

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350478

研究課題名(和文) 容器やシェルによる重要構造物の耐震性能に及ぼす長期劣化や温度変化の影響検討

研究課題名(英文) Study on the influence of long-term deterioration and thermal effects on seismic performance of important structures by container or shell

研究代表者

武藤 厚 (Mutoh, Atsushi)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：90278325

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：エネルギー関連や各種の重要構造物の基本形式の一つであるRC造容器・シェル構造に関し、長期劣化対策や耐震性能の向上に関する基本データの分析や評価手法に関する基本的検討を実施した。

1) 実機大型シェル構造を対象に、竣工から5年間に渡る計測と分析を実施し、変形と振動特性に関する基本データを得ることが出来た。2) 予測・評価手法の開発を目標とした、数値シミュレーションの手法の検討を実施し、検証を行った。3) これらの構造物の補強と高性能化を目的としたカーボンファイバーシートの利用の検討を実施した。具体的にはRCコンクリートアーチ試験体に対して動的な破壊実験を実施し、効果を定量的に把握することが出来た。

研究成果の概要(英文)：In this research, fundamental studies on basic data analysis and evaluation method concerning long-term deterioration countermeasures and improvement of earthquake resistance performance were carried out on RC container and shell structure, which is the basic form of energy related and various important structures.

1) Measurement and analysis over five years from the construction were carried out for the actual large shell structure, and basic data on deformation and vibration characteristics was obtained. 2) Study on the method of numerical simulation aiming at the development of prediction / evaluation method was conducted and its verification was also done. 3) Study on utilization of carbon fiber sheet for reinforcement and high performance of these structures was carried out. Specifically, a dynamic destructive experiment was performed on the RC concrete arch test body, and the effect was quantitatively grasped.

研究分野：構造工学

キーワード：建造物防災 産業容器等の安全性向上 鉄筋コンクリート造 シェル構造 地下埋設構造 エネルギー  
関連施設 耐震・耐久性 長寿命化

### 1. 研究開始当初の背景

大型の産業用容器構造物へのニーズは、老朽化した施設のリプレースや備蓄増強により増加が予想され、地域防災の観点からも重要である。現在、以下のような問題点が指摘されている。1) 大地震に対する十分な安全性確保、2) 長期の使用に対する安全性確保、3) アクシデント等の苛酷な事象時の限界特性把握とフェイルセーフ確保、4) 周辺環境への配慮。このような問題のうち、1)～3)に関しては、既存の施設の評価（診断と補強案検討）と、新規の設計に対する提言の双方が問題となる。代表者は、上記の観点から各種産業用容器構造に関して、主として大型のエネルギー貯蔵関連や廃棄物保管施設の飛躍的な安全性向上と周辺環境への配慮を目指した「完全埋設式」の構造形式に関する各種基本的なスタディを目標とした基本検討を実施してきた。また、国内では近年、50万klクラスのLNG貯蔵タンクが都市部近郊での安全性向上のために数例建設されるに至っている。本申請代表者は、約20年前より、この種の構造の第一号となる地下式LNGタンクの技術開発に際して、構造安全性検証にメンバーとして携わり、その後、1995年の兵庫県南部地震後は、同種の構造に関連した耐震性能評価や耐熱に関する研究を、主としてソフトウェア開発と応用の観点から実施してきた。

### 2. 研究の目的

耐久性の評価や構造設計時の合理的な安全率の設定の為に性能評価に関連し、コンクリートの打設→収縮→繰り返し温度変化（年間）＋クリープによる、使用期間中の変化が構造性能に与える影響が大きい可能性に着目し、その影響の分析と、その点を包含した構造的な補強対策の検討を、数値解析による予測モデルの構築と基礎実験により試みるものである。これらの現象が構造物の地震時／何らかのアクシデント発生時の損傷・耐力特性に与える影響としては、損傷進展と強度低下（危険側）の可能性もある。また、特に耐震性能の推定には慎重な推定が必要と考えられるが、これらの点に着目した具体的な推定手法に関する研究は殆ど見当たらないのが現状である。本研究では、これらの構造性能の変化を定量的に分析・評価するための数値解析手法の基礎技術の開発をし、実測を含めて検証する。また、これを地震荷重に拡張する。並行して、既存の施設の補強や新設に際して比較的簡便な施工で高い補強効果が期待できるカーボンファイバシートによる補強効果に関する性能比較実験を縮小アーチ試験体による動的破壊実験により実施する。いずれも初めての試みで、容器等の安全性向上に直結する改良を提案する。

### 3. 研究の方法

①容器構造に関する使用期間中における損傷・耐力レベルの変化の評価手法の開発；

竣工2年目までの測定継続中の実機大型シェルの詳細計測（変位・振動特性）の5年間の実行と、数値解析モデルの開発によるシミュレーションとの対応（数値解析プログラムの開発（機能追加）を含む）。②耐震性能検討までの拡張；動的な問題にまで数値解析手法を展開することによる基本検討と（定式化・ソフト開発）、具体的サンプルに対するシミュレーションによる分析の実行。③カーボンファイバシートによる補強効果に関する検討；鉄筋コンクリート（RC）アーチを用いた動的破壊実験／数値解析による検証は実施済であるが、比較的簡便な施工で高い補強効果が期待できるカーボンファイバシートによる補強効果に関する性能比較実験を、実験により比較し、その効果を定量的に評価・解析モデルを構築・公開する。

### 4. 研究成果

(1) 長期劣化対策や耐震性能の向上に関する基本データの分析

ここでは最新の大型RCシェルの建設例を対象として、振動特性と建設から数年の変形特性を調査することにより、直接構造基本特性を把握し、構造設計時の仮定との差異を確認することにより、今後の構造設計の資料を得ようとした試みの概要について示す。



写真-1 検討対象の外観

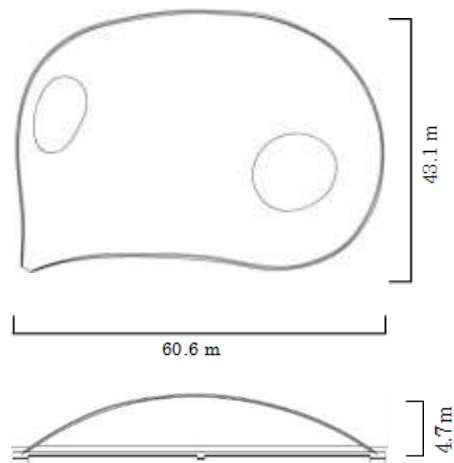


図-1 検討対象の形状

RCシェル構造は、一般に高い耐荷力と耐震性を有する。一方、偏平や薄肉シェルにおいては、振動特性、乾燥収縮・クリープ及び温度応力等において未解明の点もあり、耐震設計

の際の安全率の設定には十分な検討を要する。本研究での対象建築物は、2010年7月に竣工した美術館で、自由曲面形状に大開口を有する。本研究ではまず、振動性状の把握のために加振実験を実施したが、対象構造物のルーフシェルは仕上げや二次部材が無く、シェル構造本体のみの振動特性の把握が可能である。また、竣工直後の劣化の無い状態での測定を行うことが可能であり、経時変化を評価することが可能である。

#### 測定結果の概要

1次モードに関しては、予備解析のモードピークと、測定波の位相との対応により同定した。対応する固有振動数は、低周波(0~1 Hz)をカットした波形のスペクトルより3.78(Hz)と推定した。2次モードについても同様に推定し、対応する固有振動数は4.63(Hz)と推定した(表-1)。

表-1 実測値と固有値解析の固有振動数

	固有振動数(Hz)(固有周期(s))	
	実測による推定値	固有値解析結果
1次	3.78 (0.26)	2.701 (0.370)
2次	4.63 (0.21)	3.102 (0.322)

#### ・構造設計時の仮定との整合性に関する検討

先ず、構造設計時のコンクリートの物性値(ヤング係数)と実際の構造物に近いと考えられるコア抜き試験体の物性値に基づく固有値解析の結果と実測値を比較する。比較結果を表-2に示すが、実測による固有振動数は、コア抜きによる物性値に基づく固有値に比較的良い対応を示すことが確認された。

表-2 事後解析を含めた固有振動数の比較

	固有振動数(Hz)(固有周期(s))		
	実測による推定値	固有値(設計用物性値*1)	固有値解析結果(コア抜き試験体による物性値*2)
1次	3.78 (0.26)	2.701 (0.370)	3.616 (0.276)
2次	4.63 (0.21)	3.102 (0.322)	4.155 (0.240)

\*1 ヤング係数:21.367 (kN/mm<sup>2</sup>)  
\*2 ヤング係数:37.0 (kN/mm<sup>2</sup>)

次いで、複合非線形解析を実施した結果について示す。本報では、kobe-NS+EW+UDに対する応答を示す。なお、ここでは、構造設計段階での想定と、コア抜き試験体から得られた実際の物性を設定した場合の地震応答の差異について検証する。Z方向の最大値の比較を表-3に示す。

劣化の無い新設のRCシェルの駆体のみ振動特性について、高感度のセンサーを用いて振動測定を実施し、2次モードまで同定

表-3 最大応答値の比較

	最大加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	最大速度 (cm/s)	最大変位 (cm)
①設計用減衰を用いた解析(レーリー減衰:1次-10Hz2%)	1401.8	86.88	5.097
②測定値を元にした減衰定数を用いた解析(レーリー減衰:1次0.80%・2次0.65%)	2217.5	100.4	6.186
	比率		
①/②	1.58	1.16	1.20

することができた。また、一波ではあるが地震応答解析を試み、その結果、1) 実測で得られた固有振動数とコア抜き試験体による物性値を用いた固有値解析結果は良い一致を示す。2) 減衰定数は1次で0.8%・2次で0.65%と小さい(仕上げや二次部材が無く、竣工直後、シェル本体内部での振動レベル程度)3) Kobe波に対する応答変位は一般的な2%の減衰に対し約20%程度増加する可能性があるとして示された。

建設時のコンクリートの打設→使用後の経年変化(使用期間における収縮→繰り返し温度変化+クリープ)が構造的な性能に与える影響が大きい可能性に着目し、その影響の分析を試みた結果について概要を示す。

#### (2) 現象の予測手法の検討と事例

##### ・予測される現象

現象としての時間軸による変形の進行の概念を図-2に示す。上記の現象が構造物の地震時/何らかのアクシデント発生時の損傷・耐力特性に与える影響としては、損傷進展と強度低下(危険側)の可能性がある。また、特に耐震性能の推定には慎重な推定が必要と考えられるが、これらの点に着目した具体的な推定手法に関する研究はなく、今後の劣化対策・保守を含んだ構造設計時の安全率の設定等に関するニーズに答えられない現状である。

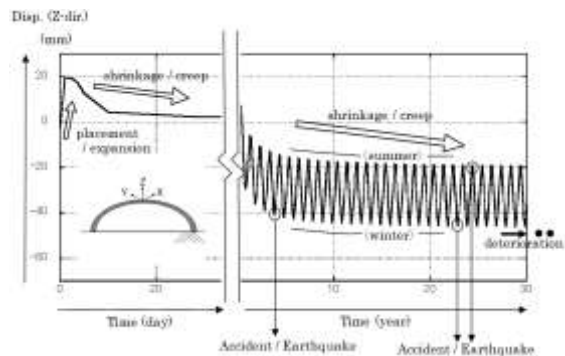


図-2 施工～使用期間中における変形の進行

静的荷重に対する影響の概念を図-3に示す。

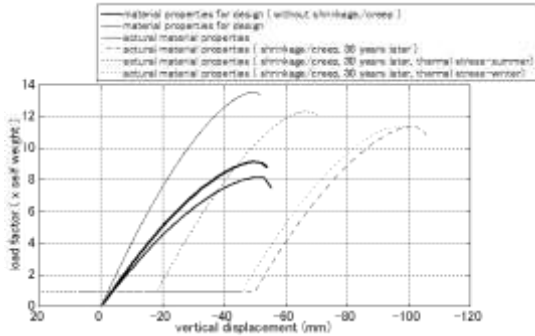


図-3 静的な耐荷力に関する影響

上記の図-2~3に模式的に示した構造性能の変化を、定量的に分析・評価するための数値解析手法の基礎技術の開発をし、実測を含めて検証することを第一の目的とした。

・計測結果と評価

本論の数値解析では、温度応力・乾燥収縮・クリープの影響をシミュレーションする。温度応力は建設現場の温度変化を測定し、コンクリートの収縮は材料実験によりモデル化を行った。材料特性は構造設計と実際の材料実験より得られた値を用いた(表-4)。

表-4 設計時と建設直後のコンクリート物性値

	design (MPa)	actual (MPa)
compressive strength (tested)	30.0	45.2
tensile strength (estimated)	3.0	4.5
Young's modulus (estimated)	21400	37000

図-4に最大変位点における型枠撤去後5年までの測定値と解析結果の変位時刻歴の比較を示す。

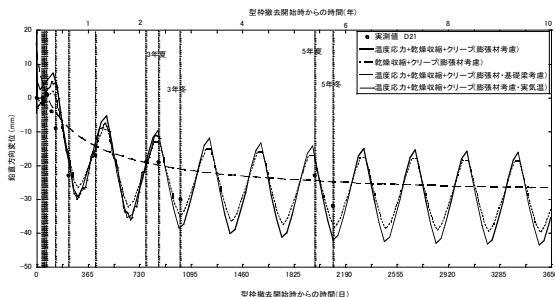


図-4 変位図(解析結果)

・地震応答性状に及ぼす影響の検討

変位測定と数値解析結果の比較より、変位時刻歴は型枠撤去後5年の測定まで良い一致を示している。さらに、変位時刻歴の比較から、乾燥収縮・クリープの影響に比べ、温

度応力による影響をより強く受ける可能性があると推測された。

次に、入力地震波として KOBE-JMA 波 (NS+EW+UD, PGA817.82-NS) を用いた応答解析の結果を示す。1次モードピーク点での最大応答の比較を表-5に示す。

表-5 地震応答性状に及ぼす影響の推定

Model	Max. acc. (cm/s <sup>2</sup> )	Max. disp. (cm)
material properties for design	1242 (1.00)	3.57 (1.00)
actual material properties	853 (0.69)	1.37 (0.38)
30 years after construction	1184 (0.95)	2.45 (0.69)
30 years after construction (summer)	1082 (0.87)	1.95 (0.55)
30 years after construction (winter)	1171 (0.94)	2.71 (0.76)

・まとめ

新たに建設された偏平の鉄筋コンクリートシェルの測定と解析により変形特性の推定を行った。また、静的および動的終局強度の温度応力・乾燥収縮・クリープの影響の評価を例として試みた。これらにより、構造設計時の安全率に関する基礎的な検証資料を得ることが出来、構造特性に与える影響の推定の検証の手法も提案することが出来、合理的な安全率を検討する一助とすることが出来た。一方、この内容は、設計強度とコンクリートの実強度での相違、シミュレーション手法の評価など、多くの未解決な問題を抱えており、継続的な検討が必要であろう。

(3) 補強と高性能化を目的としたカーボンファイバーシートの利用の検討

・比較対象としてのRCアーチの実験

RC系の曲面構造における動的な複合非線形挙動の解明と数値解析手法の検証を目的として、シェルに比して1次元リダクションしたアーチを取り上げて振動破壊実験及び数値解析による評価を試みた。なお、本稿では両端ピン支持の円弧形状とし、先ず既往のシェルで見られるシングル配筋を設定した。

図-5に示すような、断面の中央に一段に配筋したアーチを対象とした。

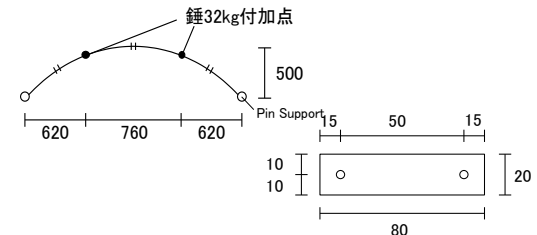


図-5 試験体概要(シングル配筋)

数値解析において初期不整を考慮するため、振動実験を実施する前に、試験体を等倍で写し取り詳細に形状を計測した。図-6 に計測の様子と計測結果を示す。

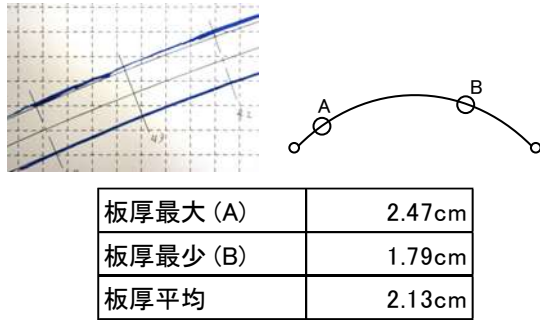


図-6 形状不整計測

表-6 に材料試験の結果を示す。なお、材料試験の結果は各々の供試体 3 体の平均値である。以下に示す実験後の比較解析においては、この物性値を使用した。

表-6 材料物性値(シングル配筋)

モルタル		鉄筋	
ヤング係数	19663N/mm <sup>2</sup>	ヤング係数	204000N/mm <sup>2</sup>
ポアソン比	0.167	ポアソン比	0.3
圧縮強度	34.55N/mm <sup>2</sup>	降伏点	563.73N/mm <sup>2</sup>
引張強度	3.46N/mm <sup>2</sup>		

錘を載荷後にスイープ加振を行い、続いて地震波を入力した(図-7)。地震波としては JMA-Kobe 波を時間圧縮したものを 0.25 倍で入力後、事前解析において破壊発生と予測した 1.0 倍を入力した(NS+UD2 方向)。

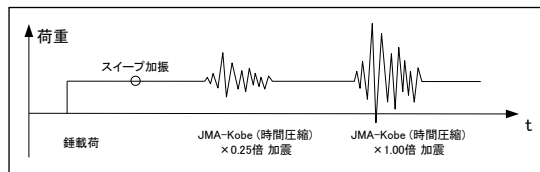


図-7 加振計画(シングル配筋)

表-7 には固有振動数に関して、実験値、予備解析、事後解析の比較で示す。実験で観察された固有振動数が同定した物性値を用いた数値解析による値と異なった要因として、試験体に錘を載荷する際に発生したひび割れの影響などが考えられる。

表-7 固有値比較結果

		実験値	予備解析	事後解析	
				完全形状	形状不整考慮
1次	固有振動数 (Hz)	3.22	4.56	4.57	4.85
	固有周期数 (s)	0.31	0.22	0.22	0.21

図-8, 9 には、JMA-Kobe 1.0 倍加振時の 1 次モードピーク点における加速度、変位応答時刻歴を実験と数値解析との比較を示す。こ

こで、変位の実験値は測定した加速度を数値積分して得られたものである。

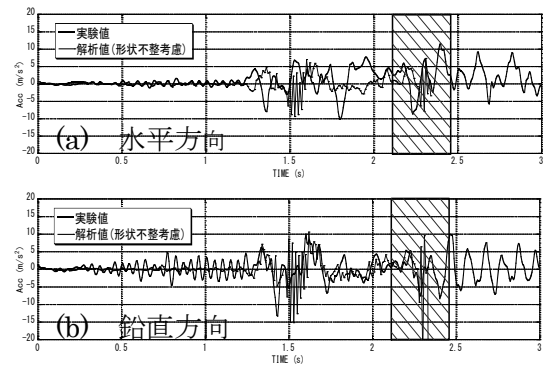


図-8 加速度応答時刻歴(1次モードピーク点)

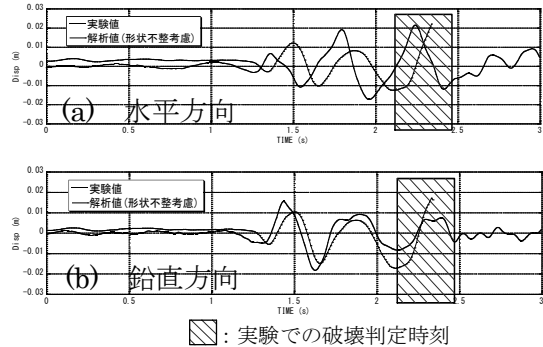


図-9 変位応答時刻歴(A2)

実験における破壊時刻は図 8, 9 の時刻歴に加え映像(本稿未掲載)から判断すると、図中の斜線部(2.0~2.5秒)と判定され、数値解析による不安定発生とほぼ同時刻で発生した。完全形状の試験体において破壊発生を推定した 1.0 倍加振時では、実験においても破壊が発生した(図-10)。破壊領域は小さく、全体の構造不安定には至っていない。



図-10 破壊モード

図-11 には M-N 相関関係を示す。図中の太実線は RC 柱の軸力+1 曲げの包絡線を示すが、RC アーチに対する破壊までの数値解析結果は、この包絡線と一定の対応が見られる。

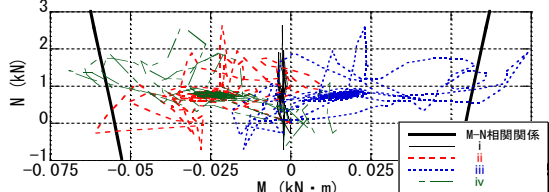


図-11 M-N 相関関係

・炭素繊維シートによる補強効果の検討

次に、炭素繊維シート（以降CFシート）を用いて補強をしたCFRCアーチの補強効果について示す。用いたCFシートの物性値を表-8に示す。図-12の様に、エポキシ樹脂をアーチ内周面に塗布後、CFシートを貼り、その上からエポキシ樹脂で塗り重ね接着した。

表-8 炭素繊維シート材料物性値

繊維目付 [g/mm <sup>2</sup> ]	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張弾性率 [N/mm <sup>2</sup> ]	設計厚さ [mm]
0.0003	3400	2.30×10 <sup>5</sup>	0.167

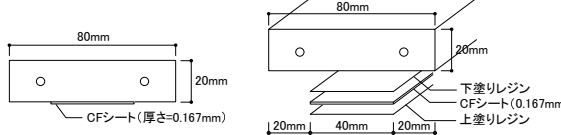


図-12 CFシートの接着

図-13に損傷結果を示す。CFRCアーチでは内周面には観測されず大幅に抑制された。

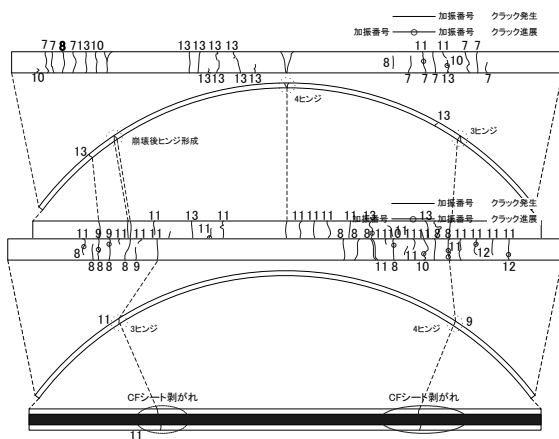


図-13 クラックの発生状況

次に応答変位であるが、CFRCアーチでは最大変位で30%程度の抑制を確認した。

・まとめ

RCアーチとCFRCアーチの振動破壊実験を実施し、動的な非線形挙動の把握が出来た。補強を施したCFRCアーチでは、無補強に対し入力加速度が約1.7倍まで耐え、変位は約30%程度に減少する結果となり補強効果が十分に確認された。今後、実験結果を基に数値解析手法の検討・改良を行う予定である。

(4) 研究全体のまとめ

各種の重要構造物の基本形式の一つであるRC造容器・シェル構造に関し、長期劣化対策や耐震性能の向上に関する基本データの分析や評価手法に関する基本的検討を実施し、予定内容をほぼ終了することが出来た。

1) 実機大型シェルを対象に竣工から5年間に渡る計測と分析を実施し、変形と振動特性に関する基本データを得ることが出来た。

2) 予測・評価手法の開発を目標とした数値解析手法の検討と検証を実施した。3) 補強と高性能化を目的としたカーボンファイバーシートの効果を検証した。コンクリートアーチ試験体に対して動的な破壊実験を実施し、効果を定量的に把握することが出来た。

(5) 今後の計画

主要学会論での論文発表を準備中である(国際シェル空間構造学会、日本建築学会)。学会の出版物は2冊(共著)が確定し、原稿校正中である。また、日本建築学会による構造設計に関するガイドブックの資料として採用予定であり、これらを含めて継続して成果の公開を進め、研究を進展する予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① A. Mutoh, A. MASUDA, T. Itoh, Development of floor system using RC curved and folded surfaces, Proc. IAASS, 2016, total 7 pages(CD-ROM)
- ② A. Mutoh, A. Miura, T. Iwata, Development of high-performance double floor slab using shell structure, Proc. IAASS, 2015, total 7 pages(CD-ROM)

[学会発表] (計2件)

- ① 武藤拓実、武藤厚 他、大型RCシェルの長期変形と構造特性に関する実証的研究、日本建築学会大会、2016/8月、福岡大学
- ② 佐野新吾、武藤厚 他、RC曲面構造における複合非線形挙動の予測に関する試み、日本建築学会大会、2015/9月、東海大学

[図書] (計1件)

- ① 武藤厚、コンクリートシェルの構造設計に関する動向と将来展望、(共著；担当pp. 41-68、全68頁)、日本建築学会、シェル・空間構造運営委員会、2014/10月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武藤 厚 (Mutoh, Atsushi)  
名城大学・理工学部・教授  
研究者番号： 90278325

(2) 研究分担者

村田 賢 (Murata, Masaru)  
名城大学・理工学部・教授  
研究者番号： 30121510