

シェル・空間構造物における応答制御と減衰評価研究の歩み

—黎明期から最近までの研究紹介—

Steps toward Response Control and Damping Evaluation of Shell and Spatial Structures

Introduction of the Twilight Study through the Latest Study

○新宮清志¹, 湯川正貴², 平塚聖敏³

*Kiyoshi Shingu¹, Masaki Yukawa², Kiyotoshi Hiratsuka³

Abstract: Damping is a very important factor for vibration property of structures. In particular, investigation of damping evaluation is urgent work for grasping vibration property about shell and spatial structures. This paper introduces the history about response control and damping evaluation of shell and spatial structures from the dawn through the present age and the near future, and an example of damping evaluation of shell and spatial structures.

1. はじめに

構造物の振動を能動的に制御するために不可欠となる制御理論は 1950 年代に体系化された古典制御理論に端を発し、1960 年代初頭にはカルマンによって現代制御理論が確立された^[1]。さらに 1970 年代に、Yang によって制御理論が建築物・土木構造物に適用されるようになった^[2]。その後、ラーメン構造物に代表される重層構造物を中心に制震（振）・免震・防振・除振に関して、多くの研究がなされてきた^{例えば [3]-[5] など}。

シェル・空間構造物の応答制御・免震の研究では、新宮研究室の研究が先駆的・先導的であり、文献[6]-[10]などが挙げられる。この内の応答制御（あるいは振動制御）では、ファジィ理論やニューラルネットワークを用いて、上下動地震を受ける軸対称回転体シェルの減衰定数を調整することによって振動抑制・応力低減を図っている（これらは「ファジィ振動制御」、「ニューラル振動制御」と呼ばれる）。この振動制御の場合、減衰のことが一応解かっているものとして事を進めていたが、その後、シェル・空間構造の減衰が殆ど解かっていないことが明らかになった。このことが、後述の新宮研究室における減衰研究の発端になっている。免震では、同様の構造物において支持基盤と構造物の間にダンパーとばねを挿入し、ダンパーの減衰をファジィ理論を用いて調整したもので、「免震シェル構造」^[8]の提案・命名をしたものである。これで大幅な応力低減に繋げることが可能となったが、残念ながら、未だ実際のシェル・空間構造への実現には至っていない。

2. 減衰評価に関する研究

シェル・空間構造物の減衰は、剛性・質量とならびその構造物の振動性状を把握するための重要な要素であることは周知のことである。今日まで、減衰という要素（性質）を定量的に表す減衰定数に関して、多くの振動計測やそれに基づく減衰定数解析が行われているが、減衰定数の把握は十分でない。この為設計では、低次モードを解析範囲としたレイリー減衰や剛性比例減衰（S 造 2%、RC3% 造）などが慣例的に用いられているが、その根拠は曖昧なままである。性能設計の導入、入力地震動の増加といった設計クライテリアの厳格化や大規模地震による被害想定・対策など、構造物やその周辺の振動特性の明確化が社会的急務となっている現在、構造物—地盤の動的相互作用による減衰の影響等も併せて、設計段階において精度良く評価することの必要性は非常に高い。特に、多人数が収容でき地域のコミュニティーを創出すると共に、災害時の避難場所として利用される公共性の高いシェル・空間構造物では、安全性の確保の面からも、減衰を適切に表現した減衰定数の把握が求められている。

減衰は様々な要因が複合的に作用しており、理論的に算出することができない。そこで今日まで、重層構造物・搭状構造物を中心として、多くの実測による減衰評価や減衰マトリクスの提案が行われてきた^{例えば[11]参照}。実測による減衰評価では、様々な減衰評価方法の提案、データ解析手法の模索、減衰の振動振幅依存性の検討が主として行われ、減衰マトリクスに関しては、解析対象とする構造物の形状・規模によって異なるが、様々な減衰マトリクスが提案されてきた。一方、シェル・空間構造物に関しては、構造物の絶対数が少なく、振動性状が複雑であること、測定が容易でないこと等から、重層構造物に比し、研究例はあまり多くない^{例えば[12]-[18]}。

3. 減衰を用いた振動制御技術

減衰を用いた制御機構として、粘性減衰を用いた粘性ダンパーや履歴減衰を用いた高減衰アイソレーター等が実用化されている。構造部材の降伏を許容した設計は、履歴減衰を用いた減衰制御機構を導入した設計であると言える。しかし、制御機構が構造物全体の減衰性能にどの程度影響を与えるのかに関しては、引き続き研究が行われている。今後、減衰制御機構の最適化や高性能化についての研究が進めば、構造物全体として非常に大きな減衰性能を発揮でき、従来よりも効果的な制御方法の開発が期待できる。また、周囲を粘性流体に囲まれ粘性減衰が大きいと考えられる海中構造物や外部に振動が逸散せず材料減衰や人工的に付加した減衰機構で振動制御しなければならない宇宙構造物では近未来的な構造物への適用の可能性がある。

シェル・空間構造において、減衰を調整することによる振動制御については、前述の通りである。



写真1. 重層構造物の一例（日大文理学部研究棟）
振動解析担当：新宮清志（1979年竣工）



写真2 シェル構造物の一例（日大生産工学部実験棟）
構造担当：加藤渉・本岡順二郎（1959年竣工）

4. 減衰評価研究の歩み（日本建築学会の動きを中心に）

ここでは、日本建築学会の動きを中心に減衰評価研究の歩みを記述しておく（文献[16]の「まえがき」に記載したことの一部を抜粋・修正し、さらに加筆した）。

1995年に都市直下型の大地震に遭遇し、さまざまな重層構造物や空間構造物の被害例を目の当たりにした。これを踏まえ、1995年の建築学会大会では、構造部門（荷重運営委員会）PDで「建築物の減衰評価—大地震や大型台風時の精度良い応答予測に向けて」が開催された。この時点では重層構造物や塔状構造物の減衰については相当のデータが収集されていたが、シェル・空間構造物の減衰に関するデータは皆無であった。そこで、1998年4月には「シェル・空間構造物の減衰に関する調査研究WG」が発足した。

また、空間構造物の実現に際して、構造設計の基本理念に立ち戻る議論も現れ、シェル・空間構造への取り組みに対する活動内容の再構築の動きが現れた。このような活動内容の再構築のひとつとして、設計法・設計理念の新しい構築を目指し、減衰性状の把握・人工減衰機構・制御システム・免震工法の導入などに対する研究が新しい動向といえる。そこで、「シェル・空間構造物の応答制御・減衰機構小委員会」（2002年5月～2006年3月）を中心に減衰機構・制御システム・免震などをキーワードとして、空間構造デザインにおけるデータベース構築のために、既往の観測データと応答制御事例を調査してきた。この間に、次のセミナーとパネルディスカッション（PD）を実施した。

- 新「シェル・空間構造」セミナー—シェル・空間構造の減衰と応答制御—、2002年11月
- 「応答制御技術が開く空間構造デザインの可能性」、2003年度日本建築学会大会（東海）PD、2003年9月

その後、この小委員は、「応答制御と減衰小委員会」（2006年4月～2010年3月）へと改編され、調査・研究を継続してきた。上述のWGと小委員会の約10年間にわたる成果を纏めたものが文献[16]であり、重層構造物・塔状構造物の減衰を扱っている文献[11]の姉妹編に相当するものである。

- 書籍「シェル・空間構造の減衰と応答制御」^[16]、2008年3月

シェル・空間構造の減衰と応答制御に関わったWGと小委員会を整理すれば、次の通りである。

- ・「シェル・空間構造物の減衰に関する調査研究WG」（主査：新宮清志、幹事：入江寿弘・川島孝幸・谷口与史也）
- ・「シェル・空間構造物の減衰に関する調査研究WG」（主査：新宮清志、幹事：入江寿弘・谷口与史也）
- ・「シェル・空間構造物の応答制御・減衰機構小委員会」（主査：新宮清志、幹事：立道郁生・谷口与史也）
- ・「応答制御と減衰小委員会」（主査：新宮清志、幹事：立道郁生・谷口与史也）

書籍刊行後、次のセミナーとシンポジウムを実施し、シェル・空間構造の応答制御と減衰の問題を究明してきた。

- 7回新「シェル・空間構造」セミナー—応答制御技術が開く空間構造デザインの可能性2008—、2008年6月
- シンポジウム「シェル・空間構造物の応答制御と減衰—最近の取り組みと将来—」、2009年12月

5. 減衰研究例の紹介^[18]

5.1 対象構造物

本構造物は日本大学生産工学部11号館であり、大規模構造実験室として1959年に建設された。シェル屋根は、スパン11m×40m、ライズ2m、厚さ0.1mの場所打ちコンクリート造であるが、後に防水シートがシェル屋根全体に葺かれている。なお、屋根部分は鉄筋コンクリート造の下部ラーメンによって支持されている。

5.2 実験方法

屋根部分の防水加工が分厚く柔らかなため、屋根についた突起部分に速度計を配して、水平2方向・鉛直1方向の3軸速度測定を行った。測定点を図2に示す。なお、計測は外部の影響が少ない深夜の時間帯に行った。

5.2.1 常時微動観測

サンプリング周波数500Hz、サンプリング時間200s、測定回数150回として計測を行った。

5.2.2 人力加振実験

人力加振実験は、固有周期に合わせた加振ピッチと十分な繰り返し回数が必要とされるため、あらかじめ常時微動観測によって確認した1次固有周期に合ったリズム音をメトロノームで発生させ、13人で鉛直方向に加振を行った。加振点はシェル屋根の頂点であり、横一列に並び加振を行った。なお、実験はサンプリング周波数1,000Hz、サンプリング時間100s、測定回数10回とした。

5.2.3 減衰評価法

常時微動観測に関しては、RD法を用い、人力加振実験に関しては、ハーフパワー法を用いて評価を行った。

5.3 結果

- 1) PC円筒形シェルの減衰定数は、常時微動観測では1.3%、人力加振実験では3.3%である。
 - 2) 常時微動観測と人力加振実験から算出された減衰定数は2%の差が生じている。
- この差異については、検討の余地がある。

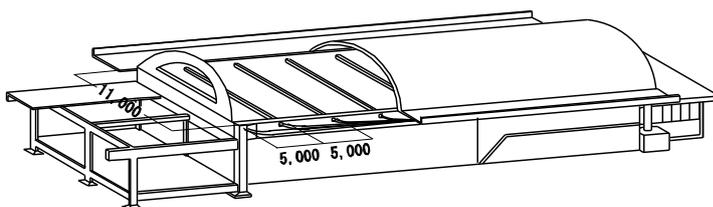


図1. 構造概要

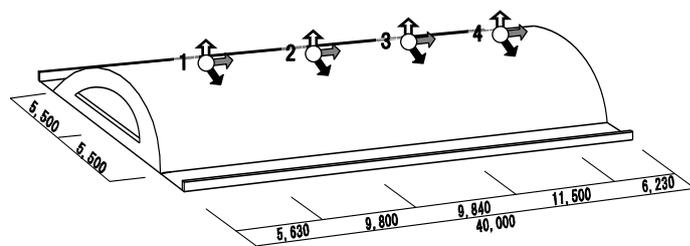


図2. 測定点

表1. 常時微動観測による減衰定数 (%)

	短軸方向	長軸方向	鉛直方向	測定点別平均
測定点1	1.41	1.37	1.20	1.33
測定点2	1.61	1.26	1.23	1.37
測定点3	1.56	1.28	1.34	1.40
測定点4	1.16	1.29	1.37	1.27
方向別平均	1.44	1.30	1.29	1.34
全平均	1.34			

表2. 人力加振実験による減衰定数 (%)

	短軸方向	長軸方向	鉛直方向	測定点別平均
測定点1	2.95	2.95	3.06	2.99
測定点2	2.93	3.54	3.36	3.27
測定点3	3.42	3.17	3.02	3.21
測定点4	4.17	3.66	3.42	3.75
方向別平均	3.37	3.30	3.22	3.30
全平均	3.31			

6. おわりに

現在までに重層構造物では、様々な減衰傾向分析が行われ、微小振幅に関して減衰定数の推定式が提案されている^例えは¹¹⁾。筆者らは、既往の報告も利用し、シェル・空間構造物の減衰評価データベースを作成し、減衰傾向分析を行った¹⁷⁾。データベースは規模、構造、実験方法、解析方法別に測定結果、解析結果が纏められており、減衰の振幅依存性、固有振動数依存性を確認している。また、シェル・空間構造物において、減衰系を剛性比例型とすると、高次において減衰が過大評価される恐れがある。但し、収集データは全て弾性領域内で、比較的低次のモードについて扱っており、評価データも一時的な測定から行われている。今後は塑性領域を含む中・大地震での評価や高次モードまで評価対象としたデータベースを作成すると共に、スマートセンシング技術などを用いた常時観測を行う必要があり、更なるデータベースの拡充が必要と考えられる。

昨今、これまでの研究成果を集約し、データベース化しようとする流れが出てきている。最終的には減衰定数に関する推定式を提示するとともに、現在汎用的に使用されている解析方法において、減衰性能を適切に表現できる減衰マトリクスの設定方法を提案することが目下の目標である。

参考文献

- [1] 山田登志郎：ファジィ理論のラーメン構造物の振動制御への応用、日本ファジィ学会誌、pp.170-177、Vol.9、No.2、1997
- [2] J.N.Yang: Application of Optimal Control Theory to Civil Engineering Structures, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.101, No.6, pp.818-838,1975
- [3] 武田寿一：構造物の免震・防振・制振、技報堂出版、1988
- [4] 海洋都市開発研究会：アクティブ制御—最新事例と海洋都市への応用—、日刊工業新聞社、1992
- [5] 篠原正宣、他 15 名：ミニ特集 建築・土木における制御技術、計測と制御、計測自動制御学会、Vol.31, No.4, pp.461-508, 1992
- [6] K.Shingu, T.Kawanishi and M.Harumoto:A Study on Active Control of a Conical Shell Subjected to Seismic Forces, International Association for Shell and Spatial Structures, East Germany, pp.33-42, 1990
- [7] 新宮清志・船本大蔵：動的外力を受けるシェル構造物および質点系のファジィ制御、日本機械学会論文集(C編)、第58巻550号、pp.1742-1747、1992
- [8] 新宮清志・福島欣哉：上下動地震を受けるシェル構造物の免震およびファジィ振動制御、日本機械学会論文集(C編)、第60巻577号、pp.2000-3005、1994
- [9] 新宮清志・平塚聖敏：建築構造物の免震および知的制御 —免震シェル構造・ラーメン構造へのファジィおよびニューロ応用— (小特集)、シミュレーション (日本シミュレーション学会機関誌)、第16巻3号、pp.157-165、1997
- [10] 新宮清志：シェル構造物の振動制御へのファジィ理論の応用、日本ファジィ学会誌、Vol.9、No.2、pp.162-169、1997
- [11] 日本建築学会：建築物の減衰、丸善、2000
- [12] 立道郁生：空間構造の地震応答制御に関する研究、3.5 空間構造の減衰性能、法政大学博士論文、2001
- [13] 新宮清志・青木義男・久保田勝朗：シェル・空間構造物の減衰に関する基礎的研究—あるテンセグリックトラスアーチの減衰特性—、日本建築学会技術報告集 第17号、pp.121-126、2003
- [14] 日本建築学会：空間構造の動的挙動と耐震設計、第2節 空間構造の減衰、丸善、2006
- [15] 平塚聖敏・新宮清志・田仲敏丈：鉄骨円錐形シェルの減衰定数—実験方法・評価手法による検討—、構造工学論文集 (日本建築学会) Vol.54B、pp.295-301、2008
- [16] 日本建築学会：シェル・空間構造の減衰と応答制御、丸善、2008
- [17] 湯川正貴・新宮清志・平塚聖敏：シェル・空間構造の減衰評価に関する研究—HP シェル及び円筒形シェル屋根の振動実験—、日本建築学会構造系論文集 第74巻 第646号、pp.2271-2280、2009
- [18] 新宮清志・平塚聖敏・湯川正貴：シェル・空間構造の減衰特性に関する研究—あるPC円筒形シェルの減衰定数—、構造工学論文集 (日本建築学会)、Vol.56B pp.463-467、2010