

高減衰構造対応汎用解析プログラム

- 制震（振）ダンパーに対応した市販の応答解析プログラムに関する調査 -

ユニオンシステム 品川 亙 山崎久雄

早稲田大学 曾田五月也

1. はじめに

制震（振）ダンパーを付加した建物が地震や風などの外乱を受けたときの挙動を推定するとき、設計実務ではコンピュータプログラムを用いた時刻歴応答解析が行われ、それによって求まる応答値から安全検証や性能確保の確認がなされていることが多いと思われる。言うなれば、制震（振）ダンパー等により高減衰化された建物の普及には、当該コンピュータプログラムの発展が不可欠であり、また当然ながら、利用者の側は、これら解析プログラムの適用範囲や条件をよく理解し正しく活用していかねばならないことも明白である。そのためには、最新の応答解析プログラムにおいて制震（振）ダンパーに関する機能がどの程度充実しているのかを設計者側が認識することや、逆にプログラム開発者は高減衰構造の設計（解析）者側のプログラムに対するニーズや要望を把握することが不可欠である。そこで筆者らは、早稲田大学理工学総合研究センターに設置された「高減衰構造に関する総合研究」プロジェクト（研究代表者：曾田五月也）においてあらかじめ選定した、国内で市販されかつ設計組織等で利用されていると思われる制震（振）ダンパー考慮可能な応答解析プログラムについて、それぞれのソフトウェア会社に機能調査および提示モデルによる試解析を依頼した。さらにプロジェクト共同研究者を中心に、高減衰構造を設計（解析）する上で応答解析プログラムに対する設計者側の要望などを調査した。ここに報告するものは、各ソフトウェア会社や設計者から寄せられた回答の内容をまとめたものである。

2. 応答解析プログラム調査内容

9社に調査依頼を発送したのに対して3社、計8本のプログラムについて回答があった。表1にそのプログラム名、開発（提供）会社、プログラムの提供方法および会社連絡先（ホームページアドレス）を示す。調査内容は各プログラムが扱う建物モデルの概要と制震（振）ダンパーモデルの対応状況に絞ったものとした。建物モデルについては骨組モデルまたは質点系モデルに大別し、骨組モデルを扱

表1 調査を実施した応答解析プログラム（会社名 50 音順，敬称略）

| プログラム名 | 開発（提供）会社 | 提供方法 | ホームページ |
|----------------------|----------|------------|---|
| RESP-M/ | 構造計画研究所 | 販売・技術サービス料 | http://www.kke.co.jp/ |
| RESP-M3 | " | " | " |
| RESP-F3D | " | " | " |
| MIDAS/Gen | " | " | " |
| SNAP | 構造システム | 販売・レンタル | http://www.kozo.co.jp/ |
| DAP | " | " | " |
| SS21/DynamicPRO | ユニオンシステム | 年間使用料 | http://www.unions.co.jp/ |
| SS21/SuperDynamicPRO | " | " | " |

うものには構造種別と解析モデルを、質点系モデルを扱うものには質点の変位自由度と置換系についてそれぞれの適用可否を調査した。また制震（振）ダンパーモデルの対応調査については粘弾性ダンパー、オイルダンパー、粘性ダンパー・制震壁、鋼材ダンパー、摩擦ダンパーに分類し、調査用紙に記したそれぞれの代表的な力学モデルについての対応可否と、ダンパーと主フレームとの接続要素の取り扱いについて調査した（調査内容の詳細は表3に示す各プログラム機能一覧を参照）。

次に、各ソフトウェア会社に依頼した試解析モデル¹⁾の条件を表2(a)および表2(b)に示す。試解析モデルは10質点直列せん断型モデルで、フレームは弾性とし粘性減衰は無視するとした。各階には粘弾性ダンパーが剛性を有する取付け部材を介して配置され、粘弾性ダンパーは図1に示すような一般化 Maxwell モデル¹⁾で与えるものとした。また、入力地震動はJMA 神戸 1995²⁾ NS 成分（主要動を含む40秒間）とした。各社には、1階のダンパー部の履歴ループ、5階および10階の応答加速度時刻歴の提出を依頼した。

表2(a) 試解析に用いた質点モデル

| 階 | 各層質量 (ton) | フレーム剛性 K_F (kN/cm) | 取付け部材の剛性 K_B (kN/cm) | 形状係数 S/d (cm) |
|----|------------|----------------------|------------------------|-----------------|
| 10 | 980 | 4887.6 | 4887.6 | 59619 |
| 9 | | 7972.8 | 7972.8 | 97251 |
| 8 | | 10769.7 | 10769.7 | 131367 |
| 7 | | 12939.9 | 12939.9 | 157839 |
| 6 | | 14998.3 | 14998.3 | 182947 |
| 5 | | 16825.3 | 16825.3 | 205232 |
| 4 | | 18429.6 | 18429.6 | 224802 |
| 3 | | 19814.3 | 19814.3 | 241692 |
| 2 | | 20985.3 | 20985.3 | 255975 |
| 1 | | 21976.7 | 21976.7 | 268068 |

表2(b) 試解析に用いた粘弾性ダンパーの力学モデル

| ダッシュポット ($N \cdot \text{sec}/\text{cm}^2$) | | バネ (N/cm^2) | |
|---|-------|---------------------------|--------|
| $_1 =$ | 3.73 | $_1 =$ | 353.04 |
| $_2 =$ | 28.44 | $_2 =$ | 30.40 |
| $_3 =$ | 3.73 | $_3 =$ | 44.13 |

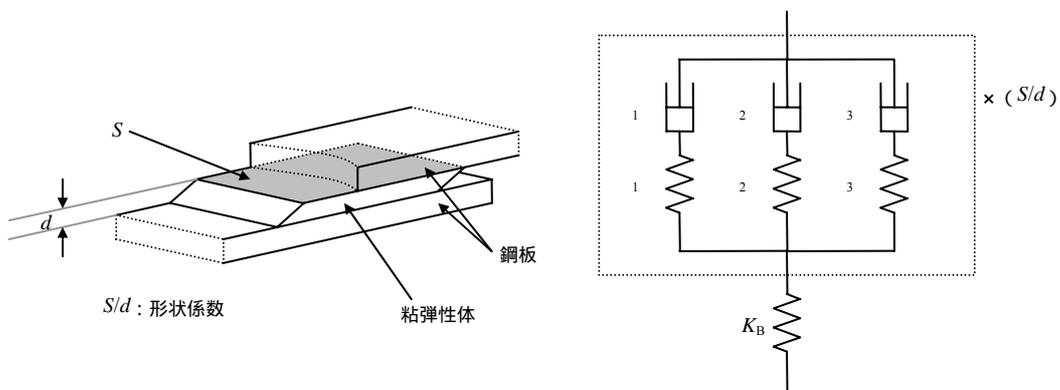


図1 粘弾性ダンパーと一般化 Maxwell モデルの模式図（文献1より引用）

3. 各応答解析プログラムの機能調査の結果

各ソフトウェア会社から寄せられた応答解析プログラムの機能に関する回答内容を表3に一覧で示す。全調査(返答)プログラム数8本のうち、建物を骨組モデルで取り扱うものが3本、質点系モデルで取り扱うものが6本であった(両方併用が1本)。骨組モデルを扱うプログラムでは少なくとも立体解析(3次元)モデルを採用しており、材料種別ではいずれもコンクリート系、鉄骨系が扱え、木質系を扱えるものもある。建物を質点系モデルで取り扱うプログラムでは、各質点に対する変位自由度が1方向併進(u 成分)の場合も2方向併進と鉛直軸まわりの回転変位($u-v-\theta$ 成分)の両方が扱えるものやいずれか一方が扱えるものがあり、そのときの置換振動系ではほとんどのプログラムで等価せん断型と等価曲げせん断型の両方に対応している。

制震(振)ダンパーの対応については、ほとんどのプログラムが分類したダンパーに対して少なくとも1種類以上の解析モデルを搭載している。特に粘弾性ダンパーに対しては4種類の解析モデルを搭載しているプログラムもあり、粘弾性体の材料種類や提案されている解析モデルの豊富さを反映したものであるといえる。またすべてのプログラムで、主フレームとダンパーとの支持剛性を直列に結合させたモデルを扱うことができ、当該効果を考慮した解析ができるようになっている。

調査結果より、立体骨組モデルに制震(振)ダンパーを取り付けて部材レベルで解析できるプログラムや、各種ダンパーの解析モデルが現在ではどちらかと言えばより豊富に搭載されている質点系応答解析プログラムなど、高減衰構造を解析するための市販プログラムは多彩で各企業の特徴を生かしくよく充実しているといえる。

4. 各応答解析プログラムによる試解析の結果

各ソフトウェア会社から寄せられた試解析の1階ダンパー部の応答履歴ループを図2(a)に、10階絶対加速度時刻歴を図2(b)に、5階絶対加速度時刻歴を図2(c)にそれぞれ示す。各プログラムの応答値はいずれもよく一致している。

今回の試解析は、一般化 Maxwell モデルに置換した粘弾性ダンパーが取付け部材を介して付加された質点系の解析であるが、各プログラムの応答結果はいずれも十分に信頼できるものであるといえる。

5. 設計(解析)者からの応答解析プログラムへの要望調査の結果

プロジェクト共同研究者を中心に、応答解析プログラムに対する要望を集めた。特に決まった設問はなく自由な形式であったが、整理すると次のようにまとめることができた。行末の記号は返答者の勤務先でCは建設会社、Oは設計事務所を表す。

- a) 様々な結果確認が簡単にでき、目標値を超えている箇所やミスが発見しやすくしてほしい : C
- b) データが作成しやすくフレームの解析から応答解析にスムーズに移行できるようにしてほしい : C
- c) 複数の結果が容易に比較でき、繰り返し処理が効率的に行えるようにしてほしい : C
- d) 出力形態や作図が DTP に対応し、ドキュメント作成が簡単にできるようにしてほしい : C
- e) ソフトウェア会社間でデータの互換性が図れることを望む : O
- f) 最新の研究を取り入れた豊富な機能を持ち、細かな検討ができるようにしてほしい : C
- g) 曲げせん断型モデルのせん断成分にダンパーが有効になるようなモデルを簡単に扱いたい : C

表3 調査対象の応答解析プログラムの機能一覧(調査回答内容に基づく)

| プログラム名 | SNAP | DAP | RESP-M/II | RESP-M3 | RESP-F3D | MIDAS/Gen | SS21/ SuperDynamicPRO | SS21/ DynamicPRO |
|-----------------|---|--|---|---|---|---|---|---|
| 提供会社(機関) | 構造システム 販売: レンタル | 構造システム 販売: レンタル | 構造計画研究所 販売: 技術サービス料 | 構造計画研究所 販売: 技術サービス料 | 構造計画研究所 販売: 技術サービス料 | 構造計画研究所 販売: 技術サービス料 | ユニオンシステム 年間使用料 | ユニオンシステム 年間使用料 |
| 提供方法 | | | | | | | | |
| 建物モデル | | | | | | | | |
| 骨組モデル | | | | | | | | |
| 構造種別 | | | | | | | | |
| コンクリート系 | | | | | | | | |
| 鉄骨系 | | | | | | | | |
| 木質系 | | | | | | | | |
| その他 | 剛性直接入力 | | | | | | | |
| 解析モデル | | | | | | | | |
| 立体骨組 | | | | | | | | |
| 類似立体骨組 | | | | | | | | |
| 平面骨組 | | | | | | | | |
| 質点モデル | | | | | | | | |
| 質点自由度 | | | | | | | | |
| (u, v,) | | | | | | | | |
| (0) | | | | | | | | |
| 置換モデル | | | | | | | | |
| 等価せん断型 | | | | | | | | |
| 等価曲げせん断型 | | | | | | | | |
| 曲げせん断型(7R7D/7S) | | | | | | | | |
| 制震ダンパーモデル | | | | | | | | |
| 粘弾性ダンパー | | | | | | | | |
| M3モデル | | | | | | | | |
| Voigtモデル | | | | | | | | |
| 4要素モデル | | | | | | | | |
| 分数微分モデル | | | | | | | | |
| その他 | | | | | | | 温度上昇考慮Voigt | 温度上昇考慮Voigt |
| オイルダンパー | | | | | | | | |
| バイリニア型ダンパージュボット | | | | | | | | |
| その他 | トリニア型 | トリニア型 | 速度二乗型 | 速度二乗型 | 速度二乗型 | | | |
| 粘性ダンパー、制震壁 | | | | | | | | |
| 速度べき乗型モデル | | | | | | | | |
| その他 | | | | | | | | |
| 鋼材ダンパー | | | | | | | | |
| Bilinear型 | | | | | | | | |
| その他 | | | | | | | | |
| 摩擦ダンパー | | | | | | | | |
| Bilinear型 | | | | | | | | |
| その他 | | | | | | | | |
| その他 | | | | | | | | |
| その他 | | | | | | | | |
| ダンパー支持剛性 | | | | | | | | |
| 線形剛性 | | | | | | | | |
| 非線形剛性 | | | | | | | | |
| その他 | | | | | | | | |
| 特記 | 対OS: Windows98/Me/2000/XP 以上 推奨CPU: Pentium 1.024x768以上 推奨メモリ: 128MB以上 | 対OS: Windows95/Me/2000/XP 以上 推奨CPU: Pentium 1.024x768以上 推奨メモリ: 64MB以上 | 対OS: Windows98/Me/2000/XP 以上 推奨CPU: Pentium 1.024x768以上 推奨メモリ: 128MB以上 | 対OS: Windows98/Me/2000/XP 以上 推奨CPU: Pentium 1.024x768以上 推奨メモリ: 128MB以上 | 対OS: Windows98/Me/2000/XP 以上 推奨CPU: Pentium 1.024x768以上 推奨メモリ: 128MB以上 | 対OS: Windows2000/XP 以上 推奨CPU: Pentium 1.024x768以上 推奨メモリ: 256MB以上 | 対OS: Windows98/Me/2000/XP 以上 推奨CPU: Pentium 1.024x768以上 推奨メモリ: 128MB以上 | 対OS: Windows98/Me/2000/XP 以上 推奨CPU: Pentium 1.024x768以上 推奨メモリ: 128MB以上 |

h) ある条件を与えてダンパーの最適値(量)が算定できるようなものを望む: C

i) 振れを考慮したときに現れるモードやそれによる減衰定数の影響を簡単に確認したい: 0

操作面での効率化や改善を期待している内容が多い(a~e)が, このうちソフト会社間でのデータ互換を期待するのは設計段階に応じて適切なプログラムを選択して利用することが背景にあると思われる。解析機能に関する要望は4点(f~i)で, 特に曲げせん断型モデルにおいてダンパーをせん断成分に有効

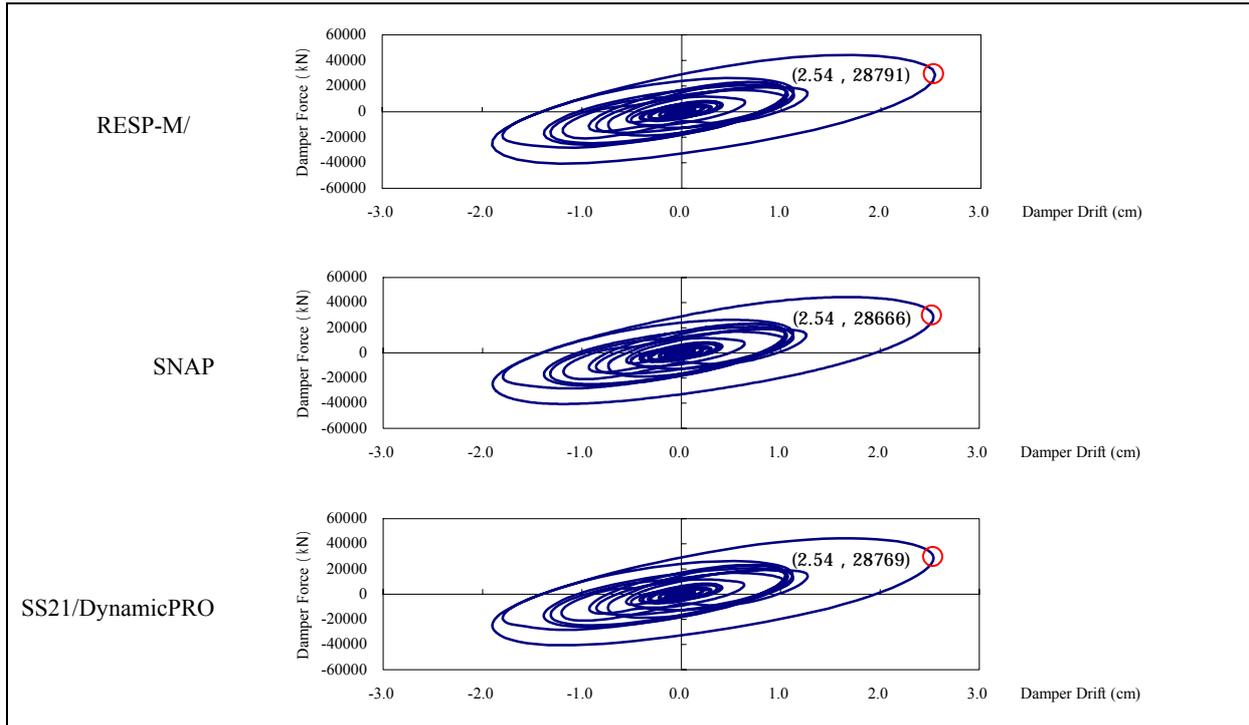


図2(a) 1階ダンパーの履歴ループの比較

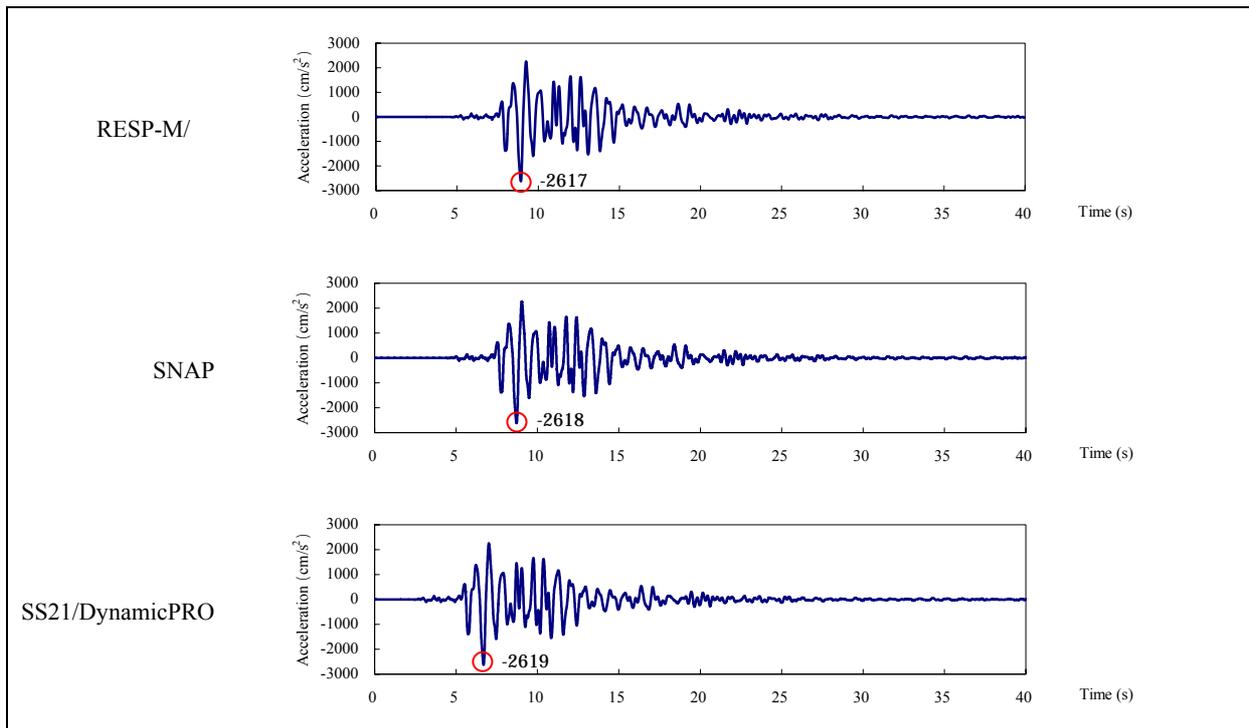


図2(b) 10階加速度時刻歴の比較

とさせる件に関してはこれまでも報告^{例えば3)}があり重要である。またダンパーの最適値(量)算定に対する要望は構造計画の段階でもプログラムを効率的に利用したいという期待であろう。

これらの要望に対して、現状の対応度は各ソフトウェア会社やプログラムによって差があると思われるが、常にこのような利用者のニーズや要望を把握して反映させていくことが重要である。

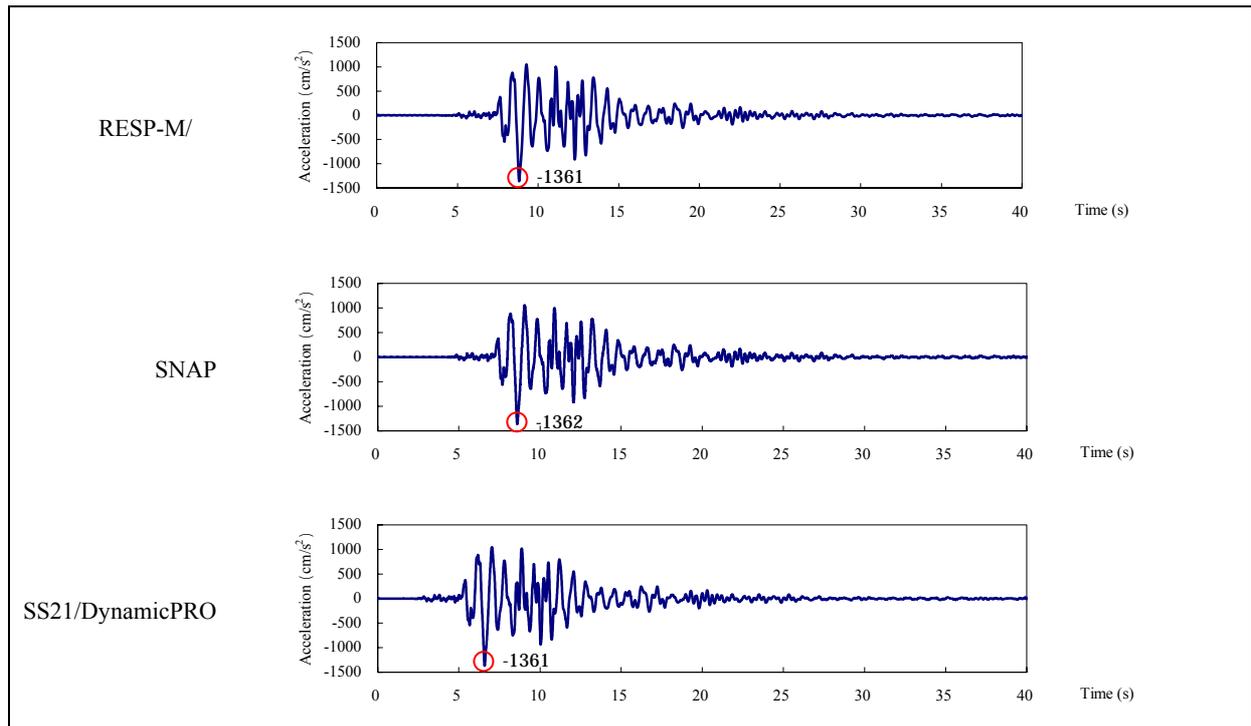


図 2 (c) 5 階加速度時刻歴の比較

6. まとめ

ソフトウェア会社 3 社の協力を得て、8 本の制震(振)ダンパー考慮可能な応答解析プログラムについてダンパーに関する機能の調査と提示モデルによる試解析を行い、これらの結果をまとめた。各プログラムの機能には開発会社の特色が生かされ、扱う建物モデルや対応するダンパーの解析モデルも多彩で充実しているといえる。また試解析結果を比較してもほぼ一致した結果が得られ、信頼できる。高減衰構造を設計(解析)しようとする設計者側にとってこれらのプログラムは多様な設計目的や建物の構造特性に対し十分適用でき得る設計ツール群であるといえる。

また、プロジェクト共同研究者を中心に調査した応答解析プログラムに対する要望をまとめた。操作性の効率化や改善面への期待が多かったが、曲げせん断型モデルにおけるダンパーの考慮方法に関する重要な指摘やダンパー最適値(量)を算定してほしいとの要望もあった。ソフトウェア会社には、このような利用者からの要望を常に把握して機能充実の指針とされるよう期待する。

最後に、プログラムやそれを利用した設計の発展が高減衰構造の普及につながることを望む。

謝辞

本報告をまとめる上で、(株)構造計画研究所の芥川さつき氏、(株)構造システムの渡辺信也氏にはプログラムの機能調査および試解析でご協力をいただきました。また多くの設計者の方から要望アンケートの返答をいただきました。ここに記して謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) 高橋雄司, 曾田五月也: 一般化マックスウェルモデルにより模擬される粘弾性ダンパーを有する構造物の応答解析方法, 日本建築学会構造系論文集第 511 号, pp85-91, 1998.9
- 2) 気象庁, 87 型電磁式強震計波形提供リスト, 1995 年兵庫県南部地震 神戸海洋気象台加速度記録
- 3) 石井正人, 北村春幸, 和田章, 笠井和彦: 粘弾性型制振部材付き架構のモデル化に関する検討, 日本建築学会構造系論文集第 531 号, pp55-62, 2000.5