

アヤソフィアほか歴史建造物に対する 1999年トルコ・コジャエリ地震の影響

中村 豊¹ ・ 佐藤 勉²

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 工修 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)

1999年8月17日のコジャエリ地震 (Mw7.6、イスタンブール市基盤で最大加速度 41Gal) の発生前後において、イスタンブール市内にあるスレイマニエ寺院、アヤソフィア博物館、シェザーデ寺院、および完成直後の14階建オフィスビルの常時微動調査が実施された。地震前後の測定を比較した結果、最大9% (HS) の固有振動数の変化が検出された。地震前の常時微動測定結果から推定される建物の地震被災危険度 α_{K_b} 値は固有振動数の変化とよく対応しており、建物の危険度を α_{K_b} 値や K_b 値により事前に的確に把握できるものと期待される。

Key Words : *Vulnerability Index, Micro-tremor, Hagia Sophia Museum, Suleymaniye Mosque, Sehzade Mosque, the 1999 Kocaeli Earthquake*

1. はじめに

イスタンブールは歴史の町である。しかし、幾多の地震災害にも見舞われている。イスタンブールの地学的環境と歴史的重要性に鑑み、市内の建造物の地震動特性調査を1998年の秋から開始した。ところが、1999年8月17日にコジャエリ地震 (Mw7.6) が発生し震源域を中心に大きな被害が発生した。イスタンブールは震央から約100km離れており大きな被害を受けなかったが、古い建物等に地震の影響が懸念された。そこで、地震前までに調査した建物を1999年9月に再調査し、コジャエリ地震の影響を建物の卓越振動数の変化を中心に検討したので報告する。

2. 調査した建造物の概要

調査の対象とした建造物は、スレイマニエ寺院、アヤソフィア博物館、シェザーデ寺院およびオフィスビルレベントプラザである。これらの建物の外観や測定点を示す平面図などを図-1~図-4に、また高さ、構造、竣工年、微動測定日などをまとめて表-1に示す。

今回測定した歴史的建造物では、大きな4本の柱に支えられた四つのアーチの上に主ドームが載っている。スレイマニエとアヤソフィアでは相対する二つのアーチと相対する二つのセミドームで支えられている。

アヤソフィアでは、直径31mの主ドームを支えるアーチ下の部分が、後年、壁で埋められ外観上は壁で

支えられている。内部空間の広さは幅30m×奥行80mである。主ドームは地震により何度か部分的に損壊している。構造体は全体的にかなり経年劣化しており、何らかの対策が必要な状態である。

また、シェザーデでは主ドームは四つのセミドームで支えられている。シェザーデは建築家シナン (1490~1588) の習作的建造物であり、スレイマニエはシナン円熟期の最高傑作のひとつである。

3. 測定と解析の方法

各建造物の測定位置については図-1~図-4 および表-1を参照のこと。ミナーレについてはシェザーデとスレイマニエで2本ずつ合計4本を計測した。

各測定の微動は1/100秒のサンプリングで4096個、約41秒の計測を3回実施した。周波数解析は4096個のデータを対象にして行い、3回の測定を平均している。スペクトルはハニングフィルターを20回かけて平滑化した。バンド幅は約0.2Hzである。

イスタンブール市内の上記4建造物について、表-1の階層を独立に測定したが、短時間の計測なので、平均スペクトルの比で伝達関数を算定した。すなわち、歴史建造物については主要構造である4本の支柱部分について各階毎に測定スペクトルを平均し、また、オフィスビルについては3F毎に長方形フロアの各辺中央部での4測定のスペクトルを平均して、各階の代表

スペクトルとした。ドーム回廊部分 (DM) については 8 測点のスペクトルを平均して代表スペクトルとした。1F を基準にした各層の代表スペクトルの比を伝達関数とした。ミナーレについても同様の方法で代表スペクトルを求めた。図-5 に算定結果を示す。なお、地上階を 1F とした。

4. 建物地震被害危険度指標

建物各階の層間変形角 γ_i は、次のように地震被害危険度 K_{bi} に地盤面での地震動最大加速度 a (Gal : cm/s^2) と効率 e を乗じて概略推定することができる⁹⁾。

$$\gamma_i = e \times K_{bi} \times a \quad (1)$$

ここに、 $K_{bi} = \Delta A_i / (2\pi F)^2 / h_i \times 10000$

ΔA_i : i 階での同倍率の増分

F : 固有振動数 (Hz)

h_i : i 階の層高さ (m)

ここでは、次のようにして各建物の平均的な K_{bi} 値である ${}_avK_b$ 値を算定して、検討を進める。

$${}_avK_b = A / (2\pi F)^2 / H \times 10000$$

ここに、 A : 最上階の増幅倍率

H : 建物の最上階床面までの高さ (m)

なお、(1)式の K_{bi} に ${}_avK_b$ を代入すると、平均的な層間変形角 γ_{av} が算定される。

5. 測定分析結果

コジャエリ地震によるイスタンブール市内の水平最大加速度は YPK (岩盤) で 41Gal であった。

図-5 によると、スレイマニエやシェザーデに見られる最も低い振動数での変動を除けば、地震の前後で伝達スペクトルの形状はあまり変化しない。スレイマニエの 0.8Hz 前後の振動数は地震前には DM (ドーム回廊部分) で顕著であったが、地震後はなくなっている。また、シェザーデの 1.2Hz 前後の振動数は地震の前後でかなり大きさが異なっている。これらの振動数はミナーレの振動数と一致している。また、DM でしか顕著に認められないことから、この振動はミナーレの振動が伝わってきたもので、地盤から伝わってきた振動が各層で増幅されたものではないと推定できる。風などの影響で大きな振動がミナーレに生じ、これがドーム部分に伝達されたものではないかと思われる。

ミナーレの振動の影響を受けていると判断される振動を除いて、各建物の基本固有振動数を最上階の伝達スペクトルから各方向別振動および捻れ振動について

読みとった。これを地震前後で比較したものが表-2 である。これには最上階での増幅倍率も示している。

解析上、振動数は $\Delta F = 0.025\text{Hz}$ ($=1/40.96$) を最小単位として与えられる。振動数変化の読みとりはピーク前後の 4 点のデータを使ってピーク位置を推定して読みとっている。

シェザーデの NT ミナーレにはかなり顕著な振動数変化が認められ、地震による損傷が相対的に ST より大きかったことを示している。

スレイマニエの WHT ミナーレでは屋根などの付帯設備が図-1 に示すように損傷している。すなわち、円錐状の屋根の西側下部が座屈し、塔頂の尖頭装飾物が東側に屈曲している。損傷した WHT ミナーレは振動数変化がより大きい方のミナーレである。

振動数変化率は建物の損傷程度を表していると考えられる。図-6 は、 ${}_avK_b$ 値と振動数変化率の関係を図示したものである。これによれば、概ね大きい ${}_avK_b$ 値は大きな損傷に対応している。

6. まとめ

先のコジャエリ地震では、イスタンブール市内は比較的堅固な地盤で記録された地震動も相対的に小さいものであったが、偶然地震前に測定していた建物について地震前後の固有振動数の変化を計測することができた。その結果、1500 年を経過したアヤソフィアで最大 8.9%、500 年を経過したスレイマニエで最大約 2.8%、シェザーデで最大 4.8%、竣功したばかりのオフィスビル、レVENTプラザで最大約 8.5%の振動数変化が認められた。振動数変化が小さいほど影響は小さいと言える。これらの構造物はコジャエリ地震により 16%~7%の剛性低下を来しているものと推測される。振動数変化は地震被災危険度指標とよく対応しており、提案指標の妥当性も確認されている。

歴史的建物については、今後定期的に調査して状態を把握しながら的確な保全策を講じていく資料としていくことを推奨したい。

謝辞：アヤソフィアなどの歴史的構造物の計測に便宜を図っていただいたボアジチ大学の Mustafa Erdik 教授、しゅん工直後のレVENTプラザの計測に便宜を図っていただいたイスタンブール工科大学のカラドアン教授、そのほか計測にご協力いただいた多くの方々へ深甚の謝意を表します。測定を手伝っていただいた (株) SDR の E. Dilek Gurler 博士と、データの解析や整理を手伝っていただいた (株) SDR の中山沢子女史に感謝します。

参考文献

- 1) J. L. Beck, B. S. May, and D. C. Polidori (1994). DETERMINATION OF MODAL PARAMETERS FROM AMBIENT VIBRATION DATA FOR STRUCTURAL HEALTH MORITORING, Proc. First World Conference on

Structural Control, Pasadena, August 1994.

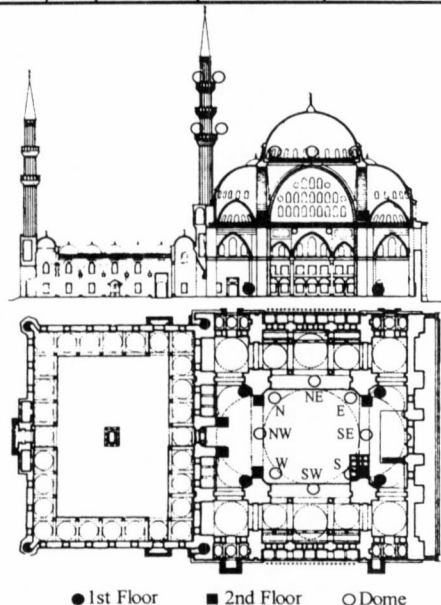
- 2) Cakmak, A. S., A. Moropoulou and C. L. Mullen (1995). Interdisciplinary study of dynamic behavior and earthquake response of Hagia Sophia, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 14, 125-133.
- 3) Drukal, E., A. Cakmak, O. Yuzugullu and M. Erdik (1994). Assesment of the earthquake performance of Hagia Sophia Comparison of system identification

techniques: a case study for Hagia Sophia,

- 4) Nakamura, Y. (1997). Seismic vulnerability indices for ground and structures using Microtremor, World Congress on Railway Research, Florence, November 1997.
- 5) Nakamura, Y., E. D. Gurler, J. Saita, A. Rovelli and S. Donati (2000). Vulnerability investigation of roman colosseum using microtremor, 12th WCEE, New Zealand.

表-1 1999年コジャエリ地震の前後で微動を計測した建物の諸元ほか

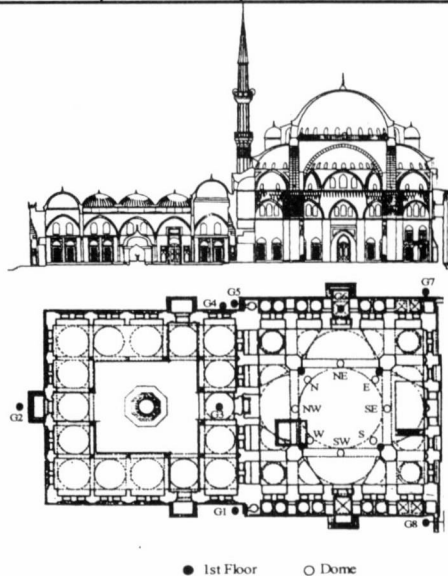
名称	高さ	平面概寸	主ドーム直径	構造	竣工	地震前測定	地震後測定	測定階層
スレイマニエ寺院	53m	68m×63m	27m	石造	1550年	1998年 10月	1999年 09月	1F, 2F, DM
アヤソフィア博物館	56m	80m×30m	31m	石造+レンガ造	512年	1999年 06月	1999年 09月	1F, 2F, 3F, DM
シェザーデ寺院	37m	50m×43m	18m	石造	1543年	1999年 06月	1999年 09月	1F, DM
レベントプラザ	52m	57m×16m	—	RC構造14F+5BF	1999年夏	1999年 06月	1999年 09月	1F, 2F, 5F, 8F, 11F, 14F



● 1st Floor ■ 2nd Floor ○ Dome



図-1 スレイマニエ寺院



● 1st Floor ○ Dome



図-3 シェザーデ寺院

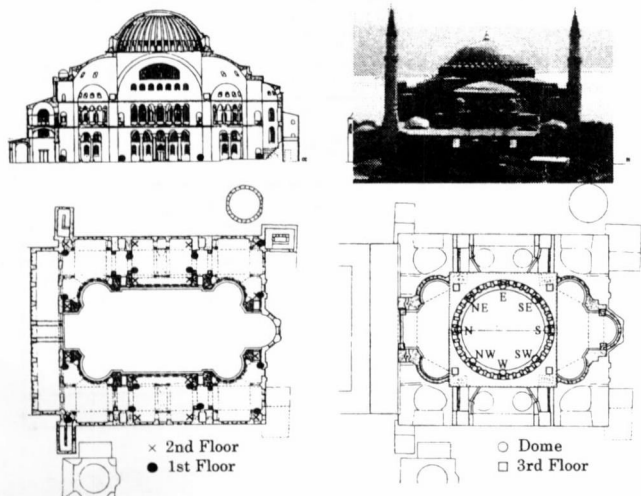


図-2 アヤソフィア博物館 (Hagia Sophia Museum)

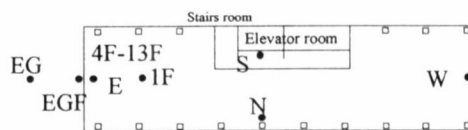


図-4 レベントプラザ (地下5階地上14階)

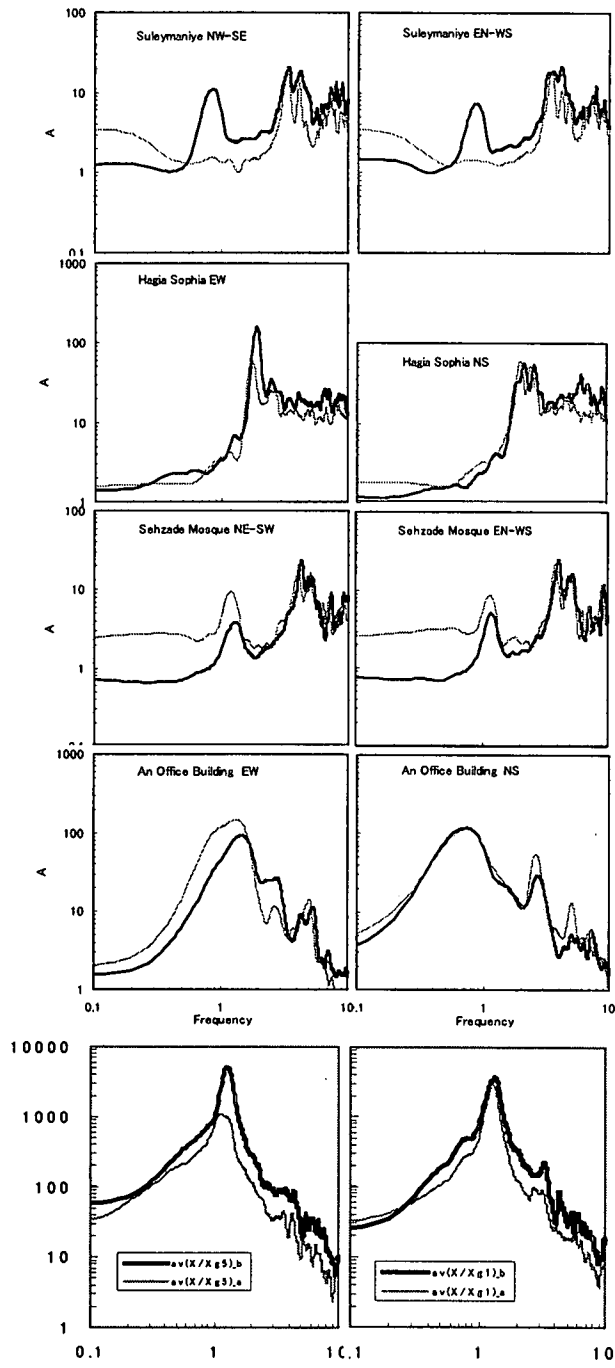


図-5 各建物の最上階伝達スペクトル

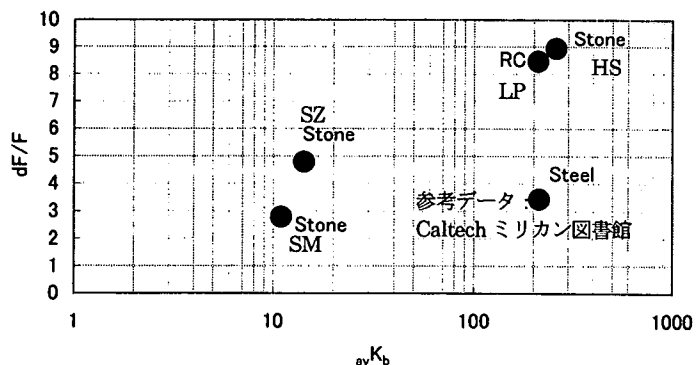


図-6 固有振動数の変化と震災危険度指標の関係

表-2 地震前後の固有振動数変化そのほか

(a)

Suleymaniye	$\omega_n K_b (10^3)$	11.0	11.4	
Main body		Before	After	dF/F (%)
NW-SE	F(Hz)	3.43	3.36	2.21
	A	20.5	20.2	
EN-WS	F(Hz)	3.55	3.46	2.78
	A	18.6	17.5	
Torsion	F(Hz)	6.69	6.45	3.59
WHT		Before	After	dF/F (%)
NW-SE	F(Hz)	0.843	0.819	2.86
EN-WS	F(Hz)	0.867	0.842	2.79
Torsion	F(Hz)	9.69	9.59	1.03
EWI		Before	After	dF/F (%)
NW-SE	F(Hz)	0.842	0.842	-0.01
EN-WS	F(Hz)	0.842	0.842	0.08
Torsion	F(Hz)	9.36	9.33	0.32

(b)

Hagia Sophia	$\omega_n K_b (10^3)$	261	122	
Main body		Before	After	dF/F (%)
EW	F(Hz)	1.92	1.75	8.92
	A	156	60.5	
NS	F(Hz)	2.16	2.01	6.82
	A	54.6	59.6	
Torsion	F(Hz)	3.32	3.10	6.63

(c)

Sehzade	$\omega_n K_b (10^3)$	14.3	14.0	
Main body		Before	After	dF/F (%)
NE-SW	F(Hz)	4.26	4.07	4.56
	A	23.0	20.2	
ES-WN	F(Hz)	4.06	3.87	4.78
	A	24.3	21.5	
Torsion	F(Hz)	5.25	5.00	4.76
ST		Before	After	dF/F (%)
NE-SW	F(Hz)	1.33	1.31	1.97
ES-WN	F(Hz)	1.13	1.14	-0.12
Torsion	F(Hz)	11.8	11.6	1.69
NT		Before	After	dF/F (%)
NE-SW	F(Hz)	1.27	1.12	11.5
ES-WN	F(Hz)	1.15	1.10	4.26
Torsion	F(Hz)	11.4	11.0	3.51

(d)

An Office BLDG	$\omega_n K_b (10^3)$	211	405	
Main body		Before	After	dF/F (%)
NS	F(Hz)	0.720	0.745	-3.38
	A	118	114	
EW	F(Hz)	1.45	1.33	8.45
	A	91.60	147	
Torsion	F(Hz)	0.974	0.952	2.28