

ローマ・サンパオロ教会建造物および 周辺地盤の常時微動調査(速報)

中村 豊¹・齋田 淳²・E. Dilek Gurler³

¹正会員 工博 株式会社システムアンドデータリサーチ (〒186-0003 東京都国立市富士見台 3-25-3)

²正会員 株式会社システムアンドデータリサーチ (〒186-0003 東京都国立市富士見台 3-25-3)

³工博 株式会社システムアンドデータリサーチ (〒186-0003 東京都国立市富士見台 3-25-3)

ローマの城壁の外側に位置するサンパオロ教会は、4世紀後半に建設が始められた教会である。1349年の地震では鐘楼が崩壊するなど過去に甚大な被害を受けており、現在の教会は1800年代に再建されたものである。この教会は地盤的には堅固な地盤と堆積地盤の境界に位置しており、今後の地震対策を考えるにあたっては地盤特性と建物の持つ耐震性のそれぞれを的確に評価する必要がある。ここではサンパオロ教会の大聖堂および周辺地盤の常時微動を測定した結果を報告する。調査の結果、地盤は1Hz付近で振動しやすく、増幅倍率は堅固な地盤に近づくほど小さくなる傾向が認められる。また大聖堂は1.5Hz付近に卓越振動数をもつ測点が多く、地盤の振動に対して増幅倍率も大きくなっているなど、耐震性を評価するための基礎的知見が得られた。

Key Words: *Microtremor Measurement, Predominant Frequency, Amplification Factor, H/V Spectral Ratio, Historical Buildings, Ground Motion Characteristics*

1. はじめに

ローマ市街の南側、旧城壁の外側に位置する San Paolo fuori le Mura 教会(以下「サンパオロ教会」という)は、ローマ(バティカン)でサンピエトロ大聖堂に次ぐ第二の教会である。この教会の建築は西暦384～386年に始められ、その後幾度かの災害を受けながら現在の姿が形作られた。当初ファサード側にあった鐘楼は1349年の地震(Ms 6前後と推定される)で破壊され、その後に再建されたものの最終的には失われた。現在の後陣側にある鐘楼は1860年に完成したものである。なお、「fuori le Mura」はイタリア語で「壁の外」を意味する。図-1にサンパオロ教会の位置を示す。

ここでは、サンパオロ教会の大聖堂(ドゥオモ)および周辺の地盤で常時微動測定を行った結果を報告する。



図-1 サンパオロ教会の位置

2. 測定の概要

サンパオロ教会の全景を図-2 に、常時微動測定の測点を図-3 にそれぞれ示す。

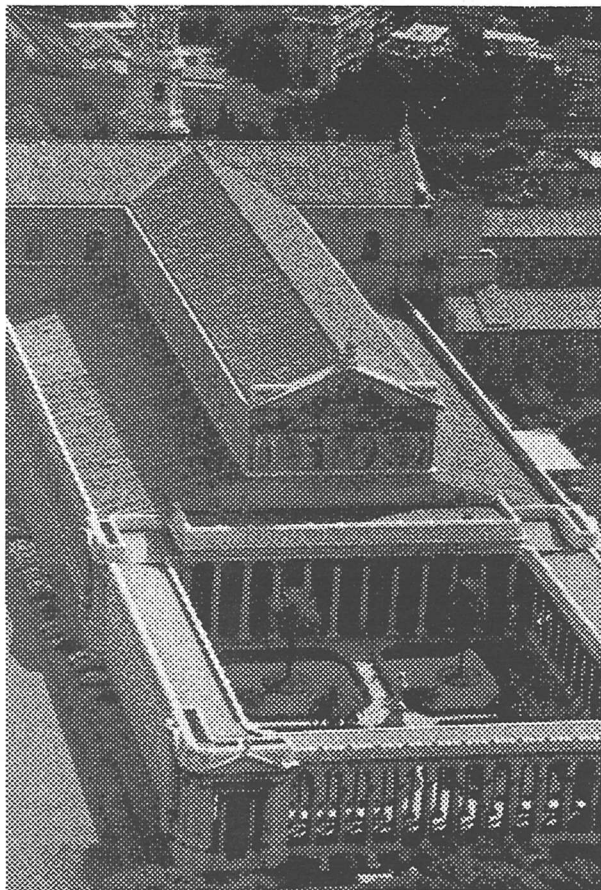
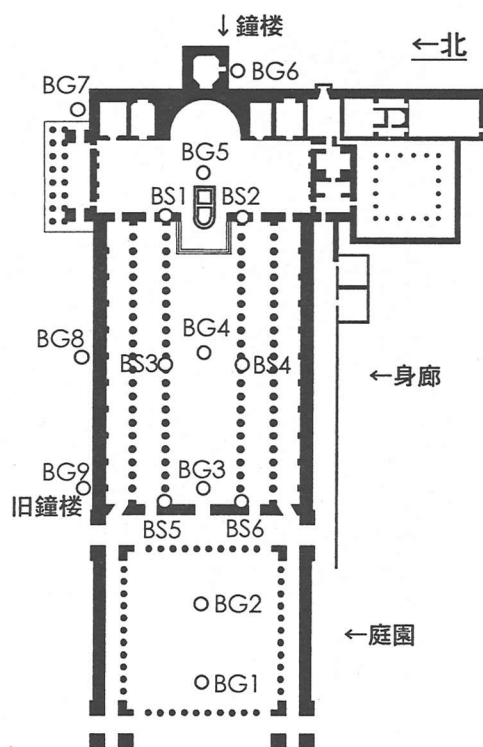
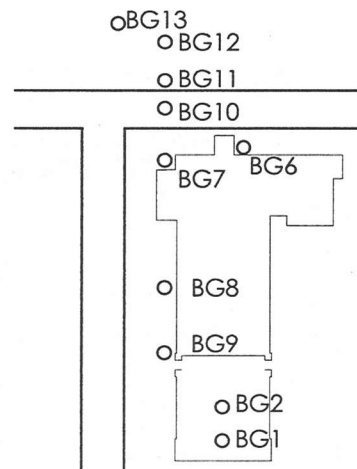


図-2 サンパオロ教会全景



(1) 大聖堂における測点



(2) サンパオロ教会周辺地盤の測点

図-3 常時微動測定の測点

BG1~13 は地盤又は床上、BS1~6 は大聖堂の身廊上部(小屋組内)の測点である。BG1~9 は教会内部や周辺の堆積地盤上の測定であり、BG10~13 は堆積層から岩盤へと移行する方向の測定となっている。地盤の模式図を図-4 に示す。

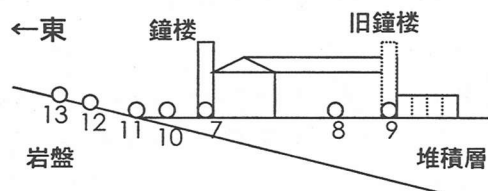
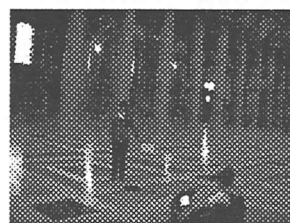
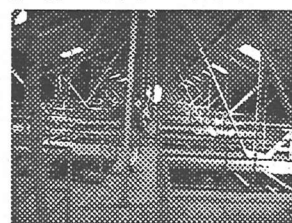


図-4 地盤の模式図

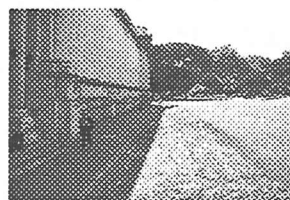
測定を行った箇所と測定風景を図-5 に示す。



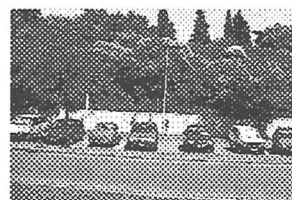
身廊内部



小屋組



教会外壁
(BG7 側から BG8・9
方向をを臨む)



岩盤側測点
(BG10 側から BG11~13 の
方向を臨む)

図-5 測定箇所・測定風景

測定に用いたのは携帯型振動計測器PIC91である。PIC91は水平2方向・上下1方向の3成分を測定することのできるセンサを2組接続して、計6成分の常時微動を同時計測することができる。

3. 測定結果

(1) 周辺地盤測定(BG1~13)

周辺地盤測定の結果については、得られた常時微動波形を各方向成分ごとにフーリエ変換を行った後に、さらに水平方向と上下方向のスペクトル比(H/Vスペクトル、以下QTSという)を算出する。このQTSは各測点における地盤の伝達関数を近似している¹⁾。

図-6に周辺地盤の常時微動測定の結果から得られたQTSを示す。測点はBG13→BG10→BG6→BG9の順に岩盤側から堆積地盤側になる。QTSにより読みとった卓越振動数・増幅倍率を岩盤側から堆積地盤側に向かって並べたものを図-7に示す。

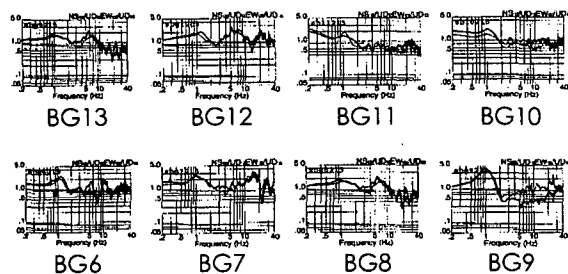


図-6 QTS

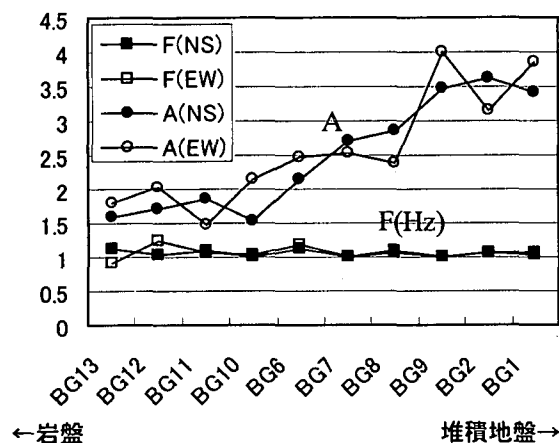


図-7 常時微動測定の結果から推定した卓越振動数 F(Hz)・増幅倍率 A

図-6に示したQTSの形状では、岩盤側ではあまり際立ったピークを持たないが、堆積地盤側のBG9では明瞭なピークを持っていることがわかる。

また図-7に示した卓越振動数と増幅倍率によると、卓越振動数は1Hz前後でほとんど変動していない。これに対して増幅倍率は岩盤から堆積層が厚くなるにつれて大きな値となっている。すなわち表層地盤の増幅特性が変化していることを表している。

常時微動の測定結果を用いて地盤の被災しやすさを表す方法としてKg値を用いる方法がある²⁾。Kg値は以下のように定義され、Kg値が大きくなることは地盤が被災しやすくなることを示す。

$$Kg = A^2/F \quad (1)$$

算出されたKg値をサンパオロ教会の大聖堂の大きな位置とともに図-8に示す。

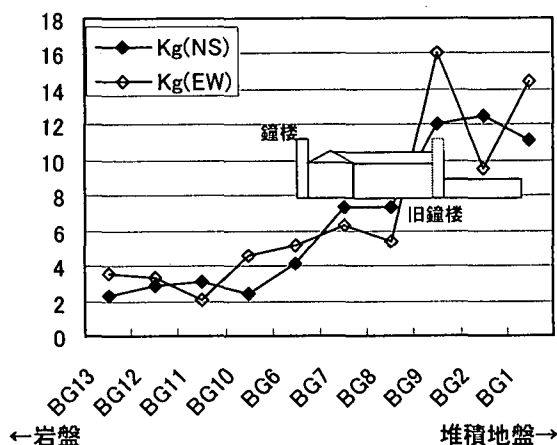


図-8 Kg値の算出結果

今回の結果では堆積層が厚くなるにつれてKg値も大きくなっており、サンパオロ教会の大聖堂が位置するBG6から堆積地盤側で大きな値になっている。なお、過去の地震で被害を受けた旧鐘楼は特に大きなKg値の記録されたBG9の付近にあった。

(2) 大聖堂身廊上部(BS1~6)

構造物上の測定として、サンパオロ教会の大聖堂小屋組の中(屋根裏)で測定を行った。この測定結果を解析するにあたり、大聖堂身廊上部における測定波形について、それぞれの対応する床上の測点(参照点)に対する増幅倍率に着目した。

観測された常時微動波形の比(大聖堂身廊上部/参照点)を図-9に、常時微動波形の比から求めた各測点の卓越振動数 F(Hz)と増幅倍率 Aを表-1に示す。なお、NS方向とEW方向はそれぞれ大聖堂の短手方向と長手方向に対応している。

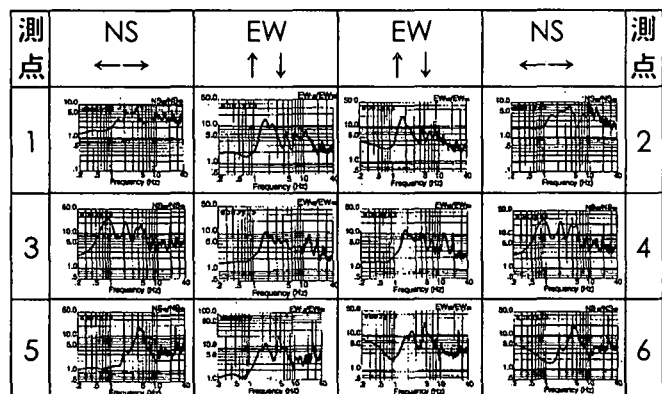


図-9 大聖堂の測定波形

表-1 大聖堂の振動特性

	BS1	BS2	BS3	BS4	BS5	BS6
F(NS)	3.76	3.78	0.90	0.90	4.08	4.08
A(NS)	7.95	7.94	26.37	27.24	19.57	21.82
F(EW)	1.73	1.73	1.78	1.78	1.83	1.83
A(EW)	15.50	19.25	10.31	12.75	8.30	9.03
参照点	BG5		BG4		BG3	
F(NS)	1.29		1.10		1.03	
A(NS)	2.54		3.24		3.25	
F(EW)	1.29		1.15		1.03	
A(EW)	2.37		2.37		3.04	

図-9・表-1によると、大聖堂の長手方向の軸について対称の位置にあるBS1・BS2、BS3・BS4、BS5・BS6は、それぞれ観測された波形が似た形状となっており、身廊の同一断面ではほぼ相似の振動特性になっていることがわかる。特にEW方向成分は固有振動数がほぼ一定の値になっており、一体の振動をしていることがわかる。そのほかの特徴としては、BS1・BS2のEW成分、BS3・BS4のNS成分がともに大きな増幅倍率となっている。またBS3・BS4のNS方向成分では卓越振動数が参照点の卓越振動数と近い値になっているため、地震時には地盤と構造物の同時共振が発生し、被害の原因となる可能性がある。

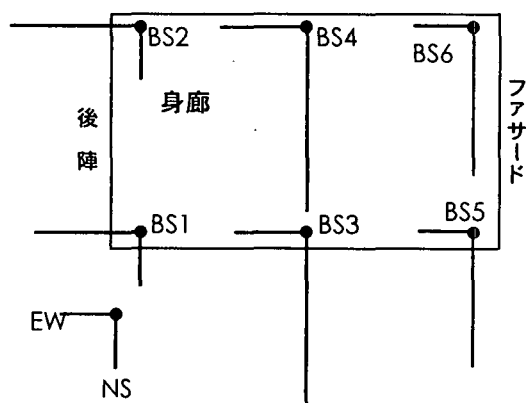


図-10 増幅倍率モデル図

各測点における各方向成分の参照点に対する増幅倍率を模式的に表したものを図-10に示す。図-10では各測点ごとの線分の長さが各方向成分の増幅倍率の大きさを相対的に示している。

図-10によると、BS1・BS2のNS方向成分の増幅倍率はほかの測点に比べて非常に小さな値になっている。これは後陣が振動を抑制しているためと考えられる。逆にファサード近くのBS5・BS6のEW方向成分の場合は振動を抑制するものが存在せず、増幅倍率はほかの測点に比べて大きな値になっている。

同じように、BS3・BS4の場合はEW方向の側壁のみが存在するためNS方向成分の値が他に比べて大きくなっている。これも振動を抑止する効果を持つ構造物が存在しないことによるものと考えられる。

4. まとめ

ここではサンパオロ教会とその周辺地盤で実施した常時微動測定の結果を速報した。この結果により、地盤については卓越振動数と増幅倍率の関係から表層地盤の状況を把握することができた。また構造物については地盤(床面)からの入力増幅特性を把握することができた。

このように、常時微動測定を行うことにより容易に地盤と建築物の振動特性を把握することができた。今後、このように容易に測定できる常時微動を用いることで、対象とする構造物の耐震性を確認することができるものと期待される。

なお、同時に鐘楼においても常時微動測定を行っているが、この分析結果については稿をあらためて報告したい。

謝辞

今回の測定を行うにあたっては、イタリア国立地球物理研究所(Istituto Nazionale di Geofisica)のアントニオ ロベーリ教授とステファノ ドナティ博士に大変お世話になりました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中村 豊：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定，鉄道総研報告，Vol. 2, No. 4, pp.18-27, 1988.4
- 2) 中村 豊：総合地震防災システムの研究，土木学会論文集，No. 531/I-34, pp.1-33, 1996.1