

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：23903

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22254005

研究課題名(和文)ラクイラ震災被害における文化遺産建築の修復・補強と保護に関する調査・研究

研究課題名(英文) Research on restoration, strengthening, and protection of cultural heritage buildings damaged in L'Aquila earthquake

研究代表者

青木 孝義 (AOKI, Takayoshi)

名古屋市立大学・芸術工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：10202467

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,100,000円、(間接経費) 10,830,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、2009年にイタリアで発生した地震により被害を受けた文化遺産建築の被害調査を実施して、被害状況と応急処置方法を系統的に整理し、1970年代以降に文化遺産建築に対して行われたRC補強の効果を検証し、モニタリングにより補強前、補強途中の構造的安定性と補強後の補強効果を検証することにより、また、関連する国内外の文化遺産建築の調査を通して、文化遺産建築の有効な修復・補強方法、地震によるリスクから文化遺産建築を保護する方法に関する海外学術調査を実施したものである。

研究成果の概要(英文)：To develop a definitive guideline for the evaluation and mitigation of seismic risk to heritage buildings, heritage buildings damaged in the 2009 L'Aquila earthquake in central Italy were investigated.

Based on the investigation, the damage situation and necessary emergency measures were systematically categorized. The effect of strengthening work on heritage buildings by using reinforced concrete, undertaken since the 1970s, could not be verified. This finding shows that the structural health monitoring of heritage buildings should be performed not only to ensure structural stability before and during the strengthening work, but also to verify the strengthening effect after completion.

In addition, based on investigations of similar heritage buildings inside and outside of Italy, integrated knowledge-based approaches were developed for the restoration, strengthening, and protection of heritage buildings from seismic risk.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築構造・材料

キーワード：国際研究者交流 イタリア 建築構造・材料 文化遺産建築 組積造 保存修復 地震 構造ヘルスマニタリング

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) イタリア中部地震

2009年4月6日3時32分(現地時間)、ラクイラ(ローマから北東に約95km、人口約7万人のイタリア共和国アブルッツォ州ラクイラ県のコムーネのひとつで、ラクイラ県の県都かつアブルッツォ州の州都)(図1a)で発生したM6.3(USGS)の地震およびその直後の最大余震(4月6日4時37分、M5.1)により、290人以上の死者、1000人以上の負傷者、1万から1万5000棟の建物が被害を受けたとされている。アペニン山脈に沿って北西-南東方向に活断層が複数存在し、今回被災したイタリア中部アブルッツォ州では、1915年にアヴェッザーノ地震を経験し、イタリア国内でも地震危険度の比較的高い地域(図1b)である。この地震により、学校や病院などの公共施設、生産施設や兵舎、私有建物に加え、教会堂などの文化遺産建築が大きな被害を受けた。イタリア政府文化財省は、アブルッツォ州にある約1,000件の教会堂のうち約200件については何らかの補強が必要だということ进行调查するとともに、45の被災文化遺産建築のリストを作成しており、その修復・補強は急務となっている(写真1)。



(a) ラクイラ (b) 地震危険度  
図1 ラクイラと地震危険度



(a) 被災直後 (b) 応急処置  
写真1 アニエ・サンテ教会堂

### (2) イタリアの文化遺産建築の現状

アウグスタの飛行船格納庫(1917年建設開始、1987年国宝指定、写真2)は、世界中で現存するRCで作られた唯一の例であるが、鉄製大扉の重量による不同沈下などの影響で、屋根スラブと壁面には大きな亀裂が生じ、その構造的安定性が危惧されている。モンドヴィ近郊のヴィコフォルテ教会堂(1596年建設開始、1731年ドーム建設、1880年国宝指定、写真3)は、宗教建築として建設され、時代・都市・様式・文化を代表する重要建築物で、長軸37.15m、短軸24.80m、高さ16.60mの世界最大規模の楕円形ドームを持つ。建設当初から不同沈下やドームの自重による進行中の亀裂により、ドームの崩壊に関する構

造的安定性が脅かされてきた。イタリアには、この他にも文化遺産建築(RC建築や組積造建築)が数多く残っているが、様々な要因により構造的安定性が脅かされている。



写真2 飛行船格納庫 写真3 ヴィコフォルテ教会堂

## 2. 研究の目的

以上を背景として、本研究は、被災地域における文化遺産建築の被害調査を実施して被害状況と応急処置方法を系統的に整理し、1970年代以降に文化遺産建築に対して行われたRC補強の効果を検証し、モニタリングにより補強前、補強途中の構造的安定性と補強後の補強効果を検証することにより、また、関連する国内外の文化遺産建築の調査を通して、文化遺産建築の有効な修復・補強方法、地震によるリスクから文化遺産建築を保護する方法について調査・研究することを目的としている。

## 3. 研究の方法

海外共同研究者(パドヴァ大学C. Modena、トリノ工科大学D. Sabia)と協力して、これまでの研究成果を発展させて、文化遺産建築の調査・研究を下記の6項目について進める。

### (1) 被災状況調査と応急処置方法の整理

被災地域における文化遺産建築の被害調査を実施して、被害状況と応急処置方法を系統的に整理する。また、1970年代以降に文化遺産建築に対して行われたRC補強の効果を評価し検証する。

### (2) 劣化現況調査

劣化現況調査・診断のための手法が確立されていない歴史的な組積造建築や80年を経過したRC建築に対して、積極的にコンクリート工学の分野で使用されている各種非破壊・微破壊検査技術の適用を試み、ラクイラの文化遺産建築、ヴェネチアとその潟にある組積造建築などの劣化現況調査を実施する。従来の研究で検討している試験方法や、ASTM、RILEM TC 127-MSで規定されている試験方法を適用することにより、80年を経過したRC建築や組積造文化遺産建築の調査・診断のための非破壊・微破壊検査技術の確立を試みる。

### (3) 振動調査

多点同時常時微動計測を実施して、文化遺産建築の固有振動数、固有モード、減衰定数などの振動特性の同定を行う。特にRC飛行船格納庫については、補強工事前のデータと比較し、補強効果の検証を行う。

#### (4) モニタリング調査

ラクイラの文化遺産建築については、補強前、補強途中の構造的安定性と補強後の補強効果を検証するために静的・動的モニタリングを実施する。RC 飛行船格納庫については、予備調査として温度、変位、傾斜、ワイヤーのひずみのモニタリングを2003年11月末から開始しているが、補強工事完了を待って温度、変位、傾斜のモニタリングを再開する。

#### (5) 構造解析法の提案と構造解析

構造解析法、損傷同定法を提案するとともに、構造解析により対象建築の構造特性の把握、耐震性能の評価を行う。

#### (6) 補修・補強方法の提案

劣化現況調査・診断と耐震性能の評価、モニタリング結果に基づき、材料の補修や構造補強方法の提案を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 被災状況調査と応急処置方法の整理

2009年4月6日に発生したイタリア中部地震、2012年5月20日に発生したイタリア北部地震における文化遺産建築について、主に目視による観察を行い、被災状況の現状を記録するとともに、応急処置方法を調査した。応急処置方法としては、壁面の転倒を防止するための方杖(写真4a)、面外方向崩落防止のための形鋼や木材による補強(写真4b、4c)、柱の爆裂を防止するための荷造り用PPバンドによる柱巻き(写真4d)、ドームの崩壊を防ぐためのワイヤー巻き(写真4e)、アーチ等の壁面開口部の崩落防止(写真4f)に大別できることが分かった。1970年代以降に文化遺産建築に対して行われたRC補強は、既設との接合が不十分であり、逆に質量が増加したことにより被害が増大したと推定された。



#### (2) 劣化現況調査

ラクイラの文化遺産建築に加え、不同沈下

や塩害など厳しい条件下にあるヴェネチアの文化遺産建築(リベルタ橋、ブラーノ島のサン・マルティーノ教会堂鐘楼、地盤)の調査を目視や非破壊、微破壊試験により実施した。微破壊検査法として日本では用いられていないフラットジャッキ(写真5)は、組積造の存在応力、応力-ひずみ関係を得る上で有効な方法であることが確認された。

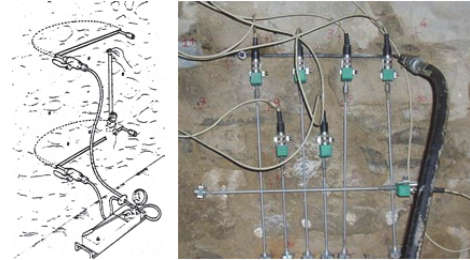


写真5 フラットジャッキ

石材、煉瓦、モルタルのサンプルを採取し、分析を行った。ラクイラの崩壊した建物のモルタルには、セメントや石灰などの結合材が入っていないことが明らかとなった。ブラーノ島の採取サンプル(写真6)の粉末X線回折(XRD)測定と定性分析により、析出塩の種類が海からの距離により異なることが確認された。



写真6 析出塩

#### (3) 振動調査

RC 飛行船格納庫の多点同時常時微動測定による振動調査を行い、改修工事前のデータと比較して改修工事の効果を検証した。

改修工事に伴い、階段室を除く桁行方向の周期は1階の壁を撤去しピロティ化(写真2)したことにより長周期化し、梁間方向の周期は基礎補強工事(写真7)により門型フレーム脚部の固定度が上がったことでわずかに短周期化した(図4、5)。非損傷側(柱⑬)構面に対する損傷側(柱⑮)構面の面内剛性の比が、改修工事前は17.3%だったが、亀裂のエポキシ補修(写真8)により90.1%に向上し、外壁面の一体性が増した。門型フレームは梁を介して一体とならずに、東側柱(およびバットレス)と西側柱(およびバットレス)でそれぞれ梁間方向に独立した挙動を示した。1階床レベルで計測された波形は、改修工事前は柱番号によって波形が異なっていたが、改修工事(基礎補強工事)後は柱番号によらずほぼ同一の波形を示し、1階床面の一体性が向上したことが確認された。

#### (4) モニタリング調査

2010年に、ラクイラの文化遺産建築(市民の塔、サン・シルヴェストロ教会堂、サンタゴスティーノ教会堂ほか、図6)の補強前、補強途中における構造的安定性、補強効果を検証するための静的・動的モニタリングシステムを設置し、モニタリングを開始した。

図7にサンタゴスティーノ教会堂(SA)に設

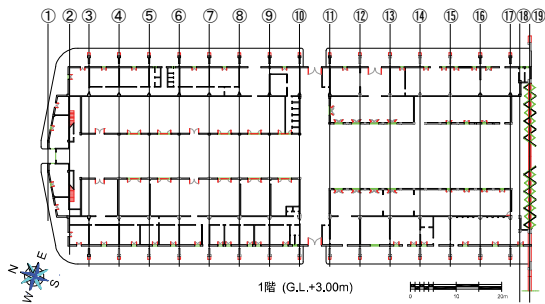


図2 RC飛行船格納庫平面図と柱番号割付

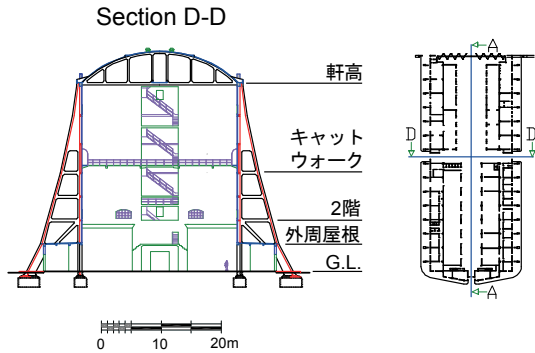
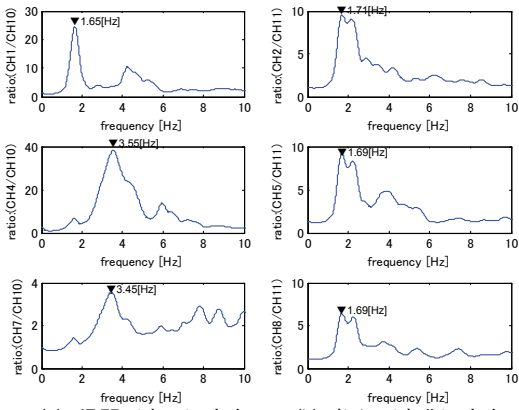


図3 RC飛行船格納庫断面図と柱番号割付

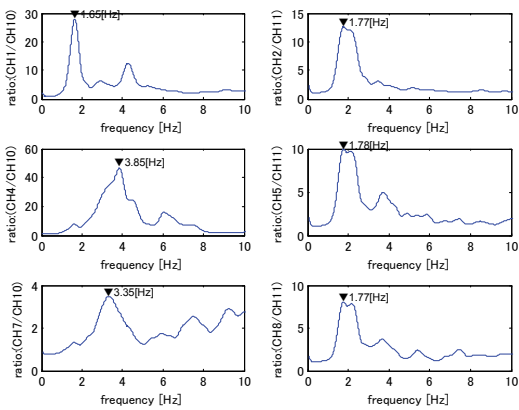


写真7 基礎補強工事

写真8 外壁亀裂エポキシ補修



(a) 梁間(東西)方向 (b) 桁行(南北)方向  
図4 伝達関数(柱⑮亀裂補修外壁構面)



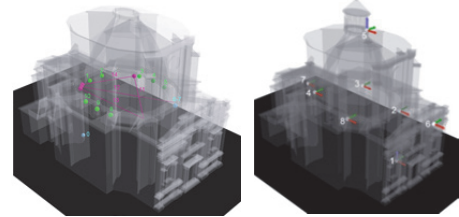
(a) 梁間(東西)方向 (b) 桁行(南北)方向  
図5 伝達関数(柱⑬非損傷構面)

置したセンサーの位置を、図8に室内気温とひび割れ幅の経時変化を示す。ひび割れ幅は、気温の日変動および季節変動によって変化しており、日変動では気温が高くなるとひび割れ幅が小さくなり、その変動幅は0.01mm程度である。季節変動では気温が高くなるとひび割れ幅が小さくなり、その変動幅は0.5mm程度である。南北方向・東面⑧のひび割れ幅の変動が若干大きいものの、コーニスレベルのひび割れは安定していると考えられる。

市民の塔(TC)のモニタリング結果(図9)より、塔が市庁舎側に倒れ固有振動数が変化



図6 ラクイラのモニタリング対象建物とセンサー



(a) 静的モニタリング (b) 動的モニタリング  
図7 サンタゴスティーノ教会堂のセンサー位置

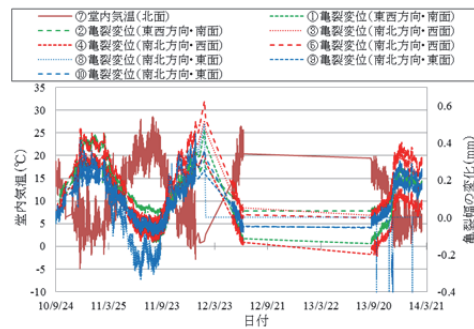


図8 室内気温とひび割れ幅の経時変化 (SA)

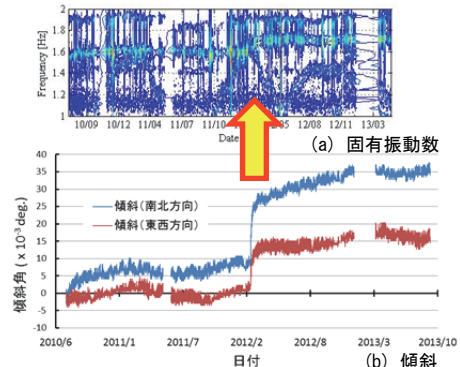


図9 市民の塔の傾斜と固有振動数の経時変化

したことが確認された。また、RC 飛行船格納庫のモニタリング結果 (図 10) より、改修工事後においても温度上昇に伴い、全体的に内側・扉側に傾斜し、大梁のひび割れが進行していることが明らかとなった。

また、2012年9月に、ブラーノ島のサン・マルティーノ教会堂鐘楼に静的モニタリングシステムを、ギルランディーナ鐘楼 (モデナ市、世界遺産、図 11a) に動的モニタリングシステムを設置した。

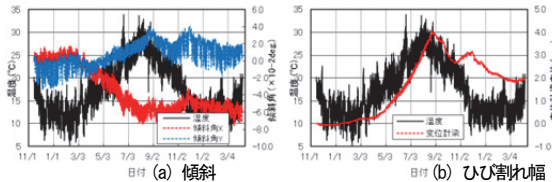


図 10 飛行船格納庫の気温と傾斜、ひび割れ幅の経時変化

#### (5) 構造解析法の提案と構造解析

組積造建築の耐震診断法に関する研究 (雑誌論文④)、損傷同定法に関する研究 (学会発表①) を実施した。

常時微動により同定された動特性パラメーター (図 11b) により、地盤を含むギルランディーナ鐘楼の構造解析モデルを構築し (図 11d)、2013年1月25日に発生した地震 (図 11c) の応答解析を実施した。解析結果はモニタリング結果と良く一致し、モデルの妥当性が検証されたため (図 11e)、今後は耐震性能の評価を行う予定である。

また、関連する文化遺産建築として、ブータンのパガ・ラカン寺院の材料実験、壁の引き倒し実験と構造解析、みなとの近代化遺産である灯台の振動実験 (図 12) と構造解析を実施し、構造特性を明らかにした。

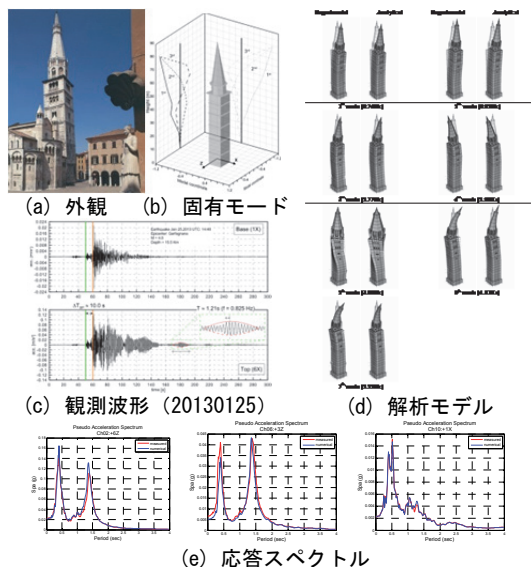


図 11 ギルランディーナ鐘楼の実験、計測と構造解析

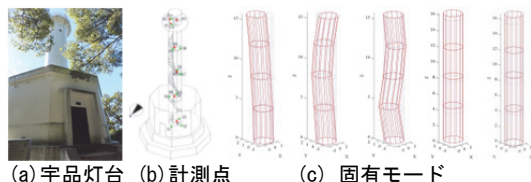


図 12 宇品灯台の振動実験と固有モード

#### (6) 補修・補強方法の提案

海外共同研究機関のパドヴァ大学と、イタリアの一般的な組積造建築に使用されている壁体の補強方法と補強効果を検証するための振動台実験 (面外方向) を実施した (写真9)。

これらの研究成果は、第 11 回日伊科学技術協力合同委員会 (2011. 10. 19) で発表するとともに、「日本におけるイタリア 2012」でシンポジウム (2011. 11. 27) を開催し、イタリア大使館の要請を受けイタリア文化会館で講演 (2013. 5. 16) を行い公表している。



写真 9 面外方向補強効果検証実験

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① 日高みなみ、佐藤大輔、青木孝義、高瀬剛、RC 造灯台の振動特性、コンクリート工学年次論文報告集、査読有、Vol.36、2014 (印刷中)
- ② M. Miyamoto, Pema, T. Aoki, Y. Tominaga, Pull-down Test of the Rammed Earth Walls at Paga Lhakhang in the Kingdom of Bhutan, Proc. of the International Conference on Preservation, Maintenance and Rehabilitation of Historical Buildings and Structures, 査読有, Vol.1, 2014, 303-311  
DOI: 10.14575/g1/rehab2014/033
- ③ F. Lorenzoni, T. Aoki, F. Casarin, C. Modena, F. da Porto, D. Sabia, V. Sumini, Post-Earthquake Assessment of the Civic Tower in L'Aquila : Ambient Vibration Tests and Structural Health Monitoring, Proceedings of the Structural Analysis of Historical Constructions SAHC2012, 査読有, 2012, 1612-1620
- ④ 中村光, 青木孝義、組積造建築物の耐震診断法に関する研究、構造工学論文集、査読有、Vol.58B、2012、85-90  
<http://ci.nii.ac.jp/els/110009706506.pdf>
- ⑤ T. Aoki, N. Yuasa, H. Hamasaki, Y. Nakano, N. Takahashi, Y. Tanigawa 他 4 名, Safety Assessment of the Sanctuary of Vicoforte, Italy, Journal of Materials and Structural Integrity, 査読有, Vol.5, No.2/3, 2011, 215-240  
DOI: 10.1504/IJMSI.2011.041935
- ⑥ K. Kawashima, O. Aydan, T. Aoki, I. Kishimoto, K. Konagai, T. Matsui, J. Sakuta, N. Takahashi 他 2 名, Reconnaissance Investigation on the Damage of the 2009 L'Aquila, Central Italy Earthquake, Journal of Earthquake Engineering, 査読有, Vol.14, Issue 6, 2010, 817-841  
DOI: 10.1080/13632460903584055

〔学会発表〕(計14件)

- ① H. Azegami, Damage identification of building using vibrational eigen value pairs, 8th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, 2014.5.27, Gyeongju, Korea
- ② 橋本大地、レンガの塩類劣化と立地条件に関する基礎的検討、日本建築学会東海支部研究報告集、2014.2.17、名古屋大学
- ③ J.Y. Zhang, Structural Parameter Identification of Low- and Mid-Rise Buildings Subjected to Earthquakes, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics & 4th International Symposium on Computational Mechanics, 2013.12.11, Singapore
- ④ 岸本一蔵、イタリア・ラクイラ地震により被災した文化遺産建築(その6)組積造建築物の応急補強事例、日本地震工学会大会2013、2013.11.12、東京・国立オリンピック記念青少年総合センター
- ⑤ 青木孝義、イタリア・ラクイラ地震により被災した文化遺産建築(その7)サンタゴスティーノ教会堂の静的・動的モニタリング結果、同上
- ⑥ 松井智哉、イタリア・ラクイラ地震により被災した文化遺産建築(その8)市民の塔の静的モニタリング結果、同上
- ⑦ 高橋典之、イタリア・ラクイラ地震により被災した文化遺産建築(その9)サン・シルヴェストロ教会堂の静的・動的モニタリング結果と簡易振動モデルの構築、同上
- ⑧ 中村光、組積造建築物の振動特性に関する研究—東急鯨バス女子寮の常時微動測定—、日本建築学会東海支部研究報告会、2013.2.19、三重大学
- ⑨ F. Casarin, Structural Health Monitoring of historical buildings: preventive and post-earthquake controls, 5th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, 2011.12.12, Cancun, Mexico
- ⑩ 高橋典之、イタリア・ラクイラ地震により被災した文化遺産建築(その4)サン・シルヴェストロ教会堂のひび割れ状況と静的モニタリング結果、日本地震工学会大会2011、2011.11.11、東京・国立オリンピック記念青少年総合センター
- ⑪ 青木孝義、イタリア・ラクイラ地震により被災した文化遺産建築(その5)サンタゴスティーノ教会堂のひび割れ状況と静的モニタリング結果、同上
- ⑫ 青木孝義、イタリア・ラクイラ地震により被災した文化遺産建築(その1)調査概要とモニタリングシステム、日本建築学会大会2011、2011.8.23、早稲田大学
- ⑬ 奥田耕一郎、イタリア・ラクイラ地震により被災した文化遺産建築(その2)調査対象建物の概要、同上
- ⑭ 岸本一蔵、イタリア・ラクイラ地震によ

り被災した文化遺産建築(その3)静的モニタリングの概要と結果、同上

〔図書〕(計1件)

- ① J.W. Bull (Editor), Saxe-Coburg Publications, Computer Analysis and Design of Masonry Structures, 2014 (印刷中)

〔その他〕

報道関連情報

- ① Esperti giapponesi al lavoro per monitorare la Ghirlandina, Una memoria virtuale per la Ghirlandina installati i chip utilizzati anche a L'Aquila, il Resto del Carlino Modena, 2012.07.26
- ② L'EX HANGAR PER DIRIGIBILI: Tecnici giapponesi visitano la struttura allo studio progetto di consolidamento, LA SICILIA, 2012.11.14

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

青木 孝義 (AOKI, Takayoshi)  
名古屋市立大学・大学院芸術工学研究科・教授  
研究者番号: 10202467

### (2) 研究分担者

谷川 恭雄 (TANIGAWA, Yasuo)  
名古屋大学・名誉教授  
研究者番号: 70023182  
中埜 良昭 (NAKANO, Yoshiaki)  
東京大学・生産技術研究所・教授  
研究者番号: 10212094  
湯浅 昇 (YUASA, Noboru)  
日本大学・生産工学部・教授  
研究者番号: 00230607  
岸本 一蔵 (KISHIMOTO, Ichizo)  
近畿大学・建築学部・教授  
研究者番号: 40234215  
丸山 一平 (MARUYAMA, Ipppei)  
名古屋大学・環境学研究科・准教授  
研究者番号: 40363030  
高橋 典之 (TAKAHASHI, Noriyuki)  
東北大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 60401270  
松井 智哉 (MATSUI, Tomoya)  
豊橋技術科学大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 20402662  
濱崎 仁 (HAMASAKI, Hitoshi)  
独立行政法人建築研究所・主任研究員  
研究者番号: 30370703  
迫田 丈志 (SAKUTA, Joji)  
堀江建築工学研究所  
研究者番号: 70455806

### (3) 連携研究者

奥田 耕一郎 (OKUDA, Koichiro)  
早稲田大学・理工学術院・講師  
研究者番号: 50454103