【大型構造物の次世代評価法】

2020年2月12日

産業競争力懇談会 COCN

【エクゼクティブサマリ】

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「国土強靭化基本計画」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を考慮した設計の技術的助言を行い、さらに機能継続ガイドラインにより、重要建設物の構造、非構造、設備の損傷を精確に評価し、機能維持性という従来の要求より高い性能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。都市や産業の中枢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、今後は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、そのためシミュレーション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品質保証が、建設産業でも必要である。さらに V&V 成立のため、建設物の構造部材、免震・制振部材など構成要素の実験データ、地震応答モニタリングによる観測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相当の安全率を見込んで設計せざるを得ず、 大型建設物のコスト増を招いていると思われる。より高い性能が必要視される今後、上記の客観 的情報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。また、高精度化の過程で様々な周辺技 術(次章)を開発して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は、縮小実験結果の外挿によることが多いと言える。使用可能な 範囲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、これと地震応答モニタリング結果の PDCA サイクルへの組込みにより、解析の V&V も 進める。以上より、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 簡単化、高性能構造の普及を目指す。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、多角的なシミュレーションの高度化と波及効果がお こり、産業競争力を高めると考えている。

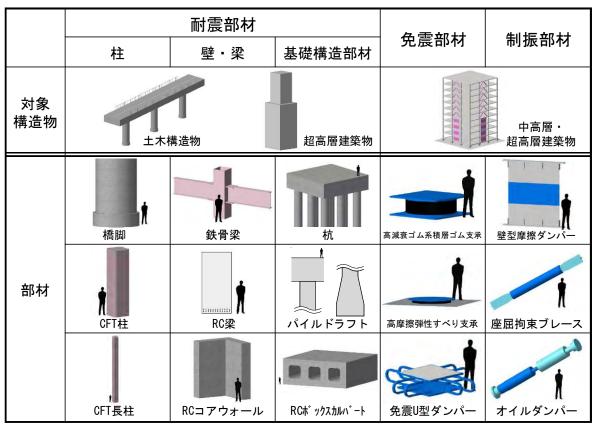
3. 産業競争力強化のための提言および施策

今後の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、イノベーション、コスト抑制にとって、精度の高いシミュレーションが不可欠である。本提言は、産官学の協力により、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を目的とする。

リーダー東工大とコ・リーダー日本製鉄が、オールジャパンの産官学のチームを結成し、今後5年間に以下の準備と試行を行っていく。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を計画・遂行する、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)普及してきた従来型の地震応答モニタリングの活用・施策、格段に多いセンサーによる高密度モニタリングを計画・遂行する、5)実験やモニタリングのデータによる V&V と建設物の設計・評価法の PDCA サイクルを回す(付図2)、6)V&V による HQC(High Quality Computing)と様々なデータ管理も行う専門家の能力育成と資格化の仕組みをつくる。また、これらと並行して「シミュレーション高度化機構(仮称)」のあり方の検討と府省との議論を重ね、5年後以降に政府に設立の提案を行う。

4. 本プロジェクトの出口

今後3年の準備期間と2年の試行期間において、構造物の建設実績と産業競争力向上に向けた構想をもとに3章で述べた活動項目1,3,4)を「産」が、ビッグデータ構築の経験と制度化に向けた準備のために活動項目5)を「官」が、シミュレーションの高度化に関して専門的な知識と経験を用いて活動項目2,4,6)を「学」が、推進主体となる。これらの活動に際しては、それぞれの得意分野に応じて産官学が活動を補助する。5年目以降は官主体の機構が、産学の協力のもとシミュレーション高度化の推進、監督、実験・モニタリングによるビッグデータの管理のみならず、日本の優れた技術と製品を国際標準化に繋げることでその価値を創出する。



※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)

従来のPDCAサイクル

Plan:構造設計(構造解析)



Do:建設(センサーなし)



地震被害の発生まで待つ

Check: 目視等による分析



経験的知見

Action: 設計条件更新

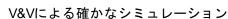
地震被害が発生したときのみ、被害形式を目視等で分析し、被害原因を経験的知見で推定

※ サイクルは被害発生まで停滞。目視では広さ・ 深さがない。経験的データは客観性を欠く。

サステナブルPDCAサイクル

Plan: 建築統合解析

(構造・非構造・設備)



Do:建設(センサー内蔵)

小中大地震、起振機加振による データ(必ずしも被害ではない)

Check: データによる客観的分析

モニタリングと部材実大実験 によるV&V

Action:設計条件更新

部材実験、構造物モニタリング、 高精度解析により、被害原因を<mark>客</mark> 観的情報で同定し、次世代に継承

※ サイクルを被害前から回す。Society5.0適合 データ。客観的データを継続的に累積していく。

付図 2. 従来の PDCA サイクルと V&V を取り込んだサステナブル PDCA サイクル

【目次】

		Page
第1章	章 本プロジェクトの基本的な考え方	
1. 1	背景	4
1. 2	2 目的と構成	4
第2章	章 検討の視点と範囲	
2. 1	これまでのプロジェクト活動	6
2. 2	2 強い揺れで損傷する構造部材の現状調査	8
2. 2	2. 1 調査項目と背景	8
2. 2	2. 2 調査結果:シミュレーションの現状	8
2. 2	2. 3 調査結果:今後の展望	8
2. 3	3 揺れを低減できる免震・制振部材の現状調査	11
2. 3	3. 1 調査項目と背景	11
2. 3	3. 2 調査結果:シミュレーションの現状	11
2. 3	3. 3 調査結果:今後の展望	12
2. 4	l シミュレーションの高度化と産業競争力	12
第3章	章 産業競争力強化のための提言および施策	
3. 1	建設産業における V&V 方法論と実行	15
3. 2	2 V&V を取り込んだサステナブル PDCA サイクル	16
3. 3	3 部材の非競争的実験研究・シミュレーションの計画	17
3. 4	トストライス 日間・公共建設物へのセンサー導入とモニタリング	19
3. 5	5 シミュレーション専門家の育成	21
3. 6	ら シミュレーションの適用性拡張	21
第 4 章	章 実大実験の計画	
4. 1	実大実験に使用する試験装置	23
4. 2	2 強い揺れで損傷する構造部材の実験計画	24
4. 3	3 揺れを低減できる免震・制振部材の実験計画	27
4. 3	3. 1 免震支承の圧縮+水平1方向動的加振実験計画	27
4. 3	3. 2 免震支承の圧縮+水平 2 方向動的加振実験計画	28
4. 3	3. 3 ダンパー部材の水平1方向動的加振実験計画	29
4. 4	1 実験方法の規格化	30
第5章	章 モニタリングの計画	
5 1	イ 従来型のモニタリングと高密度モニタリング	32

5.	2	;	全体応答のモニタリング	33
5.	3		局所応答のモニタリング	34
5.	4		非構造部材・設備のモニタリング	36
5.	5		センサーおよび記録・報知システムの開発	37
5.	5.	1	センサー	37
5.	5.	2	センシングデータの同期	37
5.	5.	3	データの記録および保守	38
5.	5.	4	報知システム	39
5.	5.	5	目標コスト	39
5.	6		既存超高層建物の高密度モニタリング試行	40
5.	6.	1	耐震構造(地上30階建)	40
5.	6.	2	免震構造(地上 20 階建)	42
5.	6.	3	制振構造(地上 54 階建)	44
第6	章		シミュレーションの高度化のための方策	
6.	1	!	学会による活動	46
6.	1.	1	日本建築学会における動き	46
6.	1.	2	確かな実験・解析データの構築	46
6.	1.	3	エンジニアの育成	47
6.	1.	4	BIM や AI などへの展開	48
6.	1.	5	モニタリング普及に向けた委員会活動	48
6.	2		シミュレーションについて過去に行われた精度確認	49
6.	3	;	実験とシミュレーションに基づく国際標準化	51
6.	4		シミュレーション技術の開発と管理	52
6.	5	;	米国・日本におけるモニタリングと制度	53
6.	6		日本の国家プロジェクトとの関連	54
第7	章		プロジェクト出口と展開	
7.	1		産業競争力と国土強靭化	56
7.	2		本提言内容の要約	57
7.	3		プロジェクト出口	58
7	4		その他	62

【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)

芝浦工業大学 名古屋工業大学 石川 裕次 市之瀬 敏勝 大崎 純 京都大学 大町 達夫 東京工業大学 小野 徹郎 名古屋工業大学 川畑 友弥 東京大学 吉敷 祥一 菊地 優 北海道大学 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 信州大学 広島大学 中込 忠男 中村 尚弘 藤倉修一 久田 嘉章 工学院大学 宇都宮大学

藤野 陽三 横浜国立大学 堀 宗朗 東京大学/海洋研究開発機構

三田 彰 慶應義塾大学

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 福喜多 輝 日本製鉄 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 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

佐藤 貢一 大成建設

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「国土強靭化基本計画」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と経済性が高められるが、 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、今後は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ことが望まれる。過剰な安全率やコスト増加を抑制して、優れた部材と 構造の開発を行うために、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とって、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。現状では、実験データをもとに解析法やモデル化を調整する必要があり、一方、実験で全て計測できる訳ではないため、調整そのものも困難なときがある。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(破断・破壊に至る状態)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、産官学の協力により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技術組合についてまず説明し、その活動計画案を述べる。技術組合は、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章ではシミュレーションの V&V を実践するためのデータを集めるべく、海外の施設を使用した大型構造部材の実大実験計画、5章では構造物のモニタリングに必要なセンサーやその特徴、高密度モニタリングを実現するための方策と実際の建物を例にしたモニタリングの実施計画を述べる。6章では、シミュレーション技術を高度化させるために必要な施策として、解析を行う技術者のスキルに着目した資格制度の概要や、構造物のモニタリングを実装させるための政策、国が主導する他プロジェクトと本提案の関係を述べる。7章で本提案の総括を述べる。

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 3 頁、活動を 7 頁の表に示す。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。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、検討分担する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。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、検討分担する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、以上に基づき中間報告書を提出した。

その後、COCN 実行委員会での議論、WG1~3 での議論、リーダー会議での議論、内閣府、文科省、経産省、国交省との懇談会および各府省への訪問を行い、頂いたご意見に基づき内容を修正・追加した。特に、国土強靭化の観点から V&V を取り込んだサステナブル PDCA サイクル、構造関連のデータ基盤の構築と質の確保、構造部材、免震・制振部材の実験の具体的な案、実験法・評価法・シミュレーションの国際標準化への展開、最近盛んになった従来型モニタリングの考慮、進歩したセンサー技術を踏まえた安価な高密度モニタリングシステムの具体的な案などを強調した。また、その後の実行委員会での再度の議論を経て、最終報告書の内容を決定した。

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 : 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(依頼した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

9月18日 : COCN 実行委員会にて中間報告

10月3日 : COCN 理事会にて中間報告

10月14日: WG3のメンバーへここまでの検討報告と意見集約

10月16日 : プロジェクト第3回検討会

11月18日: WG1第3回検討会、実大実験とシミュレーション

11月20日: 内閣府、文科省、経産省との懇談会

11月27日: WG2第3回検討会、実大実験の相談、製品を超えた非競争領域実験検討

12月6日 : WG1 第4回検討会、実大実験とシミュレーション

12月11日 : 国交省との懇談会

12月26日:文科省訪問、内閣府訪問、意見交換

1月6日 :経産省訪問、意見交換

1月10日 : 国交省訪問、意見交換

1月11日 : WG3 検討会、シミュレーション高度化、V&V 方法論など

1月22日 : リーダー会議 (WG1, 2, 3)

1月24日 : COCN 実行委員会にて最終報告

2月12日 : COCN 理事会にて最終報告

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、表中の柱・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か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アウトソーシングなども活用して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、および過剰な安全率の抑制と経済性の確保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耐力低下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

	表 I-I 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	評価方法/備考				
1	橋梁/橋脚/3,100mm 3100m	高さ: 7,500mm 直径: 2,200mm (縮小比3/5)	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。				
2	超高層建築物(200m超) CFT柱/Fc=150N/mm ² 590N鋼、□-1050×1050×40mm	□-250×250×9 (縮小比 1/4) Fc=167.3N/mm ² SA440(F=590N/mm ²)	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:□-250×250×9 ⇒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:終局強度について、鋼材とコンクリートの一般累加式 (高強度のため適用外)を実験により検討し、コンクリート強度 に低減係数0.7を採用することで安全側に評価できることを確 認した。				
3	28250mm 1450mm CFT 柱 超高層建築物/CFT柱 / ロー1450×1450×50mm (長さ28.25m)	解析のみ	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Fc=80N/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、柱が弾性限 耐力以内となることを確認				
4	8500mm 杭 地中構造物/杭基礎 フーチング8,500×8,500mm、杭直径1,200mm	フーチング:88mm 杭直径:48mm (縮小比1/25)	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				
5	4000mm パ゚イルト・ラフト 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	杭直径:1,100mm 杭長さ:約40,000mm (縮小比2/5)	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				
6	RCコア 超高層集合住宅(200m) /RCコアウォール /Fc=120N/mm², 壁厚750mm	壁厚100mm (縮小比 1/8)	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				
7	→ 300mm 2000mm 壁 ・ 300mm ・ 300mm ・ 300mm ・ 300mm ・ 400mm ・ 300mm ・ 300mm ・ 300mm ・ 400mm ・ 400mm ・ 700mm ・ 700mm	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)	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				

注:人の寸法は1,700mm、RCは「鉄筋コンクリート」、CFTは「コンクリート充填鋼管」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	2940mm 楽 土木一般構造物/RC梁/1500×2940mm	有効せい 100〜3,000mm (縮小比1/30〜2/3〜1)	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): 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、有効梁せいの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
9	t	H-500×200×10×16 (縮小比1/2~4/5)	用途:中高層建築物 構造要素:鉄骨梁(梁端拡幅) 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
10	地中構造物/RCボックスカルバート /16,000×16,000×5,900mm	解析のみ	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

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	300mm 30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	限界線図 実機により検証 繰返し特性(高速) 直径250~1,000mm	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 カ学モデル: 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				
2	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	基本特性・疲労特性 実大・縮小で検証 終局特性 実大・縮小で検証	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				
3	1500mm 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	縮小試験体 直径300~800mm	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				
4	高減衰ゴム系積層ゴム支承 高減衰ゴム/直径1,800mm	限界性能 実機により検証	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%、せん断応力 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				
5	板厚 55mm 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	基本特性・疲労特性 実機により検証 終局特性 実機により検証	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、水平荷重: 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(破断までの繰り返し回数が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				

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

	表3 揺れ	1を低減できる制振	Kaptyy O2 見 T
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	3000mm 壁型粘弾性ダンパー /鋼材 (SM490A、SS440)、粘性体 /幅:4m、高さ:3m、重量:5ton	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	型型摩擦ダンパー/鋼材(SM490A、SS440)、 摩擦(摩擦材、ステンレス材) /幅:2.5m、高さ:1m、重量:1ton	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	摩擦ダンパー/樹脂系摩擦材/ PL-1,925×890、+-350×350×25	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	粘弾性部 粘弾性ダンパー/鋼材(SS400、SM490A) スチレン系エラストマー/幅:1,800mm 高さ:2,075mm、厚み101mm	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 カ学モデル: 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 γ =300%とし、終局せん断ひずみは γ =450%以上である
5	摩擦機構部 粘弾性部 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	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) カ学モデル: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:長時間繰返しの性能についても確認している
6	座屈拘束部 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	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	ダンパー部 オイルダンパー /鋼材、摺動金属、鉱物油/直径355.6mm	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

今後の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、イノベーション、コスト抑制にとって、精度の高いシミュレーションが不可欠である。本提言は、産官学の協力により、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を目的とする。

リーダー東工大とコ・リーダー日本製鉄が、オールジャパンの産官学のチームを結成し今後 5 年間に以下の準備と試行を行っていく。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を計画・遂行する、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) 普及してきた従来型の地震応答モニタリングの活用・施策、格段に多いセンサーによる高密度モニタリングを計画・遂行する、5) 実験やモニタリングのデータによる V&V と建設物の設計・評価法の PDCA サイクルを回す (図 2)、6) V&V による HQC (High Quality Computing) と様々なデータ管理も行う専門家の能力育成と資格化の仕組みをつくる。また、これらと並行して「シミュレーション高度化機構 (仮称)」のあり方の検討を重ね、府省との議論も進めることにより5年後以降に政府に設立の提案を行う。

3.1 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 1) 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にも述べてきた。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マ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(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。

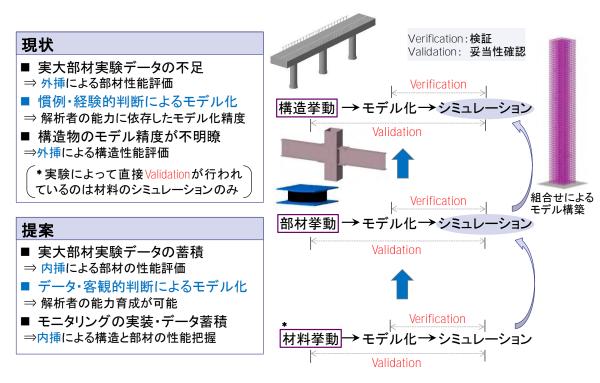


図1 建築産業における V&V 方法論

3.2 V&V を取り込んだサステナブル PDCA サイクル

図2左に示すように、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。これと対比して、実大部材実験結果とモニタリングデータに基づくV&Vが達成されることは、図2右に示すように、建設物の被害要因と程度を客観的な情報により判定することが可能となる。また、目視による被害把握が困難な中小地震による軽微な被害も判定することができるため、持続的なサイクルにより構造物ひいては都市の機能維持性能が格段に向上し、地震発生後のリジリエンシーの評価にも活用できる。

サステナブル PDCA 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。ソフトウェアあるいはモデル化の改善などの課題を明確にすることによる構造解析技術を進化させる直接的な効果のみではなく、建設物の構造設計を行う上で用いられている構造計算上の大前提となる仮説や

仮定の妥当性検証も可能となり、日本の建設技術の客観的な信頼性を向上させる効果を有している。客観的な信頼性は、国際社会における日本の建設技術の競争力を向上させる原動力となるべきものであり、実大・縮小実験の徹底と世界に先駆けた高密度モニタリング構想、それらの実験データと計測結果を用いた建築産業の V&V 方法論を早急に実現することが望ましい。

従来のPDCAサイクル

Plan:構造設計(構造解析)

Do:建設(センサーなし)

地震被害の発生まで待つ

Check:目視等による分析

経験的知見

Action:設計条件更新

地震被害が発生したときのみ、被害形式を目視等で分析し、被害原因を経験的知見で推定

※ サイクルは被害発生まで停滞。目視では広さ・ 深さがない。経験的データは客観性を欠く。

サステナブルPDCAサイクル

Plan: 建築統合解析

| (構造・非構造・設備)

y&Vによる確かなシミュレーション

Do:建設(センサー内蔵)

小中大地震、起振機加振による データ(必ずしも被害ではない)

Check: データによる客観的分析

モニタリングと部材実大実験 によるV&V

Action:設計条件更新

部材実験、構造物モニタリング、 高精度解析により、被害原因を<mark>客</mark> 観的情報で同定し、次世代に継承

※ サイクルを被害前から回す。Society5.0適合 データ。客観的データを継続的に累積していく。

図 2 従来の PDCA サイクルと V&V を取り込んだサステナブル PDCA サイク

3.3 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 の耐力低下の基礎データ構築、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 3)。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。



愛知工業大学



東京工業大学



福山大学



建築研究所



防災科学技術研究所



土木研究所

写真は下記より引用・掲載させていただいております。

 建築研究所
 : https://www.kenken.go.jp/index.html

 土木研究所
 : https://www.pwri.go.jp/

工不研先所 : <u>http://www.pwri.go.jp/</u> 防災科学技術研究所 : <u>http://www.bosai.go.jp/</u>

福山大学 : http://web.fukuyama-u.ac.jp/hrc/index.html

愛知工業大学: http://www.ait.ac.jp/

図3 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4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)-世界初の規模!

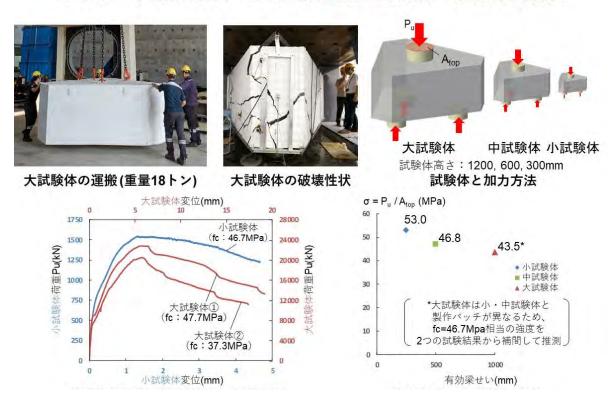


図 4 東工大・名工大と台湾地震研究所・国立成功大学の共同実験

3.4 民間・公共建設物へのセンサー導入とモニタリング

建設物の地震・台風時の挙動と損傷を高精度で再現するシミュレーションの V&V は、実験室レベルの実験結果を V&V の素材とするだけでは不十分であり、実在する建設物の観測記録を V&V の対象として初めて完結する。また、そのときの建設物の加速度や変位など全体応答は、柱や梁など多くの部材の局所挙動の結果として現れるものである。一般に、柱や梁に発生する応力などの内部の状態が正しく再現されていなくても全体応答がもっともらしく再現される可能性があるが、建物の崩壊挙動まで高精度でシミュレーションするためには内部の状態を正しく再現しなければならないことは言うまでもない。

このため、真の V&V を達成するためには局所挙動までを含めた計測結果と解析結果を照合しなければならなく、このための「高密度モニタリングシステム」は局部に至る変形の度合いをも計測することを目的としたものである。つまり 10~20 点の全体応答のみの計測データを用いた従来型モニタリングとは全く異なるものである。

因みに、妥当性検証 (validation) は必ずしも大地震や暴風時ばかりではなく当該建物が有感地震

程度の小さい外乱を受ける場合についても行われるべきであり、モニタリングシステムが設置されたならば直ちに V&V 用のデータが手に入ることとなる。また、建設物の規模によるが、起振器で建設物の微振動を起こすことも可能である。

このような V&V の試みは土木分野では土木建設物が公的なものであることもあり、論文として報告された事例もあるが、建築物の多くは民間所有のものであるためにコスト面からほとんどなされてきていない。このため、建築において真の V&V はこれからであり、高密度モニタリングは直ちに実施されるべき課題である。

なお、高密度モニタリングへの挑戦から培った低コスト化の技術により、従来型モニタリング がより身近になり多くの建設物に適用されると期待できる。このことは 5 章で述べ、以下には現 状日本国内で最も高密度と思われる事例を紹介する。

図5の東工大のJ2棟(20階建免震構造)には45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。すなわち、高密度ではないが全体応答と一部の局所応答までをモニタリングする希少な例である。本建物は2005年に竣工し、同年より観測を始め、2013年にJ3棟が増築されて、観測点数を日本でおそらく最多の合計84に増設している。

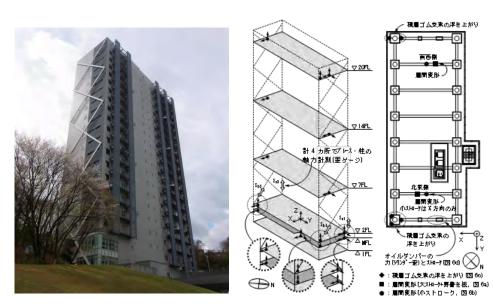


図 5 東工大 J2 棟 (20 階建免震構造) 地震応答観測点数=45

本提案では、将来的に 1000 点の観測点をもつ高密度モニタリングを 1 計測あたり 5 万円程度で実現することを目標とするが、J2・J3 棟における観測は各点で平均 40 万円の費用がかかった。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ことは、初めての試みである。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。ここでは、J2 棟で 2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録とシミュレーション技術について紹介する。

J2 棟で観測した加速度記録をもとに、免震層の積層ゴムや鋼材ダンパー、オイルダンパーの挙動を設計値と比較した†。観測記録から得られた免震層の履歴は明確なバイリニア(矩形)であり、設計時に想定した挙動とよく一致していたことから、積層ゴムと鋼材ダンパーが想定通りに機能していること、同時に観測記録の信頼性を確認することができた。一方、オイルダンパーの観測記録は小振幅時の荷重が設計値よりも小さく、大ストロークが入力された時にも 20mm 程度のスリップが生じることが確認された。また、製品規格値とはやや異なる性能を発揮していたことも確認され、設計値とのギャップが生じていた。しかし、オイルダンパーのモデル化を観測記録に合わせて行えば、その挙動を正確に模擬できることがわかっており、このような設計時と実際のギャップを埋めるためにも継続的なモニタリングが必要であると言える。

3.5 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いない。

したがって、長期的観点から、AIを利用したマン・マシーン・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。

3.6 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。

[†]松田和浩,笠井和彦:東北地方太平洋沖地震における観測記録を用いた超高層免震建物の動的挙動に関する研究,日本建築学会構造系論文集,第79巻、第704号,pp.1445-1455,2014.10 ††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/)。

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(図 2 右)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 6 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単化、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。

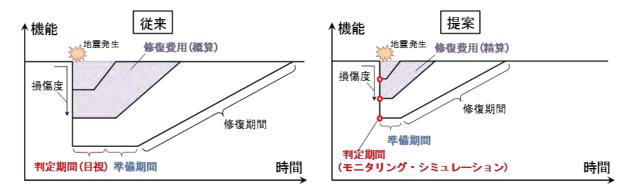


図 6 シミュレーションの高度化によるレジリエンシー(機能回復性)の向上

第4章 実大実験の計画

シミュレーション高度化のための第一ステップとして、V&V を部材レベルで行う。2章で示したように、大型構造物を構成する各部材は、縮小された試験体を用いた実験結果から性能を外挿しているのが現状である。実大または実大に近い構造部材の加力実験を計画し、その遂行は後述の海外施設の使用を考える。

一方、縮小試験体の実験結果を実大のそれと比較することも重要であるため、実大の 1/2, 1/4 ほどの縮小率での実験も行う。これらは耐力で考えて寸法効果を無視すれば、それぞれ実大の 1/4, 1/16 ほどであり、そのような加力のできる試験装置は日本にも数々あり、よって本報告では特に言及しないことにする。

以上の実大・縮小試験体の材料は極力共通とするため、重量が大きな鉄筋コンクリート試験体の場合、作成を海外施設内で行い、縮小試験体のみ日本に輸送して実験を日本で行うことが考えられる。鋼材の試験体など重量が比較的軽いものは、逆に日本で作成して実大試験体のみ海外施設に輸送することが考えられる。

4.1 実大実験に使用する試験装置

大型構造部材を実大寸法でかつ実際に作用する速度と同じ載荷条件を再現できる試験装置は現 状日本国内にはないため、本計画では海外の実験装置を使用することを想定する。本計画では北 京(中国)の中国建設が所有する 3 軸動的加力装置、上海(中国)の同済大学が所有する 1 軸動 的加力装置、台南(台湾)の国家地震工程研究中心(NCREE)台南研究室が所有する 2 軸動的加 力装置を主に使用することを想定し、水平 2 方向の動的載荷が必要な項目についてはカルフォル ニア(米国)の UCSD が所有する 3 軸動的加力装置を使用する。それぞれの試験装置の加力性能 を表 4、試験装置の写真を図 7 に示す。なお、中国建設の試験装置は 2019 年度の完成を目標とし ていたが、現在静的加力試験のみが実施可能であり、動的試験については今後整備が進んでいく ものと思われる。

文 一次川で心たりの内外及画の加力に配(東八直)						
	鉛直			水平		
	荷重	速度	ストローク	荷重	速度	ストローク
	(kN)	(cm/s)	(cm)	(kN)	(cm/s)	(cm)
中国建設	108,000 (80,000)	2.2	25	9,000	210	±150
同済大学	-	-	-	2,000	120	±60
NCREE	60,000 (30,000) ^{*2}	15	±7.5	4,000	100	±120
UCSD	53,400	25.4	12.7	8,900	178	±122

表 4 使用を想定する試験装置の加力性能(最大値)

^{*1}水平力作用時、*2動的載荷時



a) 中国建設 (中国・北京)



b) 同済大学 (中国・上海)



c) NCREE・成功大学 (台湾・台南)

図7 海外の大型加力試験装置

4.2 強い揺れで損傷する構造部材の実験計画

構造部材の実験には中国建設の実験装置を使用する。本加力装置は水平 2 軸・鉛直 1 軸に加えて各軸の回転を加えた 6 軸載荷が可能であり、試験体を固定する加振テーブルの大きさは6.0×4.0m、設置可能な試験体の最大寸法は9.0×5.0×10mである。本加力装置は他の試験機と比べて背の高い試験体を加力できる点が特徴であり、鉛直力も108,000kNと非常に大きい。図 8 に CFT 柱を設置した試験装置の立面図、以下に各構造部材の実験計画の詳細を試験体の概要図と共に述べる。なお、各試験体の緑色部分が試験体であり、グレー部分は試験体を取り付けるための治具である。また、治具と試験装置を接合する面を赤線で示している。

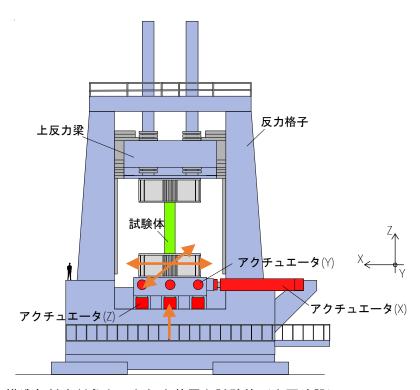
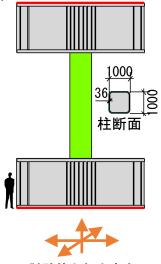


図8 構造部材を対象とした加力装置と試験体(中国建設)

a) コンクリート充填鋼管柱

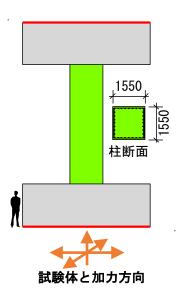
実大の試験体寸法の断面を 1,000×1,000×40mm として実験を行う。鋼管に充填するコンクリート強度は Fc=150N/mm²であり、鋼材強度は SA440(F=590N/mm²)とする。本条件で圧縮+せん断 1 方向試験を行う場合、軸降伏力に対する圧縮力の比(軸力比)は 0.4 となるように圧縮力は約 80,000kN とする。水平変位は試験体が終局状態に達する 1/30rad を想定して 17cm を目標とし、このときの最大水平力は約 10,000kN となる予想である。同様の試験を圧縮+せん断 2 方向で行う場合には試験体寸法を 0.756 倍、すなわち 750×750×37mm として試験体高さを 7.5m とする必要がある。このときの圧縮力は 80,000kN 水平力は約 6,000kN となる予想である。また、水平 2 方向加振についても追加で実験を実施する。



試験体と加力方向

b) 鉄筋コンクリート柱

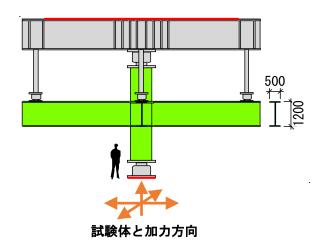
実大の試験体を $1,550\times1,550$ mm と想定して圧縮+せん断 1 方向の載荷実験を行う。コンクリート強度は $Fc=36N/mm^2$ とし、軸力比は 0.6 を想定して圧縮力は 52,000kN とする。水平変位は試験体が終局状態に達する 1/30rad を想定して 19cm を目標とし、このときの最大水平力は 8,000kN となる予想である。また、近年多く用いられている超高強度コンクリート($Fc=120N/mm^2$)を用いて同様な試験を行う場合には、柱断面を 0.65 倍して $1,000\times1,000$ mm とすれば、圧縮力は 72,000kN、最大水平力は 8,100kN となる予想である。また、水平 2 方向加振についても追加で実験を実施する。



c) 鉄骨柱梁接合部

超高層建築物の下層部に使用されるサイズを実大として実験を行う。試験体は柱材が BH-1,000×1,000×40×40mm、梁材は BH-1,200×500×25×40mm として紙面横方向と直交方向に梁を接合

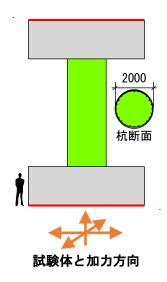
した十字試験体とする。鋼材は SN490B (F=325N/mm²) とし、加力は圧縮+せん断 2 方向とする。さらに、上反力梁に長尺の梁(治具)を接合することで水平方向の設置可能な試験体サイズを拡張することを考える。圧縮力は 3,000kN とし、このときの最大水平力は 7,200kN となる予想である。加力はフランジまたはウェブが破断するまで載荷を行うものとし、1/30rad 相当の水平変位 13cm 程度を目標とする。



25

d) 鉄筋コンクリート造場所打ち杭

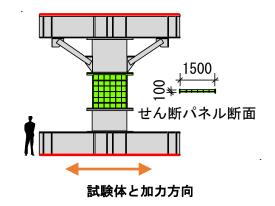
杭構造は大型構造物の中でも特に大きな部材であり、本試験設備を用いたとしても実大を加力することは難しい。そこで、実大規模の試験体として、直径 2,000mm の杭を対象として実験を計画する。本実験では場所打ち杭を想定した通常の試験体だけでなく、杭頭部にのみ鋼管を巻き付けた鋼管補強場所打ち杭についても実験を行う。加力は圧縮+せん断 1 方向の載荷とし、コンクリート強度が Fc=36N/mm²の場合、軸力比 0.5 であれば鉛直力は約 56,000kNとなる。また、水平変位は試験体の変形角が 1/30rad 程度の大変形の力学性能を把握するために 19cm 程度を目標とし、最大水平耐力は 9,000kN 程度である。また、水平 2 方向加振についても追加で実験を実施する。



e) 鉄骨造耐震壁(せん断パネル)

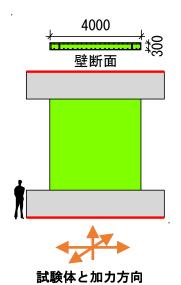
実際の建物に設置することを想定したせん断パネルとして、パネル部分が 1,500×1,500mm、ウェブ厚さが 6mm の試験体の実験を行う。せん断パネルには枠フランジ、エンドプレート、補剛リ

ブを設ける仕様とし、ウェブパネルには低降伏点鋼である LYP235 (F=235N/mm²) を用いる。せん断パネルは鉛直力は負担しないものと考え、せん断 1 方向載荷を行う。水平変位は試験体の変形角が 1/30rad 程度の大変形の力学性能を把握するために 13cm 程度とする。このときの最大耐力は 1,600kN 程度である。また、せん断パネルの低疲労サイクルに関しても検討を行うために、小振幅の繰返し加振も実施する。



f) 鉄筋コンクリート造耐震壁

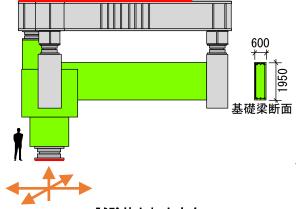
実大の RC 造耐震壁を想定して壁高さ 400cm、壁幅 400cm、壁厚さ 30cm の試験体の載荷を行う。試験は圧縮+せん断 1 方向とし、圧縮力は 1MPa を想定して 800kN、コンクリート強度はFc=60N/mm² とする。載荷は終局時の大変形を想定して試験体の変形角が 1/30rad となるように 13cm を目標とする。このときの最大耐力は 7,400kN 程度である。耐震壁は、面内方向(紙面左右方向)に対しては高い抵抗力を発揮するが、面外方向(紙面直交方向)の力が作用すると耐力が下がるという報告もあるため、水平 2 方向の試験も追加で実施する。



g) 鉄筋コンクリート造杭頭

2本の基礎梁および1本の杭と柱が取りつく隅部の RC 造杭頭の実験を行う。このとき、柱は杭

頭に対して偏心して設置されており、基礎梁の長さを800cmとするために紙面横方向および直交方向には反力梁に長尺の鉄骨梁を設置して試験体を据え付ける。試験体は実大を想定して柱が1,500×1,500mm、杭は直径2,000mm、基礎梁は1,950×600mmとする。試験は圧縮+せん断2方向載荷を行う。変位は試験体が終局状態に至るまで行うものとし、鉛直1cm、水平10cm程度を目標とする。このとき、鉛直力は80,000kN、水平方向は9,000kN程度を想定する。

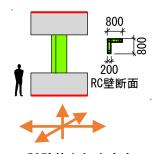


試験体と加力方向

h) 鉄筋コンクリート造 L 字型耐震壁

超高層建築物に用いるセンターコア部を構成する RC 造の立体耐震壁の実験を行う。コンクリート強度は実績のある $Fc = 120 N/mm^2$ の超高強度コンクリートとするが、実物の 1/3 スケールとして壁厚 25 cm、壁幅 100 cm の L 字型耐力壁を用いる。試験は圧縮+せん断 2 方向の載荷(45 度方向)とし、軸力比は 0.5 となるように 26,000 kN とする。水平変位は局部的な圧縮破壊が生じる

1/100rad を目標として 4cm 程度を目標とする。このときの最大水平耐力は 8,100kN 程度と予想される。さらに、Fc = 200N/mm² の超高強度コンクリートを使用する場合には上記の試験体を 0.6 倍にすることで、圧縮力 26,000kN、最大水平力 5,000kN 程度の実験が行える。本試験体は実大の構造物と比較すると 1/3 スケールと他の実験と比べてやや小さいが、2 章で調査した現状では 1/8 スケールの実験にと留まっていたことを考慮すると、本計画でも従来と比べれば十分大きな実験と言える。



試験体と加力方向

4.3 揺れを低減できる免震・制振部材の実験計画

4.3.1 免震支承の圧縮+水平1方向動的加振実験計画

NCREE の試験装置は鉛直 1 軸・水平 1 軸載荷が可能な試験装置(図 9)であり、試験体を固定するテーブルの大きさは 8.3×2.5m、設置可能な試験体の最大寸法は 8.3×3.1×2.0m である。テーブルが大きいことから長尺の試験体も試験できるが、試験体の高さは 2.0m と比較的低く、免震支承の試験に適した試験装置である。免震支承は表 2 で示した鉛プラグ挿入型積層ゴム支承、免震球面すべり支承、高摩擦弾性すべり支承、高減衰ゴム系積層ゴム支承を対象とする。

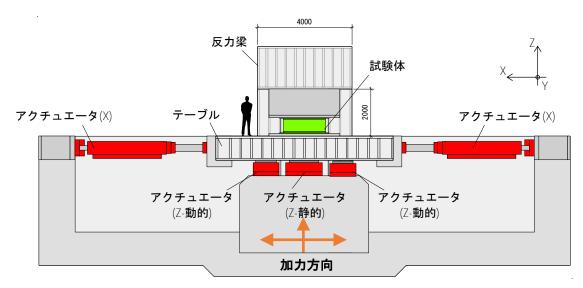


図9 免震支承を対象とした加力装置と試験体(NCREE)

鉛プラグ挿入型積層ゴム支承は直径 1,500mm の試験体を用いる。ゴム総厚が 30cm の場合、加振はせん断ひずみ γ =400%を目標として水平変位 1,200mm を与える。面圧を $10N/mm^2$ とすれば圧縮力は 26,000kN であり、最大水平力は 10,000kN 程度と想定される。

免震球面すべり支承は $1,620\times1,620$ mm の試験体を用いる。加振は限界変形として定められている 950mm とする。また、圧縮力は面圧が 106N/mm² となるように鉛直 26,000kN とし、このときの最大水平力は 560kN 程度と想定される。

高摩擦弾性すべり支承は支承径 1,500mm の試験体を用いる。加振は限界変形として定められている 950mm とする。また、圧縮力は面圧が $17N/mm^2$ となるように鉛直 30,000kN とし、このときの最大水平力は 3,000kN 程度と想定される。

高減衰ゴム系積層ゴム支承は直径 1,800mm の試験体を用いる。ゴム総厚が 32cm の場合、加振はせん断ひずみ γ =400%を目標として水平変位 1,280mm を与える。面圧を $10N/mm^2$ とすれば圧縮力は 26,000kN であり、最大水平力は 10,000kN 程度と想定される。

いずれの試験体も正負繰返しの動的加振とし、試験体が破断にいたるまでの載荷を行う。また、 長周期長時間地震動を想定して大ストロークの繰返し載荷による温度依存性の検証も併せて行う。 最終的に、これらの試験結果を再現可能な高精度な力学モデルを作成する。

4.3.2 免震支承の圧縮+水平2方向動的加振実験計画

NCREE の試験装置を用いて水平1方向の力学モデルは構築可能であるが、鉛プラグ挿入型積層 ゴム支承や高減衰ゴム系積層ゴム支承、免震球面すべり支承においては2方向載荷時のモデル化 精度も非常に重要であり、それらの構成則を見出すことは容易ではない。そこで、特に免震支承 については力学モデルの精度をさらに向上させることを目的として、圧縮+水平2方向の動的載荷 実験を UCSD の試験機 (図 10) を用いて追加で行うものとする。

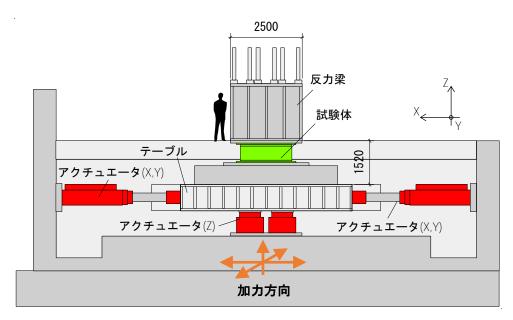


図 10 免震支承を対象とした加力装置と試験体(UCSD)

UCSD の試験機は鉛直 1 軸・水平 2 軸の動的載荷が可能である。ただし、XY 方向でそれぞれ加振能力が異なるため、水平 2 方向加振は楕円形の履歴を描くような載荷を行うものとする。既往の研究において、ゴム系の免震支承は 1 方向載荷と同様な水平変位を 2 方向で同時に加振すると、ゴム層がねじれることで 1 方向加振と比べて早期に損傷することが明らかとなっている。そのため、本実験においても NCREE の試験と同様の X 方向の水平変位を入力するとともに、Y 軸方向に X 方向の X 5 向の X 5 向の X 5 向同時加振時に対応できる力学モデルの構成則を把握し、破断にいたるまでの力学特性を把握することを目的とする。

4.3.3 ダンパー部材の水平1方向動的加振実験計画

同済大学の試験装置は水平1軸の動的載荷が可能なダンパー実験に特化したものである(図 11)。 設置可能な試験体最大寸法は 5.7m であり、ストロークは±600cm と大ストロークのダンパー実験 にも対応できる。

オイルダンパー実験では各製品において最大ストロークとして規定されている値に対して小振幅から大振幅までの正弦波加振実験を行う。特に大型の制振ダンパーについては架構が大変形 (1/30rad 程度) した場合にも安定した能力を発揮することが求められるため最大振幅 13cm 程度の正弦波加振実験を行い、免震ダンパーの場合には 40cm 程度の大変形に対する性能についても検証する。また、長周期長時間の地震動を想定して多数回の繰返し載荷によって内部のオイル温度が上昇してシール部分が損傷するまで載荷を繰り返して限界特性を把握する。

粘弾性ダンパーについてもオイルダンパーと同様に製品ごとに規定されている最大ストローク値に対して小振幅から大振幅までの正弦波加振実験を行う。粘弾性体は特に温度依存性が強いことから、長時間の載荷によって粘弾性体の剛性が著しく低下するまで加振を繰り返し、温度依存性に関する限界特性を把握する。

座屈拘束ブレースにおいても製品ごとに規定された最大振幅に対して正弦波加振実験を行う。

座屈拘束ブレースは安定した紡錘形の履歴が得られるが、大ストロークの繰返し実験によって耐力低下が生じるまで繰り返し加振を行い、終局状態として装置が破壊にいたるまでの載荷を実施する。

以上のように、製品ごとに特性を考慮して装置の終局状態に至る加振を実施するが、その他に 以下に示す最大ストロークを超えた変位が入力された場合の挙動を共通に実験する。1)圧縮方向 の最大ストロークを超えた載荷による圧縮破壊、2)引張方向の最大ストロークを超えた載荷によ る引張り破壊。上記の載荷実験結果を基に、小振幅から大振幅まで実験を再現可能な力学モデル を作成する。

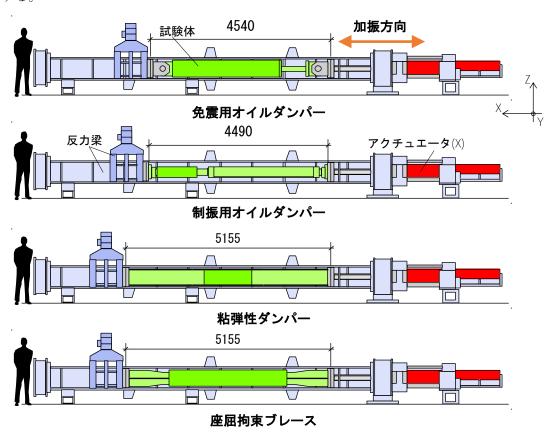


図 11 ダンパー部材を対象とした加力装置と試験体(同済大学)

4.4 実験方法の規格化

前節までに計画した実験では、大型構造部材の寸法効果や高精度な力学モデルの構築だけでなく、標準的な実験方法を確立させるための基礎的な検討も併せて行う。既に建築用免震ゴム支承は JIS 規格が制定されており、免震材料には高機能 JIS の制定に向けた動きがなされている。昨今の免震・制振部材のデータ偽装問題や、より高度な建築構造への展開において各種部材の共通的な評価基準は必要不可欠であり、免震ゴム支承と同様に制振・免震ダンパーや各種構造部材の実験方法についても JIS 規格の制定を目指す。

具体的には各部材ごとに試験体の設置方法と境界条件の設定、加力方法、計測項目と計測方法、 評価項目と評価方法を規定する。免震支承と同様に、ダンパー部材も製品を対象とすることや入 力が 1 方向で機構が単純であることから実験方法は規定しやすい。一方で、構造部材については 同じ部材であっても加振方法の違いによっても試験結果に顕著な差が生じる場合もある。例えば、振幅が大きくなるほど耐力や剛性が低下する部材については正負交番の繰返し載荷で振幅を徐々に増やしていく場合と、ランダムな波形を用いて加振をする場合では後者の方が性能の劣化が著しいことがわかっている。全ての構造部材に対して同じ試験方法を定めることはできないため、各部材ごとに的確な性能評価が行える実験方法を策定することも大きな課題であり、本計画における実大実験でも標準的な実験方法の策定と実践を試みる。

また、各実験において標準的に正弦波加振が行われることが多いが、システムに対する入力波形は理論的な波形である場合でも、試験体の取り付け方や制御方法によっては、各所におけるガタや治具等の変形による影響で試験体に入力された波形が想定した正弦波と異なる場合もある。これらの現象は結果として製品にとって有利な評価を行うこともあり得るために性能の健全な評価に悪影響をもたらす。そのためにも、実験方法として入力波形を規定するだけでなく、試験体に入力される変位に焦点を当てた実験方法の確立を目指す必要がある。このような標準的な実験方法の規格化はデータ偽装の抑制力になるとともに、統一的な評価方法の下で各製品を比較できるようになるため、健全な産業競争力の発展に寄与する。

まずは日本国内において各部材の JIS 規格を制定し、実験方法に関しては国際標準化を目指す。 素材レベルでの国際標準化は日本の高い水準に海外製品が追い付けないという観点から実現は難 しいが、実験方法の国際標準化は日本の高い技術力をアピールすることで、海外に向けた産業競 争力を活発化させることにもつながる。アプローチは具体的に 6.3 節で述べる。

5章 モニタリングの計画

シミュレーション高度化の第二ステップとして、V&V を大型建設物で行う。3.4 節で提案した モニタリングの基本的な内容をここで説明しておく。大型建設物の地震時の挙動や損傷を把握す るために、人間の神経のようにセンサーを張り巡らすことは難しいが、これまでの10~20点の計 測点数では全く足りず、技術的・経済的な制約を考えても1,000点ほどは必要と考えており、それ を本章で明らかにする。このデータが求まれば、建設物全体、その構造部材と非構造部材のシミュレーションの包括的な検証が行われ、その精度の確認の後は、計測できなかった様々な実挙動 も、逆にシミュレーションで解明できるようになる。なお、参考として5階建物の実験†では、最 多の計測点数1,400以上の例があり、本提案の遥かに大きな建設物での計測点数1,000は、実験の 観点からは必ずしも多くはないことを述べておく。

5.1 従来型のモニタリングと高密度モニタリング

本提言では、これまでの限られた数のセンサーによるモニタリングを「従来型モニタリング」または「低密度モニタリング」と称する。一方、多くのセンサーで実建物の挙動を細部まで計測するモニタリングを「高密度モニタリング」と定義し、5.2 節以降で具体的に述べる。

従来型モニタリングは、対象建物の1階、最上階及び中間階の最低3フロアに加速度計を設置するのが一般的であり、センサーのない中間階は補間して加速度や層間変形を推定している。この従来型モニタリングは構造へルスモニタリングとして近年急速に普及し始めており、その要因として従来の加速度計より非常に安価なMEMSセンサーの出現が大きいとされている††。構造へルスモニタリングは地盤の強震観測と異なり、低コストのセンサーの使用が1つの特徴である。その有用性が認められてきているが、課題としては、センサー導入予算の確保、その有益性や運用方法が明確でないこと、建物利用者の不安をあおる可能性などの問題が挙げられている。更なる普及のため、行政からのコスト優遇措置、買い取りではなくリース契約の導入、構造部材に加え非構造部材への適用、表示の仕方や基準・用語の定義統一などが必要と考えられている†††。

従来型モニタリングの運用は、設計会社が積極的に始めている。ある企業では従来型モニタリングを導入し始めて約5年で400棟の導入実績をつくり、観測データはクラウドで一括管理することで地震動が発生した地域以外でそのデータを分析し、地震発生直後の建物安全性を評価することに成功している。本事例は限られた計測点から得られたデータを建物の振動モードを用いて

[†] 笠井和彦、馬場勇揮、西澤恵二、引野剛、伊藤浩資、大木洋司、元結正次郎:鋼材ダンパーを有する試験体の実験結果、3 次元震動台による実大5層制振鋼構造建物の実験研究 その2、日本建築学会構造系論文集 第77巻 第673号,499-508,2012年3月

[†] 杉村義文:「強震観測の応用としての「モニタリング」」機能維持・回復性能評価指標の提案に向けて」、日本建築学会、振動運営委員会、強震観測小委員会、第 6 回強震データ活用に関するシンポジウム、2018.12

^{###} 畑田朋彦、小檜山雅之、西本篤史、森井雅史:レジリエンス向上のための構造へルスモニタリングの活用方法、パネルディスカッション資料「事業継続計画策定のための地震災害等に対する建物機能維持・回復性能評価指標の提案に向けて」、日本建築学会、建物のレジリエンスと BCP レベル指標検討特別調査委員会、日本建築学会大会(北陸)、2019.9

^{###} 神田克久、小笠原さおり:地震時応急対応のための構造ヘルスモニタリングシステムの発展、シンポジウム 建物の健全性モニタリング評価技術の取り組みと今後の課題、pp.48-55、2020.1.21

計測点間の応答値を補間して算出することが特徴と言える††††。また、別の従来型モニタリングの導入事例として、構造設計者が中心となりそのシステム構築・建物損傷評価を行うものがある。実用開始から6年程度で40棟の導入実績があり、観測点は概ね6~7層に1つの加速度計を設置している。得られた加速度を積分して変位に換算し、各層の変形を補間して算出した後に設計時の情報(静的増分解析結果から得られた荷重変形曲線)を用いて損傷を評価する。また、各階の加速度を非構造材に入力してその損傷レベルも評価でき、設計会社が自ら設計した建物である利点を生かしたモニタリングシステムを構築している†。建物基部で観測した加速度記録を解析モデルに即時に入力して損傷レベルを判定する方法も展開されている†。

以上のように、従来型モニタリングの普及は始まったばかりであるが、その需要が高まっていることは間違いなく、今後も継続的な普及活動と地震発生時の被災度判定方法の技術発展が望まれる。上述のように計測点数が少ないため、損傷評価において解析結果も併用するものが増えており、ここでもシミュレーションの重要性が認められる。計測点数は少なくても建物事例が非常に多くなることも予想され、高密度モニタリングとは別の形でのシミュレーション精度確認に用いることも考えられる。

なお、従来型モニタリングに関してさらに 6.1.5 節、6.4 節、7.4 節で述べるが、それ以外は高密 度モニタリングに言及する。

5.2 全体応答のモニタリング

加速度と変位:従来の地震観測記録は、地盤と構造物中の加速度計で計測された加速度を表し、その二重積分により変位も得られる。加速度は、家具・什器の転倒や天井・吊り設備などの非構造被害に大きく係わる。また、それに質量をかけて地震時の力も評価できるため、設計計算に用いる地震荷重の検討にも必須のデータである。高層建物における居住者の地震時・暴風時の揺れの感知や不安にも関連するデータでもある。また、一部の超高層建物に加速度計が設置されているが、典型的に建物頂部と基部およびその中間の層など数層のみに設置されている。そのため例えば50階建物の場合、センサー設置階の間隔は16~30階であり、それらのデータの内挿により他の階の挙動が推測されている。すなわち、センサーの少なさにより、全体応答の評価精度はかなり限られているため、ここでは各階への加速度センサーの設置を基本とする(次節参照)。

層間変形:層間変形は、ある階の床と直上階の床の変位の差であり、各階のゆがみ(図 12a)と 損傷を表す指標としてよく用いられる。通常これを直接計測することは難しく、上述の加速度を 二重積分した変位から間接的に推定される。各階の層間変形は必ずしも一様ではなく、また、あ る階が少し弱くて変形が進むと、よりその階に変形が集中する場合が多い。その推測をシミュレ ーションで行うことは一般的に難しく、モニタリングによるデータが解析の進歩に大きく貢献で きる。また、この理由からも、加速度を各階で計測する必要がある。ただし、層間変形を直接計

[†]ジロン・ニコラ、今枝裕貴、原田公明:構造設計者が開発した構造へルスモニタリングシステム「NSmos」、シンポジウム 建物の健全性モニタリング評価技術の取り組みと今後の課題、pp.56-63、2020 1 21

[†] 三浦耕太、三輪田吾郎、諏訪仁、中村充: 地震直後に利用可能な被災度判定推定技術、シンポジウム 建物の健全性モニタリング評価技術の取り組みと今後の課題、pp.64-69、2020.1.21

測できる場合、加速度の計測点数を減らすように計画する。そのための様々な方法が現在提案さ れており、中でも各階立面(図 12a)の対角間距離の変化を光ファイバーにより計測する方法は、 比較的安易で精度も良好と思われる。光ファイバーに関する OPERA プロジェクトの成果をもと に考慮していく。

ロッキング変形および全体曲げ変形:地震時における建物水平変形の成分として、建物基礎の 傾きによる構造物全体の傾き(ロッキング変形、図 12b)、建物全体のしなるような変形のため上 層で大きい床の傾き(全体曲げ変形、図 12c)による水平変形があるが、いずれもモニタリングで 計測されることは少ない。従来から計測点数が少なく水平加速度のみに計測が限られたからであ るが、超高層建物においては特に全体曲げ変形の値がかなり大きく、各階のゆがみの評価に大き く影響するため、計測が必要である。これらの変形は、各柱に貼り付けたひずみゲージおよび床 に取り付けた鉛直加速度計から評価される。

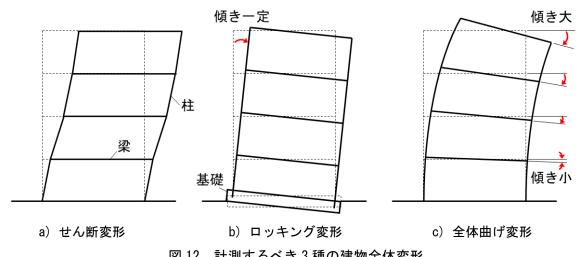


図 12 計測するべき 3 種の建物全体変形

5.3 局所応答のモニタリング

強い揺れで損傷する構造部材のモニタリング:上記の全体応答のみでは、構造物の損傷の程度 が把握できない。強い揺れで損傷する構造部材の詳細なモニタリングがシミュレーション技術の 高精度化に欠かせない。第4章で述べた極力実大の部材加力実験により得た構造部材の挙動、寸 法効果、シミュレーションモデルの最も現実的な検証ができる。さらに、構造部材の実験で評価 しきれない事項もモニタリングにより検討でき、例えば柱・梁骨組に取り付く外装・内装材など の構造部材への力学的影響という、これまで解明できなかった事項も明らかになり、構造物のシ ミュレーションモデルにフィードバックできる。以上を踏まえたセンサー選定と設置部位の例を 述べる(新設構造物を仮定)。

- a) 柱部材:鉄骨部材1本に対しひずみゲージを8点設け、それにかかる力を全て計測できる。 鉄筋コンクリート部材1本に対しては、多数ある鉄筋にひずみゲージ10~20点は必要である。
- b) 梁部材:基本的に柱部材と同様な数が必要になる。ただし、大地震時には柱よりも梁に降伏 させることが典型であるため、降伏が予想される梁端部には10点ほど追加する。また、鉄骨部材 の場合、柱との接合部の破断のモニタリングとして AE センサーも考える。

c) 基礎梁・杭頭・杭: これらは一般に鉄筋コンクリートであり、基礎梁は上記の梁部材と同様に考えればよいが、杭頭は 4.2 節で述べたように非常に大きな自重と地震力が作用し、かつ複雑な形状をしているため、鉄筋のひずみゲージも 20 点は必要と思われる。また、杭は柱と同様だが、中に深く埋設され、周囲の土壌との干渉作用が複雑なため、鉄筋のひずみゲージも様々な深さで設置する。よって杭1本につき1断面で10点、少なくとも異なる深さの4断面で計40点の計測点を考慮する。

これらの構造部材の損傷は、構造物の全体応答の特性を大きく変化させる。巨大地震に対する 構造物の強い非線形挙動の解明のためには、以上のような計測が必須である。また、このように 構造物が大型になるほど構造部材数が膨大になり、また、各部材で少なくとも 8~20 の計測点と 数千とある部材を考えると、数万の計測点が必要になる。一方、本計画では他の部材や非構造材 も含めて 1000 点に限定し、シミュレーションの妥当性評価に最も有効な計測を行う。前述のよう に、シミュレーション精度の確認の後は、計測できなかった様々な点の実挙動も、逆にシミュレ ーションで解明できるようになる。

揺れを低減できる免震・制振部材:免震・制振部材は、構造物の揺れを低減することで上記の構造部材の損傷を抑制する役目をもつため重要である。免震・制振部材の変形と力の計測が、地震エネルギーそして構造部材の破壊エネルギーをどれだけ消散できたかを明らかにする。構造部材と異なる点は、これらの製品は、実装以前に工場での確認試験を経ているため、そのデータとモニタリングデータを直接比較できることである。また、解析モデルも使用限界を超えて終局状態に至る部分(4章)以外は、挙動を再現可能な状況にあるため、現状でも使用限界内でのシミュレーションの妥当性確認は可能である。

- a) 免震支承:地震時には大きな鉛直圧縮力を受けながら左右前後と水平2方向に不規則的に変形するものであり、これらの3方向の力は直接計測できないことが課題である。このため、鉛直力は通常接続される直上の柱部材や周辺の梁部材のひずみゲージから推測し、水平力は計測した水平変形から解析モデルにより推測することになる。水平変形は、動画撮影、けがき、変位計から精度よく得られ、また、加速度記録の2重積分からも得られる。また、鉛プラグ入りゴム支承や、高減衰ゴム支承においては、長周期地震時に発熱して材料の変化が予想される。このため、それらに温度センサーを入れることでシミュレーション精度向上の貴重なデータを得る。以上より異なるセンサーによる計測点の総数は、免震部材1体当たり8点ほどで、温度センサーが必要であれば6点ほどの追加となる(柱部材、梁部材のひずみゲージおよび加速計を除く)。
- b) 制振・免震ダンパー:制振ダンパー、免震ダンパーに共通のシリンダー型(別名ブレース型)は、荷重と変形(ストローク)の両方が容易に計測でき、計測点数は6~10点である。ただし、前者は最大で100mmほど、後者は700mmほどのストロークを計測する面が異なる。また、エネルギー吸収により温度上昇する粘性ダンパーや粘弾性ダンパーの場合は、温度センサーが必要であり、6点ほどの追加を考える。一方、制振ダンパーとして用いられる間柱型・壁型ダンパーでは、力は直接計測できず、取付く梁部材のひずみゲージから求めるため計測点数30~40である。また、免震ダンパーとして用いられる鋼材ダンパーも力の計測ができず、免震支承のように水平力は計測した水平変形から解析モデルにより推測することになる。

なお、一般に免震・制振部材の構造性能や応答は、それらに取り付く周辺架構の剛性に大きく 影響される。したがって、免震・制振部材に加え、その周辺架構を含めたシステム内の力の釣り 合いを事後評価できるように、柱・梁部材にセンサーが設置されることが望ましい。

5.4 非構造部材・設備のモニタリング

天井・間仕切壁・ドア等: 天井、間仕切壁、およびドアは、いずれも面材に分類され得る。したがって、前述した線状の構造部材と異なり、2 あるいは3次元的に運動が分析される必要がある。実際、超高層建物でよく使用されるシステム天井は、複雑な運動をすることが振動台実験で確認されている。間仕切壁、ドアは実物大の加力実験も行われているが、これらの非構造部材の特徴は、高層建物内でのそれらへの絶対速度・変位・加速度などの入力を再現できる実験装置が存在しないことである。また、非構造部材の境界条件も現実とかなり異なり、パラメトリックな研究には有意義ではあるが、シミュレーションの妥当性確認が直接できるようなデータは、実建物内でのモニタリングから得る方法以外はないと考えられる。

天井は、在来型と欧米型(システム天井)のものがあり、最近の地震で頻繁に起きた天井落下に関して様々な実験研究が行われている。天井が多くの部品で構成されるため、研究では多くのセンサーが用いられるが、本計画ではシミュレーションの妥当性確認に最小限必要と思われる計測点数に留める。事務室 1 部屋あたりの天井において、水平加速度、水平変位、下地材や耐震部材にかかる力、周辺要素との接触時の衝撃力などを考慮し、それぞれ加速度計、変位計、ひずみゲージ、圧力ゲージなどで計測する。天井の詳細と大きさにより異なるが、計測点数は順に 4 点、8 点、16 点、8 点と考え、また、天井懐の状況を動画撮影する赤外線カメラ 4 台も含め、計測点数は 1 部屋あたり 40 点となる。また、間仕切り壁には面外振動や倒れを計測する加速度計、生活振動との混同を防ぐための人感センサーなどを考慮し、その面積によるが事務室 1 部屋あたりで計測点数 8 をめどに考える。

エレベーター,空調・電気・衛生設備および防火設備:一般にエレベーターの地震時の管制運転のため、エレベーター機械室に加速度計が設置されている。しかしシミュレーションの高精度化という視点からはデータが十分に活用されているとは言いがたい。これは、法律の制約やシステムの保安上の問題から、既存の計測システムの共通利用が困難なためである。他の設備に関しても同様な場合が想定されるため、本提案では重複した計測を前提とする。

エレベーターは、エレベーターケーブルの振動を評価するための巻上機レベルでの水平加速度、ピットの様々な高さ位置での内装壁の振動計測とずれ(エレベーター走行妨害の可能性)の評価のために水平加速度を計測するため、エレベーターシャフト1本あたり計測点数 30 と考える。空調・電気・衛生設備の振動計測のための加速度計は、設備機器1基ごとに計測点数 4, 吊り材の力の計測のためのひずみゲージは設備機器1基ごとに計測点数 6、防火戸枠の対角距離の変化を計測するためのレーザー変位計は1枠ごとに計測点数 2、その周辺の非構造壁のせん断変形を計測する光ファイバセンサーは各壁で計測点数 2 を考える。

以上の非構造部材・設備は多様であり広く分散・離散して配置される。そのため柱・梁骨組のように測定結果から未測定部位を空間的に内挿するのが難しい。計測点を集中化する方針として、

次のことが考えられる。まず構造的側面からは各階ごとに異なる振動モードの卓越により振動数 特性が階により異なることを踏まえ、建物での計測階をゾーニングする。また、避難経路の確保、 地震後のエレベーター運転再開の迅速化など被災度判定の利用を考えた計測計画を行う。

5.5 センサーおよび記録・報知システムの開発

5.5.1 センサー

最近のモニタリングにおける加速度の計測には、50 万円以上する従来のサーボ型に代わり、 MEMS 型が多く用いられている (図 13a)。MEMS センサーは、スマートフォンにも内蔵されてお り、安価なことが特徴である。価格帯に応じて、さまざまな計測精度のセンサーがある。数百円 のセンサーでは激震を、数千円では震度3以上の建物の揺れを、10万円程度のコストをかければ、 人が感じない微震を計測できる。

一般に、柱・梁部材のひずみを知るには、ひずみゲージが用いられる(図 13b)。しかし、部材 の損傷を評価するには、多数のひずみゲージが必要になる。最近注目度の高い光ファイバセンサ ーを用いれば、一本のセンサーで、部材のひずみ分布を連続的に計測できる可能性が高い。

建築部材には面材が多く用いられ、天井や間仕切り壁などはその代表格である。カメラ(図 13c) を用いた画像解析(モーションキャプチャ、ホログラフィ、モアレ法など)では、面材のたわみ や構成パネルのずれなどを評価できる。

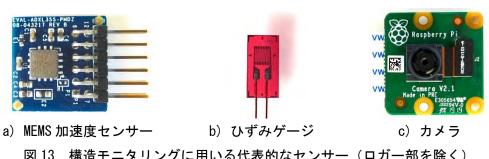


図 13 構造モニタリングに用いる代表的なセンサー(ロガー部を除く)

5.5.2 センシングデータの同期

地震時の建物全体の動きを捉えるには、建物内に分散設置したセンサーから得たデータの時刻 同期をしておく必要がある。古典的には、それぞれのセンサーが記録するタイムスタンプを用い て、同期している。センサーが参照する時計として、GPS は時刻精度が高いものの、屋内では使用 できない。一方、電波時計や NTP (Network Time Protocol)には必ず誤差が含まれ、これを補正する 必要がある。一旦取得されたデータの同期補正には一般に、試行錯誤が伴うため、膨大なセンサ 一間の補正は難しい。特に、建物に加えて固有周期の短い非構造部材も計測対象とすることや、計 測値を用いたシミュレーションの高精度化という目的から、通常おこなわれている構造ヘルスモ ニタリングよりも高い精度の時刻同期の必要性が高い。

以上のことから、高密度モニタリングでのセンサー群を同期ネットワーク化することは必須で ある。しかし、1000 点ものセンサーを有線接続する手間は膨大で、無線通信の利用が必要である ものの、従来の無線通信では転送時のデータロス、遅延などのさまざまな問題がある。

近年、マルチホップ無線ネットワークにより、これらの問題を解決する技術が実用化されている。サブミリ秒オーダーの時刻同期も可能なこの技術は、センサー数を増やすほど転送経路の多重性・冗長性が増し、システム全体の信頼性が向上する。また、Sub-GHz帯の無線を利用すれば、複数の階や壁などの遮蔽物をまたいだネットワークリンクを構築でき長距離通信が可能になる(図 14)。これらの要素技術は、高密なモニタリングとの親和性が高い。

無線化にかかる費用は一計測点 (加速度センサーの場合、水平 2 方向と鉛直の 3 チャンネル) あたり 15 万円程度であるが、量産化が進めば価格が下落していくことが見込まれる。センサモジュールのフラッシュメモリに一時記録して、大きな事象 (中・大地震、台風) があるごとに、対象データのみを回収することで通信にかかる運用費用を抑えることができる。また、Raspberry Pi などのシングルコンピュータを利用して計測器を自作し、高い信頼性や精度が望まれない箇所に限定すれば、1 計測点あたり 1 万円以下にできる試算もある。

どのセンサーをネットワーク化するかのベストミックスに係わる判断は、後述するデータのリアルタイム処理の必要度が基準となり得る。

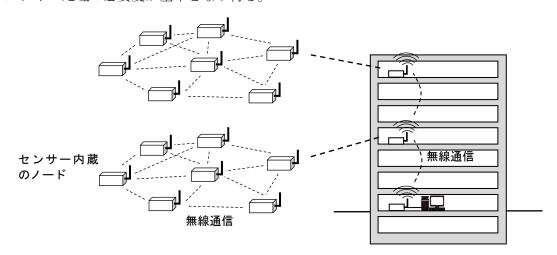


図 14 無線要素技術と建物内の高密なセンサーネットワーク

5.5.3 データの記録および保守

原則として、データの時刻歴を保管する。シミュレーションの高精度化が目的であるから、計 測事後に、構造解析を含むさまざまな分析を可能にするためである。一般的な構造へルスモニタ リングでは、地震時に記録したデータの最大値や固有振動数などの要約値のみを記録している場 合が多く、これとは異なる。本モニタリングで取得したデータは一元管理し、データへのアクセ シビリティの高さや保守を勘案するとクラウド管理が望ましい。

地震以外にも、風や温度の外乱は、建物の応答・構造特性に影響を及ぼす。さらに、計測される天井や壁の微振動は、居住者の行動にも左右される。したがって、本モニタリングシステムと、その他広く計測される環境変化やエネルギー消費量などのデータを積極的に連携する必要がある。

計測モジュールへの給電について、高精度 MEMS センサー (高消費電力タイプ) に対しては、100V の AC 電源を確保する。天井懐に設置する計測モジュールなどの電源確保が難しい場合や、 低消費電力タイプの MEMS センサー及びひずみセンサーについては、乾電池などのバッテリーを 部分的に使用する。

計測データの収録は、トリガー方式と定期方式の2つを併用する。前者では、地震や暴風時に生じる床加速度が事前に設定した閾値を超えた場合に収録する。この閾値は、地震に対して、最下階の床加速度で1cm/s²などが考えられる。このような低頻度の収録であれば、数年の間、単一電池数本程度でセンサーへの持続的な給電が可能である。後者の方式では、決められた間隔(たとえばー日や一週など)で平常時のデータを収録する。AC電源で給電されるセンサーに限定し、主として高精度 MEMS センサーを対象とする。各計測モジュールが内蔵するフラッシュメモリにデータをバッファリングし、中継器を経由したうえでデータをホストPCに一括転送する。

5.5.4 報知システム

本モニタリングを通じたシミュレーションの高度化により、構造設計の合理化や基規準の改定 に資するに留まらず、オフラインでの建物健全性評価の高度化にも貢献できる。さらに、加速度 センサーから取得したデータは、リアルタイムに近い処理をして、転送・報知・可視化されるの が望ましい。それは、以下の理由からである。

- a) エレベーターの管制運転との高度な連携 (マシンコミュニケーション)
- b) 長周期地震動時や暴風時に超高層建物の居住者が感じる恐怖や酔いの抑制 (マンコミュニケーション)

また、完全なリアルタイム処理は難しくても、

- c) 計測データと構造解析モデルの連携による、即時被害推定
- d) 確度が高く位置を特定した被害推定による、防災センターの意思決定の迅速化

のためには、大規模なデータ処理の高速化技術が必要である。そのためには、ハイ・パフォーマンス・コンピューティング (HPC) によるハードウェア面の強化のみならず、人工知能 (AI)などによるソフトウェア (アルゴリズム) からのアプローチが必要である。

シミュレーション技術の向上のためには、計測データの処理に十分な時間を充てられる。それでも将来的には、モニタリングデータ取得後、構造解析モデルを自動的に修正する技術(データ 同化)の発展が望まれることを考えれば、漸進的なデータ処理の高速化が必須である。

本モニタリングはシミュレーション技術の向上を第一に掲げるものの、その成果は学術分野に留まらず、広く産業に利用されることが期待される。建物への高密なモニタリングの社会への利用が進めば、シミュレーション技術がさらに高度化するサイクルへと加速し、都市全体への高密度モニタリングへと発展していく。

5.5.5 目標コスト

初期費用を概算した結果、次節以降に述べる高密度モニタリングの試行には、一棟あたり 5,000 万円以内を目標とすることにした。計画する 1000 チャンネルのうち、600~700 はひずみゲージ用である。それ以外の 300 チャンネル (水平・鉛直の 3 方向/ノード×100 ノード) を加速度センサーに割り当てる (床と天上面に設置)。費用については、加速度センサーと無線システムが多くを占

める。

加速度センサーは、5 階ごとに高精度(常時微動を計測可能)の MEMS センサーを設置し、それらの階の間を中精度(中小地震以上を計測)かつ格段に価格の低い多数の MEMS センサーで補う。ひとつの階につき床面へのセンサー設置箇所を 2 カ所程度とする。

これらのセンサーを含む計測モジュールは、無線通信の親機や中継器としても機能し、建物の頂部から基部までが連続してネットワーク化される。これらの無線化された MEMS 加速度センサーに係わる費用は、2,000 万円程度になる。また、建物内の一部にはサーボ型加速度計(1 ノードあたり 100~300 万円程度)を導入し、長期間にわたる MEMS センサーの精度点検に利用する。

さらに、可視化アプリケーションやクラウド管理などのシステム構築に係わる費用がある。以上を計上すれば 3,000 万円となる。 さらに、ひずみゲージについては、計測箇所が非常に多いために可能な限りロガーを自作したうえで、1,500 万円の費用がさらに発生する。その他、光ファイバセンサーや人感センサーやなどの特殊なセンサーを含めると、総額 5,000 万円ほどの費用になると思われる。 既設躯体への取り付けの場合、耐火被覆の除去・修復などの費用が追加となる。

5.6 既存超高層建物の高密度モニタリング試行

高密度モニタリングを極力早く既存超高層建物に試行する。技術組合が3年でモニタリングシステムを設置し、2年間でデータ採取を行う。その後は技術組合、または機構が設立された場合はそれがモニタリングを続けながら、日本の8地方の新築あるいは既築の大型建設物にも展開する。試行の候補建物は、1)高密度ではないがモニタリングの実績が既にあること、2)詳細なシミュレーションモデルが作成されていること、3)建物オーナーが多数のセンサーの追加配置とデータ採取に同意できること、を必要条件とした。また、それぞれ耐震、免震、制振構造1棟ずつとなるように選定した。以下に概要を述べる。

5.6.1 耐震構造(地上30階建)

東京都新宿駅西口地域に位置する 30 階建の工学院大学新宿校舎を考慮する(図 15)[†]。この建物は、2011 年東日本大震災時には中上層での天井、什器など非構造の被害があったが、構造は無被害と判断されたため、1 階ロビーが一般の帰宅困難者 700 名の避難施設として開放された。ただし、将来は首都直下地震など震源近傍強震動により 3~4 倍の強い揺れが予想されるため、この建物のシミュレーションにより構造・非構造の被害の検討が行われている。図 16a は赤シンボルで構造の損傷部位を表しており(図 16b)、このように建物倒壊はしないが、多くの構造部材で損傷がおき、建物使用が困難となることが予想される。よって、揺れを抑えて被害を軽減するためのオイルダンパーによる制振改修がシミュレーションにより検討されている。また、天井落下を防ぐための実験も行われている(図 16c)。

地上30階、地下6階の大学校舎には、加速度計が地下100m深さ、地下6階、地上1、8、16、

[†]中西真子,久田嘉章,山下哲郎,笠井和彦:長周期・長時間地震動や活断層近傍の強震動など極大地震動を考慮した都心に建つ既存高層建築の制振補強に関する研究、日本地震工学会論文集、第18巻、第2号、2018

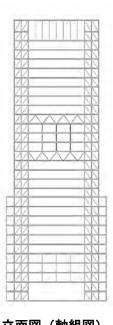
22、25、29 階に設置されており、計測点数は 26 である。1 階より上の階の総重量は 28,061 トン、 振動の周期は長手方向で 2.96 秒、短手方向で 3.08 秒、減衰定数は約 0.018 である。このため、前 述した起振器で建物頂部に 1cm/s² ほどの加速度を発生させる場合、質量 250kg の起振器 10 台が 必要である。

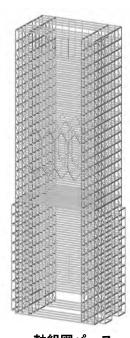
構造物のモニタリングには、1層おきの2方向水平加速度、6層おきの鉛直加速度を計測するた め計測点数は65となる。また、層間変形は各階4箇所で計測するとして計測点数240となる。図 16b の構造部材において、シミュレーションから比較的早期の降伏が予想される梁部材と斜材そ れぞれから選んだ 10 本、また図 16a, 図 16b 下に示す大空間を支える大梁は無損傷と予測される がその重要性を考慮して選んだ5本をひずみゲージにより計測し、計測点数240となる。さらに 柱は各階で48本あり、地震力が著しい外周の柱16本を1階、3階で選び計測点数256となる。 加速度計や変形に対してひずみゲージの計測数を多く計上しているが、例えば柱のひずみを計測 する場合には角型柱の4面、さらに柱頭柱脚2ヶ所、合計8枚のゲージを貼り付ける必要がある ためである。床加速度を計測する場合と異なり、部材のひずみと力を個々に評価するためには多 くのひずみゲージが必要になるが、建物の詳細な挙動を調べるためには必要な情報である。また、 加速度計や変形と比較して、ひずみゲージの単価は非常に安く、多くのチャンネルを要すること になるが費用自体が嵩むことはない(5.5.5項)。

非構造物のモニタリングには大空間の天井が揺れ易い階を3つ選び、加速度計、変位計、ひず みゲージなどの計測点数 150、ゆがみが大きいと予想されるドア、間仕切り約 20 箇所を選んで計 測点数 40、間仕切り壁、設備機器などの加速度の計測点数 60 とする。

このように膨大な数の構造部材、非構造部材のごく一部を選んだだけだが、計測点数の総計は 986となり、既存の加速度計を代用する場合 960となる。







外観写真

立面図 (軸組図)

軸組図パース

図 15 工学院大学新宿キャンパス (耐震構造、30 階建)

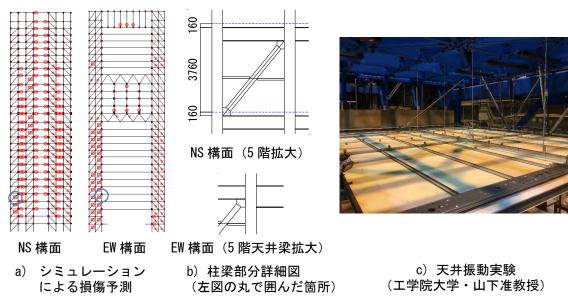


図 16 工学院大学校舎のシミュレーションと天井実験

5.6.2 免震構造(地上20階建)

神奈川県横浜市緑区長津田町地域に位置する地上 20 階建ての東京工業大学すずかけ台キャンパス J2 棟・J3 棟を考慮する (図 17)。この建物は、上部構造の剛性を高めるためにメガブレースが設置され、応力が集中するメガブレース直下の積層ゴムの引張力を低減するために、積層ゴムに浮上り機構を持たせている。2005 年竣工当時は図 17 の建物概要に示す左側の J2 棟のみであったが (3.4 節)、2013 年に J3 棟(右側)が増築された。2011 年東日本大震災時には J3 棟床が建設中であり、J2 棟側の免震層における鋼材ダンパーをとめるボルトのペンキの剥離や 1 階 EV 前の石膏ボードの剥がれた程度であり、目立った損傷は目視では確認されておらず、建物の損傷は軽微であったといえる。

地上20階+免震層のJ2棟・J3棟では、加速度計が1階、免震層、2,7,14,20階床に設置されており、計測点数は59である。その他に免震層の層間変位や積層ゴムの浮上り、ダンパー変形を計測するためにワイヤー式変位計と棒状接触式変位計が20点、2階床直上の柱とメガブレースにひずみゲージが5点設置されており、おそらく日本で最多の合計84点の計測を行っている(図18)。1階より上の階の総重量は36,332トン、免震層を考慮しないで基礎固定とした場合の振動の周期はX方向が2.346秒、Y方向が1.998秒、免震層を考慮して目標せん断ひずみを50%とした場合の実効周期(等価周期)はX方向が3.789秒、Y方向が3.963秒である。また、減衰定数は建物全体で約0.070、上部構造のみで約0.021である。J3棟が増築される以前に起振器で建物頂部に1cm/s²ほどの加速度を発生させる実験を行っており、その際には質量250kgの起振器2台を用いて実施した(図19)。

構造物のモニタリング計画は、各層 2 方向の水平加速度と鉛直加速度を計測するため、計測点数は 63 となる。また、層間変形は各階 4 箇所で計測するとして計測点数は 84 となる。さらに、応力集中が予想されるメガブレースと建物との接合部分もひずみゲージにより計測し、計測点数は 272 となる。柱は各階で 28 本あり、メガブレースが取りつく構面の柱 8 本のうち 4 本を選んで、

2,5,8,11,14,17,20 階で計測すれば計測点数 192、1,2 階では外周 20 本の内 1 本おきに柱を計測するとして 160 となる。

非構造物のモニタリングには 5 層おきで同一平面上に位置する居室に対して加速度計、変位計、 ひずみゲージなどを用いた計測点数 200、同様にゆがみが大きいと予想されるドア、間仕切りに対 して計測点数 40、間仕切り壁、設備機器などの加速度の計測点数 60 とする。

このように膨大な数の構造部材、非構造部材のごく一部を選んだだけだが、計測点数の総計は1,071となり、既存の加速度計を代用する場合987となる。

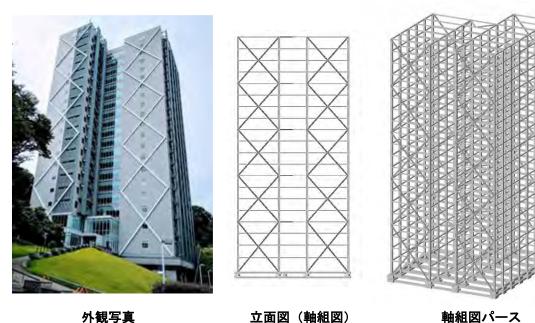


図 17 東工大すずかけ台キャンパス J2 棟・J3 棟 (免震構造、20 階建)



免震層変位



ダンパー歪・変位



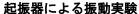
加速度(3軸)

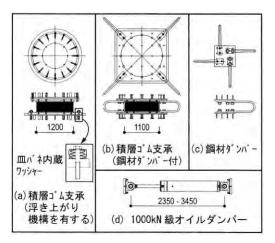


柱歪

図 18 J2 棟・J3 棟でのモニタリング実施例







免震層に設置されている装置の詳細

図 19 起振器による振動実験の様子と免震層に設置されている装置の詳細

5.6.3 制振構造(地上54階建)

東京都港区六本木に位置する地上 54 階建ての六本木ヒルズ森タワーを考慮する(図 20)。この建物は、2003 年の竣工であり、六本木ヒルズ地区は災害に強く安全な街、開発地区のみならず周辺地域にも貢献できる街といった防災都市の中にある建物である。建物内部には図 21 右側に示すオイルダンパー356 基、鋼材ダンパー192 基の合計 548 基の制振ダンパーが設置されている。防災に重点をおいた街づくりのモデルケースとして、加速度のモニタリングも行っていることから現状でも極めて重要な例として挙げられる。また、本建物では先進的な取り組みとして、地震発生時に計測した加速度データを即座に解析して建物損傷判定を行うシステムを開発している。これらの情報はポータルサイトで公開されている他、登録者のスマートフォンと連携して判定結果を通達する仕組みになっており、地震後の適切な避難行動を誘導する取り組みがなされている(図 21 左)。

地上 54 階、地下 6 階の本建物には、加速度計が地下 6 階、地上 1、20、40、54 階に設置されており、計測点数は 15 である。1 階より上の階の総重量は 292,827 トン、振動の周期は 5.573 秒、減衰定数は 1 次モードで約 0.044 である。このため、前述した起振器で建物頂部に 1cm/s² ほどの加速度を発生させる場合、質量 250kg の起振器 700 台が必要と算定され、より大型の起振器でも多数必要であり実験は不可能である。そのため、常時計測による微小振動の計測が必要となる。

構造物のモニタリングは 1 層おきの水平加速度、6 層おきの鉛直加速度を計測するため計測点数は 63 となる。また、層間変形は各階 4 箇所で計測するとして計測点数は 216 となる。また、10 層おきにオイルダンパーと鋼材ダンパーの変位とひずみを計測するとして、計測点数は 70 となる。さらに柱は各階で 72 本あり、地震力が著しい外周の柱 36 本の内、1 本おきに 16 本の柱とダンパーが取りつく柱 8 本について 1, 3, 5 階でひずみゲージにより計測するとして計測点数は 624 となる。制振建物の場合、地震発生時には外周部だけでなくダンパーが取りつく柱についても大きな力が作用することが考えられるため、柱のひずみ計測には多くの計測点数を計上した。

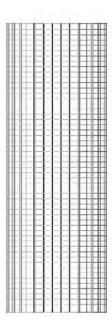
非構造物のモニタリングには天井の構成方法が異なる5フロア(1階天井:在来工法、10,14,42階天井:システム天井、53階美術館:特殊天井)を選んで加速度計、変位計、ひずみゲージなど

で計測するとして計測点数 200 とする。天井材に関しては柱と天井材の接する箇所や天井の隅部など役物が用いられる箇所も計測の対象とする。ゆがみが大きいと予想されるドア、間仕切り約 30 箇所を選んで計測点数 60、間仕切り壁、設備機器などの加速度の計測点数 100 とする。

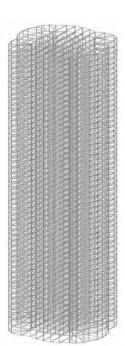
3 ケースの中で最も建物規模が大きい本建物に対しては、構造部材で計測点数 973、非構造部材で計測点数 360、合計 1,333 の計測点数を計上した。前述のように、既存のモニタリングシステムは地震発生直後の損傷判定や EV の制御機能とも連携していることから、それらとは別系統として全てのセンサーを新規に設置することを考えている。



外観写真

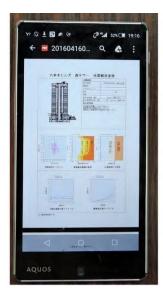


立面図(軸組図)



軸組図パース

図 20 六本木ヒルズ森タワー (制振構造、54 階建)









被害状況判定(スマホへ送信される)

建物内に設置されている制振ダンパー

図 21 モニタリングデータを用いた地震後の被害状況判定と制振ダンパー

第6章 シミュレーション高度化のための方策

シミュレーション技術の高度化のための第三ステップとして、産学官の連携による実施体制を整える必要があり、それらをここで注釈しておく。内容は、日本の学会による活動、シミュレーションについて過去に行われた精度確認、実験とシミュレーションに基づく国際標準化、米国・日本におけるモニタリングと制度、日本の国家プロジェクトとの関連である。

6.1 学会による活動

6.1.1 日本建築学会における動き

シミュレーションの原理と技術は物理現象の解明や予測のため研究者により築かれ、多くの研究の蓄積により今日に至っている。計算工学の発展とともに、以前は研究者のツールであったシミュレーションが建築や土木の実務に使われ、構造物の合理化・効率化のための技術開発において、その果たす役割はますます大きくなっている。このため、シミュレーションの更なる発展を目指す本提案は、産官学の密接な連携により実現化することを考えている。

WG3 主査の元結を通して、本報告における諸々の提案を日本建築学会の研究者と検討している。 機械分野においては V&V という概念は既に広く共有されており、海外の論文集などでは V&V が不十分な論文は採用しないことが標準となっており、V&V が当然のこととされている。これに対して、我が国の建築分野では V&V が十分にされていない構造解析ソフトおよびモデル化が未だに存在している。

そこで、建築における V&V に関する啓発活動として、日本建築学会/構造委員会/応用力学運営委員会との共同で講演会を実施していく。まずは、横国大名誉教授、元日本機械学会会長の白鳥正樹先生に「第1回 計算の品質保証について」という題で講演をお願いした(令和2年3月19日16時~、東京工業大学田町キャンパス CTC 内 国際会議室)。これを今後定期的に開催していく予定である。さらに、土木学会、日本機械学会ほかとの連携も強めていきたい。

6.1.2 確かな実験・解析データの構築

高精度のシミュレーション法の構築のためには、基盤となる実験データが「確かな」ものでなければならないが、解析がそうであるように実験もまた、実験結果が想定している問題の再現となっているかは極めて重要な問題である。このため確かな実験結果を整備していくためには、載荷・計測方法などが検証された実験結果のみから成るデータベースを構築しなければならない。すなわち、これは研究者の協力によって可能となり、同様な目的で日本建築学会でも行われていた。しかし、実験結果を吟味することは極めて専門性の高い業務であり事務的な手続きではできず、本提案の大型実験のデータ量からして、学会のボランティア活動に期待するには無理がある。かなりの労力が必要となるため、専門家の登用やアウトソーシングの活用が肝要であり、その人件費の捻出も重要な課題となる。

さらに、構築された実験データの維持管理および一般による活用の促進などの業務も、同様な理由から学会で請け負うことは困難であり、データベースを扱っている公的な機関との協調が望ましいと考えている。防災科学技術研究所兵庫耐震研究センター(E-defense)において過去に実

施してきた実験結果のweb上での公開(ASEBI)や、同センターのデータ利活用委員会において、 震動台実験のデータを有効利用するためのシステムが既に検討されている。本提案における部材 実験についても、これらの関係機関との連携によりデータベースが構築可能と考えられる。

一方、高精度のシミュレーションのためには、十分な精度を構造解析ソフトウェアがもっていることと、十分なモデル化を解析者が行うことが要求される。前者は、上述した実験に基づき作成されたソフトウェアが、数理的に整合し、定式化通りに解を算出するか検証する必要性を意味する。これはソフトウェアを提供するものが負うべき責務であり、よって解析結果の詳細なデータの公開に努めているが、より一層推進するべきである。また後者は、ソフトウェアに入力するデータの検証の必要性を意味している。同じ構造解析ソフトウェアを用いたとしても、利用者が作成・入力するデータにより解析結果は大きく異なる。姉歯事件として知られる構造計算書偽造問題はエンジニアが故意にデータを操作したものであるが、複雑な構造解析になるほど入力データの影響が大きくなり、利用者の過失によって大きなエラーが発生する可能性がある。

以上のうち前者には、3.2 節で述べたソフトウェアの検証(Verification)が必要であり、建築学会活動として過去に行われている。後者には、解析の妥当性確認(Validation)が必要であり、数少ないが実物大の実験との比較が行われた。これらを 6.2 節に例示するが、解析精度は必ずしも良くなく、学会で改善の努力を継続する必要がある。また後者については、建設分野で個々の問題が唯一無二でありバリエーションは無限ともいえるが、土木学会で行われたように「解析が困難な現象のモデル化と具体的な入力データ、解析と実験との比較データなどを準備・整備していくことが望まれる。これについては応用力学運営委員会(前掲)も重要な課題として認識している。

大崎純教授(京都大)が、本節で述べたアクションに関する特別研究委員会あるいは特別調査 委員会を日本建築学会に申請し、これらの委員会に産学官から委員を集結し、実効性のある計画 を議論していく。また、計画は継続的に更新していかなければならない。この更新を有機的に実 施するための組織として、本技術組合またはシミュレーション高度化機構の設立を提案する。

6.1.3 エンジニアの育成

解析結果の品質保証は以上のデータベースを整備すれば達成されるものではない。現代の構造 解析ソフトウェアは、ソフトウェア利用者個人ですべてを理解することが困難なものとなってい る。このために建設に対する解析技術者を継続的に育成していくシステムが産学官それぞれで必 要となる。ここで提案するのは、

- 1) 高精度な実験および数値シミュレーションの講習会、
- 2) ブラインド解析による数値シミュレーションのコンペティション、
- 3) 高度な解析を実施担当できるエンジニアの資格認定制度の基盤づくり、である。

1) は、高精度な実験を行うため思考された実験計画、および既往の実験結果のシミュレーショ

[†]鋼構造のインターフェースストラクチャの有限要素モデル化に関する調査研究:報告書、土木学会鋼構造委員会、鋼構造のインターフェースストラクチャの有限要素モデル化に関する調査研究小委員会、2019.9

ンのため思考されたモデル化について、習得・議論する場を若手技術者などに提供するものである。 2) は、実施予定の実験について公開された解析上必要な諸元を用いて実験以前に結果を予測し、その精度を競うものである。これは笠井・大崎(前掲)の指導のもと E-defense の実験について行った実績があり、国際コンペティションとして実施された (6.2 節)。いずれも大学の一研究室で行われるものではなく日本建築学会や防災科学技術研究所と連携して計画実施されるべきである。 3) は、若手技術者に解析技術の習得についてインセンティブを与え、社会的に評価する制度である (3.5 節)。これまでも日本建築学会内部でその設置運動があったが、実施・運営の負荷が委員のボランティアで担えないと予想され見送られた経緯がある。資格取得のメリットを具体的に考え、また、収入を得て 1)、2) の経費負担として還元することも考えている。



図 22 ブラインド解析コンテスト (防災科研・大学)

6.1.4 BIM や AI などへの展開

BIM については国交省において建築 BIM 推進会議(委員長:松村秀一、東大特任教授)が BIM/CIM 推進委員会(平成30年9月3日設置)を設置している。大手ゼネコンでは10年ぐらい 以前から BIM の導入に積極的であったと聞くが、BIM と構造解析ソフトウェアが統品質保証と安全安心技術は同時に考え、両者の統合化に向けての議論を開始し、BIM と構造解析とのインターフェースの仕様設計など早急に統合化を図れる環境づくりをしていく。なお、これを現在進行中の PRISM(6.6 節)へ組み込むには時期的に早々であるが、将来の方向と考えている。

一方、AI については、日本建築学会において AI の利活用に関する特別調査委員会(委員長:野城智也、東大教授)が組織されている。その設置目的の中で、「AI のアルゴリズムには人々の要望や規範が反映していて、AI と人との関係は価値中立ではないという注意点がある。」という指摘がある。本章で述べた「確かな」実験データや解析モデルを AI に組み込むために、上記の教育制度が重要な意味をもつ。

6.1.5 モニタリング普及に向けた委員会活動

現在、日本建築学会では地震発生時の建物健全性評価を目的とした技術発展と構造へルスモニタリングの普及を目的に振動運営委員会に建物健全性モニタリング小委員会(主査:佐藤貢一)が設置されている。同委員会は10年程度の継続的な活動を行ってきており、2020年1月には「建

物の健全性モニタリング評価技術の取り組みと今後の課題」と題したシンポジウムを開催している。近年多発している未曽有の大地震により企業の事業継続計画対策が一層の高まりを見せており、元来目視で行ってきた被害調査では到底対応できない超高層建築物等に対しても一貫して被災度判定評価が行えるモニタリングシステムの重要性を訴えている。委員会はゼネコンや設計事務所のメンバーから構成され、今後の事業性や技術発展に向けた情報共有、モニタリング普及に向けたロードマップの策定を行っているが、それらの推進のためにはモニタリングデータの一般への公開、センサー導入に向けたコスト問題、センサー導入の制度化が必要であるとしている。その中でも、制度化については最も重要な問題と捉えており、国土交通省が平成30年「建築構造設計基準の資料」†において、国の管理する高さ45mを超える建物、免震構造及び制振構造の建物に対して「地震応答の計測及び記録をする装置の等の設置」を義務付けたように、民間の建物に対して「地震応答の計測及び記録をする装置の等の設置」を義務付けたように、民間の建物に対しても同様な義務化が行われることが必要だと考えている。その他、未だ国内の耐震化されていない建物に対して、地震後の対応をスムーズにさせるために耐震補強するまでの期間に補助金を助成するなどの、国土強靭化にむけた働きかけも重要であるとしている。また、モニタリング技術の発展としては、層間変形角による被災度判定技術の高度化や非構造部材や人的安全確保のためのモニタリング技術の開発が必要としている。

本提言でも、従来型モニタリングの普及と高密度モニタリングの8地方での実装を目標としているが、同委員会の活動は主に従来型モニタリングの普及、そしてデータ公開とモニタリングの制度化であり、本企画テーマと同様の見解を持つものであることから、本プロジェクトの出口以降も連携して検討を進めていく予定である。

6.2 シミュレーションについて過去に行われた精度確認

シミュレーションの精度を検証するうえで、実験結果と解析結果を比較するのは、対象とする構造物または部材が小型のものであれば容易であるが、まずは数あるプログラムの中で設計者が使用したプログラム自体が正しいものであるのかを判断する必要がある。それを検証するために、各種解析プラグラムを用いた地震応答解析結果を比較した研究がある。この検討は、3.2 節で述べたソフトウェアの検証(Verification)にあたるものであり、以下に要約する。

各ソフト会社のプログラムの違いによる差を検討するために、簡単な質点系モデル(各層の質量を1つにまとめて各層の自由度を水平1方向にした簡易モデル)を用いて同様な条件を与えた解析を行った場合には解析結果のばらつきは小さく、最大応答値は部分的に卓越するもので平均に対して十数%程度であったことが示された†。対して、部材構成モデルとして設計された7階RC造建物の静的増分解析結果を各社に配布し、骨格曲線の設定、履歴法則、減衰の決定方法に解析者の判断により定めた質点系モデルを用いて解析を行った場合には、最大層間変形角で平均値に対して約2倍のばらつきを生じたとしている。数あるパラメータの中でも特に留意すべきは各層の復元力特性であるとしており、簡易なモデルでさえもこれほどの差が生じることに留意しな

†国土交通省:建築構造設計基準の資料(平成30年度版)、平成30年4月25日国営整第25号 †† 辻幸二,山口圭介,深野慶,窪田敏行:耐震性能評価プラグラムによるRC 造建物の地震応答解析結果の比較,日本建築学会構造系論文集,第550号,pp.119-126,2001.12 くてはいけない。

さらに、参考文献[†]では複雑な部材構成モデルを各社のプログラムで解析させた場合の比較検討を行っている。前述の簡易モデルは各層 1 つの質量と復元力特性を与えるだけの簡単なモデルであったが、部材構成モデルは与えられた条件をもとに設計者が柱・梁・床などをそれぞれ設定する必要があることから、解析結果が解析者の能力にかなり依存すると考えられる。検討モデルは5 層、2 層の RC 建物 2 種類と 1 層の鉄骨造建物 1 種である。このように極めて単純なモデルでも、崩壊モードに大きな差異が示され、基本的な設計方針が解析者によってばらつくことを意味する。近年、建物の大型化・複雑化に伴い部材構成モデルの解析検討は必要不可欠なものとなっているが、モデル構築の上で基規準となる情報も膨大・複雑になる一方であり、この両方を網羅的に熟知することは極めて困難になっていると言える。

上記2つの例は、解析プログラム上の話であるが、参考文献**では実大建物の崩壊実験をそれぞれ事前に予測した場合の解析精度を検証している。これは、3.2 節で述べた解析の妥当性確認 (Validation) にあたり、世界から約50チームが参加したブラインド解析競技である。評価は、まず崩壊前の床レベルの最大応答 (例えば加速度) および各層の最大値 (例えば層間変形角)、1層柱のひずみ、残留変形とし、次いで、極めて大きな地震動に対して建物が崩壊するかどうかを評価対象とした。なお、解析モデルの構築においては、参考資料として事前に柱脚のみを実験した結果を参加者に配布している。結果として、崩壊前の結果でさえも実験結果と比較して解析結果の層間変形角を小さく予測したグループが半数以上であり、残留変形角の予測についてはさらに大きなばらつきを生じていた。さらに、崩壊するか否かの予測については約半数のグループが倒壊するという結果と近い結果を得たが、残りの半数は倒壊しない、またはより早期に崩壊すると予測しており、建物の崩壊予測が如何に難しいものであるかが明らかになった。以上の結果は、崩壊のきっかけ予測された部材の事前実験データを参加者に提示したうえでの精度であり、実務においては2章で示したように実大の部材実験が行われずに外挿により予測しているものであることから、実建物の挙動を予測することはさらに難しいものであることを示している。

以上の3件は実験的なモデルに対して解析精度の検討がなされているが、解析精度そのものが構造設計に対しても影響を与えかねないことに言及する文献***** もある。相模トラフ沿いの地震動を想定した本文献では、鉄骨造及び鉄筋コンクリート造それぞれの建物モデルについて部材構成モデルと質点系モデルの解析結果を比較している。いずれの建物モデルにおいても耐震設計で一般的に用いられるトリリニア型の復元力特性を用いた質点系を用いた場合には、1/30radを超えるような大振幅領域における建物応答を十分な精度で再現することができないことが示されている。また、設計時によく用いられる簡易モデルについても今後さらなる高精度化が求められるが、部

[†] 辻英一,魚木晴夫,中川佳久,山浦晋弘,大谷圭一,桜井譲爾:標準建物モデルによる実用構造計算プログラムの調査研究(その2)2次設計部分,日本建築学会構造系論文集,第430号,pp.91-99,1991.12

^{††} 引野剛,大崎純,笠井和彦,多田元英,中島正愛:実大4層鉄骨建物のブラインド解析コンテストの総括と解析精度の検討,日本建築学会構造系論文集,第75巻,第655号,pp.1717-1726,2010.9 †† 岡村祥子、千葉大輔、谷翼、久礼実希:相模トラフ沿いの地震を想定した建物応答、パネルディスカッション資料「プレート境界地震による大振幅時震動の予測と耐震設計」、日本建築学会、振動運営委員会、日本建築学会大会(北陸)、構造部門(振動)、2019.9

材降伏後の剛性低下率によっても建物応答は大きく変化するため、部材構成モデルの妥当性を含めた検証が今後必要になるとしている。

つまり、解析プログラム自体が計算技術の発達により高級なものになったとしても、それを用いてモデルを作成し、解析を行う技術者の能力が解析結果を左右することは解析モデルの簡易さ・複雑さに依らず克服できない問題である。それぞれの設計者がそれぞれ行った解析結果を、何をもって正しいと判断し、何を根拠に安全性の高い構造物であると評価するためにも、その基盤構築、与えられたデータに対してあらゆる技術者が同様なモデル化を行えるような統一的な手法・基準を確立させることが、今後のシミュレーション技術の発達において必要不可欠な要素であると考えられる。

6.3 実験とシミュレーションに基づく国際標準化

超高層建築やインフラの国際的な建設プロジェクトにおいて、地震対策として用いられる高強度鋼材、免震支承、制振ダンパーなど、高性能の大型構造部材やその技術の輸出競争が盛んになっている。また、これらの大型構造部材の要求性能、認証方法などの国際標準化が一部始まっており、今後大きな展開が予想される。多くの地震の体験により、世界で最も性能改善を重ねてきた日本の大型構造部材の優位性を獲得する必要がある。4章で述べた部材実験データは、その達成に有用であり、技術面でのその計画は4.4節で述べた。ここでは、国際標準化戦略の観点から述べることにする。

国際標準化が既になされたものは、免震ゴム支承のみであり、日本がその委員会(ISO/TC45)を主導している。ただし内容は、他国に合わせた低めの性能を規定しているのみである。この現状の改善のため、まず国内でグレードを定めなかった従来のJIS K6410-1,2 に、高耐久・高性能仕様を追加して三種グレードを規定するJIS K6410-3 が策定され、2018年2月に制定された。「高機能 JIS」と呼ばれるものであり、今後はこれを現行の国際標準に反映させ、他国製品との差別化をはかることが期待できる。

一方で、他の免震支承や、鋼製柱・梁部材、制振部材、鋼管コンクリート杭部材など、世界に傑出できる大型構造部材の国際標準化は未だされていない。建物の重要性により要求性能を規定する世界の耐震設計の方向に則り、上述のようなグレード化は自然な方向であり、また、高い技術の正当な評価という観点からも望ましいと言える。以上を踏まえた国際展開の準備のため、まず免震ゴム支承に関し日本を幹事国として ISO22762 を作成した TC45/SC4/WG9 の活動状況と各国規格との関連、構造耐震設計の基本に関し日本を幹事国として ISO3010 を作成した TC98/WG1 における今後の先端技術の取り扱いの方向、上述した他の様々な大型構造部材も含む先端技術に関する各国規格と建築・土木設計規準、委員会活動などについて調査する。

未来投資戦略 2017 の「IV 海外の成長市場の絞込み (p.164~)」における我が国企業の展開支援として、インフラ輸出の拡大、中堅・中小企業支援が述べられており、それに高性能の構造部材を付加して安全・安心のレベルを高めることができる。国際標準化された場合、大企業だけでなく中小企業の海外認証取得の道も開ける。また、知的財産推進計画 2017 の「グローバル市場をリードする知財・標準化戦略の一体的促進 (p.26~)」における(2)今後取り組むべき施策において、

官民の標準化体制強化として、官民が連携して日本の優れた技術やサービスを活かした国際標準化を一層躍進するため、官民の協力・連携体制を含め、基準認証制度の在り方について検討するとあり、本調査の目指すところと合致する。

因みに、試験方法規格と性能等級規格 (グレード規格) を成果物とすることは、経済産業省が、産学官連携ジャーナル 2014 年 2 月号の「特集 1 - 国際標準化はなぜ重要か」で説明している。日本発の数多くの高性能・大型構造部材は典型的な最高級タイプ C として考えられる。これらを総括した試験・評価方法、およびグレード規格化の必要性を唱えていく。

6.4 シミュレーション技術の開発と管理

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ー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、技術の裾野を拡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、論文などでの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用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。

一方で、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ため、シミュレーションの高度化に適していると思われる。その今後の方向性も検討する。

52

[†]多田元英、桑原進:インターネットで異種プログラムを統合した構造解析システムの基本考察、 日本建築学会構造系論文集,第580号,pp.113-120,2004.6

6.5 米国・日本におけるモニタリングと制度

日本国内においてモニタリングデータを一般に公開されている建築研究所の強震記録観測網 (図 23a) は、全国 88 の建築物を対象としたものである。対象建物は主に庁舎であるが、従来型モニタリングの典型として計測点数は極めて少なく、対象建物の分布は関東の首都圏に偏っている。その他にも、建設を担当した企業が維持・管理を目的として建築物のモニタリングを行っている建物が 800 棟ほど存在するが、観測したデータは公開できないという状況である。また、オーナーがモニタリング設備を発注して自身のためにモニタリングを行う建築物もあるが、その数を把握することは難しい。建築物以外にも、国総研により土木構造物の加速度強震記録が定期的に公開されているが、一般への公開は地震発生から時間を要する。

このように、日本におけるモニタリングデータの活用は非常に限られたものであり、有用な観測記録が入手できた場合には当該機関(当事者)だけでなく関係者以外にも広く公開し、記録を最大限に活かすことが必要であると訴える研究者も多い。この背景の下、日本のモニタリングデータにいち早く注目したのがフランスである†。既設ダムの地震観測は、ダムへの入力地震動や地震応答の諸特性が実証的に検証できる他、観測記録はダムの安全管理や設計・施工の高度化などに非常に有利である。観測記録自体が価値をもつという認識、その有効な活用の動きにおいて、日本は海外から遅れをとっていると思われる。

構造物の積極的なモニタリングとデータ活用を行っている政策として、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)がある。CSMIP は 1972 年以降整備が進められており、現在では構造物だけでも 940 程度の観測を行っている(図 23b)。対象の多くは建物であるが、中には橋やダムのデータも含まれている。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。CSMIP は、強震動を記録し、耐震基準や耐震設計の改善に寄与することにあったが、情報通信技術の発達により地震発生直後数分でデータを公開することが可能となり、地震直後の緊急対応のためにも役立てられている。このような計画は設立当初にはなかったものであるが、緊急時にも利用できる点が評価され、州政府や自治体にとって CSMIP がより高い価値のあるものと認められるようになった。

日本でも CSMIP のようにデータを活用するためには観測データの公開が大前提であることから、強震記録観測網の拡充、およびそれを管理する公共機関が新たに必要になる。また、観測機器の設置に際し建築主に負担がかからないような制度の導入も求められる。一方で、現在の日本独自の状況として構造ヘルスモニタリングの急速な普及があり(5.1 節)、企業サービスにより得られたデータの公開について国益の面から制度化するなど、政府の検討が望まれる。

[†] Jean-Jacques Fry & Norihisa Matsumoto: Validation of Dynamic Analysis of Dams and Their Equipment, ICOLD Proceedings, Volume 1

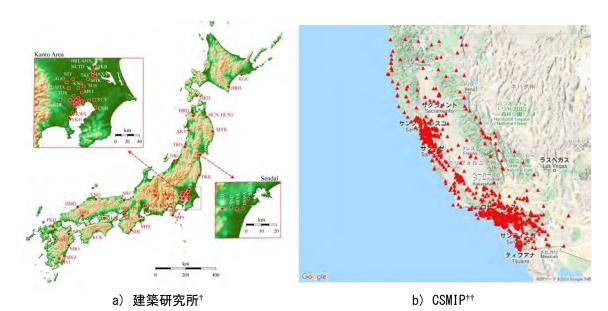


図 23 強震記録観測網

6.6 日本の国家プロジェクトとの関連

SIP (戦略的イノベーション創造プログラム): SIP (Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program)は、研究開発と社会実装を一気通貫で進めるプログラムであり、規制・制度改革や特区制度の活用等も視野に入れて推進していくものである。第2期(2018年~)12課題のうち課題「国家レジリエンス (防災・減災)の強化:統括・堀宗朗」(以下、「SIP 国家レジリエンス」)では、衛星・IoT 等の最新技術も活用した、国と自治体向けの災害情報統合システムの開発を大きな目標としている。国の統合システムに連動するシステムに、衛星コンステレーションを用いた被災判定システムがある。これは、大規模な風水害や地震災害に対して、政府対策本部が設置される発災後2時間を目途に、多数の衛星データを使った広域被災判定を可能とすることを目指している。これに対し本提案は、個々の大型構造物を各部材のシミュレーション高度化に基づき評価する点で性質が異なる。なお、課題「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術:統括・藤野洋三」(以下、「SIP インフラ」)は第1期(2014~2018年)に土木構造物のモニタリングを題材に挙げ、インフラの損傷度を点検・診断する技術を展開したが、本提案は大地震での損傷を対象とする点で異なっている。

ImPACT (革新的研究開発プログラム): ImPACT (Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies Program) は、政府の科学技術・イノベーション政策の司令塔である総合科学技術・イノベーション会議が、ハイリスク・ハイインパクトな研究開発を促進し、持続的な発展性のあるイノベーションシステムの実現を目指したプログラムである。本提案は、構造物ひいては都市の安全・安心をより向上させるための構想であり、既にある技術の信頼性を増強するものであることから、本政策とは意図が合致しない。

PRISM (官民研究開発投資拡大プログラム): PRISM (Public/Private R&D Investment Strategic Expansion Program) は、民間研究開発投資誘発効果の高い領域又は財政支出の効率化に資する領

[†]建築研究所の強震観測: https://smo.kenken.go.jp/ja より引用

^{††} https://www.fdsn.org/networks/detail/CE/より引用

域への各府省庁施策の誘導を図ることを目的としたプログラムで、課題「革新的建設・インフラ維持管理技術/革新的防災・減災技術:統括・田代 民治」は、前述した「SIP 国家レジリエンス」、「SIP インフラ」を意識しながら、「革新的建設」を中心に推進されてきた。その中の国 3, 国 5 と位置づけられる「建築構造物等の防災・減災」では、被災建築物の使用性の迅速判定システム、仮設・復興住宅の早期整備が国立研究開発法人建築研究所(建研)を中心として検討されているが、本提案は今後の大型建設物の耐震性能向上を経済的に進めるためのデータ取得とシミュレーション精度向上を提案しており、活動内容は合致しない。一方、「革新的建設」においては、国 1 の課題として国土技術政策総合研究所(国総研)を中心として主に土木関連の検討がなされているが、現在 2 年目が終了して 3 年目が始まろうとしており、5 年間を想定したロードマップの下で行われている。本提案の次世代評価法、サステナブル PDCA サイクルの考え方が、PRISM の BIM を含む PDCA サイクルや建設の新設計・新技術に適用可能と思われるが、上記の事情もあり PRISM への参加は難しいと考えられる。

MOONSHOT (ムーンショット型研究開発事業): MOONSHOT は破壊的イノベーションの創出を目指し、従来の延長にないより大胆な発想に基づく挑戦的な研究開発を推進するプログラムである。本提案は、都市におけるレジリエンスの向上に与するものであると考えるが、破壊的イノベーションの類ではないことから、本政策とは意図が合致しない。

OPERA(産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム): OPERA (Program on Open Innovation Platform with Enterprises, Research Institute and Academic) は、JST (国立研究開発法人科学技術振興機構)が産業界との協力の下、大学等が知的資産を総動員し、新たな基幹産業の育成に向けた「技術・システム革新シナリオ」の作成と、それに基づく学問的挑戦性と産業的革新性を併せ持つ非競争領域での研究開発を通して、基礎研究や人材育成における産学パートナーシップを拡大し、我が国のオープンイノベーションを加速することを目指すプログラムである。東京工業大学でも「社会活動継続技術創成コンソーシアム: 統括・山田 哲」(4大学、36企業・機関)として事業が採択されており、本提案における東工大研究者らも部材の実大実験やモニタリングの検討を行っていることから、本プロジェクトとの連携を目指している。

第7章 プロジェクト出口と展開

7.1 産業競争力と国土強靭化

大型建設物は、単に大規模で建設費が高額というばかりでなく、被災時およびその後の社会へのインパクトを考えても個々がまさに国家プロジェクトほどの規模である。この極めて大きなインパクトを有する大型建設物の安全・安心の評価を具体的かつ高精度に行える精緻なシミュレーションは 技術力で競争すべき建設業にとって非常に重要な武器となる。すなわち、精緻なシミュレーションは建設物の品質を客観的に評価することを可能とし、これにより客観的な価値観に基づく健全な企業間競争などを実現する原動力となる。

また、地震発生前後における被害を高精度に予測することを可能とすることにより、国土強靭化に向けての詳細な計画もまた可能とする。つまり、図 24(a)の基本目標†に掲げた人命の保護や維持すべき重要な機能に対し、起きてはならない最悪の事態を明らかにし、そのような事態に至らないための事前に取り組むべき施策を考える上で、精緻なシミュレーションが有効なデータを明示することができる。

このように産業競争力および国土強靭化を推進する上で精緻なシミュレーションは必要不可欠であるが、それを可能とするための環境を整備していかなければならない。すなわち、解析結果の品質を如何に保証するか、そのための土壌づくりをしていく。本提言におけるシミュレーショ





図 24 国土強靭化の(a)基本目標と(b) PDCA サイクルによる進め方†

^{*} 内閣官房「国土強靭化とは」https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo kyoujinka/about.html より引用

ンの高度化および大型構造物の安全・安心を確保するためのサステナブル PDCA サイクルは、図 24(b)の内閣府が示す PDCA サイクルによる国土強靭化の進め方に新たな視点を与えつつ、適用することが可能であると考えられる。

7.2 本提言内容の要約

ここでは、2~6 章で述べたプロジェクトの意義を再確認·要約しておき、それに基づき次節で 政府課題解決の施策と実現に向けた産官学の役割分担や内容を記載する。

第2章「検討の視点と範囲」: 大型構造物を構成する要素として、自重や積載荷重などの静的 荷重に加えて地震や風などの動的荷重に耐えて建物全体が崩壊しないように支える構造部材と、 構造物の固有周期の調節や地震エネルギーを消散させることにより揺れを制御する免震・制振部 材の2種類について、性能評価方法とシミュレーション方法を調査した。著しく縮小した試験体 をもとに評価した性能から大型構造部材の性能を外挿し、シミュレーションが行われているのが 現状である。

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していくために「シミュレーション高度化機構」を設立する。同機構は、構造部材の縮小・実大実験を主導し、構造部材にかかわるビッグデータの構築とその活用方法を検討する。実験は国内の実験ネットワークを活用するだけでなく、載荷能力が足りない場合には海外の施設利用も考慮する。また、建築産業における V&V 方法論を実行に移し、構造物のモニタリングを実施・普及させる。さらに、シミュレーションを職能として確立させるための教育方法と資格化制度を整える。

第4章「実大実験の計画」: シミュレーションを高度化するための第1ステップとして、部材レベルでの V&V を実施するために実大実験の計画を行った。このほか、1/4 倍、1/2 倍の縮小試験体も加力し、実大の場合は中国と台湾の試験装置を用いた場合にどれほどの試験が行えるか検討した。縮小・実大実験は実験データ取得だけでなく、構造部材や免震・制振部材の実験方法の規格・標準化(JIS 化)を見据えた基礎的な研究も含み、機構は規格化に向けた活動を先導する。

第5章「モニタリングの計画」: シミュレーション高度化のための第2ステップとして、構造部材の集合体である構造物の V&V を実施するため構造物のモニタリングを計画した。モニタリングには従来と比べ安価なセンサーを用い、1棟に対し1,000の計測点数を持たせる高密度モニタリングを提案した。これにより構造物の局所的な挙動を把握して部材の損傷余裕度まで評価できるような高度化を図る。また、この結果から、より効果的な低密度モニタリングを普及させる。

第6章「シミュレーション高度化のための方策」: シミュレーションを高度化するための第3ステップとして、産学官の連携方法を提案した。V&V がなされた確かな解析技術を広く技術者に定着させるための教育方法として、講習会、ブラインド解析競技、資格化を実施する。さらにビッグデータの活用やBIM,AI との連携を進め、シミュレーションを活用した建築技術の向上を図る。国益の観点からのモニタリングの制度化を推進するため、米国カルフォルニア州で実施されているカルフォルニア強震観測プログラムを紹介した。

7.3 プロジェクト出口

プロジェクト終了後は、リーダーの東工大とコ・リーダーの日本製鉄が、プロジェクトメンバーとともに、下記 1) ~6) を準備または一部を開始し、さらに「シミュレーション高度化機構(仮称)」の在り方も検討しながら府省との議論を続けていく。1 年後には、1) ~6) の活動本格化のため、産官学に呼びかけてオールジャパンのチーム(コンソーシアム)を結成し、5年後に機構を設立する。活動については3章にまとめてある。

以下、「産」とあるのは WG1 のゼネコン 5 社に、中堅多数を勧誘、WG2 のメーカー、WG3 のソフト会社、「官」は国土強靭化を推進する内閣府、建設物の基準を扱うだけでなくモニタリングの実績も持つ国土交通省の建築研究所、実験と数値震動台(シミュレーション)および ASEBI によるデータ公開を行う文部科学省の防災科学技術研究所、製品等の基準・標準化(JIS)を担当する経済産業省、「学」は日本建築学会、土木学会、そして実験、解析、モニタリングの実績をもち、委員会の活動も中心的に行ってきた東工大、京都大学、慶應義塾大学などを現段階で考えている。

1) 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とシミュレーション精度向上を計画・実行する。

機構設立前の準備活動

準備期間における推進主体はゼネコンを中心とした「産」とする。まず、産が産業競争力の向上に与する課題選定を行うことが自然であり、それを非競争領域としてデータ共有可能なものにする。実験の計画・準備は、広い実験ネットワークをもちデータ精度にも細心の注意を払う「学」が中心に行う。日本国内で載荷能力が不足する場合は海外施設も考慮する。「官」は実験データのビッグデータ化、当該データの活用を行う文科省と連携して検討を進める。また、経産省が、既に国際標準化がなされている免震ゴム支承を参考に、その他の免震支承や鋼製柱・梁部材、制振部材、鋼管コンクリート杭部材などについても規格・標準化(JIS)の整備を行い、さらにこれを国際基準に反映させて他国製品との差別化をはかる。

機構設立後

機構設立後における推進主体は「官」とし、「産学」の協力のもと部材解析精度の実験検証、実験データの集中管理および利用方法の整備を進め、実験方法の規格化に着手する。また、実験データは公開を原則とし、ブラインド解析競技の実施により部材レベルの V&V を促進する。

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、建設産業の実情をふまえて築いていく。

機構設立前の準備活動

準備期間における推進主体は、シミュレーションを開発してきた「学」とする。日本建築学会にシミュレーションに関する特別委員会を設置し、建設産業における V&V 方法論を検討する。「産」は建設産業の現状やニーズなどの情報を委員会に提供するとともに検討に参加する。本委員会では V&V 方法論の推進体制やシミュレーション精度の管理体制も含めた議論を行い、機構設立後の体制を築く。

機構設立後

機構設立後における推進主体は「官」とし、「産学」の協力のもと V&V の方法論と管理を含めた実行体制を構築、推進活動を行う。また、継続的にシミュレーション精度の監督を行う。

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。

機構設立前の準備活動

準備期間における推進主体はシミュレーションソフトウェアを開発する企業を中心とした「産」とする。まず、「学」を中心に築いた高精度シミュレーションの V&V 方法論を展開する。ソフトウェアの V&V を行い、高精度シミュレーションを実装する。その他、「産学」が連携してさらな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、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。

機構設立後

機構設立後における推進主体は「官」とし、「産学」の協力のもとシミュレーション技術 の高度化を推奨し、新たな建設技術の開発に着手する。

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従来型の低密度モニタリングおよび高密度モニタリングを計画・実行し、データ共有に関する制度作りを行う。

機構設立前の準備活動

準備期間における推進主体はゼネコンを中心とする「産」と「学」とする。産は低密度モニタリング、学は高密度モニタリングの実現を先導する。高密度モニタリングは東工大 SOFTech が進めるモニタリングの課題 4,5 の研究グループと共同し、高密度観測の必要性と効果を明らかにする。また、国交省と連携して、米国 CDMG の制度を参考にモニタリング義務化を検討し、低密度モニタリングを全国に普及させる。

機構設立後

機構設立後における推進主体は「官」とし、「産学」の協力のもと大型構造物の解析精度 検証、モニタリングシステム・データの集中管理および利用方法の整備を行う。また、モニ タリングデータは公開を原則とし、構造物としての V&V を促進する。

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 (図 2)。

機構設立前の準備活動

準備期間における推進主体は内閣府を中心とする「官」とする。国土強靭化のための PDCA サイクルを構造物に適用した場合について、新たなサステナブル PDCA サイクルを推進する。「産学」はこれらの活動を補助するものとし、「産」はサステナブル PDCA サイクルの実装、「学」は継続的な V&V 方法論の検討と検証を行う。

機構設立後

機構設立後における推進主体は「官」とし、「産学」の協力のもと内閣府と連携してサステナブル PDCA サイクルの推進とシミュレーション精度を継続的に監督する。

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。

機構設立前の準備活動

準備期間における推進主体は「学」とする。日本建築学会に委員会を設置し、資格制度の 基準とシミュレーション技術に関する教育の方針・内容を検討する。また、土木学会との連 携も行う。「産」は委員会への協力、教育の受講を推進する。また、資格制度化に向けた基 準設定を、文科省と連携して定める。機構設立前に教育内容の大枠を決めるものとし、試行 期間を経て機構設立に準備する。

機構設立後

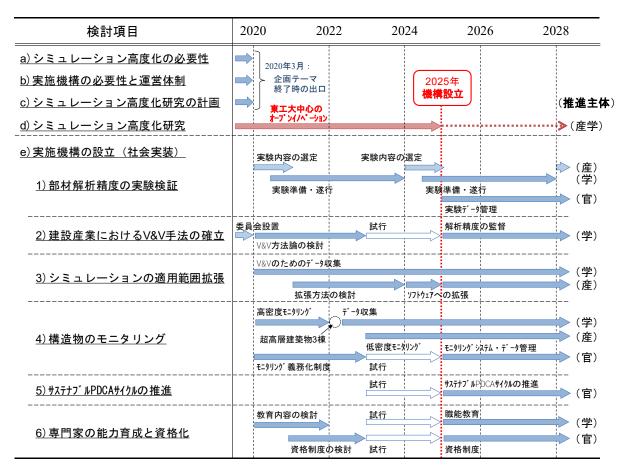
機構設立後における推進主体は「官」とし、「産学」の協力のもと専門家育成のための教育の実施、制度の運営、資格の管理を行う。なお、資格は解析能力のグレードを表すものとし、国家資格と同様な扱いにはしない。

図 25 には機構の実現に向けた 6 つの活動と産学官の役割分担の一覧、図 26 には各活動におけるマスタープランを示す。本プロジェクト終了と同時に、産官学のオールジャパンのチームを結成し、機構設立まで先頭に立って検討を進める。機構設立に向けた準備活動は上記で述べた通りであるが、2), 4), 5), 6)については機構設立前に試行期間を設ける。この期間でそれまでに準備検討した基盤に対して不備の無いことを確認する。また、実際に機構を運営する場合の運営体制や費用、人数などを確認し、機構設立に向けた最終準備を行うものとする。

本提言は、シミュレーション技術の高度化と一般に公開できるモニタリングデータを管理・蓄積できる機構を設立することが目的であり、機構設立のために必要な準備活動を提案するものである。最終的には機構の運営は「官」が管理することになるが、「産学」が適宜協力して運営をサポートしていく計画である。

活動	検討・準備			機構の低口
	産	官	学	- 機構の役目
1	非競争領域の実験選定	経産省:実験方法の規格・標準化 文科省:ピッグデータの構築・ 公開	実験の計画・実施 実験ネットワークの整備 海外研究者との連進	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とシミュレーション精度向上を計画する。実験データの集中管理。
	委員会への出席 委員会への情報提供	内閣府:国土強靭化、サステナフ・ル PDCAサイクルの推進	空会に 蛭 別 本 自全 を 設 吉	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、建設産業の実情をふまえて築いていく。解析精度の監督
3	シミュレーション技術をソフトウェアへ実装	研究課題の公募 新規技術の開発	シミュレーション技術の高度化 拡張方法の検討 V&Vのためのデータ収集	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	低密度モニタリングの実装・普及	国交省:モニタリング義務化制度 建築研究所、土木研究所との 連携	モニタリング手法の検討	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。モニタリング・ジステム・モニタリング・デー タの集中管理
5	サステナプルPDCAサイクルの実装	内閣府:国土強靭化、サステナフ・ル PDCAサイクルの推進	V&V方法論の検討	全国8地方で大型建設物のモニタリンク 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。
h	委員会への協力 教育の実施の推進	文科省: 資格制度の基準検討	資格制度の基準検討 教育内容の検討	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。

図 25 今後 5年間における準備活動と産学官の役割分担



注) 2020 年からの 1 年間は、コンソーシアム設立準備期間とする。 図 26 マスタープラン

7.4 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。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」の観点から、本プロジェクトの自己評価を行っていく。本プロジェクトの構想の実現により、国内はもとより、日本の技術輸出により国外の大型建設物の自然災害に対する安全性・機能維持性を高めることができる。

また、ビッグデータの活用という面から、Society5.0 に様々に貢献できる。ビッグデータの質を確保するための様々な方策をここで提案しており、データに基づく事業の推進や国民の安全安心、産業の発展にとって必須の内容と考えている。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。

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