地すべりに関する新共振法による研究 A Study on the Landslide by a New Resonance Method

盛合禧夫^{*)}・松村吉康^{*)}・阿部真郎^{**)}・森屋 洋^{**)}

MORIAI Tomio・MATUMURA Yoshiyasu・ABE Shinro・MORIYA Hiroshi

Abstract

We have developed a new resonance method which enables us to measure resonant frequency and consequently to obtain propagation velocity by imparting vibrations to samples. And by this new method we can also estimate the strength of the materials through the obtained propagation velocities.

Over the past twenty-two years we have conducted several researches, using this new method. In our research in 1988 into steel tower footings whose underground concrete foundations dangerously deteriorated in the course of many years, we diagnosed their conditions without conducting any digging or excavation. Since 1995 we have been engaged in the preservation and the restoration of Angkor Monuments and carried out diagnoses on the rocks and the concretes of the monuments by this method.

The present article is the report about the excellent results we have gained by applying our new method to the studies of the soil samples from landslides in the Tohoku district. By studying the relationship between propagation velocity and water content, we have found that the strength of the soil declines with its changing process from elastic body to plastic body. Our findings are applicable to landslide prediction and protection measures.

Key words : plasticity, elasticity, slip surface, soil sample

1. はじめに

最近、新幹線や道路のトンネル、または高架橋のコンクリート・ジョイント等の不良箇所からコンクリート塊の落下が問題となっている。筆者らのうち盛合・松村は平成元年から鉄塔基盤の形状・劣化の研究から始まり石造遺跡およびコンクリートの診断・解析を行い、1999年からはこれまで、非常に困難とされていた地盤沈下地帯の土質地盤にまで及んでいる。これらの計測・診断には新共振法を用いて成果をあげている。

一般に土の内部組織の劣化や破壊の進行を知る目安は、固体から塑性領域に入ったことである。すなわち、塑性体になると弾性体としての性質も失うので、非常に重要である。そこで、共振法による測定で塑性体との関係が把握できれば、災害発生の可能性を推定できるものである。塑性体になるには、水・振動・風化およびその他の要因がある。今回、土質地盤が注水によって共振現象の変化や共振現象が発生しないこと、すなわち固体から塑性領域に入る点を総合的に解析した。

一般に、従来の地盤工学での実験は長時間かかる複雑なものが多いのに反し、筆者らの測定は簡単で短時間に処理できる利点を持っている。

今回、筆者らは地すべり面粘土の測定を行い、今後地すべりの予知および対策に応用したいと考えている。

2. 共振法の原理

有限の大きさを持つ弾性波は、それぞれの弾性波が複

雑に組み合わせあって、伸縮運動やたわみ振動、ねじれ振動等を起こし、その弾性体の材質・大きさ・形状によって決まる固有の振動数で共振する。この振動数を固有振動数、または共振振動数と呼んでいる。このことから、ある弾性体に対して、いくつかの固有振動数と伝播速度から、その弾性体の大きさ、形状を決定することができる。さらに、この理論を展開・応用すると大きさ、形状が分かっている物では強度や劣化程度も推測できる。

この共振法は、モード解析が困難なため特定の形状の物にしか用いられない。たとえばJISS1127の試験要項では棒状の物と定められている。従って、試料の形状に制約があるため、構造物の各部材を有るがままの状態で測定することは、これまで行われていなかった。また、上述の共振振動数を測定する装置は、振動数を掃引して加振機により試料の加振を行うが、加振にはある程度パワーが必要なために装置が大きくなり持ち運びに不便である。

最近、デジタル技術の進歩によりFFT (Fast Fourier Transform) 分析器が開発され、これとインパクト・ハンマーとの組み合わせにより、種々の形状の物体においても共振振動数の測定が簡単に行えるようになった。これはインパクト・ハンマーで試料物体に軽く衝撃を与え、その物体に接触されたピックアップからの出力をFFT分析器で分析し、振動数応答を求める物である。このFFT分析器—インパクト・ハンマーの組み合わせの測定器は、測定が簡単で精度も良く、携帯に便利な小型(3.2 Kg)の物も開発されている。従って、野外の測定にも適している。一般には共振振動数は $f = v/2l$ で表される。

^{*)} 東北工業大学

^{**)} 奥山ボーリング

ここで v は振動の伝播速度であり、 l がわかり f を測定すると v が求められる

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad E: \text{ヤング率} \quad \rho: \text{密度}$$

$$f(n) = n \frac{V}{2l} \quad n: \text{正整数}$$

V には2つあり1つは上記のもので他のものはよこ波の伝播速度で弾性体の場合は

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}}$$

$$f_s = n \frac{V_s}{2} \quad \nu: \text{ポアソン比}$$

物体強度は（破壊強度も含めて）ヤング率 E に密接に関係があり、 E の大きいものは強度も大きい。なお現場でFFTアナライザーによって測定した結果は即座に横軸に振動数、縦軸に振動強度が表示され、これから共振振動数を読みとっている。同じ材料でも劣化が進むと共振が起こらなくなりグラフにはピークが存在しない。また、亀裂のある物体ではあるべき所に共振振動数が存在しなかったり、共振が複雑になる。さらに、肉眼で見えない亀裂が存在する場合も共振振動数は測定できないが、内部破壊の進行を推定できる。従来までの研究では岩石物性間の相関性は図-1のように、伝播速度と一軸圧縮強度とは常に比例関係にあることが知られている。

以上のことをふまえて、筆者らの研究は文献^{(1)~(18)}で示したように岩石およびコンクリートでの種々の測定、解析を重ね成果をあげてきた。そこで、今回原理的には全く同じなのでこの測定を土に適用したものである。

3. 土の測定方法

測定対象の土壌を柔軟な筒状部材に充填し、該筒状部材の両端に硬質の板状体を設けて両端から加圧して、土の粒子どうしが可能な限り接着させ、地下数m程度の圧力下の自然の地山と同じ状態にする。その一端の板状体

土木学会
土木技術者のための岩盤力学（1975）

図-1 弾性波速度と圧縮強度

を加振して充填された土壌の共振振動を測定し、共振振動数を分析して土壌強度の度合を判定する土壌の測定法である。また、測定対象の土壌の地表面あるいは地中に間隔をおいて一対の金属板を配置し、一方の金属板には振動手段を設け、他方の金属板には振動検知手段を設けて、土壌を加振して共振振動数を測定する。

ここで、土壌も加圧して弾性体としたから、図-2のような試料（この図は円柱状）の土壌、即ち、長さが L で断面積はどのような形状でも良いが断面の最大寸法 D が、 $L > 2D$ である棒状の土壌を考えると、最も単純な共振は長さ方向に平行な縦波の伸縮振動の共振であり、この場合の基本波の共振振動数 f は、

$$f = \frac{V}{2L} \quad V = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

で表され、共振振動数 f を測定すると伝播速度 V が求められ、この伝播速度 V は密度が同じであれば V が大きいほど強い材料であることが分かる。

3. 実験結果

3.1 実施例A

上記の知見に基づき、図-3に示すような計測システムを組み立て使用したが、この実験例では測定対象の土壌を柔軟な筒状部材に充填し、この筒状部材の両端に硬質の板状体を設けて両端から加圧して、板状体を加振して、充填された土壌の共振振動数を測定し、該共振振動数を分析して土壌強度の度合を判定するものである。

なお、土壌（岩石）10の振動を検出するための振動検出手段として、金属板13には振動検知センター15が取り付けられているが、この取り付け手段は金属板13にネジ止めしてあるが、瞬間接着剤等でもよく、金属板13に強固に取り付ける必要がある。なお、この振動検知センター15に替えて所定距離、例えば10cmを隔てて指向性の強いマイクロホンを設けてもよく、この場合には移動が容易である。

測定結果

試料はカンボジア・アンコール遺跡における土壌と、仙台七北田川の砂であって、以下の挙げるものである。

- ① 硬質な砂岩（クデイ（地名）の砂岩）をハンマーで砕き、土粒子の大きさに調整した砂微粒子
- ② 沈下地帯の土（K-19の石柱の地盤で沈下しているところの土）
- ③ 褐色土（前柱殿（クデイ）の北側の良好な土壌）

$$L > 2D$$

図-2 測定試験

A…加振検出信号 B…振動検出信号 10…岩石あるいは土壌
11…インパクトハンマー 111…力検出ピックアップ
12,13…金属板 14…ゴムバンド 15…力検出ピックアップ
16…布性筒状袋 17…前置増幅器 18…FFT分析器
181…FFTアナライザ部の第1チャンネル
182…FFTアナライザ部の同第2チャンネル
19…チャージ増幅器 20…ピーク読み取り装置
21…パソコン 22…プリンタ

図-3 測定装置システム

- ④ ラテライト性赤色土（バンテアイ・クディの参道）
- ⑤ ラテライトを1と同様に粉碎した微粒子
- ⑥ 仙台七北川の砂

これらの試料を、長さ約10cmで直径が5cmの筒状の布袋に入れ、両側に金属板12・13を密着させ、7本のゴムバンド14で両側から圧縮し金属板13には振動を検知するセンサー15を固着した後、共振周波数を検出し伝播速度を算出する。

①～⑥までの乾燥状態での各土壌の共振法で伝播速度の数値を求めるが、例えば、⑤のラテライトをハンマーで砕き粉碎した微粒子の乾いた状態での周期数応答関数（1番目の波の形）での共振周波数は1.22KHzで、補正した伝播速度は250m/sである。同様に試料①、②、③、④、⑥の各土の共振法で伝播速度の数値を求め、従来の一軸圧縮試験の測定値と比較したのが図-4で、ほぼ同じ傾向にあることが判る。次に、これらの試料は最初は乾かした状態から、次第に注水して、その都度、共振周波数を検出し伝播速度を算出した。例えば、試料⑥に水を7g注入した共振周波数は1.24KHzで、水を20g注入した共振周波数は1.09KHzで伝播速度は徐々に下がっていき、強度も下がっていく。同様に、試料①～⑥までの各土壌の試料を測定した結果が、図-4、表-1である。水が浸透した場合の変化をみると、最も弱いものは砂岩より構成された砂質土で、最も弱いものはラテライトの粒子やラテライト性赤色土である。この点は、従来の方法では適格に測定することが全く困難なもので

図-4 各種土の伝播速度・水分および圧縮強度との関係

あった。

また、沈下地帯の試料の土の強度値が最も小さく砂岩の粒子の数値と非常に似ており、これは、この地盤の構成では砂岩を源岩であることを反映していることから、極めて興味ある事実が判明した。これらの土壌の強度の強弱の程度を比較すると試料④>③>②となり、理論上で考えられる傾向とも一致する。

ただし、水の付加で一時的に強度が上がり土粒子間の接着の効果を上げることがあるが、K-19試料②と砂岩粒子①はその効果が現れない。最終的には水分の増加は劣化の促進という効果を与えることだけは共通している。実験方法にも、ゴムバンドで土粒子を密着させて共振現象を見る際に、このゴムバンドの圧力を定量的に調査して共振現象との比較が必要であったが、圧力は概略の目安と考えて、本実施例で各試料に対する圧力をほぼ同じ程度にした。すなわち、ゴムバンドの圧力は地上・又は地中の圧力に相当するところの伝播速度である。そこで、圧力が変われば速度も変わる。試料①～⑥はその圧力下での値として有効であり、強度判定の重要な目安となる。また、ラテライトの粒子は加水すると急激に伝播速度が下がるが、ラテライト中のカオリン・微粒状赤鉄鉱等が粘性土と同じく急激に溶脱するのがその原因と思われる、本実施例の測定した検証結果において、土壌の強度の度合いが測定できるという事実を否定するものではない。

次に、試料の両端での圧力と伝播速度との関係をパソコン（アンコール遺跡）のラテライト性赤色土について検証した。

表－１ 図－４の測定値

番号	名称	条件 圧力 長さ 注水 Q: 試料 の長さ	Freq- KHz	補正計算値	
				v:km/s	P波換算 (ボアソン比 0.32として)
1	砂岩を粉砕した砂微粒子	ゴム7本×2 Q: 8.6cm 注水飽和	1.05 0.97	0.204 0.188	0.242
2	沈下地帯の土 K19の土	ゴム7本×2 Q: 8.6cm 水 0 水 7g 水 26g	1.14 1.07 0.96	0.228 0.214 0.194	0.273
3	褐色土 良好な土 KB2	ゴム7本×2 Q: 8.6cm 水 0 水 12g 水 20g 水飽和 (50g)	1.18 1.21 1.19 1.01	0.235 0.239 0.235 0.200	0.281
4	ラテライト性 赤色土	ゴム7本×2 Q: 8.8cm 水 0 Q: 8.8cm 水 7g Q: 8.7cm 水 28g	1.18 1.22 1.19	0.240 0.246 0.236	0.287
5	ラテライトを粉砕した微粒子	ゴム7本×2 Q: 8.9cm 水 0 Q: 8.9cm 水 7g Q: 8.6cm 水 20g	1.22 1.24 1.09	0.250 0.253 0.224	0.299
6	パコン ラテライト性赤色土	Q: 9.1cm 水 0 ゴム7本×2 10本×2 14本×2 18本×2	1.35 1.50 1.61 1.72	0.280 0.307 0.327 0.347	0.335
7	仙台 七北田川 の砂			0.246

図－５ ラテライト性赤色土(パコン地区)の伝播速度と圧力

その結果は図－５におけるゴムバンドの本数を変えることにより圧力を変えて測定した結果を表－１に示すが、圧力7本×2（ゴムバンドの本数）では280m/sを示し、圧力を10本×2，18本×2と順次に増加させて測定していくと共振周波数は上昇し、伝播速度は307m/s，327m/s，347m/sと直線上に比例関係を保ちながら上昇する。これは、圧力をかけると土粒子間がよく密着し、弾性体として物性を示す理論と一致することが分かる。この測定も従来の試験方法では困難なものであった。

なお、圧力が0の点での伝播速度の値はこの直線上の延長上にあるので256m/sを図表により確認でき、この値はフックの弾性体の限界を意味しており、これ以下では弾性体の性質を示さないことになる。

これは固体、半固体、塑性、液性と区分なかでは塑性領域のような状態、いわば未固結の土粒子間が非常に伝播しにくい状態を意味しているものと解釈できる。

以上検証したように、実施例Aは共振周波数からの伝播速度を検出することで、比較的簡単に土壌の強度を推定することができ、その結果、土壌の種類を判別でき、また、水の浸水状態の変化にともなう土壌強度の変化や、土壌での加圧の変化にともなう土壌強度の変化を知ることができた。

3.2 実施例B

この実施例はAの実施例と測定原理はほぼ同じであり、計測システムも実施例Aとほぼ同じであるが、試料を採取することなく測定ができる。土壌の地表面あるいは地中に間隔をおいて一対の硬質の板状体を配置し、一方の板状体を加振して土壌の共振振動数を測定し、共振振動数を検出して土壌の強度の度合を判定するものである。

実施例Bは図－６に示すように、測定対象の土壌の層に平行に20cm×20cmの正方形の金属板一対31，32を、20cmの間隔で面を平行にして配置する。一方の金属板31の外側面には、インパクト・ハンマー11で打撃するスペースを設け、他方の金属板32の外側面には振動を検査するセンサー15を固着する。

この実施例は、なによりも簡便に強度測定ができ、水の浸水状態や圧力状態の変化にともなう土壌の強度の変

10…土 11…インパクトハンマー 15…力検出ピックアップ
31, 32…金属板 111…力検出ピックアップ

図－６ 野外における岩石または土の測定法

化をリアルタイムで検出することができる。また、装置としては振動検出センサーは測定対象物に固着しなくても、所定距離を隔てて指向性の狭いマイクロホンでもよく、この場合に装置の移動が簡単である。更に、基準となる土壌の強度や特徴を測定装置の記憶手段に記憶しておけば、常にこの土壌強度の数値と比較して即座にその土壌の強度や分類が可能になる。

3.3 実験例C—地すべり面の粘土—

試料採取地は下記のとおりである。

谷地はグリーントフ中の泥岩を中心とした大規模岩盤地すべりであり、仏社は同様の凝灰質粘土を中心としたものである。芦菰はグリーントフの大童子層の泥岩と崩積土を含む地すべりで、下前はグリーントフ中の地すべりで、R(338)は強風化千枚岩と崩積土が地すべりである。

表－2 地すべり面粘土の採取地

サンプル名	場 所
谷地	秋田県雄勝郡東成瀬村
仏社(ブッシャ)①, ②	秋田県北秋田郡上小阿仁村仏社地内(サンプル2ヶ(①, ②))
芦菰(アシヤチ)	青森県西津軽郡深浦町大字長慶平字芦菰地内
下前	青森県北津軽郡小泊村下前地内
R338(佐井)	青森県下北郡佐井村大字穴沢沢地内(長後)

既述の地すべり面粘土の注水と伝播速度がどのようなかを図－7に示した。どの粘土も水の付加(含水量の増加)によって伝播速度は直線的に下降し、概ね140～170ccで弾性体が塑性体になり共振現象は発生しない。なお、この図では共振現象が2ヶ所認められる。これを1, 2と表している。この理由はよこ波ではねじれ振動の共振で低い振動数(1)のところに出て、高いところの振動数は棒状の伸縮振動なのでたて波的な共振になる(2)。更にベトベトになると、たて波的な共振はなくなりねじれ振動だけになる。また以下の共振図は同一条件で1回のハンマーでの振動で出てくるスペクトルの横軸共振振動数の位置のみが重要である。

次に測定結果を示す。

表－2に示す。

L：長さ(試料)

図－7 地すべり粘土・伝播速度・水との関係

表－2 地すべり粘土・水分・および伝播速度との関係の測定値

地区名			f(KHz)	v(m/s)	f(KHz)	v(m/s)	L=cm	m	g	p	kg/m ³
		水	1	2	2	2					
谷地	乾燥前	自然状態	0.45	117	0.66	172	L=13.0	m=530	p=3800	pH=2.5	
	乾燥後	0	0.50	119	0.74	176					
	100	0.39	93	0.51	121						
	170	0.16	38								
仏社①	乾燥前	自然状態	0.29	78	0.43	116	L=13.5	m=530	p=4600	pH=6.3	
	乾燥後	0	0.54	141	0.79	207					
	50	0.51	134	0.71	186						
	170	0.35	92	0.53	139						
仏社②	乾燥前	自然状態	0.29	76	0.44	115	L=13.1	m=470	p=4600	pH=4.8	
	乾燥後	0	0.57	143	0.81	214					
	50	0.53	140	0.79	209						
	90	0.44	116	0.70	185						
		170	0.34	90	0.48	127					
芦菰	乾燥前	自然状態	0.26	74	0.48	137	L=14.3	m=560	p=4600	pH=5.5	
	乾燥後	0	0.43	110	0.64	164					
	100	0.31	79	0.44	113						
	170	0.20	51	0.42	108						
下前	乾燥前	自然状態	0.31	86			L=13.8	m=470	p=4600	pH=1.2	
	乾燥後	0	0.51	133	0.79	205					
	130	0.19	49								
佐井	乾燥前	自然状態	0.36	96	0.54	144	L=13.3	m=470	p=4600	pH=5.8	
	乾燥後	0	0.63	174	0.82	226					
	100	0.26	72	0.45	124						
	130	0.24	66								

m：質量

p：スプリングによる軸方向の圧力

pH：水素イオン濃度

この中で谷地を例として図8－1, －2, －3, －4に示した。2ヶ所の共振現象は図中、1, 2の位置であり、カーソルで読みとったものである。縦軸は対数目盛での振動数に比例した電位であり、横軸は振動数でKHZである。これより計算で速度を求めている。

図9～13も全く同様なので図のみ示している。

また、図－14ではpH, 液性限界, 塑性限界, 最低伝播速度(地すべり, 崩壊, 沈下などが最も発生の可能性のある値)および湿潤後の強度比(最初の乾燥時の伝播速度と注入後の共振現象が発生しなくなった最後の速度との強度換算比)との相関性を示している。全体的に総べて大局的には相関性を持つが、塑性限度と湿潤後の強度比は最も強い相関性を有している。特に共振が1と2では1の方が塑性限度と調和できである。これは含水し飽和するとねじれ振動を生じるためである。

4. まとめ

以上説明したように土壌の新共振法測定装置を使用した。これにより、土壌の内部組織の劣化の度合や品質分類、地盤沈下の度合、地すべりの可能性、土壌強度を総合的に把握することが可能となり、また、土壌は含水量の違いで固体・半固体・塑性・液性へと変化し、加圧状態の変化によっても土壌強度が変わるが、これらのどの状態でも土壌を分解や破壊することなく土壌強度の推定や判断が可能であり、必要に応じてその変化の過程をリアルタイムで把握することも可能である。

なによりも測定装置が簡単であって装置の移動を容易であり装置を設定することも簡単であることから、短時間で土壌の強度測定ができるという効果が得られる。

また、土壌が塑性体になる時点から地盤の破壊・地すべり沈下が発生することが多く、従って、土壌の含水比の増減により災害発生の予知にも大いに貢献できるも

谷地（乾燥前）

0.00000 Hz 700 125m TRB #REQ RESP LOGMAG Reg 2 00-04-17 14:22:30

谷地（乾燥後） 水0

0.00000 Hz 136 710m TRB #REQ RESP LOGMAG Reg 49 00-04-28 18:58:33

谷地 水100cc

0.00000 Hz 379 320m TRB #REQ RESP LOGMAG Reg 50 00-04-28 17:12:28

谷地 水150cc

0.00000 Hz 383 270m TRB #REQ RESP LOGMAG Reg 51 00-04-28 17:23:08

図-8 谷地地すべり粘土の水分注入時毎の共振振動周波数のスペクトル図

(a) ① 100cc

0.00000 Hz 178 300m TRB #REQ RESP LOGMAG Reg 4 00-04-17 21:17:03

(a) ② 50cc

0.00000 Hz 1.114 TRB #REQ RESP LOGMAG Reg 20 00-04-28 16:18:21

(a) ③
乾燥後
水0

0.00000 Hz 318 347m TRB #REQ RESP LOGMAG Reg 13 00-04-25 12:38:18

(a) ④

0.00000 Hz 127 320m TRB #REQ RESP LOGMAG Reg 22 00-04-25 17:35:08

図-9 仏社①地すべり

仏社② (乾燥用)

仏社③

仏社②

仏社③

仏社②

図-10 仏社②地すべり

芦花 (乾燥用)

芦花

芦花
乾燥後

芦花

図-11 芦花地すべり

図-12 下前地すべり

図-13 佐井地すべり

図-14 地すべり粘土の最低伝播速度、液性限界・塑性限界、PH、湿潤後の強度との関係

のである。

これらのことから地すべり発生の可能性には、現地の土の採取後あるいは現地での測定により簡単に決定できることが思料された。

引用文献

- 1) Evans, A. G.: Fracture Mechanics of Ceramics I, Plenum Press, N. Y. 1976 (英文)
- 2) 満永 豊・勝山 豊・小林敬和・石田之則：スクリーニング試験による光ファイバ強度保証法，電子通信学会誌，'87/7 Vol.66-B, No. 7, pp. 829-836
- 3) Y. Matumura・A. Ishikawa・Y. Akama・N. Chiba・T. Moriai: Study on Relations between Shapes and Resonant Frequencies of Elastic Body by Electrical Circuit Theory. 東北工業大学紀要 I，理学編，15号，(1995)，pp. 19-28 (英文)
- 4) 盛合禧夫・奈良国立文化財研究所・大阪土質：1995年 Banteay Kdei のボーリング調査による地盤工学的研究，カンボジアの文化復興（上智大学アジア文化研究所）No. 12 (1995)，pp. 23-30
- 5) 盛合禧夫・松村吉康・赤間芳雄：新手法による石材の診断カンボジアの文化復興（上智大学アジア文化研究所）No. 12 (1996)，pp. 31-32
- 6) 盛合禧夫・松村吉康・赤間芳雄・ラオ キム リアン：カンボジア・アンコール遺跡における主要構築素材に関する基礎的研究-1-，東北工業大学紀要 I，理工学編，16号，(1996)，pp. 47-60
- 7) 盛合禧夫・松村吉康・赤間芳雄：フランス極東学院による瀾王のテラス，象のテラスの修復用の砂岩・ラテライトの性状，カンボジアの文化復興（上智大学アジア文化研究所）No. 13 (1996)，pp. 47-53
- 8) 盛合禧夫・松村吉康・赤間芳雄：バンテアイ・クディにおける共振法による石材の診断，-第2報-，カンボジアの文化復興（上智大学アジア文化研究所）No. 13 (1996)，pp. 54-55
- 9) 盛合禧夫・松村吉康・赤間芳雄：バンテアイ・クディにおける共振法による石材の診断，-第3報-
- 10) 盛合禧夫・松村吉康・クム ソリッド：バンテアイ・クディにおける共振法による石材の診断，カンボジアの文化復興（上智大学アジア文化研究所）No. 14 (1997)，pp. 13-16
- 11) T. Moriai・Y. Matsumura・Koum Sorith: Diagnosis of the stone of Anghor Vat and Bayon Region, Renaissance Culturelle du Cambodia (Institute of Asian Cultures, Sophia University) No. 14 (1997)，pp. 231-232 (英文)
- 12) T. Moriai・Y. Matsumura・Koum Sorith: Diagnosis of the stone of Banteay Kdei using the Resonance Method Culturelle du Cambodia (Institute of Asian Cultures, Sophia University) No. 14 (1997)，pp. 233-236 (英文)
- 13) 盛合禧夫・松村吉康・赤間芳雄・ラオ キム リアン・クム ソリッド：カンボジア・アンコール遺跡における主要構築素材に関する基礎的研究-2-，東北工業大学紀要 I，理工学編，17号 (1997)，pp. 45-60
- 14) 盛合禧夫・松村吉康・赤間芳雄・ラオ キム リアン・クム ソリッド：カンボジア・アンコール遺跡における主要構築素材に関する基礎的研究-3-，東北工業大学紀要 I，理工学編，18号，(1998)，pp. 29-52
- 15) 盛合禧夫・松村吉康・赤間芳雄・ラオ キム リアン・クム ソリッド：カンボジア・アンコール遺跡における主要構築素材に関する基礎的研究-4-，東北工業大学紀要 I，理工学編，19号，(1999)，pp. 63-88
- 16) 盛合禧夫・松村吉康・赤間芳雄・ラオ キム リアン・クム ソリッド：カンボジア・アンコール遺跡における主要構築素材に関する基礎的研究-5-，東北工業大学紀要 I，理工学編，20号，(2000)，pp. 47-62
- 17) 盛合禧夫・松村吉康：土・岩石およびコンクリートの診断方法，東北地質調査業協会40年記念 (2000) pp. 37-56
- 18) 土木学会：土木技術者のための岩盤力学 (1975) pp. 129

(原稿受付2000年10月17日，原稿受理2001年5月28日)