

建築物の構造性能向上技術の将来 —スマート建築構造—

緑川 光正

性能に基づく構造設計という世界的な流れの中で、これからの建築物では、要求される性能を確実にかつ容易に実現する技術、さらにその性能が確実に発揮されるように性能を監視する技術が重要になる。

スマート建築構造システムは、材料や構造形式などの新しい技術を積極的に応用し、建築構造体自身が外部から受ける荷重・外乱などに適応して安全性や使用性などの構造性能を効果的に発揮できるように計画されたものである。これを実現するためには、構造劣化・損傷を検知する技術、それに基づき構造性能を診断する技術、外乱などの影響を制御する技術など、各種の要素技術を総合した建築構造システムを開発する必要がある。

キーワード：建築、構造システム、外乱、検知、診断、制御、センサ、エフェクタ

1. はじめに

将来起こると予想される地震動をはじめとする各種の外乱に対して建築物がどの程度安全なのか、どの程度使用目的を満足しているかという安全性、使用性の

構造性能に加えて、地震動に対する性能として損傷に対してどれくらいの修復を必要とするのか、という修復性が建築物の構造性能として注目されつつある。

今後の建築物においては、要求される性能を確実にかつ容易に実現することが重要になる。さらに、その性能が確実に発揮されるように性能を監視することも必

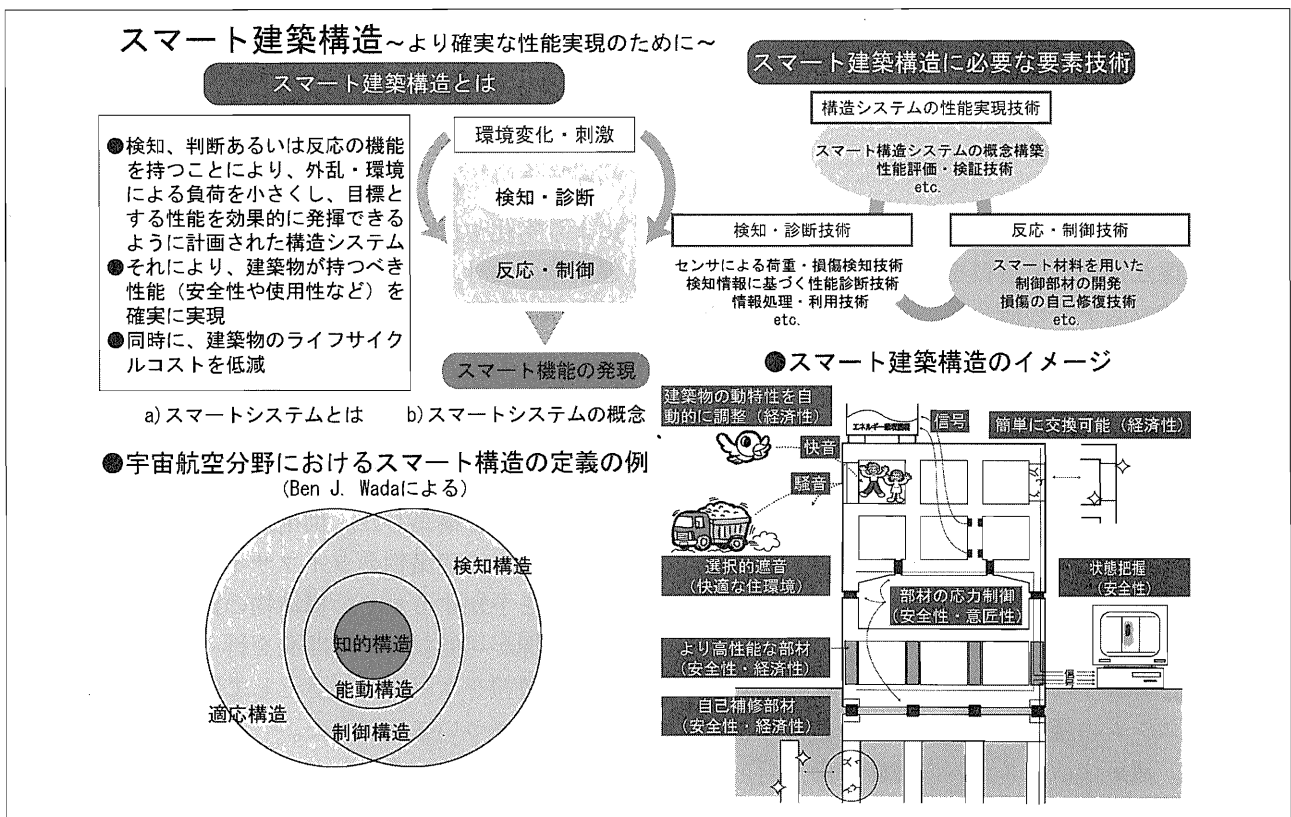


図-1 スマート建築構造の概念、要素技術とイメージ

表—1 研究の全体概要

年 度	1998	1999	2000	2001	2002
高知能建築構造システムの概念構築	構造システムの概念の構築 ・構造システムの提案/性能評価				
構造特性検知・診断技術の開発	センサの特性把握 ・部材レベル実験/性能評価 ・検知・診断ガイドライン作成				
高知能材料を用いた構造部材の開発	高知能材料の特性把握 ・部材レベル実験/性能評価 ・高知能材料利用ガイドライン作成				
高知能建築構造システムの性能評価	性能評価ガイドライン作成 ・架構レベル実験/性能評価				

要となる。

スマート建築構造システムは、新素材や新構造形式などの新しい技術を積極的に応用し、建築の構造体それ自身が外部から受ける影響（荷重、外乱など）に適応して安全性や使用性などの構造性能を効果的に確保しようとするものである。スマート建築構造の概念、要素技術とイメージを図—1に示す。

これにより、建築構造物をより合理的に設計し、建設・維持管理に関わる費用の低廉化を進め、将来にわたる持続可能性を確保することが期待される。その実現のためには、構造損傷を検知するセンサ技術、それに基づき構造性能を判断する診断技術、外乱などの影響を抑える制御技術など、各種の要素技術を総合した建築構造システムを開発する必要がある。

本報文では、1998年度から5年間かけて実施された日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」^{1)~3)}の研究成果の概要^{4)~6)}を紹介する。

2. 研究の全体概要

研究期間の前半では、既往の研究の整理や材料、部材の特性把握などの基礎資料を蓄積するとともに、高知能建築構造システムの概念構築を行った。研究期間の後半では、具体的な構造システムの開発と大型実験による性能検証を行うとともに、性能評価ガイドラインや技術、材料・部材の利用ガイドラインを作成した。研究の全体概要を表—1に示す。

3. 構造システムに関する研究

検知・判断技術や反応・制御技術などの要素技術を応用して、どのような建築構造システムを実現するかというシステムの基本的な概念の構築を行うとともに、スマート建築構造システムの性能評価技術を開発した。

図—1中に示すスマート構造の概念の一例⁷⁾による

と、検知、判断、反応の機能を全て備えたものがスマート構造とされる。しかし、この概念を建築分野にそのまま適用すると範囲が限定されてしまうため、ここではスマート構造をもっと広く捉えて研究を進めた。

すなわち、スマート建築構造システムを、「検知・判断あるいは反応の機能を持つことにより、外乱・環境による負荷を小さくし、目標とする性能を効果的に発揮できるように計画された構造システム」と定義した。また、特別な材料や装置を用いずに従来とは異なる発想により高い性能を実現するように計画された構造システムも開発対象に含めた。

- ・自己適応構造システム
- ・損傷制御構造システム
- ・スマート簡易耐震補強システム

を研究対象とし、性能評価ガイドライン⁸⁾としてまとめた。

4. センサに関する研究

建築物は、供用期間中に経年、様々な外力、外乱等により劣化や損傷を受け、構造性能が低下していく。建築物の設計、施工から維持管理、補修などを含むライフサイクルコストを低減させる場合、建築物の構造健全性を監視（モニタリング）することが有効であり、構造物中の損傷の有無、位置、程度といったことを同定する必要がある。

ここでは、センサとプロセッサとを融合させたセンシング機構を構築した。供用期間中にその構造性能が低下していく建築物のライフサイクルコストの低減、危険性を予知するための構造物の健全性監視、構造性能の把握が可能な技術の開発を行った。また、多くのセンサ情報をネットワークとして融合し活用する技術のあり方について検討した。

- ・性能モニタリング
- ・スマートセンシング
- ・センサネットワーク

を研究対象とし、ヘルスマonitoring技術利用ガイドライン⁹⁾としてまとめた。

5. エフェクタに関する研究

エフェクタとは、外的な状況変化または外部信号により、その特性が変化し、構造体の変形に対応した作用を構造体に及ぼす材料・装置をいう。

スマート建築構造システムに用いられる構造要素には、想定される荷重・外乱に対して自律的に対応することが求められる。しかも、その機構は極力単純な形で実現されることが望ましい。そこで、以下のような構造要素の開発を目指した。

- ① 検知、判断、作用といった各種のスマート性が一体化された部材
 - ② より一層改良された特性（強度、靱性、使用性、耐久性など）を持つ部材
- ・形状記憶合金、
 - ・電気・磁気粘性流体、
 - ・圧電・磁歪素子、
 - ・セメント系複合材料
- を研究対象とし、利用ガイドライン¹⁰⁾としてまとめた。

6. スマート建築構造に関する技術の例

スマート建築構造に関して検討したシステム、要素技術の幾つかを以下に紹介する。

(1) 制振構造としてのロッキング構造システム

(a) ロッキング構造システムの特徴

強震時に、建築物に意図的にロッキング振動を誘発して浮上りを生じさせる構造システムを構築するこ

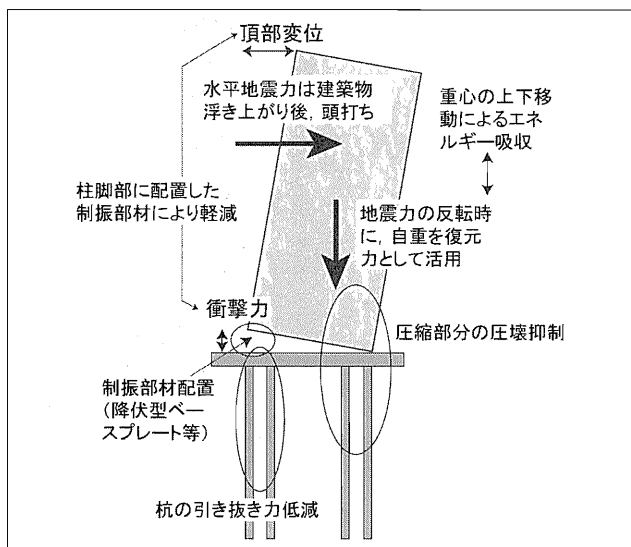


図-2 ロッキング構造システムの概念

とにより、その地震応答低減を図ることができる。

このシステムの特徴は、図-2に示すように、上部構造が塑性化する前に浮上りを生じさせて地震動入力を頭打ちとし、地震動入力の反転時には、建築物自体の自重を復元力として活用することにある。

(b) ロッキング構造システムの使い方

建築構造物は、特別な材料や装置を導入することで性能向上を図れるが、一方で、建設費の増大や、維持管理の煩雑さをもたらしがちである。地震動を考えた場合には、その比較的低い発生頻度と、起きた時の重大性を考えて、費用が極力安く、維持管理が容易で、かつロバスト性の高い単純なシステムにより、高い構造性能を実現することが望ましい。

ロッキング構造システムは、このような観点から、特別な材料や装置を用いることなく、従来とは異なる発想に基づいて構造システムの計画自体を工夫することにより、高い性能を実現することを目標として開発された。

これまで、ロッキング構造システムの地震時性能について、解析及び振動台実験¹¹⁾により検討した。その結果、基礎固定の構造物と比較して、建築物の各層せん断力を低減できること、さらに、ベースプレート降伏型の場合には、基礎固定の場合と比較しても、頂部の変形や着地時の1階柱の圧縮力が著しく増大することがないことなどが明らかになった。ベースプレート降伏型ロッキング構造システムの振動台実験結果を図-3に示す。

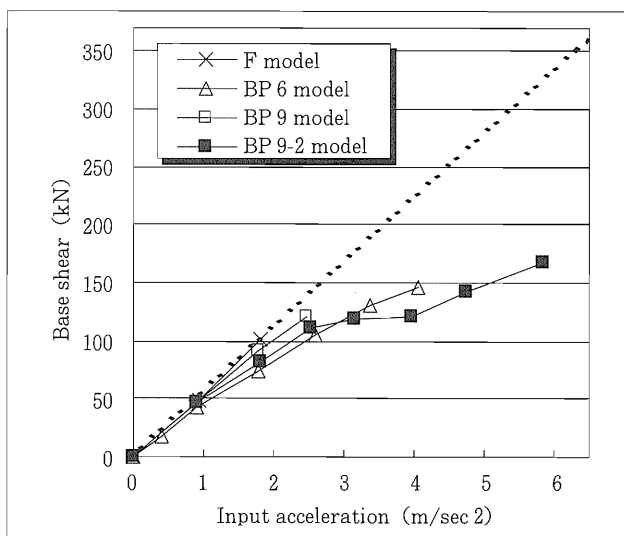


図-3 ベースプレート降伏型ロッキングシステム（縮尺 1/2、鉄骨造 3 層試験体）の大型振動台実験結果—ベースシア（base shear）と最大入力加速度の関係

(c) ロッキング構造システムの利点

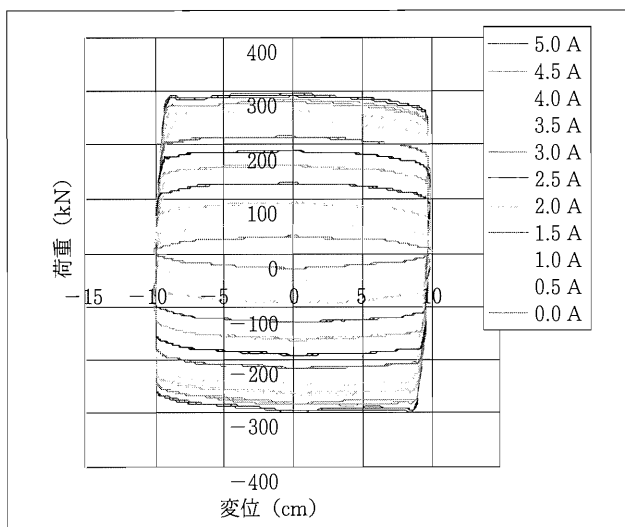
通常、建築物では、柱脚部を基礎に緊結することに

よって、過大な応力を生じる部位がある。例えば、塔状比が大きい建築物では、地震時に基礎杭の引抜き力が大きくなり、設計、施工上、特別な配慮が必要な場合がある。このような場合、このシステムを導入して柱脚部の浮上りを許容することで、ある部位の応力が過大になる前に、建築物への地震動入力を頭打ちとすることができ、構造設計の合理化が図れる。

(2) 磁気粘性流体を用いた特性可変ダンパ

(a) 磁気粘性流体の特徴

磁気粘性 (MR) 流体は、図—4 に示すように、磁界の作用によって、通常の粘性流体から粘性が大きく変化する。これを用いた可変 MR ダンパでは、電磁石によってその発生力を変化させることができる。



図—4 MR ダンパの特性

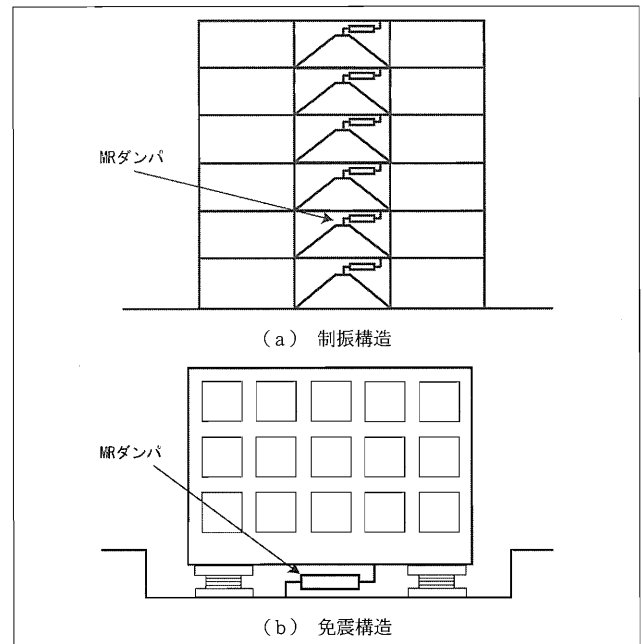
(b) 磁気粘性流体の使い方

可変 MR ダンパによって、建築構造物を高性能化するための検討^{12),13)}を行い、地震、風等の外乱に対して、また常時の使用性能について、構造物を効率的に制御できる可能性を示した。また、図—5 に示すような制振構造や免震構造への応用を検討した。

(c) 磁気粘性流体を用いた制振技術

近年、免震構造やパッシブ制振構造が普及しつつあるが、これらの構造において、減衰効果高めると、応答変位は低減されるが、応答加速度が増幅される場合があり、最適な制御効果が得られる範囲が限定される。

これに対して、MR ダンパによるセミアクティブ制振構造では、その減衰特性を可変とすることで、様々な周波数特性と大きさを持つ外乱に対して減衰効果を発揮できる。



図—5 MR ダンパの建築物への応用

また、MR ダンパは、電磁石の電流値によって荷重が支配され、速度依存性が小さいので、構造物の応答速度の変化にあまり影響されず、電磁弁等によって減衰特性を可変としたオイルダンパよりも、意図通りの減衰特性を与えることができる。

(d) MR ダンパの適用例

2001年に完成した日本科学未来館においては、居住性向上のために2基のMR ダンパ(写真—1、写真—2 a、2 b)が使われている。また、免震構造の鉄筋コンクリート (RC) 造4階建て集合住宅に使われた例を写真—2 に示す。



写真—1 制振用 MR ダンパ (東京・日本科学未来館, 神戸大・藤谷秀雄氏提供)



(a) RC造4階建て免震構造

(b) 免震用MRダンパ

写真-2 免震構造のMRダンパ実施例 (神戸大・藤谷秀雄氏提供)

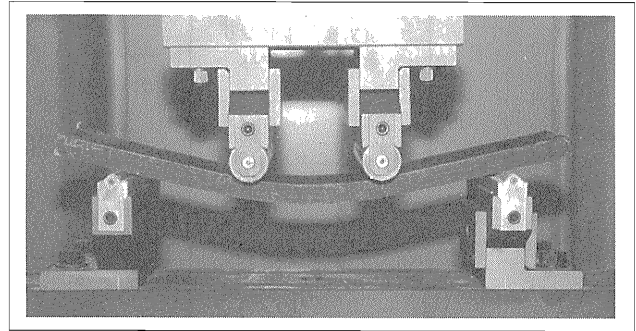


写真-3 高靱性繊維補強セメント複合材料 (DFRCC)

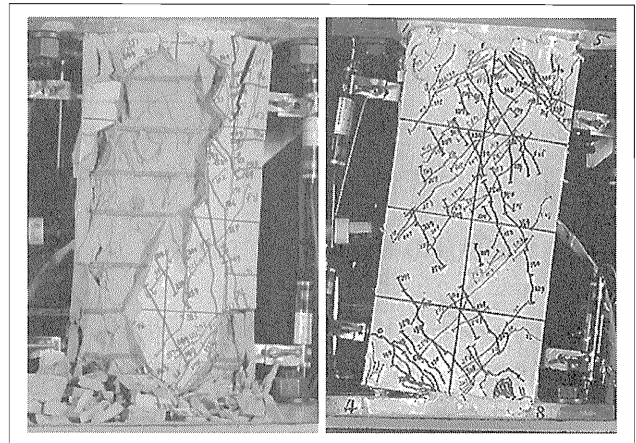


写真-4 DFRCC制振部材の静的加力実験結果

(3) 損傷制御のためのセメント系制振部材

(a) セメント系制振部材の特徴

高い剛性、強度、靱性、自由な成形性、形状・配筋・材料による特性の選択性、安価といった特徴を有するセメント系制振部材により、構造物の応答を低減し、構造要素や非構造部材の損傷を低減する。この制振部材は、例えば図-6のような壁部材で、鉄筋と高靱性繊維補強セメント複合材料 (DFRCC, 写真-3) より構成される部材 (写真-4) である。

(b) セメント系制振部材の使い方

建築物の長寿命化は、省エネルギーや廃棄物の削減といった地球環境問題の観点から緊急に解決すべき課題であり、それを実現するためには、構造物としての耐久性の根本的な改善が不可欠となる。さらに、耐用年限中に遭遇する大地震動などの外乱に対しても、損傷・劣化を適切に制御・防止し、地震後も容易な補修で建築物の長年にわたる継続使用を保証するような技術開発も求められる。

一方、損傷制御に有効な制振部材は、従来の適用建築物ではある程度十分なエネルギー吸収効果が得られているが、この特性は剛性が大きく限界変形が比較的小さなRC造建築物には必ずしも適していない。

(c) セメント系制振部材を使用する利点

セメント系制振部材は、高い剛性、強度と靱性を兼ね備えた部材で、小さな変形から効率的にエネルギー吸収を行うため、剛性の大きなRC造建築物の応答制御^{14),15)}に適している。しかも、制振部材の剛性や耐力は、その形状や配筋およびセメント複合材料の材料設計により容易に変えられ、自由な成形性を有するので、特性や形状が個々の構造物に適した制振部材を得られる。

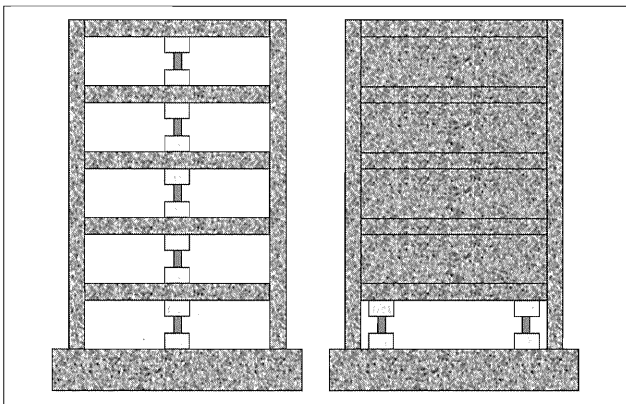


図-6 セメント系制振部材

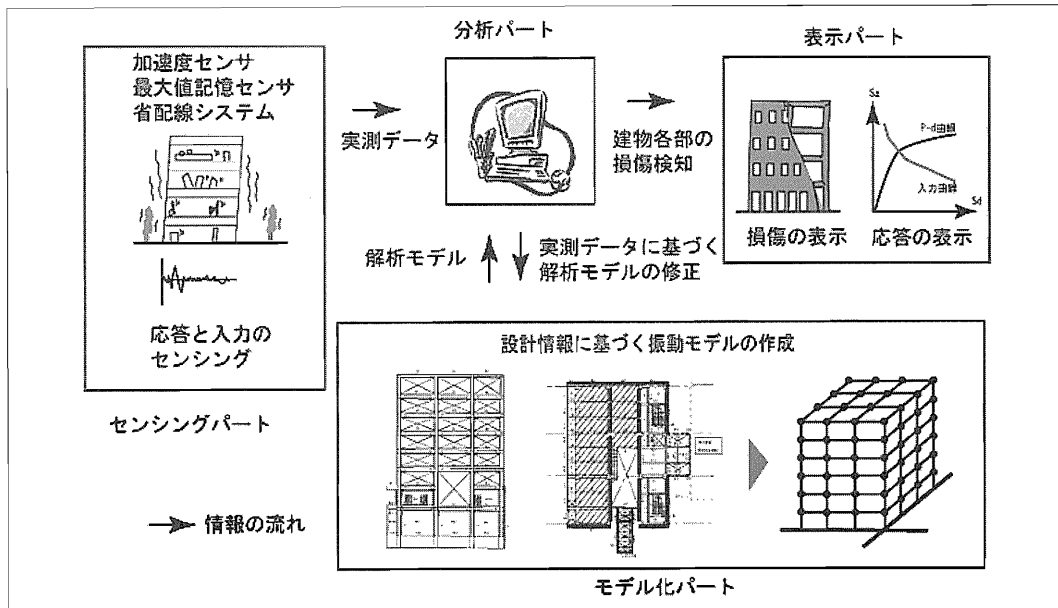


図-7 実建物に設置したモニタリングシステム

(4) 構造性能のモニタリングシステム

(a) モニタリングシステムとは

設置したセンサによる建築物の劣化、損傷検知と損傷程度の推定¹⁶⁾はもとより、構造設計情報から作成した解析モデルとセンサによる情報を融合し、建築物の局所的な損傷とその程度を効率的に推定する技術を組んだシステムである。

(b) モニタリングシステムの使い方

建築物の局所的な損傷まで把握するためには、センサを建築物の随所に設置する必要がある。この技術では、少ないセンサによって、建築物の劣化、損傷の有無を判断する第1段階の損傷検知システム、必要により、劣化、損傷の種類に応じたセンサによって局所的な損傷を詳細に検知する第2段階の損傷検知システムを考える。

第2段階の損傷検知システムでは、安価で高性能なセンサと計測技術を用いる。さらに、設計情報により作成した解析モデルとセンサから得られる建築物の入出力情報をもとに、解析モデルをより正確なものに修正し、センサが設置されていない部位についても損傷を追跡可能な、検知と解析の並列システムを採用する。

(c) モニタリングシステムを使用する利点

この技術は、日常的に建築物の健全性を監視する。例えば、経年による構造性能の劣化や、地震時の損傷、そして地震後の余震に対する安全性を即座に把握して危険であれば居住者に警告を発するなど、居住者の安全な生活、活動を確保する。また、この技術により、性能に基づいた効率的な維持管理が可能となり、ライフサイクルコストの低減を期待できる。

(d) モニタリングシステムの適用例

実在する鉄骨鉄筋コンクリート造8階建物を用いて上記システムを試行している。全体のシステム概要を図-7に示す。システムは

- ・検知部
- ・解析部
- ・分析部
- ・表示部

よりなる。

検知部は各所に配置された加速度センサ、最大値記憶型センサなどで構成され、地震時には入力と応答の情報を出力する。解析部では振動解析モデルを作成して分析部へ情報を提供する。分析部では実測情報を解析モデルに入力し、得られた応答と実際の応答を比較することにより、モデルの修正を行う。修正されたモデルと実測データを用いて各部の損傷を推定し、表示部で結果を表示する。

7. ま と め

建築物の構造性能向上技術の将来として、1998年度から5年間行われた日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」で得られた研究の概要を紹介した。

これまでの建築構造設計は、主に想定される設計荷重、外力に対して所定の仕様を満足するというものだったが、今後は、性能を基本とする設計概念の普及に伴い、単に設計の仕様を満足だけではなく、目標とする性能に対して如何に確実に性能を実現するかとい

う観点が重要になる。

スマート建築構造システムは、その要求に高い水準で応えることを可能とする新しい技術であると期待される。

今後、実用化に向けた研究と、より一層の合理化を目指す必要がある。

JCM A

《参考文献》

- 1) 小谷俊介, 他: 高知能建築構造システムに関する日米共同構造実験研究 (その1~その7), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造 II, pp. 519-532, 1999年9月
- 2) Otani, S., Hiraishi, H., Midorikawa, M. and Teshigawara, M.: Research and Development of Smart Structural Systems, Proc. of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, Paper ID 2307, Jan., 2000
- 3) 緑川光正: 日米共同研究「高知能建築構造システムの開発」, 第49回理論応用力学講演会講演論文集, pp. 167-172, 2000年1月
- 4) Otani, S., et al.: Research and Development in the U.S.-Japan Cooperative Structural Testing Research Program on Smart Structural Systems, Proc. of the 35th Joint Meeting of U.S.-Japan Panel on Wind and Seismic Effects UJNR, Tsukuba, Japan, pp. 155-184, May, 2003
- 5) 建築研究所, (財) 日本建築センター: 日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」平成10~14年度報告集概要集, 1999年3月~2003年3月
- 6) 建築研究所 HP の研究トピックス, <http://www.kenken.go.jp/english/contents/topics/structural/intelligence/main.htm>
- 7) Wada, B. K., Fanson, J. L. and Crawly, E. F.: Adaptive Structures, *J. Intelligent Material Systems & Structures*, 1-1, pp. 157-174, 1990
- 8) 日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」技術調整委員会・システム部会・(独) 建築研究所・国土交通省国土技術政策総合研究所・(財) 日本建築センター: スマート建築構造システムの性能評価ガイドライン, 2003年3月
- 9) 日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」技術調整委員会・センサー部会・(独) 建築研究所・国土交通省国土技術政策総合研究所・(財) 日本建築センター: ヘルスマonitoring技術利用ガイドライン, 2003年3月
- 10) 日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」技術調整委員会・エフェクター部会・(独) 建築研究所・国土交通省国土技術政策総合研究所・(財) 日本建築センター: エフェクターに関する利用ガイドライン, 2003年3月
- 11) 緑川光正・小豆畑達哉・石原直・和田章: 地震応答低減のためベースプレートを浮き上がり降伏させた鉄骨架構の動的挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第572号, pp. 97-104, 2003年10月
- 12) 樋渡健・塩崎洋一・藤谷秀雄・曾田五月也: 最適レギュレータ理論を用いたMRダンパーによるセミアクティブ免震, 日本建築学会構造系論文集, 第567号, pp. 47-54, 2003年5月
- 13) 塩崎洋一・樋渡健・藤谷秀雄・曾田五月也: MRダンパーを用いた免震構造物の簡易なセミアクティブ制御に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第570号, pp. 37-43, 2003年8月
- 14) 福山洋・倉本洋: スマートコンクリート—高じん性コンクリート—, *コンクリート工学*, Vol. 39, No. 1, pp. 104-109, 2001年1月
- 15) 藤原徳郎・松崎育弘・磯雅人・福山洋: 高靱性型セメント系複合材料を用いたデバイスの構造性能に関する実験的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 23, No. 3, pp. 145-150, 2001年
- 16) 濱本卓司・森田高市・勅使川原正臣: 複数モードの固有振動数変化を用いた多層建築物の層損傷検出, 日本建築学会構造系論文集, 第560号, pp. 93-100, 2002年10月

【筆者紹介】

緑川 光正 (みどりかわ みつまさ)
独立行政法人建築研究所
研究専門役



大深度地下空間を拓く 建設機械と施工技術

最近の大深度空間施工技術について取りまとめました。

主な内容は鉛直掘削工, 単円水平掘削工, 複心円水平掘削工, 曲線掘削工等の実施例を解説, 分類, 整理したものです。

工事の調査, 計画, 施工管理にご利用ください。

定価 2,310円 (本体2,200円) 送料500円

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 (機械振興会館) Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289