

【産業競争力懇談会 2019年度 プロジェクト 中間報告】

【大型構造物の次世代評価法】

2019年10月3日

産業競争力懇談会 **COCN**

【エクゼクティブサマリ（中間）】

1. 本プロジェクトの基本的な考え方

多発する地震や社会経済情勢の変化を踏まえて昨年12月に見直された内閣官房による「国土強靱化基本計画」は、いかなる災害に対しても人命保護、国家・社会の重要な機能の維持、国民の財産と公共施設の被害最小化、迅速な復旧復興を目標としている。また国土交通省は、従来の設計基準レベルを大きく上回る南海トラフや相模トラフなど大振幅地震動による検討の必要性を技術的助言として示し、さらに機能継続ガイドラインにより、大地震時の重要な建設物の構造、非構造、設備の変形量と損傷を極力定量的に評価して機能継続性を明示することを推奨している。

自動車など他分野ではシミュレーションと実験の組合せで製品の性能が高められるが、建設物はその大きさから通常は実験で試されず、設計がシミュレーションに強く依存している。都市や産業の中核的な役割を担う超高層建築や橋梁などの大型建設物に対し、今後上記ガイドラインを適用する際、多くの部材や設備の破壊余裕度を評価しなければならず、そのためのシミュレーション技術の精度確認がまず必要である。

この意味で、世界で急速に広まっているV&V、つまり解析の検証(Verification)と妥当性確認(Validation)のような、シミュレーションの信頼性を高める具体的な方法論が、建設産業でも必要である。さらにV&V成立のために、建設物の地震応答観測データや構造部材、免震・制振部材など構成要素の実験データという客観的情報を充実させ、解析をそれらと照合していく必要もある。

現状ではシミュレーションの精度が不確かなときは相当の安全率を見込んで設計せざるを得ず、大型構造部材のコスト増を招いていると思われる。冒頭で述べたごとく更に高性能の構造が必要視される今後に対し、上記の客観的データの活用により精度を格段に高めたシミュレーションで、コストを極力抑えた新構造や部材の開発と実用化など、建築生産のイノベーションを可能にすることを考えている。また、高精度化の過程で様々な周辺技術を開発して(2章)シミュレーションの高度化も行い、建築生産を新たな方向に導いていく。以上により、建設産業競争力を強化する。

2. 検討の視点と範囲

大型建設物の機能継続性、機能回復性、安全性の評価のため、シミュレーションでは地震の後、どれだけの部材がすぐ使用可能な状態、修理可能な状態、または耐力を喪失した状態かを判定する必要がある。この観点から大型の構造部材と免震・制振部材のモデル化や実験検証について大手ゼネコン5社、免震・制振部材メーカー7社に調査を行った(付図1)。以下に要約する。

大型の構造部材については、縮小試験体の実験結果をもとに実大の場合の性能を予想(外挿)しており、大きいものほど脆く破壊するという寸法効果は当事者の判断で加味される。再現した縮小率はかなり小さく、耐力に直接関連する断面積で0.1倍以下のケースも多い。また、比較的大きな部材実験では破壊までの加力がなされないことが多い。積層ゴム系の免震部材については、実大の製品に対しせん断ひずみ400%程までの性能は検証されているが、それ以上から破断つまり破壊までの実験は殆ど行われていない。また、実際に免震部材に生じる速度を載荷できる試験装置が国内にないことから、動的特性は準静的試験をもとに補正して外挿により評価するか、縮小

試験体で動的試験を実施している。制振部材でも、実大の製品に対し性能検証がよく行われるが、使用可能な状態の範囲での加力のみが行われ、様々なパターンが予想される破壊の実験は殆ど行われていない。部材の特性を考慮して静的あるいは動的試験が行われている。

これらから部材の評価や解析では、縮小実験の結果の外挿に依存することが多い。また、使用可能な範囲内で実験結果を再現できているが、今後はより強い地震での余裕度評価のために、現実に近い大きさの部材を破壊まで実験するべきである。海外の設備も活用して極力実物大・実速度を再現したデータ取得により、内挿による部材評価、部材解析のV&Vを進める必要がある。

また、これに加え、地震応答モニタリング、そのPDCAサイクルへの組込みと内挿による解析のV&Vと高精度化を進める。以上により、共通要素の非競争的な解析技術の改善、各企業で異なる競争的な技術展開、個々の建設物や都市レベルでの被災度判定、インターフェース高度化によるシミュレーションの単純化、高性能構造の普及を目差す。この結果、実験やモニタリングからのビッグデータの活用、AIによる多様なデータ評価も進むと思われ、このような多角的なシミュレーションの高度化と波及効果で、産業競争力を高めることを考えている。

3. 産業競争力強化のための提言および施策


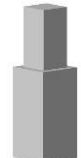







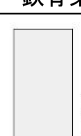
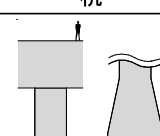



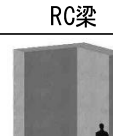



本提言で、東工大を中心としたオープンイノベーションでシミュレーションを高度化し、その成果を各企業がノウハウを加味しながら社会実装(実用化)するというシナリオを以下に述べる。

本プロジェクト終了後は、建設産業における「シミュレーション高度化機構(仮称)」の設立を提言する。機構は、1) シミュレーション精度向上のための技術情報共有が可能な構造部材・免震・制振部材に対し、余裕度を把握する実験の内容、国内外の既存施設による実験遂行の体制を計画する、2) シミュレーションの信頼性を高めるV&Vの方法論と管理・実行体制を、建設産業の実情(1章)をふまえて築いていく、3) 様々なインターフェースの開発によるシミュレーションの適用範囲の拡張、それによる新たな建設技術の方向をつくる、4) 米国CDMGの州政府課金制度、データ公開制度に基づく建設物地震応答モニタリングの拡張として、格段に多いセンサーによる高密度モニタリングを計画する、5) 全国8地方での大型建設物のモニタリング、そのデータによるV&Vと建設物の設計・評価法のPDCAサイクルを長年継続する(付図2)、6) V&VによるHQC(High Quality Computing)促進と様々なデータ管理も行う建設物シミュレーション専門家の能力育成と資格化の仕組みをつくる。

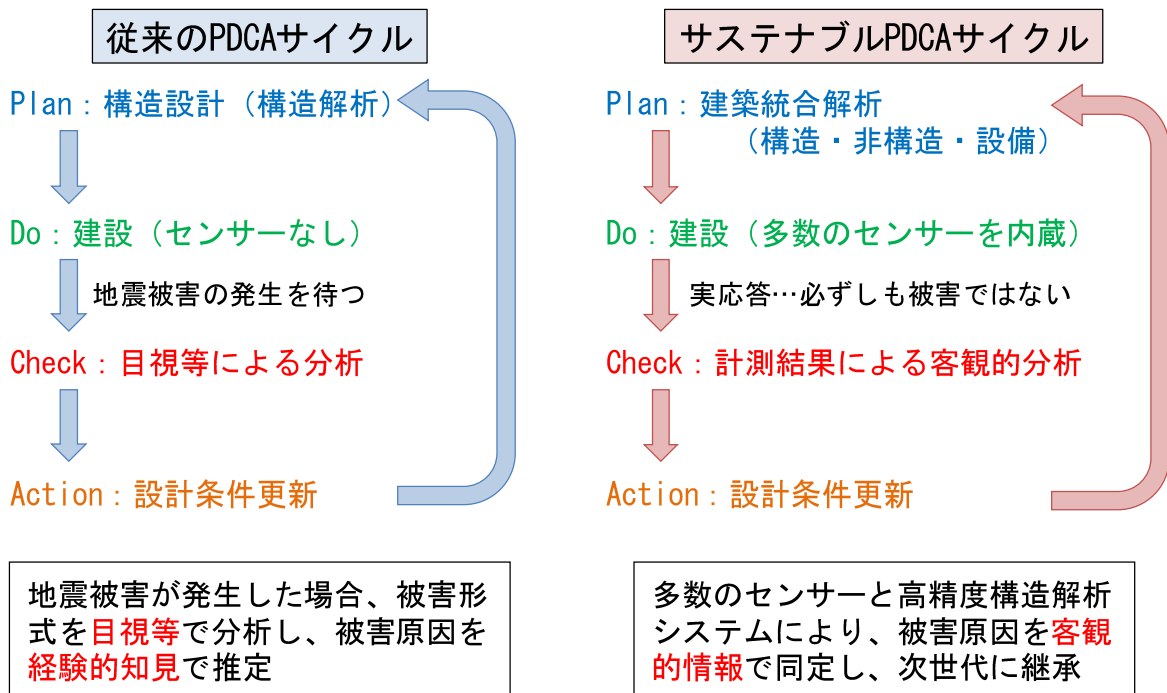
本プロジェクトの出口まで、シミュレーション高度化、実施機構の必要性と体制、研究項目と実施候補者・企業などの検討を続ける。出口後、産官学連携コンソーシアムを組成しアウトソーシングなども活用しながら検討を進め、7年後に機構を設立する。ただし1)、4)の緊急性のため、大型部材の実験、モニタリングの制度作りと実際のセンサー設置は、出口後に早急に開始する。

4. 最終報告書に向けた検討上の課題と展開

上記の第三者的な機構の産学または官主導の運営ほかについて、府省と議論を進めたい。また、SOFTech(OPERA)の進展と繋げてモニタリング方法の考察、BIM(Bldg. Inform. Modeling)などとの融合による安全安心評価システムの検討、SDGs 9,11,17、Society5.0との関連付けなどを行う。

| | 耐震部材 | | | 免震部材 | 制振部材 |
|-----------|---|--|--|---|---|
| | 柱 | 壁・梁 | 基礎構造部材 | | |
| 対象 構造物 |  土木構造物 | |  超高層建築物 |  中高層・ 超高層建築物 | |
| 部材 |  橋脚 |  鉄骨梁 |  杭 |  高減衰ゴム系積層ゴム支承 |  壁型摩擦ダンパー |
| |  CFT柱 |  RC梁 |  パイルドラフト |  高摩擦弾性すべり支承 |  座屈拘束ブレース |
| |  CFT長柱 |  RCコアウォール |  RCボックスガバート |  免震U型ダンパー |  オイルダンパー |

※他7件（本文参照）、CFTはコンクリート充填鋼管、RCは鉄筋コンクリート
付図1. 調査した部材の例（22部材を調査）



付図2. 従来のPDCAサイクルとサステナブルPDCAサイクル

【目 次】

| | Page |
|------------------------------|------|
| 第1章 本プロジェクトの基本的な考え方 | 3 |
| 1. 1 背景 | 3 |
| 1. 2 目的と構成 | 3 |
| 第2章 検討の視点と範囲 | 4 |
| 2. 1 これまでのプロジェクト活動 | 4 |
| 2. 2 強い揺れで損傷する構造部材の現状調査 | 5 |
| 2. 2. 1 調査項目と背景 | 5 |
| 2. 2. 2 調査結果：シミュレーションの現状 | 5 |
| 2. 2. 3 調査結果：今後の展望 | 6 |
| 2. 3 揺れを低減できる免震・制振部材の現状調査 | 8 |
| 2. 3. 1 調査項目と背景 | 8 |
| 2. 3. 2 調査結果：シミュレーションの現状 | 8 |
| 2. 3. 3 調査結果：今後の展望 | 9 |
| 2. 4 シミュレーションの高度化と産業競争力 | 9 |
| 第3章 産業競争力強化のための提言および施策 | 12 |
| 3. 1 部材の非競争的実験研究・シミュレーション | 12 |
| 3. 2 建設産業におけるV&V方法論と実行 | 14 |
| 3. 3 シミュレーションの適用性拡張 | 16 |
| 3. 4 民間・公共建設物へのセンサー導入とモニタリング | 17 |
| 3. 5 観測記録の利用による設計法PDCAサイクル | 18 |
| 3. 6 シミュレーション専門家の育成 | 18 |
| 第4章 最終報告書に向けた検討上の課題と展開 | 19 |
| 4. 1 プロジェクト終了までの取り組みと出口 | 19 |
| 4. 2 プロジェクト終了後の出口での直近の取り組み | 19 |
| 4. 3 その他の取り組み | 20 |
| 4. 4 想定しているコンソーシアムの主体や組成 | 22 |

【プロジェクトメンバー】

リーダー : 笠井 和彦 東京工業大学 アドバイザー : 奈良林 直 東京工業大学
コ・リーダー : 窪田 伸 日本製鉄 コーディネーター : 木村 功 東京工業大学
事務局 : 田中 章 東京工業大学 事務局 : 渡井 一樹 東京工業大学

アドバイザー・メンバー（五十音順）

| | | | |
|-------|---------------|--------|---------|
| 石川 裕次 | 芝浦工業大学 | 市之瀬 敏勝 | 名古屋工業大学 |
| 川畑 友弥 | 東京大学 | 菊地 優 | 北海道大学 |
| 吉敷 祥一 | 東京工業大学 | 木村 祥裕 | 東北大学 |
| 佐藤 大樹 | 東京工業大学 | 高山 峯夫 | 福岡大学 |
| 多田 元英 | 大阪大学 | 中込 忠男 | 信州大学 |
| 中村 尚弘 | 広島大学 | 藤倉 修一 | 宇都宮大学 |
| 堀 宗朗 | 東京大学/海洋研究開発機構 | | |

WGメンバー（五十音順）

WG1(耐震部材)

主査 : 山本 雅史 竹中工務店

| | | | |
|-------|----------|-------|-------|
| 上田 太次 | 神戸製鋼所 | 勝俣 英雄 | 大林組 |
| 佐々木 純 | 日本製鉄 | 重野 喜政 | 竹中工務店 |
| 篠崎 洋三 | 大成建設 | 清水 幹 | 鹿島建設 |
| 下川 弘海 | JFE スチール | 鳥井 信吾 | 日建設計 |
| 日比 政昭 | 日本製鉄 | 福喜多 輝 | 清水建設 |
| 山本 裕 | 日建設計 | 吉田 治 | 大林組 |

WG2(免震・制振部材)

主査 : 正木 信男 ブリヂストン
副主査 : 宮崎 充 オイレス工業

| | | | |
|-------|--------------|-------|------------|
| 加藤 直樹 | 昭和電線ケーブルシステム | 窪田 友夫 | KYB |
| 後藤 尚哉 | スリーエムジャパン | 澤田 毅 | オイレス工業 |
| 高田 友和 | 住友理工 | 露木 保男 | KYB |
| 所 健 | スリーエムジャパン | 長田 修一 | オイレス工業 |
| 山下 由彦 | 昭和電線ケーブルシステム | 渡辺 厚 | 日鉄エンジニアリング |

WG3(解析法)

主査 : 元結 正次郎 東京工業大学

アドバイザー : 笠井・菊地・木村・多田・中村・堀・各メンバー

WGメンバー : 竹中工務店・日建設計・日本製鉄・ブリヂストン・各メンバー

梁川 幸盛 構造計画研究所 山崎 久雄 ユニオンシステム

COCN 担当実行委員・企画小委員

| | | | |
|--------|-------|-------|------|
| 須藤 亮 | 実行委員長 | 大石 善啓 | 実行委員 |
| 金枝上 敦史 | 企画小委員 | | |

【本 文】

第1章 本プロジェクトの基本的な考え方

1.1 背景

多発する地震や社会経済情勢の変化を踏まえて昨年12月に見直された内閣官房による「国土強靱化基本計画」は、いかなる災害に対しても人命保護、国家・社会の重要な機能の維持、国民の財産と公共施設の被害最小化、迅速な復旧復興を目標としている。また国土交通省は、従来の建築基準法の設計用地震動を大きく上回る南海トラフや相模トラフなど大振幅地震動による検討を技術的助言として示し、さらに機能継続ガイドラインにより、大地震時の重要な建設物の構造、非構造、設備の変形量と損傷を極力定量的に評価して機能継続性を明示することを推奨している。

自動車など他分野ではシミュレーションと実験の組合せで製品の性能が高められるが、建設物の場合、その大きさから通常は実験で試すことができず、シミュレーションへの依存度が非常に高い。都市機能と産業へのインパクトが凄まじいと考えられる大型建設物の損傷や倒壊に対し、膨大な数の構造部材や設備の破壊余裕度を明らかにして安全性、機能回復性・継続性までを的確に評価するため、まずシミュレーション技術の精度確認、そして高度化を行う必要がある。

この意味で、世界で急速に広まっているV&V、つまり解析の検証(Verification)と妥当性確認(Validation)のような、シミュレーションの信頼性を高める具体的な方法論が、建設産業でも必要である。さらにV&V成立のために建設物の観測記録や構造部材、免震・制振部材など構成要素の実験データという客観的情報を充実させ、解析をそれらと照合していく必要もある。

1.2 目的と構成

増え続ける大型建設物にはより高い耐震性が求められ、その技術の開発やイノベーションによって、精度の高いシミュレーションが不可欠である。しかし、連続体力学に基づくFEMによっても部材の挙動を破壊まで正確に予測できる訳ではない。材料の不均一性、組成のバラツキ、複合材の各構成要素の強度・付着特性、寸法依存性、さらには経年変化や疲労特性などの広範な特性を有限要素で模擬することは困難であり、また、残留応力や応力集中に対する材料挙動、局部座屈や破断という高度な材料・幾何学非線形性、減衰材料の分子運動による温度・振動数依存など、多岐にわたる応答の敏感性も容易に再現できる段階にはない。

構造部材の終局状態までの解析モデル化が十分でないこと、もしくは縮小試験体の実験結果の外挿によるモデル化のため精度が不明瞭であることがよく指摘されている。そのため現状は、相当の安全率を見込んで設計せざるを得ず、大型構造部材のコスト増を招いていると思われる。コストを極力抑えながら建設物の高性能化を進めるため、解析モデルの精度を明確にして合理的な安全率の評価が可能な次世代型のシミュレーションの高度化が必要である。以上より本プロジェクトの目的は、これらのシミュレーションと実験を産学官で行う機構を設立することでシミュレーション技術を格段に向上させ、建設分野での産業競争力を高めることである。

2章では今年度前半のプロジェクト活動内容、大型の構造部材、免震部材、制振部材のシミュレーションに必要な実験データの現状を述べる。大型建設物に用いられた部材のモデル化や実験検

証について、大手ゼネコン5社、免震・制振部材メーカー7社の協力を得て調査を行った。3章では、実験とシミュレーションを産学官で行う機構についてまず説明し、その活動計画案を述べる。この機構は、実験データの蓄積・拡充・運用、解析モデル作成、シミュレーション技術の促進、シミュレーション精度の管理、人材育成などに関するプラットフォームの役割をつとめる。4章では今後の課題と展開について述べる。

第2章 検討の視点と範囲

2.1 これまでのプロジェクト活動

本プロジェクトの前半期では、現状での大型構造要素・部材のシミュレーションの方法、実験などによる検証の程度を調査した。更に大型化が進む将来を考え、できるだけ規模と荷重条件が顕著な事例を、WG1(耐震部材)、WG2(免震・制振部材)が提示した。損傷し難い次世代型の大型構造物を実現するために、各社共通に必要な要素技術の開発課題を洗い出し、その実験とシミュレーションによる非競争的な開発の展望を示すことを検討した。また、WG3(解析法)は、シミュレーションを中心とした構造力学のイノベーションの方向を検討した。

プロジェクトメンバーを Page 2、活動を Page 5 の表に示す。リーダー1名、コ・リーダー1名、サブリーダー3名、コーディネーター1名ほかによるリーダー会により本プロジェクトの方針が決定されている。プロジェクトリーダー連絡会を2度開催して準備作業を行い、5月24日のプロジェクト第1回検討会でプロジェクトメンバーほぼ全員に、各リーダーが本プロジェクトの背景の説明と以降のWG1, WG2, WG3活動への協力を要請した。

- 4月5日 : 第1回リーダー連絡会(事前打ち合わせ)
- 4月25日 : 第2回リーダー連絡会(事前打ち合わせ)
- 5月24日 : プロジェクト第1回検討会(42名参加)
- 6月3日 : WG1, 2への検討依頼発信
- 6月28日 : WG2第1回検討会、WG2データシートの集約
- 7月12日 : WG1第1回検討会、WG1資料の集約
- 7月18日 : 12日のWG1検討会を踏まえて笠井よりWG1に対し追加依頼
- 7月19日 : 笠井よりWG2に対して追加依頼
- 7月26日 : WG2第2回検討会、リーダー出口議論会
- 7月31日 : プロジェクト第2回検討会(33名参加)
- 7月31日 : WG3のメンバーへここまでの検討と7月18日資料に関するコメント依頼
- 8月2日 : WG1第2回検討会(笠井依頼のコメントについてヒアリング)
- 8月7日 : WG2に対して終局状態データ要請
- 8月30日 : WG1意見集約

以後、リーダー会により、構造部材 WG1 に対しては、各建設会社における大型建設物に関するデータ、検討分担すべき部材の種類の調整を行った。免震・制振 WG2 に対しては、WG1 と異なり各社の製品が量産されるため、製品データを共通のフォーマットで記載するよう要請した。

プロジェクト第 1 回検討会から 1~1.5 ヶ月でデータが集まり、7 月中旬にそれらのより詳しい情報や、シミュレーションに関する非競争的取り組みに関する意見を要請した。その途中経過を各 WG の主査が 7 月 31 日の プロジェクト第 2 回検討会でプロジェクトメンバーほぼ全員に説明した。また、追加情報が集まり、それらなどに関するコメントを WG3 のメンバー・アドバイザーに要請した。以上の情報の受領後、それらに関する議論をリーダー会により複数回開き、中間報告用のデータ作成を行った。

2.2 強い揺れで損傷する構造部材の現状調査

2.2.1 調査項目と背景

構造部材は、自重や積載荷重などの静的荷重に加え地震や風などの動的荷重に耐え、建設物全体が崩壊しないよう支える部材である。大型構造物において、これらの荷重は膨大でありそれを支える構造部材も巨大となる。構造部材を構成する材料は鋼材やコンクリートであり、それぞれ変形があるレベルを超えると損傷、破壊に至る。巨大地震でも安全と機能を確保できる次世代型の構造物を実現するため、構造部材がどのレベルで損傷し始め、徐々にまたは急激に壊れるかなどを高精度で評価できるシミュレーション解析技術や評価法が必要である。本節では、現状における評価法の適用範囲・精度について行った調査と、将来のあるべき方向についての意見の集約結果を示す。

2.2.2 調査結果：シミュレーションの現状

結果を表 1-1, 1-2 に示す。大型の構造部材については、柱・梁・壁など多くの構造部材が実大実験による性能検証が行われておらず、縮小試験体を基に大型部材の性能を外挿しているのが現状である。また、比較的大きな部材の実験を行った場合にも部材が破断するまでの加力はなされておらず、終局状態における力学挙動は把握しきれていない。また、高精度と言われる有限要素法解析（FEM 解析）を行った場合においても、部材の塑性化が進むと精度が低下する傾向が確認されている。

土木構造物は荷重条件などを単純化することで、大型の部材を加力しようとする試みが見られるが、建築部材のように複雑な荷重条件の下で抵抗力を発揮する部材はモデルの単純化が非常に難しい。FEM 解析によって大型構造部材の実験結果を正確に再現できる場合もあるが、解析自体がソフトウェアや解析者の技術力や経験に左右されることや、解析結果が正しいものであることを示す根拠となるデータがないのが現状である。

構造部材は建設物の自重を支える鉛直方向の抵抗力だけでなく、地震動が発生した際にはそれに対する水平方向の抵抗力を発揮しなければならない。柱の場合には縮小された試験体であっても鉛直力を作用させながら水平力を与える試験が一般的に行われているが、部材が極めて巨大となる基礎構造、特に杭については大きな鉛直力を受けた状態での水平力に対する耐力の検討はほ

とんど行われていない。限られた条件の下における性能は評価される傾向にあるが、地中構造物の場合には特に荷重条件が複雑となることから、実験による検証が必要であると言える。

2.2.3 調査結果：今後の展望

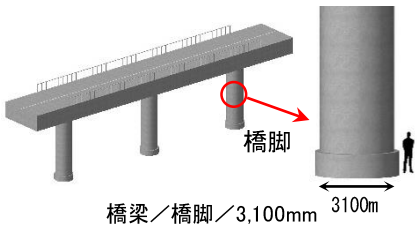
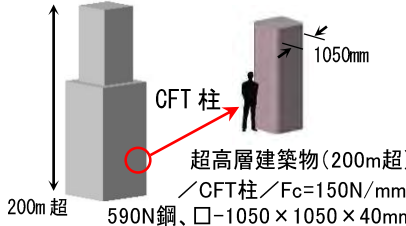
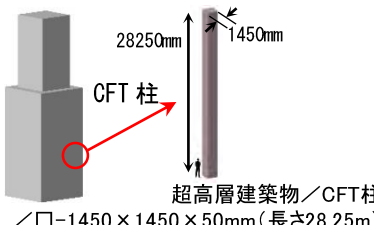
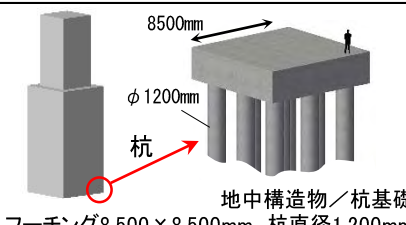
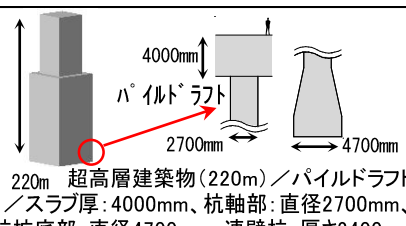
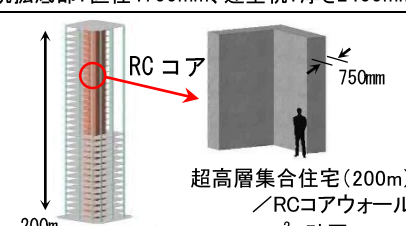
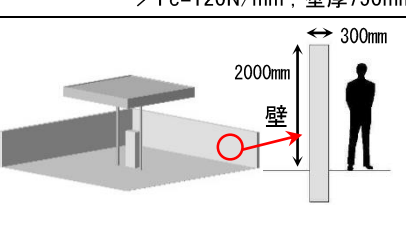
前節で述べたように、多くの大型構造部材の性能は縮小試験体を用いた試験結果に基づく外挿や、FEM 解析によって評価されている。しかし、これらのデータの正当性を裏付けるデータが少ないため、今後、高度なシミュレーションを行うためには、あらゆる部材・大きさを包括した実験データの蓄積・公開が求められる。しかし、大型構造部材の加力実験は単独の大学や企業で実施することは難しいことから、国家的プロジェクトとしての実施および結果を共同利用できるような体制を構築することが望ましい。

これらの実験結果が日本建築学会で作成されている設計基準や、各企業が使用している設計ソフト・CAE ソフトの妥当性検証に活用され、建築物の安全性の向上に寄与することになる。また、設計の不確かさを安全率のみに背負わせない、合理的な設計によるコスト抑制にも繋がると言える。現状では縮小試験体を用いた実験結果により解析精度を検証し、大型構造物は外挿による性能評価を行っている。構造物の安全性を向上させるためには、大型構造部材についても実験結果を用いた解析精度の検証を行い、内挿による性能評価を実現することが不可欠である。

構造物単体の評価だけでなく都市としての機能維持を見据えた場合、各構造物地震被災度判定を集約することで都市の機能維持性を判定することになるため、各構造物の適切な評価が必要である。現状では構造物を構築する構造部材のポストピーク挙動を適切に評価できないため、構造物の地震被害を正確に把握することは難しく、相当な安全側に評価せざるを得ない。そこで、小型から大型の構造部材を破壊に至るまで加力したデータの蓄積、統一された評価手法の確立と各建物へのセンサー配置および記録波形の公開制度が必要である。

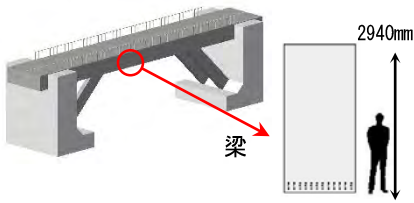
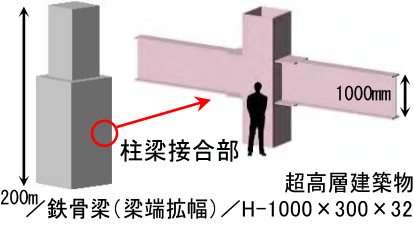
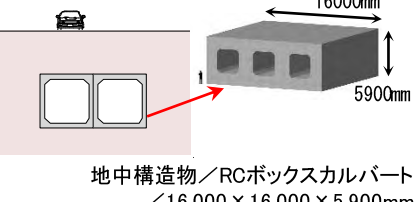
大型構造部材の加力実験で得られる知見に加えて、これらを正確に模擬できるシミュレーション技術の高度化が必要と考えられる。特に、高強度コンクリートを用いた RC 部材については、十分に精度検証された解析法が構築されていないのが現状である。高精度の解析法が整備できれば、実験では代表的な条件での性能把握を行い、その他の条件下の性能はパラメトリックなシミュレーションで補完することができる。これにより、実験に用いる試験体数を必要最小限に抑えることが可能となり、実験コストの削減、効率的な実験装置の運用が可能となるだけでなく、実験結果の予測評価による効率的な実験計画や、構造部材の設計にも活用できる。

表 1-1 強い揺れで損傷する構造部材に関する事例一覧

| No. | 対象構造／部位／実寸法 | 試験体サイズ | 評価方法／備考 |
|-----|---|--|--|
| 1 |  <p>橋梁／橋脚／3,100mm 橋脚</p> | <p>高さ: 7,500mm 直径: 2,200mm (縮小比3/5)</p> | <p>用途: 橋梁の柱脚、規模: 直径3,100mm程度 構造要素: RC柱脚、試験体サイズ: 高さ7,500mm、直径2,200mm ⇒縮小比は3/5であり、寸法効果なしの抵抗力は実大の9/25程度 モデル化: 物理挙動の直接的モデル化 ⇒動的解析では塑性応答が大きくなると精度が不十分 特記: 1995 兵庫県南部地震の地震動(JR 鷹取)に耐える 特記: 小型の試験体と異なる破壊特性(爆発的)を示す。</p> |
| 2 |  <p>200m 超 CFT 柱 超高層建築物(200m超) ／CFT柱／$F_c=150\text{N}/\text{mm}^2$ 590N鋼、$\square-1050 \times 1050 \times 40\text{mm}$</p> | <p>$\square-250 \times 250 \times 9$ (縮小比 1/4) $F_c=167.3\text{N}/\text{mm}^2$ SA440($F=590\text{N}/\text{mm}^2$)</p> | <p>用途: 超高層建築物、規模: 高さ200m超 構造要素: CFT柱、試験体サイズ: $\square-250 \times 250 \times 9$ ⇒縮小比は1/4であり、寸法効果なしの抵抗力は実大の1/16程度 特記: 実験結果と終局強度式における鋼材とコンクリートの一般累加式に差が生じた ⇒終局強度計算時のコンクリート強度に低減係数0.7を採用</p> |
| 3 |  <p>28250mm 1450mm CFT 柱 超高層建築物／CFT柱 ／$\square-1450 \times 1450 \times 50\text{mm}$(長さ28.25m)</p> | <p>解析のみ</p> | <p>用途: 超高層建築物 構造要素: CFT長柱 モデル化: 鋼材TMCP385C、充填コンクリート$F_c=80\text{N}/\text{mm}^2$ 特記: 弾性座屈解析により有効長さを検討 ⇒大梁の剛性、層剛性、初期不整、地震時の水平変位を考慮 特記: 余裕度レベル(レベル3)の地震動に対し、柱が弾性耐力以内となることを確認</p> |
| 4 |  <p>8500mm $\phi 1200\text{mm}$ 杭 地中構造物／杭基礎 フーチング8,500×8,500mm、杭直径1,200mm</p> | <p>フーチング: 88mm 杭直径: 48mm (縮小比1/25)</p> | <p>用途: 地中構造物(杭) 構造要素: 杭、試験体サイズ: 杭直径48mm ⇒縮小比は1/25であり、寸法効果なしの抵抗力は実大の1/625程度 モデル化: FEM解析によるモデル化 ⇒加速度、変位の最大応答は概ね良好に対応 ⇒応答波形の位相については実験と解析で差異が見られる 特記: 地盤と構造物の連成系の解析では2次元解析が主流であるが、本解析では3次元要素を用いてモデル化している</p> |
| 5 |  <p>4000mm 2700mm 4700mm 220m 超高層建築物(220m)／パイルドラフト ／スラブ厚: 4000mm、杭軸部: 直径2700mm、 杭拡底部: 直径4700mm、連壁杭: 厚さ2400mm</p> | <p>杭直径: 1,100mm 杭長さ: 約40,000mm (縮小比2/5)</p> | <p>用途: 超高層建築物、規模: 220m 構造要素: パイルドラフト、試験体サイズ: 杭直径1,100mm ⇒縮小比は2/5であり、寸法効果なしの抵抗力は実大の4/25程度 モデル化: FEM解析によるモデル化 特記: 実験により検証したのは鉛直抵抗力のみであり、地震動に対する水平性能は解析でのみ検証 特記: 施工時に生じる沈下についてはFEM解析結果が計測値と良い対応を示す</p> |
| 6 |  <p>200m RC コア 超高層集合住宅(200m) ／RCコアウォール ／$F_c=120\text{N}/\text{mm}^2$、壁厚750mm</p> | <p>壁厚100mm (縮小比 1/8)</p> | <p>用途: 超高層建築、規模: 200m 構造要素: RCコアウォール、試験体サイズ: 壁厚100mm ⇒縮小比は1/8であり、寸法効果なしの抵抗力は実大の1/64程度 モデル化: 物理挙動の直接的モデル化のために複数の柱要素に置換 ⇒実験結果と解析結果には10%程度の離散化誤差が生じる 特記: 実大のコアウォールは載荷実験が行えないため、シミュレーションにより実大の挙動を把握</p> |
| 7 |  <p>2000mm 300mm 壁 水素供給ステーション／RC壁</p> | <p>試験体高さ 1,000～2,000mm 壁厚 80～120mm (実物を意識せずに 挙動の把握が目的)</p> | <p>用途: 水素ステーション 構造要素: RC壁、試験体サイズ(最大): 2,000×120mm ⇒実物を意識せずに挙動の把握が目的 モデル化: FEM解析によるモデル化 ⇒最大応答変位については±20mmの誤差の範囲で再現可能</p> |

注: 人の寸法は1,700mm、CFTはコンクリート充填鋼管、RCは鉄筋コンクリートを表す

表 1-2 強い揺れで損傷する構造部材に関する事例一覧

| No. | 対象構造／部位／実大寸法 | 試験体サイズ 縮尺比 | 評価方法 |
|-----|--|---|--|
| 8 |  <p>土木一般構造物／RC梁／1500×2940mm</p> | <p>有効せい 100～3,000mm (縮小比1/30～2/3～1)</p> | <p>用途: 橋梁の橋桁、規模: 1,500×2,940mm 構造要素: RC梁、試験体サイズ(最大): 梁有効せい3,000mm モデル化: FEM解析によるモデル化 ⇒寸法効果を表すために粗骨材寸法やメッシュサイズを考慮 特記: 土木学会コンクリート標準示方書[設計編]のせん断補強筋の無い梁のせん断強度式には、梁有効せいの1/4乗に反比例してせん断強度が低下する寸法効果が取り入れられている</p> |
| 9 |  <p>超高層建築物 鉄骨梁(梁端幅)／H-1000×300×32</p> | <p>H-500×200×10×16 (縮小比1/2～4/5)</p> | <p>用途: 中高層建築物 構造要素: 鉄骨梁(梁端幅) 試験体サイズ(最大): H-500×200×10×16 特記: 超高層建築物を考えると試験体の縮小比は1/3～1/2程度</p> |
| 10 |  <p>地中構造物／RCボックスカルバート ／16,000×16,000×5,900mm</p> | <p>解析のみ</p> | <p>用途: 地中構造物、規模: 16×16×5.9m ⇒地中構造物(取水路)を想定 解析モデル: FEM解析によるモデル化 ⇒地盤の非線形挙動に対する解析精度は遠心振動台実験と比較 ⇒構造物の非線形挙動については静的加力実験と比較 特記: 検討は地中構造物直下で断層が変位することを想定</p> |

注: 人の寸法は1,700mm、RCは鉄筋コンクリートを表す

2.3 揺れを低減できる免震・制振部材の現状調査

2.3.1 調査項目と背景

免震・制振部材は建設物の固有周期の調節や地震エネルギーの消散により揺れを制御する部材であり、前節で示した重要構造部材の損傷を軽減するために、大きな変形でも壊れずに機能しなければならない。次世代型の構造物には免震・制振部材の適用は必須であり、それらの制御効果および破壊に対する余裕度を高精度で評価できるシミュレーション解析技術や評価法が必要である。本節では、現状における評価法の適用範囲・精度について行った調査と、将来のあるべき方向を検討した結果を示す。

2.3.2 調査結果: シミュレーションの現状

結果を表2、表3に示す。制振部材については実機を用いた性能検証および力学モデルの構築を行うことが主であり、実験結果と解析結果が精度よく一致する精巧なモデルが提案されている。一方、免震部材は縮小試験体を用いた実験による性能評価が行われている場合がある他、力学モデルの適用範囲は使用限界(積層ゴムの場合せん断ひずみ $\gamma = 300\%$ 程度)を対象としている。また、大型の製品は縮小試験体の試験結果に基づく外挿による評価が行われている場合もある。制振部材の場合にはそれ自体に変形を入力する構造物の損傷が大きくならなければ、制振部材に大きな変位が入力されないため終局状態(破断・破壊に至る状態)に達するのは稀である。一方、

免震部材はそれ自体が大きく変形することで構造物の損傷を防ぐことから、巨大地震が発生した場合には免震部材に大きな変形が生じる可能性が高く、大変形時の挙動把握は必要不可欠である。

2.3.3 調査結果：今後の展望

制振・免震部材は、使用限界を超えない範囲では非常に安定した性能を発揮するが、終局状態では抵抗力が著しく増大する場合もある。その場合、制振・免震部材自体が破断に至らなかったとしても、それらが取り付く周辺の構造部材を損傷させる恐れがある。現在は、免震・制振部材ごとの単体性能を評価しているが、実大規模の架構の中に設置された両部材が終局状態に至るときの挙動および性能を、周辺架構も含めて評価することが考えられる。また、免震部材においても実大の試験体を用いて正確な性能評価を内挿により行い、免震部材が破断に達する挙動まで模擬できる力学モデルの構築が望まれる。

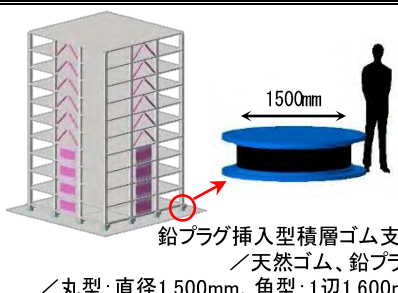
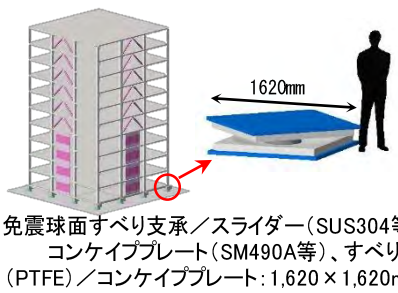
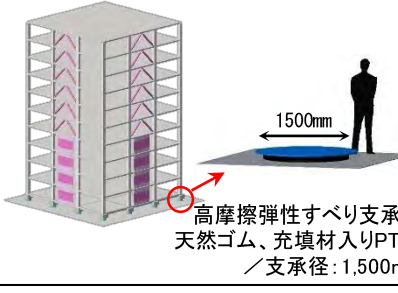
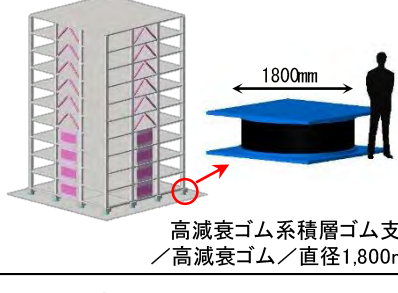
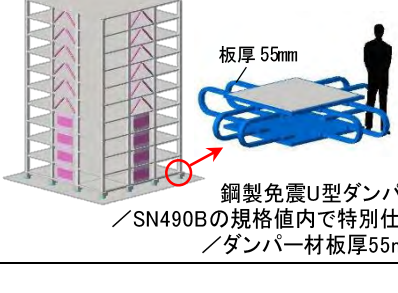
制振・免震部材の中でも巨大な部材は、上述のように縮小試験体の実験結果を基に外挿により性能を評価し、力学モデルが構築されているものもある。建築物全体のシミュレーションを高度化させるためには個々の部材の精度を向上させることが不可欠であり、外挿により構築されたモデルを使用する場合にはその精度を保証することはできない。解析モデルの精度を検証するためにも実大部材の加力データは必要不可欠であり、実大部材の終局状態に達する挙動を含めた力学モデルを各メーカーがこれまでの経験を踏まえて構築し、そのモデルを公開することでシミュレーションの高精度化が進むものと考えられる。

2.4 シミュレーションの高度化と産業競争力

大型建設物の安全・安心の評価を具体的に行える精緻なシミュレーションは、技術力で競争する建設業にとって非常に重要な武器であると思われる。したがって、その精度を向上させるための本プロジェクトで考慮する策は、国内での各建設業に同様に重要であり、それら個々の企業の競争力の増強に繋がると言える。正確なシミュレーションを用いないと、建設物の適切な性能評価、地震挙動と被害予測、健全な企業間競争などを積極的に推進できないため、建設技術の健全な発展のため、本プロジェクトで提案するようなシミュレーションの精度の把握と管理が肝要である。

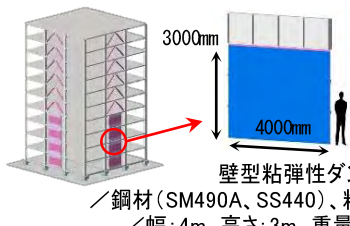
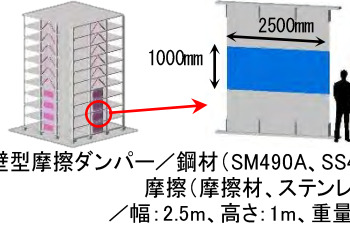
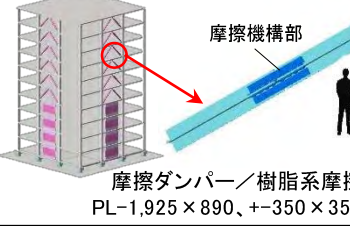
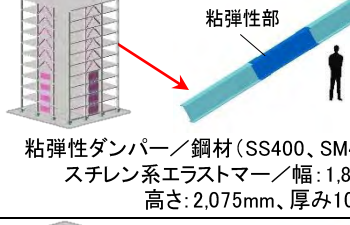
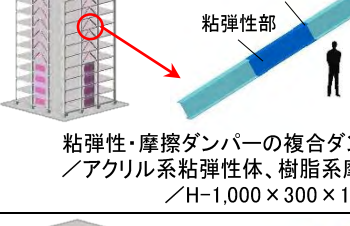
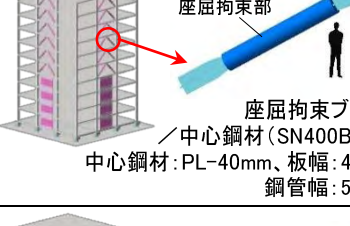
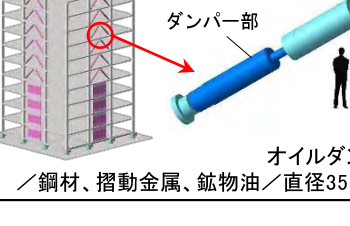
また、精度向上に加え、地震大国である日本における地震応答モニタリングによる膨大なデータ、そのPDCAサイクルへの組み込みによる解析や設計の顕著な改善、個々の建設物や都市レベルでの被災度判定、インターフェース高度化によるシミュレーションの簡便化など、シミュレーションの適用性の拡張は、さらに高性能構造の普及も目差すことになる。このようなシミュレーションの高度化を多角的に行うことは、その波及効果も含めて、海外に対する産業競争力も飛躍的に高めることになると考えられる。

表2 揺れを低減できる免震部材の一覧

| No. | 対象構造／部位／実大寸法 | 試験体サイズ 縮尺比 | 評価方法／備考 |
|-----|--|--|---|
| 1 |  <p>鉛プラグ挿入型積層ゴム支承 ／天然ゴム、鉛プラグ ／丸型：直径1,500mm、角型：1辺1,600mm</p> | <p>限界線図 実機により検証</p> <p>繰返し特性(高速) 直径250～1,000mm</p> | <p>種類：鉛プラグ挿入型積層ゴム支承 試験体サイズ：縮小試験体、最大直径1,000mm 力学モデル：修正バイリニアモデル(物理挙動の直接的モデル化) ⇒モデル化精度検証：振幅200mm、水平荷重600kN ⇒解析結果は実験結果を概ね再現できる 特記：限界線図は実大サイズの試験により評価</p> |
| 2 |  <p>免震球面すべり支承／スライダー(SUS304等) コンケイププレート(SM490A等)、すべり材 (PTFE)／コンケイププレート：1,620×1,620mm</p> | <p>基本特性・疲労特性 実大・縮小で検証</p> <p>終局特性 実大・縮小で検証</p> | <p>種類：免震球面すべり支承 試験体サイズ：実機 力学モデル：バイリニアモデル(物理挙動の直接的モデル化) ⇒モデル化精度検証：振幅950mm ⇒解析結果は実験結果を精度よく再現できる 特記：圧縮限界強度試験の前後で圧縮剛性がほとんど変わらないことを確認済み</p> |
| 3 |  <p>高摩擦弾性すべり支承／ 天然ゴム、充填材入りPTFE ／支承径：1,500mm</p> | <p>縮小試験体 直径300～800mm</p> | <p>種類：高摩擦弾性すべり支承 試験体サイズ：縮小試験体、最大直径800mm ⇒加振条件(直径300mm)： 鉛直荷重2,000kN、振幅200mm、速度400mm/s 解析モデル：FEM解析によるモデル化 ⇒構造と伝熱の連成解析を実施し、縮小試験体の結果を再現できるモデルを作成し、実験ができない大型製品の性能を推定</p> |
| 4 |  <p>高減衰ゴム系積層ゴム支承 ／高減衰ゴム／直径1,800mm</p> | <p>限界性能 実機により検証</p> | <p>種類：高減衰ゴム系積層ゴム支承 試験体サイズ：実機 力学モデル：バイリニアモデル(物理挙動の直接的モデル化) ⇒モデル化精度検証：せん断歪200%、応力1N/mm² ⇒解析結果は実験結果を概ね再現できている 特記：実大サイズの積層ゴムでは、準静的なせん断加力試験を行うため、実現象に相当する速度への補正を行う 特記：限界線図は実大サイズの試験により評価</p> |
| 5 |  <p>鋼製免震U型ダンパー ／SN490Bの規格値内で特別仕様 ／ダンパー材板厚55mm</p> | <p>基本特性・疲労特性 実機により検証</p> <p>終局特性 実機により検証</p> | <p>種類：免震ダンパー 試験体サイズ：実機 力学モデル：バイリニアモデル(物理挙動の直接的モデル化) ⇒モデル化精度検証：振幅600mm、荷重：200kN ⇒解析結果は実験結果を概ね再現できている 特記：必要に応じて地震レベル2の最大応答変位と限界変形(破断までの繰返し回数が5回以上となる変形)の比較や累積変位を累積疲労損傷度として評価し、限界変形および疲労性能として問題ないことを確認する</p> |

注：人の寸法は1,700mm

表3 揺れを低減できる制振部材の一覧

| No. | 部材名称／主要材料／最大寸法 | 試験体サイズ | 評価方法／備考 |
|-----|---|--|--|
| 1 |  <p>壁型粘弾性ダンパー ／鋼材 (SM490A, SS440)、粘性体 ／幅: 4m、高さ: 3m、重量: 5ton</p> | 実機による検証 | 種類: 粘弾性ダンパー(壁型) 試験体サイズ: 実機 力学モデル: 速度のべき乗に比例する非線形粘性モデル ⇒モデル化精度検証: 振幅40mm、荷重2,000kN ⇒周辺部材を考慮する場合にはバネを直列に配置 ⇒解析結果と実験結果は精度よく一致 |
| 2 |  <p>壁型摩擦ダンパー／鋼材 (SM490A, SS440)、 摩擦(摩擦材、ステンレス材) ／幅: 2.5m、高さ: 1m、重量: 1ton</p> | 実機による検証 | 種類: 摩擦ダンパー(壁型) 試験体サイズ: 実機 力学モデル: 速度のべき乗に比例する非線形粘性モデル ⇒モデル化精度検証: 振幅45mm、荷重900kN ⇒履歴がほぼ矩形となるため、簡易的にバイリニア型とする場合もある ⇒周辺部材を考慮する場合にはバネを直列に配置 |
| 3 |  <p>摩擦ダンパー／樹脂系摩擦材/ PL-1,925 × 890、+-350 × 350 × 25</p> | 摩擦材サイズ 60mm × 73mm (要素試験) | 種類: 摩擦ダンパー(ブレース) 試験体サイズ: 実機(摩擦材の要素試験: 60 × 73mm) 力学モデル: バイリニア型としてモデル化 ⇒モデル化精度検証: 振幅20mm、荷重: 1,000kN ⇒解析結果と実験結果は精度よく一致 特記: 有限要素法を用いて単位時間当たりの熱量を摩擦面に投入する手法で熱解析を実施している |
| 4 |  <p>粘弾性ダンパー／鋼材 (SS400, SM490A) ステン系エラストマー／幅: 1,800mm 高さ: 2,075mm、厚み101mm</p> | 実大・縮小で検証 | 種類: 粘弾性ダンパー(ブレース) 試験体サイズ: 実機 力学モデル: 非線形4要素モデル ⇒モデル化精度検証: 振幅30mm、荷重600kN ⇒解析結果と実験結果は精度よく一致 特記: 実大と縮小試験体での実験検証を行い、各種依存性に関しては縮小試験体で実施 特記: ダンパー設計時の最大荷重はせん断ひずみ $\gamma = 300\%$ とし、終局せん断ひずみ $\gamma = 450\%$ 以上である |
| 5 |  <p>粘弾性・摩擦ダンパーの複合ダンパー ／アクリル系粘弾性体、樹脂系摩擦材 ／H-1,000 × 300 × 19 × 25</p> | 粘弾性体: 50 × 50mm (破断歪と応力の検証) | 種類: ハイブリッドダンパー(ブレース) 試験体サイズ: 粘弾性体: 50 × 50mm (破断歪と応力の検証) 力学モデル: 粘弾性ダンパーはKelvinモデル、摩擦ダンパーはバイリニア要素として直列に結合 ⇒モデル化精度検証: 振幅20mm、荷重1000kN ⇒解析結果と実験結果は精度よく一致 特記: 破断歪と応力の関係を実験により検証 特記: 長時間繰返し性能についても確認している |
| 6 |  <p>座屈拘束ブレース ／中心鋼材 (SN400B等)／ 中心鋼材: PL-40mm、板幅: 450mm 鋼管幅: 508mm</p> | 基本特性 実大・縮小で検証 終局特性 実大・縮小で検証 | 種類: アンボンドブレース 試験体サイズ: 実機 力学モデル: バイリニアモデル ⇒モデル化精度検証: 振幅140mm、荷重1,000kN ⇒解析結果と実験結果は精度よく一致 特記: 疲労曲線から疲労性能についても検証する |
| 7 |  <p>オイルダンパー ／鋼材、摺動金属、鉱物油／直径355.6mm</p> | 実機による検証 | 種類: オイルダンパー(ブレース) 試験体サイズ: 実機 力学モデル: 減衰要素とバネ要素の直列 (Maxwell-model) ⇒モデル化精度検証: 振幅15mm、荷重900kN ⇒解析結果と実験結果は精度よく一致 |

注: 人の寸法は1,700mm

第3章 産業競争力強化のための提言および施策

東工大を中心としたオープンイノベーションでシミュレーションを高度化し、その成果を各企業がノウハウを加味しながら社会実装（実用化）していくシナリオである。シミュレーションを中心とした構造力学の破壊的イノベーションとそれによる産業競争力の飛躍的増強を目差しており、この中間報告の後に産学のより深い意見交換を行うため今回は草案とする。活動案は本章で記載するが、想定しているコンソーシアムの主体や組成、およびプロジェクト終了後の出口（2019年度末）での直近の取り組みに関しては4章で述べる。

本プロジェクト終了後は、産学連携により下記6項目を実行する機構の検討と設立準備を5年間で行う。つまり5年後は「シミュレーション高度化機構（仮称）」を設立し、その活動として、1) シミュレーション精度向上のための技術情報共有が可能な構造部材・免震・制振部材に対し、余裕度を把握する実験の内容と国内外の既存施設との連携による実験遂行の体制を計画する、2) シミュレーションの信頼性を高めるV&Vの方法論と管理も含めた実行体制を、1章で述べた建設産業の実情をふまえて築いていく、3) 様々なインターフェースも含めてシミュレーションの適用範囲を拡張し、それによる新たな建設技術の方向をつくる、4) 米国 CDMG による建設物地震応答モニタリングの拡張としてセンサー数を格段に増やした高密度モニタリングを計画する、5) 全国8地方で大型建設物のモニタリングによるシミュレーションのV&Vと建設物の設計・評価法を改善するPDCAサイクルを長年に渡り継続する（付図2）、6) V&VによるHQC（High Quality Computing）促進を行う建設物シミュレーション専門家の能力育成と資格化の仕組みをつくる。これらの順に、以下に説明する。

3.1 部材の非競争的実験研究・シミュレーションの計画

構造要素の開発においては、1)縮小試験体を用いた実験、2)シミュレーション手法の確立とパラメータ特性把握、3)実大規模の試験体を用いた検証実験、の段階が踏まれることが多い。今後、次世代型に向けた構造要素の開発が行われる場合にも同様な手順が踏まれると考えられ、その際には、「シミュレーション手法」と「実大実験による検証」が重要となってくる。

大型コンクリート部材の寸法効果を検証するための基礎実験データの蓄積、大型鉄骨部材の性能評価や疲労特性に関する基礎実験データの蓄積などが非常に有用となり、非競争領域のつまりオープンな課題と言える。また、コンクリート構造の実験領域では、高強度鉄筋や施工性を向上させる機械式継手などの市販される要素を用いた高強度コンクリート部材は、各社で共通の部材であり、鋼繊維、炭素繊維を添加することで脆さを克服した高強度コンクリート部材の技術も、比較的オープンである。また、縮小実験結果の外挿に基づいていた従来技術の検証で、非常に大きな従来型の鉄筋コンクリート部材のせん断と付着・圧壊に対する実験も同様である。

さらに、地震被災度の誤判定に伴う個社のリスクを避けるため、各社共通ルールの作成のためのポストピーク基礎データ構築。規制が緩いか無い分野での、いち早い自主規制ルール確立による建設活動の自由度確保のための研究も考えられる。

一方、免震・制振部材については、使用限界・耐力喪失限界の実験は、各社による共同開発は困難であるが、複数企業が参加する大建設プロジェクトの場合、共同実験などにはあり得る。免震・

制振部材は、使用限界を超えない範囲では非常に安定した性能を発揮するが、終局状態では抵抗力が著しく増大する場合もある。その場合、制振・免震部材自体が終局状態に至らなかったとしても、それらが取り付く周辺の構造部材を損傷させる恐れがある。これをシミュレーションにより事前に把握するためには、設計時の想定を超える大速度、大変位が部材に入力された際の挙動や、部材が破壊に至るまでの挙動を正確に把握することが必要になる。特に、免震・制振部材は建設物の揺れを低減する役割を担うことから、予期せぬ大振幅地震動でも安定した性能を発揮することの証明が必要である。また、内挿による実挙動に則した力学モデル構築を行うためにも、実大部材の終局状態での挙動を含めた力学モデルを各社が構築し、そのモデルを公開することでシミュレーションの高精度化を図る必要があると考える。

実験は施設利用のネットワークの活用により行うとする。一般が利用可能な公的な実験施設はE-Defenseをはじめ、各地に点在する(図1)。各実験施設の載荷性能、載荷可能な部材や大きさ、境界条件は異なるため、各実験計画に見合う適切な実験施設を特定して運用効率の向上を図る。本プロジェクトで提言するシミュレーション高度化機構(仮称)は、これらの施設利用のネットワークを築くうえでリーダー的な役割を担う。



図1 東工大と国内大学・研究所の実験ネットワーク検討

また、国内の実験施設だけでは載荷能力に限界があるため、必要な場合に海外実験施設の利用も行う。典型的に海外の大型施設は大学に属し、大学研究者により運営されている。大学研究者の国際的な研究活動のネットワークの活用により、海外の実験施設を施設利用のネットワークに組み込む。海外の施設の使用例として、図2に東工大が連携協定をしている台湾地震工学研究所および台湾国立成功大学の実験施設(BATS)を利用して行った世界最大のRC杭頭の実験を示す。

コンクリート杭頭の実大・縮小実験(台湾BATS使用)―世界発の規模！

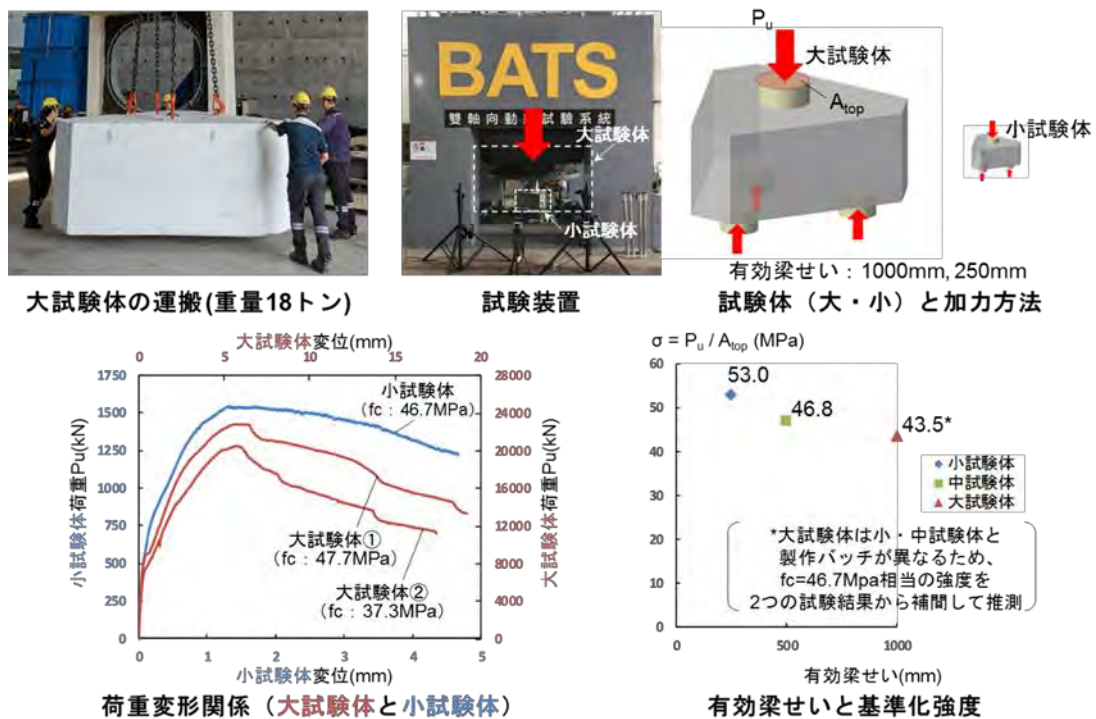


図2 東工大・名工大と台湾地震研究所・国立成功大学の共同実験 (写真は大型試験機 BATS)

3.2 建設産業における V&V 方法論と実行

シミュレーションの信頼性を高める具体的な V&V の方法論 (図3) と管理も含めた実行体制を、外挿に依存する建設産業の実情をふまえながら築いていく。解析の検証 (Verification) については数理的なアプローチが可能であり、ベンチマーク例題とその解から成るデータベースが複数存在し、それらは解析の検証に対して極めて有用である。

一方、妥当性検証 (Validation) については、様々な工学的判断が関係するために Verification ほど単純ではない。与えられた外乱に対して求めるべき建設物の応答を忠実に再現し得る適切な解析モデルを設定し、これを適切な解析手法によって解くことによって妥当性が確保されることは言うまでもない。この例として、建設構造解析における柱・梁・壁などの構造部材あるいは免震・制振部材について、部材・要素レベルでのシミュレーション方法の妥当性検証がある。また、これを拡張して建設物レベルでのシミュレーション方法の妥当性検証もある。ただし、これらはそ

れぞれ、大型構造部材の実験、建設物の実験を必要としており、その例が少ないことをこれまでも述べてきた。先に示した付図 2 左のように多くの地震被害を経験した研究者・専門家による長期間にわたる PDCA サイクルが行われてきたが、“check”の部分が「目視」によるものであり、必ずしも客観的な評価とは言えない。

また、事業継続性に代表される安心について今後は重要な課題となることは近年の地震後のライフラインの断絶などの経験からも明らかである。地震時や台風時の揺れのみならず環境振動などの居住者に不快感を生み出す障害のデリケートな現象を高精度で予測することも今後要求されるものと思われる。このような安心を担保するための高精度のシミュレーションに対するシステムティックな妥当性検証はこれまでなされてきておらず単発的な報告がなされているのみである。

単一受注生産システムにて創成される建設物のシミュレーション方法の妥当性を検証するためには、できるだけ複数の実建物でモニタリングを実施し、様々な外乱が作用したときの応答についてシミュレーション結果と記録データを比較して解の精度を客観的に調査し、その結果を踏まえてモデル化およびシミュレーション方法を修正していくサステナブル PDCA サイクル（付図 2 右）が肝要である。本プロジェクトでは、妥当性がある程度普遍性を有するために必要・最低限のモニタリング個数を科学的アプローチによって提案する。

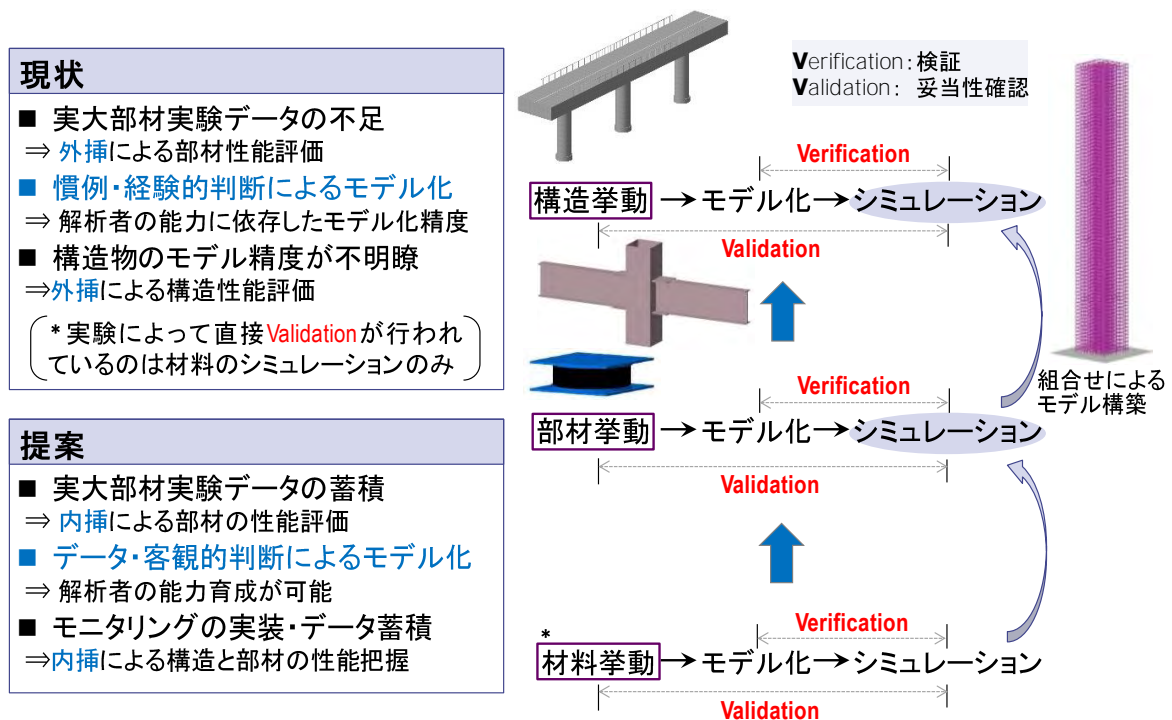


図 3 建築産業における V&V 方法論

3.3 シミュレーションの適用性拡張

自動車など他分野では、シミュレーションと実験の組合せにより製品の性能が高められるのに対し、3.2節で述べたように建設物の場合その大きさから通常は実験では試されず、シミュレーションに依存している。つまり性能予測を前者は内挿、後者は外挿で行い、建設産業ではシミュレーションの基本であるV&Vがなされていないのが現状である。

よって、部材レベルでの実験とシミュレーションによるV&Vに加え、実際の大型構造物の高密度のモニタリングを行い、中から大の地震発生の際の期間のスパンでシミュレーションの精度評価を行う。この詳細は全国レベルでその建物データを増やすことでこれを実現し、データ管理・蓄積・公開によりサステナブルPDCAサイクル（付図2）の実現をめざす。

また、データをもとに被災度判定などから要求される客観的な評価方法を確立し、さらに都市防災や機能維持のための都市シミュレーションおよび評価方法の確立につなげる。図4は建設物の被災後の機能回復性への高精度シミュレーション・高密度モニタリングの効果を示している。高密度モニタリングにより復旧に必要な判定期間が最短化され、また、データ活用により復旧作業の準備期間も短縮でき、さらにモニタリング以前の設計段階で、高精度のシミュレーションによりこの建設物の性能を高めていることから地震時の損傷度も抑えられ、結局、従来のケースに比べ格段に機能回復性が高くなると考えられる。高精度シミュレーション・高密度モニタリング、被災度判定、機能回復性の評価プロセスの一連のビッグデータのつながりをAIに学ばせ、構造モデル化や損傷パターン予測などに新たな技術展開もできると思われる。

また、様々なインターフェースの高度化もなされ、その成果を活用して構造シミュレーションの「簡単なソフト」を目標とすることもできる。つまり、これまで専門家が自己の経験に基づき入力せざるを得ないところもあったシミュレーションから、豊富な客観的情報に基づき様々な入力データを自動的に決めるようなシミュレーションへと変化させる。この波及効果として、これまで時刻歴応答解析を用いないと設計できない免震・制振技術を中小規模の企業も扱えるようになり、様々な規模の建物に使用されるようになるために市場の顕著な拡大が望める。

このように、本プロジェクトで考えるシミュレーションの高度化として、高精度化、モニタリングとの連携、PDCAサイクルへの組み込み、個々の建設物や都市レベルでの被災度判定、インターフェース高度化によるシミュレーション入力の簡便化、これらによる高性能構造の普及がある。つまりシミュレーションの高度化を多角的に行い、その波及効果も含め産業競争力を高める。

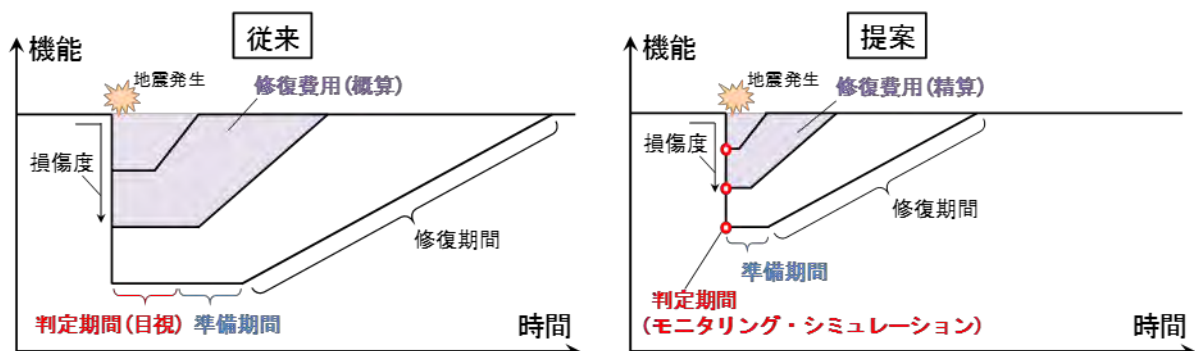


図4 シミュレーションの高度化によるレジリエンシー（機能回復性）の向上

3.4 民間・公共建設物へのセンサー導入とモニタリング

カリフォルニア州の CDMG (California Division of Mines and Geology) の CSMIP (カリフォルニア強震観測プログラム; California Strong Motion Instrumentation Program) では、1972 年以降、250 以上の構造物 (170 の建物、60 の橋、20 のダムなど) に強震計を設置してきた。州で設計・施工される建物には強震観測のための課金があり (建設コストの 0.07~0.14%)、プログラム遂行の基金となっている。州法により地震工学の技術者と研究者からなる諮問委員会を設置し、基金による建物や地盤、他の構造物 (橋、ダムなど) の強震観測が遂行されている。選ばれた建設物には、CSMIP によりセンサー設置、観測、データ取得が行われる。地震発生後まもなくデータが公開され、各種構造物の設計者、研究者により盛んに利用されている。

この仕組みの拡張として、センサーの数を格段に増やしたモニタリングを提案する。全国 8 地方における大型建設物に対し、それぞれ約 1000 のデータ観測点を設ける。図 5 の東工大の 20 階建免震構造には、おそらく日本で最多の 84 観測点が設けられ、加速度、歪、免震層変位、ダンパー力、風速が常時モニタリングされている。各点で平均 40 万円の費用がかかったが、本提案では 5 万円程度を目指す。計 1000 点ということで、構造躯体のほか非構造材も観測する。建築であれば電気・空調・水道・エレベーターなどの設備、天井・間仕切壁・内外装材など非構造材が、建築コストの 7~8 割を占め、機能維持性を左右するため、近年盛んに研究されている。それらを反映した破壊のシミュレーションのため詳細な観測データを得る。科学技術振興機構の産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (OPERA) で東工大 SOFTech が進めているセンサリングの共同研究の成果も活用する。CSMIP の日本版の可能性を省庁に相談する。

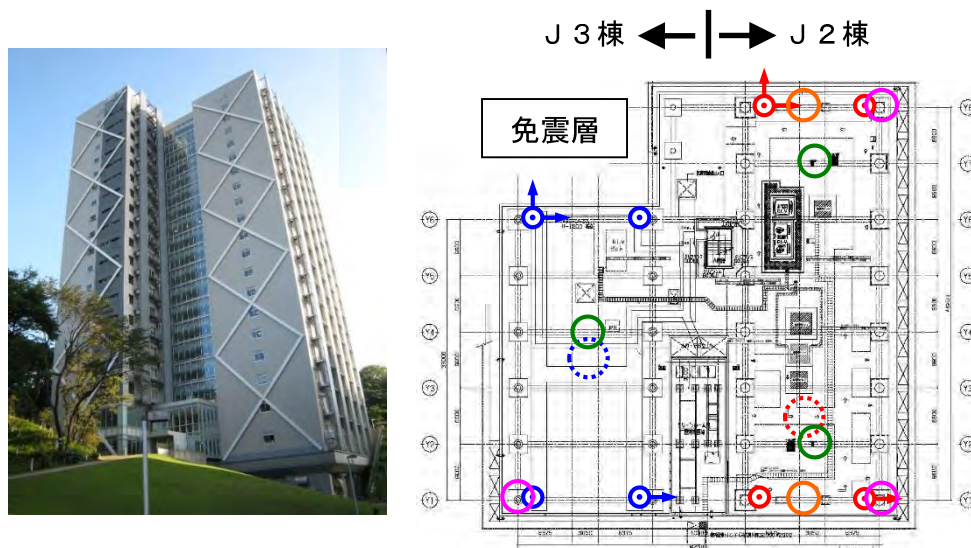


図 5 東工大 J2 および J3 棟 (20 階建免震構造) 地震応答観測点数=84

3.5 観測記録の利用による設計法 PDCA サイクル

先に示した付図 1 左のように、従来の PDCA サイクルは、地震被害を目視などにより分析し、被害原因を経験的知見で推定することで設計条件の更新をしてきたが、経験的知見に基づく評価は個人差によるばらつきが大きく、分析も地震被害が起こってからでないとできないものであった。一方、前述の構造部材、免震・制振部材の評価方法の現状と V&V の観点から、より高性能の巨大建設物を実現するためのサステナブル PDCA サイクルは、付図 1 右に示すものとなる。本サイクルは、大型構造物の構成要素のモデル化および実験での確認、構成要素の客観的評価データの入力による建設物全体のシミュレーション、構造物内の様々な構造部材、非構造材、設備など各所の振動モニタリングによる検証により構築される。モニタリングデータは、建設物のサステナビリティの向上や地震後の被害緊急判定、ひいてはリジリエンスの評価にも活用できるだけでなく、必ずしも地震被害が起こらずとも、日常的な小さな振動の観測による評価も可能である。

3.6 シミュレーション専門家の育成

建設物の V&V による HQC (High Quality Computing) を促進する建設物シミュレーション専門家の能力育成および資格化の仕組みをつくる。建設物の倒壊挙動などの複雑系問題は複数の解候補を有している可能性があるために、解析ツールがあれば誰もが真の解を求められるわけではない。物理的な側面と数理的な側面の両面に精通している必要があり、これを満足する専門家は現段階では一握りしかない。

したがって、長期的観点から、AI を利用したマン・マシン・インターフェースの構築も産業競争力を向上させるために不可欠であると言える。また、長期的目標を達成するために、短中期的に当該インターフェースの構築に向けてなすべきこととしては以下の事項が挙げられる。

1) 従来の単なるオペレーターとは異なる複雑系問題に対して適切なモデル化を設定し適切な解を見出せる能力を職能として設立する。この職能を社会的に認知させるために、能力に応じた資格制度（例えば構造設計一級建築士や技術士に相当するもの、または日本機械学会による計算力学技術者に相当するもの※）を導入する。

2) 長期的目標である AI によるインターフェースは機械学習による高度な自動モデリングを可能とするものであるが、これを達成するためには膨大なモデリング情報から成るデータベースが必要となる。このデータベースは適正なモデリング情報のみから成るものでなければならず、上記の有資格者制度によって選別された専門家による確かなシミュレーション情報を集約する必要がある。

※計算力学技術者資格認定事業委員会、日本機械学会：固体力学、熱流体力学、振動分野ごとに上級・一級・二級・初級が設定されている。5年ごとに更新 (<https://www.jsme.or.jp/cee/>)。

第4章 最終報告書に向けた検討上の課題と展開

プロジェクト最終報告書に向けた検討項目 a)～c)、およびプロジェクト終了後の出口からの取り組みにおける検討項目 d)～e)を図6に示す。具体的には、3章で述べた将来の「シミュレーション高度化機構（仮称）」の活動項目 1)～6)の必要性や効果、その実施の体制の準備段階での検討である。以下に説明する。

4.1 プロジェクト終了までの取り組みと出口

図6の検討項目は、a) シミュレーション高度化の様々な効果を考えて産業競争力の観点からその必要性を明らかにする。b) その実施機構の必要性と体制を具体的に考える。c) どのような研究項目についてどのような研究者・企業の協力を得てそれらに取り組むかを検討するものである。

活動項目 1), 2) は実験とシミュレーションおよびその V&V に関するものであり、a) 東工大と WG1 (ゼネコン)、WG2 (メーカー) により部材レベルでのシミュレーション精度向上の効果と必要性を検討する。b) 国内外の実験施設の状況の把握と施設ネットワーク構築、梁・柱・基礎・壁・免震支承・制振ダンパーなどの非競争領域の実験研究・シミュレーションの課題設定を行う。c) 日本建築学会、土木学会、建築研究所、土木研究所、および他分野のシミュレーション専門家との相談に基づき、部材レベルでの V&V 実施の検討を行う。

活動項目 3), 6) はシミュレーションの適用性拡張とその専門家の育成に関するものであり、a) WG3 (大学、設計事務所、ゼネコン、メーカー、構造ソフトメーカー) およびデータ活用や AI に関する様々な専門業者のアウトソーシングにより、シミュレーションとデータの多岐にわたる活用、およびその効果と必要性を検討する。b) WG3 が府省関係者、および建設系の諸学会・協会との相談により、シミュレーション精度の管理と向上、およびデータ活用を行う第三者機関の内容と体制を考える。c) 高精度シミュレーション・高密度モニタリング、被災度判定、機能回復性の評価プロセス、それらのビッグデータの機械学習による展開などを検討する。

活動項目 4), 5) はモニタリングとそのデータ活用による設計法 PDCA サイクルに関するものであり、a) WG3 および東工大 SOFTech が進めるモニタリングの課題 4, 5 の研究グループにより、従来の小規模なものと対比して高密度観測の必要性と効果を明らかにする。b) 米国 CDMG のようなデータ共有の制度化に関する府省関係者との相談により日本版の制度の構築を検討する。c) 構造部材、非構造部材、設備などに対し、モニタリングすべき応答や、そのための必要なセンサーの機能や数量、データサイズなどを検討する。

4.2 プロジェクト終了後の出口での直近の取り組み

図6の検討項目 a)～c) に基づき、d) 東工大を中心にシミュレーション高度化の産学協同研究・オープンイノベーションの活動を官のサポートにより開始する。その研究・検討内容は、d-1) 海外施設の利用も含めた実験により、シミュレーションの精度検証およびその改善を様々な構造部材、免震部材、制振部材について行なう。d-2) 建設物の高密度モニタリングの候補として全国 8 地方の建設物、およびモニタリングの詳細を特定、かつその数年後に実行する。d-3) 部材のレベル、および外挿により建てられる建設物のレベルそれぞれを対象とした V&V 方法論の実施を試

みる。また、その基盤となる専門家の養成および資格制度の実施も検討する。

なお、本プロジェクト終了時に、WG1～WG3を含めた実行組織は解散するが、府省関係者との相談により官のサポートを得て、「シミュレーション高度化機構（仮称）」の準備組織とも言える産学コンソーシアムを設立し、上記の活動を開始するという計画である。現在はWG1に大手ゼネコン5社が参加しているが、コンソーシアムでは中堅19社の参加も要請する。

また、図6が示す長期的な取り組みにもここで言及しておく。本プロジェクト終了後、産学官の連携により上記6項目をアウトソーシングも活用して検討する。本機構設立e)までの7年間で、基本的な構造部材、免震・制振部材の実験の必要規模の特定、国内外施設を用いた実験を行う。同時に、CDMGのような課金システム・データ公開の制度化に3年、加えて4年で公共・民間建設物へのセンサー導入を実現する。機構設立後もシミュレーション精度向上・管理、建設物のモニタリングは継続し、中から大規模の地震動に対する多くのモニタリングデータの取得と公開まで30年にかかるが、2050年までに多くの成果が出ると思われる。

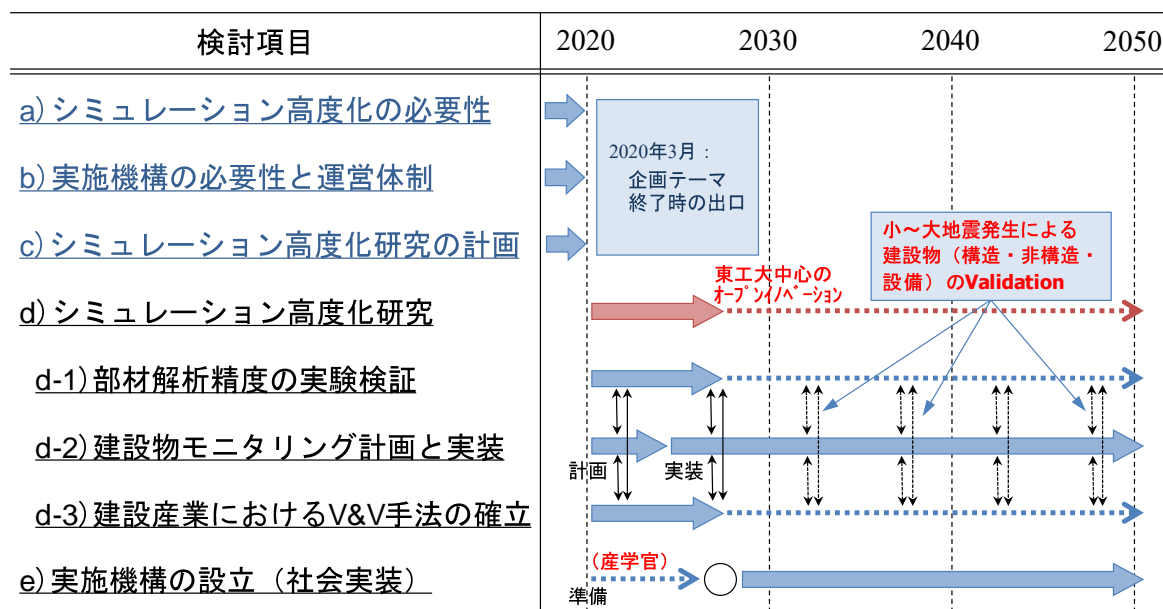


図6 マスタープラン

4.3 その他の取り組み

検討中の課題のうち、現段階で重要と思われるものを記述しておく。

競争領域と非競争領域のバランス：まず、一般的に用いられる構造部材と対比して、製品化されている免震・制振部材については、実大・実速度での実験が不可欠と考えられるが、メーカー1社ではできない規模なのでゼネコンとメーカーの共同検討が必要となる。最近重要視されてきた多数回の繰返し実験などは、長周期長時間地震に対する大変貴重であるが、実験時間も長く多くのパラメータの検討が困難である。こういった場合に、これらの実験データの公開を前提とした非競争的研究は大変意義があると思われる。ただし一般の製品でなく、特にゼネコン中心の開発品に関しては、競争領域と非競争領域のバランスが重要であることを踏まえ、協力体制を築いていく必要がある。

シミュレーション法のオープンソース化：建設のためのシミュレーション法の精度確認が海外でも必要視されてきており、そのオープンソース化で透明性が向上し、多くの人によるプログラム改良も可能になり、最新の技術が利用できるという意見がある。これによって建設業の国内外での正当な競争を促すことにもなると思われる一方、プログラムを利用する企業、研究機関などが、プログラムに組み込んだ know-how の流出を恐れてなかなかオープン化は進んでいない。また、プログラムのインターフェイスの扱い易さやメンテナンスなどの諸問題もある。

これに対し例えば「認定機関が設定する数種の実大試験結果を要求する精度で予測できること」を使用可能なシミュレーションの満足すべき仕様とするという考えもある。この「数種」をうまく設定して通常用いられるシミュレーション技術を正確に評価するということである。数値解析ベンダー間の自由競争原理による使いやすさや拡張性の改善は目を見張るものがあり、技術の裾野を広げる役目を果たしている。上記方法であれば、このような自由競争を損なうことなく、所望の目的を果たせるという考えである。

本プロジェクトにおいて、透明性は重要であるが、一方でソフト会社には困難な面もあり、これらを踏まえなければならない。これまでシミュレーション技術は、各研究機関にて個別に開発が進められており、論文などで公開にとどまっている。技術開発の効率化、スピードアップのためには、過去に構築したものなど公開可能な基本プログラムはオープンソースとして共用できる環境を整え、個々の機関が新たに開発する部分についてはサブルーチンとしてその機関のみが占有できる形態が望ましいと考えており、このバランスの設定を考えていく。また、入出力を含めた、解析の幹の部分（新規部分以外）を誰がどのように用意するか、このシステムの維持管理のための費用や人材どうするかなども課題である。

統合化構造解析法・インターネット活用によるシミュレーション高度化：各種の構造部材に関し研究者がそれぞれ開発した異種サブプログラムをインターネットを通じて統合し、構造物全体を高精度に解析する「統合化構造解析システム」が多田らにより提案された。新たな汎用プログラムの作成や個々のサブプログラムの開示の必要性が無い場合、シミュレーションの高度化に適していると思われる。その今後の方向性を検討する。

都市災害シミュレーションへの貢献：都市を対象とした統合解析は、広範な土地と土木建設物をメッシュで分割してFEM解析を行うものであるが、その土地に建つ建築物は地図情報を基に質点系として簡易的に構築されている。都市の被害状況を把握するためには個々の建築物の損傷状況を正確に捉える必要があるが、質点系の解析ではその精度に限界がある。しかし、全ての建築物を細かなメッシュで刻んでFEM解析を行うには計算負荷が膨大となり現実的ではないため、本プロジェクトで考慮する効率的で精度のよいシミュレーション技術が都市災害シミュレーションに貢献できると考える。

その他：本テーマが社会的ポリシーの推進に寄与できることは重要であるため、SDGs 9「強靱（レジリエント）なインフラ構築、包摂的かつ持続可能な産業化の促進及びイノベーションの推進を図る」、SDGs 11「包摂的で安全かつ強靱（レジリエント）で持続可能な都市及び人間居住を実現する」、SDGs 17「持続可能な開発のための実施手段を強化し、グローバル・パートナーシップを活性化する」の観点から本プロジェクトの自己評価を行っていく。また、ビッグデータの活

用という面から、Society5.0 への寄与についても検討を加える。さらに、SOFTech (OPERA) の進展と繋げたモニタリング方法の考察、また、建設物のシミュレーションと合わせて、BIM (Bldg. Information Modeling)、 AIM (Architect Integrated Modeling)、 BSM (Bldg. Structure Modeling)の融合による安全性・機能性・審美性・施工性を包括した建築統合モデリングの方向も検討する。

4.4 想定しているコンソーシアムの主体や組成

4.2 節で述べたように、本プロジェクト終了時に、WG1～WG3 を含めた実行組織は解散するが、府省関係者との相談により官のサポートを得て、「シミュレーション高度化機構（仮称）」の準備組織とも言える産学コンソーシアムを設立するという計画である。

これに対し、現在の WG1 の参加メンバーの大手ゼネコン 5 社に加え、中堅 19 社の参加も要請する。また、WG2、WG3 に属する他大学、設計事務所、メーカー、構造ソフトメーカー、およびアウトソーシングの企業も参加することになる。東工大は、オープンイノベーションの中心的役割を機構設立後も担うこととする。

一般社団法人 産業競争力懇談会（COCN）

〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-1

日本プレスセンタービル 4階

Tel : 03-5510-6931 Fax : 03-5510-6932

E-mail : jimukyoku@cocn.jp

URL : <http://www.cocn.jp/>

事務局長 中塚隆雄