



E-Defense Today

(Published by E-Defense, NIED, April 22 2021, Vol.17 No.1)

「第4期中長期計画」の6年目を迎えて

防災科学技術研究所（以下、防災科研）の第4期中長期計画は6年目を迎えました。地震減災実験研究部門では、昨年3月31日までにEーディフェンスの作動油の交換を含む老朽化対策工事が完了し、各方面の関係者のご協力とご尽力により、新型コロナウイルス感染症の感染拡大予防に努めることで、利用計画通り無事故で運用と予定した実験研究を進めてきました。厚生労働省が設けた無災害記録に記録証を交付する制度に基づく無事故無災害時間 230 万時間（R3.1 末時点）を達成し更新しています。今後の施設運用とこのような実験施設の運用への貢献を見据え、これまでの施設運用で得られた知見等を取りまとめた運用マニュアルについて現在作成中です。

Eーディフェンスでは、令和2年度に7課題の実験を実施し、これまでの実験数が113件となり72件のデータの公開に至りました。

令和2年度の共同実験では、国土交通省の令和2年度基準整備促進事業「S30 鉄筋コンクリート造の限界耐力計算における応答変位の算定精度向上に向けた建築物の振動減衰性状の評価方法の検討」の一環として行われた5層RC建物の耐震実験、文部科学省の補助事業である「首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト」のサブCの課題である、災害時重要施設の高機能設備性能評価と機能損失判定にて、3層の免震建物と4層の耐震建物を渡り廊下で連結した病院施設の耐震実験を実施し、国の施策や防災科学技術の向上に貢献しています。また、中長期計画に掲げた次世代免震技術の研究として、これまでの空気浮上に引き続き、高圧水により微小浮上させ地震入力を低減する、60トンの試験体を対象にした免震実験を実施して成功しました。

昨年度も述べましたが、これらの研究推進では、Eーディフェンスの「実大」、「三次元」、「破壊」のユニークさを活かした構造物の評価実験とデータ取得がベースになります。これらのデータを援用して、大規模地震での長大構造物の損傷と被害の様相から対策技術の効果までを評価できるシミュレーションシステム（数値震動台）こそ、Eーディフェンスの装置限界を凌駕する目標です。更に、個々から空間的な広がりを持ったシミュレーションシステムを用いた展開も必要になると考えています。令和3年度のシミュレーション技術を活用した耐震性評価に関する研究では、これまでの数値震動台の開発成果をベースに、大学、研究機関、民間企業とソフト開発を進めると共に、実際の都市を仮想空間で再現してセンシングシステムで繋ぐ、都市CPS（Cyber Physical System）について大学、有識者らと共に研究を進めています。

この方向性を持って、令和3年度のEーディフェンス等研究基盤を活用した地震減災研究における「地震対応力向上のためのダメージ評価手法の研究開発」では、令和4年度以降に予定しているオフィス建物を用いた実験に向けて、試験体製作に着手します。既存建物を含むインフラ構造物の地震によるダメージ評価や災害時の継続利用の判定を可能にするため、構造物の特性を情報化するシステムの開発を産官学の体制で実施します。つくばの大型耐震実験施設でも9課題の実験を予定しており、社会の地震防災減災への貢献を目指します。

国際連携では、昨年12月に、協力覚書を締結している米国 Natural Hazards Engineering Research Infrastructure (NHERI)と、第4回目となる日米国際会議をオンラインで開催しました。コロナ禍の影響で米国側関係者が来日することができない中、動画配信システムを介して実験の様子をライブ配信し、所の国際課の協力も得て効果的に会合を実施できました。さらに、同月に、Eーディフェンスで実施した10層鉄筋コンクリート建物実験を踏まえた国際ワークショップをオンラインで開催し、北米・欧州・大洋州・中東・アジアの鉄筋コンクリート構造の第一線の研究者が研究成果を発表し、実験に係る今後の協力、資金拠出等を踏まえた共同実験について議論を行いました。引き続き、実現に向けた国際連携を進める予定です。

未来を築く地震対応研究の推進と技術の先導を見据えると、

1. 点から面への展開（個々の構造物とライフライン・地盤を結び付けたエリアへ）
2. 質の高い空間構築（構造・居室・ライフラインの機能維持）
3. センシングとアラート（予防と対応に向けた評価と表示）

これらを踏まえた具体的な到達課題を進めて、将来の南海トラフ地震、首都直下地震に備え、予防により僅かでも被害を軽減するべきと考えています。街区免震や広範囲の画像も含めた高度センシング・表示システム等もあるのではないのでしょうか。

これらの推進では人と人の繋がり大切さと有難さを痛感しています。省庁、機関、企業の多くの防災関係者の方々、研究者と有識者の方々、当方のスタッフの方々の支援に御礼申し上げますと共に、引き続きのご高配とご尽力を何卒お願い申し上げます。

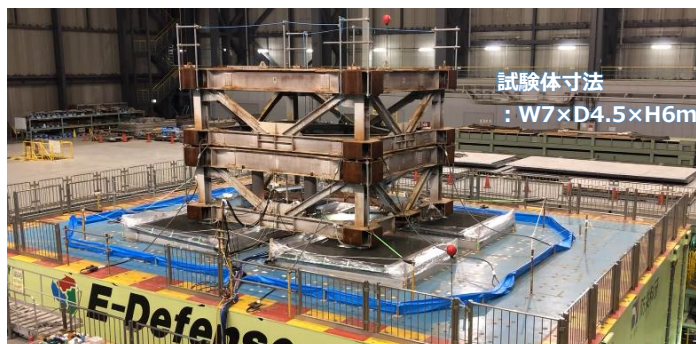
（文責 地震減災実験研究部門長 梶原 浩一）

浮揚式 3 次元免震装置の加振実験 ～神様はなかなか微笑んでくれないが、最後は…～

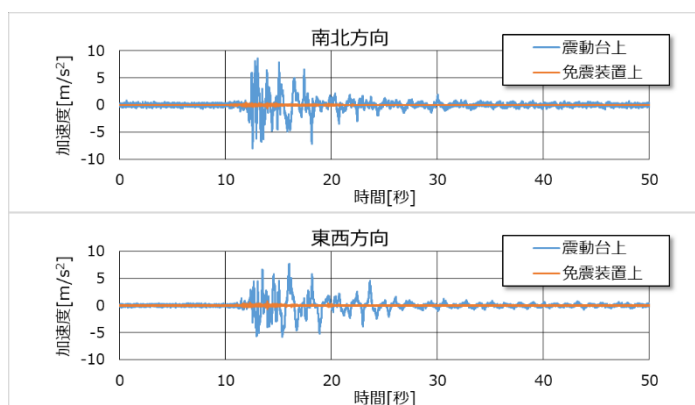
先日、純国産哨戒機 P-3 の開発に関する番組を見ました。最初は戦闘機では無いんだなあ…と鼻白んだものの、最後はその壮絶な開発秘話に胸は高鳴り涙しました。私は某メーカーから出向者で 50 代。好奇心旺盛、熱しやすく飽きやすい性格だがいつも気持ちは 20 代です。出向の最終年度に掲題実験の主担当をさせていただきました。前述の P-3 開発には遠く及ばないかも知れませんが、彼らの言う「神様はなかなか微笑んでくれないが、やりつくした後、最後は…」という境地に近づくものはあったと感じています。しばしお付き合いいただければ幸いです。

まずは実験結果です。2021 年 2 月、開発中の浮揚式 3 次元免震装置について、60 トン（小型の 2 階建てビル程度）の試験体を用いた E-ディフェンス加振実験を行いました（写真 1）。図 1 に兵庫県南部地震（阪神淡路大震災）で記録された波形（JR 鷹取波）で加振したときの加速度の時刻歴を示します。本波形を含め、その他多くの実地震動の入力において、免震装置上の加速度を入力加速度の 1/10 以下（水平方向）にする良好な結果を得ました。この規模の実験は世界でも稀で、免震装置としてはトップクラスの性能です。本研究の最終目標は、200m 角程度の街区に適用し、インフラを停止させない地震フリー空間を提供することです。今回このための基礎データを取得することができました。

この数行の結果を得るために 1 年をかけてきました。本研究は、部門内では梶原部門長、佐藤研究員らと共同で実施してきましたが、4 月になると、外部より転入された福井研究員が加わりました。緊張感も初々しい 30 代の若手研究者です。増員で計画がぐんぐん進むと思ったものの、テレワークの推奨でなかなかまなりません。そんな中、出勤できる日程で浮揚パッドなどの要素実験を開始しています（写真 2）。



【写真 1 震動台上の試験体（60 トン）】



【図 1 水平方向の加速度時刻歴】



【写真 2 浮揚パッドの要素実験】

新型コロナが収まりを見せた7月、浮揚免震の滑走面となるベース（4セット）の製作が始まりました。浮揚免震は、床に高圧水を噴射することで約 $50\mu\text{m}$ （髪の毛程の高さ）の高さで浮揚し、地面の横揺れを遮断します。今回の滑走面は $3\times 3\text{m}$ 。コンクリート製で、大容量化を予定している次の実験にも使える高強度仕様です（写真3）。



【写真3 ベース製作の様子】

9月、各種要素実験の結果を受け設計仕様を確定。浮揚のためのポンプは、産業用高圧ピストンポンプと比較して、はるかに低価格の市販高圧洗浄機を改造して適用する工夫をしています。必要流量の関係で8台の同時使用（写真4）になりますが、1台が故障しても全機能を失わないというメリットがあります。

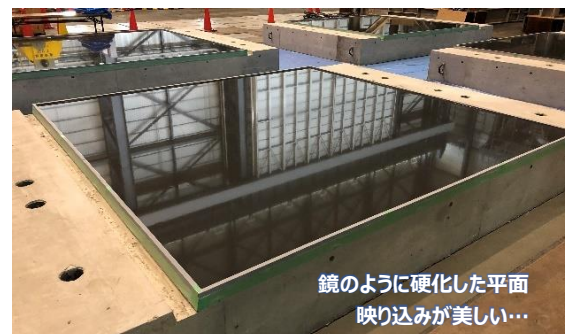


【写真4 60トンを浮揚させる高圧洗浄機】

12月、コンクリートベースの表面に、エポキシ樹脂をコーティングしました（写真5）。エポキシはサラサラの液体の状態から時間をかけて硬化させると、水面のように凹凸の無い滑走面になります（写真6）。これにより、 $50\mu\text{m}$ の浮揚高さでも引っ掛からない理想的なベースを作ることができます。

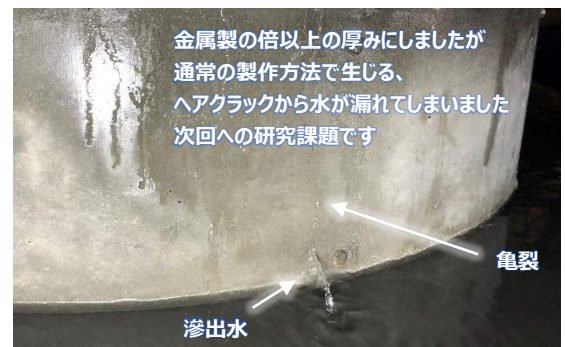


【写真5 エポキシ樹脂コーティング作業】



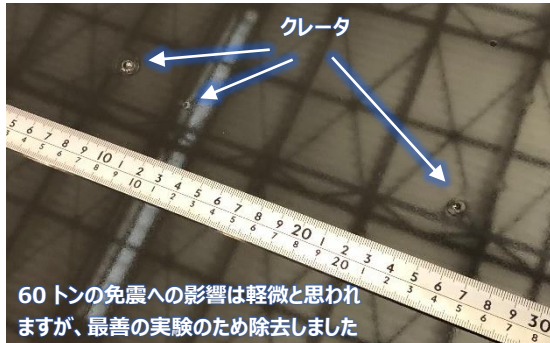
【写真6 硬化したエポキシ樹脂】

年が明けて1月。加振実験時と同じセットを準備棟に作り、試運転を開始しました。ここから様々な問題が発生します。床に高圧水を噴射する浮揚パッドは、今後の大型化も踏まえて大幅コストダウンの可能性があるコンクリート製にトライしました（これまでの実験は金属製を採用）。しかしながら、試運転中、小さな亀裂から水漏れが発生（写真7）。補修を検討しましたが、加振実験中に再発して機能不全になる危険性を考慮し、前回10トンの加振実験に適用した金属製に戻すことにしました。もちろん担当者として重く受け止めています。



【写真7 浮揚パッドの亀裂から滲出する水】

気を取り直し、前回の金属製浮揚パッドを今回用に改造。これに交換して試運転を再開しました。各種調整により浮揚するようになりますが、特定の場所でスムーズに滑走できません。ベース表面を調べると、ごく一部、クレータのような個所がありました（写真8）。おそらくエポキシコーティング時の気温が低く、粘度が増し、気泡が抜けきらなかった所です。これを紙やすりと砥石で除去。本来、研磨不要の工法ですが、この個所だけを特異な状況にしないために全面を研磨しました（写真9）。

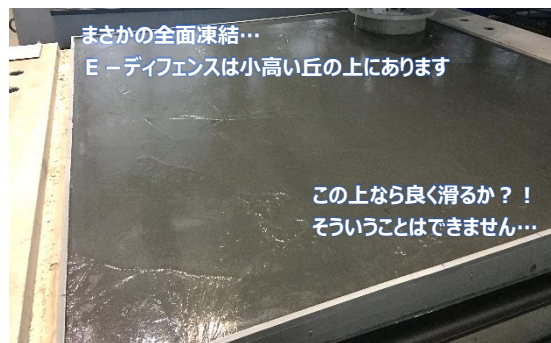


【写真8 ベース表面（エポキシ）の拡大図】



【写真9 ベース表面の研磨の状況】

ここまでやれば大丈夫…と思いましたが、浮揚状態は若干改善した程度。複合要因です。水の流量、圧力、配管、荷重バランスなど根気強く調整を続けました。今日こそ完璧な浮揚を！…と思い、出勤すると、寒波の影響で、屋内にもかかわらずベースの水は凍り付いてスケートリンクに（写真10）。高圧配管から水が出ず、午後になるまで作業がストップしてしまいました。

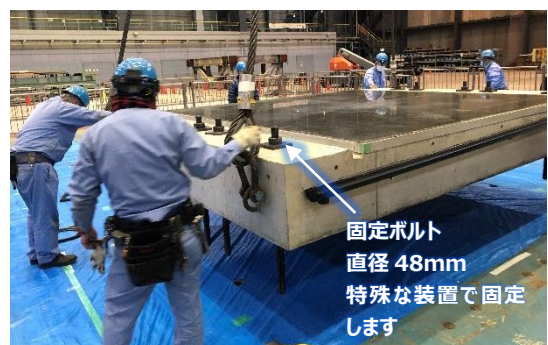


【写真10 スケートリンクになったベース】

2月、ついに加振実験が始まります。900 トンキャリアという巨大な台車を使って構内を搬送し、震動台に取り付けます（写真11）。実験上の課題ですが、1枚15 トンのベースを滑走面が水平になるように据え付ける作業は困難を極めました。ベースをクレーンで持ち上げて薄い金属板を敷き、一度下して震動台に直径 48mm の巨大なボルトで固定。高さを測量器で測定して低いところを探すという作業を繰り返します（写真12）。



【写真11 900 トンキャリアによる試験体運搬】



【写真12 ベースの震動台上設定作業】

初回の実験は、設計仕様の半分の荷重（30 トン）です（写真 13）。心配をよそに、性能は遺憾なく発揮されました。しかしながら激しい加振で滑走面の水が震動台上に溢れ、予定した数加振を繰り返して実験を終了。その後、水回収による復旧と、対策に多くの時間を要することとなりました。

第二回の実験は、設計仕様の荷重（60 トン）です。30 トンを 2 段重ねにしてさあ試運転！…ところが全く浮揚しません。まるで 30 トンと 60 トンの間に見えない壁があるようでした。共同研究者と深夜まで議論しながら、浮揚高さを細かくチェックし、ベース、浮揚パッド（写真 14）、球面座金、ゴムなど、構成部品の改善に全力を尽くしました。しかしながら、水漏れ対策にも時間を要し、不安を残したまま加振実験日を迎えることに。機械というのは素直なもので、実験結果は調整不足という厳しい現実を我々に突きつけるものでした（写真 15）。ここまで大規模な実験をやっていたきながら、あまりにも不甲斐ない…。共同研究者との会話もままならず唇を噛みしめていました。余談ですが、この時、歯の詰め物が外れたほどです。



【写真 13 震動台上の試験体（30 トン）】



【写真 14 水を噴出する浮揚パッド（正常時）】



【写真 15 実験終了後の浮揚パッド連結部】



【写真 16 試験体調整の状況】

後悔と反省を何度か往復すると、最終回への期待とプレッシャーが同時に高まってきました。このまま下を向いては献身的にサポート下さる共同研究者にも申し訳が立ちません。加振実験日を可能な限り後ろ倒しして時間を確保。調整作業を一から見直して原因を追究していきました（写真 16）。4 脚均等荷重が肝ということが分かり、水压を確認しながら浮揚パッドと試験体の間にゴム板を入れていきます。原点で浮揚したとしても、可動範囲の全面で、ひっかかりなく滑走させるのは至難の業でした。こうして加振前日、装置はなんとかベストの状態に。連日深夜まで調整していましたが、この日は早めに帰宅・就寝。ところが明日が心配でなかなか寝付けませんでした。ここで申し上げておきますが、私は決して神経質な性格でなく、大雑把で楽天的といわれる O 型です。

加振最終日。浅い眠りを経て結局我慢できずに早朝出勤。ひとり祈る気持ちで装置を起動すると全く浮揚しません。「おお神よ！…」なんという試練でしょう。十数時間前にご機嫌だった装置は、冷たい鉄の塊に変貌したかのようでした。しかしながら、残り数時間、やれることをやるだけです。脚部の高さ調整に使用しているゴムの安定性には懸念がありましたので、まずここを微調整。さらに、最終手段と考えていたポンプ増強を決断。増強といっても定格圧力が現行型より低いポンプでしたので、確実に送液でき、逆流が発生しないと思われる合流点に配管。さらに過負荷でモータが停止する可能性も考慮しなければなりません。共同研究者の協力もあり、装置には徐々に血が通い、ようやく昨日の状態を取り戻せたのです。

13:00 運命の加振が始まりました。緩い加振波から順調にクリアしていきます。装置の調子は良いようですが油断は禁物。Eーディフェンスは油圧が印可された状態（すぐに加振できる状態）では、震動台上及び周囲への立ち入りが禁止されるため、試験体の状況は、主に各種監視カメラの映像で確認します(写真 17、18)。食い入る様にモニタを見つめ、異常が発生しない事を祈り、実地震動の 100%加振を待ちました。ところがまたしても暗雲が立ち込めます。強化した水漏れ対策でも、スプラッシュが床を濡らし、水溜まりが目立つようになってきました（尚、震動台は超精密機械で防水仕様ではなく、無数に空いた固定穴から水が内部に侵入した場合、各種センサや伝送系に深刻なダメージを与えます）。



【写真 17 監視カメラの映像と制御室のモニタ】



【写真 18 遠隔操作型監視カメラの映像】

ここで試験体確認に行くと、震動台の油圧操作を含めて約 1 時間のロス。終了時刻は規則があるため、予定の加振を全て実施するには「1 回の確認」が限度でした。共同研究者と協議して「早めの対策」を選択。震動台上にダッシュして、床に零れた水をモップや雑巾で手早く回収。水が漏れそうな個所に養生テープを張りまわります。これから先は、異常があれば即実験中止という状況で最後の戦いが始まりました。

東北地方太平洋沖地震（東日本大震災、K-net 仙台波）や、人工地震波（海洋型及び直下型の 2 種、地震の特徴を代表できる様に富澤徹弥先生（明治大）が作成）など巨大地震をクリアし、残すところ破壊的な横揺れを持つ兵庫県南部地震（阪神淡路大震災、JR 鷹取波）です。大加振の連続で水溜まりは早くも広がっていましたが、もう行くしかありません。初期微動が始まり激しい主要動が試験体に襲い掛かります。震動台上の標識は激しく揺れていますが、試験体は背景と同化し、こちらの標識は全く揺れていません。「このまま終わってくれ！」…と祈ります。ついに…、ついに神様が微笑んでくれました。



【写真 19 実験を終え搬出される試験体】

あとがき

今回は新型コロナの対策のため実験作業を外注せず、所内の共同研究者と、所内で構内維持管理業務を担う、震動実験総合エンジニアリング㈱で実施したため、関係各位には慣れない作業で多大なるご苦勞をおかけしました。特に佐藤研究員には、私が焦るあまり手順を省略して危険作業になるところ、厳しい注意と的確な対策のご提案を。福井研究員には、キツイ作業を率先してやっていただき、また、持ち前の明るさでチームを盛り立てていただきました。お二人と研究開発に打ち込むことができ本当に幸せでした。ありがとうございました。最後に本研究をとりまとめ、ご推進いただいた梶原部門長、ご協力いただいた安全管理室、研究推進室、研究員の皆様、協力業者様、外部の共同研究者ほか関係各位に厚く御礼申し上げます。本研究はまだまだ発展途上です。今後ともご指導のほど、よろしくお願い申し上げます。



(文責 主幹研究員 山田 学)