

	よしだ	あきひと	
氏 名	吉 田	昭 仁	
授 与 学 位	博士 (工学)		
学 位 授 与 年 月 日	平成18年3月8日		
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学位規則第4条第2項		
最 終 学 歴	平成9年3月 東京工芸大学大学院工学研究科建築学専攻修士課程修了		
学 位 論 文 題 目	構造物の高精度な風応答推定に関する研究		
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 植松康	東北大学教授 山田大彦	
	東北大学教授 井上範夫	東京工芸大学教授 田村幸雄	

論 文 内 容 要 旨

本研究の目的は構造物の風応答の予測精度を向上させることであり、そのために構造物の動特性の精度良い同定手法の開発、および、構造物の風応答計測を精度良く行うための新しい計測手法を導入し、その精度を実証する。

構造物は地震や風などの動的外力により振動する。構造物の設計をする際に、その応答を推定することは非常に重要であり、現在では建物の構造特性を再現した解析モデルを作成し、動的解析を行うことにより応答量を推定することが一般的である。その応答量に影響を及ぼすパラメータとして固有振動数、減衰定数、固有振動モード形などの動特性があげられる。これらの動特性は構造物の応答量に直接影響を与えるため、それぞれの構造物の動特性を正確に与える必要がある。それにも拘らず、現在、建築物を設計する際の減衰定数の値としてS造建築物に対しては2%、RC造建築物に対しては3%という数値が明確な根拠もなく慣用的に用いられてきた。各年代別に見ると、S造建築物の場合では1960年代は減衰定数として2~5%の値が用いられていたが、1980年代以降は殆どの建築物で2~3%が用いられている。RC造の場合では1960年代には減衰定数は2~5%が用いられており、1990年代以降は大多数のRC造建築物の設計において3~4%の減衰定数が用いられている。

通常の建築物の応答解析で用いられている減衰特性については粘性減衰のみとし、剛性比例型もしくは質量比例型、Rayleigh型を仮定することが多く、上記のような減衰定数を自分で設定して応答値を予測している。しかし、既往の研究でも分かっているように、例えば剛性比例型の減衰を仮定した場合、高次モードの減衰を、過大に評価している場合もある。減衰定数の見積もりによっては構造物の応答量が非常に大きく変化するが、今のところ明確な量として提示することができていないのが現状である。このように、非常にあいまいな値が用いられてきた原因は建築物の減衰定数を正確に予測する理論的手法が存在しないためであり、今現在は建設後に行なわれた実測により得られるデータを蓄積することで経験式を求めることが主となっている。固有振動数や固有振動モード形については有限要素法解析 (Finite Element Method, FEM 解析) などにより、適切にモデル化がなされていれば、ある程度の精度で推定することは可能であるが、先に述べたとおり、減衰定数を理論的に求める手法は現在のところないため、実測による減衰定数の推定が建設後に行なわれている。しかし、減衰定数は種々のコンディション (例えば、接合部の状況や種類・外装材、内装材の状況・構造種別・地

盤の条件・基礎種別・振動振幅・減衰評価手法など)により、非常にばらつくことが分かっている。また、同じ建物を対象にしたとしても、経年変化により減衰定数が変化することも報告されている。

既往の研究で推定された減衰定数では、変動係数は70%(減衰定数の平均値が2%の場合に0.6%～3.4%)にもなることが報告されており、既往の研究によると、風の乱れによるパフエィング応答の場合、減衰定数が2%の時の応答を1とすると、減衰定数を0.6%とした場合の応答は1.8倍、3.4%とした場合の応答は0.77倍となり、減衰定数の設定次第で応答値が2.3倍も変化してしまうことが分かっている。

構造物の応答を精度良く推定するためには、まず、これらの動特性が精度良く同定されている必要がある。しかしながら、動特性を同定する手法は様々あり、それぞれの手法において長所・短所、適用範囲などがあるため、解析手法によって同定結果がばらついてしまうことがわかっている。また、構造物の設計では様々な実測結果を基に作成されたデータベースを参考に減衰定数の値を決定している。そのデータベース化された動特性(減衰定数)は精度良く同定された結果である必要があるが、上にも述べたように必ずしもそうではない。そこで、本研究では構造物の応答を高精度に推定することを目的とし、まず、そのために必須となる動特性の高精度な同定手法を導入する。既往の同定手法ではモードが近接する場合には動特性の同定は不可能であり、無理に動特性を同定すると過大な減衰を見積もるなどの問題があるため、そのような場合においても高精度に動特性を同定する手法が必要とされてきた。そこで本研究では多自由度RD法の提案とFrequency Domain Decomposition(FDD)法の減衰評価への応用を行った。多自由度RD法は従来のRD法を多自由度系に拡張したものであり、近接する固有値が複数ある場合においても複数の動特性を同定することが可能である。FDD法は応答のクロススペクトル行列を特異値分解することにより、固有値が近接する場合においても、単一の固有値の成分へと分解することができる手法であり、減衰定数の同定に有効であることが示された。これらの手法により従来の同定手法の問題点を解決することが可能であることをシミュレーションにより発生させた応答記録に適用することにより明らかにした。また、導入した2種類の手法を様々な実構造物に適用し、様々な構造特性をもつ実構造物に対しても適用可能であること明らかにした。さらに、精度の良い同定が可能となったことで従来の手法では分離できなかった現象も明確に分離でき、構造特性の詳細が把握できるようになった。さらに、それによって各種構造物に対して、より合理的な構造設計や応答解析を確立する上で貴重なデータが得られた。

また、精度の良い動特性を同定することが可能になったことから、得られた動特性を使った応用例として、構造物の外壁、内壁等の2次部材の剛性評価を行った。現在、構造物の応答量を推定するためには、その構造物の設計段階において有限要素法(Finite Element Method, 以後FEMと略す)解析などを行うことが必要であるが、一般的にFEM解析に用いられる解析モデルには、外壁、内壁等の2次部材の剛性も考慮に入れておらず、これらの理由から結果として得られる固有振動数が実測値と異なることが分かっている。そこで、本論文では実情に即したFEM解析モデルへのアップデートを視野に入れ、上述した同定手法を用いて得られる精度良い同定結果を基に、低層建物に用いられている各建物要素の剛性評価を行い、剛性の推定式を得ることができた。

上述した精度良い動特性の同定結果とアップデートされたFEM解析モデルを用いることにより、構造物の精度良い応答推定が可能となる。その推定精度を確認するために、実際に構造物の応答との比較を行う必要があるが、そのためには、実構造物の応答測定を精度良く行う必要がある。しかし、現在行われている殆どの実測では、応答測定には加速度計、速度計が用いられており、風応答を測定する際に重要となる静的成分については測定することが不可能であった。そこで本論文では構造物の変

位応答計測を行うため、人工衛星を利用した Global Positioning System（地球的衛星測位システム、以後 GPS と略す）技術にいち早く着目し、その適用可能性について詳細に検討を行った。GPS 技術は近年、船舶、自動車、測量の分野で用いられており、衛星からの電波を受信した GPS アンテナの 3 次元的な絶対位置を基線解析により求める方法である。ただし、カーナビゲーションや船舶で用いられている単独測位と言われる方法では位置推定精度が低く、構造物の絶対変位計測を行うことができない。近年、RTK-GPS（Real Time Kinematic・GPS）と呼ばれる測位手法が開発され測量の分野などでは利用され始めている。そこで、RTK-GPS を用いた構造物の風応答計測の可能性について、詳細に検討を行い、構造物の振幅が 2cm 以上かつ振動数が 2Hz 以下となる応答であれば十分に実構造物に適用可能であることが明らかとなった。このことから、東京などでの春一番程度の強風、つまり、地上 10m での平均風速が 15m/s 程度の場合では高さ 80m 以上の高層建物において計測が可能であり、また、同じく平均風速 25m/s 程度の普通の台風の場合では、高さ 60m 以上の高層建物であれば精度の良い計測が可能であると結論付けることができた。

そこで、この RTK-GPS を超高層鉄塔の変位応答測定実構造物に適用し、風力や地震力など様々な外力による鉄塔の応答測定結果について示し、RTK-GPS を用いて実構造物の応答が測定可能であることを示した。また、FEM 解析により得られる部材の応力度と RTK-GPS により得られる応答変位をハイブリッド利用することにより、部材応力度を推定する手法を提案し、構造物の健全性をモニタリングすることの可能性を示した。

本論文により提案された動特性の同定手法は、構造物の精度の良い動特性を得ることを可能にし、その同定結果に基づいて構造物の 2 次部材などの剛性評価などを行うことが可能となり、結果的に合理的な構造設計や精度の良い応答予測に役立てることができると考えられる。また、導入された変位応答計測を用いることにより、構造物の応答性状の把握に役立てることが可能となり、また、部材応力度などを推定することにより、構造物のヘルスマニタリングの一助となることが期待される。

論文審査結果の要旨

本研究は、構造物の風応答の予測精度を大幅に向上させることを目的とし、構造物の動特性を精度よく同定できる手法の開発に取り組んだもので、全編7章よりなっている。

第1章は序論であり、本研究の目的と背景について述べている。

第2章では、構造物の動特性の同定手法について、従来の方法の問題点を指摘し、それを解決する方法として、多自由度RD(Random Decrement)法の提案とFDD(Frequency Domain Decomposition)法の新しい応用を図った。コンピュータシミュレーション並びに模型実験に基づき、これらの方法の妥当性を検証した。

第3章では、第2章で提案した手法を用いて実構造物の動特性の同定を行い、これらの手法の適用性と応用性を検討した。いくつかのモードの固有振動数が接近している場合でも、各モードを明確に分離し、その固有振動数と減衰定数を精度よく推定できることを示し、提案した方法の有効性を実証した。また、得られた結果を用いてFEM解析モデルをチューニングすることで、より精度良く風応答を推定することが可能であることを示した。

第4章では、低層建築物を対象とし、様々な状態での動特性の同定を行い、外壁、内壁、耐震ブレースなど、各構造要素の剛性評価を行った。得られた結果はデータベース化され、FEM解析モデルのアップデートに利用され、より精度よい応答予測を可能とする。

第5章では、RTK-GPSを用いた風応答測定法を提案し、その測定精度と適用範囲を単純な模型を用いた実験結果に基づいて検討した。

第6章では、第5章で提案した手法を実構造物に適用した。従来の方法による結果との比較によって妥当性を確認するとともに、従来の方法では困難であった静的変位成分も精度よく測定できることを示した。さらに、構造物の健全性をモニタリングするために、RTK-GPSによる実測とFEMのハイブリッド利用によって部材応力度を推定する手法を提案した。

第7章は結論である。

以上、要するに、本論文は実構造物の動特性を高精度で同定する手法を提案するとともに、その結果をFEM解析モデルのアップデートに利用することで実構造物の高精度な風応答の推定を可能にしたものである。特に、構造物の動的応答に大きな影響を及ぼす減衰定数を精度よく同定できる手法を提案したことは、風応答のみならず地震応答の推定精度を大幅に改善するものであり、建築構造学の発展に大きく寄与する。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。