

機関番号：33919
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20510164
 研究課題名（和文） エネルギー関連等の大規模貯蔵施設の完全埋設化に関する基礎的研究
 研究課題名（英文） Study on the underground construction of energy-related large-scale storage facilities
 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

研究成果の概要（和文）：数値解析手法の開発として、1)鉄筋コンクリート（以下RC）の材料非線形を考慮した動的な損傷・耐力予測手法を3次元モデルにて開発し、実験との検証を詳細に実施した。2)過渡荷重及び温度荷重に対する大変形・弾塑性解析手法を安定かつ高精度に実行するための数値解析手法を開発し、計算の高速化を実施した。次いで、整備した数値解析手法の妥当性検証と精度の確認を目的として、3)RCアーチ（円弧形状）および、RCシェル（逆転懸垂形状）に関する高精度型枠を用いた試験体により、複合非線形挙動の検証実験を実施した。また、複数の実際の大規模構造物に関して、大型のRC自由曲面による構造物の安全性検証を実施した。これらにより、開発された、基本的評価手法の検証が可能となった。

研究成果の概要（英文）：First, the followings were carried out as development of the numerical analysis technique. 1) The dynamic damage and ultimate strength prediction technique in which the material nonlinearity of RC was taken into consideration were developed in the three-dimensional model, and verification with an experiment was carried out in detail. 2) The combined geometrically/materially nonlinear analysis technique for transitional load and temperature load were developed, and the improvement in the computational speed was carried out. Subsequently, the following examinations were carried out in order to verify the developed numerical technique. 3) The static/dynamic ultimate strength of a circular arch and a reversed catenary shell are experimentally checked by the specimen manufactured by a highly precise mold, and the results of verification by numerical analysis are shown. Moreover, safety verification was carried out about two actual large-scale structures. By the above, the fundamental numerical-analysis technique developed by this research was able to be verified.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学／社会システム工学・安全システム

キーワード：都市・社会防災／高耐震、アクシデント、苛酷事象

1. 研究開始当初の背景

(1) 各種の大型の産業用容器構造（エネルギー

一関連貯蔵施設、危険物保管施設等）は、従来から円筒（鉄筋コンクリート造；RC）＋部

分球形（鋼製；S 造）、球形（S/RC 造）といった、単純な幾何学的形状をベースとした地上式および半地下方式のものがほとんどである。これらは戦後の高度経済成長期において、安定した性能で効率の良い設計・施工を可能とするニーズから生まれたものであり、構造・工法の簡明さと、コスト・工期圧縮が第一条件であった。これらの構造物へのニーズは、老朽化した施設のリブレースや備蓄増強により増加が予想され、また、地域防災の観点からも重要である。研究開始当初、以下のような問題点が指摘されていた：1) 大地震に対する十分な安全性確保とフェイルセーフ確保、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等。このような問題に関しては、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。

(2) 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。また、住宅密集地での空地確保等の用途制限上の理由による地下式の体育館の建設事例がある。これらは、高い安全性の確保及び上部空間の緑化等を含めた周辺環境への配慮に成功しているが、現時点では高コストと未解明の問題点の存在もあり、事例は数例に留まっているのが現状である。本申請代表者は、約 18 年前に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

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」に対応する構造の耐力評価に関する各種基本的なスタディを実施する。主として鉄筋コンクリート（RC）による容器構造の耐震・耐熱性能評価に関する基礎資料を提示し、具体的な事例を示す。具体的には、以下の内容を実施する。

1) コンピュータの性能向上に合わせた連続体系の数値解析手法（申請者が開発中）を改良し、大地震やアクシデント荷重等に対して接合部を含めた 3 次元での詳細な損傷進展を予測可能とし、合理的な設計や既存構造物の診断の精度を向上させる。

2) フレーム系のシステム（申請者が開発中）への組込みを実施することにより、補強フレームを含む現実に近い解析モデルに基づい

た解析・評価を可能とする。

3) 開発する数値解析手法や精度の検証のための基礎実験を詳細に実施し、比較検討を実施する。

3. 研究の方法

(1) 準備として、完全埋設式容器のボトルネックである上蓋の薄肉・低ライズ化に関して、RC の材料非線形と幾何学的非線形を考慮した動的な損傷・耐力予測手法 3 次元シェルモデルにて開発し、実験との検証を詳細に実施した。

(2) 鉄筋コンクリート構造部分に関して、3 次元ソリッド要素をベースとした、過渡荷重及び温度荷重に対する大変形・弾塑性解析手法を開発し、その高速化を実施する。同時に、従来の解析手法では困難であった、局所破壊後の解析を安定に実施する為の解析手法を展開する。

(3) 整備した数値解析手法の妥当性検証と精度の確認を目的として、2 つのシリーズの実験を計画・実施する（データ公開予定）。

- ・実験 A；RC 複合非線形挙動に関する実験および解析の基本検証実験（アーチモデル）。
- ・実験 S；RC シェルにおける複合非線形挙動の検証実験（シェルモデル）。

(4) 研究期間中に関連した技術開発の検証として、複数の実際の大規模構造物に関して、地上式ではあるが、大型の RC 自由曲面による構造物の安全性検証を実施する。

- ・事例 1；開口を伴う筒状シェル（概要添付）
- ・事例 2；開口を有する偏平シェル（文献で発表）

4. 研究成果

(1) 解析手法の開発

開発した解析手法は、RC の材料非線形性および幾何学的非線形を考慮した複合非線形解析であり、可能な要素としては 8 節点シェル要素、及び 20 節点ソリッド要素である（鉄筋は等価な断面として考慮）。図 1 にはシェルモデルでの材料構成則を示す。ここでは数値解析上の安定性確保を優先し、コンクリートは直線モデル、鉄筋は Bi-linear 型とした。

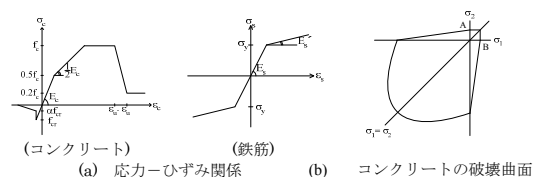


図 1 本解析で使用した材料構成則

(2) 検証実験の概要

①アーチモデル

モデル諸元

実験前に行った予備解析より実験モデルを設定した。その概要を図 2、3 に示す。スパン 2000mm、ライズ 500mm (ライズスパン比 0.25) の円弧アーチを対象とし、断面は $b \times D = 80 \times 20\text{mm}$ の矩形断面、配筋については中央一段、鉄筋比 1.0% とした。また、境界条件については両端ピン支持とした。

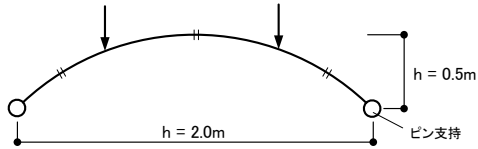


図 2 アーチモデル

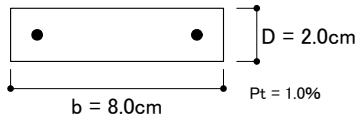


図 3 断面形状

また、今回は破壊実験を想定しているため、図 2 に示す 2 箇所 に 32kg の錘を載荷して実験を実施する。入力地震波は JMA-Kobe NS, UD を寸法比に基づいて時間圧縮した地震波を使用する。

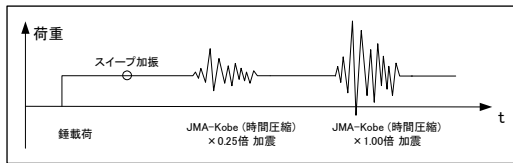


図 4 加振計画

事後解析における解析手法

以下に示す複合非線形解析に用いた解析条件を表 1 に示す。

表 1 解析条件概要

使用要素	8節点退化シェル要素	
解析種別	動的複合非線形解析	
入力地震波	JMA-Kobe NS,UD(時間圧縮)	
減衰	種類	Rayleigh型
	減衰定数	2.0% (1次固有振動数~30Hz)
時間間隔	0.01s	
時間積分法	NewMark-β法 ($\gamma=0.6, \beta=0.3025$)	

アーチ・シェル等むくりのある構造では、一般に比較的高次のモードでも振動することから、内部減衰は、1次固有振動数と 30Hz の 2 点で 2.0% の Rayleigh 型 ([K]:瞬間剛性) とした。

実験結果とその考察

表 2 に実験値、及び予備解析・事後解析の固有値の比較を示す。Kobe 波入力前に行ったスweep加振で得られた応答加速度のスペクトル解析を行った結果、実験における固有振動数は 3.22Hz となった。また、予備解析と

事後解析(完全形状)はほぼ同等の値であるが、形状不整を考慮した事後解析では、完全形状に比べて高い振動数が得られた。実験における固有振動数が、解析と異なった要因として、試験体を震動台に設置する際や、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 2 固有値比較結果

1次	固有振動数 (Hz)	実験値	予備解析	事後解析	
				完全形状	形状不整考慮
	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

入力地震波には、実験時に振動台に設置した加速度計 (A0-X, Z) より得られた測定値を用いた。図 5、6 に、JMA-Kobe 1.0 倍加振時の A2 (1 次モードピーク点) における加速度、変位応答時刻歴の比較を示す。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。

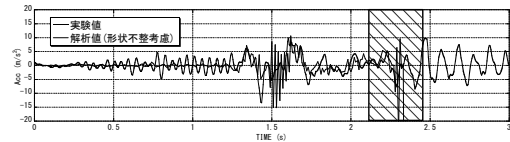


図 5 加速度応答時刻歴 (A2-Z)

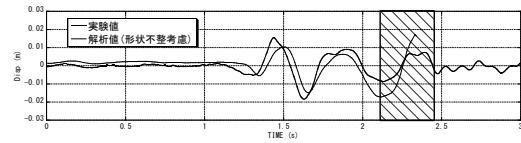


図 6 変位応答時刻歴 (A2-Z)

■ : 実験での破壊判定時刻

実験における破壊時刻は示した図からでは判断し難いが、映像等から判断すると、図中の斜線部 (2.0~2.5 秒) と判定され、数値解析とほぼ同時刻で破壊に至ったと考えられる。実験においての A2 点 (1 次モードピーク点) での最大加速度応答は水平、鉛直方向、各々 10.1m/s^2 , 13.4m/s^2 、解析では 9.4m/s^2 , 20.8m/s^2 であった。応答変位については実験値とほぼ同等の結果が得られた。

錘を載せた時点で試験体中央付近、及び支持端部付近で浅いひび割れが確認された。JMA-Kobe 0.25 倍加振時には浅いひび割れがアーチ全体に確認されたものの崩壊には至らなかった。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 7)。

破壊点は 1 点で領域は小さく、構造不安定には至っていない。(これは、装置の安全上の錘の落下防止による拘束の影響も考えられる。) 図 8 に解析における崩壊時変形図を、図 9 に M-N 相関関係図を示す。解析結果では実験の破壊箇所 i に加え、ii、iii の計 3 箇所にて曲げ破壊をする結果となった。



図7 崩壊状況

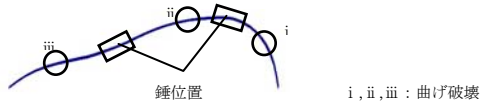


図8 崩壊時変形図(表示倍率10倍)

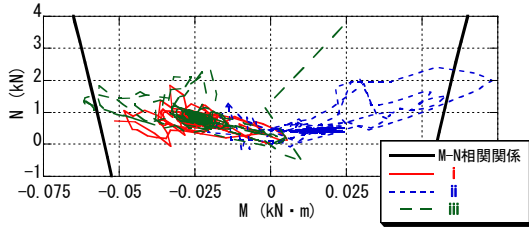


図9 M-N 相関関係図

②シェルモデル

試験体概要

図 11、12 に試験体の平面形状、寸法、配筋図及び断面を示す。シェルは 500×500mm のほぼ正方の平面形を有し、ライズ・スパン比を 0.1 とし、板厚は一様に 10mm となるように作成した。試験体は縁梁で固定をし、境界条件としては固定支持としている。また、縁梁は鉄筋で十分補強しており極めて剛なものとする。鉄筋はφ2.2mm の縮小異型鉄筋を用い、互いに直行した単配筋とした。配筋間隔は、鉄筋比を中央1%にするため 31.25mm とし、鉄筋本数の兼ね合いから実際の鉄筋比は 1.14% となった。

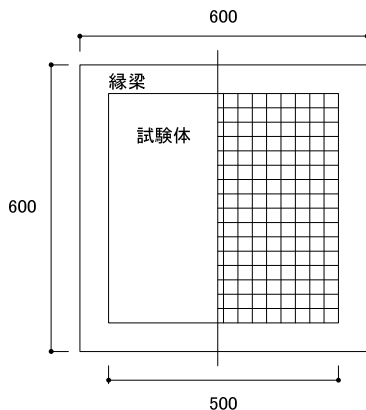


図11 平面形状及び配筋

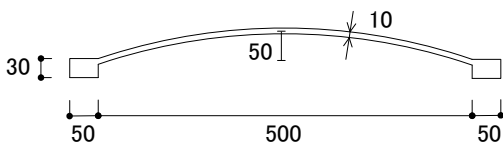


図12 断面図

実験方法

図 13 に本実験における加力システムの概要を示す。加力は変位制御型の試験機を用いて中央の鉛直方向に载荷した。

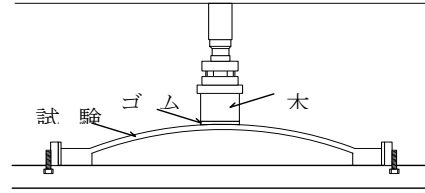


図13 加力システム図

実験結果と解析結果の比較

実験の結果、試験体の最大耐力は 11.67kN となった。集中荷重という構造上不利な荷重に対しても、シェルの高い耐力を示した。図 14 に実験におけるひび割れ分布図を、図 15 に解析より得られたひび割れ分布図をそれぞれ示す。試験体の上面は、補修した箇所でのひび割れが確認できなかったため、モルタルが一体となって挙動していなかった可能性がある。ひび割れは中央部から放射線状に入り、支持部近傍では曲げひび割れも確認された。下面のひび割れは、隅角部を結ぶ対角線に大きなひび割れが確認された。これは、周辺固定なので、隅角部で応力が集中しているためと思われる。解析より得られたひび割れも同じようなひび割れが確認される。また、解析での境界条件は完全固定なので、試験体の下面に曲げひび割れが発生した。

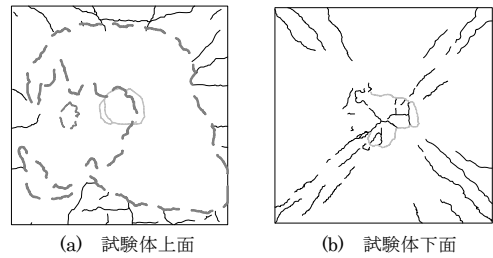


図14 実験によるひび割れ位置

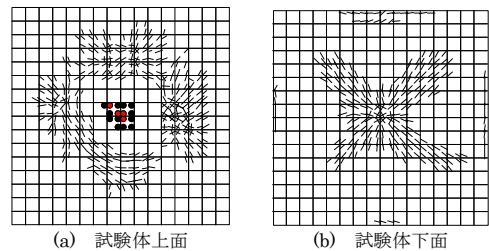


図15 解析によるひび割れ

事後解析における最大耐力は 7.86kN となり、実験結果より約 34.4% の耐力低下が見られた。剛性は実験結果より高い結果を示した。図 16 には荷重とひずみの関係を示すが、終局近傍までの状況と数値解析結果の良い一致を示している。

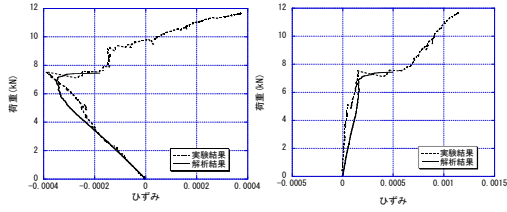


図 16 荷重-ひずみ関係 (中央 X, Y)

図 17 に形状初期不整を考慮したモデルの変形モードを示す。コンクリートの圧壊は、載荷点である試験体中央部に見られた。

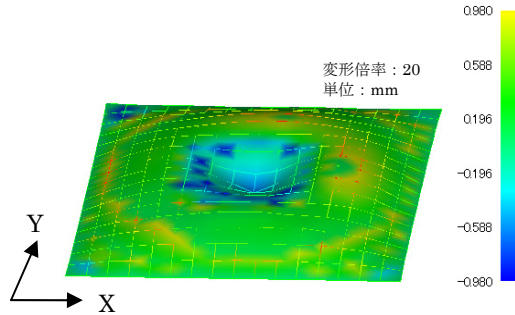


図 17 終局時変形モード

(4) 実構造物の安全性検証の実施例
対象構造物は、開口を伴う筒状シェルで、スパン 25.9m×29.8m、高さ 29.8m の RC 連続体シェルを有する構造物である。対象構造物の安全性・損傷レベル等の検証を行った際の、応答解析静的・漸増解析の結果の概要について示す。

検討対象の概要

図 18、表 3 に構造物の概要を示す。スパン 25.9m×29.8m、高さ 29.8m、シェル厚は 350mm、鉄筋は二段配筋 (かぶり 50mm) で鉄筋比は図 15 に示す通りである。また、開口部補強部材として角形鋼管 (□-750mm×350mm t=19mm) を開口部に配してある。また、開口部の頂部には 750mm×350mm 矩形断面の補強部材 (以下、頂部金物と呼ぶ) が配してある。

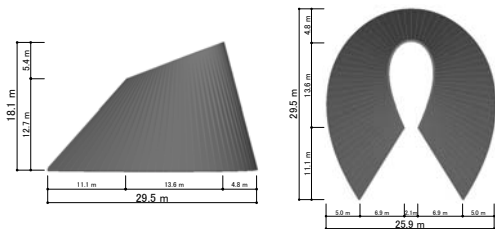


図 18 対象構造物の概要

表 3 部材詳細

コンクリート厚さ	350mm
配筋 (図4.2)	二段配筋、かぶり50mm
開口部補強	角形鋼管 □-750mm×350mm t=19mm
頂部金物	矩形 750mm×350mm

動的解析

表 4 に動的解析の解析条件について示す。内部減衰については、初期剛性比例型とし 1 次モードの固有振動数で 5.0%となるように設定した。なお、本報告では告示波 KB の結果について示す。

表 4 解析条件

解析種別	動的複合非線形解析	
減衰	種類	初期剛性比例型
	減衰定数	5.0% (1次固有振動数)
時間間隔	0.005 sec	
時間積分法	NewMark - β 法 ($\gamma=0.6, \beta=0.3025$)	

表 5 に固有値解析結果を、図 19 にモード図を示す。

表 5 固有値解析結果

モード	固有振動数 (Hz)	固有周期 (s)	刺激係数		
			β_x	β_y	β_z
1次	4.02	0.25	-1.20E+01	7.29E-06	-2.11E-05
2次	5.11	0.20	4.48E-05	-3.97E+00	9.57E+00
3次	7.75	0.13	5.48E-04	5.36E-03	3.72E+00

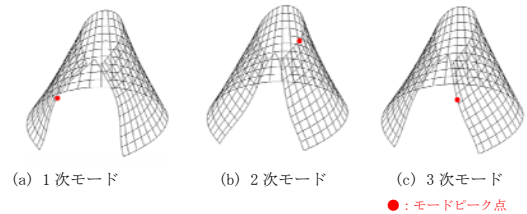


図 19 振動モード図

各応答解析の結果の概要について、応答が最大となった告示波 KB (JMA KOBE 1995 NS 位相) を X 方向に入力したケースの結果について示す。

図 20 に M1 点 (1 次モードピーク点) における加速度応答時刻歴を、図 21 に M1 点における変位応答時刻歴を示す。なお、いずれの地震波を入力したケースにおいても、鉄筋降伏は発生していない。

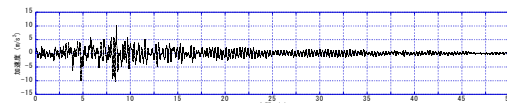


図 20 M1 点加速度応答時刻歴 (X 方向)

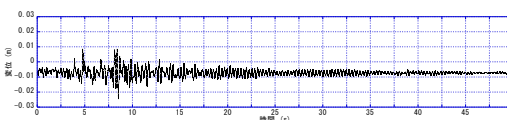


図 21 M1 点における変位応答時刻歴 (X 方向)

(5) フレームの解析システムについて既に共同研究者により開発・公開されているフレームの動的解析システムに対する RC の弾塑性の組み込みの詳細に関しては、公開ホームページを参照されたいが、ここではシ

システムの概要とサンプル画面を示す。
 (<http://wwwra.meijo-u.ac.jp/labs/ra007/space/index.htm> にてソフト公開)

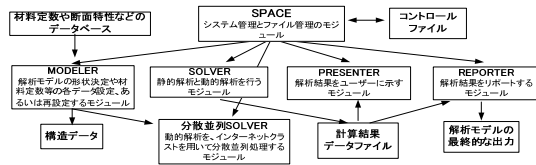


図 22 システム構成

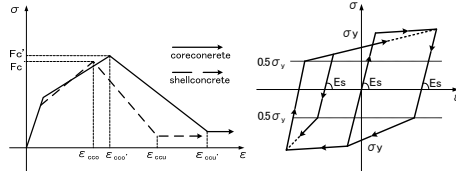


図 23 コンクリート、鉄筋の履歴

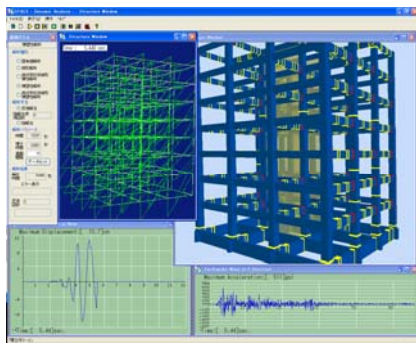


図 24 解析結果表示画面

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

① Atsushi MUTOH, Makoto TAKAYAMA, Kazuhiko MASHITA and Shiro KATO, Study on Nonlinear Vibration Characteristics of Reinforced Concrete Circular Arches by Vibration Tests and Simulations, Int'l Association on Shell & Spatial Structures, 査読有、2010、tt.8 pages (CD-ROM)

② Atsushi MUTOH, Daisuke MAEDA and Mutsuro SASAKI, Evaluation of Nonlinear Behavior of Reinforced Concrete Free-Curved Shells Proposed in Recent Years, Int'l Association on Shell & Spatial Structures, 査読有、2010、tt.8 pages (CD-ROM)

③ Atsushi Mutoh, Daisuke Maeda and Shiro Kato, Analysis of the Effect of Geometric Imperfections on the Structural Properties of Hyperboloid RC Cooling Towers, Int'l Association on Shell &

Spatial Structures, 査読有、2009、tt.8 pages (CD-ROM)

④ 武藤 厚、岩瀬智紀、佐々木睦朗、自由曲面を用いた鉄筋コンクリートシェル of 構造特性に関する評価の試み、構造工学論文集、査読有、Vol.55B、2009、57-62

[学会発表] (計 5 件)

① 齋藤太士、武藤厚、前田大介、RC 曲面構造における複合非線形挙動の予測に関する検証の試み (その 6)、日本建築学会大会学術講演梗概集、2010/9/9、富山大学

② 前田大介、武藤厚、齋藤太士、RC 曲面構造における複合非線形挙動の予測に関する検証の試み (その 2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、2009/8/26、東北学院大学

③ A. Mutoh, Study on the Effect of Three-Dimensional Imperfections on the Nonlinear Behaviour of Hyperboloid Reinforced Concrete Cooling Towers, The 9-th Int'l Conference on Computational Structures Technology, 2008/9/3, Athens, Greece

④ 前田大介、武藤厚、村田賢、3次元非線形解析システム SPACE への RC 弾塑性解析機能の組み込みと応用、日本建築学会大会学術講演梗概集、2008/9/18、広島大学

⑤ 梶原由貴、武藤厚、村田賢、RC 曲面構造における複合非線形挙動の予測に関する検証の試み (その 1)、日本建築学会大会学術講演梗概集、2008/9/18、広島大学

[図書] (計 1 件)

① 新宮清志、武藤 厚、他 24 名、シェル・空間構造の減衰と応答制御、2008、357

[その他]

ホームページ等

(シェル関連)

<http://wwwra.meijo-u.ac.jp/labs/ra002/research.htm>

(骨組関連ソフト公開)

<http://wwwra.meijo-u.ac.jp/labs/ra007/space/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武藤 厚 (ATSUSHI MUTOH)
 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 (MASARU MURATA)
 名城大学・理工学部・教授
 研究者番号：30121510