

Castleton Tower 頂上と麓における微動波形の分析結果メモ

中村 豊 (SDR)

はじめに

アメリカ合衆国地震学会の学術ジャーナル BSSA の Short Note に掲載された Jeffrey R. Moore らが著わした論文 (BSSA Early Edition 2019118.1) に興味をもち、著者に計測微動データの提供をお願いしたところ、快諾された。そこで、独自に分析した結果を簡単にまとめたので報告する。

Castleton Tower とは、ユタ州東部の Castleton 峡谷にある高さ 120m の天然岩石柱のことで、本報告の最終ページに外観写真などを掲示したので、参考にされたい。分析は周波数分析のほか、CERS 法のうち、C 法と E 法を用いて行った。CERS 法については、中村(2017)を参照されたい。

データについて

提供されたデータは頂上 (CASTA) と麓 (CASTB) で同時に計測された約 9000 秒 (二時間半) の 100Hz サンプリング記録である。物理単位は m/s、記録時刻は、2018 年 5 月 12 日の 20 時 30 分から 23 時 00 分まで (UTC) である。

解析について

(1) 周波数分析

長周期まで計測できるセンサーで記録された波形はゼロ線が安定しないようにみえるので、HPF 処理(カットオフ周期 5 秒、-6 d B/Oct)を行ったものについてフーリエ解析などを行った。ここでの解析に際して、物理単位をマイクロカイン μ kine (10^{-6}cm/s 、 10^{-8}m/s) に変更している。解析に使用したのは、記録開始後 600 秒~900 秒の 5 分間の記録で、ここからパルス的な波形を避けて 40.96 秒の区間を 6 区間選定してフーリエスペクトルを算定し、スペクトル比などを算定してのち、6 セットの結果を平均して最終結果とした。

分析内容は以下のとおりである。

頂上と麓については、XYZ の三方向成分記録を用いて、X と Y、X と Z および Y と Z の組み合わせでスペクトル比を算定し、これらの間の Coherence や位相差も併せて算定した。さらに CASTA と CASTB の対応する XYZ 成分毎のスペクトル比と Coherence、位相差を算定した。結果を図 1~図 3 に示す。対象周波数域は 0.1Hz から 20Hz である。用いたスムージングフィルターはハニングを 5 回適用して、約 0.1Hz のバンド幅を実現している。

(2) CERS 分析

頂上を基準波形、麓を目的波形として C 法を適用して、この間の波動伝播時間と減衰比を推定した。さらに頂上波形に E 法を適用して、頂上と反射面間の波動伝播時間と減衰比を推定した。この時、9000 秒を 900 秒ずつに 10 分割し、指数平滑の半減期を 10 秒とした。分析は 1/100 秒毎に行われているが、計算結果の変化は緩やかなので、結果の数値を 1 秒毎に抽出してデータを削減して全体が容易に把握できるようにした (図 4、図 5)。

解析結果と解釈ほか

(1) Castleton Tower の応答特性と物性推定

頂上での各方向成分の組合せ解析で、水平方向同士のフーリエスペクトルについて概ね 10Hz 以下では良く類似している。顕著なピークは 0.8Hz、1.0Hz および 2.1Hz である。

0.8Hz の Coherence はほぼ 1 であり、同じ振動を X 方向と Y 方向で観測しているものと考えられる。この振動の水平方向と Z 方向成分の相関をみるとほぼ 1 であり、この振動は上下動を伴ったものであることがわかる。こうした相関の特徴は曲げ振動か剛体振動の場合にみられるものであるが、ここでは曲げ振動と考えられ、スペクトル比や位相差から概ね北西-南東に振動していると推測される。

1.0Hz の振動についてみると、それぞれの成分間の相関は、X (東西) 方向と上下方向の相関が高いほかはやや低く、X 方向主体の曲げ振動と推測されるが、スペクトル比や位相差をみると振動面は北東-南西に傾いている。

これらの曲げ振動に対して、2.1Hz の振動は水平方向同士の相関は高いものの、水平方向と上下方向の相関は極めて低いものとなっている。すなわち、この振動は上下動を伴わない水平方向のみの振動で、せん断振動の可能性が高い。せん断振動の場合、高次振動として基本振動数の 3 倍、5 倍、7 倍などが見られると期待されるが、頂上と麓の水平方向のスペクトル比やコヒーレンスをみると、該当する周波数においてピークが観察され、2.1Hz の振動はせん断振動であると考えた。しかし、ユタ大学の Moore 教授からの捩じり振動とも考えられるのではないかと指摘を受けた。確かに、0.8Hz と 1.0Hz の曲げ振動は振動面が異なっており、(2) の CE 法の結果に基づけばこれらの振動は時間的に交互に現れていることから、捩じり振動を伴っていると考えるのが自然である。このことから 2.1Hz の振動は、せん断振動と考えるよりは捩じり振動と考えるのが妥当であろう。ただし、後述のせん断波速度の推定においては、簡単のため捩じり波動の伝播速度はせん断波速度 $\times (G/\rho)^{0.5}$ と同じと仮定しているが大過は無いかと考えている。

一方、曲げ振動の高次振動数は、曲げ波動の伝播速度が波長とともに変化するため、基本振動数を 1 として、二次 6.2669・・・、三次 17.5449・・・、となるが、0.8Hz や 1Hz の振動に対応する二次振動のピークは見当たらない。断面形状の影響で単純な片持ち梁の曲げ振動になっていない可能性がある。むしろ、高次の振動数は伝播速度が一定の場合の高

次振動数の比率（1：3：5：・・・）に近いものになっている。

上下動の頂上と麓のフーリエスペクトル比をみると、0.8Hz と 1.0Hz にピークが見られるが、これらは曲げ振動に伴うものなので除外すると、4Hz～10Hz に 10 倍弱のピークが多数認められる。これらの内、固有振動数として考えられるものを位相差が最初に 90 度となるフーリエスペクトル比のピーク周波数とすると、それは概ね 5.0Hz となる。この二次振動数はおよそ 15.0Hz となるが、この付近にもスペクトル比のピークは認められるので、概ね 5.0Hz を上下動すなわち P 波による Castleton Tower の固有振動数と考えることができる。

高さ 120m の Castleton Tower を、伝播速度 V_s (m/s) の S 波または伝播速度 V_p の P 波が重複反射した場合の基本固有振動数 F_s または F_p は次のように与えられる。

$$F_s = V_s / (4H) \text{ または } F_p = V_p / (4H)$$

これから、 V_s と V_p は次のように求められる。

$$V_s = 4HF_s = 4 \times 120 \times 2.1 = 1008 \text{ m/s}$$

$$V_p = 4HF_p = 4 \times 120 \times 5.0 = 2400 \text{ m/s}$$

これから、 $\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$ と仮定して、 $E = 6.2 \text{ Gpa}$ 、 $\nu = 0.39$ が得られる。少しポアソン比が大きい、風化の影響と考えることができるかもしれない。

タワーの曲げ振動やせん断振動（捩じり振動の倍率は計測できていないのでここではせん断振動として考える）、上下振動の増幅倍率から減衰定数を推定すると、以下のようになる。曲げ振動は 100 倍から 200 倍の増幅倍率であり、刺激係数は 1.57 と考えられるから、0.4%～0.8% と見積もられる。せん断振動と上下振動については、それぞれ、30～40 倍と 8 倍の増幅倍率であり、刺激係数は 1.27 と考えられるから、それぞれ、減衰定数は 0.4～0.6% と 8% と見積もられる。上下動の減衰は曲げ振動や水平せん断振動に較べて桁違いに大きいことが窺われる。

なお、CASTB での各方向成分の組合せ解析によると、各方向成分の相関度は低く、各成分は独立して振動していると思なせる。すなわち、HVSr については、いわゆる HVSr 法の条件に合致している。HVSr の相関の低いピーク振動数と倍率を読み取ると、概ね 2.3Hz で 2.2 倍となっている。麓の基盤 S 波速度をタワーの S 波速度と同じとすると、表層の伝播速度と厚さは、460m/s、50m と推定される。また、CASTB での K_g 値 (Nakamura, 1997) は 2 程度であり、基盤速度が 600m/s ではなく 1000m/s であることを考慮すると、 $(1000/2) \times (1000/600) = 800 \text{ Gal}$ 以上の基盤入力加速度で地盤変状が生じ始めると推測される。この辺りでこんなに大きな基盤加速度は滅多にないと思われるが・・・。

(2) CE 法の分析結果

C 法の結果と E 法の結果を図 4、図 5 に示すが、伝播時間についてほとんど同じ結果にみえる。このことは反射面が麓の測点より上にあることを示唆している。水平方向については、伝播時間は $25 \sim 31 \times 0.01$ 秒でフーリエ周波数分析による卓越振動数と概ね一致している。X 方向と Y 方向（磁北の方向）の伝播時間がほぼ同じ時間的変動をしており、同じ振動をふたつの方向で観測していることを示している。つまり、ふたつの曲げ振動が交互に出現していることを示唆しており、これによって、捩じりが誘発されていると考えられる。上下方向については、P 波の伝播に関連すると思われる範囲に限定すると、頂上で反射した波動がいくつかの反射面で反射された波動に対応すると考えられる伝播時間が認められる。この範囲で計測されたすべての伝播時間を平均すると、約 5.8×0.01 秒となるが、伝播時間の多くは $6 \sim 7 \times 0.01$ 秒の範囲に入っている。誤差指数が小さい伝播時間は概ね 6.5×0.01 秒であり、伝播距離は 120m なので、伝播速度はおおよそ 1850 m/s 程度と見積もられる。このタワーの伝播速度が一定とすれば、計測された多数の伝播時間（主なもの：3、4、6、7、8 および 9.3、単位は 0.01 秒）に対応する反射面の位置は頂上から、55m、75m、110m、130m、150m および 170m などと推定される。タワーの写真などに見える水平構造がこれらに対応するものかどうか非常に興味深い。

Jeffrey R. Moore らによる結果の要約と比較

Moore らは、周波数分析を行なって、0.8Hz と 1.0Hz の曲げ振動が卓越することを明らかにするとともに、タワー諸元を簡略化した上で梁理論から物性値を推定している。密度は付近で採取したコアブロックの測定に基づき 2200 kg/m^3 、またポアソン比を 0.25 と仮定して、ヤング率 $E = 7.0 \text{ GPa}$ としている。これに対応する P 波速度と S 波速度は、それぞれ約 1800 m/s と 1000 m/s としている。さらに三次元 FEM 解析を実施することにより結果を検証している。この三次元 FEM 解析による動画は web 上で公開されている。

提供していただいたデータを分析した結果は、本文で述べたとおり、ヤング率 E が 6.2GPa と 10%以上低く見積もられている。また、ここでは、P 波と S 波の伝播速度の推定に成功しているが、P 波速度が彼らの推定結果より大きくなっているため、ポアソン比が彼らの仮定よりも大きくなっている。CERS 解析によって多数の反射面の存在が示唆されている点なども含めて、困難な計測を初めて実施した Moore らの今後の活動によって明らかにされていくことを期待したい。

謝辞

困難な計測を実施した Moore 教授をはじめとする研究チームに敬意を表するとともに、データを快く提供していただいたことに深く感謝申し上げます。研究チームの今後のさらなる活躍を期待します。

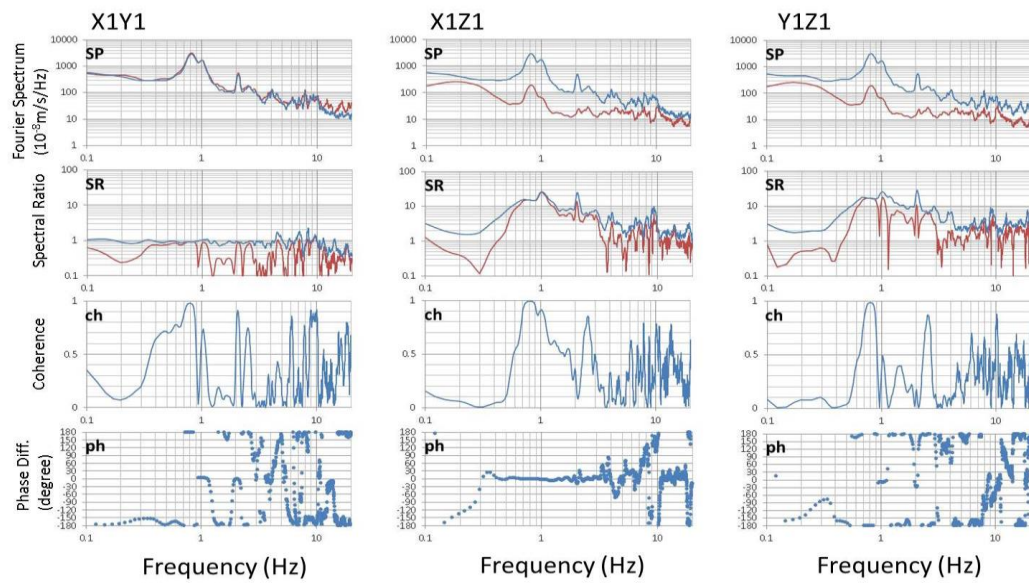
文献

Moore, Jeffrey R., Paul R. Geimer, Riley Finnegan, and Clotaire Michel: Dynamic Analysis of a Large Freestanding Rock Tower (Castleton Tower, Utah), Bulletin of the Seismological Society of America, Early Edition Aug. 2019.

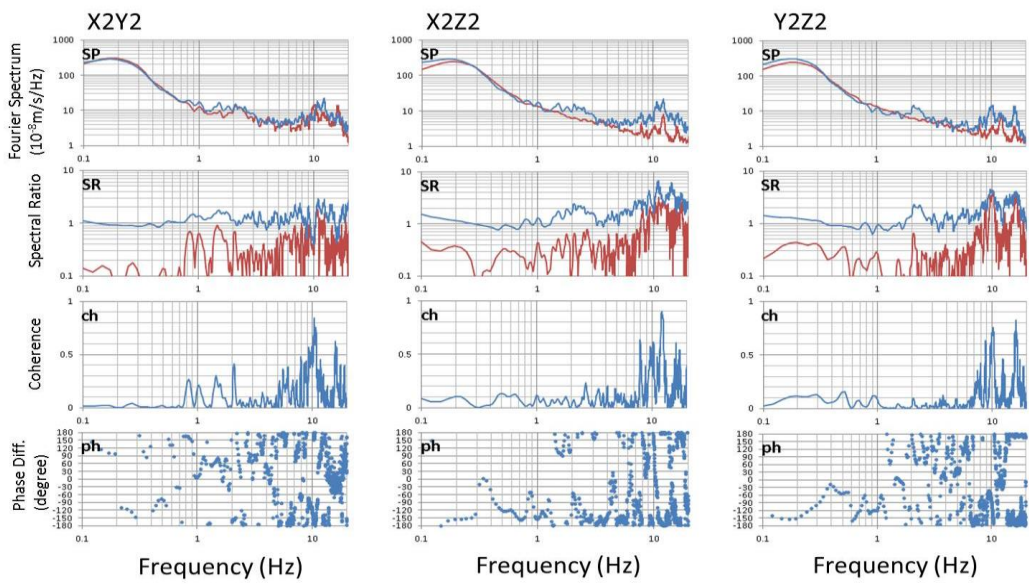
中村 豊：伝播時間と減衰のリアルタイム算定法群 CERS について、2017 年度日本地震工学年次大会論文、P4-20、2017.

Nakamura, Yutaka: Vulnerability indexes for surface ground and structures using microtremor, 8th Soil Dynamics Earthquake Engineering '97, Istanbul, Turkey, 20-24 July 1997.

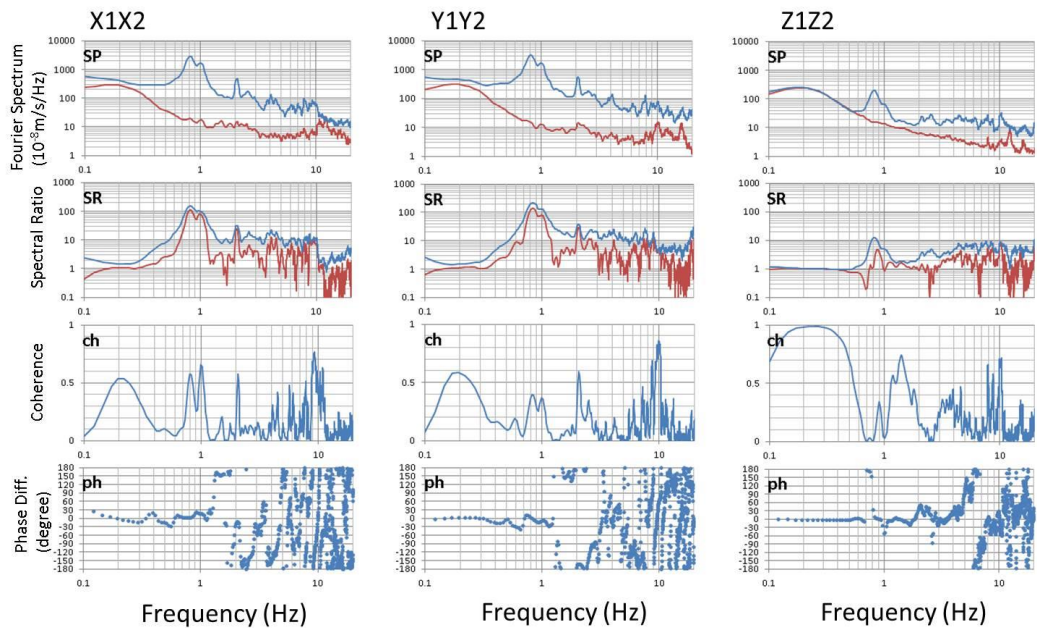
以上



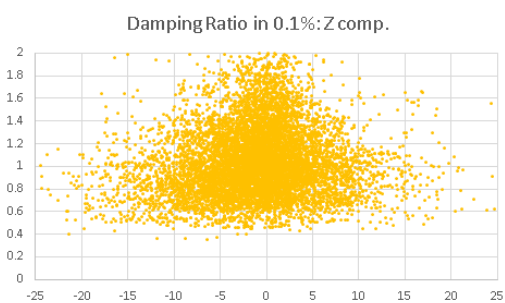
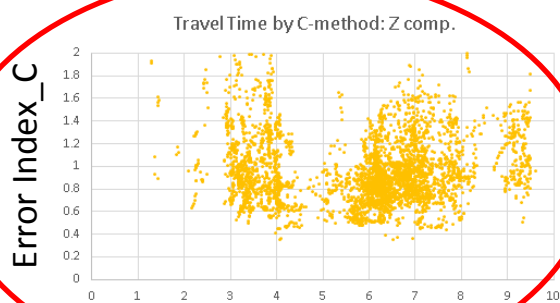
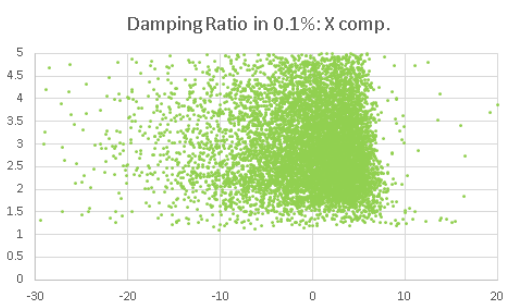
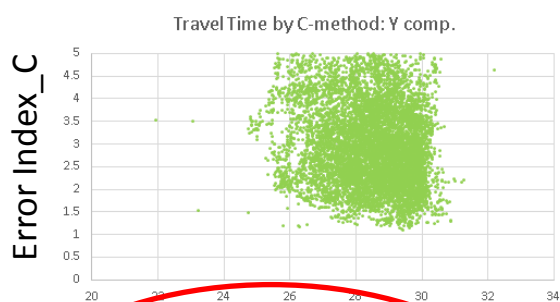
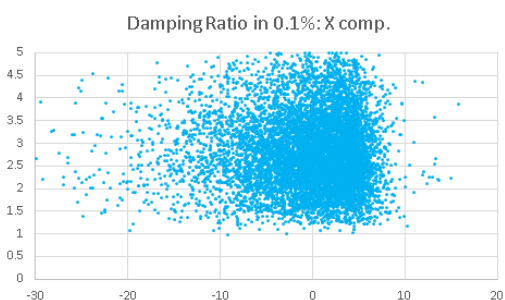
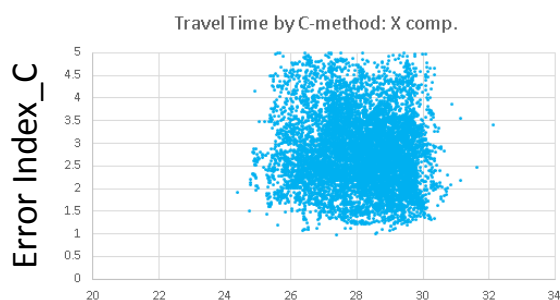
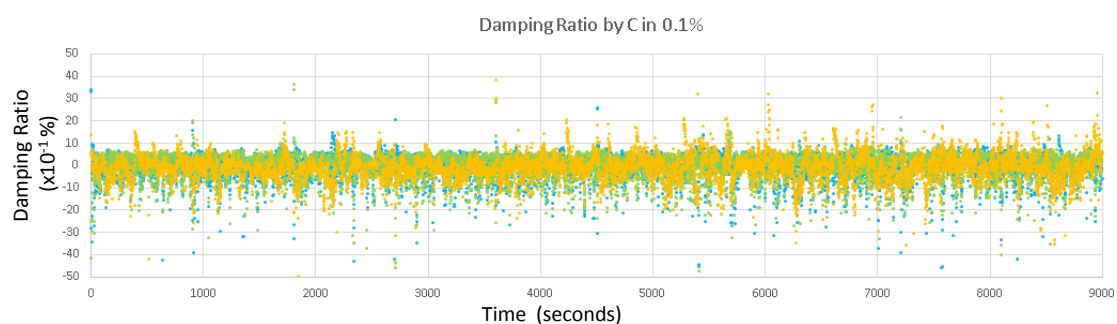
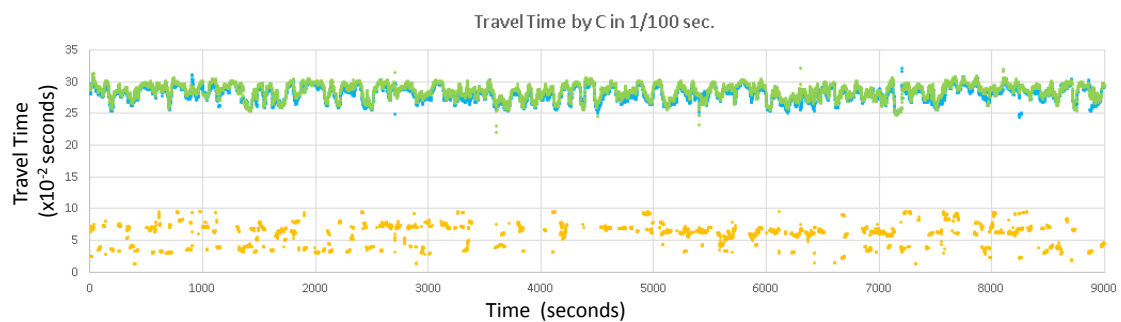
☒ 1 CASTA Average of the selected six block of 40.96 sec. from 600 - 900 sec. range



☒ 2 CASTB Average of the selected six block of 40.96 sec. from 600 - 900 sec. range



☒ 3 CASTAB Average of the selected six block of 40.96 sec. from 600 - 900 sec. range



Travel Time ($\times 0.01$ seconds)

Damping Ratio ($\times 0.1$ %)

図4 C法による解析結果

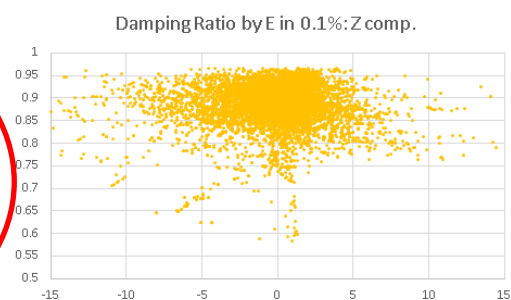
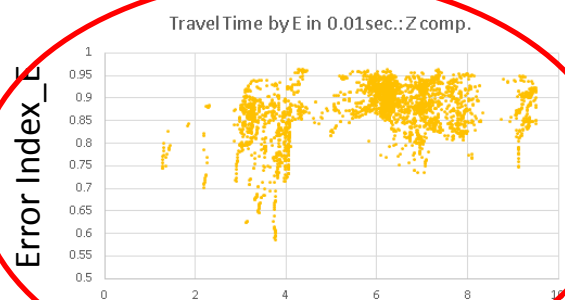
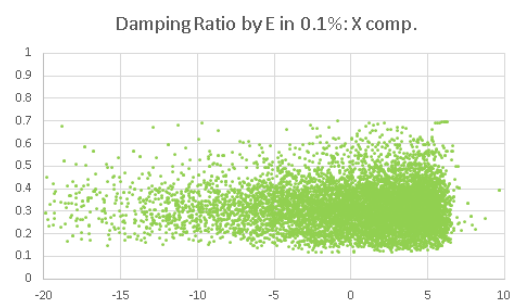
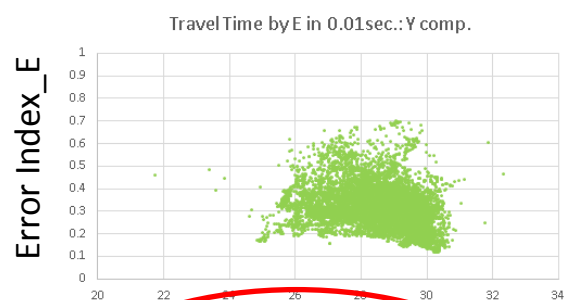
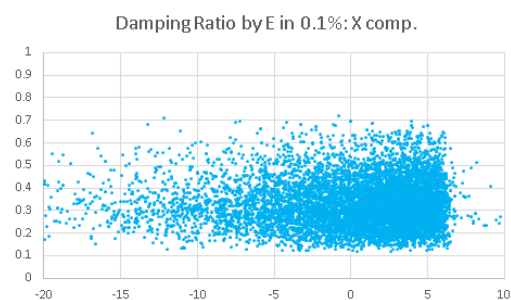
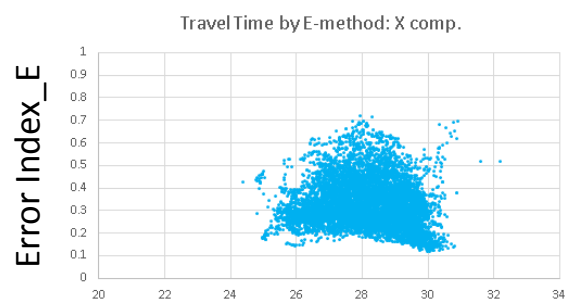
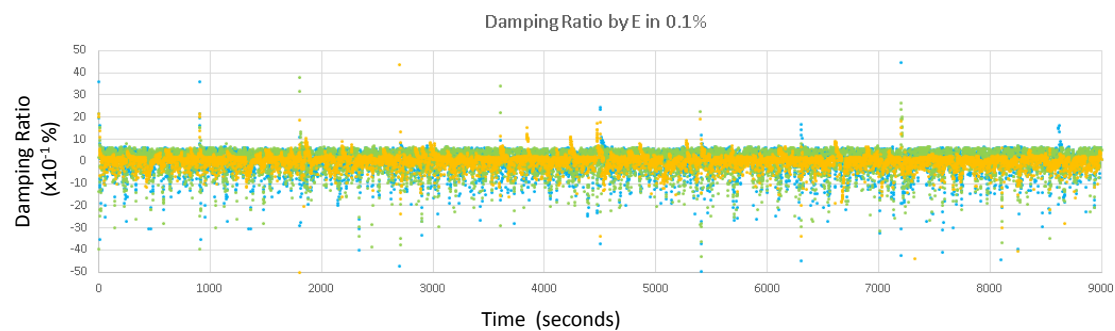
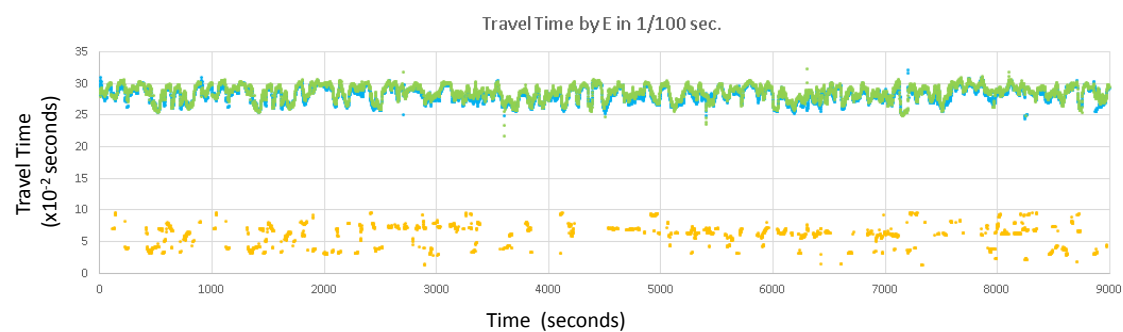


図 5 E 法による解析結果

参考図：Castleton Tower の外観他（Google Earth などの web 情報を加工）

