（楠） これよりパネルディスカッションを行います。テーマは「巨大地震時に要求される災害拠点建物の耐震性能と実地震での応答モニタリングの利活用について」です。前半の 4 名の講師の皆さま、情報提供をありがとうございました。話を伺っていると、建築物は全く壊さないというのは大変で、かといって完全に壊すというのも今日の設計法ではあり得ないということですが、災害拠点に関しては、継続使用性を考えると、ほとんど壊すわけにはいかないということだと思います。深井さんの話にもあったように、今回の試験体は、より簡便といいますか、より合理的な新しいディテールを採用して、継続使用性が本当に達成できているかを揺すって調べようということです。そのときには、構造体だけではなく、非構造も含めて継続使用性を評価しなければならないと思いますが、われわれが今度実験しようとしている試験体の非構造部材に関しては、今どのような計画がされているのか、補足的に深井さんからご紹介いただけますか。

（深井） 今回の非構造部材に関しては、まずサッシを 2 階と 3 階に設置します。それも引き違いの窓と、はめごろしの窓の 2 種類を同スパンに設置します。さら

に、はめごろしの窓は大きなものと縦に 2 分割した縦長のものの 2 種類を考えています。引き違いの窓は今回の変形では恐らく損傷は出ず、はめごろしの窓は、大きなはめごろしについては恐らくガラスの角が当たって、ひび割れ等が生じるだろうと思います。縦長で 2 分割にしたはめごろしの窓については、それよりは変形能があるだろうと思っています。そういうことを確かめるためのサッシを入れようと考えています。

それから、タイルを 1 スパン貼ろうと考えています。モルタルで貼るものと弾性接着剤で貼るものの 2 種類に分けて、その性状を確かめようと考えています。加えて、2 階と 3 階に天井を付けます。きちんと耐震設計された天井と、地震時に揺れてしまうような、ブレースが入っていない天井の 2 種類で、性状の違いが分かるような試験体にしようと考えています。

(楠) ありがとうございます。きちんと配慮して設計した場合の継続使用性と、一般的な設計の継続使用性が、それぞれどのくらいあるのかを確認するということだと思います。

今日は講演内容は耐震設計に特化していたので、どちらかという地震が起こる前の対策という部分が大きかったと思いますが、実際の被害は地震が起きて発生します。われわれ耐震工学の人間からすると、思ったとおりの力を建物に与える地震というのはなかなか発生しませんが、実際の被害を考えたときに、災害拠点建物に対してどのようなことを考えるべきか、広島大学の日比野先生からコメントを頂ければと思います。

(日比野) われわれはサブプロ (c) のプロジェクトの中で、非構造も含めて損傷を評価するための方法を研究していますが、災害後の迅速な継続使用性の評価や安全性確保のためには、誰が損傷を評価し、どのようにそれを運営していくのかということが大きな課題になると思います。前半の講演で皆さまに提示していただいたように、評価する方法は技術的におおむね確立されてきているのだろうと思いますが、一体それを誰がどのように運営していくかは、まだ具体的になっていないのが現状です。今回の E-ディフェンスの実験では、そのあたりのモニタリングを、損傷をどのように評価していくかという試行実験も兼ねて行い、将来の実用化につなげようと考えています。

構造体に関しては、加速度計を使うことで建物の変形や力を測ることができるので、オートマチックに判定できると考えています。しかし、非構造部材については、さまざまな形・機能を有した部材が存在しているので、それぞれの損傷をどのよう

に判断し、それが建物の機能や使用継続性に与える影響をどのように評価したらいいかということが非常にネックになると考えています。今のところ考えているのは、例えば天井が落ちたとか、ずれたということ、画像を見て評価できないかということです。単純に天井がこれぐらい落ちたとか、被災してこのような損傷を受けているということの評価するだけでは、建物の継続使用性の判定に直接結び付かないと思うので、非構造がそこにいる人たちにどのような被害を及ぼしそうかということも含めて判定できるシステムの研究を、私の個人的なプロジェクトの中で進めています。最終的には、構造部材の損傷と非構造部材の損傷をミックスした形で建物の継続使用性や安全性を評価できることが理想であり、それを自動的に判定できるモニタリングシステムが大事ではないかと考えています。

(楠) ありがとうございます。今の件で何か意見のある方はいらっしゃいますか。

(壁谷澤) 最近の鉄筋コンクリートの建物は、例えば二次壁の薄いところにひび割れが入り、その建物が使えるかどうか問題になったりするわけです。構造上はあまり問題ないような損傷が出てくると、造っている側としては、それを隠したいというか、あまり見せたくないということで、それを表に出さないような設計になっていってしまうのではないかと予想しています。そうすると、ユーザーに対し、地震後もその建物が使用継続できるかどうかをきちんと答えるためには、やはり非構造部材についても構造材についても積極的にモニタリングを行い、情報開示していくことが一番大事なのではないかと、日比野先生のコメントを伺って思いました。

(楠) ありがとうございます。この部屋にしても外から構造体が見えないので、今、大きな地震が起こって「被害程度を言え」と言われても、ここにいる耐震工学の専門家たちは「われわれも分からない」ということになってしまいます。そういう意味では、壁谷澤先生がおっしゃったように、モニタリングが今後ますます重要になってくると思います。別の観点からすると、構造と非構造の垣根がだんだんなくなってきており、これまでのような構造体だけの実験では立ち行かなくなってきたという現状もあると思います。

このような大型実験はそうたくさんできるわけではないので、それぞれからできるだけ多くのことを学ばなければいけません。そのような実験や試験体という観点で、梶原センター長からコメントを頂ければと思います。

(梶原) 私どもの E-ディフェンスでは、これまで 14 年間さまざまな実験を行ってきており、今回の災害拠点の実験で恐らく 100 課題を超えるのではないかと考えています。今までのほとんどの実験研究が、地震動に対する構造躯体の耐震性能を調べるというものだったのに対し、今回の実験は、明確な設計ビジョンに加えて、実際に災害拠点としてこの建物が使えるかどうかを非構造を含めて実験するというので、規模は若干小さくなりますが、これだけの思想を持って行う実験研究は初めてではないかと考えています。E-ディフェンスは 900 チャンネルの計測システムを持っており、ローカルな計測を含めると、今回は恐らくそれ以上の計測が行われることとなります。非常に有用なデータが獲得できて、それが今後、実社会や皆さまの取り組みに活用されることで、さらに研究が進むのではないかと考えています。

(楠) ありがとうございます。われわれも、そのようなことが達成できるようにしっかりと準備していきたいと思います。

災害拠点ということで、比較的早期に継続使用性を判断することが求められます。全く被害がない建物はすぐに使えるでしょうが、そうでない建物は、実際の現場では一体どれぐらいの期間閉鎖されてしまうものなのでしょうか。被害調査などをされている向井さんに伺いたいと思います。

(向井) 熊本の事例で申し上げますと、前震の後に本震があって、それで軒並み使えない状態になったと思います。その状態から、その建物の損傷度を人が建屋の中に入って判断しなければいけないわけですが、そのときに、必ずしも構造技術者が入っていける庁舎ばかりではありません。比較的規模の小さい庁舎等だと、建物の管理者に構造技術がない場合もあり得ます。そうすると、その調査に数週間かかってしまうこともあります。ただ、中を見れば、この部屋はこれぐらい使えるということは分かるので、恐らく内部の関係者としては、この辺はこうやって使っていこうということを、状況を見ながら判断しているというのが実態ではないかと思えます。ただ、外向きには、応急危険度判定を行って本当にこの建物が使えるかどうかを 1 週間ぐらいではっきりさせたいという要望が強くありますし、その後、建物を恒久復旧して、補修・補強して再度使っていこうとなると、3 カ月ぐらいの間にはその計画を立てたいというのが一般的にいわれていることです。

(楠) ありがとうございます。やはり時間がかかり過ぎているということで、モニタリングで何とかそれを短くしていく必要があります。機械を使えば、1 日

といわず、数分から数十分でできると思いますし、一次データとしてもそれは有効ではないかと思います。

さて、ずっと災害拠点建物の設計と地震時の挙動に特化して話をしてきましたが、ここで少し、デ活の活動についても考えてみたいと思います。サブプロ(c)では建物対象なので、建物にセンサーを置き、いろいろなものを測っていきこうという動きがあるわけですが、建物の観測・計測を推し進めていくと、デ活の活動との関連で考えたときに、将来どのようなメリットがありそうか、何か意見があれば伺いたいと思います。

(向井) 熊本の事例のとき、県の担当者は、全体の被害概要を早く把握したいと考えていらっしゃいました。とにかく応急危険度判定をすぐにやるのだということで、4月15日からすぐに動かれていましたが、最終的に全部出そろったのが6月に入ってからだだったと思います。先ほど申し上げた、発災後1週間で知りたいという情報を知るのに2ヶ月かかったことになります。ですから、そのような情報が一瞬でなくても3日ぐらいで担当者の元に届くと、復興に向けた次の判断や議論に移ることができて、かなり有用なものになるのではないかと思います。

(西谷) 首都圏に限っていうと、大きな地震が起きたときに、恐らく区によって被害の状況がかなり変わってくると思います。いろいろなデータが収集できて、可能なら1時間ぐらい、それは無理でも2~3時間で、この区はあまり壊れていない、この区はかなりやられてしまったなどということが分かると、ひどい被害を受けた区を大丈夫な区が助けるようなシステムがつかれるのではないかと思います。東京で大きな地震が起こると、さまざまな大変な状況が発生してしまうので、大丈夫なところが少しでも助ける方に回る仕組みをつくる必要があるのではないかと思います。

(楠) 建物のモニタリングは、それにより被害を判定すれば住んでいる方やオーナーにメリットがあるということもありますが、その情報をどこかに集約すれば、地震直後の復興や事前の対策に非常に有効ではないかと、西谷先生のコメントを伺って感じました。

他にいかがでしょうか。

(壁谷澤) モニタリングによってデータを収集することは、被害を把握する上で基本になると思います。問題は、高機能な設計がされた建物についてはかなりデー

タが集まる可能性があります。一般的な建物にはモニタリング機器が普及しづらく、データの偏りが生じてしまうことです。ただ、一般的な建物であっても、少なくともモニタリングの技術は、それが建築基準法や、それ以外の基準と照らし合わせて、どれぐらいきちんと設計・施行されたものかを証明することにはなるので、そういう意味でも、モニタリング機器を設置すると、設計者側にも施工者側にも非常にメリットがあるのではないかと思います。もちろん、ユーザーにも、そのまま使えるかどうかを判断できるという意味では非常にメリットがあると思います。

(楠) 確かに、モニタリングには、いろいろなメリットといろいろな目的があり得るのだと思います。併せて申し上げますと、確かデ活の第1回のシンポジウムで、平田先生が、高密度観測がさらに推進できればという話をされていたと思います。建物にセンサーを置くメリットを皆さんに理解していただければ、それはすなわち地表面の観測点も増えるということですから、相乗的な効果があるのではないかと思います。そのようなことを考えたときに、今まではセンサーというと加速度計のイメージが強かったですが、他に使いそうな、デ活で共有すべきような建物の計測データとして、何かアイデアがあれば伺いたいと思います。

(壁谷澤) 私の発表でも少し紹介しましたが、変形をそのまま測るということはやってみました。加速度の方が実際の建物にかかる力も計測できるので、より高度ではありますが、一方で残留変形をどこまできちんと推定できるかということがあるので、加速度と並行して、変形についても測った方がいいのではないかと思います。

(西谷) 私も層間変形ということをお願いしたかったのです。今、実装されているモニタリングシステムで、加速度計が付いていて、そのデータを積分して層間変形のデータに直し、それを基に安全性を判定するシステムが既に出来上がっています。しかし、加速度計のデータを積分するときに、残留変形が出ると、きちんと計算できないのです。そういう意味で、直接的に層間変形を測るセンサーがあると非常に便利です。手前みそですが、実は私は非接触型の層間変位を直接測るセンサーを開発していて、それが一部の建物に付いています。それは残留変形も測ることができます。残留変形は結構重要な指標になり得ると思っています。層間変形がもう一ついいのは、構造部材の損傷にはもちろんすごくよく結び付いているのですが、非構造部材の壊れ方にも何かしらのサゼッションを与えてくれるデータになり得るということです。ですから、層間変形をきちんと測ることは非常に重要ではないかと考えています。

(楠) 脇山さんの発表の中でもあったように、加速度に依存するものと変位に依存するものがあるので、変形を直接測るというのは確かに重要だと思います。別の見方をすると、建物のモニタリングも、目的に特化してセンサーの開発が既に始まっているというイメージだと思います。

(向井) 壁谷澤先生がおっしゃった、残留変位を測れないかということで、今、私たちが行っているプロジェクトが幾つかあります。一つは今日紹介したレーザースキャナーです。あれはまだ非常に高額なものですが、点の精度が $\pm 3\text{mm}$  ぐらいという実験結果が出ています。3mm ぐらいのずれであれば、それで測る残留変形は使えるものになるのではないかという見立てがあります。

もう一つは、衛星から降ってくる測位情報です。近年、国内でも準天頂衛星が上がっていますが、その情報を使ってどのようなことができるかということで、幾つかの建物でトライアルで実証を始めたところです。楠先生と別途で調査している軍艦島の建物にも装置を付けています。年々朽ち果てて倒壊していくような建屋はなかなか世の中にはないので、フィールドワークとしてそのような所の情報を取りながら、建物の変位がどの程度進んでいくかを見ている状況です。

(日比野) いろいろな変位を測った方がいいという意見もあると思いますが、実用化を考えると、そこは難しい気もしています。最初に少し話しましたが、最近は防犯カメラが多く建物の中に取り付けられているので、そのカメラ映像をもう少し有効活用した方がいいのではないかと考えています。常に定点観測しているようなものなので、被災後にどのように変わったかをその映像から分析するシステムができれば、実用化はかなり早いはずです。防犯カメラは、個人の持ち物である場合もありますが、ネットワークでつながっているものもたくさんあるので、それを活用して、画像判定で被害が分かればと思っています。

(楠) 確かに、建物全体の超超長周期のような、ゆっくり動いていく変形には GPS が非常に長けていると思いますし、日比野先生がおっしゃったように、天井やライトなどをセンサーで 1 個ずつ測りたいときには、カメラで面で押さえる方法が十分考えられると思います。いずれにしても、建物のモニタリングというのは、加速度に限らずさまざまなデータを取り得るということです。そうなると、デ活の活動としても、加速度というフォーマットだけではなく、さまざまなデータを共有できる可能性があると考えられます。

最後に、産官学民でデータを収集し、それを統合してみんなで有効に活用しているというときに、建物側から考えられる課題や解決すべきことが今の時点であれば、ご意見を頂ければと思います。

(壁谷澤) 最近、被害調査を実施していると思うのは、昔に比べて調査結果を開示できなかったり、モニタリングをして情報を収集しても、民間のデータなので、それを設計基準などに反映しづらくなっているということです。そこは官民一体となって、目的を提示できるようにガイドラインを作成したり、手法をある程度統一して一般化することで、モニタリングをすれば社会全体が良くなるということに対する皆さんの共通の理解が生まれるのではないかと考えています。

(楠) 地表面だけではなく建物のデータも活用できるようになると、耐震工学の進歩には非常に大きな貢献になると思います。ただ、その反面、個人所有物の応答ですから、オープンとまではいいませんが、どのような形でそれを産官学で利用していくかという枠組みは早急に整理しなければ、なかなか活用の道が開かれないかもしれないということは、建物側からすると危惧するべき点かもしれません。

(壁谷澤) モニタリングのプロジェクトが有意義だと思うのは、非構造部材にきちんとした目標性能が取り入れることができることが一番大きいのではないかと考えています。従来の非構造部材の設計は、工法を比べたときにどちらの性能が高いかと定性的に考える選択方法も多かったですが、地震時の外力や変形の状態に関するデータが増えるので、非構造部材が壊れないように設計するというアプローチが容易になります。また、新しい被害形態について検証をすることも重要ですし、それが新たな非構造部材の損傷の対策につながっていくのではないかと考えています。

(楠) 脇山さんの発表の中でも、構造体と非構造の相互作用で被害が出たり、出なかったりという話がありましたが、今後、両方のモニタリングが並行して進んでいけば、何か解決の糸口がつかめるかもしれません。脇山さん、その点に関して何かコメントはありますか。



(脇山) 非構造部材の耐震に関しては、先ほどの技術基準の中で決まっていることでもありますし、民間の方で技術開発が進んでいる部分もあるのではないかと思います。その中で、今回のプロジェクト等で行うモニタリングのクライテリアが決められることとなります。それは場合によっては過去の知見に基づくものかもしれませんが、今回の実験に基づくものかもしれません。一方で、そこで決めたクライテリアについて、今後どのような蓄積をしていけるかは、実際の建物がどのようなようになったかをきちんと確認していくことにかかっていると思います。被害があった建築物、被害がなかった建築物についてモニタリングを通して確認しながら、今後、蓄積していくことが非常に重要だと思っています。

(楠) ありがとうございました。フロアからも幾つか質問を頂こうと考えていましたが、パネラーの皆さまに活発にご発言いただき、残念ながら時間となってしまいました。本日話された課題については、来年度、内外装を施した実物の鉄筋コンクリート構造の試験体を E-ディフェンスの上に建てて、本物の建物で非構造も含めてどのような被害が生じるかという実験を、観察とモニタリングの両方の側面から実施する予定です。詳細は未定ですが、恐らく冬の寒いころになると思います。また改めてご案内しますので、その折にはぜひご参加いただければと思います。本日はどうもありがとうございました。

(司会：古屋) モデレーターの楠様、パネリストの皆さま、ありがとうございました。会場の皆さま、改めてもう一度拍手をお願いします。

約束の時間が近付いてきましたが、ここで一つ、デ活会員の皆さまに向けた告知があります。西谷先生、お願いします。

(西谷) 私の発表でも申し上げましたが、木造 3 階建ての実験を 2 月上旬に行う予定です。詳細が決定し次第、E-ディフェンスからのプレスリリースを予定しています。その後、速やかに見学者応募が始まります。サブプロ (c) としては、デ活会員の皆さまには優先的にその実験を見学していただく、立ち見席ですが、席を確保するつもりです。時期が来たら事務局からもデ活会員の皆さまに連絡を差し上げるとしますので、ぜひ見学にお越しください。よろしくようお願い申し上げます。