

建築構造物の FEM モデル・アップデートング

Carlos E. Ventura (Dept. of Civil Engineering, University of British Columbia, Canada), Rune Brincker (Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark), Eddy Dascotte (Dynamic Design Solutions n.v., Belgium) and Palle Andersen (Structural Vibration Solutions ApS, Denmark)

要旨

本稿は、鉄筋コンクリートのせん断コアを有する 15 階建て建築物に対して行われたモデル・アップデートングの結果について述べたものである。建物の周囲振動の測定データから得られた「出力専用」のモード同定結果が、この構造物の有限要素モデル・アップデートングに使用された。

構造物の初期モデルは、この建物の設計書に記されている情報から作り出された。モデルの種々のパラメータは、測定と計算によるパラメータの間の相関関係を改善するための自動化された処理手順を使って変更された。モデルに必要な変更が現実的なもので、物理的に実現可能で意味のあることを保証するために、アップデートング用ソフトウェアを用いて修正するパラメータの選択には、入念な注意が払われた。本稿では、モデル・アップデートング処理に照準を当て、出力専用のモード同定結果と組み合わせた自動モデル・アップデートングの活用の有効性について評価を行っている。

1. 緒言

「出力専用」のモード同定のための振動データを求める種々の手法の中で、周囲振動試験は大型土木構造物から振動データを収集する最も経済的な非破壊試験方法である。この方法の最大の利点は、構造物の動特性を決定するために、何も特別の人工的な振動を励起する必要がないということである。風、交通、微震、人間の動きなどは、土木構造物に絶え間なく動的に作用している。そして我々は、適切な道具とデータ解析システムがあれば、その動特性を評価するために、これらの自然の励振「力」を利用することができる。

構造工学の設計基準の立場からみると、既存の建築物において振動測定を行う理由がいくつかある。例えば、地震の多発圏にある建物の所有者は、その建物が現行の地震工学の設計基準に従うかどうかを決定することに関心があるかも知れない。もしその建物が激しい地震に対して危険であることが分かれば、それを矯正する構造変更がその構造物のいろんな部分に施されなければならない。それを行うために、この構造物の改装のための信頼できる構造工学は、最も経済的な方法でローカルな建築コード (the local building code) の安全性と耐久性の要求仕様を満足する設計を提供することを目的とするであろう。構造技術者は、建物の動特性を含む実際の状態を正しく評価することが必要なばかりでなく、可能な改装のシナリオを評価するために使用できる現実的な構造物の有限要素コンピュータ・モデルを開発することも必要である。そのような状況では、大型土木構造物の動特性を実験的に決定する経済的で有効な方法が望まれるばかりでなく、そのような構造物の有限要素モデルが物理的な構造物の現実的な表現であることを十分に信頼させることのできる有効な方法もまた望まれる。本稿の目的は、大型土木構造物の信頼できる有限要素モデルを開発するために、モデル・アップデートングのツールと組み合わせて、「出力専用」のモード同定手法をどのように有効に利用できるかを証明することである。この目的のために、事例研究として、鉄筋コンクリートの 15 階建ての建築物が用いられた。

一連の周囲振動試験は、バンクーバーにある高層ビルのモード特性を求めるために、ブリティッシュコロンビア大学の研究者たちにより、1998年4月28日に行われた[1]。この建物のセンター・コアに横方向とねじりの抵抗要素の大部分が集中するせん断コアが存在することが、この試験の実際の関心のあるところであった。建物の周囲の近くにはそれ以外の構造壁が存在するが、余分なねじり拘束が加わらないような方法で配置されている。せん断コアの建築物は、非連成の横振動数とねじり振動数の比と、建築計画における静的な偏心量により、強い地震動を受けたときに増大したねじり応答を示す可能性がある[2]。

この研究の関心のある動特性は、まず数少ない横固有振動数とねじり固有振動数、およびそれらに対応するモード・シェープであった。モード間の連成の度合いもまた検討された。

2. 建物の説明

この研究において考慮された建物は、Heritage Court Tower (HCT)と呼ばれ、ブリティッシュコロンビア（カナダ）のバンクーバーのダウンタウンにある。それは比較的規則正しい鉄筋コンクリートのせん断コアを持つ建物である。計画では、この建物は小さな突起物と後退（セットバック）があるだけで、本質的には長方形の形をしている。上部の階の代表的寸法はおよそ25m×31mで、下部の3つの階は36m×30mである。一方、地下の建物の底部はおよそ42m×36mである。平均の階高は2.70mであるが、1階は4.70mである。エレベータと階段は建物の中央のコアに集中していて、風と地震による潜在的な横方向力とねじり力に対する抵抗要素を形成している。このタワー構造物は、鉄筋コンクリートの地下駐車場の4階分の頂上に据え付けられている。駐車場の構造は、南方向にタワーをおよそ14m超えるL字型の腰壁を形成しているが、1階の壁は残りの3つの側面で基本的に同一高さになっている。タワーは高さ／幅の比は東西方向でおよそ1.7、南北方向でおよそ1.3でがっしりしている。建物の外観は図1に示されており、代表的な階の平面図が図2に示されている。この建物は駐車場の北側に建てられているので、振動のねじりモードと横方向のモードの連成は、主として東西の方向で生じると予想された。

3. 実験研究

振動の測定は、8チャンネルのシステムを用いて行われた。加速度計は屋根から始まる1階までの各階の北西と北東の隅に設置された。この構造物の屋外試験の詳細は、参考文献[1]に示されている。タワー・モデルは、鉛直方向に一列に配置された節点を持つ長方形に単純化された。この長方形の隅部の動きは、床スラブの剛体運動をするものと仮定することにより、測定された動きから計算された。プログラム ARTeMIS[3]が、実験モード解析(EMA)を行って建物のモード特性を決定するために使用された。同定された最初の6つの固有振動数が表1に示されており、それらに対応するモード・シェープの3次元ワイヤフレーム表示が図2に示されている。この図では、建物の1階より上の部分だけが表現されている。それ以外のモード同定の研究は、他の研究者によって行われて参考文献[4]にまとめられており、ここに提示された振動数の値とモード・シェープを確認することができる。

モード番号	EMA周波数	モードの種類
1	1.23	1次モードのNS方向モード
2	1.27	1次のねじりモード
3	1.44	1次のEW方向のモード
4	3.87	2次のねじりモード(連成)
5	4.25	2次のNS方向のモード
6	5.35	2次のねじりモード(連成)

表1 実験的に決定されたHCTビルにおける最初の6つの固有振動数(Hz)

4. FEM アップデーティングの研究

手作業によるアップデート処理で、建物の実験によるモード特性と解析によるモード特性の相関関係を求める試みが[5]で説明されている。その研究は、大型の土木構造物に対して実験と解析によるモード特性の間の良好な相関を求めようとすることに制限と困難が存在することを明確に示している。この観点から、構造物の初期のFEモデルをアップデートするために、もっと効率の良いプラットフォームを使用することが決定された。プログラムFEMtoolsは、それがテスト・データとFE解析データの迅速かつ効果的な統合を可能にする種々のツールを持ったCAE解析プログラムであるという理由で、この作業のために選ばれた。EMAとFEMモデルの固有振動数とモード・シェープの比較を伴う解析作業が、満足できる相関が得られるまで行われた。この研究で用いられたFEモデルとモデル・アップデーティングのために選択されたパラメータの詳細については、次節で述べられている。

4.1 建物のFEモデル

FEMtoolsのFEモデリング解析機能が、構造物の「スターティング」モデルを作成するために使用された。建物の設計図で与えられた情報は、モデルの幾何形状と材料特性を作成するために使用された。建物の1階フロアの動きはそれより上の階の動きに比べて無視できるので、建物の上部構造のみをモデル化し、地面で「固定」されているという条件が仮定された。主構造要素(コンクリートのコアせん断壁、重力荷重を支える柱、ヘッダー・ビームと荷重伝播ビーム)は、すべてこのモデルに含まれている。ビームと柱は3Dのビーム・柱要素としてモデル化され、せん断壁は4節点の板要素としてモデル化された。平らな床スラブは、大部分が4節点の板要素としてモデル化された。建物の外部クラディング・パネルも構造物の周囲の近くに置かれた簡易化された薄板要素としてモデル化された。建物の高さ方向のすべての後退(セットバック)と構造断面の変化も考慮された。コンクリートの材料特性は、図面に書かれている設計仕様から決定された。モデルは合計で348のビーム・柱要素と、818の板要素で構成され、1456節点と7種類の材料特性を含むものとなった。その結果、このFEモデルの自由度は8736となった。建物の2つのFEモデル(完全なモデルの3Dモデル表現とコアせん断壁の分布を強調して表現したワイヤフレーム・モデル表現)が図4に示されている。

4.2 モデル・アップデートのためのパラメータの選択

次のパラメータが、モデル・アップデートのために選択された。

- ビーム、柱、せん断壁、床スラブ、クラディング・パネルのヤング率（弾性係数） E
- 上記各要素の質量密度 ρ
- 柱の慣性モーメント I
- シミュレートされたクラディング・パネルの板厚 H

この結果、モデルのアップデートに使用するパラメータは 13 種類となった。構造物の要素の異なるグループに対して、それぞれ独立に E の変動を認めることによって、材料特性に対するモデルの感度が分かり、それらが構造物の剛性全体にどのように影響するかが分かる。建物の FE モデルを開発するときに、要素剛性の最も現実的な表現は何かという問題はもちろん、要素の実際の材料特性に関するある程度の不確実性が常に存在する。各要素の質量密度 ρ の変動量は、構造物の質量分布とその構造系に取り付いているいくつかの非構造要素の質量分布に対して、建物のモデルがどれほど敏感であるかを決定する助けになる。柱の慣性モーメント、およびその結果としてその横方向の剛性は、コンクリートの骨組み構造物においてモデル化する最も不確実なパラメータの一つである。 I の値は、使用されるコンクリート断面（ひび割れか、非ひび割れか）の選択に対して、またコンクリートと鉄筋の複合的な動きをどのようにモデルに含めるかということに対して、非常に敏感である。さらに柱の剛性は、その有効長さの関数として、したがって I が柱の有効長さをより正確に表現するために必要なモデルの変動量と解釈できるならその値の変動量として、意味のある変動をすることは可能である。最後に、クラディング・プレートの板厚の変更も認められた。それは、外部クラディングが建物全体に与える付加的な質量と多少の剛性を説明するために、それらの要素が組み入れられたからである。しかし、クラディング要素を含まない予備的な研究によって、それらが構造物の動特性に影響があり、モデルに含めるべきであることが示された。それらの最も大きな影響は、各階の回転質量の慣性モーメントに対してである。実験モデルと解析モデル間の応答の MAC 値の計算が、40 点（各階 4 点、10 階分）で行われた。

4.3 モデル・アップデートの結果

パラメータのアップデートを 13 回繰り返した後の、モード周波数の結果が表 2 に示されている。この表には、アップデート前と後の FEM 周波数はもちろん、実験周波数（EMA 値）も含まれている。この表の最後（右端）の列は、アップデートされた MAC 値を示している。この表から、アップデートされたモデルの周波数のいくつかは、あらゆる実用目的にとって実験の周波数と同じであることが分かる。最も大きな差は 3 番目のモードに対する 12% であるが、これは実用目的にとってまだ十分に受け入れることができる。MAC 値もまた、非常に満足なものである。

アップデートの結果得られたモデルのモード・シェープが、図 5 に示されている。縮小された FE モデルのモードと実験モデルのモードとの比較が図 6 に示されている。モデル・アップデートの前と後の MAC マトリックスの 3D プロットが図 7 に示されている。MAC マトリックスの比較は、自動アップデート処理がどのようにして実験モードと解析モードの良好な一致を達成するのか、初期モデルのモードが実験モードに一致するためにどのように変更されるかを明確に示している。

建物のすべての階が測定されたわけではないので、振動のより高いモードの表現は十分に正確ではないし、実験モデルの信頼性も、振動の高いモードに対しては低いモードに対するほど高くはない。これが、振動の6つのモードだけがアップデーティングの研究のために選ばれた理由である。しかし、いったん実験と解析の結果が得られると、さらに4つの実験モードが解析に追加され、モデルがさらに精密になった。紙面の関係で、その詳細は割愛する。

モード番号	EMA 周波数	FEM (前)	FEM (アップデート後)	
			周波数	MAC
1	1.23	1.33	1.20	83%
2	1.27	1.74	1.40	82%
3	1.44	2.07	1.63	85%
4	3.87	4.08	3.88	84%
5	4.25	4.38	4.25	73%
6	5.35	5.66	5.62	81%

表2 HCT ビルのモデル・アップデーティング前後における最初の6つの固有振動数比較

表3は、上記の表の中に表された相関の値を達成するために、FEMtools が作った変動量をまとめたものである。この表の数量の単位はメートル、ニュートン、キログラムである。変動量のいくつかが非常に重要な意味を持つことは明らかであるにもかかわらず、これらのパラメータのいくつかにおける変動に対するモデルの感度解析は、それらの全体の影響がそれほど大きいものではないということを示した。そのような一例として、柱の弱い軸方向の慣性モーメントの変化が挙げられる。しかし、質量密度や剛性のパラメータ (E, H) は、意味のある変化を示した。初期のクラディング質量は過小評価されたが、剛性は過大評価された。スラブの初期剛性もまた、過小評価された。

種類	要素	初期値	実際の値	差 (%)
E	柱	2.5E+010	1.3E+010	-50
E	ビーム	2.5E+010	3.8E+010	50
E	床スラブ	3.0E+011	5.1E+011	70
E	せん断壁	2.5E+010	1.7E+010	-32
E	クラディング	3.0E+010	1.4E+010	-54
ρ	柱	2.4E+003	2.9E+003	20
ρ	ビーム	2.4E+003	1.9E+003	-20
ρ	床スラブ	3.0E+003	2.2E+003	-25
ρ	せん断壁	2.4E+003	1.9E+003	-20
ρ	クラディング	3.0E+003	4.5E+003	50
I _{max}	柱	変わる	変わる	50
I _{min}	柱	変わる	変わる	-50
H	クラディング	0.02	0.006	-69

表3 モデル・アップデーティングのために選択されたパラメータの初期値と最終値の比較

5. 結論

HCT ビルの振動の固有振動数とモードが、実験的および解析的に決定された。この事例研究は、「出力専用」モード同定解析の結果を使って大型土木構造物の有効なモデル・アップデートングを達成できることを示した。FEMtools のような自動モデル・アップデートング・ツールは、実験結果と解析結果の間の良好な相関を得るためにどのモデル・パラメータが変更できるかの決定を著しく容易にしてくれる。しかし、モデル・アップデートング・プログラムによって示唆された変動量を受け入れて、その変動量がどれほど現実的なものであるかを判断することは、解析者の責務である。

参考文献

- [1] Dyck, C. and Ventura, C.E. :Ambient Vibration Measurements of Heritage Court Tower., Research report No.98-07, University of British Columbia, Department of Civil Engineering, Vancouver, B.C., Canada, pp.1-24, 1998.
- [2] Llera, J.C. and Chopra, A.K. :Accidental and Natural Torsion in Earthquake Response and Design of Buildings., University of California, Berkeley, CA, report No. EERC 94/07, 1994.
- [3] Bricker, R. and Andersen, P. :Ambient Response Analysis of Heritage Court Tower Building Structure., Proc. of the XVIII IMAC, San Antonio, Texas, 2000, pp.1081-1094.
- [4] Horyna T. and Ventura, C.E. :Summary of HCT Building Ambient Vibration Data Analysis., Proc. of the VIII IMAC, San Antonio, Texas, 2000, pp.1095-1098.
- [5] Ventura, C.E. and Horyna, T. :Measured and Calculated Modal Characteristics of HCT Building., Proc. Of the XVIII IMAC, San Antonio, Texas, 2000, pp.1070-1074.
- [6] Dynamic Design Solutions :FEMtools Users' Guide, Version 2.0, Leuven, Belgium.



図1 HCT ビルの外観

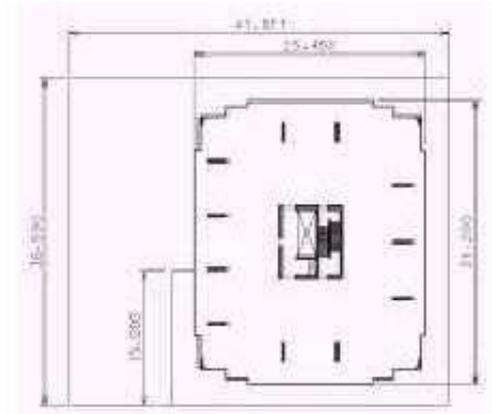


図2 HCT ビルの代表的な階の平面図

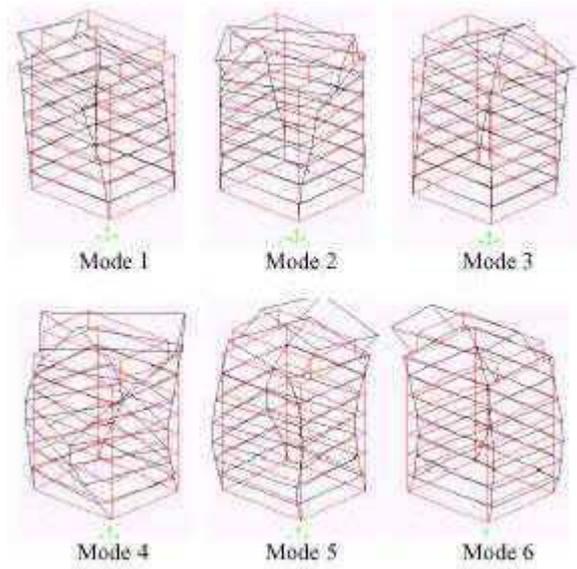
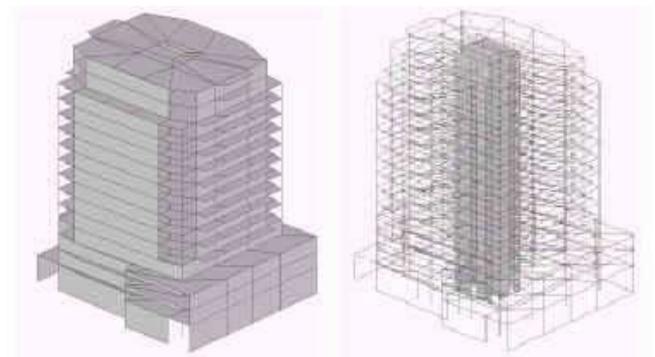


図3 実験による最初の6つのモード・シェープ



a) 3Dモデル全体

b) モデルの詳細

図4 HCT ビルのFE モデル

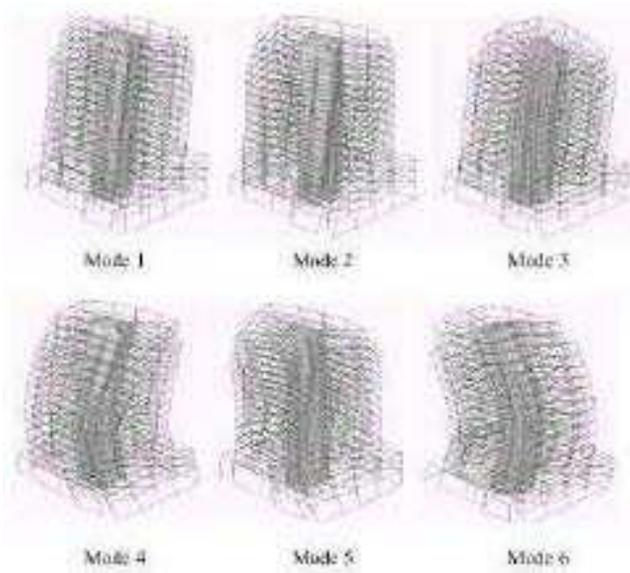


図5 アップデートされた FE モデルの最初の6つのモード・シェープ

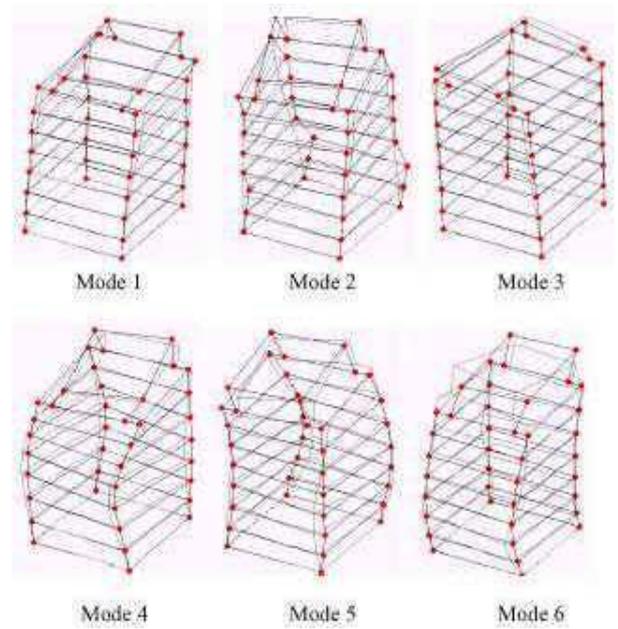
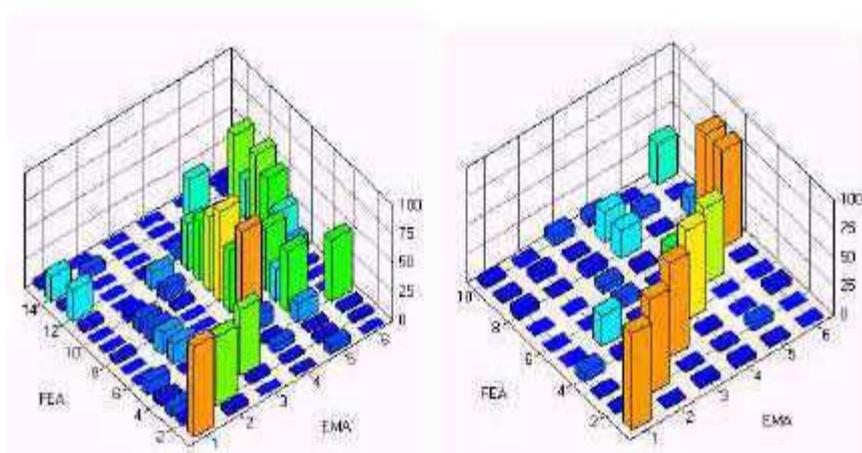


図6 アップデートされた FE モデルのモード・シェープと実験モード・シェープの比較



a)アップデート前の MAC マトリックス b)アップデート後の MAC マトリックス

図7 最初の6つのモード・シェープの3D表現 MAC マトリックスの比較