

GPS を用いた建物の変位応答測定および健全性モニタリング

MEASUREMENT OF WIND-INDUCED RESPONSE OF BUILDINGS USING RTK-GPS AND INTEGRITY MONITORING

吉田昭仁¹⁾ 田村幸雄²⁾ 松井正宏³⁾ 石橋外史⁴⁾
Akihito YOSHIDA¹⁾, Yukio TAMURA²⁾, Masahiro MATSUI³⁾ and Sotoshi ISHIBASHI

ABSTRACT

An RTK-GPS (Leica MC1000) has a nominal accuracy of $\pm 1\text{cm} + 1\text{ppm}$ for horizontal displacements with a sampling rate of 10Hz. The object of this paper is to demonstrate the feasibility of RTK-GPS for wind-induced response measurements and its efficiency in measuring the displacement of a full-scale tower and to study the feasibility of hybrid use of FEM analysis and RTK-GPS for detecting the integrity of structures during strong typhoons. The efficiency of RTK-GPS is demonstrated in the full-scale measurement of an actual steel tower. According to the feasibility study of RTK-GPS for measuring wind-induced responses of buildings, the responses with amplitudes larger than 2cm and natural frequencies lower than 2Hz can be detected by RTK-GPS. Hybrid use of RTK-GPS and FEM analysis for real time monitoring of the integrity of structures is proposed and its efficiency is demonstrated.

Key Words: RTK-GPS, Measurement of displacement, FEM, Integrity Monitoring

1. はじめに

建物の風応答は平均成分を含む為、動的成分と共に静的成分の計測も必要となる。従来から用いられている加速度計や速度計では、数値的に積分して変位を求めることになるが、静的成分の検出は極めて困難である。筆者らは RTK-GPS を用いた変位計測システムにより建築物の静的成分を含んだ変位計測の可能性について研究を行っており、起振器等を用いた実験によって、ある程度のレベル以上の強風時や地震時には、十分に変位計測が可能であることを報告している。¹⁾⁻⁵⁾

本研究では、RTK-GPS (Real Time Kinematic – Global Positioning System) 計測システムの基本的な応答特性を検証し適用可能な範囲を調べ、また、RTK-GPS を用いて実物鉄塔における変位計測を行い、強風時の応答挙動について調べるとともに、GPS 変位を用いてリアルタイムで建築物の健全性を評価できるシステムを構築するため、FEM 解析を併用した部材応力度の時刻歴評価手法について検討した。

2. RTK-GPS の概要

GPS 測位システムとは GPS 衛星から発信された電波を GPS 受信機で受信し、到達するまでに要した時間から衛星と受信機との距離を測定するものである。一般的に、GPS 測位では 3 成分の位置情報 (X,Y,Z) および時間の情報

1), 2), 3) 東京工芸大学工学部建築学科 助手、教授、助教授 (〒243-0297 神奈川県厚木市飯山1583)

4) 都市基盤整備公団総合研究所技術センター (〒192-0032 東京都八王子市石川町2683-3)

を得るため、最低でも 4 衛星を必要とする。しかし、この測位方法(単独測位)を用いる場合、10m~50m 程度の測定誤差を生じるため、建物の応答測定には使用することはできず、カーナビゲーションシステムや船舶の航行のための用途が殆どであった。この測定誤差の要因として、衛星の配置(Position Dilution Of Precision: PDOP)、衛星の時計誤差、衛星の軌道誤差、電離層遅延、対流圏遅延、マルチパス、受信機ノイズなどがある。それらの誤差を最小限にする測位システムとしてディファレンシャル GPS(DGPS)と呼ばれる測位システムがある。この方法は、まず、正確な位置がわかっている場所に GPS アンテナを基準点として設置し、この基準点の真の位置と GPS 計測値の誤差を定量化する。そして、基準点ともう一方の計測点で同時に同じ衛星の電波を受信していれば、同じ誤差を含むと考えられるので、基準点で得られた誤差を補正情報として、計測点の GPS 計測値を補正するものである。

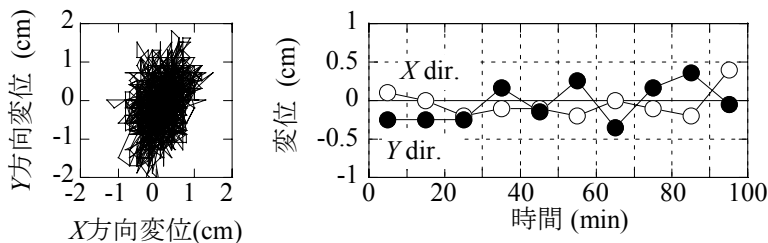
DGPS 測位システムの誤差補正を DMCA 無線を用いてリアルタイムに行い、移動体の位置を高精度・高サンプリングで計測する方法が RTK-GPS であり、RTK-GPS を用いることにより、10Hz サンプリングで、X,Y の水平位置が 1cm + 1ppm、高さ Z が 2cm + 2ppm の精度で計測を行なうことが可能である。

3. RTK-GPS の基本特性

実測を行なう前に、RTK-GPS の基本特性を調べた。

最初に、RTK-GPS のバックグラウンドノイズを調べるために、基準点の GPS アンテナと計測点の GPS アンテナの両方を 3 階建ての RC 造の屋上に設置して測定を行なった。図 1(a)(b)に静止地点での 10 分間のリサーチと 10 分間平均変位の時間変化を示す。(a)のリサーチでは±1.5cm 程度変動しており、(b)の 10 分間平均変位は±5mm 程度変動している。これらは RTK-GPS のバックグラウンドノイズであると考えられる。このバックグラウンドノイズは PDOP (Position Dilution Of Precision: 衛星の幾何学的配置の状態を表す指標)によっても影響を受けると思われる。

次に、正弦波加振による RTK-GPS の精度を検証した。図 2 に正弦波加振実験の概要を示す。計測点の GPS アンテナ(図 3 中の GPS)を振動台に設置し、また、ワイヤ式変位計を用いて正確な変位(図 3 中の DIS)の測定も行な



(a) リサーチ(10 分間) (b) 10 分間平均変位

図 1 静止状態での RTK-GPS の変位応答特性

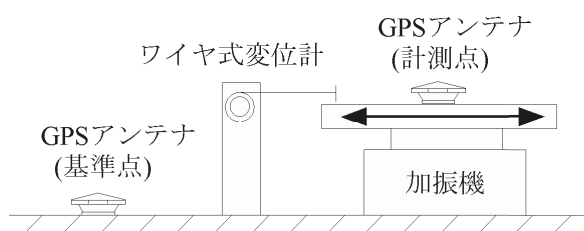
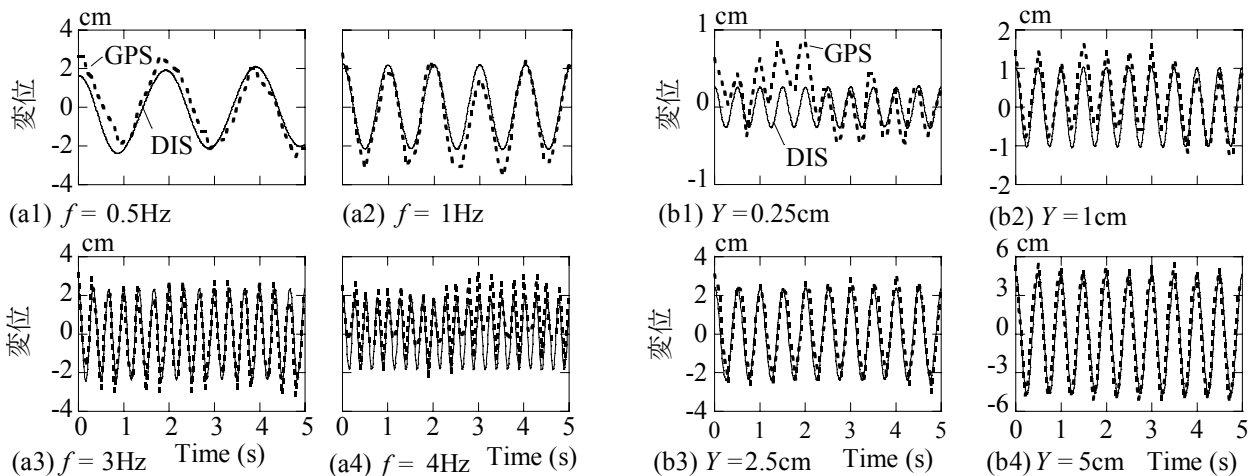


図 2 正弦波加振実験のセットアップ



(a) 振幅 $Y = 2\text{cm}$ (b) 加振振動数 $f = 2\text{Hz}$

図 3 RTK-GPS による変位と変位計による変位の比較

った。図3に実変位とRTK-GPSにより得られた変位の時系列を示す。加振振動数が2Hz以下で加振振幅が2cm以上のケースでは、RTK-GPSにより得られた変位は、実変位にかなり近い値となっていることが分かる。

4. RTK-GPSを用いた鉄塔の応答測定

4.1 実測概要

実測対象鉄塔は、図4に示す東京都八王子市郊外の都市基盤整備公団技術センター内にある高さ108m、地上部重量約730tの超高層住宅実験鉄塔である。

GPSアンテナを鉄塔上部にある機械室の屋根に設置し、三杯風速計と矢羽根式風向計を高さ120mの位置に設置した。さらに加速度計を機械室内部の梁上に、X方向をEW方向に、Y方向をNS方向に一致させて設置した。基準点のGPSアンテナは鉄塔に隣接する高さ16mのRC造建物のR階に設置した。

4.2 ゼロ点の決定

GPS測位では、ある地点からの相対距離が計測されるため、解析を行なう前に鉄塔のゼロ点を求める必要がある。鉄塔のゼロ点を定めるにあたって、平成13年8月11日～11月6日までのGPSデータからPDOP (Position Dilution Of Precision: 衛星の幾何学的配置の状態を表す指標) が2.0以下(衛星の配置が良好であることを示す。)、かつ10分間のデータ取得率が約92%以上であるデータを選出した。更に風と熱応力による影響がないものを選ぶため、午前2時から5時の夜間のデータで、平均風速1.5m/s以下のものを対象とした。以上の条件に適合したデータのみを選び、その全時間平均位置を鉄塔のゼロ点とし、これ以降の解析結果はゼロ点からの変位として示す。

4.3 強風時の鉄塔の風応答

図5(a)(b)に、台風0115号接近時(2001年9月11日)の風向風速の時間変化を示す。この日の平均風速は最大で19.8m/sに達しており、台風が最接近した時の風向はほぼNである。GPSによる変位出力および加速度計による加速度出力のX成分とY成分の合成値 $\sqrt{X^2+Y^2}$ を算出してこれを応答変位、応答加速度とし、それらの10分間平均値の時間変化を図5(c),(d)に○印で示す。応答変位、応答加速度ともに風速の増減に対応しており、風速が最大となる11:00前後にピークに達している。同図中の●印は、10

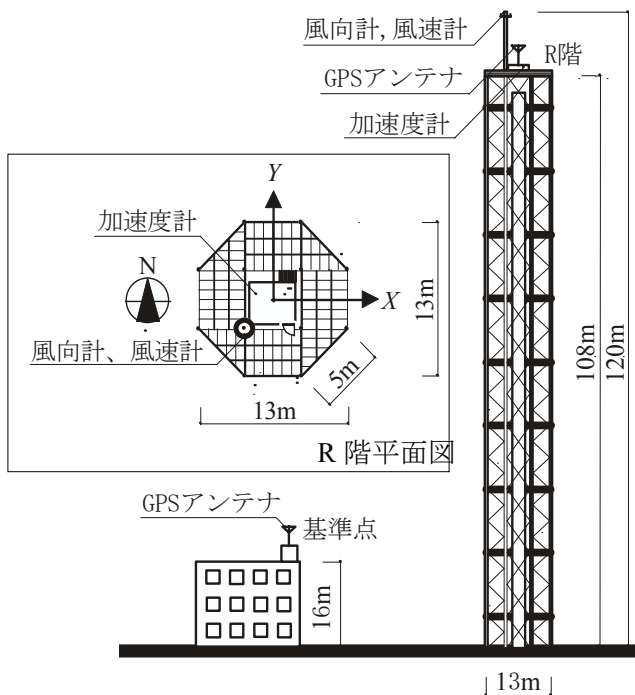


図4 実測鉄塔概略図

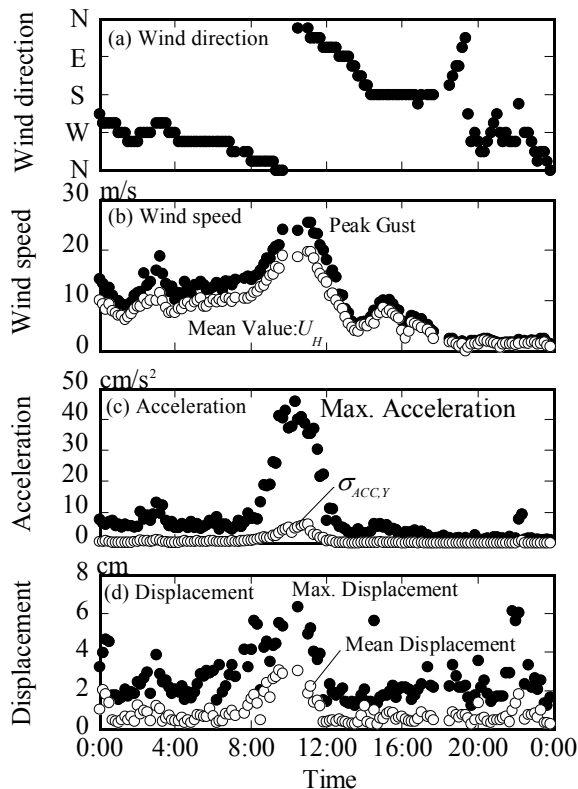


図5 台風0115号時の風向風速および風応答の時間変化

分間毎の最大瞬時値である。(d)の GPS 応答変位には、時々、前後の値に較べてかなり大きめの値が記録されることがある。ちなみに、(c)の応答加速度にはそのような傾向は見られなかった。

台風 0115 号の観測記録データの中から、風速が最大となった 11:00 から 11:10 の 10 分間における鉄塔頂部の軌跡を図 6(a),(b)に示す。この時刻における最多風向は NNW であり、(a)の GPS による変位出力のリサージュでは、概ね風方向に静的な変位が生じている。また、(b)は加速度計による加速度出力のリサージュである。また、一例として RTK-GPS および加速度計により得られた変位、加速度の時系列波形を図 7 に示す。両者ともほぼ同様の傾向を示しており、良い対応が見られた。

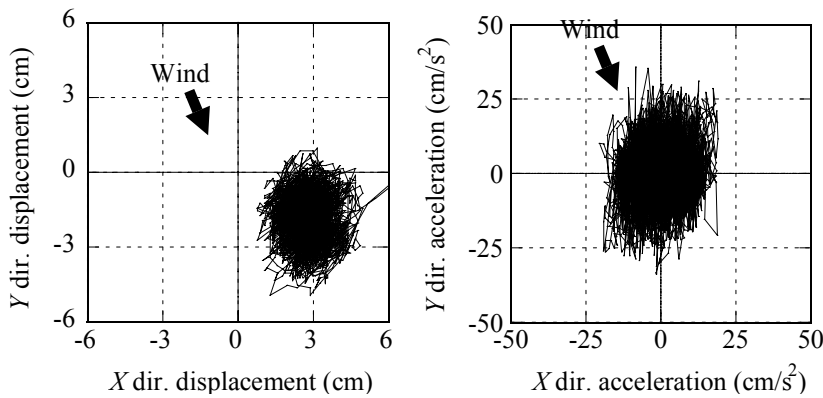
4.4 鉄塔の振動特性

図 8 に鉄塔頂部変位のパワースペクトル密度を示す。なお、比較のため加速度のパワースペクトル密度には $(2\pi f)^4$ を乗じて変位のパワースペクトル密度に換算した。両者ともに 0.57Hz に鉄塔の 1 次固有振動数に対応するピークが見られる。また、高周波数側においては、RTK-GPS のバックグラウンドノイズによる影響が出ていると思われる。

RTK-GPS システムにより得られた変位および加速度計により得られた加速度に、RD 法を適用し鉄塔の振動特性について検討した。図 9 にそれぞれの RD 減衰波形を示す。最小二乗近似により得られた鉄塔の振動特性は、固有振動数については両者ともに 0.57Hz と一致しており、減衰定数については、RTK-GPS で 0.87%、加速度計で 0.94% と概ね良い対応を示した。

4.5 日射による鉄塔の変形

本システムでは静的変位が検出されるため日射による熱応力での鉄塔の変形が検証できる。一例を図 10 に示す。



(a) RTK-GPS (b)加速度計

図 6 台風 0115 時の鉄塔頂部のリサージュ

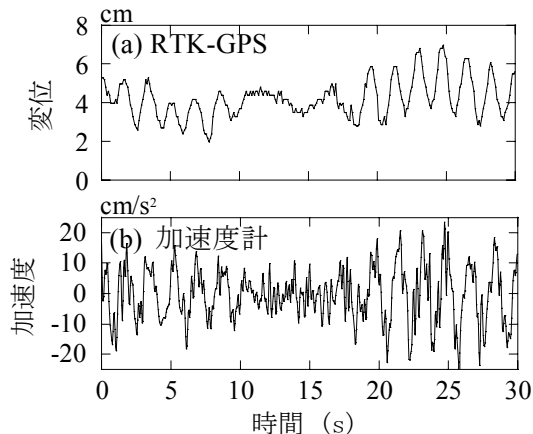


図 7 強風時の時系列波形の一例

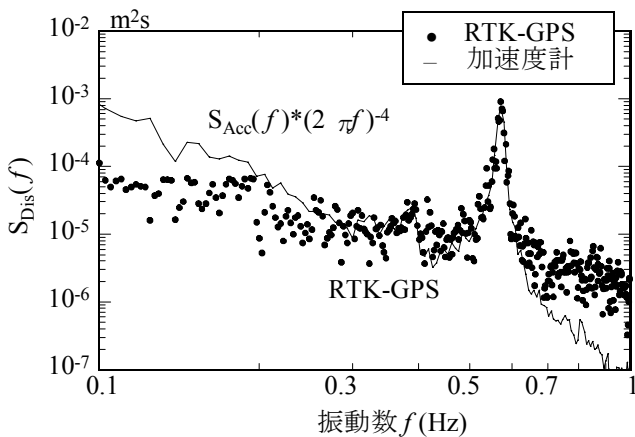
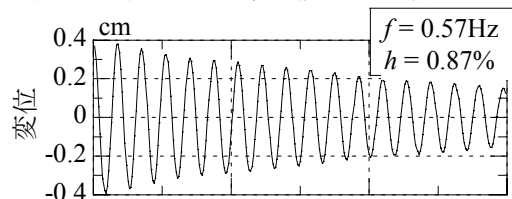
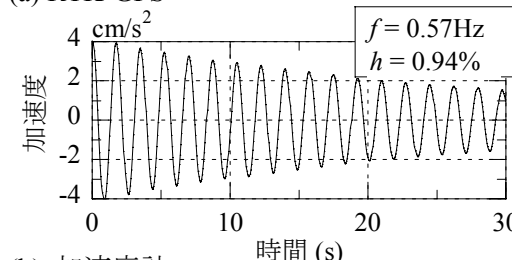


図 8 変位のパワースペクトル密度



(a) RTK-GPS



(b) 加速度計

図 9 RD 法により得られた RD 減衰波形

風の弱かった日の鉄塔頂部の変位を 1 時間毎に平均して図示した。日の出時刻は 6:30 頃であり、7:00 に 1cm 西に変形し、10:00～11:00 頃に北西に 4cm 程度変形している。午後は東側に変形し、日没後の 19:00 頃にはゼロ点に戻った。

5. 構造解析結果

5.1 FEM 解析モデル

設計図書に基づいて、総質量 730t の FEM 解析モデルを作成した。その際、構造部材以外の質量は全節点に均等に振り分けた。作成した FEM モデルにより鉄塔の固有値解析を行い、固有振動数を算出した。Y 方向の 1 次固有振動数は 0.57Hz となり、図 8 に示した実測による GPS 変位および加速度のパワースペクトル密度のピーク周波数と一致した。2 次、3 次についても、加速度計による実測結果はそれぞれ 2.17Hz, 4.57Hz であり、FEM 解析結果とほぼ一致した。図 11 に FEM 解析モデルによる Y 方向の 1 次から 3 次までの振動モード形を示す。

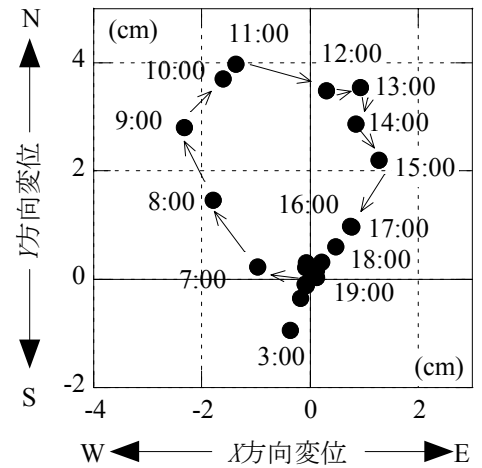


図 10 日射による鉄塔の変形

5.2 鉄塔の平均変位の検討

高さ z での平均風速を U_z 、見付面積を A とし、下式に基づいて各層の平均風荷重を算定し、風上面の接合部に静的な集中荷重として作用させることにより、FEM 解析モデルの頂部平均変位を求めた。

$$\text{風力} \quad F_z = \rho U_z^2 CA/2$$

$$\text{風力係数}^{(6)} \quad C = 4.0 \phi - 2.5.9 \phi + 4.0$$

空気密度 ρ は 1.22kg/m^3 とし、鉄塔の充実率 ϕ は図面から 0.65 とした。なお、地表面粗度区分は III とした。その結果、風速計高さ 120m での平均風速を 20m/s としたとき、鉄塔頂上での平均変位が 2.8cm となった。

図 12 に RTK-GPS による平均変位の实測結果と FEM 解析結果を比較して示した。RTK-GPS による平均変位は最多風向が北で、且つ日射による変形の影響を無視できると思われる終日曇りまたは雨天時のデータのみをプロットしている。RTK-GPS 実測結果と FEM 解析結果は高風速側では概ね対応している。

5.3 部材応力度の検討

応答のパワースペクトル密度などから平均風荷重分布に基づいて FEM 解析した頂部変位と各部材応力度

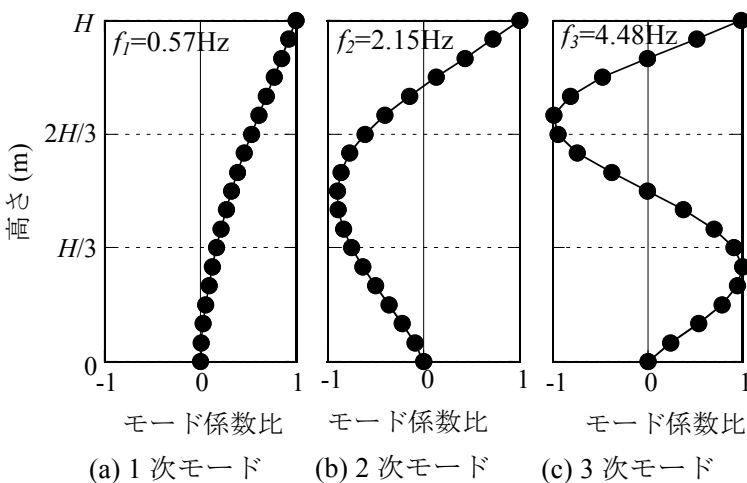


図 11 FEM 解析により得られた振動モード

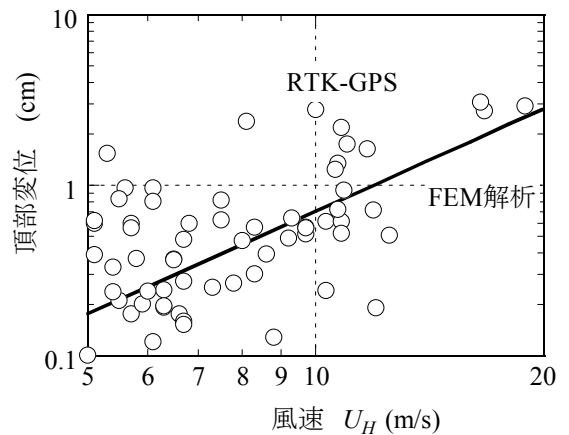


図 12 GPS による頂部平均変位(Y 方向)と FEM 解析値の比較

の関係から、GPS 頂部変位の時刻歴に対応する部材応力度の時刻歴を求め、図 13 に示す 3 部材について図 14 に示した。部材応力度は、台風 0115 号の強風時 10 分間のデータから鉄塔自重の影響も含めて算出している。ちなみに、この場合は、図 5(d)から分かるように、GPS 変位に特異な最大応答値は現れていない。例示した部材は図 13 に示すように、鉄塔脚部主柱材、斜材および中柱材であり、ともに圧縮側部材である。(a)の主柱材応力度、(b)の斜材応力度は風力変動を反映して大きく変動しているが、(c)の中柱材は時間変動が少なく、主として鉛直荷重を負担する結果となっている。

6. まとめ

RTK-GPS を用いた計測手法の基本特性の検討および実構造物の風応答測定を行い、下記の結果を得た。

RTK-GPS 計測システムの基本特性としては、振動数 2Hz 以下、振幅が 2cm 以上であれば精度良く測定することが可能である。また、実物鉄塔での RTK-GPS による応答変位計測では、強風時において加速度応答と非常に良い対応を示し、振動特性についても評価することができた。

鉄塔をモデル化して FEM 解析を行った結果、実測結果と良い対応を示した。また、GPS 変位応答結果と FEM 解析結果を利用して強風時における鉄塔部材の応力度の時系列的変化をモニタリングすることの可能性が示された。

参考文献

- 1) Çelebi, M.: GPS and/or strong and weak motion structural response measurements - Case studies, *Structural Engineering World Congress '98, San Francisco, Conference Proceedings on CD-ROM*, T193-1, pp.8, 1998
- 2) 田村他、GPS を利用した高層建物群の風応答観測の可能性、日本建築学会学術講演梗概集、pp203-204、1999
- 3) 石原他、GPS を利用した建物の風応答計測に関する基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp211-212、2000
- 4) 吉田他、RTK-GPS を用いた鉄塔の風応答変位測定、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp211-212、2001
- 5) Y. Tamura et al.: Measurement of wind-induced response of buildings using RTK-GPS, *Proc. of APCWE V*, pp93-96, 2001
- 6) ASCE Standard, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, 2000

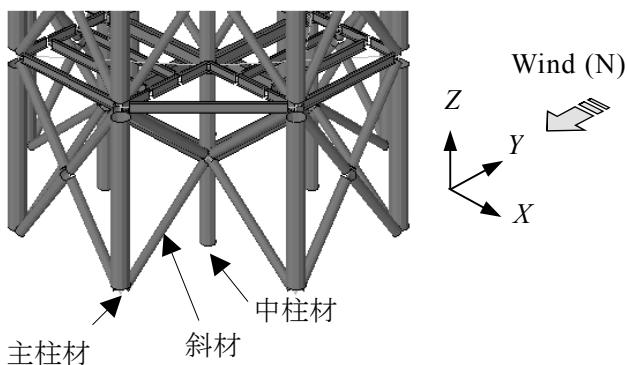


図 13 解析を行なった鉄塔基部の部材位置

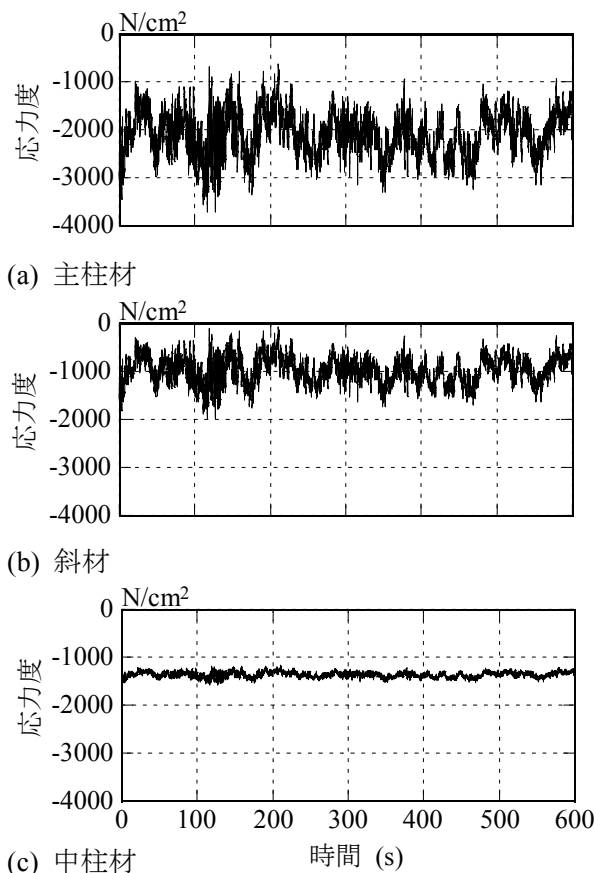


図 14 FEM 解析および RTK-GPS 変位のハイブリッド利用により得られた部材応力度の時系列波形