

RC アーチの振動破壊と RC シェルの長期変形のシミュレーション Simulation for Vibrational Destruction of RC Arch and Long-Term Deformation of RC Shell

武藤 厚¹⁾
Atsushi Mutoh

1) 名城大学・理工学部・建築学科, 教授, 工学博士 (連絡先, amutoh@meijo-u.ac.jp)
Department of Architecture, The Faculty of Science and Technology, Meijo University, Professor, Dr. Eng.

1. 鉄筋コンクリート造空間構造の構造特性の評価

RCシェルは 1950 年代の主として明快な幾何学形状のルーフシェルから¹⁾、現在では常時圧縮応力場における合理性に着目して、覆土のある大空間のルーフやエネルギー関連施設の蓋などに、プレストレスも適用して実現されている。また、「一体性のある任意形状の実現」という、RC本来の長所を発揮する様々なタイプの自由曲面を可能とする構造設計技術も急速な進展を見せ、多彩な建築空間の要素として実現されるようになってきた²⁾。

一方、構造特性の確認に際しては、1) 想定を超える荷重時の損傷・耐力評価、2) 動的特性の評価、に加え、3) 長期の性能の確認、等も重要であることも特徴である。1) に関しては、破壊に至るまで変形が微小である RC 骨組においては、荷重の増加に伴い、一般にコンクリートのひび割れ・鉄筋の降伏・付着の劣化・コンクリートの圧縮破壊といった損傷の発生・進展により、材料的な非線形性を示す。一方、本論で取り上げる RC シェルのような薄肉で偏平な構造においては、材料的な非線形性に加え、幾何学的非線形性が同時に影響する、いわゆる複合非線形性が顕著となる場合も多く、また、形状(厚さを含む)や材料の不整の影響が大きいことが特徴である。これらについては多くの解析的および実験的検討がなされている^{3,4,5)}。図1にはその例として、鉛直荷重を受ける屋根型円筒シェルの解析例を示す⁴⁾。

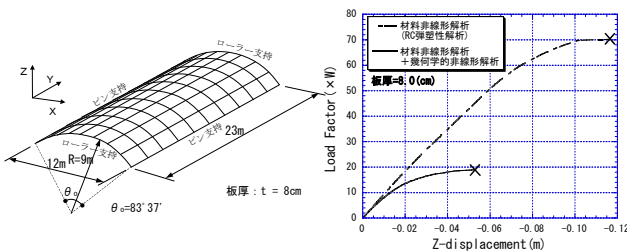


図1 屋根型円筒シェルの複合非線形性の例

本稿では、2)「動的特性」に関連し、「むくり」のある基本的構造としてRCアーチを取り上げ、地震荷重に対する破壊実験のシミュレーション⁶⁾、3)「長期の特性」について、実機を対象とした変形特性の実測と、その構造特性に及ぼす影響の推定に関する検討事例を示す^{7,8)}。

2. RC アーチの振動破壊のシミュレーション

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、現行のダブル配筋、及び既往のシェルで見られるシングル配筋を設定した。

2. 1 試験体の概要

モデルの概要を図2、材料試験による物性値を表1に示す。スパン 2000mm、ライズ 500mm (ライズスパン比 0.25)、断面は $b \times D = 80 \times 20\text{mm}$ の矩形として、主筋は上下 3 本ずつのダブル配筋で鉄筋比を 1.0%、せん断補強筋は 20mm 間隔で、補強筋比を 0.2% と設定した。

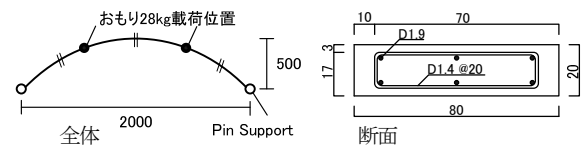


図2 RC アーチ試験体の形状 (ダブル配筋)

表1 材料物性値

モルタル		鉄筋	
ヤング係数	23464 N/mm ²	ヤング係数	236730 N/mm ²
ポアソン比	0.167	降伏点	419 N/mm ²
圧縮強度	42.98 N/mm ²		
引張強度	4.30 N/mm ²		

2. 2 震動破壊実験と解析

2. 2. 1 加振と計測計画

付加質量を載荷後、時間圧縮した JMA-Kobe 波を 30%、60%、90% の倍率を目標に加振し (図3)、その間に、固有振動数の変化と損傷の記録を行った (なお、スパン 20m を想定し、寸法 1/10 のみの相似則を適用した)。

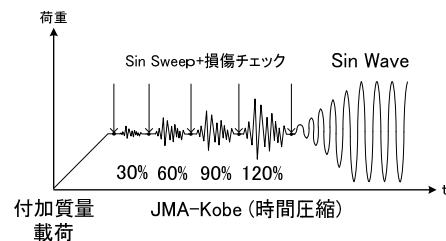


図3 加振計画

加速度は震動台上、想定1次モードピーク点上、中央部の計4点にて、水平・鉛直方向の2方向を計測する。ひずみも、1次モードピーク点において、コンクリート表面と、主筋においてを計測した(図4)。

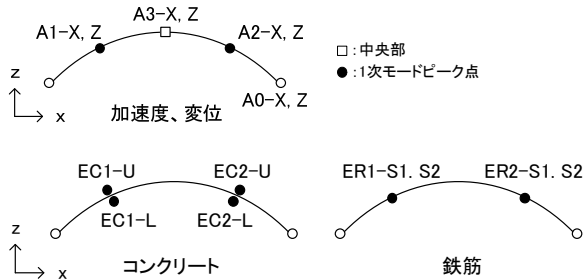


図4 測定点

2.2.2 実験結果

予備解析(設計強度)、実験時(実測)、及び詳細な事後解析(材料強度試験後)における固有振動数を表2に示す。なお、実験値は錘の裁荷後、表面に若干のクラック発生後の推定値である。

表2 固有振動数

	予備解析	実験値	事後解析	
			完全形状	不整考慮
1次	固有振動数(Hz)	4.88	5.08	5.08
	固有周期数(s)	0.21	0.20	0.20

図5, 6には、時間圧縮したJMA-Kobe NS30%, 60%, 90%での加振時に、実験により計測した鉛直方向の加速度及び変位応答時刻歴と、震動台で計測した加速度記録を入力として、筆者らにより提案されたシェル要素を用いた動的な複合非線形解析手法⁹⁾により数値解析した結果を比較して示す。

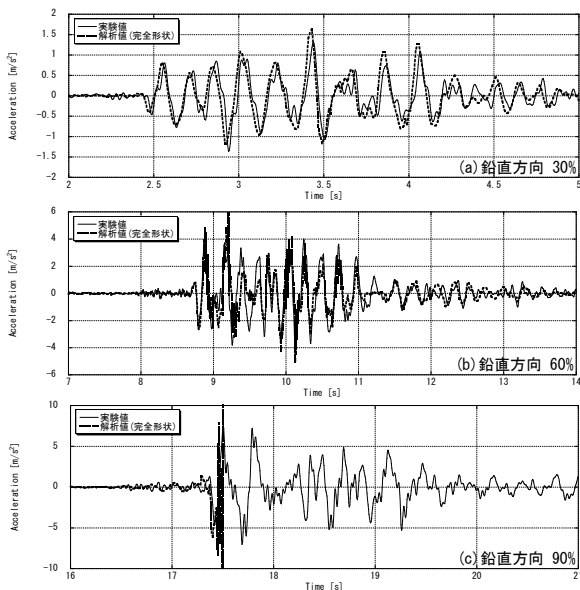


図5 加速度応答時刻歴 (A1)

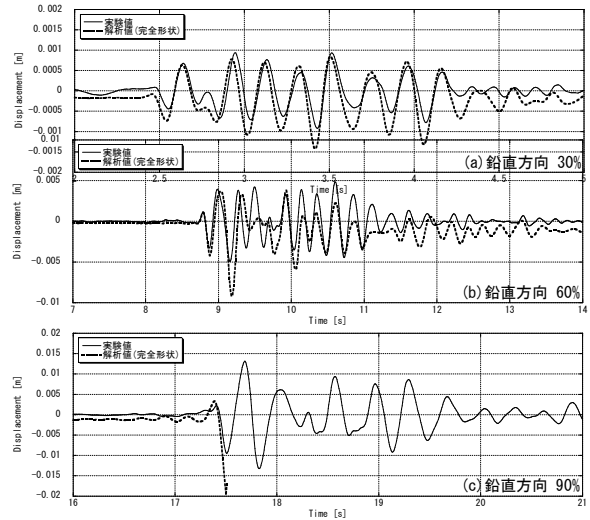


図6 変位応答時刻歴 (A1)

実験結果では、1次モードピーク点(試験体右側)において、90%加振時にコンクリートの断面は急速に破断し、鉄筋のみによるヒンジが形成され、急激な剛性低下と共に3ヒンジアーチとなり、入力に鈍感な安定化へと移行した。数値解析では、ほぼ同時点で数値的不安定が発生し、計算の継続が失敗した。3ヒンジ形成までの応答は実験と数値解析で良い対応の一致を示していると考えられる。

図7には、崩壊後の試験体を示すが(アーチの不安定が発生する4ヒンジをベースとする崩壊形)、この段階までのポストピークまでの数値解析は筆者らの手法では安定して追跡するに至っていないが、実用的には十分な損傷までの追跡は可能であると判断されよう。

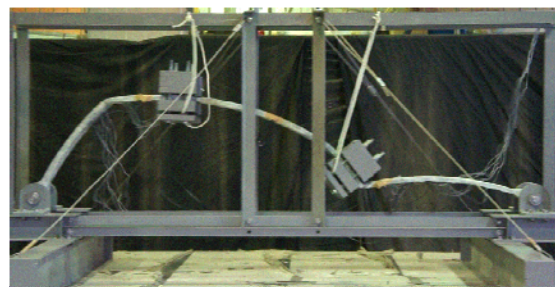


図7 崩壊後の試験体

2.3 シングル配筋に対する検討結果

次いで、既往の多くのシェルに見られるシングル配筋を模擬し、図8に示すような中央一段のアーチについて同様に試験と解析を実施した。

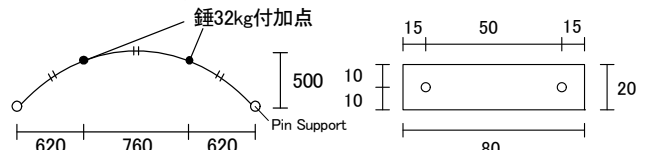


図8 試験体概要 (シングル配筋)

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9に計測の様子と計測結果を示す。

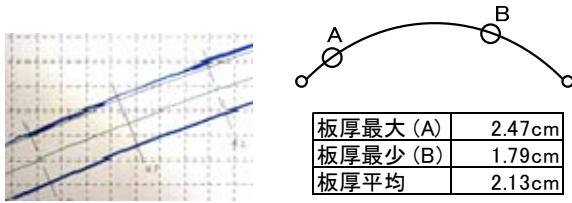


図9 形状不整計測の様子

表3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3 材料物性値 (シングル配筋)

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

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10)。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)。

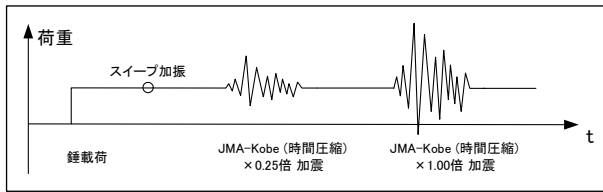


図10 加振計画 (シングル配筋)

表4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 (震動破壊の再現の為、事前の設定であり、試験体中央付近、及び支持端部付近で浅いひび割れを確認)。

表4 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
	固有周波数 (s)	0.31	0.22	0.22	0.21

図11、12には、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。

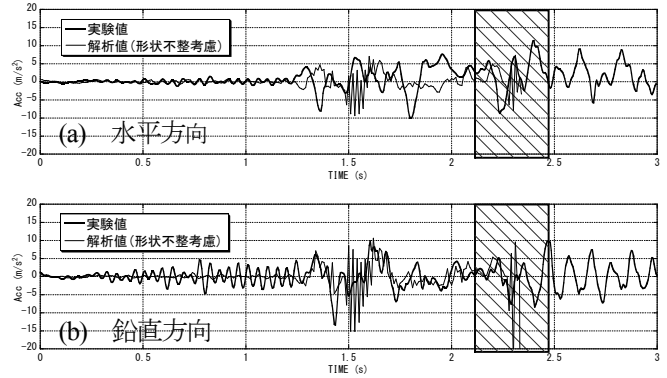


図11 加速度応答時刻歴 (A2)

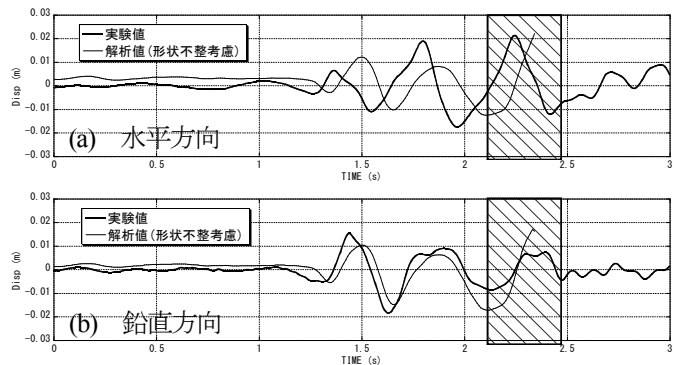


図12 変位応答時刻歴 (A2)

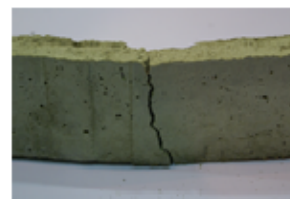
▨: 実験での破壊判定時刻

実験における破壊時刻は図11及び12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13)。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。)



(a) 崩壊状況



(b) 崩壊部詳細(外周面)



(c) 崩壊部詳細(内周面)

図13 破壊時の状況

図 14 には M-N 相関関係を示す。図中の太実線は RC 柱の軸力+1 軸曲げの包絡線を示すが、動的な軌道は大きく領域から外れる結果とはなっておらず、一定の対応が類推される結果と言えよう。

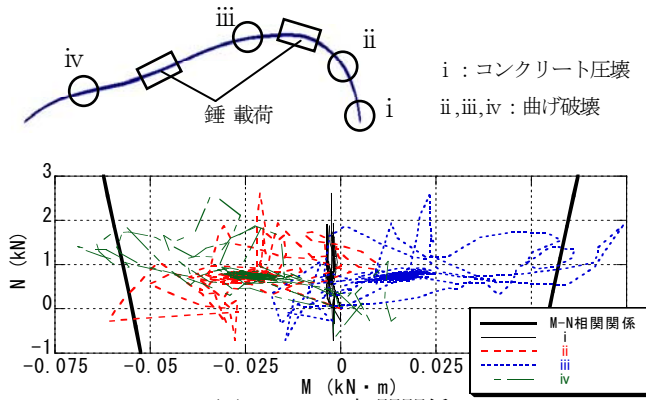


図 14 M-N 相関関係

3. RC シェルの長期変形のシミュレーション

ここでは、大型の扁平な RC シェルの実機について、建設から約 3 年間の変形特性とびびり割れに関する実測結果について示し、同時に数値的な予測及び構造特性への影響を検討した結果を示し、構造設計手法の高度化に際しての資料を得るものである。

3.1 予測される現象について

想定される現象として、時間軸による変形の進行の概念を図 15 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の可能性はある（設計時には大きな安全率を設定している）。また、耐震性能の推定にはさらに慎重な検討が必要と考えられる（これらの点に着目した推定手法に関する研究は殆ど見当たらない）。

静的な荷重に対する影響の概念を図 16 に示す。本研究の最終的な目標は、上記の図 15 および図 16 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、構造設計手法の高度化を目指すことにある。

時間による劣化を考慮した各段階での耐震性能の推定のシミュレーションのイメージを図 17 に示す。

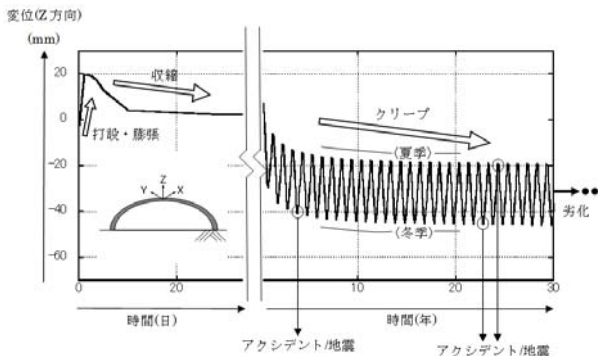


図 15 構造物の施工～使用期間中における変形の進行

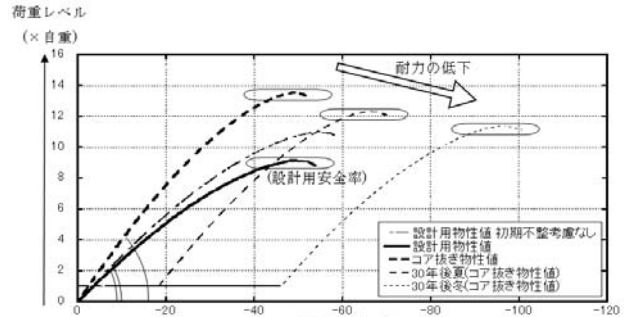


図 16 使用期間中における損傷・耐力レベルの変

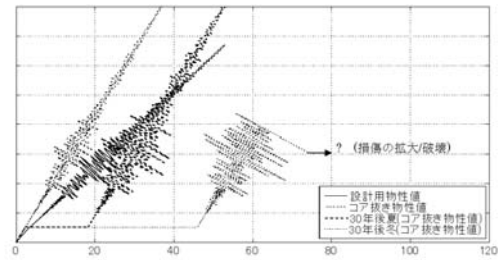


図 17 使用期間中における損傷・耐力レベルの変化

3.2 対象建物と測定の概要

対象建物は、楕円形の 2 つの大開口を有する、3 次元自由曲面形状で鉄筋コンクリートシェル構造の 1 階建てのアートギャラリーである。スパンは約 60×42 m、最大立ち上がりは 5.1 m、厚さは 250 mm である。主筋径は 16 及び 13 mm、主筋間隔は、150 及び 75 mm である。建物の外観と寸法を示す (図 18)。

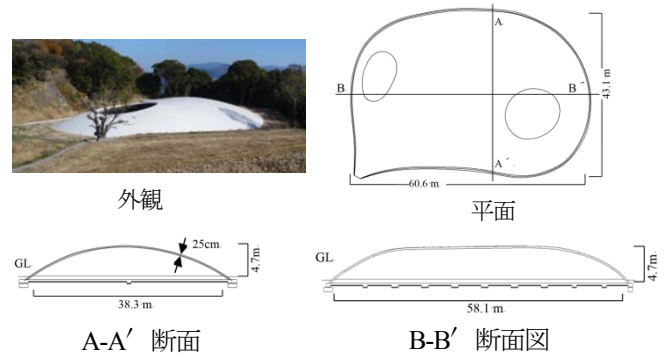


図 18 検討対象構造物の概要

図 19 には変位計測日時を平均気温と共に示す。

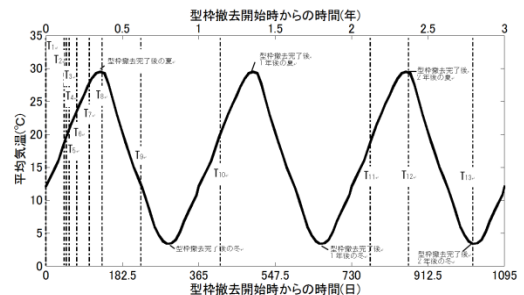


図 19 測定日時と気温

シェル面の変位測定は、外表面について図 20 に示す 50 点について高精度の光波測量を用いて実施した。

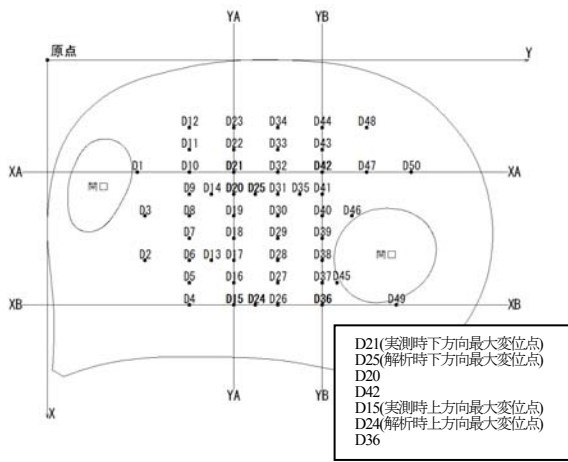


図 20 測量位置

3.3 変位測定と解析結果の概要

図 21 には型枠撤去から 3 年後までのシェル面の鉛直変位を最大点にて示す。図中●は計測値を示し、各線の表示は数値解析による推定結果である（収縮・クリープは CEB-FIP1990 モデルをカーブフィットしてモデル化し、温度は図 19 に示す温度を 1 カ月平均として断面内一定の温度荷重として設定したものである）。図 22、23 には、2 年後の外表面のひび割れの観測結果と推定結果をそれぞれ示す（内表面には観測されていない）。なお、数値解析において設定したコンクリートの材料特性としては、実機のコア抜き試験体の材料試験結果による値を用いた。

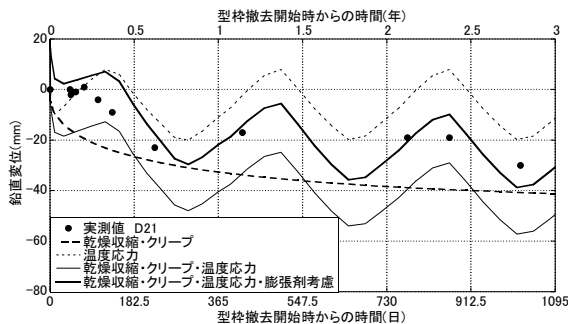


図 21 変位時刻歴（型枠撤去から 3 年後まで）

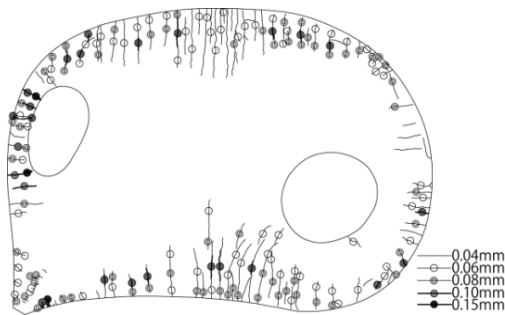


図 22 ひび割れ図（2 年後実測値）

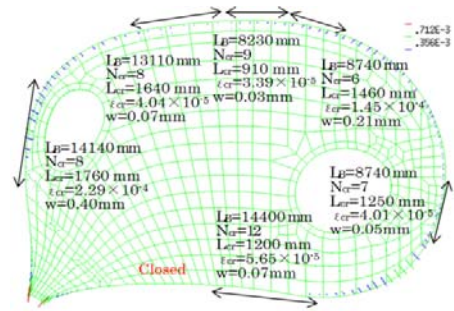


図 23 第一ひび割れ歪（2 年後数値解析による予測）
（乾燥収縮・クリープ・温度応力・膨張材考慮モデル）

ここでは、新たに建設された扁平な RC 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。実測データが非常に少ない問題であるが、定性的にも定量的にも現象を良く説明する推定が可能であると考えられる。一方、この問題に関しては、コンクリートの設計強度と実強度での相違、シミュレーション手法の検証など、多くの未解決な問題を抱えているが、構造設計における合理的な安全率の設定等について、今後の継続的な研究が必要である。

なお、同一の対象構造物に対し、常時微動および人力加震により 2 次までの自由振動モードと減衰定数を推定した結果を示す⁷⁾。図 24 には予備解析による自由振動モード形を示す。なお、モード形は同時多点計測により同定された。対応する固有振動数を表 5 に示す。

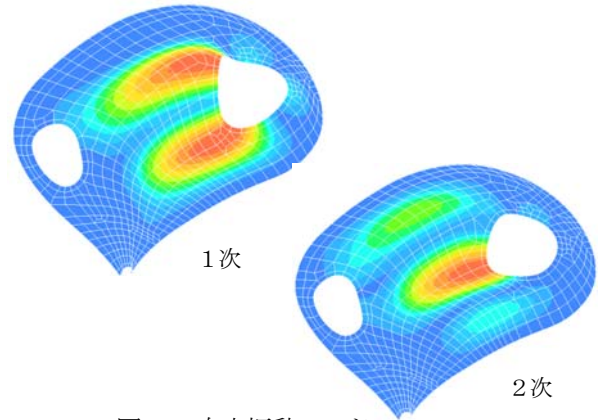


図 24 自由振動モード

表 5 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	固有値解析結果 (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 ²) *2 ヤング係数 37.0 (kN/mm ²)			

ここでは、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して示すが、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、設計時の想定との差異が確認された。表6には事後解析用に設定した物性値を示す。

表6 事後解析用の物性値

	コンクリート		鉄筋	
	コア抜き試験体による物性値	設計用物性値 Fe30(参考)	SD295	SD345
ヤング係数 (N/mm ²)	37000	21367	205000	205000
ポアソン比	0.2	0.2	0.3	0.3
圧縮強度 (N/mm ²)	45.2	30.0	-	-
引張り強度 (N/mm ²)	4.5	3.0	-	-
降伏点 (N/mm ²)	-	-	324.5	379.5

次に、複合非線形を考慮した地震応答解析例を示す。入力は kobe-NS+EW+UD とし、減衰はレーリー型（設計用の減衰として、1次モードから10(Hz)の間でh=2.0(%)、実測による減衰を用いる解析では1次モードでh=0.80(%)と2次モードでh=0.65(%)との間で推定し設定した)。1A点の応答波形を図25に示す。また、Z方向の最大値の比較を表7に示す。

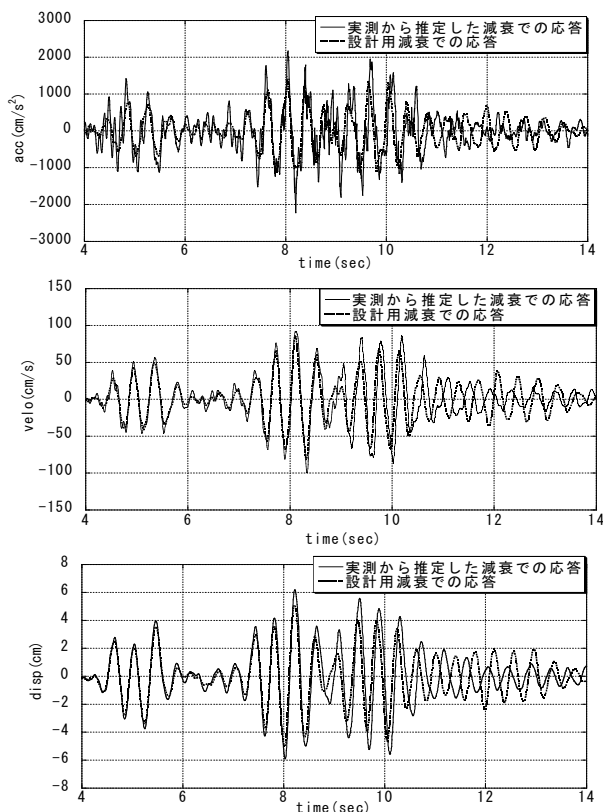


図25 地震応答の比較 (JMA-Kobe 3方向)

表7 最大応答値の比較

	最大加速度 (cm/s ²)	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

構造設計時に設定するコンクリートの設計強度とコア抜き試験体による値の差異による影響や動的特性に及ぼす影響は、長期の変形特性と複合して構造設計時の安全率の設定に際して検討材料を与えらるる。

4. RCシェルの損傷・破壊と数値解析の基本事項

4.1 損傷・破壊の特徴

シェル構造物はその形状や荷重により、力学的な特性が大きく変わる。最も基本となる、漸増する鉛直荷重に対する性能を見ても、幾何学的非線形性が先行して顕著に現れ、材料非線形としてはひび割れ程度の範囲内で最大耐力に達する場合や、その逆の場合など、構造物によってその状況は大きく異なる。改めて図26には、RCシェルにおいて想定される破壊モードの基本要素を模式的に示す。ここでは、基本事項のみを前PD資料を抜粋して再掲する¹⁰⁾。

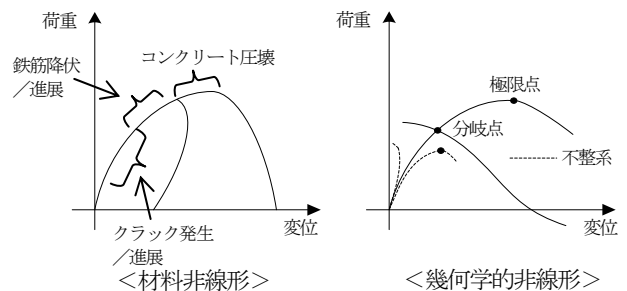


図26 想定される破壊モードの基本要素

4.2 一般的な解析の概要

RCシェルにおける上記の現象を評価する為に実施される構造解析の項目を表8に分類して示す⁴⁾。次に、同表中に示す動的な複合非線形解析に関して実施されるFEM解析手法の概要について例示する。ひずみと応力はGreen-Lagrangeひずみ、2nd Piola-Kirchhoff応力とし、幾何学的非線形性はTotal Lagrangeにより定式化し、時間方向は直接時間積分を行う場合で示す。即ち、複合非線形性を考慮したRCシェルの多次元入力の地震力に対する過渡応答に関する釣合式の例を離散化して示す⁹⁾。

表8 RCシェルの構造解析の分類

＜静的解析＞	
・線形解析	・・・線形応力／変位
・非線形解析；	
幾何学的非線形	・・・大変形、弾性座屈
材料非線形	・・・弾塑性（材料的な損傷・破壊）
複合非線形	・・・大変形弾塑性、弾塑性座屈、破壊
＜動的解析＞	
・線形解析	・・・固有値、線形応答、モーダル解析
・非線形解析；	
幾何学的非線形	・・・動的大変形、動的弾性座屈
材料非線形	・・・動的弾塑性
複合非線形	・・・動的大変形弾塑性、動的破壊

まず、後の数値積分の準備の為に時刻 $n+1$ ステップについて表示すると、

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}_{n+1} + \mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{f}_{n+1} \quad (1)$$

ここに \mathbf{M} 、 \mathbf{p} 、 \mathbf{f} 、 \mathbf{x} はそれぞれ質量マトリクス、内力ベクトル、外力ベクトル、及び変位ベクトルである。

(1)式はコンクリートのクラックの開閉・圧壊や、鉄筋の降伏発生により履歴依存の問題となり、一般に内力ベクトルは、 $\mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_1 \sim \mathbf{x}_{n+1}, \dot{\mathbf{x}}_1 \sim \dot{\mathbf{x}}_{n+1})$ となる。

(1)式において接線剛性および減衰マトリクスは次式で示される。

$$\mathbf{K}_{n+1} = \partial \mathbf{p}_{n+1} / \partial \mathbf{x}_{n+1}, \quad \mathbf{C}_{n+1} = \partial \mathbf{p}_{n+1} / \partial \dot{\mathbf{x}}_{n+1} \quad (2)$$

コンクリート及び鉄筋の損傷履歴により、内力ベクトルは経路に依存する。尚、以後の計算では Rayleigh 型の減衰を用いる。

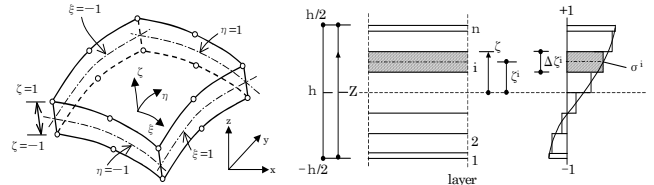
$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{n+1} &= \mathbf{C}_{n+1} \dot{\mathbf{x}}_{n+1} + \mathbf{K}_{n+1} \mathbf{x}_{n+1} \\ &= (\alpha_0 \mathbf{M} + \beta_0 \mathbf{K}_{n+1}) \dot{\mathbf{x}}_{n+1} + \mathbf{K}_{n+1} \mathbf{x}_{n+1} \end{aligned} \quad (3)$$

外力ベクトルとしては、多次元の地震入力、及び自重等の外力を考慮して、次式のように設定する。

$$\mathbf{f}_{n+1} = -\mathbf{M}\xi\ddot{\mathbf{g}}_{n+1} + \mathbf{b}_{n+1} \quad \xi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \vdots & & \end{bmatrix} \quad \ddot{\mathbf{g}}_{n+1} = \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{g}}_{n+1}^x \\ \ddot{\mathbf{g}}_{n+1}^y \\ \ddot{\mathbf{g}}_{n+1}^z \end{bmatrix}$$

ξ 、 $\ddot{\mathbf{g}}_{n+1}$ はそれぞれ、地震影響マトリクス、入力加速度ベクトル、 \mathbf{b}_{n+1} は地震力以外の時間依存の荷重を示す。

ここでは図27に示すような形状の8節点アイソパラメトリック退化シェル要素を積層分割して用いる場合を示す。コンクリートは厚さ方向に層分割され、鉄筋は等価な層として表現される。なお、ひずみ成分は(5)式に示すように、法線方向変位の一回微分に関する2次項までの非線形項を面内ひずみに考慮している例である。



$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon} &= \left\{ \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \right. \\ &\quad \left. \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right\}^T \\ &\quad + \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2, \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2, \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}, 0, 0 \right\}^T \end{aligned} \quad (5)$$

図27 シェル要素の形状と要素の層分割

要素の各応力成分は

$$\boldsymbol{\sigma} = \left\{ \sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz} \right\}^T = \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}$$

と示される。要素に関する座標系、変位場、形状関数は省略する。また、構成関係行列 \mathbf{D} については材料の非線形性を考慮してモデル化されるが、一般に薄肉シェルにおいては、各層に分割したそれぞれについては平面応力の構成関係を用いることが多く、面外せん断については別途検討されることも多い。各断面力については以下のように示される。

$$\begin{aligned} N_{x(y)} &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{x(y)} dz = \frac{h}{2} \sum_{i=1}^n \sigma_{x(y)}^i \Delta \zeta^i \\ M_{x(y)} &= - \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{x(y)}^z dz = \frac{h^2}{4} \sum_{i=1}^n \sigma_{x(y)}^i \zeta^i \Delta \zeta^i \\ Q_{x(y)} &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xz(yz)} dz = \frac{h}{2} \sum_{i=1}^n \tau_{xz(yz)}^i \Delta \zeta^i \end{aligned}$$

材料非線形性に関しては、数値計算の安定性確保を優先し、コンクリートと鉄筋に関して比較的単純な構成則で例示する。コンクリート及び鉄筋の応力-ひずみ関係は図28に示すような比較的単純なモデルを想定する。コンクリートの破壊曲面は、Kupferの実験結果¹¹⁾を塑性論に基づいて近似することが一般的に行われる(図29)。

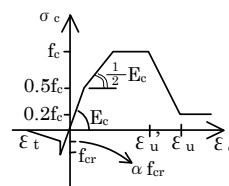


図28 コンクリート及び鉄筋の1軸応力-ひずみ関係

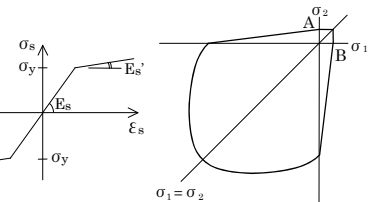


図29 コンクリートの破壊曲面のモデル化

図 26 に模式的に示すような RC の材料非線形モデル化については一般には図 30 に示すような項目を取扱う必要がある。これらのモデル化に際しては、比較的単純な塑性論に基づくものから精緻なものまで種々の試みがなされており、数値解析の手法とも相まって、その適用範囲や安定性、精度にはかなりのばらつきが存在すると言える。なお、コンクリートのひび割れや圧縮破壊・鉄筋の降伏・付着といった RC の材料非線形性とそのモデリングは、マイクロモデルに関する限り、本 PD の前題；「RC 構造物の破壊現象」に記述されるものと基本的に同一であり、詳しくは前題を参照されたい。

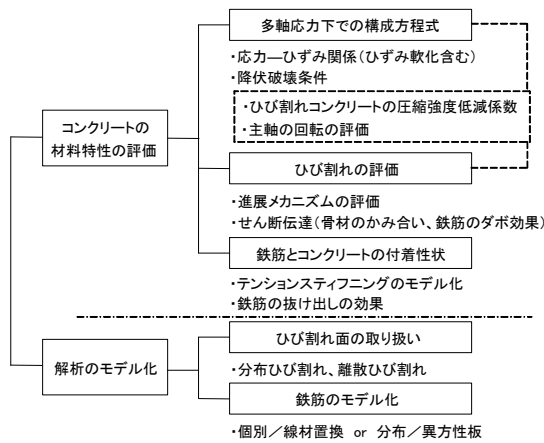


図 30 RC の材料非線形解析に必要な事項

5. まとめ

RC の空間構造として、RC アーチやシェルを取り上げ、構造特性評価に際して不可欠な損傷・破壊に関連する非線形特性について、アーチの動的破壊とシェルの長期変形性状についての評価事例を紹介した。

RC アーチに関しては、動的な荷重に対する損傷の進展と動的な破壊までの追跡では比較的良い推定が可能と考えられるが、ポストピークまでの挙動やせん断破壊を示す場合の検討やシェルについては今後の課題として挙げられよう。シェルの長期変形特性に関しては、コンクリートの収縮・クリープ及び温度応力による影響の推定は、既往の材料モデルである程度表現可能であると考えられるが、それらが耐力や動的特性に与える影響の検討や数値解析手法の開発は今後の課題と考える。また、RC 系の空間構造に関する全般についての課題としては、例えば以下の事項が挙げられよう。

- (A) せん断破壊の分析； 面内せん断するシェルや厚肉シェルの場合の面外せん断破壊挙動の分析と評価¹²⁾
- (B) 動的な解析； 近接した固有値や特に複曲面シェルにおける高次モードでの大きな刺激係数を有するケースの応答評価手法の検証、局所的に大きな曲げを伴うようなモードの分析、シェル屋根架構部分と下部構造との相互作用の検討
- (C) 留意事項の整理； 構造不安定や初期不整の影響の

大小など、対象とする構造物の力学的特性に敏感なケースが多く、既往の実験データ^{13, 14)}も参考にある程度形態別に整理したガイドラインの整備（新しい設計手法への対応を含む； 構造合理性を見出す為の形態創生手法の開発や施工技術の向上による各種の自由曲面など）

参考文献

- 1) 青木 繁、「連続体シェルの歴史的展望」、第 2 回/新「シェル・空間構造」セミナー資料集、建築学会、2003、pp. 1~4
- 2) 佐々木睦朗、「構造デザインにおける連続体シェルの未来像」、第 2 回/新「シェル・空間構造」セミナー資料集、建築学会、2003、pp. 7~8
- 3) 武藤 厚、「コンクリート系の構造における非線形解析の現状と将来に関する一考察」、建築雑誌、Vol. 118、No. 1511、2003、pp. 21~23
- 4) 松井徹哉、村田 賢、元結正次郎、武藤 厚、「シェル構造」、空間構造の数値解析ガイドライン~第 3 章~、建築学会、2001、pp. 147~227
- 5) 武藤 厚、花井建吾、舟崎孝介、加藤史郎、「一葉双曲面 RC 造冷却塔の構造特性に及ぼす形状不整の影響の分析」、建築学会構造系論文集、No.584、2004/10、pp. 103~110
- 6) 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検証の試み」、建築学会大会、2007~2013
- 7) 武藤 厚、他、「大型鉄筋コンクリートシェルの振動特性に関する評価」、建築学会大会、2012
- 8) 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」、建築学会大会、2012~2013
- 9) 武藤 厚、小山信夫、村田 賢、加藤史郎、「上載圧を受ける鉄筋コンクリート球形シェルの非線形振動性状に関する検討」、建築学会構造系論文集、No.549、2001/11、pp. 83-90
- 10) 武藤 厚、「RC シェルの破壊現象」、建築構造における強非線形問題に対する数値解析の現状と課題、建築学会大会 PD 資料、2007、pp. 30~39
- 11) Kupfer, H., Hilsdorf, H.K. and Rush, H. : Behavior of concrete under biaxial stresses, ACI Journal, Vol. 66, No. 8, 1969, pp. 656-666
- 12) Vecchio, F. and Collins, M.P. : The response of reinforced concrete to in-plane shear and normal stresses, Univ. of TORONTO, Pub. No.82-03, 1982
- 13) 鉄筋コンクリートシェルの弾塑性解析および破壊のメカニズムに関する研究班、「鉄筋コンクリート耐荷重力実験資料集」、建築学会・連続体構造小委員会、1993
- 14) シェル・空間構造運営委員会、「補強コンクリートシェル破壊実験資料集」、建築学会、2003