

## イタリア中部地震によるアッシジ・聖フランチェスコ大聖堂の被害と常時微動特性

(株) システムアンドデータリサーチ 正会員 中村 豊  
 (株) システムアンドデータリサーチ 正会員 齋田 淳  
 Istituto Nazionale di Geofisica, Italy. Antonio ROVELLI  
 Istituto Nazionale di Geofisica, Italy. Stefano DONATI

## 1. はじめに

1997年9月26日、イタリアの中部 Umbria 地方において地震が発生した。この日、未明から昼にかけて3回の地震に襲われ、震源を中心とする半径10kmの地域ではかなりの被害を被っているところがある。震源から約20km離れたアッシジでも聖フランチェスコ大聖堂のドーム天井や屋根が崩落する被害が生じた。たまたま、最初の地震の後、大聖堂内部でテレビ取材中のクルーが撮影中に2回めの地震が発生して、ドーム天井が崩壊する様子を記録している。最初の地震 ( $M_L5.5$ ) は2時33分に発生し、2回め ( $M_L5.8$ ) は11時40分に発生している。その直後の11時46分 (いずれも現地時間) には3回め ( $M_L4.7$ ) の地震が発生している。

ここでは、聖フランチェスコ大聖堂付近で計測した常時微動の分析結果を被害と対比して述べる。

## 2. 聖フランチェスコ大聖堂の外観と被害

聖フランチェスコ大聖堂はアッシジの西端に位置し、上下二層の教会という珍しい構造を持っている。下層の教会は1230年に完成している。上層の教会が建立された年は明らかではないが、1253年にはローマ教皇イノセントIV世により奉献されている。



Photo-1 The Basilica of St. Francis

聖フランチェスコ大聖堂の外観写真を Photo-1 に示し、上層を濃く示した平面図を Figure 1 に示す。なお、平面図にはドーム天井が崩落した部分を輪郭をぼかした灰色で示した。前部の崩落の様子はテレビ撮影されている。Photo-2 および Photo-3 にこれらの崩落状況を示す。

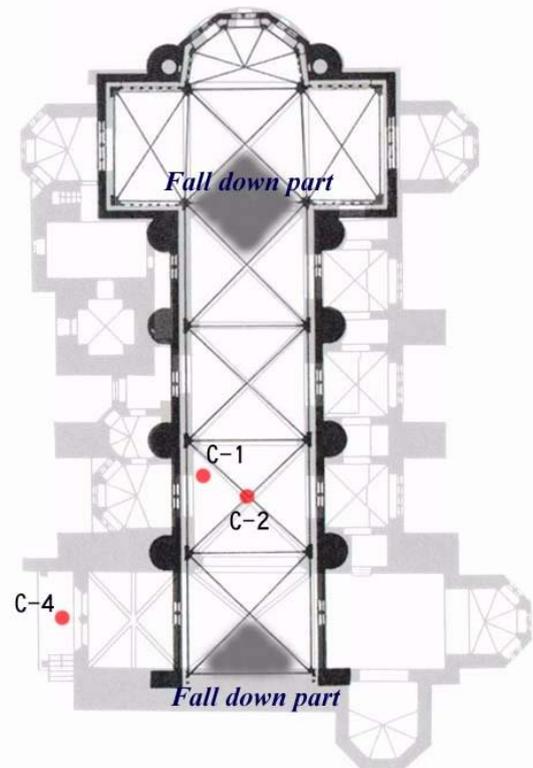


Figure 1 Floor Plans of the Upper and Lower Basilica

地震の規模は  $M_L 5.8$  であり、日本ならば被害域はせいぜい  $10\text{km}$  で、被害の程度も軽微なものに留まるものと推測される。アッシジでも聖フランチェスコ大聖堂以外の被害はほとんどなく、あっても塗壁の剥離程度の軽微な被害である。小さな規模の地震で震源から  $20\text{km}$  も離れ、しかも地震被害の発生しにくい堅固な岩盤に建立された聖フランチェスコ大聖堂がなぜ被災したかは興味深い問題である。



Photo-2a Rear Damage



Photo-2b Front Damage



Photo-2c Just after the Quake



Photo-3 The Sequence of the Basilica Break-Down

### 3. 測定点と測定方法・分析方法

聖フランチェスコ大聖堂の震災原因の解明に資するため、建物の常時微動を測定した。1997年11月20日午後2時10分～3時にかけて、上層教会の床面 C1、上層教会のドーム天井の上 C2、そして下層教会の入口 C4 の3ヶ所を測定した。これらの測点は Figure 1 に示されている。測定方向は、大聖堂の長手方向を X (概ね EW)、短手方向を Y (概ね NS) とし、上下方向を Z とした。復旧工事中であったが、C1 および C2 の微動測定時には、工事を中断していただいた。計測器は、SDR 製の PIC91 を使用した。

測定は、各測点毎に別々に、 $100\text{Hz}$  サンプリングで約 41 秒間 (4096 個) の計測を 3 回ずつ行った。フーリエスペクトルは、4096 個のデータに対して FFT 処理した結果をハニングウィンドウを 80 回かけて平滑化 (バンド幅は約  $0.4\text{Hz}$ ) し、さらに 3 回の測定を平均して算定した。C4 と G1 については、測定毎に水平/上下フーリエスペクトル比を算定して 3 回を平均し、QTS (水平/上下スペクトル比, Quasi Transfer Spectra) とした。これらの測点は同時測定されていないが、構造物の伝達特性を把握するため、X、Y および Z の各成分毎に、C2/C1、C1/C4 および C2/C4 の組み合わせのスペクトル比を算定し、伝達特性を推定した。

### 4. 分析結果

Figure 2 に示した下層教会の入口測点 C4 の QTS は、いずれも、 $3\text{Hz} \sim 10\text{Hz}$  にいくつかのピークを示しているが、倍率は小さく良好な地盤と判定される。以下スペクトル比に基づいてそれぞれの応答特

性を検討した。

上層教会の構造特性 (C2/C1、Figure 3 参照) : 水平方向はいずれの方向も概ね 2Hz が卓越し、その増幅倍率は X 方向 6 倍、Y 方向 11 倍と短手方向の方が 2 倍程度大きくなっている。また、X 方向は 5.3Hz および 7.1Hz に突出したピークがあり、10 倍を越えている。なお、Y 方向は 2Hz~5Hz までほぼフラットで 10 倍強の倍率という特異な形状を示している。X 方向の突出したふたつの周波数のうち、5.3Hz に相当するものは 9 倍と大きな増幅を示すが、7.1Hz に相当するものは 4 倍程度しかない。上下方向は 2Hz、5Hz、10Hz などに大きなピークが認められ、それぞれ、8 倍、20 倍、50 倍と通常構造物の上下動の応答と比較して低い振動数でかなり大きな増幅倍率を示している。この上下動のスペクトル比の特性はドーム天井の特性を示すものと思われる。また、5Hz 付近はいずれの方向においても卓越するが、7Hz 付近は X 方向が卓越し、10Hz 付近は上下動方向が卓越している。

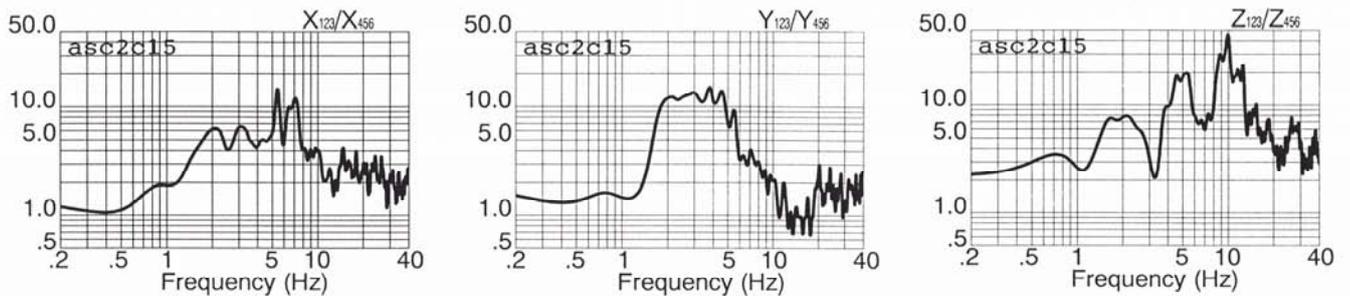
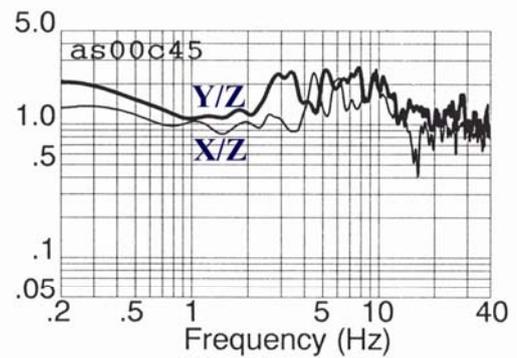


Figure 3 Spectral Ratio of C2 and C1

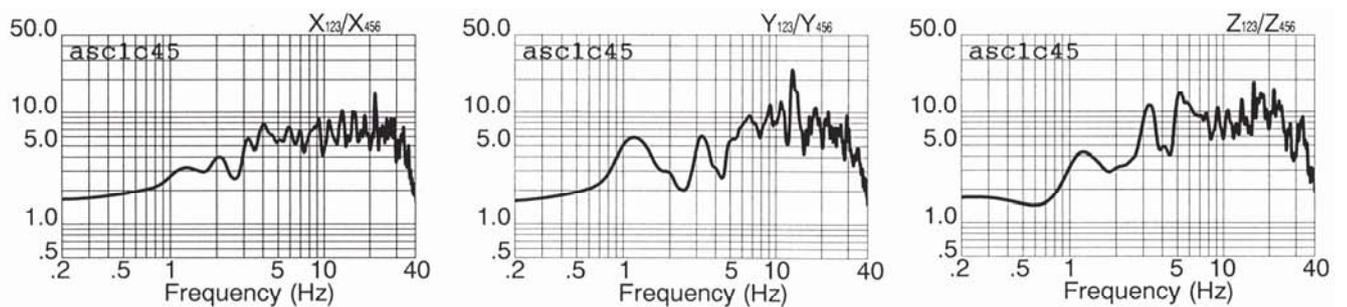


Figure 4 Spectral Ratio of C1 and C4

Figure 5 Spectral Ratio of C2 and C4

下層教会の構造特性 (C1/C4、Figure 4 参照) : X 方向は 1Hz から 20Hz まで増幅倍率が 2 倍から 8 倍程度まで漸増し、特に目立つピークは認められない。これに対して、Y 方向は 1.2Hz、3.2Hz が 6 倍程度の目立ったピークを示した後、12Hz 付近をピークとした 10 倍程度のなだらかな高まりが見える。12Hz のピークはこの高まりを突き抜け、20 倍を超える増幅倍率を示している。上下方向は Y 方向と類似の特性を示し、X 軸を回転軸とするロッキング振動の存在を示唆している。

上層教会の基盤からの応答特性 (C2/C4、Figure 5 参照) : これによると、水平方向はいずれも 2Hz ~10Hz の間でいくつかのピークが認められるようになり、増幅倍率も数十倍と大きくなっている。上下動は、5Hz~6Hz および 9Hz~10Hz に明瞭なピークが現れ、その増幅倍率は 300 倍に達している。各方向で共通して卓越する周波数は、1.6Hz (X10、Y?, Z22) 、2Hz 付近 (X28、Y35、Z25) 、3Hz 付近 (X31、Y60、Z26) 、5Hz 付近 (**X80**、**Y63**、**Z300**) 、7Hz 付近 (**X75**、Y31、Z50) 、9Hz-10Hz (X30、Y18、**Z260**) であった。括弧内は各方向別の増幅倍率である。

堅固な地盤における地震動には、通常、以下の特徴がある。上下動は P 波部分で卓越し、水平動は S 波部分で卓越するが、水平動の最大値と上下動の最大値には大きな差はない。したがって、5Hz 程度の比較的低い振動数で水平動の 4 倍近くにもなる上下動の極めて大きい増幅や 9-10Hz での上下動の突出した増幅は、上下動による被害が先行し、しかもその限界地震動が小さいことを推測させる。これは、P 波初動での発災を連想させる。

以上の分析は、いくつかの測定点での常時微動の計測結果に基づく推測にすぎない。今後機会を得て、さらに詳細な検討を行ない、歴史的石造建造物の補修・保存に役立つ知見を見出したい。

参考文献) 中村：総合地震防災の研究、土木学会論文集 I, No.531/I-34, p.30, Jan.1996.

(本論は測定直後に適当な学会で発表するために準備していたものである。時期を失した感はあるが、備忘録として、弊社 HP で公開する。論文引用する場合には弊社ホームページアドレスとともに引用していただければ幸いである。公開日：2009 年 5 月 28 日)