

第6章

結論

6.1 まとめ

現代の構造設計は性能設計を指向しているが、性能設計の裏づけとなる実建物の挙動は全く確認されていない。実測を設計や品質確認、損傷評価に反映することができれば、より安全で、経済的で長寿命の構造体をつくることが出来る。本研究はこのような問題意識に基づき、設計から施工そして供用期間終了までの建築物のライフタイムにおける性能確保を目標とし、実建物の計測を実施し、設計手順や設計時の解析モデルへのフィードバックや完成後の建物変化の把握などの分析と、その方法論をまとめたものである。そして、計測結果を解析モデルに基づいて分析し、実際の建物の構造評価や、設計、品質確認、損傷評価を試みその有用性を示した。これらによって、真の意味での性能確保に結びつけることができると考えている。

また、既存躯体に新築躯体が複合される改修建物の挙動はさらに複雑なものとなり、改修工事および改修後の品質確認のために実測とその分析は欠かせない技術であると考えられる。既存建物の数は新築建物よりも圧倒的に多く、すでに出来上がっている建物の構造安全性及び経済性の確保、そして長寿命化を図ることも課題である。建物設計用の入力地震動がいまだ発展途上の技術であることを考えると、現在設計している建物がすぐに要求性能を満たさなくなる可能性もあり、改修による性能確保及びその実測による分析が必要と考えられる。本研究ではこれら既存の建物の改修に対しても、性能を確保する設計手法をまとめ、実測による構造安全性の確保も目標としており、事例を示しその有用性を示した。

作って終わりの設計から建物のライフタイムを通じての安全性確保が求められている。車におけるドライビングコンピュータのように、建築物にもセンサの設置が常識となり、設計技術の向上に活用されるとともに、被災や老朽化による不具合を自ら診断して警告してくれる。万一性能が不足の場合には計測データを踏まえて適切な改修を実施する。このような技術が近い将来に実現できると考える。

以下に結論として各章ごとの内容をまとめる。

[第1章 序論]では、なぜ本研究に着手するに至ったか、その背景を論じ既往の研究の問題点を指摘した上で研究の目標と展望について論じている。また、提案するライフタイムモニタリングの概念について示した。

[第2章 建設時の計測による新築建物のモニタリング手法]では、提案するライフタイムモニタリングの手法について論じている。計測装置として光ファイバセンサ SOFO が適切であること、計測対象とした2つの超高層建物の概要、センサ設置の概要を説明し、次に、モニタリング結果を評価するための基礎的検討、温度歪みの影響を除去する手法、CFT柱の充填コンクリートの収縮挙動の把握、CFT柱の鋼管と充填コンクリートの一体的挙動についてまとめている。

さらに、モニタリング結果を反映した信頼性の高い構造解析モデルを作成する手法を示し、計測対象とした建物の構造解析モデルを作成している。そして、信頼性の高い構造解析モデルの作成の検討の過程で明らかとなった一般的な設計の手順に対する注意点にも言及した。

以下に得られた知見をまとめる。

- 1) 一般的な鉄の線膨張係数は概ね 12×10^{-6} であるが、鉄骨にブラケットを接着するセンサの固定状況では、固定用ブラケットの材質や固定条件の影響も含めて、みかけの線膨張係数はやや小さい 10×10^{-6} 程度となる。
- 2) コンクリートを充填して放置した CFT 柱の充填コンクリートの収縮歪は、 170μ 程度である。実際の施工では CFT 柱に建物重量が載荷される時期が鋼管にコンクリート充填が施工された1月程度後であり、重量による軸歪の評価に関係する1月以後の充填コンクリートの収縮歪は $20 \sim 30 \mu$ 程度である。
- 3) 充填コンクリートの打設後、0.4日程度でコンクリートが固化し、その後コンクリートの収縮に伴い、付着を介して鋼管に収縮歪が発生する。コンクリートの収縮は半径方向にも進行し、14~15日でスリップして鋼管の収縮が緩和される。その後さらにコンクリートの収縮が進行し、鋼管の収縮は次第に緩和され、材齢140日程度では、鋼管中央付近のひずみは $5 \mu \sim 10 \mu$ 程度の収縮量に漸近する傾向を示す。このことから充填コンクリートと鋼管は載荷がなく放置された状態では肌別れする傾向がある。
- 4) 収縮挙動把握後の材齢が経過した試験体を用いて CFT 柱の鋼管への載荷を行い、鋼管と充填コンクリートの挙動の確認を行った結果、鉄骨の長期許容応力度に対する歪みの1%に相当する 10μ 程度の小さな歪みレベルまでは一体的に挙動するものの、それより大きな荷重では、充填コンクリートの歪は鋼管の歪よりも小さく、一体的には挙動しない。

[第3章 新築建物のライフタイムモニタリングの実例と計画手法]では、モニタリングした実建物の柱の静的および動的歪みを、前章で作成した信頼性の高い構造解析モデルに基づいて分析を行っている。

また、計測結果の分析から得られた知見をもとに、提案するライフタイムモニタリング計画の具体例を示した。

静的計測の結果の分析から得られた知見を以下にまとめる

- 1) 2 棟の整形・不整形高層建物の建設中から竣工後までの柱軸力を評価し、その結果が工事の過程での固定荷重や積載荷重の増加と整合する。
- 2) CFT 柱の鉄骨と充填コンクリートの変形が整合しない結果が得られ、常時の荷重に関しては、鋼管と充填コンクリートの挙動の一体化が図られていないものと考えられる。
- 3) 鋼管及び充填コンクリートの歪みから算定される柱軸力は、解析結果と比較的良好一致を示し、換算された軸力は解析のオーダーからは大きくははずれていないことが分かる。また鉛直な柱と比較して斜め柱は誤差が大きく、設計での配慮が求められる。

動的計測結果の分析から得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 光ファイバセンサを用いた CFT 柱の静的・動的軸変形の計測技術を検証し、施工時から竣工後の長期にわたり間欠的な計測を行う方法論を構築した。動的特性については、鉄骨の長期許容応力度に対する歪みの 1%程度の歪に相当する加振を行えば、計測部材の挙動を精度良く捉えることができる。
- 2) 断面に外付けしたセンサは部材の曲げ歪みを計測可能で、適切な取り付け位置を選択することで精度良く計測可能である。自由振動など小振幅の再現性のある加振に対して、柱端部の曲げ歪の発生状況を精度良く捉えることができるため、震災時の鉄骨梁下フランジの破断などが生じた場合には、梁下フランジ側の曲げ応力負担が減少し、柱端部の曲げ応力負担状況が変化する状況をモニタリングすることが可能であると考えられる。これを利用して損傷度推定が可能であると考えられる。損傷度推定については 3.3 節で詳細を論ずる。
- 3) 微小振幅の動的計測結果からは、CFT のコンクリートと鋼管は一体的に挙動しているものと考えられる。
- 4) 動的軸力のシミュレーションの結果によると、1)で述べた程度の大きさの加振を行えば計測結果と良好対応を示すシミュレーションとなることが分かった。
- 5) 提案するライフタイムモニタリングにより、長期にわたる建物性能評価、特に劣化や損傷につながる剛性の変化を、比較的簡素な計測体制で精度よく評価できる可能性があることを示した。

[第4章 既存建物の改修による性能確保と構造モニタリング]では既存建物の改修において、耐震性だけでなく、使用性や文化財的価値など多くの価値観を調整し、各分野の専門家の見識を反映した客観的な総合評価によって改修工法を選定する手法について論じている。この手法により、最適な工法が選出されるだけでなく、工法選出にあたっての説明性がより増すことができている。また、結果として、ごくローカルな敷地地盤の振動特性を反映した地震動を設計に採用することができ、より構造安全性の高い改修の実施に結びつけることができたことを示した。

また、既存建物の改修における構造モニタリングの必要性について言及した。

[第5章 既存建物の改修におけるモニタリング事例]では、前章で選定した改修工法を採用した既存建物の免震改修の具体的設計事例を示した。

さらに、改修工事中のモニタリング結果の分析結果から、提案するモニタリングが施工中の構造安全性の確保に有用であることを示した。また免震部材基礎に発生する軸力についても設計軸力と大きく外れることはなく、設計へフィードバックできる可能性のあることが示唆された。ただし、歪みから換算される免震部材の軸力は、想定したクリープ係数に大きく依存するため、今後同様の計測がなされ、データが蓄積することで、さらに精度良く設計値との相違の程度が把握できものと考えられる。

6.2 今後の課題

本研究は実測をベースとした建築物の真の性能確保をテーマとしている。完成した実建物を計測して分析するといった類似の研究はほとんどなく、この点で新しい取り組みであるといえる。本論での実測及びその分析によりはじめて明らかとなってきたことも多く、この問題の奥の深さを物語っている。例えば2章、3章で述べたCFT柱の鋼管及び充填コンクリートの静的及び動的挙動は今回はじめて明らかとなった挙動であるし、実際の建物における変動軸力の解析との一致の程度などはじめて考察がなされた一つである。変動軸力に関して言えば、信頼性の高い解析モデルによる動的な解析結果は、以外なほど実建物と解析結果は一致する。この結果は不整形建物でも同じである。むしろ実測記録がやや小さく雑振動の影響をうけた整形建物よりも一致の程度が良い。不整形建物は建方上、一般の建物よりも高い精度が要求され、結果としてより一致するとも言えるかもしれない。また、計測歪みから軸力の換算にあたっては、コンクリート乾燥収縮や自己収縮、クリープ変形などのコンクリートの収縮量の適切な評価が不可欠である。本論文でも実大試験などを実施してこれらの値の推定を試みているが、まだまだデータが不足していると考えられ、この種の計測に当たって同様のデータが蓄積されることが望まれ、今後の課題である。本論で提案したライフタイムモニタリングは、既存建物の実測も含めて、いずれも有用な知見を与えるが、今後も同様の研究が継続され資料が蓄積されていくことが必要であり、今後の課題であると考えている。

このような計測は、計測技術の発展によって初めて可能となった計測であり、これまでは実際に施工された建物の状況を把握しようとしても出来なかったという背景がある。このような背景の中で、建築物の耐震設計は実際の地震被害の分析をもとに進歩してきたが、大きな地震被害が発生することはまれであり、このため十分な分析ができていたとは未だ言い難い状況にある。

一方で構造設計の手法は、性能設計が指向され各種指針が整備されており、これらをもとに実務を行っている、建物の構造性能を設計する手法がすでに完成しているかのような錯覚を覚えるほどである。しかし、今回の計測の分析でも明らかとなったように、実際のところは実建物の挙動は分かっていないことが多いものと考えられる。われわれ構造設計の技術者はこのことを肝に銘じて、分かっていることと、分かっていないことの振れ幅を捉え、適切な余裕を確保した設計を行うことが必要であり、これこそが課題であると考えている。これらの課題に対し、筆者自身研究を継続し、多少なりとも建築技術の発展に貢献できることを願っている。

