# 常時微動を用いたローマ・コロッセオの地震動特性の予備的調査
# Seismic Response of Roman Colosseum and its Foundation by using Micro-tremor Measurements

中村　豊[1)]、齋田　淳[2)]、アントニオ　ロベーリ[3)]、ステファノ　ドナティ[4)]
Yutaka NAKAMURA[1)], Jun SAITA[2)], Antonio ROVELLI[3)], Stefano DONATI[4)]

1)株式会社システムアンドデータリサーチ(SDR)　所長　工博
President, System and Data Research Co., Ltd., Dr. Eng.
2)株式会社システムアンドデータリサーチ(SDR)　研究員
Research Engineer, System and Data Research Co., Ltd.
3)Professor, Instituo Nazionale di Geofisica, Ph. Dr., Italy
4)P. D., Instituo Nazionale di Geofisica, Ph. Dr., Italy

**要　約**

イタリアは古代遺跡が豊富であるが、多くの地震に見舞われてきた。イタリアの歴史的構造物の被害状況や耐震性を調査研究することにより、地震防災の新しい知見や歴史遺産の適切な保存方法を見い出すことができると期待される。調査研究の第一歩として、ローマの象徴的歴史建造物コロッセオを採り上げる。ここでは、コロッセオの概要を述べるとともに、その地震応答特性を常時微動を用いて予備的に調査した結果を述べる。コロッセオ本体について、地下階、１階および2階部分で常時微動を測定した。その結果、基礎地盤には特に顕著な卓越振動数は認められなかったが、今後さらに周辺部まで測定範囲を広げて検討する必要がある。コロッセオの振動特性は、ほぼ全周が残っている内側構造物と約半分が崩壊した外側構造物とに分けられる。それぞれの固有一次振動数（倍率）は、約1.5Hz（3倍）および3Hz強（10倍）であった。あたらしい耐震性評価指標として、微動測定結果から容易に算定できる許容最大加速度を提案したが、1349年の地震で外側構造物が破壊されたと考えても矛盾しない結果が得られた。

**SUMMARY**

Italy has many ancient structures together with many destructive earthquakes in its history. Structural damage caused by previous earthquakes on historical buildings together with their resistance against earthquakes are investigated and new concept for the earthquake hazard mitigation is suggested in this study. For this purpose, Colosseum which is the most imposing of all the monuments in ancient Rome is selected as a first step of the research. Microtremor measurements were performed on Colosseum's basement, ground floor and the first floor. Analysis of this measurement resulted that dynamic characteristics of Colosseum consists of two parts which can be named as inner and outer wall. Predominant frequency and amplification factor of outer part are 1.5 Hz and 3, respectively. And the inner part has a value of 3Hz for the predominant frequency and 10 for amplification factor. According to this results, acceptable maximum acceleration is proposed as new index of earthquake resistance. The reliability of this index is checked with the damage on outer structure caused by the 1349 Appennino Centrale Earthquake.

## １．はじめに

遺跡も含めて歴史的構造物は数多く存在する。我が国にも千数百年の歴史を持つ建造物群がある。しかしながら、こうした歴史的構造物がいわゆる地震多発帯に位置している場所も少なくない。歴史的構造物の耐震性を的確に把握することは、歴史的構造物の地震被害を考察する上で重要であり、翻って現代都市の耐震化にも有益な示唆が得られるものと期待される。また、歴史的な構造物は後世に伝えるべき貴重なものであるが、その耐震性の的確な把握は、これに対する適切な補修・補強処理方

法を検討する基礎となり、歴史的構造物を末永く後世に伝えるためにも重要である。こうした貴重な歴史的構造物にわずかな損傷も与えることなく、その耐震性を把握する手段として、常時微動が有効と考えられる。

ここでは、常時微動を用いて歴史的構造物の耐震性を把握する研究の端緒として、予備的な計測を実施したので報告する。対象構造物はローマの象徴的な歴史的構造物コロッセオである。イタリアは古代都市文明の中心のひとつであるとともに、我が国と同じ地震・火山の国に属しており、コロッセオをはじめとする歴史的構造物はこれまでいくつかの地震に遭遇してきていると思われる。

## ２．コロッセオの概要

ローマ皇帝ネロ帝の後を受けた皇帝ウェスパシアヌス帝（在位西暦 69 年～79 年）は、前皇帝ネロ帝の悪夢を拭い去るために、ネロによって建造された黄金宮殿 Domus Aurea を完全に破壊し、人工池を埋め立てた跡に、民衆の憩いのモニュメントとしての「Flavian 円形闘技場」建設を決定した。この円形闘技場は、西暦 75 年に起工され、息子の皇帝ティトス帝（在位西暦 79 年～81）の時代の西暦 80 年に完成した。この円形闘技場は中世以後コロッセオ（Colosseo）と呼ばれているが、その名前は近くに立っていた巨大立像（colossal statue）に由来する。

Photo-1. Aerial picture of the Roman Colosseum.
The southern part of the outer wall is missing.

いくつかある古代の円形闘技場の中でもローマのコロッセオは最大で、周囲 526m、長径 188m、短径 156m、地表面からの高さは約 50m である（Photo-1）。観客の収容人員は 3 万 5 千人～7 万人であったといわれている。闘技の舞台であるアリーナ部分は 76m×46m あり、かっては、板張りの上に砂が敷き詰められ、剣闘士同士の闘技、猛獣と剣闘士の闘技など種々の闘技が行われていた。板張りの下には、これを支える支持構造物や猛獣の収容施設などが設備されていた。これらの施設は永らく地中に埋没していた。既に掘り出されているが、現在、アリーナの板張りは失われ、支持構造物ほかが損壊・損傷した状態で露出している。最後の闘技記録は西暦 523 年であり、以後の使用記録はない。

コロッセオが現在の廃墟のような形になったのにはいくつかの要因がある。大理石のスタンドなどは、ルネッサンス時代の法王やローマの貴族政治家らにより新しい建造物の資材として持ち去られた。火災、落雷、地盤沈下、地震などの自然災害も変状の大きな要因である。外部壁は南側の 50%が失われているが、それでも、内部壁を含め外側部分の 3/4 はよく保存されている。

ローマの上級元老院議員、ローマ市長官、通常執政官（西暦 508 年）を歴任した貴族 D.M.V. Basilius は私費を使って大地震により損壊したコロッセオを修復したと記された石碑（Photo-2）およびそのコピー（1813 年 8 月 23 日発見）がコロッセオの入り口に展示されている。

Photo-2.　D.M.V. Basilius’s inscription

Figure 1 はコロッセオの横断図ならびにその周辺の地質平面図を示したものである。コロッセオの基部には、古代コンクリート製の大きなリング状円盤が据えられている。この円盤は長軸と短軸で区分された４つの部分からなる。円盤の上には、筒状の４層からなる外側構造物と２層からなる内側構造物が建設されている。外側は、全周 80 本の柱の間を３層のアーチで連結した高さ約 50m の筒状の壁構造物、内側は同じく 80 本の柱の間を２層のアーチで連結した高さ約 30m の筒状の壁構造物である。使用石材（石灰華：トラバーチン）は 100,000m$^3$ を越え、合計で 300ton 以上になる金属材で接合されている。

コロッセオ全体としては、北側は比較的堅固な洪積地盤に支持され、中央部から南側にかけては河川跡の堆積地盤（沖積地盤）となっている。現在、外側筒状壁構造物は堅固な地盤上のみを残して約 50%が失われているが、内側の筒状壁構造物は概ね残存している（Photo-1 参照）。

コロッセオに影響を与えた地震としては、碑文にある地震（西暦 508 年）のほか、西暦 801 年および西暦 1349 年の中央アペニン地方の地震,、1703 年のアクィラ地方の地震などが考えられる。これらの地震の規模は M7 またはそれ以上であり、ローマから震源までの距離は 100km 程

度と推測されている。ローマでの震度は 1349 年の地震が MM 震度階で最大 VIII（対応する加速度レンジは最大で 350Gal、平均で 172Gal 程度）、その他は最大 VII と推定されている。

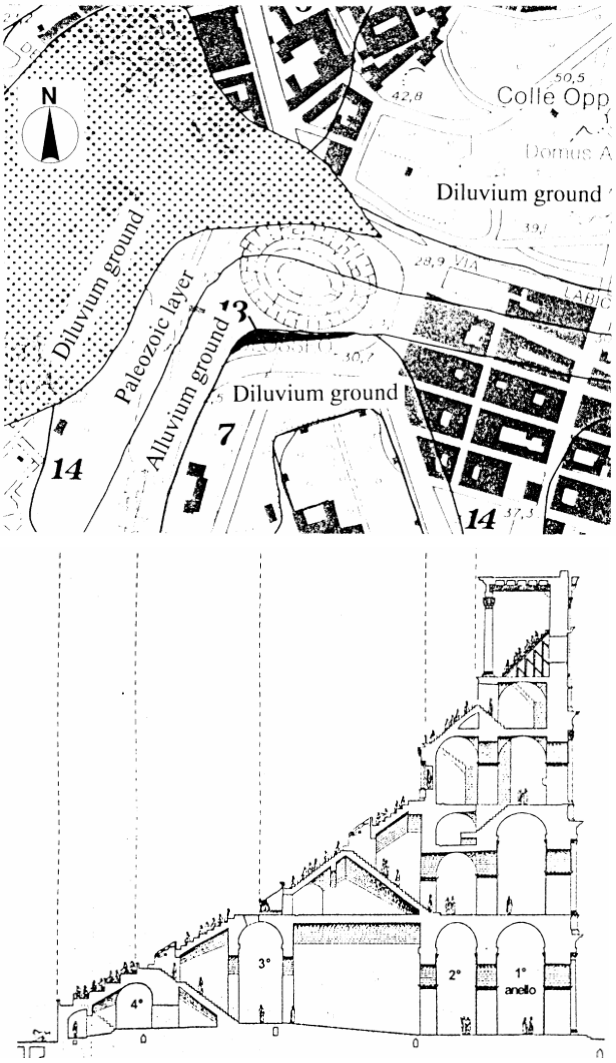


Figure 1　Cross Section of Colosseum and Geological Map around Colosseum

## ３．測定地点と測定状況

Figure 2 に測点の配置図を示す。南北断面の地層構造模式図[1)] を Figure 3 に示す。地質平面図によれば、コロッセオ北側は堅固な古生層にのっているように見えるが、Figure 3 では Vs=400m/s 程度の洪積層を想定している。

常時微動の測定はコロッセオの地下階、１階および 2 階にて行った。3 階～5 階については次の機会に測定したい。地下階では、合計 7 ヶ所を計測したが、内 1 ヶ所（B2）は露地地盤上、あとは長軸短軸とアリーナ外周の交点付近に設定した。１階の測点は、２ヶ所の出入り口付近に設定した。2 階の測点は、内外の筒壁状構造物の振動特性を併せて把握すべく、両者の接合ライン付近に計 3 ヶ所設定したほか、内側筒壁状構造物の外周付近で２ヶ所設定した。いずれも長軸または短軸と交差する地点付近である。今回の予備測定の測点総数は 14 地点であった。

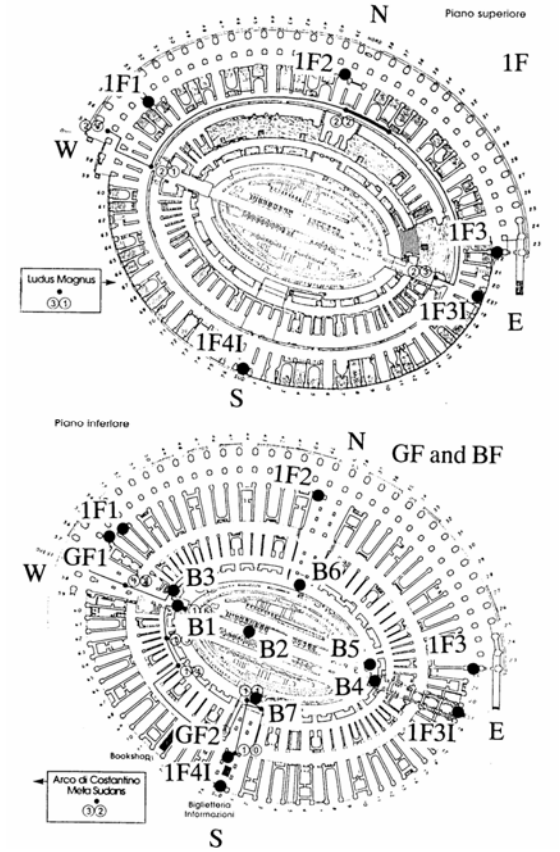


Figure 2　Measurement Points

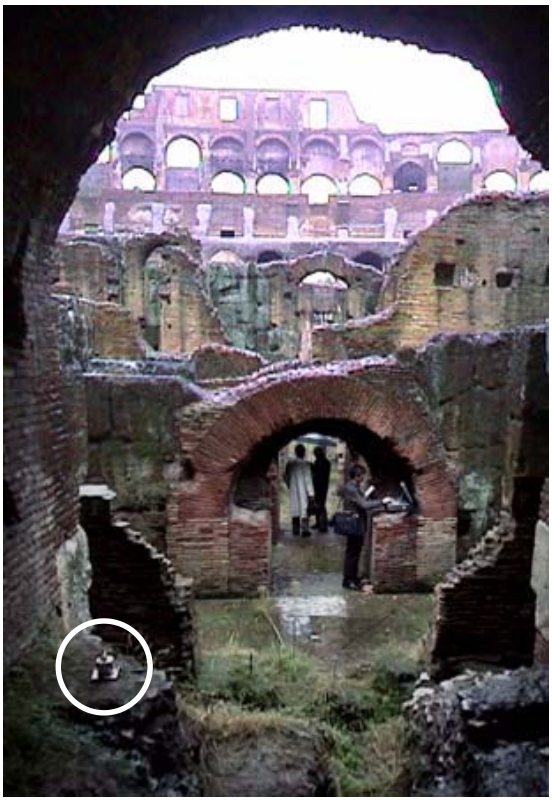

Photo-3　Measurement Condition at B6

各測点では、（株）SDR 製の PIC91 を使用して、３方向成分の常時微動を同時に測定した。測定方向は、コロッセオの中心方向を X 方向、円周方向を Y 方向、上下方向を Z 方向とした。各測点は、1997 年 11 月 22 日午前 10 時から 2 時間半かけて降りしきる雨の中で個別に測定されている。Photo-3 は B6 地点からみた測定風景である。左手前にみえるのが円筒型の 3 成分センサーである。

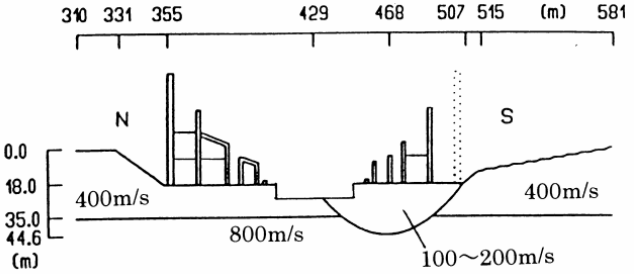


Figure 3　Local Geological Conditions in the north-south direction

## ４．分析方法と分析結果

### （１）分析方法

すべての測定点で、水平動スペクトルを上下動スペクトルで除したスペクトル比[2)] QTS を算定した。中村[2)] によれば、地表面上の QTS は、ほぼ表層地盤の伝達特性を近似し、構造物上の QTS は表層地盤と構造物の伝達特性を併せ持ったような特性を示す。

構造物２階の測点のフーリエスペクトルを、当該測点に対応する地下の測点のフーリエスペクトルで除したスペクトル比で、２階測点での応答特性を推定した。それぞれの測定は同時には行われていない。

ここでは、地盤の QTS ならびに水平方向を中心に B6 を基準にした地下各測点のスペクトル比および構造物上下のスペクトル比を用いて議論を進める。このときの方向は X=EW、Y=NS に統一している。

### （２）地下階と１階の分析結果

Figure 2 に示すように、地下測点は B2 を除いて構造物基礎の上に置かれている。地質図と対比すると、B6 がもっとも堅固な地盤（洪積地盤～古生層地盤）であり、B6 以外の地点は概ね沖積地盤に位置すると思われる。

Figure 4 に示すように各測点の QTS は、B6 も含めて概ね同一で大きな差はない。地下階各測点の QTS の形状は次の通り。1Hz 程度まで概ね 1～2 倍で推移し、1Hz～2Hz で 1～2 倍程度のピークを示した後、数 10Hz まで 1 倍以下の幅の広いトラフが続く。ただし、B2 のみには、前述の形状に加えて 10Hz 前後に低いが幅広いピークが出現する。１階測点でも地下測点と同様な傾向を示す。

大きなトラフは Rayleigh 波の影響を示唆しており、地下測点の QTS はコロッセオの周囲を巡る道路交通振動の影響を強く受けている可能性がある。

次に、一番堅固と考えられる B6 を基準にした各測点のスペクトル比を算定した結果について述べる。Figure 5 が B6 基準の各測点のスペクトル比である。これによると、B1、B4 および B5 は表示した周波数範囲で、B6 とほぼ同じ特性を示している。また、10Hz 以下に限ると、B2 を除く、地下および１階のすべての測点がほぼ同一の応答を示している。

B2 のスペクトル比によると、卓越振動数は 7Hz～10Hz で増幅倍率は 4～5 倍と推定される。基盤の Vs を 800m/s と仮定して、表層地盤の Vs および B2 測点での層厚を推定すると、それぞれ、160m/s～200m/s、5m 程度となる。

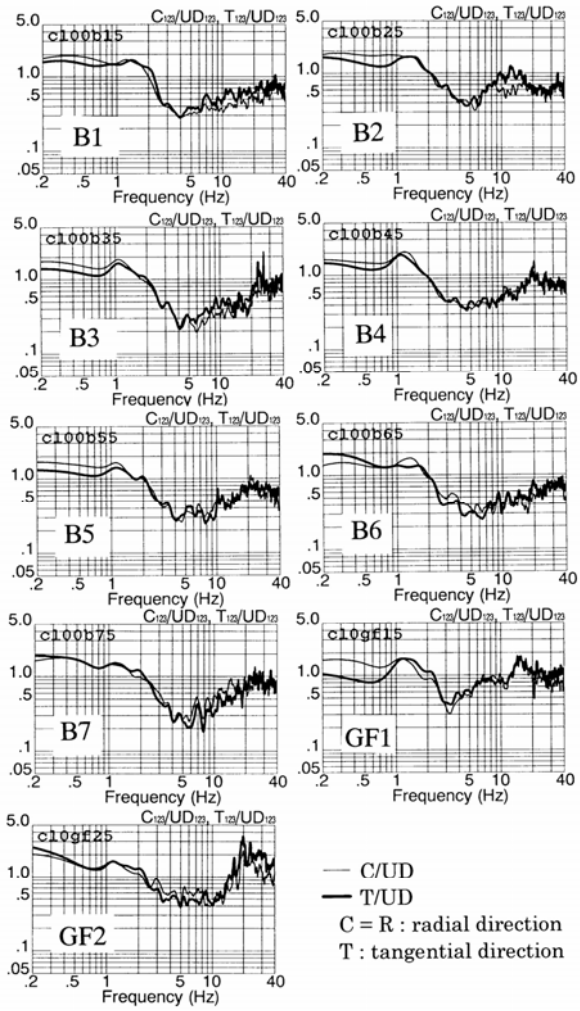


Figure 4　QTS of Basement and Ground Floor

### （３）２階の分析結果

２階測点は大まかな振動特性を把握するため、外側構造物が残っている部分で３箇所、内側構造物しか残っていない部分で２箇所測定した。測点分布は Figure 2 に示すとおりである。B6 を基準にして算定したスペクトル比を元に検討する。

Figure 6 が各測点のスペクトル比である。これをみると、EW 方向、NS 方向の伝達特性が各測点で異なっていることがわかる。スペクトル比の形状をみると、1F1、1F3 および 1F3I の EW 方向（または NS 方向）と、1F2 および 1F4I の NS 方向（または EW 方向）がそれぞれ類似してい

ることがわかる。これは、振動形態がコロッセオの中心軸方向と円周方向とで異なっていることを示しており、一般に中心軸方向に揺れやすくなっている。中心軸方向はいくつかの卓越振動数が認められ、円周方向はピークは少ないが幅広いスペクトル形状を示している。

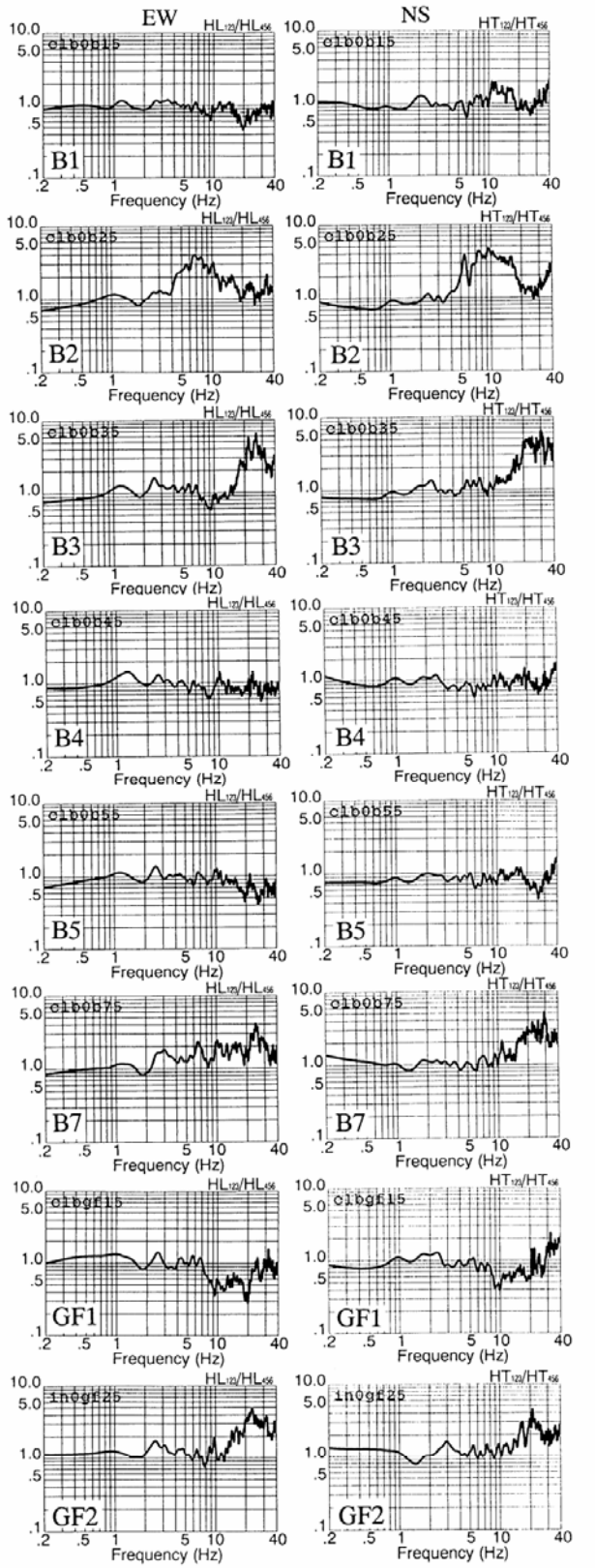


Figure 5　Spectral Ratio standardized by B6

中心軸方向の振動を見ると、1Hz～2Hz、3Hz 前後、5Hz 前後および 8Hz 前後が卓越している。このうち、1Hz～2Hz の振動は外側構造物が残っている部分でのみ観測され、外側構造物の一次固有振動数に対応しているものと推測される。3Hz 弱の振動は外側構造物が残っている部分で観測され、3Hz 強の振動はそれ以外の部分で観測される。したがって、3Hz 強の振動は内側構造物の一次固有振動数に対応しているものと推測される。同様にして、5Hz 弱は外側構造物、5Hz 強は内側構造物に対応しているものと推測される。

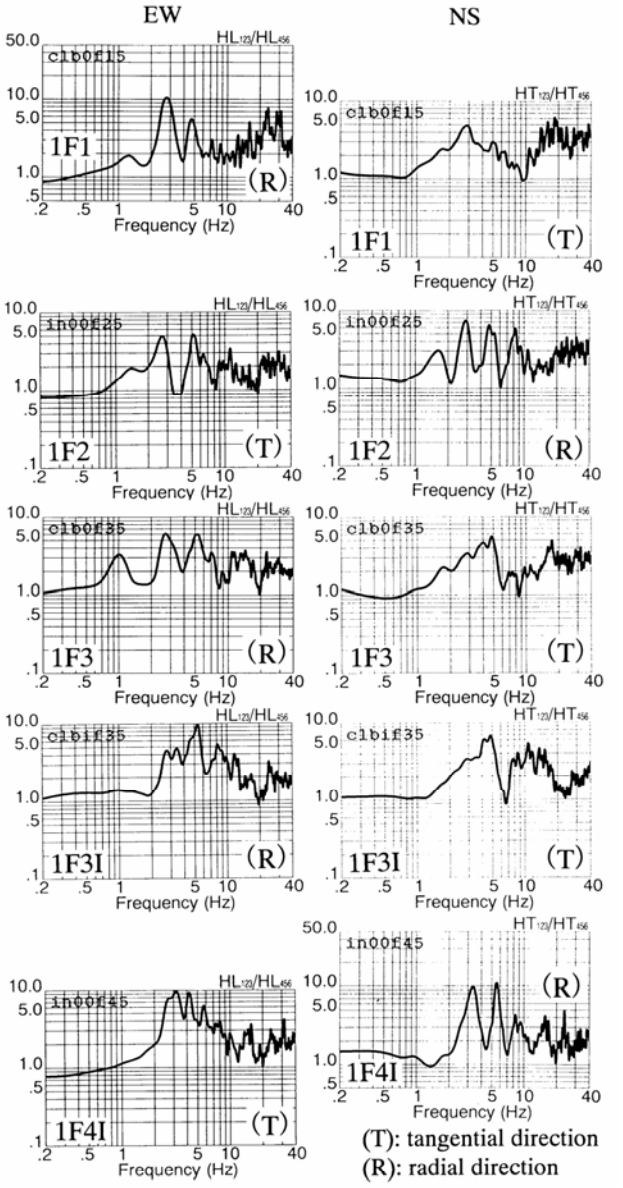


Figure 6　Spectral Ratio of First Floor standardized by B6

円周方向の振動をみると、1F3 および 1F3I 以外は 3Hz 前後が卓越している。1F3 は残存外側構造物の東端部であり、Figure 1 に見られるように円周に沿って置かれた大きな三角定規様の剛構造物で補強されているところである。このため、この部分の円周方向の卓越振動数は 5Hz とほかの部分より高く、円周方向の剛性が高くなっているこ

とを示唆している。ただし、1F3 の中心軸方向卓越振動数は 1Hz まで低下しており、この補強は中心軸方向には抵抗として作用せず、大きな質量として作用していることを示している。

### （４）耐震性の考察－許容最大加速度指標の提案－

ここでは計測された固有振動数 F と増幅倍率 A とから、対象構造物の地震時の変形量δを概算し、許容最大加速度 $\alpha_a$ がどの位になるか検討する。

計測地点(2 階)の地震時の変形量δは、増幅倍率 A の基準となる地点の地震動加速度αと固有振動数 F を用いて、次のように見積もることができる。

$$\delta = A\alpha/\omega^2$$

1 階の柱高を H とすると、1 階部分の層変形角γは次のようになる。

$$\gamma = \delta/H = A\alpha/\omega^2/H$$

層変形角が一定の基準を越えると崩壊する。ここでは、

$$\gamma > \gamma_r$$

を危険と考え、こうなるまでの地震動加速度を許容最大加速度$\alpha_a$と呼ぶことにする。 $\alpha_a$は次式で定義される。

$$\alpha_a = 4\pi^2F^2H\,\gamma_r/A$$

コロッセオの外側構造物の一次固有振動数を 1F2 の測定結果から 1.66Hz とし、倍率を 3 倍とする。文献 5)によれば、RC 造建物の破壊部材角（層変形角）として、1/500～1/150 を想定している。コロッセオはブロックを積み重ねた状態の柱であり、限界の層変形角として、やや大きめの値 $\gamma_r = 1/200$ を採用する。柱高さは概ね 9m であるから、外側構造物の許容最大加速度は約 163Gal となる。

内側構造物の固有振動数は約 3Hz でむき出し部分の倍率は約 10 倍、外側構造物に保護された部分の倍率は約 7 倍であるから、その許容最大加速度は前者で 160Gal、後者で 224Gal と推測される。

三角定規様の補強部分については、弱軸方向である中心軸方向の振動特性が 1.0Hz、3.2 倍と推定されており、許容最大加速度は 56Gal と小さな値が予測される。

1349 年の地震によるローマの最大 MM 震度階は VIII と予測されており[3]、その平均加速度は 172Gal である[4]。すでにコロッセオはこの頃までにかなりの損傷を受けており、その耐震性や振動特性が現在より著しく高かったとは考えられない。当時と現在とで耐震性に大きな差違がなかったとすれば、この時の地震でコロッセオの外側構造物のみが破壊されたと考えてもおかしくはない。しかし、南側の外側構造物が破壊された理由は、今回の常時微動測定結果だけでは明らかではなく、周辺地盤のより詳細な微動特性調査を進める必要がある。

現在のコロッセオは耐震性が低下しており、特に外側構造物の東側端部付近は MM 震度階で VII 程度（気象庁震度階で IV の強い方）の地震動で被災する可能性が大きいと推測される。

## ５．測定のまとめと今後の計画

ローマ・コロッセオの耐震性の予備調査として常時微動を測定した。その結果は次のようにまとめられる。

１）少なくとも計測した範囲内では、基礎地盤には場所による大きな振動特性の差は認められず、特に大きく増幅される現象はみられなかった。

２）コロッセオの構造体としての振動特性は、大きく二つに分けられる。すなわち、現在 50%が残存している外側筒壁状構造物とほぼ全部が残っている内側筒壁状構造物である。その一次固有振動数（増幅倍率）は前者で 1.5Hz 前後（3 倍）、後者で 3Hz 強（10 倍）である。前者の東側端部の補強部分は 1Hz（3 倍）と特に低い振動数となっている。

３）測定結果に基づいて簡便な方法で耐震性を検討したところ、コロッセオに影響を与えたと考えられる 1349 年の地震により外側構造物が損傷したと考えても矛盾しない結果が得られた。

本論文での検討結果は、あくまでも予備的な測定結果に基づく概略の結果である。南側の外側構造物が破壊された理由などを微動特性の面から探るためには、地盤特性についてはより広い範囲で測定調査を実施して周辺地盤の地震動特性を的確に把握しておく必要がある。さらに、構造物に関しても、今後より詳細な測定調査を行って、耐震性検討の信頼性を向上させる所存である。

参考文献

１）Peter Moczo, Antonio Rovelli, Peter Labak and Luca Malagnini: Seismic response of the geologic structure underlying the Roman Colosseum and a 2-D resonance of a sediment valley, ANNALI DI GEOFISICA, VOL.XXXVIII, N.5-6, Nov.-Dec. 1995.

２）Yutaka NAKAMURA: A method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface, QR of RTRI, Vol.30, No.1, Feb. 1989.

３）Memorie Descrittive Della Carta Geofisica D'Italia-Vol.L: LA GEOLOGIA DI ROMA, 1995.

４）Kiyoshi KANAI: Engineering Seismology, p.24, University of Tokyo Press, 1983.

５）建設省住宅局建築指導課監修：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説、財団法人日本建築防災協会