

# 沖縄本島における石積文化財の地震時の応答に関する計測システムの開発と適用

藍檀 オメル<sup>1\*</sup>・渡嘉敷 直彦<sup>1</sup>・富山 潤<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 琉球大学工学部 環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

\*E-mail: : aydan@tec.u-ryukyu.ac.jp

沖縄本島に石積文化財が数多く存在し、2010年2月27日の沖縄本島近海地震で勝連城址などを含め数多くの石積文化財に被害が発生した。これらの文化財の今後発生し得る地震に備えてその地震時の応答と地震時の被害の可能性について検討すべきである。しかし、2010年2月27日の沖縄本島近海地震や2011年3月の東日本大震災でも見られたように石積文化財の地震時の応答について未だに計測結果を存在しない。本論文で、開発した長期的多重パラメータ計測モニタリングについて説明し、沖縄本島にある代表的な石積文化財の長期的安定性と地震時応答について示す。また、有限要素法を用いての琉球石灰岩層の解析を行い、それについての結果も示す。

**Key Words :** masonry structures, castle, arch, earthquake, Okinawa, Shuri, Katsuren

## 1. はじめに

琉球諸島には、グスク（城）を始めとする多くの石造文化財や岩盤構造物があり、これらの多くは、琉球石灰岩層上、あるいは層内に存在している。首里城、今帰仁城、（今帰仁村）、勝連城（うるま市）、中城城（北中城村）は代表的な例である（図-1）。一般に、琉球石灰岩層の下部には基盤層の島尻層群が分布しており、琉球石灰岩層および島尻層群の劣化や風化現象により、上部琉球石灰岩層の長期的破壊が進行し、石造文化財や岩盤構造物の保存・維持が課題<sup>1,2)</sup>となっている。

2010年2月27日の沖縄本島近海地震で勝連城址などを含め数多くの石積文化財に被害が発生した<sup>3)</sup>（図-2）。中城で400年前の地震で転倒したといわれている大きな岩盤ブロックが存在している（図-3）。2010年2月27日の沖縄本島近海地震や2011年3月の東日本大震災でも見られたように、石積文化財の地震時の応答について未だに計測結果が存在しない。これらの文化財の今後発生し得る地震に備えて、その地震時の応答と地震時の被害の可能性について検討すべきである。

一般に地震時の地盤および構造物の強震測定機器の単価とその維持管が高いため、強震観測点の数が限られている。この分野で日本は強震観測網が最も進んでいる国であっても、その数が限られている。また、今まで電池あるいは太陽電池で作動する小型でスタンドアロンタイ

プの加速度計が存在していなかった。Aydanら<sup>1,2)</sup>は、2004年のスマトラ巨大地震をきっかけに太陽電池で作動する小型でスタンドアロンタイプの加速度計の開発に成功した。沖縄を中心に石積構造である遺跡における強震測定を試み始めている。



図-1 代表的なグスク（城）



図-2 2010年2月27日の沖縄近海地震による勝連城址の被害



修復前

修復後

図-3 中城城址における400年前の地震で転倒したといわれている大きな岩盤ブロックの修復前後の様子

本研究は、沖縄本島にある代表的な石積遺跡（中城、勝連城、具志川城址）にAydanら<sup>2)</sup>が開発してきた太陽電池で作動する小型地震計を設置し、リアルタイム計測を行い、上記の遺跡の地震時の応答を明らかにすることを目指している。加速度計を勝連城、具志川城址および姫ゆり塔などに設置して、地震時の強震計測を計画している。現時点で南東側急崖斜面内には、連続した大きな亀裂が存在している世界遺産の一つである中城城址に加速度計を設置し、観測を行なっている状況である。また、勝連城に加速度計の設置について、設置場所の選定および観測システムの設置について計測器・機材の手配などは完了している。また、石造文化財の地震時の応答に関してその振動特性を把握するため、常時微動による計測を実施し、その分析と解析を行なってきた。

本論文では、設置した地震動計測システムの概要を説明し、計測期間中に発生した地震時の計測結果を示す。また、中城城址で設置している多重パラメータ計測システムから得られた結果について、個別有限要素法を用いて数値解析を通して、解析・分析を行なう。さらに、代表的な石造文化財に関して得られた常時微動結果についても紹介し、その分析結果について記述する。

## 2. モニタリング・計測システム

### (1) 地震動観測システム

図-4に、種々の構造物の加速度応答を安価で簡易に計測する目的で新たに開発したスタンドアロン型の加速度計を示す。本加速度計は、加速度センサー、データロガー（2GB）および内蔵バッテリーで構成され、長期の観測を考慮し、外部電源による蓄電も可能となっている。今回、電源を供給するためソーラーパネルを利用している。また、データ計測開始のトリガー設定、計測インターバル設定、計測時間設定などの各種機能をPCで簡易に設定できるようになっている。



図-4 小型加速度計

### (2) 多重パラメータ動態観測システム

岩盤が変形、または破壊する過程において、岩盤内に発生するひずみ、応力、電気抵抗、電位、AE、温度、間隙水圧などを多重パラメーターと呼ぶ。これらの多重パラメーターは、岩盤の破壊時に、加速度応答が発生する。Aydanら<sup>1)</sup>は、多重パラメーター応答を検討している。

多重パラメータ動態観測システムの設置の例として、中城城址におけるシステムをここで紹介する。中城城址南東側急崖斜面亀裂部の長期的安定挙動を把握するため、亀裂部の変位、岩盤の傾斜、AEおよび地震発生時の加速度応答を計測する多重パラメータ動態観測システムを構築した。本計測システムの状況を、図-5に示す。本計測システムは、亀裂部に設置した各種センサー、計測装置収納ボックスおよび電源を供給するソーラーパネルより構成されている。計測装置収納ボックスは、変位計、AE、傾斜計個々のアンプ・ロガー、およびソーラー電源システムのバッテリーと安定器・電源接続ターミナルより構成されている（図-6）。



図-5 多重パラメータ動態観測システム



図-7 常時微動計測システムと計測の様子



図-6 計測装置収納ボックスの構成

### (3) 常時微動計測システム

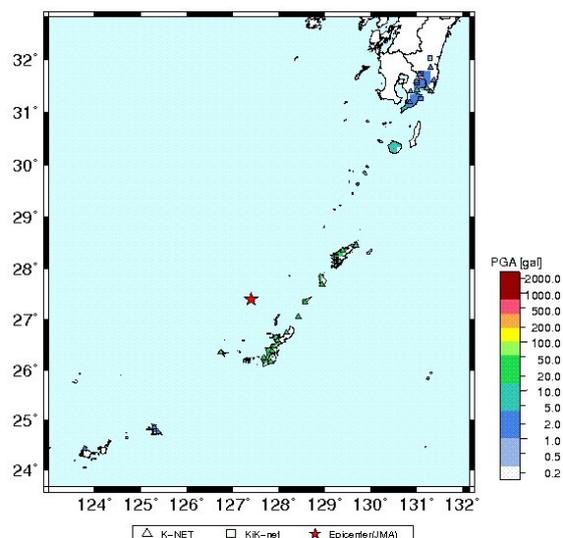
常時微動計測システムの基本的な原理は、大地が常時揺れていることに基づいている。その振動の計測より、計測場所の固有の振動特性を把握することが可能である。今回、勝連城址、中城城址、首里城、知念城址、具志川城址および座喜味城址の振動特性を把握するために、常時微動計測システムも利用することとした。各城址における計測の様子を図-7に示す。各城址で主にアーチの中心とそのアバット、城壁および基盤の振動特性を計測した。

## 3. 計測結果と考察

この節で今までに得られた結果について報告する。

### (1) 地震観測システムによる計測結果

観測開始後、2014年3月3日午前5時10分沖縄本島北西沖にてM6.6の地震が発生し、同日午前11時27分に、沖縄本島北西沖近海でM5.0の地震が続いて発生した(図-8)。地震は、逆断層型であり、最初の地震によって中城城址近傍で観測された具志川観測点における加速度記録において最大値は、いずれの方向も40gal以下であった。設置した加速度計のトリガーレベルのしきい値を上げて設定していたため、地震発生による加速度を記録することができなかった。このため、しきい値を再設定し、今後の地震発生時の加速度記録に備えている。



2014/03/03-05:11 27.4N 127.4E 120km M6.6

図-8 沖縄本島北部沖地震発生位置と加速度分布 (2014年3月3日午前5時10分, NIED, KNET)

2015年1月15日に沖縄本島北部近海で発生した地震による中城城址に設置している地震動観測システムで計測された加速度記録を図-9(a)に、そのFourierスペクトルを図-9(b)に示す。

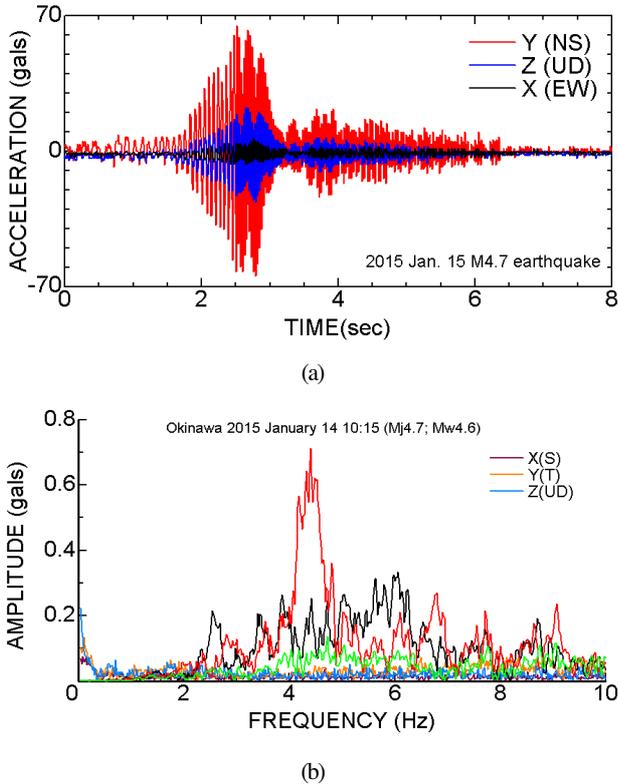


図-9 2015年1月15日の地震による加速度記録とそのFourierスペクトル

設置した加速度計のトリガーレベルのしきい値の設定が最も大事なことで。特に、低く設定した際に気象状況やアメリカ軍の飛行機やヘリコプターによってトリガーされることがある。図-10に、中城村で停電を起こした雷による地震動観測システムで計測された加速度記録を示す。

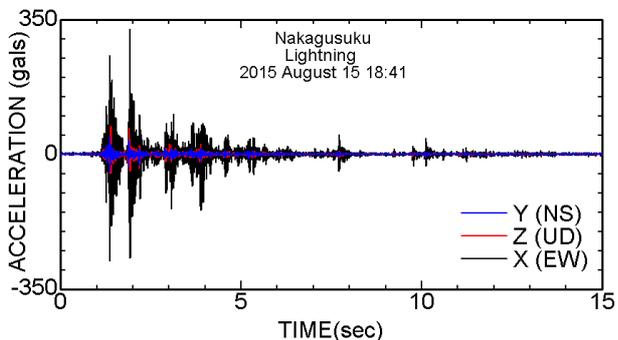


図-10 2015年8月15日の雷による加速度記録

## (2) 多重パラメータ動態観測システム

図-11に、観測開始後2014年4月5日までに計測した亀裂の相対変位 (3方向) と温度、湿度の変化を示す。亀

裂部の相対変位は、図-11に示す通りであり、水平方向 (x, y方向) の相対変位は、開く傾向を示しているが、鉛直方向 (z方向) の変位は、水平方向の比べて小さい。亀裂を挟む不安定岩盤が、安定な岩盤から離れる方向に変位していることを示しており、近隣の島尻層群斜面の変位の要因と同様に、基盤層である島尻層群の地下水の変化が影響していると推察される。

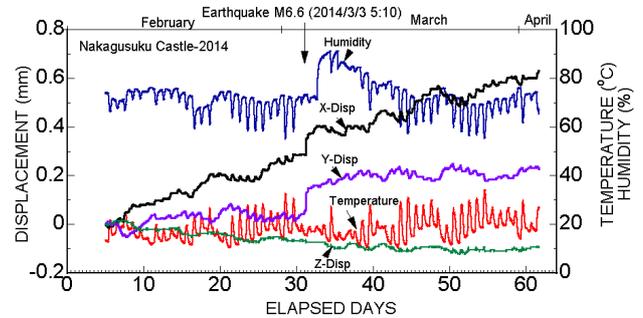


図-11 亀裂変位 (3方向) , 温度, 湿度の変化

2014地震発生前後における亀裂部の相対変位の変化を図-12に示す。地震発生によって、亀裂部水平方向に約0.15mmの永久変位 (開口) が生じた。

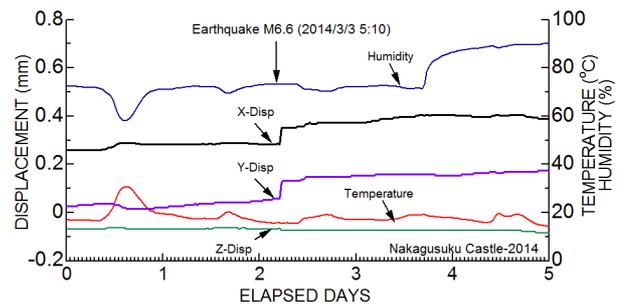


図-12 地震発生前後の亀裂変位の変化

地震発生に起因していると思われるAEの発生を図-13に示す。AE発生の時系列の記録との照合から、二つの地震発生時に、それぞれ岩盤のAE発生が認められる。

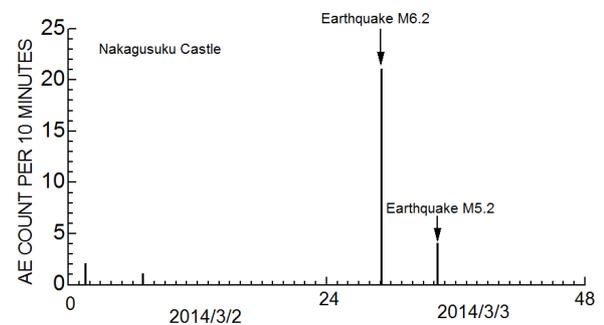


図-13 地震発生に起因したAE発生

## (3) 常時微動観測による計測結果

図-2に示したように、2010年2月27日の地震で崩壊し

た城壁に対して、うるま市での加速度記録および常時微動の計測結果の分析について、ここで紹介し、常時微動の解析結果と直接比較するため、同様な解析結果を示すことにする。まず最初うるま市で計測された加速度記録についてFourierスペクトルとH/Vスペクトルを示す(図-13, 図-14)。Fourierスペクトルに関して、低い周波数部分を除いて、3Hzと11Hzに卓越していることが言える。また、H/VスペクトルはNS成分について、0.72秒で、EW成分に関して1.1秒において、大きな値が見受けられる。

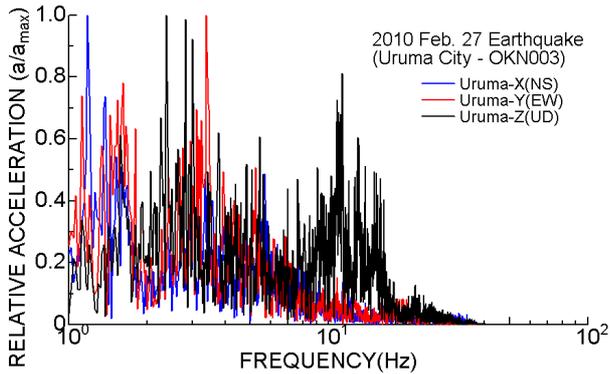


図-14 Fourierスペクトル

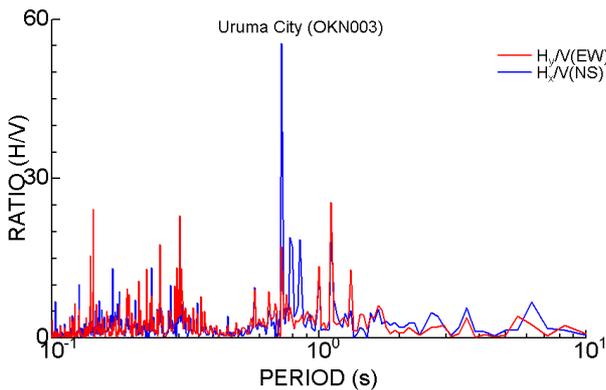
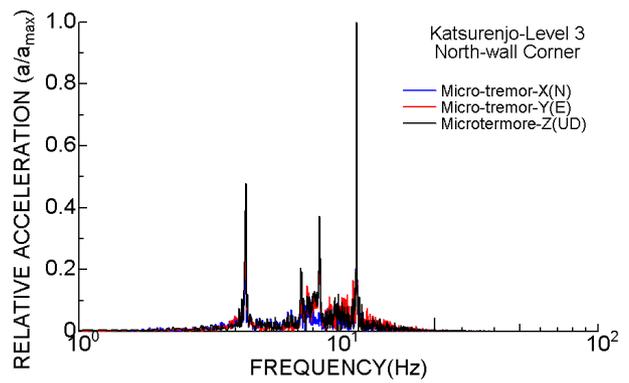


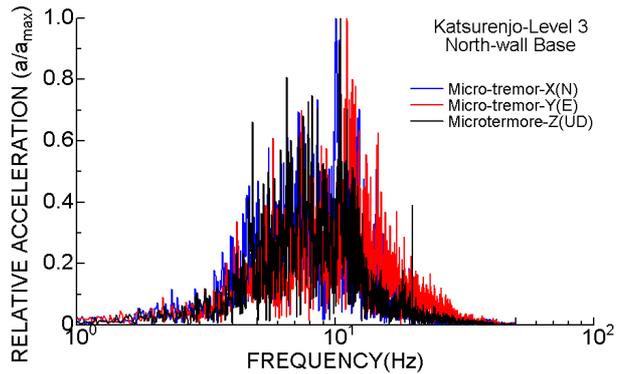
図-15 H/Vスペクトル

各地点ごとに3回計測を行ない、その一部について常時微動の解析結果を示す。記録の解析に関して、うるま市の加速度記録と同様に、各成分のFourierスペクトルとH/Vスペクトルを示す(図-16, 図-17)。城壁上部で記録の結果に関して、各成分のFourierスペクトル値は同様に、4.4Hzと11Hzで固有の周波数が見受けられる。基盤のFourierスペクトル値と比較するとほぼ同様な値になっている。

一方、城壁の基盤のH/Vスペクトルにおいては0.2秒と0.36秒に固有な値が見られる。城壁の上部で取れた記録について、H/Vスペクトルにおいて0.13秒と0.39秒に固有な値が見られ、EW方向にH/Vの値は大きい。城壁の崩壊した方向はほぼEW方向であったことを考慮すると、この結果は崩壊方向を裏付けている。

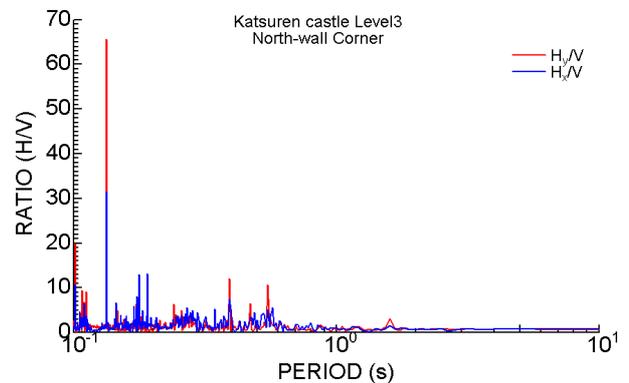


(a) 城壁上部

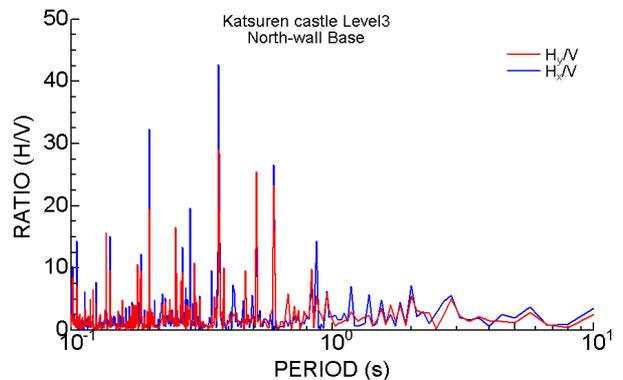


(b) 城壁基盤

図-16 Fourierスペクトル



(a) 城壁上部



(b) 城壁基盤

図-17 H/Vスペクトル

#### 4. 中城城址の計測結果に対する個別有限要素法による解析

中城城址の琉球石灰岩層や島尻層群の劣化や風化は、層内の地下水の影響に大きく依存していると考えられる。また、図-11のように、地震の影響による亀裂の広がりも見られた。個別有限要素法<sup>4)</sup>で、地震による外力と、雨量のデータを用いて、それらの影響による中城城址の岩盤の挙動を解析した。島尻層群の水分量の変化と地震力の影響を考慮できるように従来の個別有限要素法アルゴリズムを加えて、解析を行なった。解析に用いた物性値を表-1に、解析メッシュを図-18に示す。解析結果と計測変位の比較を図-19に示す。計測結果と解析結果は大変類似、同様な傾向を示している。したがって、雨と地震の影響を考慮した解析したが、亀裂の変位が変化するのは、この2つの要素が深く関係していると判断できる。

表-1 解析に用いた物性値

材料	$\lambda$ (MPa)	$\mu$ (MPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (kPa)	$\phi$ (°)	$\sigma_c$ (MPa)
石灰岩	900	900	25	-	-	-
泥岩	400	400	22	-	-	-
風化泥岩	300	100	20	-	-	-
不連続面(下部)	100	20	-	10	10	1
不連続面(縦)	0.02	0.02	-	10	10	0

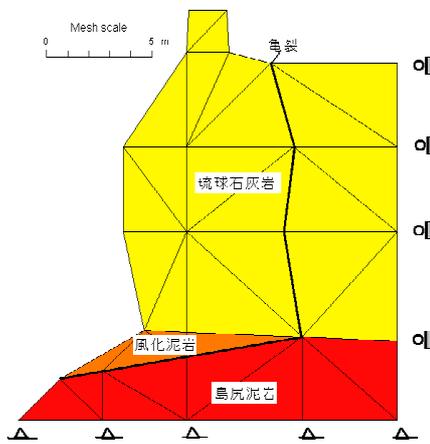


図-18 解析に用いたメッシュ

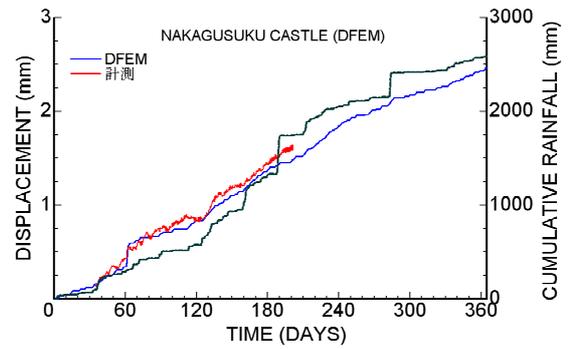


図-19 解析および計測亀裂変位の比較

#### 5. 結論

石造文化財の地震時および長期的安定性について動態観測するため開発した地震動計測システムと多重パラメータ動態観測システムを用いて、沖縄本島における石積文化財の一部に適用した。また、研究が初期段階であるが下記のような結論をつけることができる。

- 1) 多重パラメータ計測システムによって石造の長期的な挙動を動態観測することが可能である。
- 2) 石造文化財の地震時の応答を計測することが可能になった。
- 3) 地震力と雨量による岩盤の軟化を考慮した改良DFEM解析より計測変位を評価することが可能になった。

**謝辞:** 本研究の実施に関して、しまたて協会からの部分的な支援について感謝を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Aydan, Ö., Daido, M., Tano, H., Tokashiki, N., Ohkubo, K., A real-time multi-parameter monitoring system for assessing the stability of tunnels during excavation. *ITA Conference*, Istanbul, pp.1253-1259, 2005.
- 2) Aydan, Ö., Tani, H., Imazu, M., Ideura, H., Soya, M., The dynamic response of the Taru-Toge tunnel during blasting. *ITA Conference*, San Francisco (in press), 2015.
- 3) Aydan, Ö. and Tokashiki, N., The Off-Okinawa Island earthquake of February 27, 2010, *JSCE-EEC, Okinawa-Report*, 2010.
- 4) Aydan, Ö., Mamaghani, I.H.P., Kawamoto, T., Application of discrete finite element method (DFEM) to rock engineering structures, *NARMS '96*, pp.2039-2046, 1996.

### DEVELOPMENT AND APPLICATION OF DYNAMIC MULTI-PARAMETER MONITORING SYSTEM FOR HISTORICAL MASONRY STRUCTURES

Ömer AYDAN, Naohiko TOKASHIKI and Jun TOMIYAMA

The authors have been involved with the restoration of the various historical masonry structures as well as static and dynamic stability assessment of some natural monumental rock structures in Ryukyu Archipelago. The authors developed dynamic multi-parameter monitoring systems for assessing the response and stability of cultural masonry structures during earthquakes and in long-term. It is shown that the developed systems can be effectively used for such a purpose. The applications of the systems are still limited and further applications are needed.