



## コロッセオ(ローマ)のコモド通路における 常時微動を用いた CERS 法による波動伝播速度他の測定

中村 豊<sup>1)</sup>、齋田 淳<sup>2)</sup>、佐藤 勉<sup>3)</sup>

1) 正会員 (株)システムアンドデータリサーチ、代表 工学博士  
e-mail : yutaka@sdr.co.jp

2) 正会員 (株)システムアンドデータリサーチ、主任研究員  
e-mail : jun@sdr.co.jp

3) 正会員 (株)システムアンドデータリサーチ、主任研究員 修士 (工学)  
e-mail : tsato@sdr.co.jp

### 要 約

コロッセオの基礎は厚さ12mの直接基礎で上下二層構造(層厚各6m)になっており、コモド通路はコロッセオ完成後に上部基礎に穿たれた皇帝専用通路である。通路は古代コンクリートでできた基礎の物性を研究する絶好のサイトになっている。ここでは、コモド通路上の約10m離れた2点の常時微動を次々に同時計測して、CERS法により通路に沿う弾性波動の伝播速度を計測したので報告する。反射法や地中レーダーなどを用いた調査結果と比較して、整合性のある結果が得られており、基礎物性に関して新たな知見を加えるとともにCERS法の有効性が確認できた。

キーワード: CERS法、波動伝播速度、コロッセオ基礎、常時微動

### 1. はじめに

西暦72年から80年につくられたコロッセオの基礎は、厚さ12mの直接基礎で上下二層構造(層厚各6m)になっている。コモド通路(Commodus Passage)は皇帝住居とコロッセオの間の専用通路として、ドミティアヌス皇帝の治世(81年から96年)に上部基礎を長さ60mほど掘削して作られた。この通路はコロッセオの基礎構造を直接的に分析できるため、さまざまな調査が行われてきた(例えば<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>)。ここでは、通路の床面で常時微動を計測してCERS法<sup>1)</sup>を用いて測定した波動伝播速度などについて報告する。

CERS法は、一次元波動場を前提に自由端と反射面間の媒質中の一点との間の波動伝播時間と減衰をリアルタイムに算定できるC法、同じく自由端と反射面間の波動伝播速度と減衰をリアルタイムに算定できるE法、さらに、より一般的に空間的に離れた2点の時間差をリアルタイムに算定することができる相互相関最大原理に基づくR法と単純誤差最小原理に基づくS法の四つの方法の総称で、算定結果を相互に照査することもできる。詳しくは中村(2017)<sup>1)</sup>を参照されたい。

### 2. 伝播速度の推定法

2地点で計測された常時微動について、R法により2点間の時間差をリアルタイムに算定して、これを基に2地点間を伝播する波動の伝播時間を計測する。この時、常時微動の発生源は不明で、2点間の時間差は時々刻々変化することが考えられるので、推定された2点間の相互相関係数が大きくて時間差の絶対値が最大とみなせる値を2点間の伝播時間とした。詳細は分析結果の項で述べる。このほか、水平方向に基礎内を伝播する波動は基礎内を重複反射していると考えられるので、アリーナから基礎外縁に向かう波動場を考えると、図1にあるように、#1を自由端、#2を媒質内の測点と考えることができる。そこで、この二点に対してC法を適用して、この間の波動伝播時間と減衰定数を推定してみた。さらに、このような基礎内を水平に重複反射する波動場だとすれば、基礎内測点でのE法により、基礎内をアリーナ側から外端までの伝播時間や減衰定数も推定できる可能性がある。

### 3. 微動測定と分析結果

#### 3.1 測定地点分布

コモド通路は図1に示すように、コロッセオのアリーナ部分の南側から上部基礎を開削して基礎部分を直線的に通過し、基礎を出るとすぐに東方向に伸びたトンネルに続く。微動計測は、コモド通路入口までのアリーナ外周に沿う部分約10mと入口から基礎端まで約60m、および基礎端から接続トンネル端部まで約10mの約80mをおおよそ10mピッチで行った。測点#0地点から測点#8地点の計9地点を2地点ずつ同時測定した。測定日時は現地時間2017年10月18日（水曜日）の午前中で、測定点の分布と測定状況写真を図2に示す。また、図3は、#1地点から#7地点の概略位置を文献3)の縦断面図に加筆したものである。計測に用いた機器はSDR社製のNewPIC<sup>++</sup>で2地点の3成分波形を正確に同時測定できる機能を持っている（写真1）。常時微動は1/100秒サンプリングで、8通りの組合せ、#0と#1、#2と#1、#2と#3、#4と#3、#4と#5、#6と#5、#6と#7および#8と#7で、各組合せを5分間ずつ記録した。



図1 常時微動の測点位置と周辺状況



写真1 測定状況

#### 3.2 R法による伝播時間測定

図4は、R法による2点間の時間差と相互相関係数の時間変動を、#2と#1の組み合わせ（CMD21と表記）を例示したものである。平均化には指数平滑法を用い、半減期は10秒とした。図4に見られるように、波動の到来方向がさまざまであることに対応して2点間の時間差は大きく変動している。2点間の伝播速度は、波動の到来方向が測線方向と一致する場合のものであり、計測された時間差の最大値または最小値（マイナス）がそれに相当すると考えられる。この時、相互相関係数が大きい時間差を選定することが重要となる。図5は時間差と相互相関係数の関係を例示したもので、#2地点と#1地点の組合せの場合を示

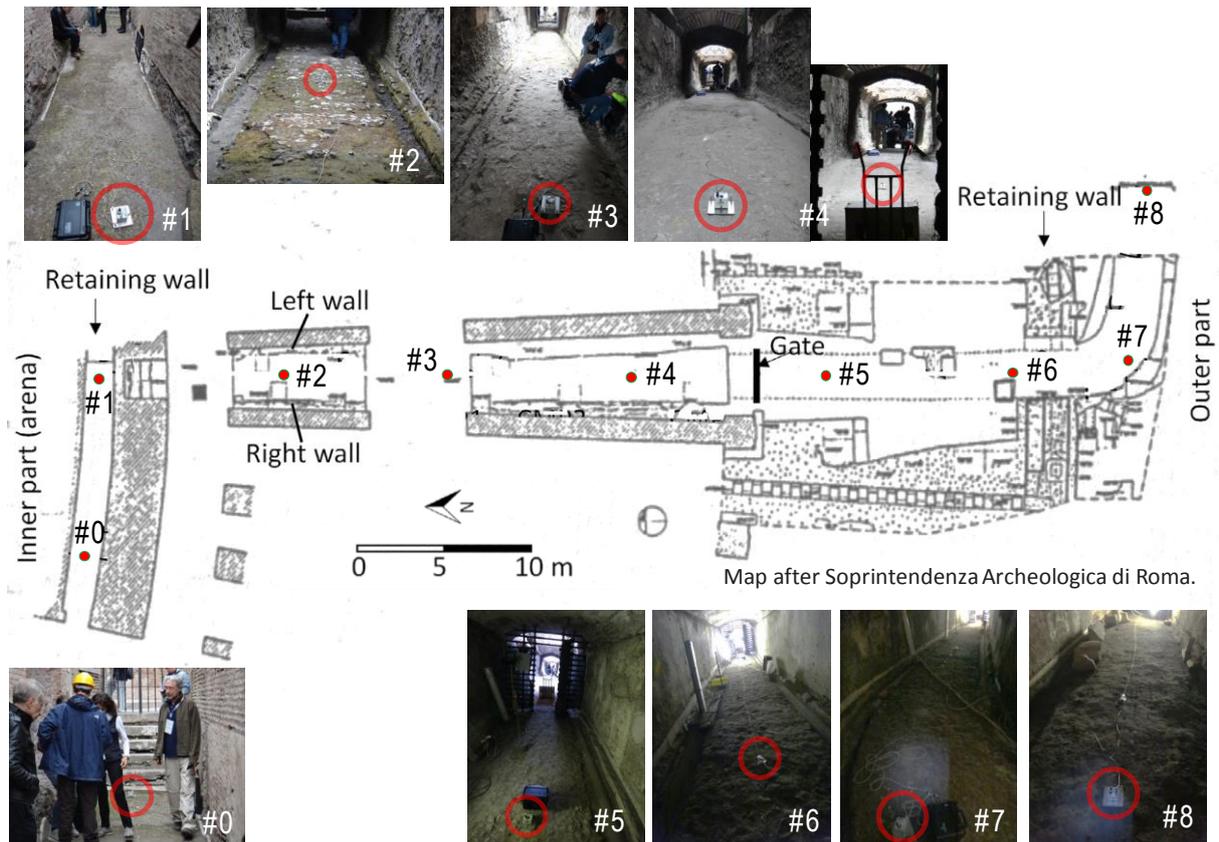


図2 コモド通路の状況と測定地点（文献3）の図に修正加筆）および測点周辺の写真

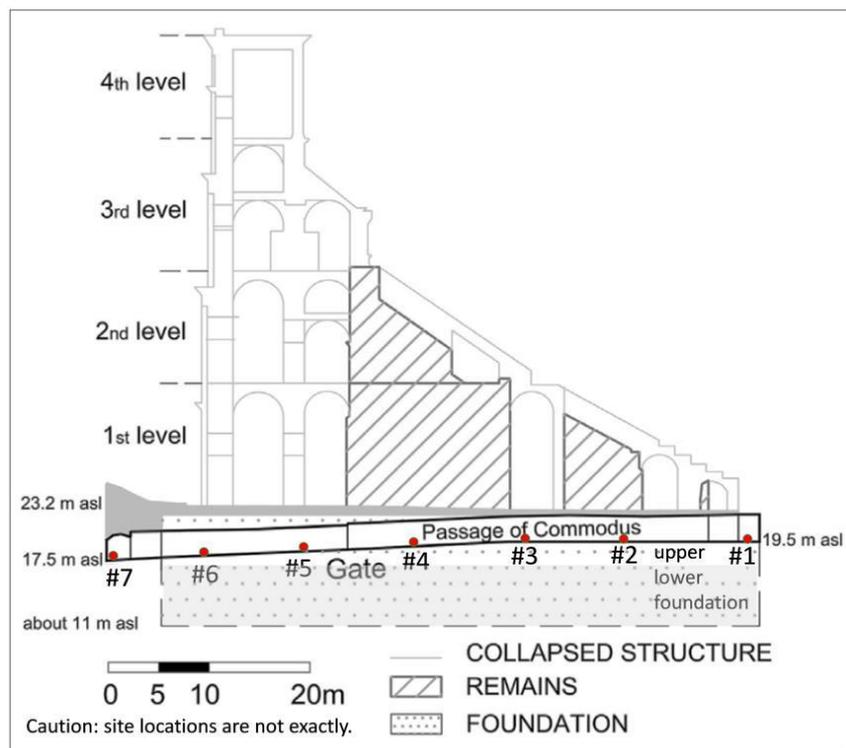


図3 縦断図における#1～#7 測点の概略位置（文献3）の図に加筆）

している。横軸は時間差、縦軸は相互相関係数である。すべての組合せをみると、基礎の外側地盤内の

トンネル部分を除けば、X (T) 方向、Y (R) 方向、Z (V) 方向とも相互相関係数は概ね0.6を超えている。特に、P波に対応するR方向では、相互相関係数が1に近づいている。なお、相互相関係数の計算始めと終わりには過渡的な部分があることを考慮して、計算開始5秒後から計算終了5秒前まで約290秒間の計算結果を用いている。

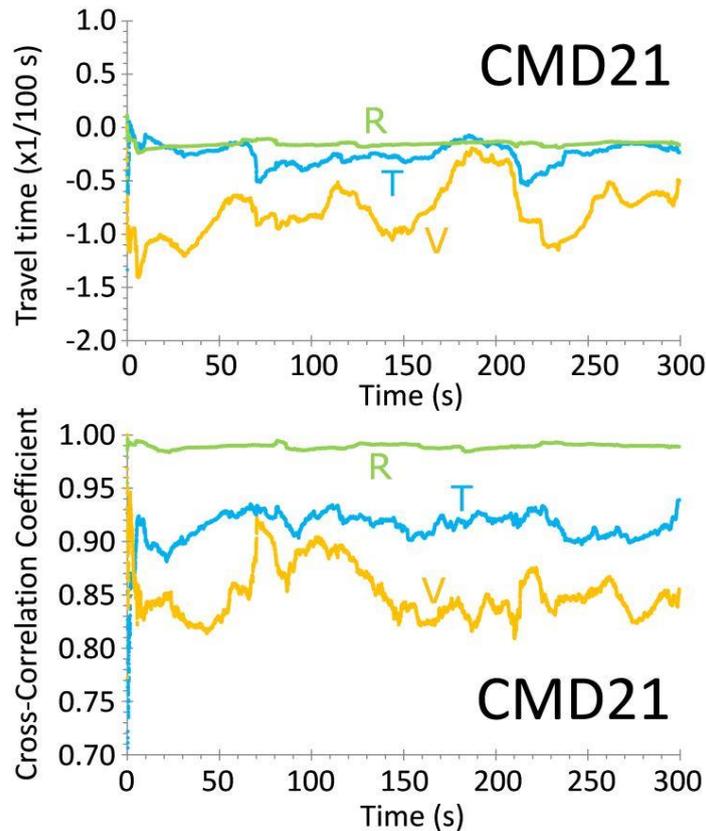


図4 地点#2 と地点#1 の間の伝播時間と相互相関係数

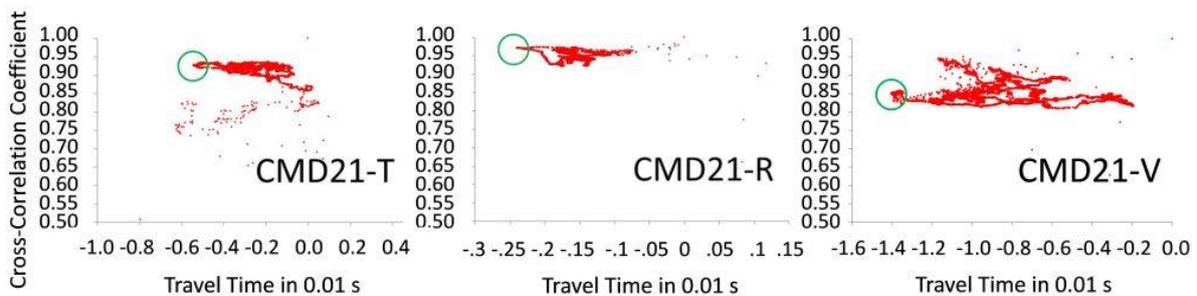


図5 伝播時間と相互相関係数： 最大と最小の伝播時間の読取例（この例では最小）

### 3.3 C法およびE法による伝播時間測定

#1を自由端測点とし#2を媒質内測点として、C法により#1と#2の間の波動伝播時間を測定することができる。さらに各地点の波形を用いてE法により、自由端と反射面間の波動伝播時間を算定できる。後者は、#1から#7までの基礎上7地点において伝播時間を測定でき、各地点での測定値がどのくらい変動するかを確認することで、上部基礎について材質の均質性に関する情報を得ることができると期待される。この時、波動場の状況を考えると、半径方向のR成分のP波のみが安定して存在し得ると推測されるので、R方向成分のみについて検討した。

#### 4. 推定結果と考察

表1は、R法による各方向成分の推定伝播速度を各測定を組み合わせて毎に示したものである。各組合せに対して、各方向成分の推定される最大または最小の伝播時間とその時の相互相関係数を表示している。いずれの組合せでも、V方向はSV波または曲げ波（B）に対応する。水平方向のT方向とR方向については、組合せ#0#1と#8#7では、それぞれP波とSH波に対応し、そのほかの組合せでは、それぞれSH波とP波に対応する。いずれの場合でも、相互相関係数はP波、SH波、SV波またはB波の順に小さくなる。P波では概ね0.9を超えるほど二点の波形の相関性は高い。組合せ#Aと#Bの場合、プラスの時間差は地点Aから地点Bへの伝播を意味し、マイナスの時間差はその逆で、地点Bから地点Aへの伝播であることを意味する。

表1 伝播時間および伝播速度と相互相関係数

Combination of sites	#2 and #1			#2 and #3			#4 and #3			#4 and #5		
	Vsh	Vp	Vsv or Vb	Vsh	Vp	Vsv or Vb	Vsh	Vp	Vsv or Vb	Vsh	Vp	Vsv or Vb
Correlation at Max.	0.9014	0.9902	0.8170	0.7459	0.9224	0.7706	0.9284	0.9463	0.8556	0.8971	0.9824	0.7516
Max. travel time in 0.01s	-0.0643	-0.1042	-0.1927	1.1558	0.7346	1.6596	-0.0270	-0.1397	0.0206	0.3814	0.4158	1.8049
Min. travel time in 0.01s	-0.5418	-0.2406	-1.4053	-0.1575			-0.4676	-0.5940	-0.7319	-0.2133	-0.0398	
Correlation at Min.	-0.9264	0.9941	0.8511	0.7135			0.9178	0.9543	0.9067	0.9315	0.9727	
Distance in m	10.7	10.7	10.7	9.4	9.4	9.4	10.6	10.6	10.6	11.2	11.2	11.2
Component	T	R	V	T	R	V	T	R	V	T	R	V
Max. correlation	0.9264	0.9941	0.8511				0.9178	0.9543	0.9067			
Estimated Velocity in m/s	-1975	-4448	-761				-2267	-1784	-1448			
Estimated Velocity in m/s				813	1280	566				2937	2694	621
Max. correlation				0.7459	0.9224	0.7706				0.8971	0.9824	0.7516

Combination of sites	#6 and #5			#6 and #7			#0 and #1			#8 and #7		
	Vsh	Vp	Vsv or Vb	Vsh	Vp	Vsv or Vb	Vp	Vsh	Vsv or Vb	Vp	Vsh	Vsv or Vb
Correlation at Max.	0.9183	0.9612	0.8540	0.5437	0.7049	0.8632	0.9083	0.9311	0.9005	0.7818	0.6568	
Max. travel time in 0.01s	-0.0801	-0.0707	-0.0420	0.9051	1.5803	1.7998	0.2639	0.3123	0.8335	0.4200	0.6258	
Min. travel time in 0.01s	-0.5783	-0.6617	-0.8434	-0.0532	0.4689		-0.4665	-0.1961	-0.5695	-0.7510		-2.7986
Correlation at Min.	0.8871	0.9467	0.8745	0.7745	0.5752		0.8926	0.9440	0.9236	0.8247		0.6223
Distance in m	10.9	10.9	10.9	7.1	7.1	7.1	10.1	10.1	10.1	11.5	11.5	11.5
Component	T	R	V	T	R	V	T	R	V	T	R	V
Max. correlation	0.8871	0.9467	0.8745				0.8926			0.8247		0.6223
Estimated Velocity in m/s	-1885	-1647	-1292				-2165			-1531		-411
Estimated Velocity in m/s				784	449	394	3827	3234	1212	2738	1838	
Max. correlation				0.5437	0.7049	0.8632	0.9083	0.9311	0.9005	0.7818	0.6568	

算定結果は、いくつかの例外を除き、概ね一方向の伝播時間しか存在しない。基礎上の#1から#7までの地点について伝播方向をみると、アリーナ側からの波動伝播（すなわち北側からの波動伝播）が主体であることが推察される。概ね東西の測線になっている#0と#1および#8と#7の組合せでは、概ね双方向からの波動伝播が認められる。これらは、波動発生源としての道路交通（北東南の3方向にあり）や地下鉄（北と西側）、路面電車（東と南側）の存在位置（図3参照）に関係していると考えられる。

推定伝播速度を組合せ測点の中間地点に対応させて図化したものが図6である。これによると、#4や#5などの地点を含む区間では、P波よりもSH波の伝播速度の方が大きい結果となっている。これは、これらの地点で、微動のSH波伝播は地下の高速層（おそらく下部基礎）から各測点への伝播が主体で、表面を伝わるSH波成分はほとんどないことを示唆している。P波については、伝播方向と振動方向を考慮すると地下からの伝播はほとんどないと考えられ、表面をP波で伝わる直達波が主体であると考えられる。SV波またはB波については、振動方向と伝播方向の関係から、壁面の背後に高速層があれば、そこからの波動伝播が主体になると想像される。しかし、壁面の背後は概ね上部基礎であり、上部基礎は下部基礎よりも伝播速度は低いと考えられているので、結局計測された伝播波動は、床面を伝わるSV波またはB波と考えることができる。したがって、床面の下に空洞などがあれば、そこでのB波はかなり遅くなると期待される。なお、#6と#7の組合せにおけるSH波の伝播時間については、二点間波形の相互相関係数がきわめて低くなっており、伝播時間は十分な精度で推定できていない可能性がある。

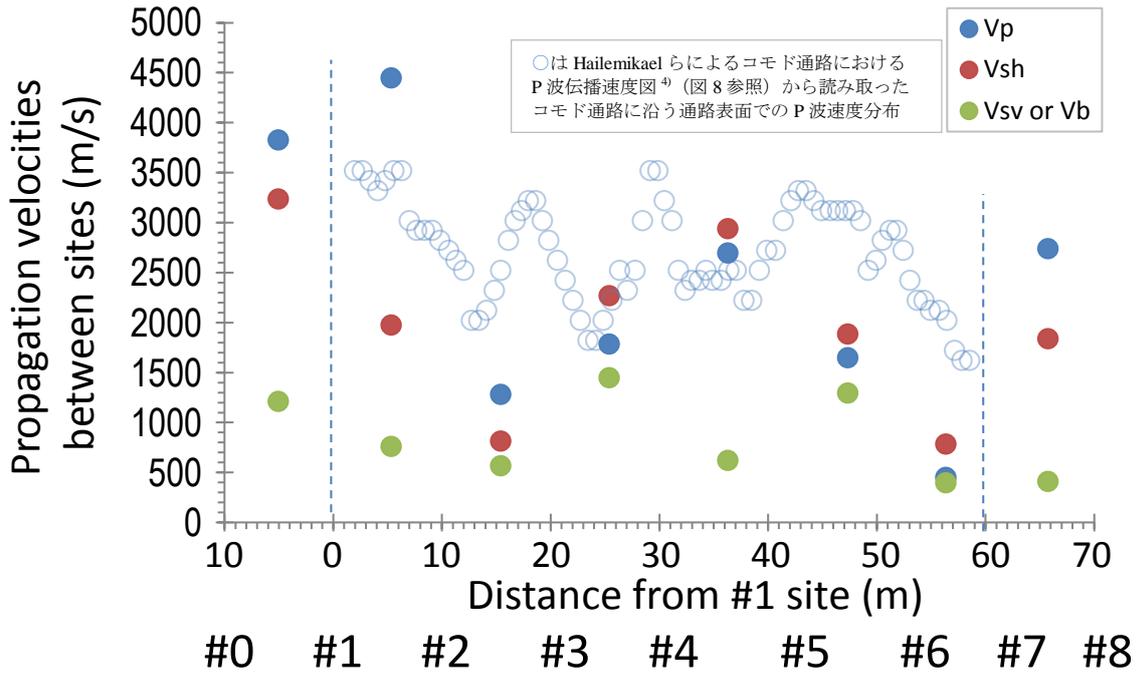


図6 R法による常時微動を用いた各種波動の伝播速度

P波速度から判断すると、アリーナに近い基礎部分は、非常に堅固であるが、上部基礎の本体部分は中心部よりやや外側の#4と#5地点の間の部分で比較的大きくなるもののそれ以外は2000m/sを下回る程度である。SH波の分布をみると、同じく#4地点と#5地点の間を中心にP波より大きな伝播速度となっており、この付近の地下に高速度層が存在することを示唆している。この部分は構造物が残っている部分であり、拘束圧の影響で伝播速度が大きくなっていると解釈することができる。

以前、常時微動を用いて推定した両基礎内のSH波速度を推定した結果<sup>2)</sup>を図7に示す。コモド通路に相当する赤丸で示した地点は#5地点に相当し、上部基礎では600m/s、下部基礎では2000m/sが推定されており、今回の結果と整合している。

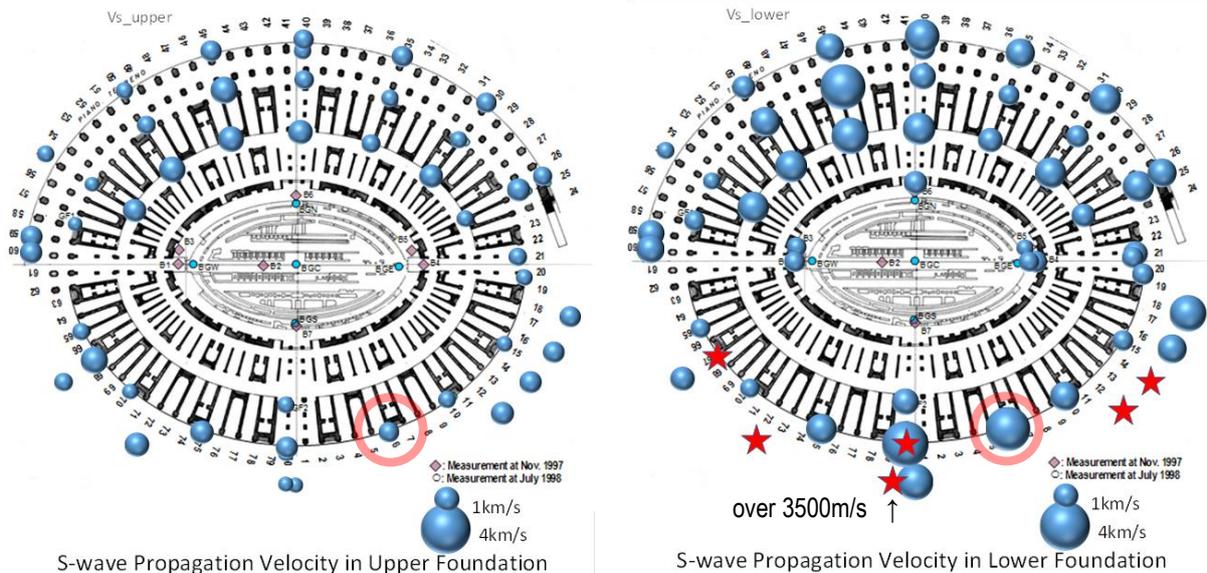


図7 基礎上の常時微動 HVSR による卓越振動数と増幅倍率から推定した上下部基礎の SH 波伝播速度<sup>2)</sup>

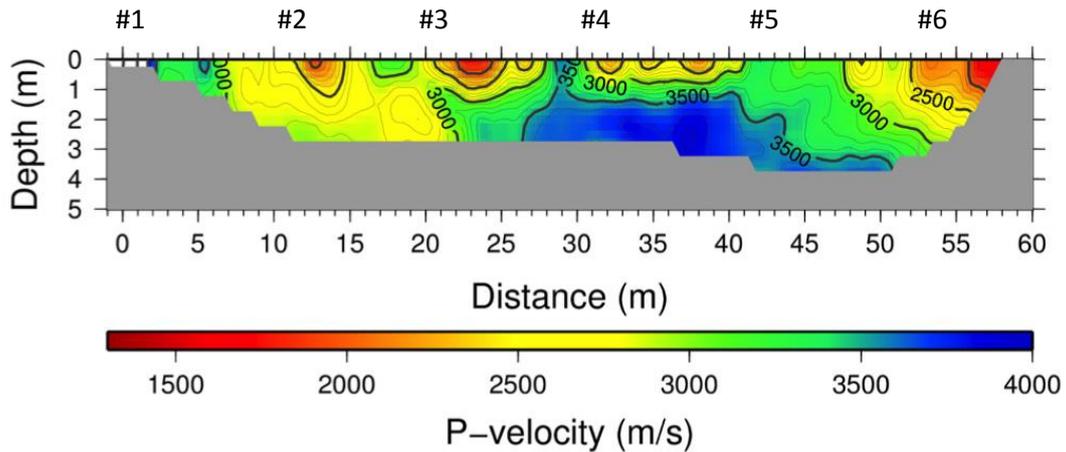


図8 文献<sup>4)</sup>によるP波伝播速度

また、SV波またはB波についてみると、他の波動成分に較べてかなり小さな伝播速度となっているところが、#0と#1の間、#1と#2の間、#4と#5の間および#7と#8の間に認められる。SV波またはB波が小さくなるのは床面の下に空洞がある場合と推測されるので、これらの地点間の床下で水平亀裂を含む空洞または軟弱な層の存在が示唆される。

図8は、Salmon Hailemikaelら（2017）よって行われたコモド通路に沿ったP波速度縦断図を示したものである。上下動センサー（geophone）を床面中央に1m間隔で59個設置して、5kgハンマーで床面を2m置きに3回ずつ加振してスタックした波形について1/1000秒の精度で総計1395個の波動到達時間を読み取って解析している。これによると、#4～#5地点あたりの地下に高速度層が存在していることがわかる。そこではP波速度は3500m/s～4000m/sと推定されており、本研究で推定されたSH波速度1900m/s～2900m/sと整合するものとなっている。図8から読み取った床面附近のP波速度を図6に薄い○印で示している。細部に相違はあるものの、概ね本研究での推定結果と整合しているようにみえる。

また、測点#0と測点#1の間の地下には空洞があり（写真2参照）、Luciana Orlandoら（2017）による地中レーダー（GPR）を用いた探査結果によると、#2付近や#4～#5の地下には層構造が認められ、#7～#8地点の地下は#1～#2地点と同様な構造と考えられるなど、微動を用いたR法の解析結果と整合する結果となっている。

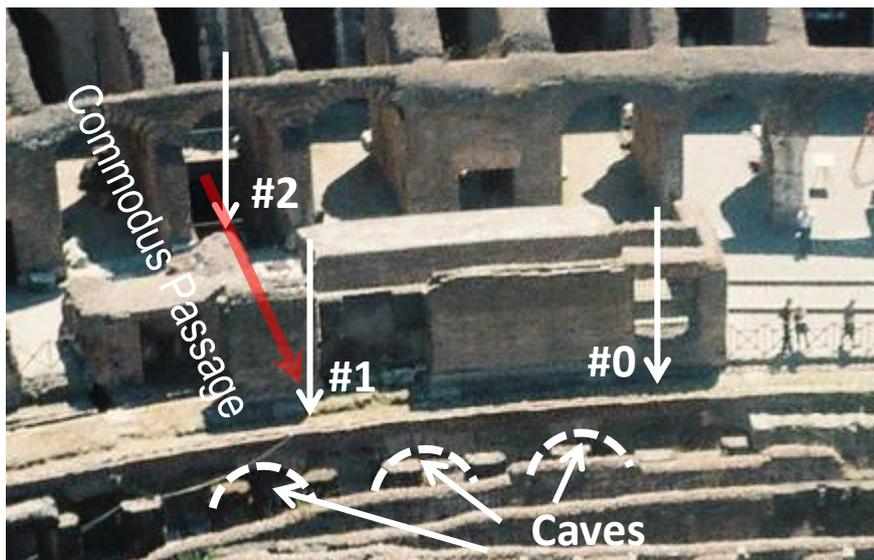


写真2 コモド通路入口付近

次に、C法とE法を用いた伝播速度と距離減衰の推定結果について述べる。C法を#1と#2の組み合わせ（間隔10.7m）に適用して、#1の自由端の波形から#2の媒質内波形を推定し、観測波形との相対誤差が最小となる伝播時間や距離減衰をリアルタイムに推定した。時々刻々の伝播時間や距離減衰定数を相対誤差と対比させたものが図9である。これから相対誤差が最小となる伝播時間や距離減衰定数を読み取ると以下ようになる。すなわち、T方向（SH波対応）では、0.724（単位1/100秒）、11.5/1000(1/m)、R方向（P波対応）では、0.458（単位1/100秒）、14.4/1000(1/m)、V方向（おそらく曲げ波対応）では、1.59（単位1/100秒）、33/1000(1/m)である。これから、#1と#2間のSH波の速度は1480m/s、P波の速度は2340m/s、曲げ波の速度は673m/sと推定される。C法による速度は層全体の挙動を平均的に捉えたものであり、R法による速度は局所的な挙動を反映していると考えられる。なお、#1と#2の間のP波とS波の伝播速度から推測されるポアソン比は0.25と推測される。

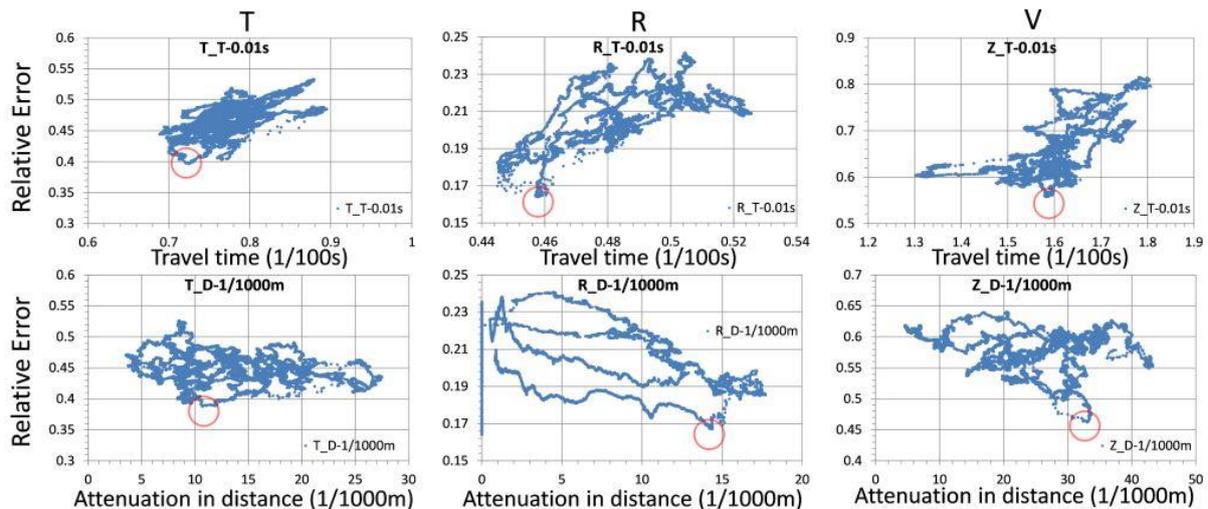


図9 #1と#2地点の同時測定結果にC法を適用して得られた各種波の伝播速度や距離減衰と相対誤差の関係（相対誤差最小を推定値とする）

E法による伝播時間は自由端（基礎板のアリーナ側端部）と反射面間（基礎板外周部）の波動伝播時間を与えると考えられるが、ここではP波に対応する半径方向成分について検討する。図10は各測点において2回ずつ算定された基礎内を水平に伝播するP波の伝播時間から計算される伝播速度を示したものである。伝播時間が外側に行くほど短くなっているのは、計測している床面が#3地点以降次第に下降して、下部基礎に近づいているためと思われる（図3参照）。コモド通路付近の上部基礎の平均P波速度は2500m/sを越えており、下部基礎の平均P波速度は3000m/s付近に達しているものと推測される。

## 5. おわりに

コロッセオ基礎を掘削してつくられたコモド通路床面で常時微動を測定して、基礎の物理的特性を分析した。その結果、ほぼ10mごとに床面での各種波の伝播速度を推定することができた。推定結果は、HailemikaelらによるP波速度構造やOrlandoらによる地中レーダーを用いた探査結果と整合するものであった。今後、基礎の各所で水平方向のみならず、鉛直に離れた2点での常時微動の同時測定を行うことによって、基礎全体の物理的特性を把握することができるようになると期待される。

## 謝辞

この測定は、ワークショップDISS\_17の機会にラクイラ大学Valente教授とコロッセオ特別管理官のFumagalli博士の協力のもとに中村が実施したものであり、二氏に感謝する。

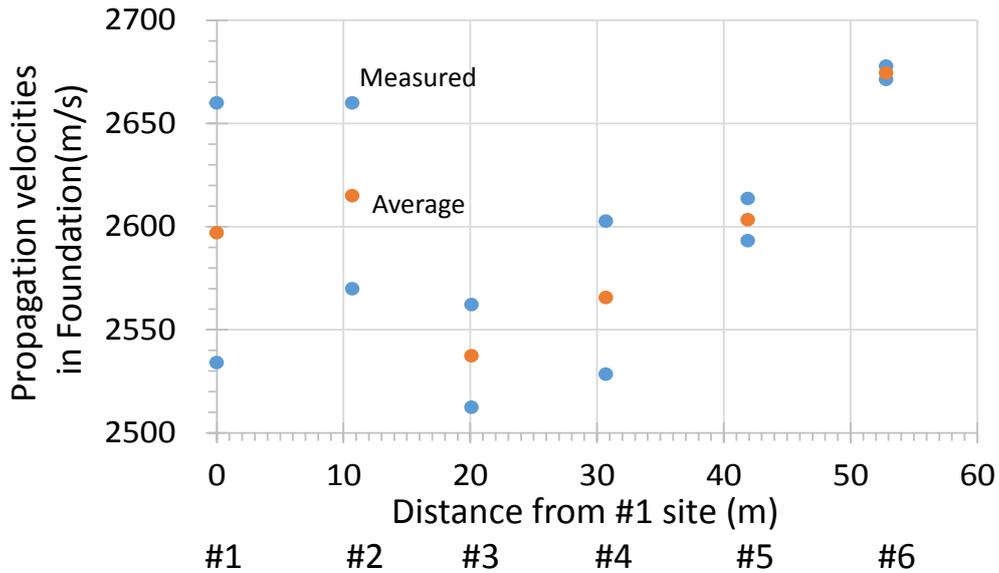


図 10 E 法により各測点位置で推定した基礎を半径方向に伝播する P 波速度

#### 参考文献

- 1) 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年度地震工学会年次大会論文、P4-20、2017.
- 2) Yutaka Nakamura, Jun Saita, Tsutomu Sato and Gianfranco Valente: Attempts to Estimate the Physical Property of Surrounding Ground and Foundation Concrete of Colosseum using Microtremor, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Workshop on “Dynamic Interaction of Soil and Structure (DISS\_15)” Rome, 12-13 November 2015, 1<sup>st</sup> edition: October 2016.
- 3) Luciana Orlando, Giorgio De Donno, Luca Di Giambattista and Lucia Palladini: Investigating the foundation of the Amphitheatrum Flavium through the Passage of Commodus, ANNALS OF GEOPHYSICS, 60 (4), 2017.
- 4) Salomon Hailemikael, Giuliano Milana, Fabrizio Cara, Maurizio Vassallo, Marta Pischiutta, Sara Amoroso, Paola Bordoni, Luciana Cantore, Giuseppe Di Giulio, Deborah Di Naccio, Daniela Famiani and Alessia Mercuri: Sub-surface characterization of the Amphitheatrum Flavium area (Rome, Italy) through single-station ambient vibration measurements, ANNALS OF GEOPHYSICS, 60 (4), 2017.