

博士論文

(2022年11月10日 提出)

論文題目 弾性すべり支承における静摩擦係数の待機時間依存性を

考慮した免震建物の構造設計法に関する研究

指導教員 宮内 靖昌



大学院 工学研究科
博士後期課程 建築・都市デザイン工学専攻

申請者氏名 吉田 康弘



大阪工業大学大学院

博 士 論 文

弾性すべり支承における静摩擦係数の待機時間依存性を
考慮した免震建物の構造設計法に関する研究

大阪工業大学大学院工学研究科

吉田 康弘

目 次

第 1 章 序論

1.1 研究背景	1
1.2 本論文の構成	4
1.3 既往の研究	5
1.4 研究の目的	9

第 2 章 免震建物の水平加力実験

2.1 はじめに	13
2.2 建物概要	14
2.3 実験概要	16
2.4 荷重-変位関係	20
2.5 建築物の応答に影響する静摩擦係数およびその待機時間依存性	27
2.6 まとめ	28

第 3 章 素材実験による静摩擦係数と待機時間の定量的評価

3.1 はじめに	29
3.2 実験概要	
3.2.1 試験条件の設定	30
3.2.2 試験体	32
3.2.3 試験方法	34
3.3 実験結果	
3.3.1 試験実施日程と気温	35
3.3.2 夏季における試験結果	37
3.3.3 秋季および冬季の試験結果	40
3.4 静摩擦係数と待機時間の関係式	54
3.5 まとめ	58

第 4 章 静摩擦係数の待機時間依存性を考慮した解析モデルの構築と設計法の提案

4.1 はじめに	60
4.2 設計法の提案	61
4.3 解析プログラムの開発	
4.3.1 弾性すべり支承の解析モデル	63
4.3.2 試解析結果	65
4.4 モデル建物での試設計	
4.4.1 解析モデルの設定	66
4.4.2 入力地震動	70
4.4.3 時刻歴応答解析結果	77
4.5 まとめ	93

第5章 観測記録のシミュレーション解析による設計法の妥当性検証	
5.1 はじめに	95
5.2 観測地震動	
5.2.1 記録装置	96
5.2.2 観測記録	98
5.2.3 加速度記録とけがき板記録との対応性	103
5.2.4 建物への入力地震動	109
5.3 シミュレーション解析	
5.3.1 地震時の復元力特性	110
5.3.2 時刻歴応答解析結果	111
5.3.3 設計法の妥当性検証	113
5.4 まとめ	114
第6章 結論	
6.1 研究のまとめ	117
6.2 今後の課題	119
研究実績	120
謝辞	121

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 研究背景

我が国では、免震構造建物の普及が進み、累積棟数（戸建住宅除く）としては世界トップクラスの5,000棟（図1.1）を数える免震先進国である。免震構造の技術水準は世界最高レベルにあるとされている^{1.1)}。免震構造は、免震部材が上部構造の建物重量を安定して支持しながら水平方向には柔らかく動くことで、建物が地震による激しい振動から免れる構造形式である。免震部材には、図1.2に示すように地震による弾性ひずみエネルギーを一時的に蓄えるアイソレータ（支承）と、エネルギー吸収により振動を減衰させるダンパーがあり、それぞれ数種類に分類される多数の免震部材が開発されている^{1.2)}。免震建物の設計では、それらの免震部材を組合せ、適切な減衰量を付加して応答変位が過大とならないようにしながら、建物の固有周期を伸ばし地震力（応答加速度）を低減するように設計する（図1.3）。普及とともに免震部材は淘汰され、現在主流となっている支承は図1.4に示す4種類である。

その中で、弾性すべり支承（図1.5）は断層近傍での直下型地震動や長周期長時間地震動など幅広い特性の地震動に対して有効に固有周期を伸ばし、建物に高い免震性能を発揮させることができる、ロバスト性（幅広い特性の地震動群に対応するためのシステムの有効性）に優れた免震部材であるとされている^{1.3)}。その特性を活かし超高層建物から低層（軽量）建物まで広範囲の免震建物で使用されている。一方、免震建物では入力地震動レベルの不確定性に対して冗長性（幅広いレベルの地震動群に対応するための余裕度）も必要となる。免震建物の設計では、設計レベル（レベル2）での入力地震動の1.5倍を余裕度検討用のレベル3として限界状態を検討するなど、入力地震動レベルの不確定性に対して一定の余裕度を確保するように設計する。しかし、免震建物の設計クライテリアは最大級の地震動を考えるだけでなく、レベル1やレベル2の地震動に対しても建物内部の応答加速度を低減し、収蔵物の転倒防止、建物としての機能維持および財産の保全など、地震の再現期間に応じて詳細に設定される。後述するように弾性すべり支承においては経年による摩擦特性の変化を把握できていない部分があり、普及が進む弾性すべり支承の経年も含めた設計レベルでの応答を精確に把握することは、地震発生時に災害拠点等としての機能維持や継続使用を期待される免震構造の重要な課題であることが本研究の背景にある。

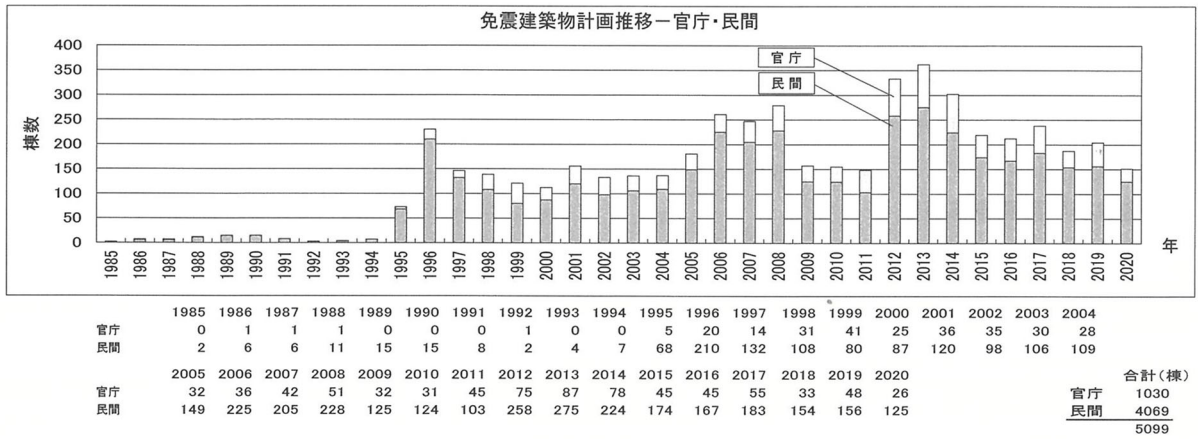


図 1.1 免震建築物計画推移棟数^{1.4)}

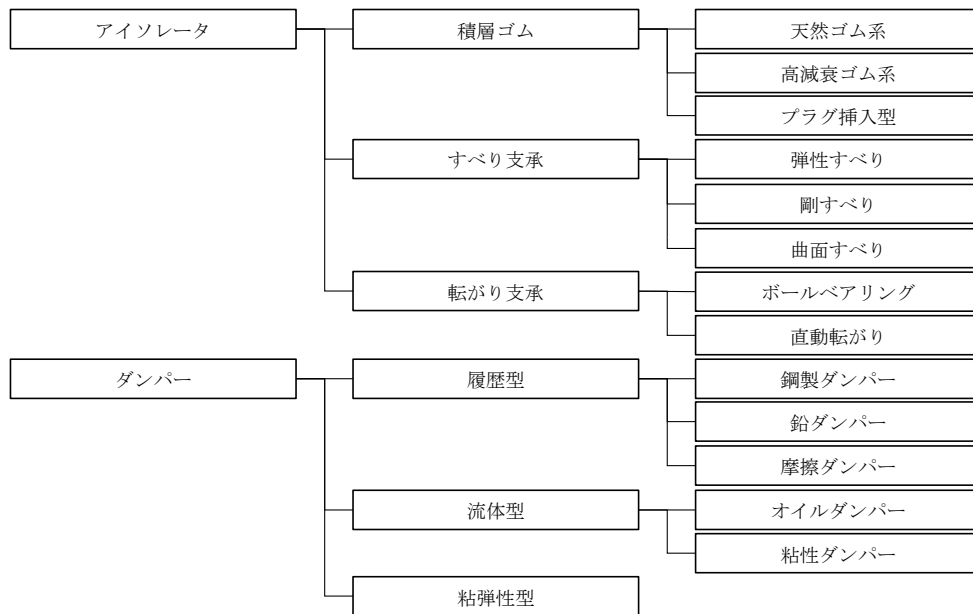


図 1.2 免震部材の種類

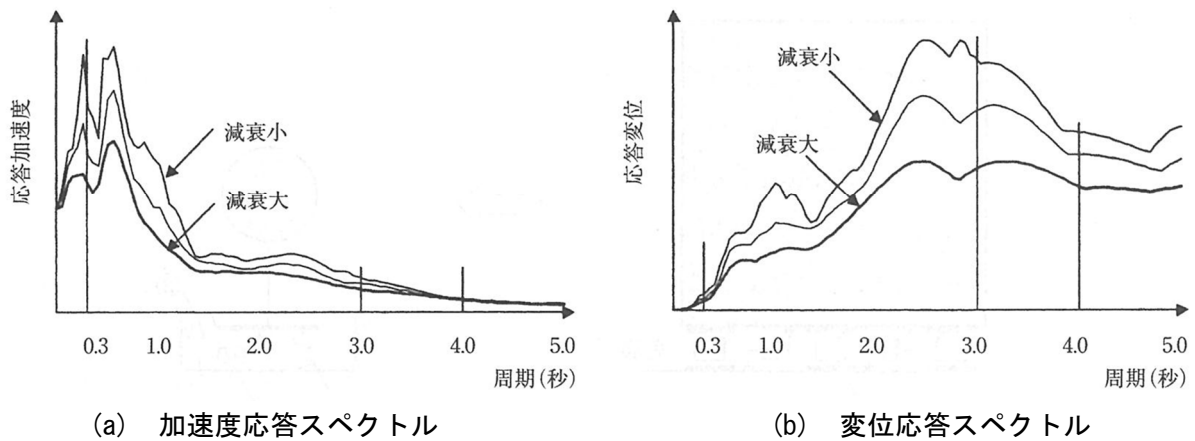


図 1.3 地震応答スペクトルの概念図^{1.2)}

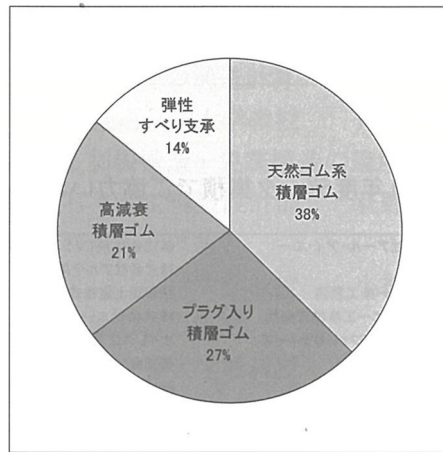


図 1.4 免震支承の使用割合 (2004~2020 年) ^{1.4)}

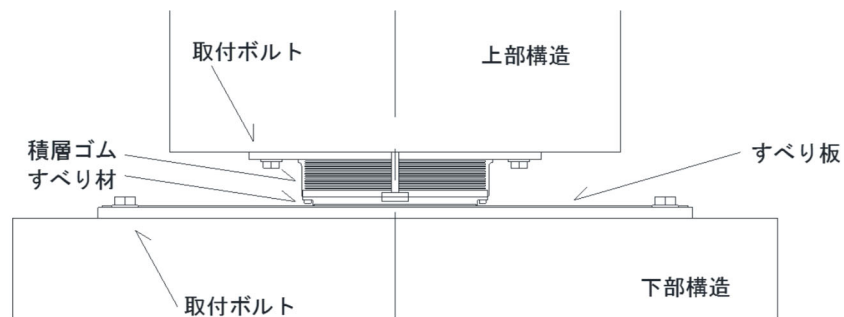


図 1.5 弾性すべり支承の基本的構成

1.2 本論文の構成

本論文は、以下に示す6つの章で構成される。

第1章では、序論として本研究の背景と目的を示す。数ある免震部材の中で弾性すべり支承は、免震層の水平剛性を小さくして建物の固有周期を伸ばすために有用な免震部材である。設計において弾性すべり支承の復元力特性を設定する際には、面圧や速度などの各種依存性が考慮されるが、摩擦係数の経年変化については明らかにされていない。建設した免震建物が何年後に遭遇するかは分からない地震時に優れた性能を発揮するためには、設計における摩擦係数の経年変化に対する考え方を明確にすることは重要であり、弾性すべり支承の経年変化を考慮した免震建物の設計手法を確立することを本研究の目的とする。

第2章では、本研究着手の発端となった免震建物（以下、モデル建物）の水平加力実験について述べる。この実験は、維持管理や地震時の対応に建設会社として必要となる免震構造の専門的な技術を取得するために行ったものである。本章では、実験の概要と得られた荷重変位関係について記述し、設計復元力特性から推定される水平力よりも実験では大きな水平力を要した原因と建物への影響について考察し、本研究着手の発端となった課題を示す。

第3章では、弾性すべり支承の静摩擦係数の経年による変化を定量的に把握するために、すべり材（PTFE材）とすべり板（PTFEコーティングステンレス板）を組合せた試験体に、面圧を加えて一定時間経過後に加力した実験について述べる。実験の結果から待機時間、面圧および気温を変数とした重回帰分析を行い、弾性すべり支承の静摩擦係数と待機時間の関係式を提案した。

第4章では、免震建物の実施設計において、静摩擦係数の待機時間による増大を考慮するための設計手法を提案した。まず第3章にて示した提案式を使用する際の考え方と復元力モデル例を示し、次に、既往のプログラムでは静摩擦係数を考慮した解析ができないため、摩擦モデルを有するプログラムを開発したので、その解析モデルと試解析結果を概説する。さらに、モデル建物での試設計として、バイリニア型の動摩擦モデルでの応答と、提案式により待機時間による静摩擦係数の増大を考慮した静摩擦モデルでの応答を、実建物の設計モデルにて開発プログラムを用いて解析し、結果の比較により提案した設計手法を用いた場合の応答への影響を示した。

第5章では、2018年に発生した大阪府北部を震源とする地震において、モデル建物にて地震観測記録が得られたので、シミュレーション解析により第4章にて提案した設計手法の妥当性を検証した。まずは得られた地震観測記録を分析し、加速度記録とけがき板の変位記録との対応性を検討した。検討により得られた建物1階の入力地震動を設計モデルに入力し、2階床での設計応答と観測記録の比較、および免震層上下の設計相対変位とけがき板記録の比較により設計手法等の妥当性を検証した。

第6章では、各章で得られた知見を整理し、本研究の結論を示す。

1.3 既往の研究

免震部材の研究開発は、海外で発明されたアイソレータ（積層ゴム支承）を日本の建築物に適用させるための研究が1970年代から精力的に行われ、1983年に日本で最初の免震建物が建設^{1.5)}されて草創期を迎えた。1995年の阪神淡路大震災においてその安全性が実証^{1.6) 1.7)}されたことにより適用件数が大幅に増加し、その頃には免震部材の種類も豊富になり活発に技術革新が行われた。弾性すべり支承は、1987年頃の開発当初^{1.8)}にはすべり材をPTFE、すべり板を鏡面加工ステンレス板とした摩擦係数0.1程度のものであったが、現在ではすべり板をPTFEコーティングステンレス板とした摩擦係数0.015以下の低摩擦タイプが主流となった^{1.9)}。

免震部材は工業製品であり、その復元力特性は比較的把握しやすいといえる。耐震構造では、復元力特性を構成する主要部となる梁端等の塑性ヒンジは建物全体となり、建物毎に異なる架構剛性や崩壊機構とコンクリートなど材料特性のばらつきの大きさから、その復元力特性は把握が難しく安全側に最低限の耐力を担保する設計を行う。免震構造では、復元力特性を構成する主要部は免震層に集中配置された免震部材であり、各部材の復元力特性は温度、経年、ひずみ、面圧など各種依存性および製造ばらつきによる特性変化の幅を把握し、加速度と変位の相反する条件に対して両方のクライテリアを満足するように設計を行う。指定建築材料として必要となる大臣認定のための性能評価時に、メーカーごとに特性変化率が把握され、設計では複数のメーカーを選定候補とした設計が可能となっている。

しかし、弾性すべり支承については、積層ゴム部分の一次剛性に対して温度および経年による依存性は考慮されるが、すべり面の摩擦係数について静摩擦係数は考慮されず、動摩擦係数に対して面圧、速度、繰り返し回数の依存性のみで経年や温度に対する変化は考慮されていない^{1.10)}。積層ゴム部分の温度および経年変化については基本的に天然ゴム系積層ゴム支承と同様であり、アレニウスの化学反応速度論^{例えば 1.11)}、開発時の実験、別置き試験体^{例えば 1.12) ~1.14)}、メルボルンの100年近く使用された防振ゴム材^{1.15)}などで理論、実験および観測により把握されている。また、すべり面の温度依存性については、主に長周期長時間地震動を対象として動摩擦係数について検討され、高摩擦タイプでは高温になるほど動摩擦係数は低減し、低摩擦タイプでは設計領域における変動はほとんどないとされている^{例えば 1.16) ~1.18)}。摩擦係数の経年変化については、既往の研究成果として以下の文献^{1.19) ~1.21)}がある。

長島ら^{1.19)}は、高摩擦タイプの弾性すべり支承8基と復元材のクロロプレンゴムブロックを用いた建物（1988年7月竣工）にて、ほぼ9年経過時に静的な水平加力実験を行い、竣工前実験時の特性変化を確認した。加力は油圧ジャッキにて一方向に±10cmを4往復行い、図1.6に示される荷重－変位関係では1回目の加力時に静摩擦荷重の立上りがわずかにみられる。弾性すべり支承の動摩擦係数は竣工前実験時0.04に対し0.05程度でありその差は小さいとされているが、実験時の気温や動摩擦係数の設計仕様値は示されていない。実験時の面圧は5.4～7.5N/mm²である。

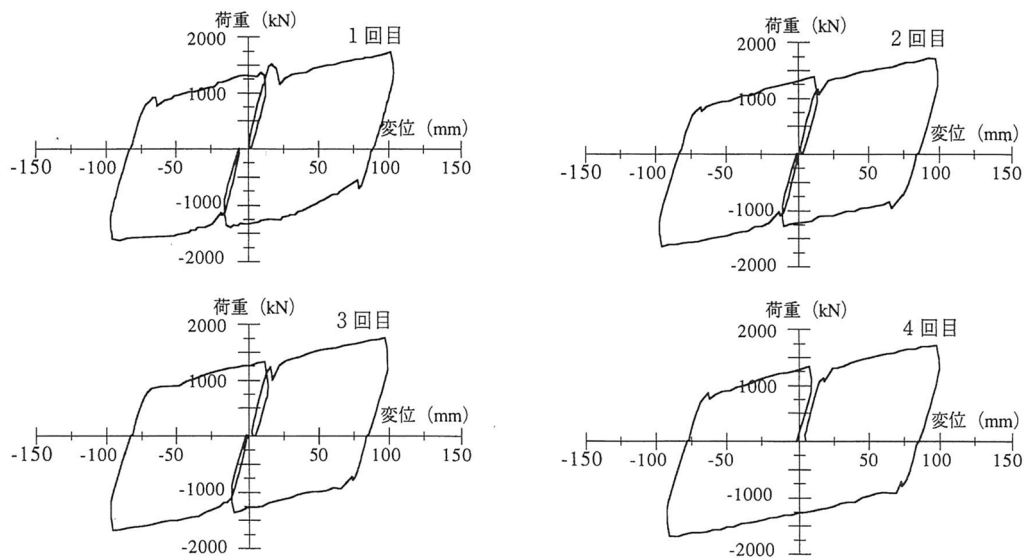


図 1.6 水平方向加力の荷重－変位関係^{1.19)}

浜口ら^{1.20)}は、すべり支承 14 基と復元材としての積層ゴム（鉛直荷重を支持しない）を用いた実験用建物にて、2000 年 2 月と 2000 年 8 月に静的な水平加力実験を行い、経年による静摩擦係数と動摩擦係数の変化を確認した。加力は油圧ジャッキにて±150mm と±300mm を 1 方向 1 往復ずつ行われ、静摩擦係数は図 1.7 に示される前回 μ_s （躯体工事がほぼ完成してから 3 か月後）が 0.041，今回 μ_s （約 6 か月後）は 0.044 とほとんど変化はなく、動摩擦係数は図 1.8 に示されるように出荷試験±9%と大きな変化はないと結論づけた。いずれも試験時の気温や実験時の面圧は示されていない。

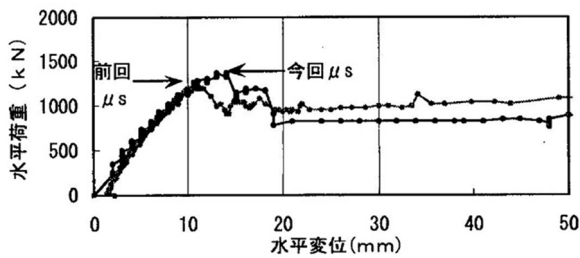


図 1.7 実験建屋の荷重－変形関係
(静摩擦時) 1.20)

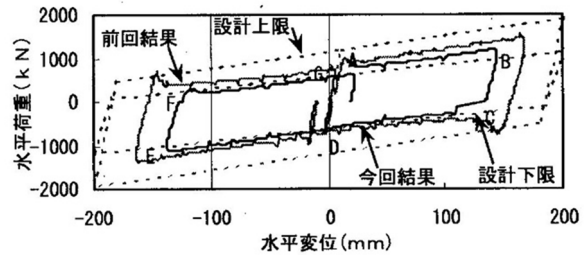


図 1.8 実験建屋の荷重－変形関係
(動摩擦時) 1.20)

また、浜口らは縮小試験体による実験も行い、静・動摩擦係数と経過時間の関係を示した。Φ 35～40mm のすべり材とすべり板を面圧 15N/mm² となるようにボルト・ナットで締め込んで加力を行い、所定時間経過後に再び加力し静・動摩擦係数が測定された。また、熱劣化促進試験にて 100℃雰囲気中で 60 年相当の時間経過後にも試験を行い、静摩擦係数は経過時間の小さい指数での指数関数に近似するとして 100 年程度の建物供用期間内で初期値の 1.4～1.5 倍程度に増大するとした（図 1.9）。また、動摩擦係数は安定しており、経年変化を考慮する必要はないとした（図 1.10）。

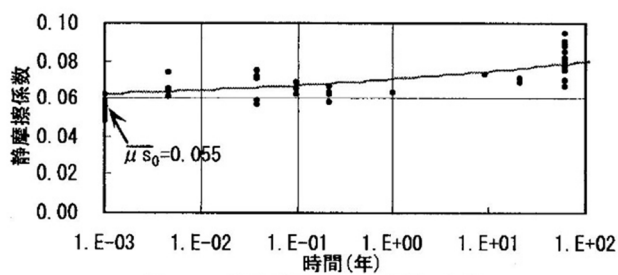


図 1.9 静摩擦係数の経年変化 1.20)

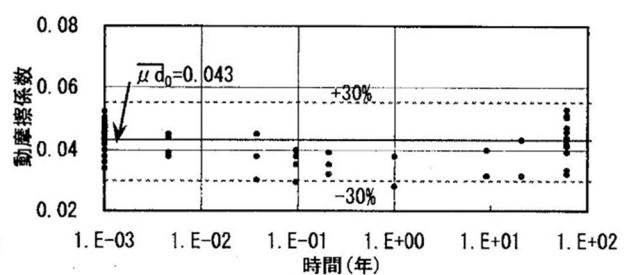


図 1.10 動摩擦係数の経年変化 1.20)

三山ら^{1.21)}は、高摩擦タイプと低摩擦タイプのそれぞれ2種類ずつ複数(表1.1)の試験体を用いて、固着期間1100日までの実験を行った。図1.11に示されるように $\Phi 80\text{mm}$ の試験体ですべり板を挟み、皿ばねを介してPC鋼棒にて設定面圧を加え、一定時間経過後にアクチュエータにより0.3Hz、振幅25mmの加振を行い、固着期間と摩擦係数の関係が示された。

表 1.1 試験ケース^{1.21)}

試験体	設定面圧 (N/mm^2)	摩擦係数 (仕様値)	試験体数
PL	15	0.013	9
PH	15	0.112	3
OL	12	0.029	3
OH	12	0.135	3

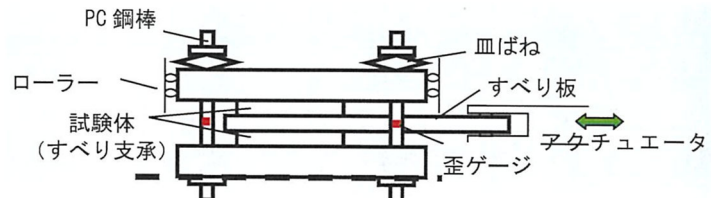


図 1.11 試験体概要^{1.21)}

試験結果の例を図1.12に示す。低摩擦タイプで固着期間が最長の1100日では最初のサイクルで最大摩擦係数が大きく増加し、高摩擦タイプで固着期間が最長の730日では最初のサイクルの最大摩擦係数に固着の影響は小さいとされた。文献^{1.21)}のデータを再整理^{1.2)}された図1.13では、静摩擦係数を最初のサイクル、動摩擦係数を1サイクル以降として示され、(a)の低摩擦タイプでは、固着期間が長くなるに従わずかに摩擦係数は大きくなり、(b)の高摩擦タイプでは固着の影響はほとんど見られないとした。試験時の気温は示されていないが、冬季に実施された試験体が多い。

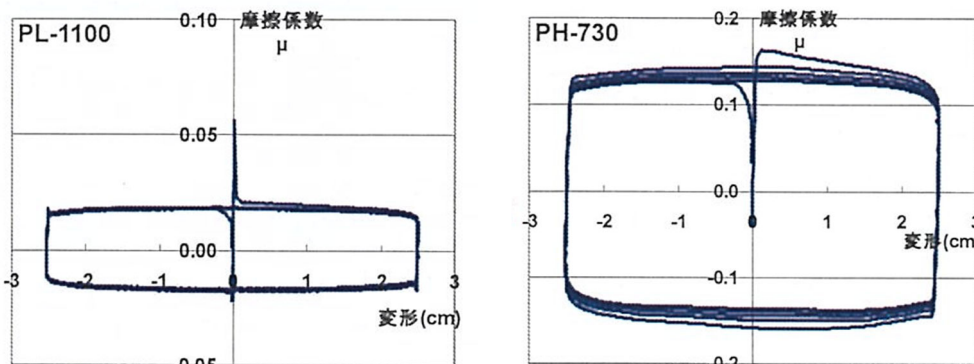


図 1.12 摩擦係数と変形の関係^{1.21)}

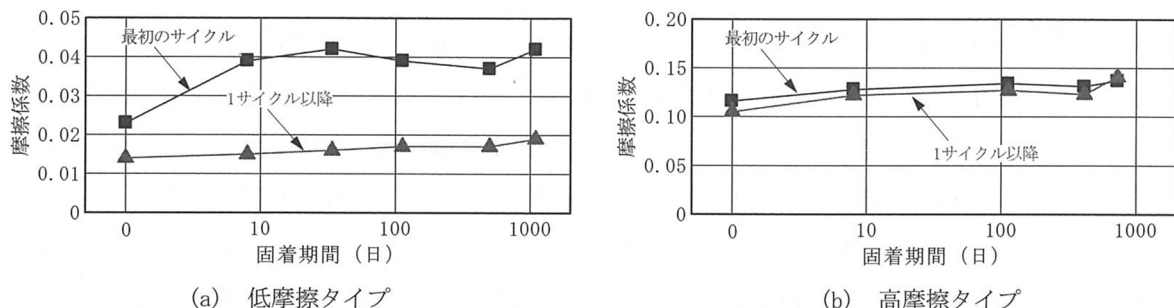


図 1.13 固着期間と摩擦係数の関係^{1.2)}

1.4 研究の目的

摩擦係数の経年変化に関する既往の文献(1.19)～(1.21)を概観すると、動摩擦係数と静摩擦係数のうち、動摩擦係数はタイプに関わらず経年による影響は小さい。静摩擦係数は、高摩擦タイプの弾性すべり支承では経年による影響は小さいが、低摩擦タイプでは経年により静摩擦係数が大きく上昇する傾向がみられる。しかし、それぞれの実験では試験時の摩擦係数も設定面圧も異なり、定性的な傾向は掴めるものの定量的な把握に至るデータとはなっていない。低摩擦タイプの弾性すべり支承の需要は今後も増加すると考えられ、また免震構造設計指針^{1.2)}でも「摩擦係数の経年変化については実際のところわかっていないことも多いため、今後も引き続きデータの蓄積に努める必要がある。」とされており、摩擦係数の経年変化による影響を定量的に把握し設計に反映するための知見を整備する必要がある。

一般に、静摩擦係数は待機時間（2つの物体が接触または静止してから次に滑動するまでの時間）に依存して増大するとされている^{1.22)}。そのため、すべり支承や弾性すべり支承のように摩擦機構をもつ免震部材では、その設置（竣工）から地震発生時までの通常長い待機時間によって、その静摩擦係数は材料試験で得られている設計摩擦係数より増大していると考えられる。建設した免震建物が何年後に遭遇するかは分からない地震時に優れた性能を発揮するためには、設計における経年変化に対する考え方を明確にすることは重要であり、弾性すべり支承の経年変化を考慮した免震建物の設計手法を確立することを本研究の目的とする。

参考文献

- 1.1) Toru TAKEUCHI: Introduction, 30 years and future with seismic isolation structure, Journal of Japan society of Seismic Isolation, menshin, No.88, pp.1-2, 2015 (in Japanese)
竹内徹：巻頭言 免震構造との30年とこれから，日本免震構造協会 menshin, No.88, pp.1-2, 2015
- 1.2) Architectural Institute of Japan: Recommendation for the Design of Seismically Isolated Buildings, Maruzen Publishing, 2013 (in Japanese)
日本建築学会：免震構造設計指針，丸善出版，2013
- 1.3) Masahiko HIGASHINO, Akira WADA: A Study on Seismic Isolation System with Robustness for Increasing Ground Motion Level, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.74, No.641, pp.1233-1240, 2009 (in Japanese)
東野雅彦，和田章：地震入力に対してロバスト性のある免震構造に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第74巻，第641号，pp.1233-1240，2009
(DOI:<https://doi.org/10.3130/aijs.74.1233>)
- 1.4) The Japan Society of Seismic Isolation: Changes in Plans for Seismic Isolation and Damping Buildings, Journal of Japan society of Seismic Isolation, menshin, No.117, pp.19-24, 2022 (in Japanese)
日本免震構造協会：免震・制振建築物の計画推移，menshin, No.117, pp.19-24, 2022
- 1.5) Hideyuki TADA, Mineo TAKAYAMA, Syoichi YAMAGUCHI, Masanori ANDO, Shiroh TATARA: The Research Study of a Seismic Isolation System by the Enforcement Construction, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures- II separate volume, pp.887-888, 1983 (in Japanese)
多田英之，高山峯夫，山口昭一，安藤全典，多田羅史郎：免震構造に関する実物実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），B-2 分冊，pp.887-888，1983
- 1.6) Katsuyuki OSADA, Kimihiro KAWADA: Performance of Base-Isolated Building under the southern-hyogo pret. Earthquake (WEST-building for MPT), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-2, Structures- II , pp.631-632, 1995 (in Japanese)
長田勝幸，川田公裕：免震建物の兵庫県南部地震による効果，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），B-2，構造II，pp.631-632，1995
- 1.7) Masakazu NISHINAGA, Makoto KAI, Hiroyuki NISHIKAWA, Kiyoji IZAWA: Response of the Ground and a Building based on Observed Earthquake motion Records, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-2, Structures- II , pp.527-528, 1995 (in Japanese)
西永雅一，甲斐誠，西川宏之，伊澤清治：観測地震動記録に基づく地盤・建物の応答性状，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），B-2，構造II，pp.527-528，1995
- 1.8) Koji KITAZAWA, Souiti KAWAMURA, Masayoshi HISANO: Seismic Isolation Method using Sliding Bearings PartI Overview of the Construction Method, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B, Structures- I , pp.817-818, 1987 (in Japanese)
北沢巧次，河村壮一，久野雅祥他：すべり支承を用いた免震構法 その1 構法の概要，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），B，構造I，pp.817-818，1987
- 1.9) The Japan Society of Seismic Isolation: Seismic Isolation Material Standard Product List 2005, 2005 (in Japanese)

- 日本免震構造協会：免震部材標準品リスト-2005-, 2005
- 1.10) Bridgestone: Elastic Sliding Bearing (Low Elasticity Type) Performance Evaluation Report, The Building Center of Japan, 2013 (in Japanese)
ブリヂストン：弾性すべり支承（低弾性タイプ）性能評価書，日本建築センター，2013
- 1.11) The Society of Rubber Science and Technology Japan, The Japan Society of Seismic Isolation, Laminated Rubber Bearing Handbook for Building Seismic Isolation Editorial Committee: Handbook of Laminated Rubber Bearings for Architectural Seismic Isolation for Designers Revised Edition, The Japan Society of Seismic Isolation, 2017 (in Japanese)
日本ゴム協会日本免震構造協会建築免震用積層ゴム支承ハンドブック編集委員会：改訂版設計者のための建築免震用積層ゴム支承ハンドブック，日本免震構造協会，2017
- 1.12) Akihiro ITO: Aging of the Body Placed Another Small Study of Seismic Isolation Building is Located in a Cold Region, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures- II, pp.535-536, 2013 (in Japanese)
伊藤昭浩：寒冷地に建つ免震建物の別置き小試験体の経年変化，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），構造Ⅱ，pp.535-536，2013
- 1.13) Yusuke KAWAHARA, Koji NISHIO, Naoki KATO, Miyuki SHIMIZU: A Study of Aging Effect on A Rubber Bearing after 27 Years in Use. Part1. Outline and Basic Performance of Natural Rubber Bearing, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures- II, pp.993-994, 2018 (in Japanese)
川原佑介，西尾浩治，加藤直樹，清水美雪：27年間使用した積層ゴムの経年変化（その1）概要および据置試験体の基本性能，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），構造Ⅱ，pp.993-994，2018
- 1.14) Naoki KAMOSHITA, Hiroki HAMAGUCHI, Yuma TANI, Shigenobu SUZUKI: A Study of Aging Effect on a Rubber Bearing after about Thirty Years in Use, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.24, No.56, pp.41-46, 2018 (in Japanese)
鴨下直登，濱口弘樹，谷佑馬，鈴木重信：約30年間使用した積層ゴムの経年変化調査，日本建築学会技術報告集，第24巻，第56号，pp.41-46，2018 (DOI:<https://doi.org/10.3130/ajjt.24.41>)
- 1.15) Noboru YAMAZAKI, Mitsuo MIYAZAKI: Properties of Natural Rubber Bearings after 100 Years of Use, Recommendation for the Design of Seismically Isolated Buildings, pp.311-312, Architectural Institute of Japan, 1993 (in Japanese)
山崎升，宮崎光生：100年使用後の天然ゴム系ベアリングの性質，免震構造設計指針，pp.311-312，日本建築学会，1993
- 1.16) Akio SUZUKI, Sakae UEDA, Tohru SAKAGUCHI, Shinji SERA, Takashi NAKAMURA, Yoshitaka MURAMATU, Nobuo MUROTA, Takaaki YAMAMOTO, Hideo MITAMURA, Haruyuki KITAMURA: An Investigation Report of the Characteristic of Sliding Bearings for Base-Isolated Building, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.10, No.19, pp.49-54, 2004 (in Japanese)
鈴木明雄，上田栄，坂口達，世良信次，中村嶽，村松佳孝，室田伸夫，山本享明，三田村秀雄，北村春幸：調査に基づく免震建築物用すべり系支承の摩擦係数基本特性の分析，日本建築学会技術報告集，第10巻，第19号，pp.49-54，2004 (DOI:<https://doi.org/10.3130/ajjt.10.49>)
- 1.17) Hironori HAMAZAKI, Ryuichi KOUSAKA, Mineo TAKAYAMA, Nobuo MUROTA: The Experimental Study about Durability Ability of the Elastic Sliding Bearing. Part 2 The Experiment

- Result of the Low and High Friction Type Elastic Sliding Bearing, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-2, Structures- II, pp.1061-1062, 2007 (in Japanese)
 浜崎宏典, 高坂隆一, 高山峯夫, 室田伸夫: 弾性すべり支承の耐久性能に関する実験的研究 その2 低摩擦タイプと高摩擦タイプの弾性すべり支承の実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), B-2, 構造II, pp.1061-1062, 2007
- 1.18) Shigeo MINEWAKI, Masashi YAMAMOTO, Harumi YONEDA, Mineo TAKAYAMA, Masaru KIKUCHI, Masanori IIBA: Experimental Study on Multi-cyclic Characteristics of Devices for Seismic Isolation against Long Period Earthquake Motions Part 5: Sliding Bearing with Elastic Element (Low Friction Type), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-2, Structures- II, pp.663-664, 2011 (in Japanese)
 嶺脇重雄, 山本雅史, 米田春美, 高山峯夫, 菊地優, 飯場正紀: 長周期地震動に対する免震部材の多数繰返し実験 その5 弾性すべり支承 (低摩擦), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), B-2, 構造II, pp.663-664, 2011
- 1.19) Ichiro NAGASHIMA, Masayoshi HISANO, Hideki FUNAHARA: Slide bearing method Seismic isolation building confirmation experiment of aging characteristics, TAISEI Technical Research Institute Report Vol.30, pp.131-134, 1997 (in Japanese)
 長島一郎, 久野雅祥, 船原英樹: すべり支承方式免震建物の経年変化特性の確認実験, 大成建設技術研究所報, 第30号, pp.131-134, 1997
- 1.20) Hiroki HAMAGUCHI, Masahiko HIGASHINO, Shigeo MINEWAKI, Masashi YAMAMOTO, Takuya ISHII: Aged Deterioration in the Coefficient of Friction of Sliding Bearings, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-2, Structures- II, pp.645-646, 2001 (in Japanese)
 浜口弘樹, 東野雅彦, 嶺脇重雄, 山本雅史, 石井卓哉: すべり支承の摩擦係数の経年変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), B-2, 構造II, pp.645-646, 2001
- 1.21) Takafumi MIYAMA, Shinsuke INAI, Keiji MASUDA, Takashi KATO: A Study on the Aged Adhesion of the Sliding Bearing under the Axial Stress. Part2, The characteristic of Sliding Bearing of 3-years progress, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-2, Structures- II, pp.1047-1048, 2007 (in Japanese)
 三山剛史, 稲井慎介, 増田圭司, 加藤貴司: 面圧を加えた滑り免震支承における摩擦係数の経年変化に関する研究 その2 3年経過時のすべり支承特性について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), B-2, 構造II, pp.1047-1048, 2007
- 1.22) Hiroshi MATSUKAWA: Physics of Friction, Iwanami Syoten, 2012 (in Japanese)
 松川宏: 摩擦の物理, 岩波書店, 2012

第2章

免震建物の水平加力実験

第2章 免震建物の水平加力実験

2.1 はじめに

本実験は、地震発生時にも機能維持が求められる災害拠点施設や鉄道交通網を支える附帯施設等で採用が望ましいと考えられている免震構造の建物で、維持管理や地震時の対応に必要な専門的な技術を取得するために行ったものである。本章では、実験の概要と得られた荷重変位関係について記述し、設計復元力特性から推定される水平力よりも実験では大きな水平力を要した原因と建物への影響について考察し、本研究着手の発端となった課題を示す。

2.2 建物概要

実験対象の建物概要を表 2.1 および図 2.1 に示す。免震レトロフィット工法にて改修を行った建物であり、地上 1 階柱頭を免震層とする中間階免震構造の建築物である。設計クリアランスは 450mm であり、レベル 2 地震時に上部構造および下部構造が短期許容応力度以下となるように設計した建物である。免震部材の配置を図 2.2 に示す。高減衰ゴム系積層ゴム支承を建物の四隅に配置し、他は弾性すべり支承として、オイルダンパーを各方向に 2 基ずつ配置している。なお、弾性すべり支承 11 基のうち 10 基は図 1.5 とは上下反転配置としている。免震部材および振動系の概要を表 2.2 に示す。ここでは弾性すべり支承の摩擦係数は製品仕様値である動摩擦係数を示し、復元力特性もバイリニアモデルとしている。

表 2.1 建物概要

建築物用途・位置	寄宿舎・大阪府大東市
建築年・免震改修年	1973年(昭和48年)・2017年(平成29年)
構造形式	鉄筋コンクリート造 中間階免震構造
階数・建築面積	地上3階塔屋1階・366.874 m ²

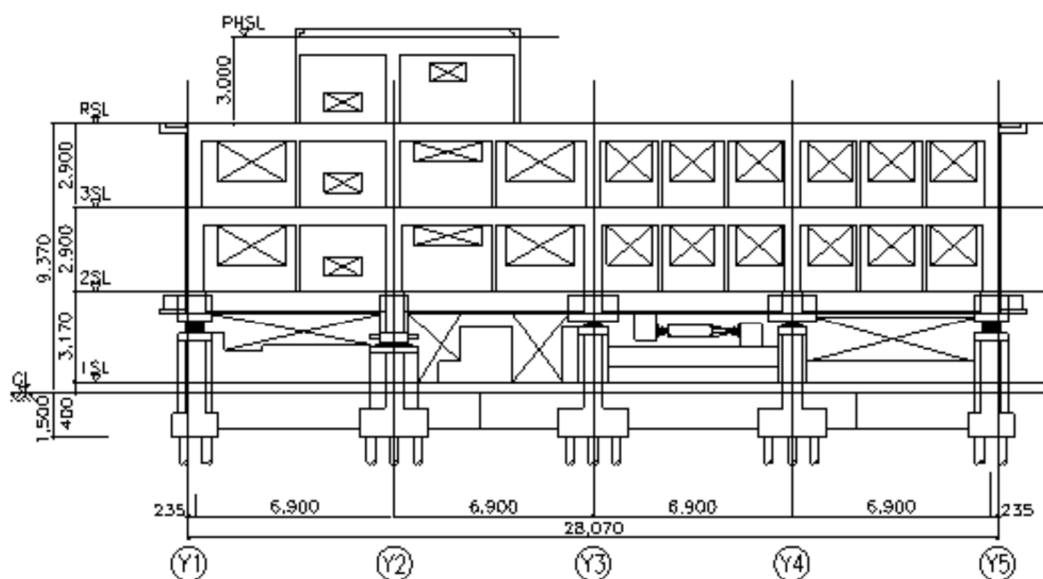


図 2.1 対象建物軸組図

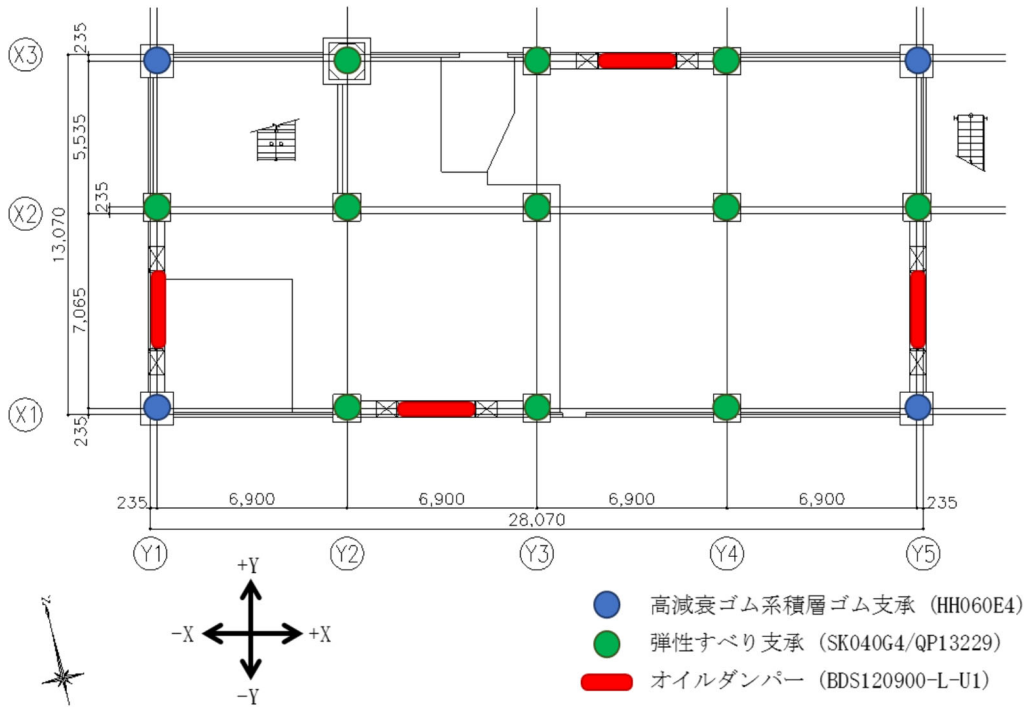


図 2.2 免震部材配置図

表 2.2 免震部材および振動系概要

免震部材	高減衰ゴム系積層ゴム支承	積層ゴム直径 (mm)	600	
		基準面圧 (N/mm ²)	5	
		ゴム総厚 (mm)	200	
		せん断弾性係数(N/mm ²)	0.392	
		等価粘性減衰定数(100%)	0.220	
		限界変形 (mm)	600	
	弾性すべり支承	ゴム外径 (mm)	400	
		基準面圧 (N/mm ²)	18	
		ゴム総厚 (mm)	41.6	
		せん断弾性係数(N/mm ²)	0.392	
		水平剛性 (kN/m)	1.48×10 ³	
		すべり材外径 (mm)	360	
	オイルダンパー	摩擦係数	0.011	
		限界変形 (mm)	450	
		最大減衰力 (kN)	1000	
限界速度 (m/s)		1.0		
振動系モデル	減衰係数 (kN・s/m)	1000		
	限界変形 (mm)	450		
	質点数・振動系	4 質点・等価せん断型		
	免震層変形 (mm)	10	200	400
	せん断歪率 (%)	5	100	200
	等価一次固有周期 (s)	1.549	4.297	5.317
	復元力特性	上部構造	線形	
		各免震部材	高減衰ゴム系積層ゴム支承：修正バネ係数 弾性すべり支承：バイリニア オイルダンパー：線形	
減衰定数	上部構造：内部粘性減衰 2.0% 免震層：履歴減衰のみ			

2.3 実験概要

実験は、オイルダンパーを取り付ける反力躯体を利用し、油圧ジャッキ2台を用いて静的に加力した。加力回数を表2.3に示す。躯体工事完了後(2016.6.29～)の実験はジャッキダウン(2016.2.3～4.13)から平均約3か月経過後に、1階部分が構造躯体のみの状態で行った。これに対し、仕上工事完了後(2017.1.25～)の実験は、耐火被覆や免震スリット、EXP.Jなど全て仕上がった状態で行った。

加力は躯体工事完了後と仕上工事完了後にそれぞれ4回ずつ行い、強制変位量はレベル1地震動における最大応答値である180mmとした。加力のプロセスを図2.3に示す。各加力のステップは10mmずつの平均変位とし、それぞれの1回目と2回目では各ステップの間に1分以上のインターバルを挟んだ。3回目と4回目では連続的に加力を行った。躯体工事完了後の加力時の状況を図2.4に示し、仕上工事完了後の加力計測および仕上げ材等の変位追従状況を図2.5および図2.6に示す。実験の目的であった、今後の同種作業のための加力計測の計画方法や仕上げ材の変位追従性など、当初必要とした情報を得ることができた。

表 2.3 加力回数

回数		加力方向	加力開始日時		加力終了日時		強制変位量(mm)
躯体工事完了後	1-1	Y	6/29	10:01	7/1	11:30	+180～-20
	1-2	X	7/4	10:42	7/6	14:00	+180～-20
	1-3		7/19	10:44	7/19	13:35	+180～±0
	1-4		7/19	15:07	7/20	13:39	+180～-20
仕上工事完了後	2-1	Y	1/25	10:00	1/27	10:24	+180～-180
	2-2	X	1/30	9:37	1/31	11:11	+180～-180
	2-3		1/31	12:32	1/31	13:47	+180～-180
	2-4		1/31	14:04	1/31	15:18	+180～-180

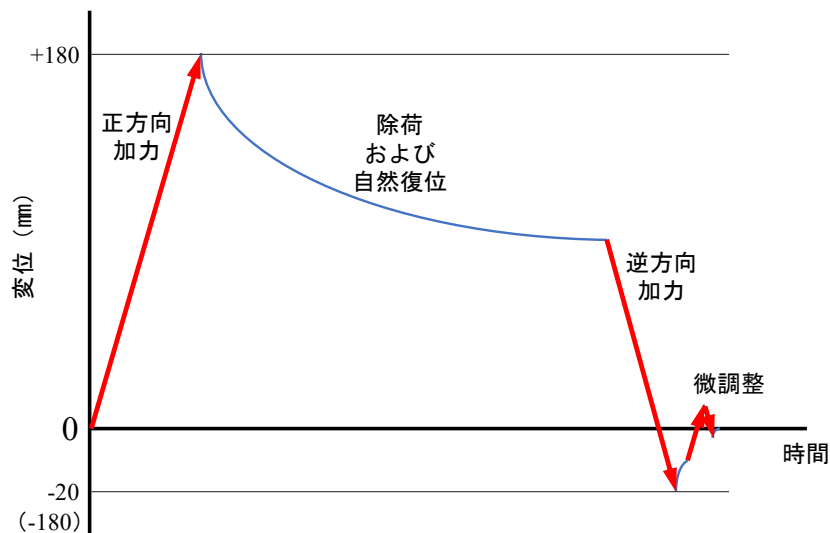


図 2.3 加力プロセス



加力および計測状況



計測状況



加力状況（逆方向加力）

図 2.4 実験状況（躯体工事完了後）



実験時養生状況



加力・変位状況



加力状況



計測状況



変位追従状況（外装）



変位追従状況（内装）

図 2.5 実験状況（仕上工事完了後）



変位前状況 (EXP. J)



変位追従状況 (EXP. J)



変位前状況 (EXP. J)



変位追従状況 (EXP. J)



変位追従状況 (階段)



変位追従状況 (配管)

図 2.6 実験状況 (仕上工事完了後)

2.4 荷重－変位関係

躯体工事完了後の加力 1-1 から 1-4 までの荷重－変位関係を図 2.7 に示し、仕上工事完了後の加力 2-1 から 2-4 までの荷重－変位関係を図 2.8 に示す。図中には、各免震部材の復元力特性に実験時の温度依存性や速度依存性などを考慮した設計復元力特性を重ねて示しており、その合計をグレーの太線（以下、想定ライン）で示している。

高減衰ゴム系積層ゴム支承（HDR）には一次剛性と二次剛性があり、100kN 程度で降伏し変位が進むと荷重（水平力）が上昇する。弾性すべり支承（SSR）にも一次剛性と二次剛性があるが、降伏後二次剛性は水平であり、一定の摩擦荷重で変位が進む。オイルダンパー（OD）は加力が静的であるため 10kN 程度で全体への影響は小さい。その他設備配管と階段の摩擦荷重も影響は小さいが考慮した。なお、図 2.8 の設計復元力特性には、耐火目地材やエキスパンションジョイントなど仕上げ物で荷重想定が困難なものの摩擦抵抗等は考慮していない。

全体的な結果としては、一次剛性および二次剛性は概ね設計と一致しているとみることができる。しかし、図 2.7 の 1-1 回目の加力では大きな荷重の立上りがみられ、降伏荷重は 200kN 程度の想定に対し 600kN 以上の荷重が必要であった。変位が 20～30mm 程度で一部の弾性すべり支承が滑動して荷重が低下し、70mm 程度で全ての弾性すべり支承が滑動してからは、想定した二次剛性程度で変位が進んだ。最大強制変位量の 180mm に達し除荷すると変位は 90mm 程度まで戻り、逆方向に加力、一次剛性をみながら微調整し原点まで復位した。弾性すべり支承が想定変位で滑動しなかった以外には、荷重を上昇させるような挙動はみられなかった。

約 3 日後に行った 1-2 回目、13 日後に行った 1-3 回目では、同様に降伏荷重の立上りがみられたが 400kN 程度に低減した。約 90 分後の 1-4 回目では降伏荷重の立上りはなく、想定に近い降伏荷重であった。

図 2.8 に示す約半年後に行った仕上工事完了後の実験でも、2-1 回目では降伏荷重部分の立上りが同様に再現され、約 3 日後の 2-2 回目では低減し、約 80 分後および約 20 分後の 2-3 回目および 2-4 回目では降伏荷重の立上りはみられなかった。実験では耐火目地材の擦り傷等は全体的にみられたが、加力により損傷したような仕上げ物等はみられなかった。

なお、第一象限と第三象限で想定と実験のラインが離れているのは、仕上げ物の影響および気温想定の違いと考えられる。仮に、30kN 程度の摩擦抵抗と気温 5℃程度の想定とすると図 2.9 に示すような想定ラインとなる。

また、図 2.7 および図 2.8 を各加力回に分けて図 2.10(a)～(d)および図 2.11(a)～(d)に示す。

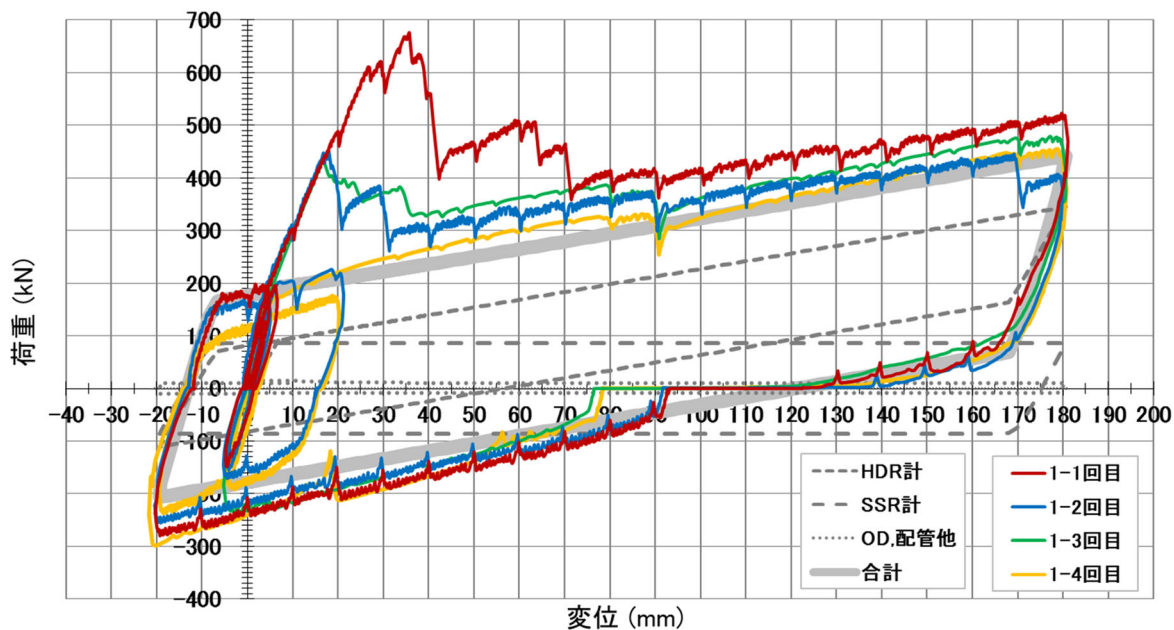


図 2.7 荷重 - 変位関係 (躯体工事完了後 1-1~1-4 回)

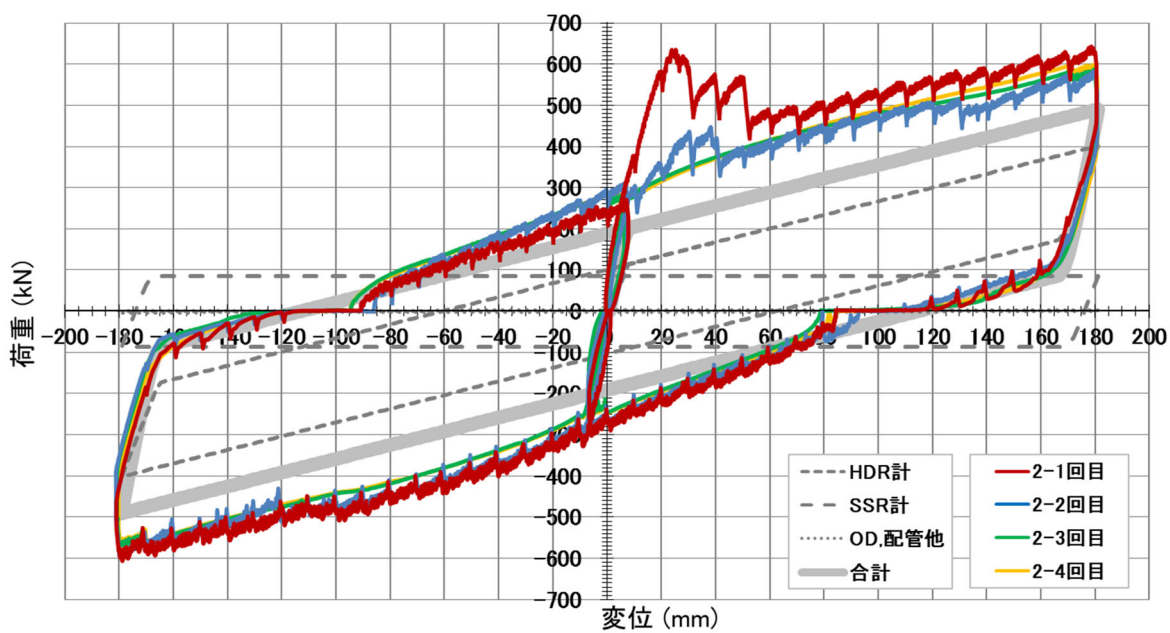


図 2.8 荷重 - 変位関係 (仕上工事完了後 2-1~2-4 回)

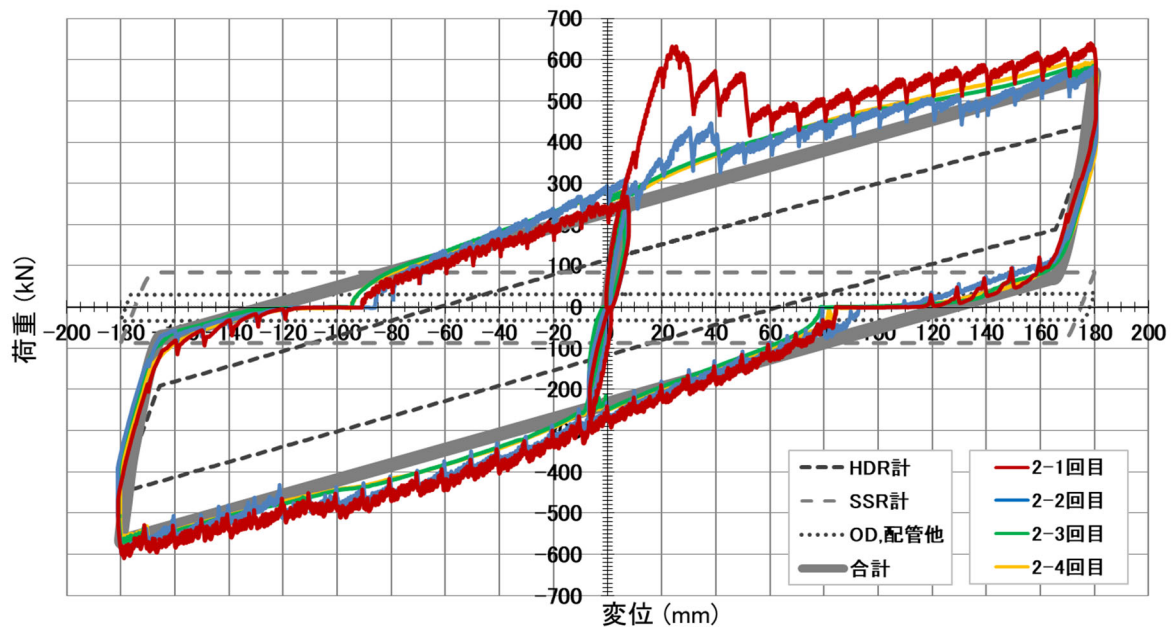


図 2.9 荷重 - 変位関係（仕上工事完了後 2-1～2-4 回）（設計想定ライン調整）

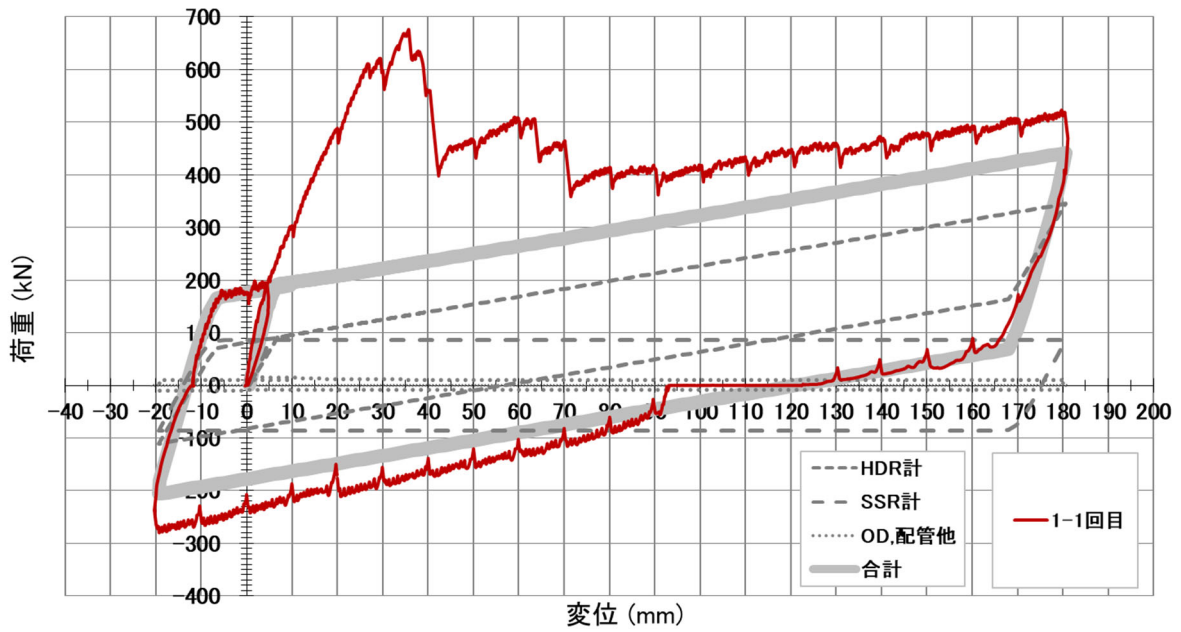


図 2.10(a) 荷重 - 変位関係 (躯体工事完了後 1-1 回)

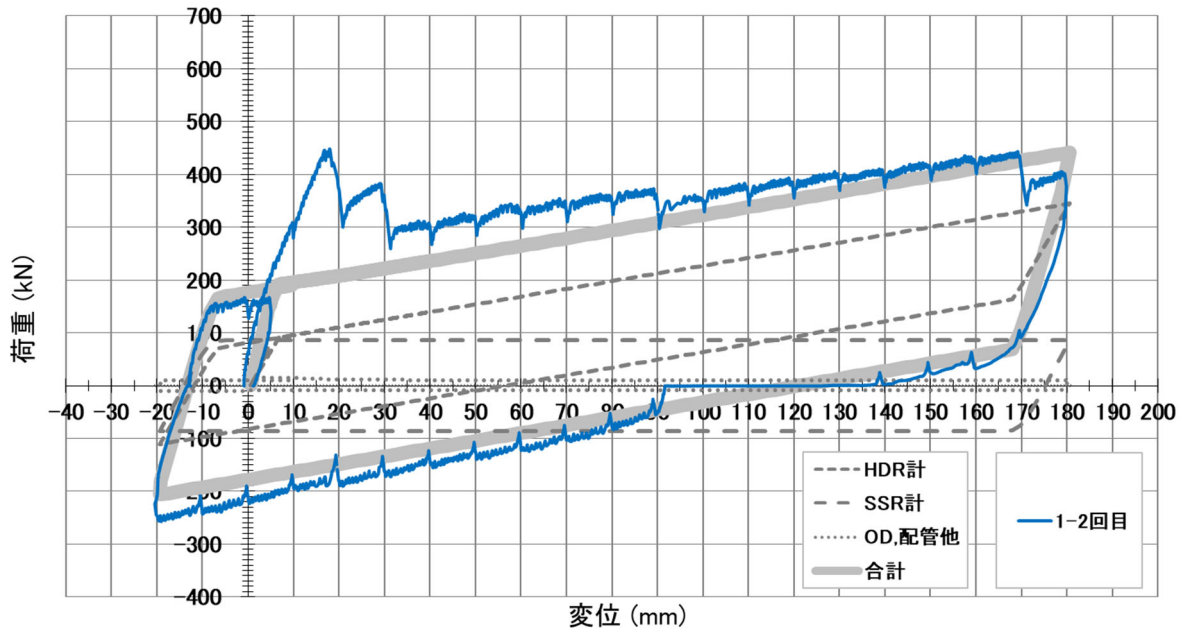


図 2.10(b) 荷重 - 変位関係 (躯体工事完了後 1-2 回)

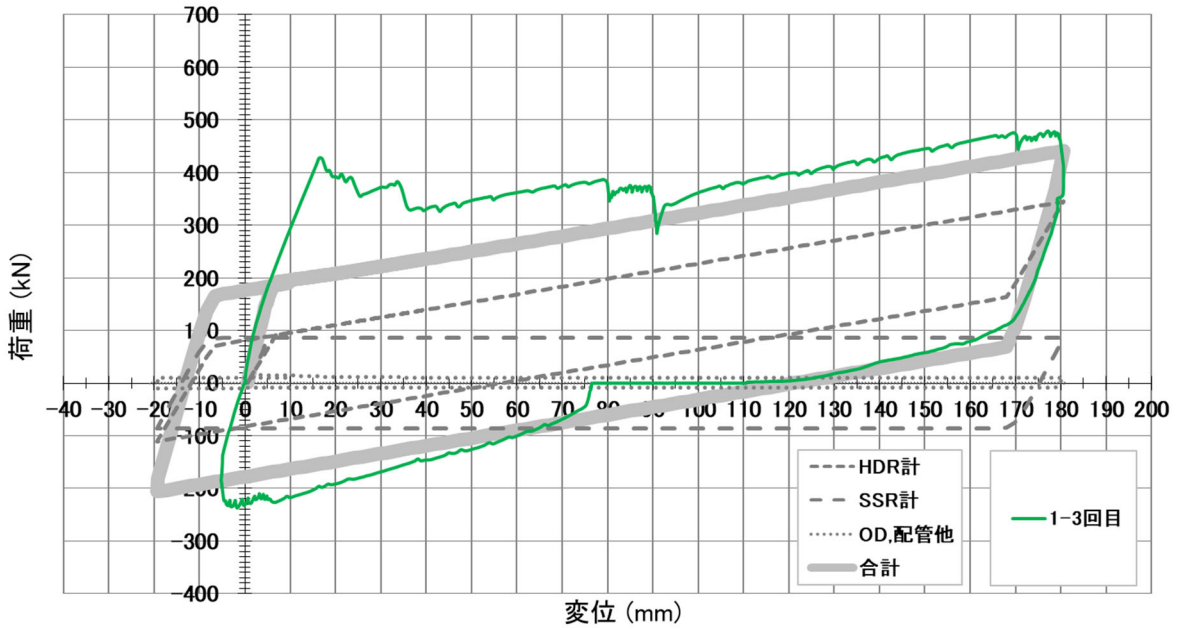


図 2.10(c) 荷重 - 変位関係 (躯体工事完了後 1-3 回)

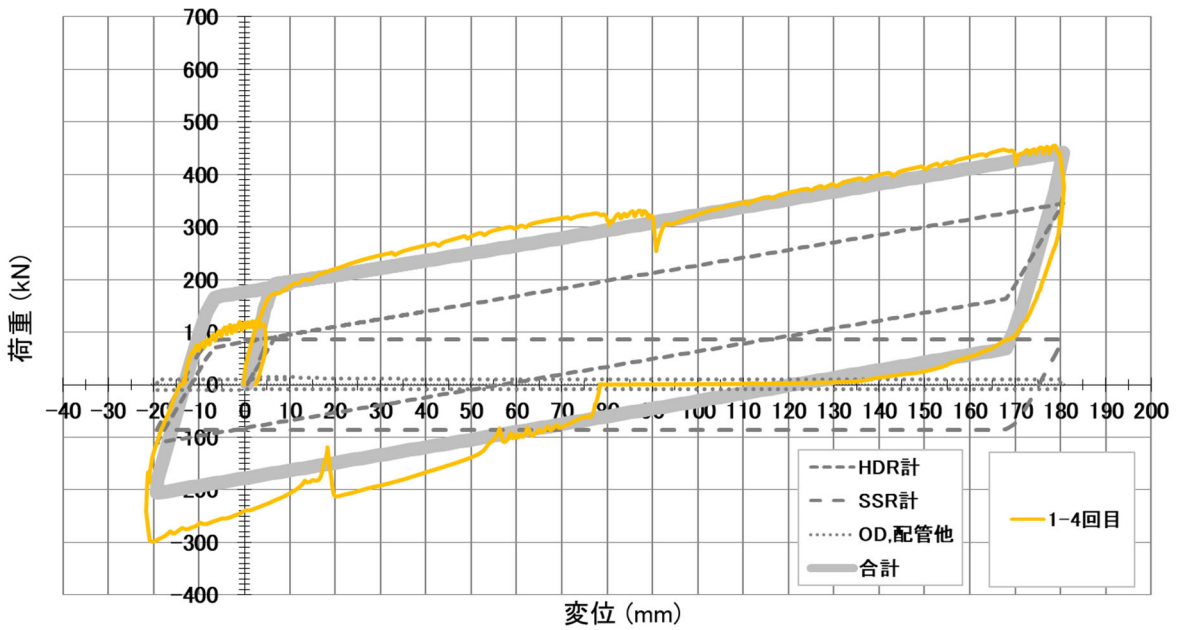


図 2.10(d) 荷重 - 変位関係 (躯体工事完了後 1-4 回)

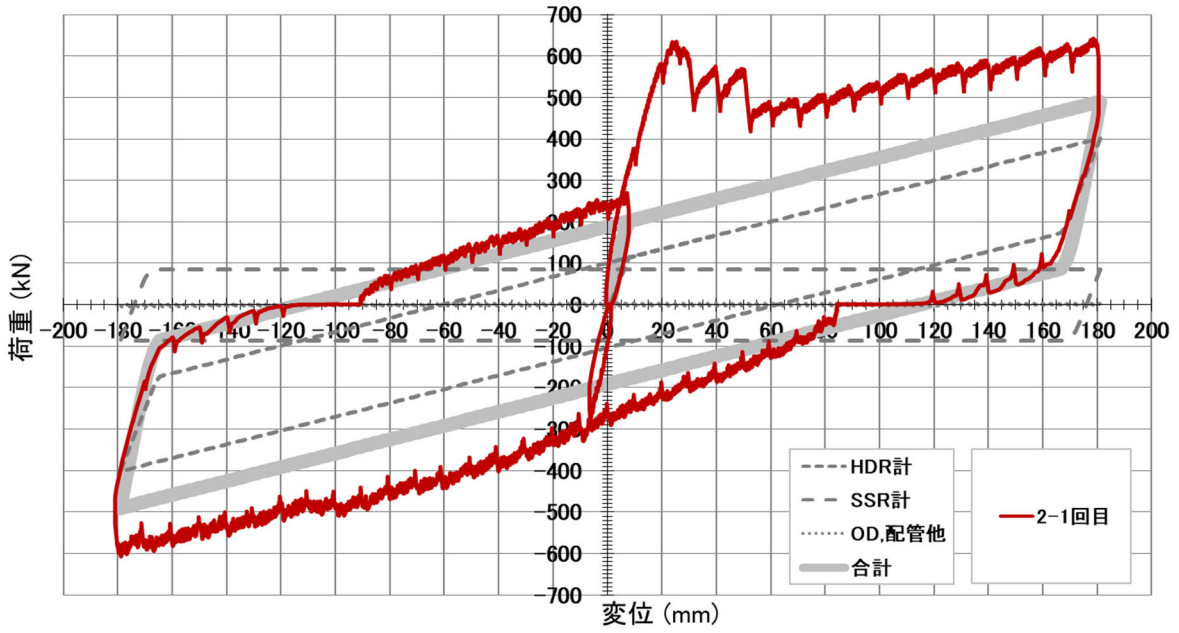


図 2.11 (a) 荷重 - 変位関係 (仕上工事完了後 2-1 回)

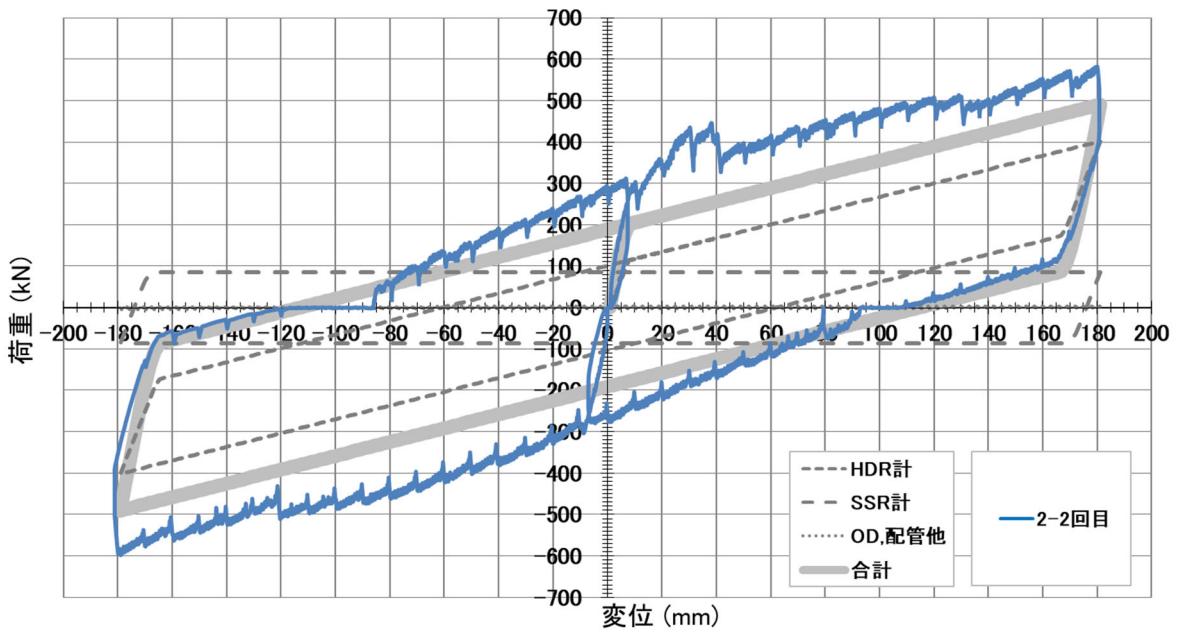


図 2.11 (b) 荷重 - 変位関係 (仕上工事完了後 2-2 回)

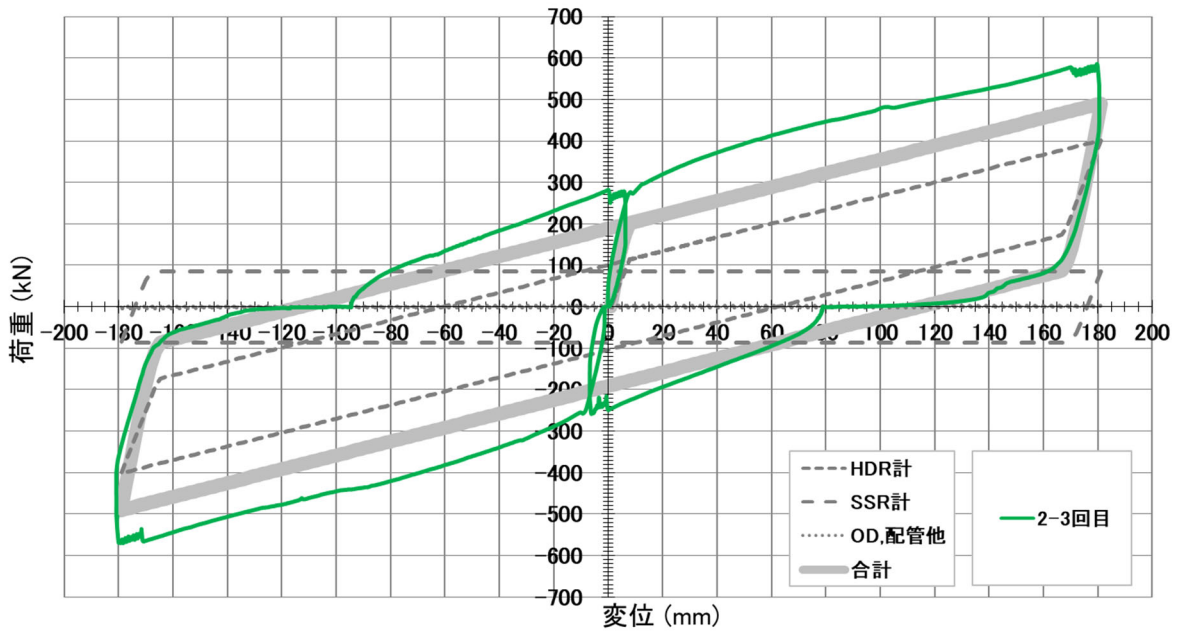


図 2.11(c) 荷重 - 変位関係 (仕上工事完了後 2-3 回)

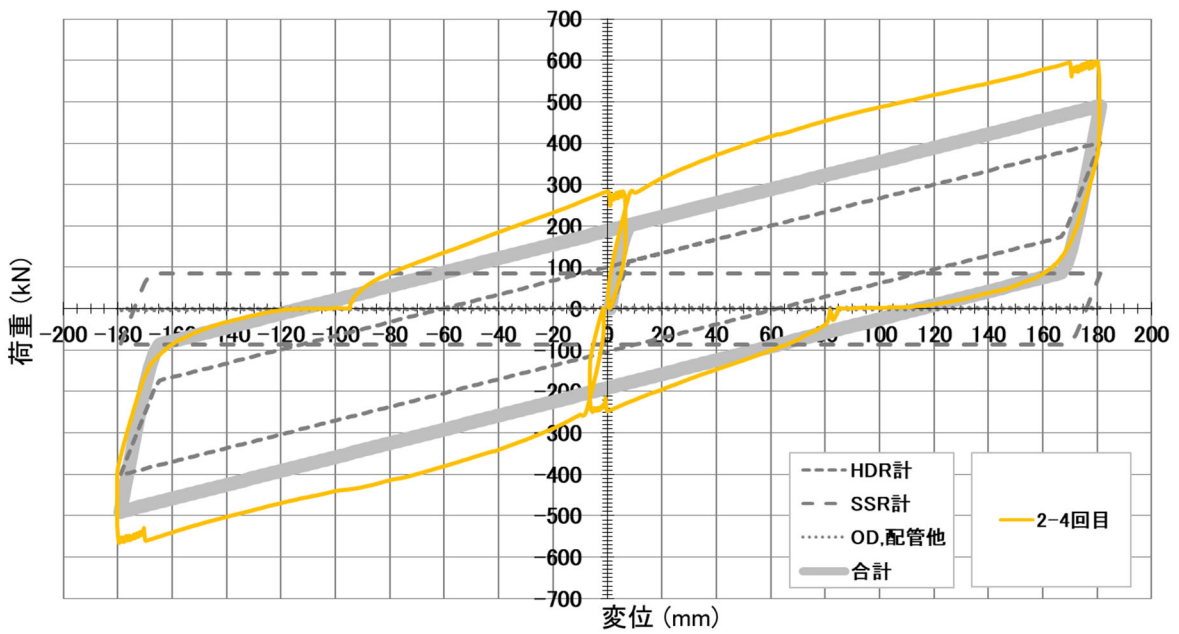


図 2.11(d) 荷重 - 変位関係 (仕上工事完了後 2-4 回)

2.5 建物の応答に影響を与える静摩擦係数およびその待機時間依存性

本実験で設計復元力特性から推定した水平力よりもかなり大きな降伏荷重となったのは、弾性すべり支承の挙動も踏まえると、摩擦面に生じる静摩擦荷重、すなわち静摩擦係数の増大によるものと考えられる。しかもこの静摩擦係数は、静止してから次に滑動するまでの時間（待機時間）に関係しているものと考えられ、最初の 1-1 回目の待機時間を支承に鉛直荷重を載荷した日時（レトロフィット工法におけるプレロード・ジャッキダウン時）の平均から水平加力開始までとすると、表 2.4 に示すように待機時間の増加に伴って降伏荷重は増大しているとみることができる。しかも、2-1 回目から 2-4 回目の加力でも同様であったことから、再現性のある現象であると考えられる。

しかし、11 基ある各支承で鉛直支持荷重が異なり、静摩擦係数が同一であるとしても静摩擦荷重は同一とはならず、すなわちすべり出しの変位は支承毎に異なることになり、降伏荷重が最大静摩擦荷重の合計とはならない。実際に、1-1 回目の加力で確認した弾性すべり支承の挙動からも同様に考えられる。例えば、1-1 回目の降伏荷重（611kN）のうち高減衰ゴム系積層ゴム支承などの想定負担荷重（121kN+11kN）を引いて弾性すべり支承の想定負担荷重（479kN）を算出し、建物上部の総重量（14,684kN）のうち弾性すべり支承の支持重量（12,304kN）で除することで、概略的に静摩擦係数を算出すると 0.039 となるが、各支承の支持荷重には違いがあるため実際とは異なると考えられる。全ての弾性すべり支承の挙動を確認しようにも、加力のインターバル時に荷重および変位の変動があったためグラフには折れ点が多数あり、またすべり面の変位を計測対象としていなかったため、本実験結果だけでは定量的な把握は難しい。したがって、静摩擦係数を定量的に把握するには建物全体での加力ではなく、すべり面のみの実験で確認する必要がある。

表 2.4 待機時間と降伏荷重

回数	加力方向	待機時間 (s)	降伏荷重 (kN)	想定負担荷重 (kN)		概算静摩擦係数	
				高減衰など	弾性すべり支承		
躯体工事完了後	1-1	Y	9,070,200 (約3か月)	611	121+11	479	0.039
	1-2	X	256,320 (約3日)	446	106+12	328	0.027
	1-3		1,111,440 (約13日)	428	106+12	310	0.025
	1-4		5,520 (約1.5時間)	169	86+12	71	0.006
仕上工事完了後	2-1	Y	16,230,060 (約6か月)	633	163+32	438	0.036
	2-2	X	256,380 (約3日)	436	172+32	232	0.019
	2-3		4,860 (約1.5時間)	277	131+32	114	0.009
	2-4		1,020 (17分)	284	132+32	120	0.010

(建物上部の総重量：14,684kN、弾性すべり支承の支持重量：12,304kN)

一般的に、指定建築材料である弾性すべり支承の大臣認定および性能評価では、材料試験に基づく動摩擦係数にて評価されているが、静摩擦係数がこれほど大きければ、建物としての免震性能にも影響する可能性がある。すなわち、図 2.7 でわかるように実験時の降伏荷重はレベル 1 の応答変位である 180mm 変位時の復元力想定を超えており、またレベル 2 の応答変位である 351mm 変位時の復元力想定（オイルダンパーをほぼ除いているが）に近い降伏荷重となっている。つまり、地震時の免震層の等価剛性が硬化し等価固有周期が短周期化するため、図 1.3(a)に示す加速度応答スペクトルで周期が左側に寄り、建物の応答加速度が増加する可能性がある。図 1.3(b)の応答変位への影響は不明であるが、いずれにしても静摩擦係数を考慮しないと実際の建物の挙動を把握できないことがわかる。

2.6 まとめ

本章では、免震レトロフィットを行った実建物の躯体工事完了時および仕上工事完了時に水平加力実験を行った。得られた荷重-変位関係ではそれぞれ1回目の加力において大きな水平力の立上りが観察された。これは静摩擦係数の影響であり、しかも静摩擦係数は待機時間に依存して増大するものと考えられた。この待機時間に依存する静摩擦係数の増大は、免震建物の地震時応答に影響を与える可能性があり、これを考慮しないと実際の免震建物の挙動が把握できないことがわかった。免震構造のさらなる普及に向けて、今後の需要も見込まれる弾性すべり支承における静摩擦係数の待機時間依存性の定量的な把握と設計手法の確立が必要である。

第3章

素材実験による静摩擦係数と待機時間の定量的評価

第3章 素材実験による静摩擦係数と待機時間の定量的評価

3.1 はじめに

弾性すべり支承は積層ゴムとその端面に取付けられたすべり材（PTFE 材）およびすべり板（PTFE コーティングステンレス板）により構成され、通常その復元力特性は積層ゴム部分の弾性剛性とすべり材部分の摩擦係数を用いて表されている。1987年頃の開発当初はすべり材部分の摩擦係数は0.1程度であったが、現在は0.015以下の低摩擦タイプが主流となっている。

一方、摩擦係数には静摩擦係数と動摩擦係数があるが、静摩擦係数は待機時間（2つの物体が接触または静止してから次に滑動するまでの時間）に依存して増大することが分かっている^{3.1)}。そのため、すべり支承や弾性すべり支承のように摩擦機構をもつ免震部材では、その設置（竣工）から地震発生時までの通常長い待機時間によって、その静摩擦係数は材料試験で得られている設計摩擦係数より増大していると考えられる。動摩擦係数の各種（面圧・速度・繰り返し回数・温度）依存性に関する研究は多数あるが、静摩擦係数およびその待機時間依存性に関する研究は少ない。それら既往の研究^{3.2) ~3.4)}を概観すると、高摩擦タイプでは静摩擦係数と動摩擦係数に大きな差はないが、現在主流となっている摩擦係数0.015以下の低摩擦タイプでは静摩擦係数が大きく上昇する傾向がみられる。しかし、それぞれの実験では試験時の摩擦係数も設定面圧も異なり、定性的な傾向は掴めるものの定量的な把握に至るデータとはなっていない。低摩擦タイプの弾性すべり支承の需要は今後も増加すると考えられ、また免震構造設計指針^{3.5)}でも「摩擦係数の経年変化については実際のところわかっていないことも多いため、今後も引き続きデータの蓄積に努める必要がある。」とされており、摩擦係数の経年変化による影響を定量的に把握し設計に反映するための知見を整備する必要がある。

本章では、経年（待機時間）による静摩擦係数の変化を定量的に把握するために、まずすべり材とすべり板を組合せた試験体に面圧を加え、一定の待機時間を経た後に静摩擦係数を測定する実験の概要について述べ、その結果から得られた静摩擦係数と待機時間の関係式を提案する。また提案式での計算値と実験値を比較し提案式の妥当性を示す。

3.2 実験概要

3.2.1 試験条件の設定

本実験では、実験変数として面圧と待機時間を設定した。その理由のひとつは、年代とともに基準面圧が高面圧化されており、また実物件の設計における使用面圧は建物あるいは柱毎に異なるため、設計時の与条件として扱うことを意図したためである。もうひとつの理由は、参考文献 3.1) に示される真実接触面積の増加が、待機時間と面圧に依存すると考えられるためである。

図 3.1 は 2 つの固体同士が接触している部分を模式的に示したものである^{3.1)}。それぞれの表面は平滑に見えたとしても微視的には凹凸が存在し、その凸同士の真に接する部分を真実接触点、その面積の総和を真実接触面積という。真実接触点では分子間または原子間相互作用による凝着（結合）が生じるため、外力によりその凝着を切るために必要な力が摩擦力であるとするのが凝着説^{3.6)}である。この真実接触面積が荷重（面圧）と待機時間の増加に伴って増大する機構を図 3.2 の真実接触点の部分を拡大した模式図で示す。アスペリティと呼ばれる突出部が固体表面にはあり、同図(a)に示すように上側の固体に荷重を与えることで真実接触点ができる。それが待機時間を経ることで (b) のように増加し、外力により凝着を切るときにより大きな静摩擦力が生じる。すなわち、(a) でのアスペリティ（突出部）の高さ方向の分布と面圧の程度によって、待機時間を経たときの (b) での真実接触点の増加の程度は影響を受けるものと考えられる。なお、(c) のように一旦凝着が切れて動き出すと、次々と新しい真実接触点が生じては切れ、その凝着を切るときに動摩擦力が生じる。したがって、動摩擦力の待機時間による影響は、凝着が分子レベルでの現象であるため微小であると考えられる。

なお、本実験における待機時間の設定は、対数軸にプロットすることとし、時間の単位は秒とする。E.Rabinowicz によれば静摩擦係数は指数関数的に増大するとされている^{3.7)} が、一方 T.Baumberger らによると、約 1 秒から数十年にわたる範囲で固体摩擦における静摩擦係数は対数関数的に増加するとし、小さい指数でのべき乗法も可能ではあるが物理的な解釈として受け入れにくいとされている^{3.8)}。時間の単位は年とする考え方や日とする考え方などもあるが、地震の発生頻度として設計対象とするべきは年単位であるものの、分子レベルである凝着についてはもっと短い時間単位での現象であるため、実験では単位を秒として考えた。

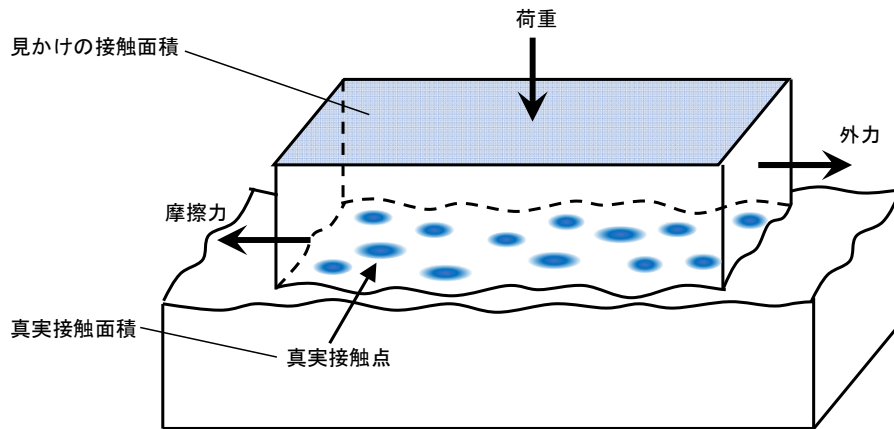


図 3.1 2つの固体表面の凹凸と真実接点

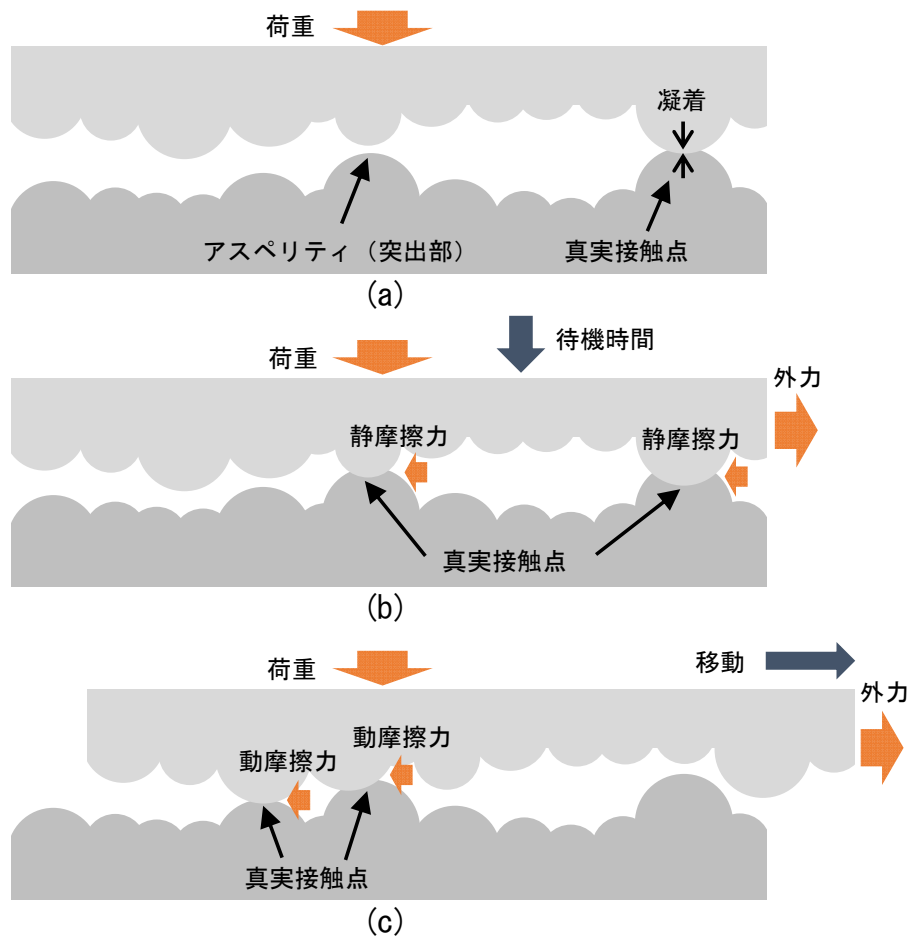


図 3.2 真実接点の部分を拡大した模式図

3.2.2 試験体

試験体の形状および寸法を図 3.3 および図 3.4 に示す。同図(a)に示すすべり材はステンレスの座彫りを施したホルダーに 80φ の PTFE 材を半埋め込み接着したものである。同図(b)に示すすべり板は加力のためのバックプレートの両面に PTFE コーティングを施したステンレス板をビス固定したものである。試験体としてはすべり板の両面にすべり材を当て、2面摩擦としている。試験体の製品仕様としての基準面圧は $18\text{N}/\text{mm}^2$ であり、動摩擦係数は 0.011 である。試験体は表 3.1 に示すように面圧を基準面圧とその2倍および1/3とした3水準、各4体ずつの計12体とし、設定する待機時間に対応させこれらの試験体を繰り返し使用している。待機時間は5分から250日までのものと1分から209日までのものを設定面圧ごとに2体ずつとした。各試験体は、待機時間中には比較的溫度変化の少ない実験場地下ピット内にて図 3.5 および図 3.6 のように設定面圧を加えたままで保管し、予備の試験体にてピット内の試験体温度と面圧（基準面圧）の変化を継続的に計測した。

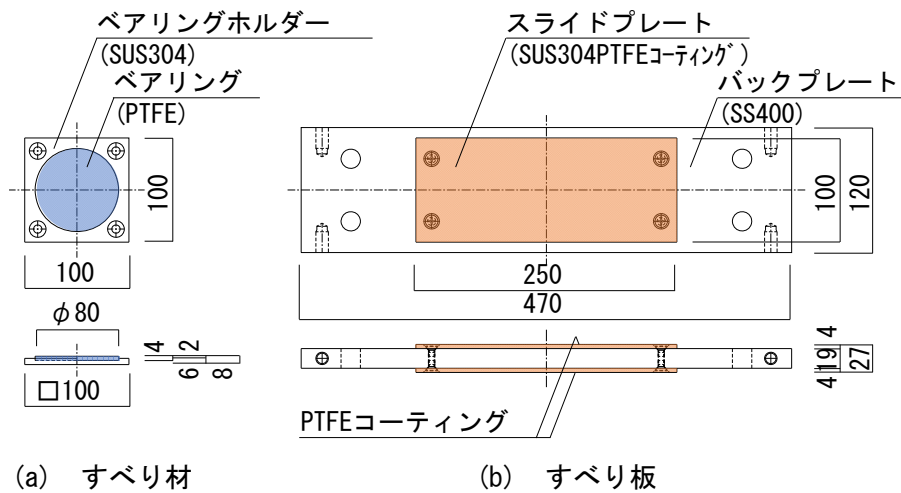


図 3.3 試験体の形状および寸法（単位：mm）



(a) すべり材



(b) すべり板

図 3.4 試験体の形状

表 3.1 試験体一覧

試験体名	設定面圧 (N/mm ²)	待機時間
L-1,L-2	6.0	5分,15分,2時間,1日,7日,42日,126日,250日
L-3,L-4		1分,15分,2時間,175日,209日
M-1,M-2	18.0 (基準面圧)	5分,15分,2時間,1日,7日,42日,126日,250日
M-3,M-4		1分,15分,2時間,175日,209日
H-1,H-2	36.0	5分,15分,2時間,1日,7日,42日,126日,250日
H-3,H-4		1分,15分,2時間,175日,209日

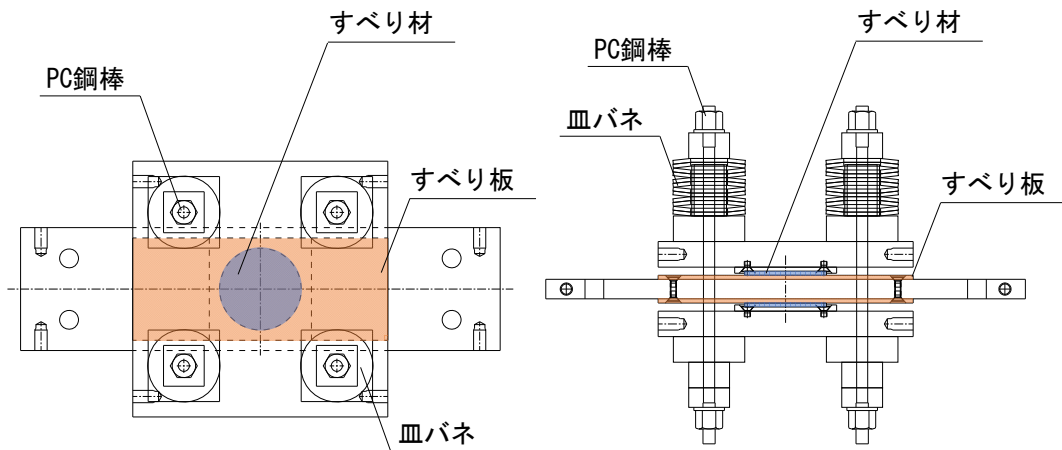


図 3.5 試験体組立図



図 3.6 ピット内保管状況

3.2.3 試験方法

試験体を挟み込んだ鋼板の4隅に設置した PC 鋼棒に設定面圧となるように軸力を導入した。軸力値は、予め実施した PC 鋼棒予備試験体における引張試験の結果を用いて、2枚/本のひずみゲージで測定されたひずみ度から換算した。また、締付け部にはリラクセーションを考慮して皿バネを用いた。図 3.7 および図 3.8 に加力装置を示す。加力は、試験体のすべり板に連結した鋼板を、50kN ロードセルを介して 50kN 油圧ジャッキにより行った。まずは静的に引き荷重を加えた後、反対方向に押し荷重を加え、さらに元の位置まで引き戻すまでの1サイクルを手動ポンプにより静的に加力した。初回のゼロセット時は繰返し回数による摩擦係数の変動を低減するために3サイクルの加力を行った。各試験前には待機時間中の面圧変化、試験体の移動および架台への固定等により変動した PC 鋼棒の張力を微調整した。変位は試験体前後および左右の変位計にて4点計測し、その平均値を求めた。静摩擦係数の測定が主目的であるため、すべり板が滑動を開始する瞬間の荷重を計測するために最大 50Hz 程度的高速データロガーを用いた。また加力時には加力装置付近の気温も室内用温度計にて計測した。

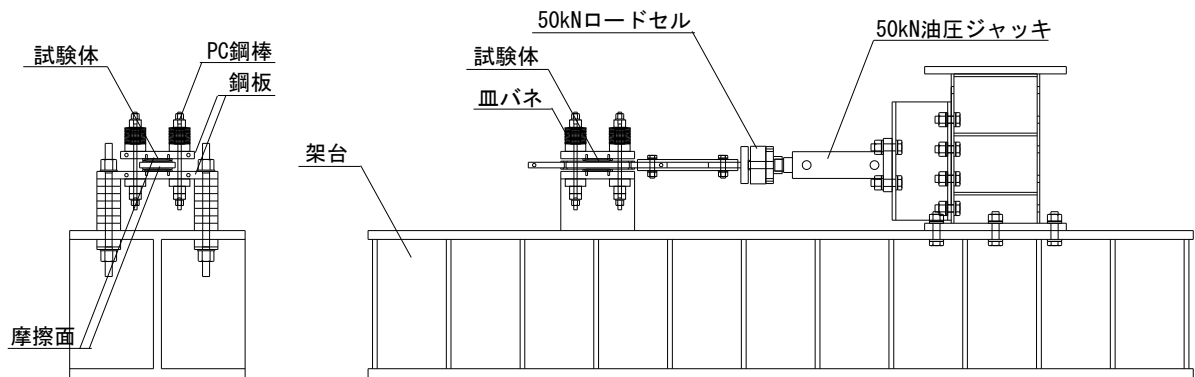


図 3.7 加力装置

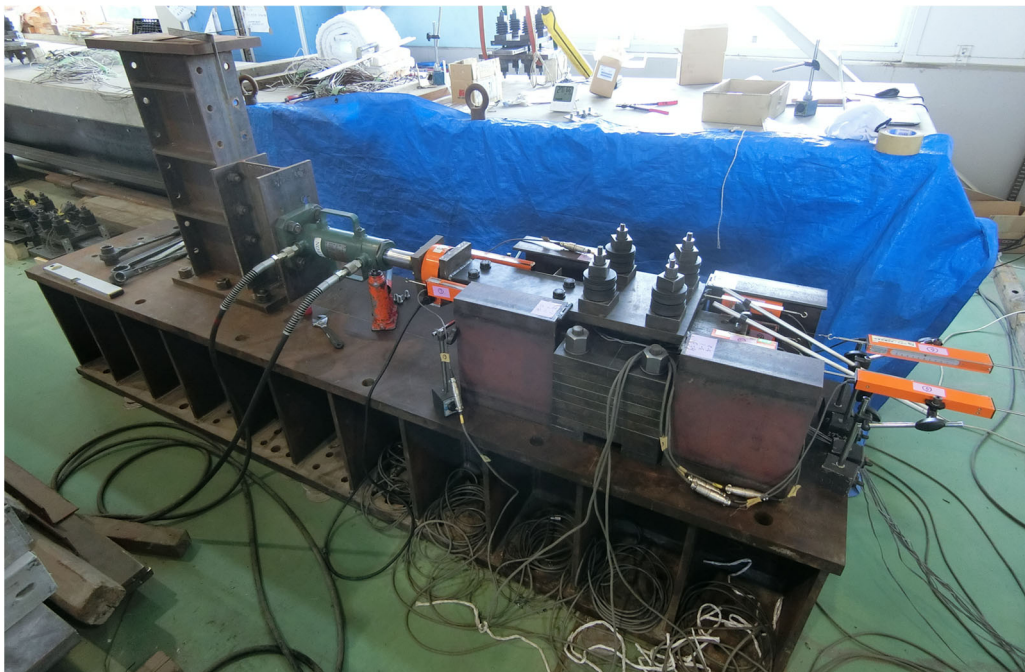


図 3.8 加力状況

3.3 実験結果

3.3.1 試験実施日程と気温

本実験では待機時間が実験変数であるため、実験開始から設定した待機時間において試験を行うと、図 3.9 に示すように試験時の気温が高中低と区分される日程で行うこととなった。図の横軸は月日、縦軸は気温を示し、各試験体の試験実施日における加力装置付近での試験開始時の気温をプロットしている。また、図中上下には試験間隔を示す補足軸を追記しており、各面圧 1,2 の試験体は上側補足軸に、3,4 の試験体は下側補足軸に示すように、前回試験終了時から設定待機時間経過後に試験を行い、同日中に短い待機時間の試験も行った。図中には、最寄りの気象庁観測所にて計測^{3.9)}された最高および最低気温とその過去 30 年間の平均値である平年値、並びに地下ピット内の気温と予備試験体の温度変化も併せて示す。試験は日中に行ったため、試験時の気温は概ね日最高気温の平年値程度であった。ピット内の気温は、時間ごとの変動がほとんどなく年間を通して $20^{\circ}\text{C} \pm 6 \sim 7^{\circ}\text{C}$ 程度であり、予備試験体との温度差は $\pm 1 \sim 2^{\circ}\text{C}$ 程度であった。予備試験体にて継続計測した面圧は、PC 鋼棒のリラクセーションと考えられる変化は認められず、試験体の温度変化に伴った $\pm 5\%$ 程度の変動がみられた。

本章では、後述するように試験結果が試験時の気温の影響を受けたと考えられるため、まずは高温に区分する夏季に実施した試験結果について 3.3.2 に述べ、その後気温の影響も含めた結果を 3.3.3 に述べる。

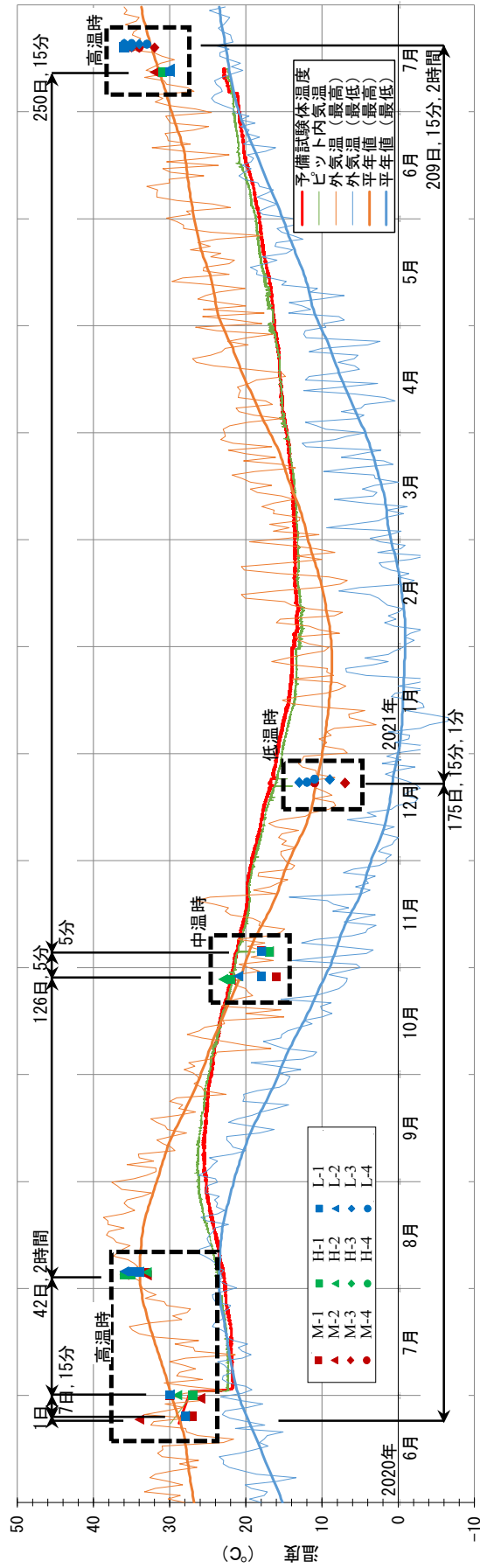


図 3.9 試験実施日程と気温

3.3.2 夏季における試験結果

試験結果の一例として、2021年7月に行ったL-1, M-1, H-1試験体での待機時間が250日(上段)とその直後に行った15分(下段)での摩擦係数と変位の関係を図3.10に示す。横軸は変位量を示し、縦軸は1面分の摩擦係数としている。各面圧の動摩擦係数には差があるが、既知^{3.10)}の式(3.1)にて正負の切片における摩擦係数の平均値を基準面圧(18N/mm²)での動摩擦係数に補正すると、 $\mu(\sigma_{18})$ は0.005~0.007となる。本実験では、静摩擦係数の測定が主目的であり静的加力としたため式(3.2)での速度補正値は参考値であるが、面圧補正後の動摩擦係数を基準速度($V_0=100\text{mm/s}$)に補正すると $\mu(V_0)$ は0.007~0.011となり、いずれの試験体も設計仕様値(0.011)に近い動摩擦係数であることがわかる。なお、繰返し回数による変動は2%程度であり試験結果への影響は小さいと考えられる。また、静摩擦から動摩擦に移行する際の下り勾配の形状が図1.21の実験データと異なるのは、動的試験と静的試験の違いによるものと考えられる。

$$\mu / \mu(\sigma_{18}) = (\sigma / 18)^{-0.51} \quad (3.1)$$

$$\mu / \mu(V_0) = (V / 100)^{0.0894} \quad (3.2)$$

ここで、 μ は測定動摩擦係数、 $\mu(\sigma_{18})$ は基準面圧での動摩擦係数、 σ は試験面圧、 $\mu(V_0)$ は基準速度の動摩擦係数、 V は試験速度である。

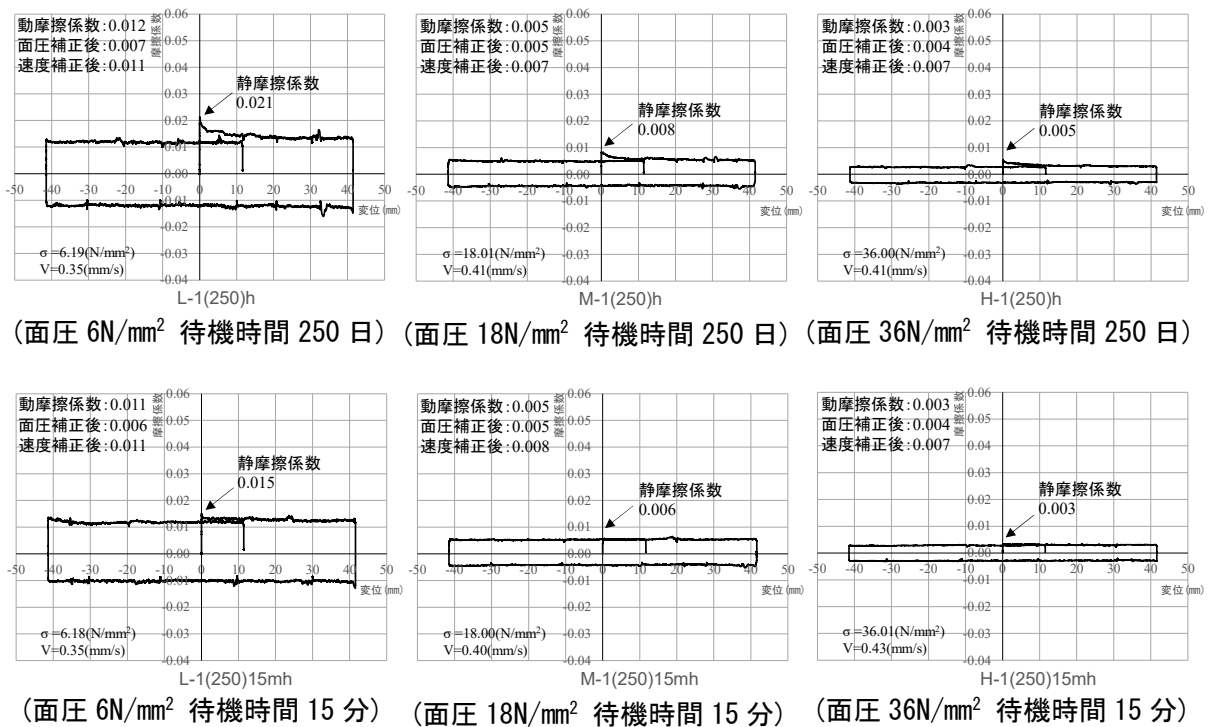


図 3.10 摩擦係数—変位曲線例

静摩擦係数は、待機時間 15 分では動摩擦係数と同等であるが、待機時間 250 日ではその 1.5 倍程度に増大している。これらの試験結果を静摩擦係数と待機時間の対数との関係で整理した結果を図 3.11 に示す。図中の各点は各回の試験結果のプロットであり、1 面分の摩擦係数としている。破線はそれぞれの設定面圧での対数近似曲線を示し、いずれの面圧でもその勾配が右上がりであり、面圧が低いものほどその傾きが大きいことがわかる。

なお、縦軸を静摩擦係数でなく静摩擦力とすると、図 3.12 に示すように各プロットのばらつきが大きいものの対数近似曲線の勾配が一定に近づく。すなわち、本実験の範囲では待機時間による真実接触面積の増加が、面圧ではなく荷重に依存する可能性も示唆されるが、摩擦面の面積を実験変数としておらず、また弾性すべり支承の設計で使用するのは摩擦係数であるため、本研究では静摩擦係数を縦軸とした。

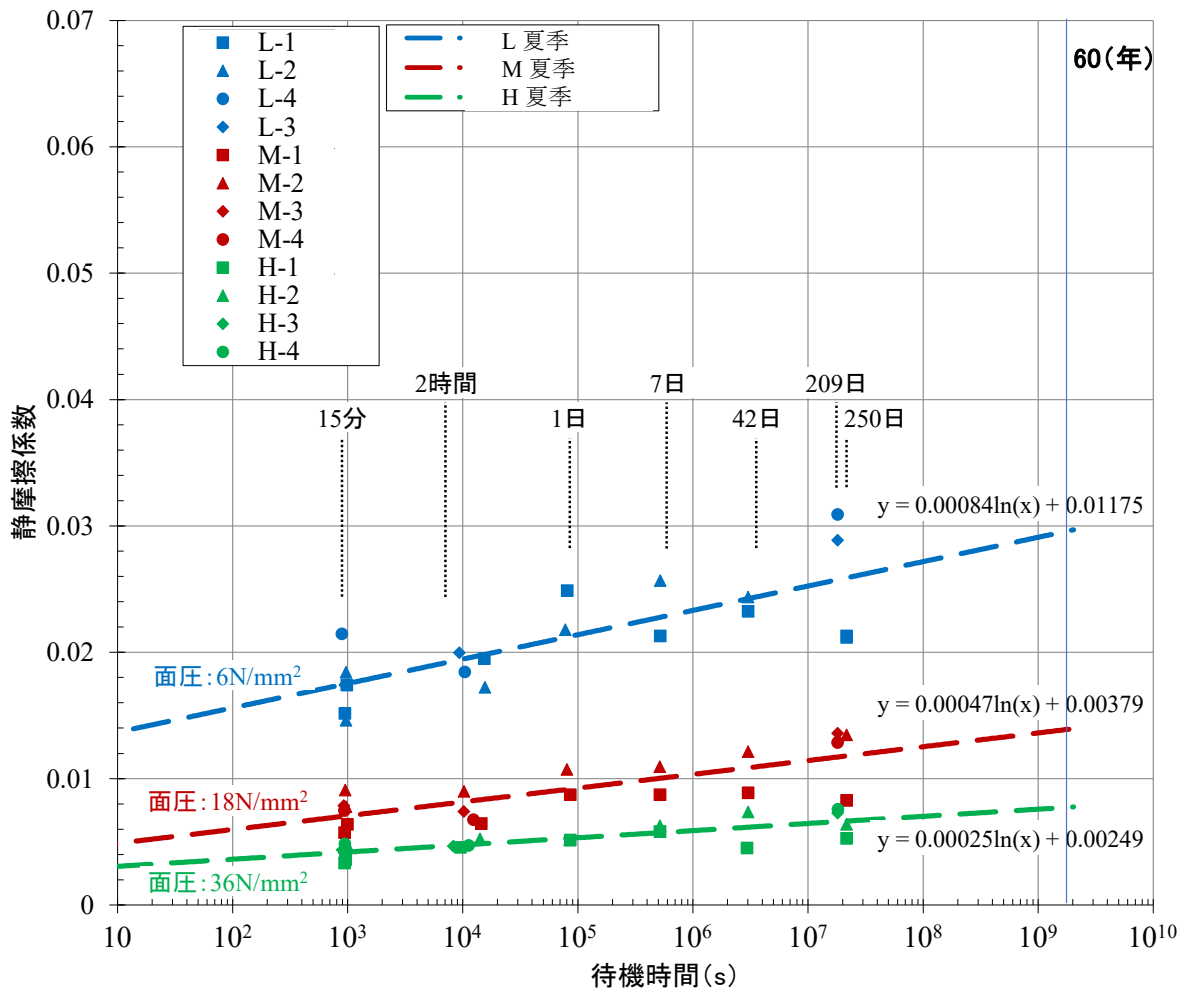


図 3.11 静摩擦係数—待機時間対数 (夏季)

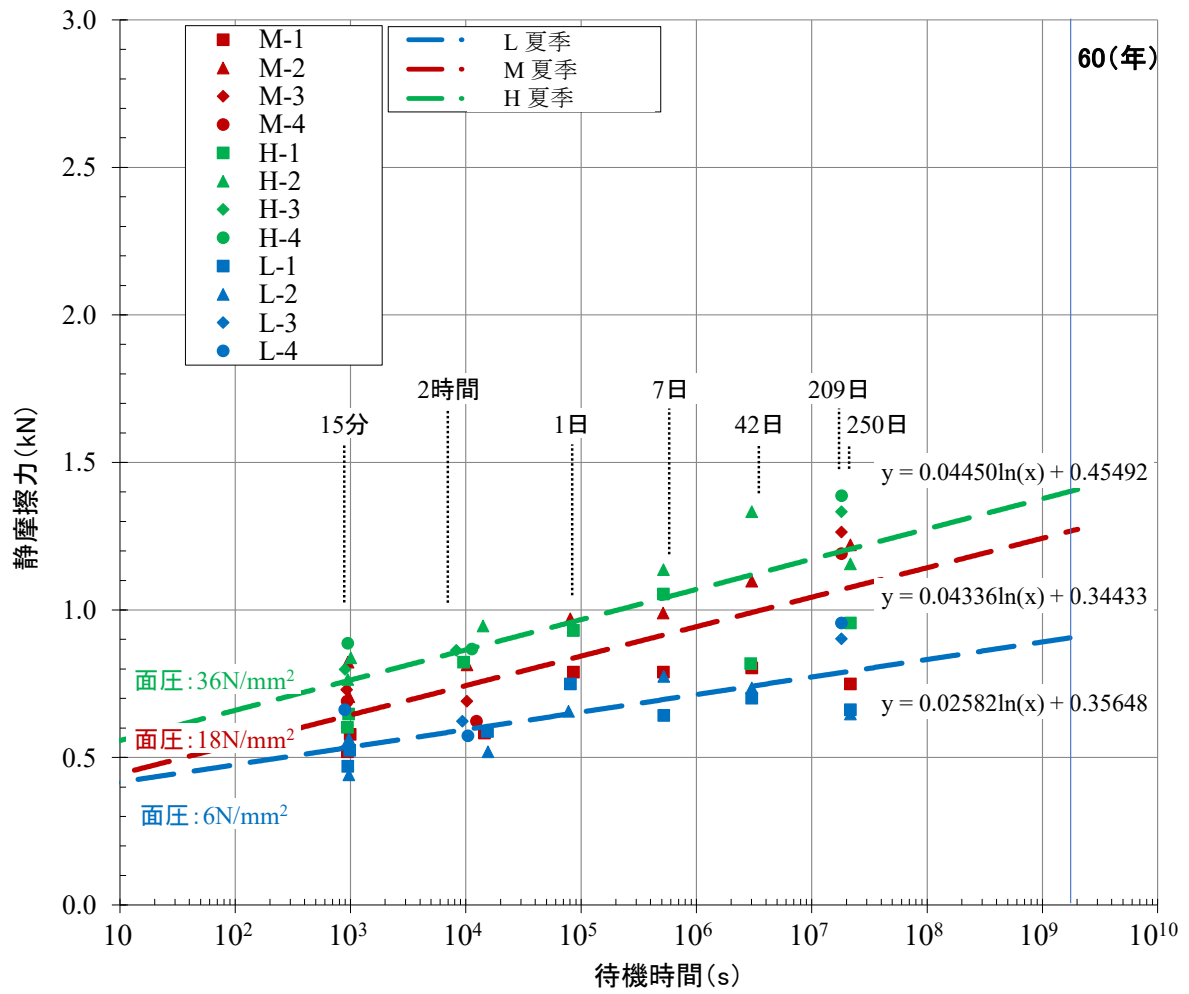


图 3.12 静摩擦力—待機時間対数 (夏季)

3.3.3 秋季および冬季の試験結果

秋季と冬季（図 3.9 の中温と低温に区分）に行った試験結果を加えて図 3.13 に示す。図中グレーで示す回帰線等は，図 3.11 で示した夏季の試験結果を示している。各面圧とも静摩擦係数は，夏季と比べて秋季には 1.2 倍程度に増加し，冬季には 2.0 倍程度に増加した。これは，先に触れたように試験時の気温による影響であると考えられる。一般に PTFE 材の動摩擦係数は，20℃～300℃程度の広い温度範囲でほとんど変化しないとされている^{3.6)}が，J.C.Burton らの PTFE コーティング鋼を用いた-269℃～+200℃程度の広い温度域での実験結果^{3.11)}では，図 3.14 に示すように常温環境下での静摩擦係数は温度低下に伴って上昇している。これは，真実接触点での凝着を切断するときに必要なせん断力（エネルギーバリアー）を，熱揺らぎの助けを借りれば小さなせん断力でも乗り越えることができるとする熱揺らぎの効果^{3.1)}の考えと一致する。

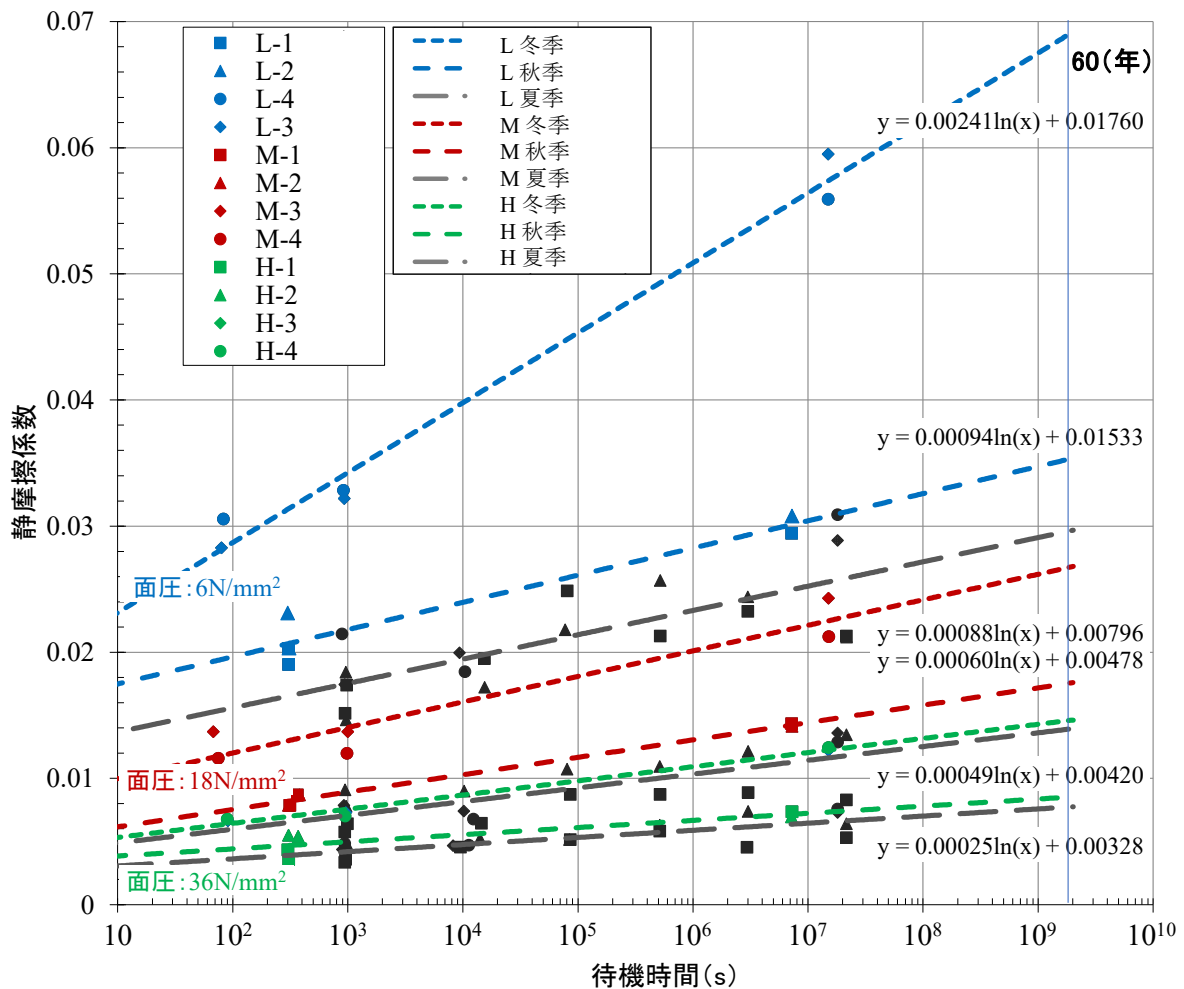


図 3.13 静摩擦係数—待機時間対数（通季）

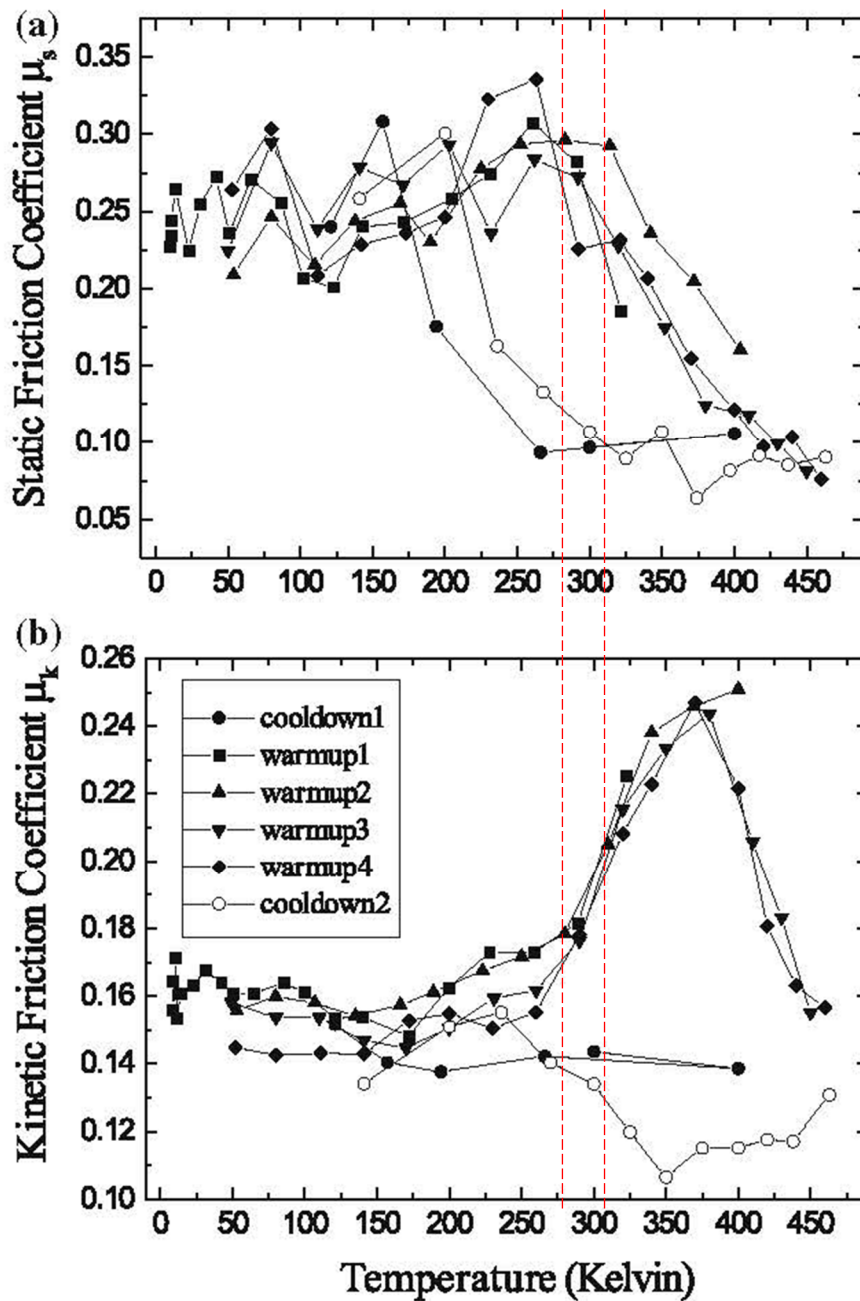


図 3.14 PTFE コーティング鋼の摩擦係数と温度の関係^{3.11)}

0 (Kelvin) = -273.15 (°C)

本実験の温度域 : 7~36 (°C) = 280~309 (Kelvin)

図 3.11 および図 3.13 を設定面圧ごとに分けて改めて図 3.15～図 3.17 に示す．図 3.15 には既往研究の三山ら^{3,4)}による PL 試験体の実験結果，および第 2 章の実験における表 2.4 に示した概算静摩擦係数のプロットを併せて示す．三山らの PL 試験体は本実験と同じすべり板を使用しているとみられるが，基準面圧は 15N/mm^2 と本実験での基準面圧よりやや低く，高めの摩擦係数仕様値である．試験結果が本実験と比べて全体的に高くばらつきも大きくなっているのは，面圧と気温の影響および動的試験による影響も考えられる．表 2.4 の概算静摩擦係数は面圧 $7.6\sim 15.9\text{N/mm}^2$ の建物全体での結果であり気温も実施日や時間によりばらばらであるが，待機時間の長い範囲では高めの結果であったと考えられる．

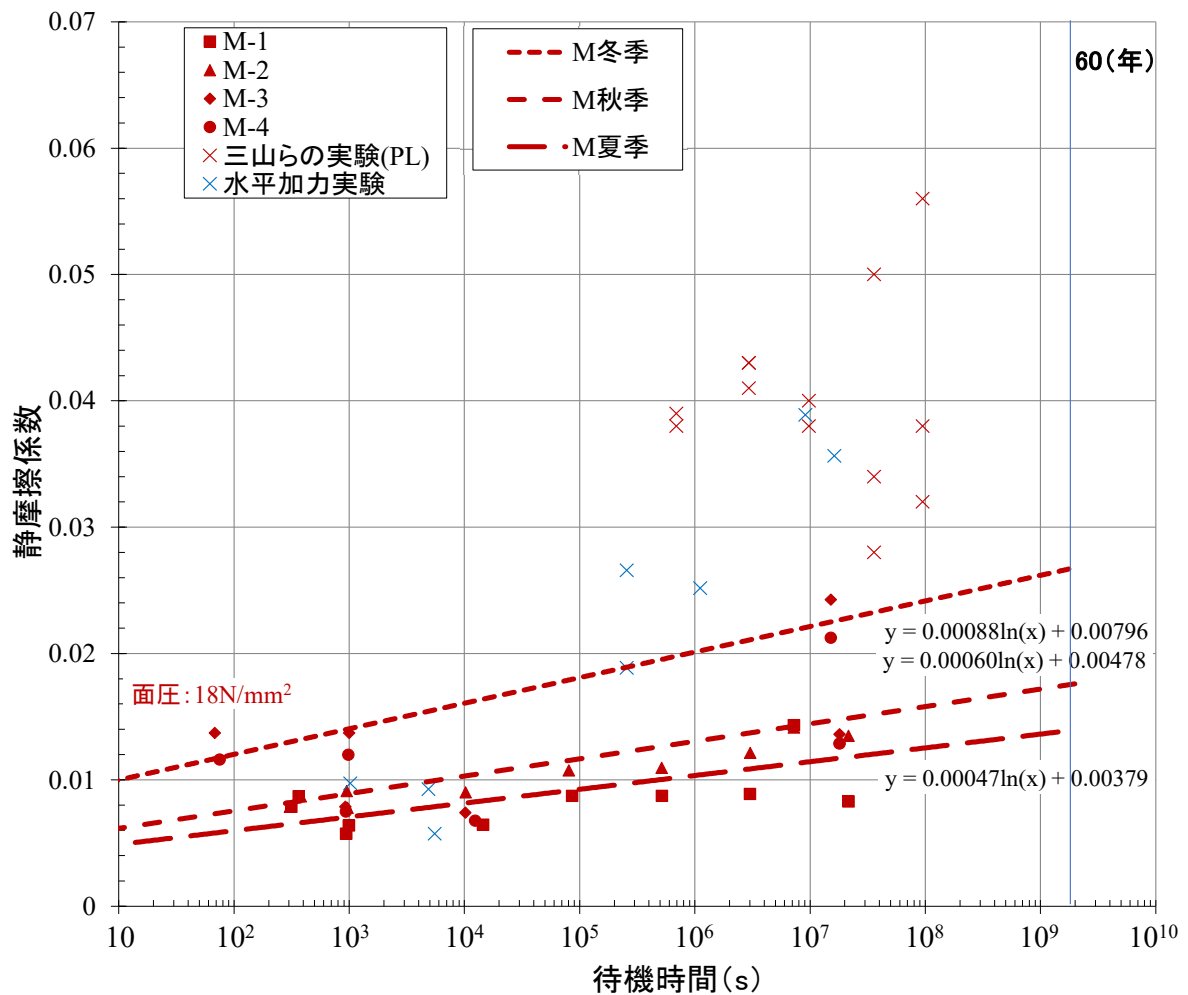


図 3.15 静摩擦係数－待機時間対数（通季）（基準面圧）

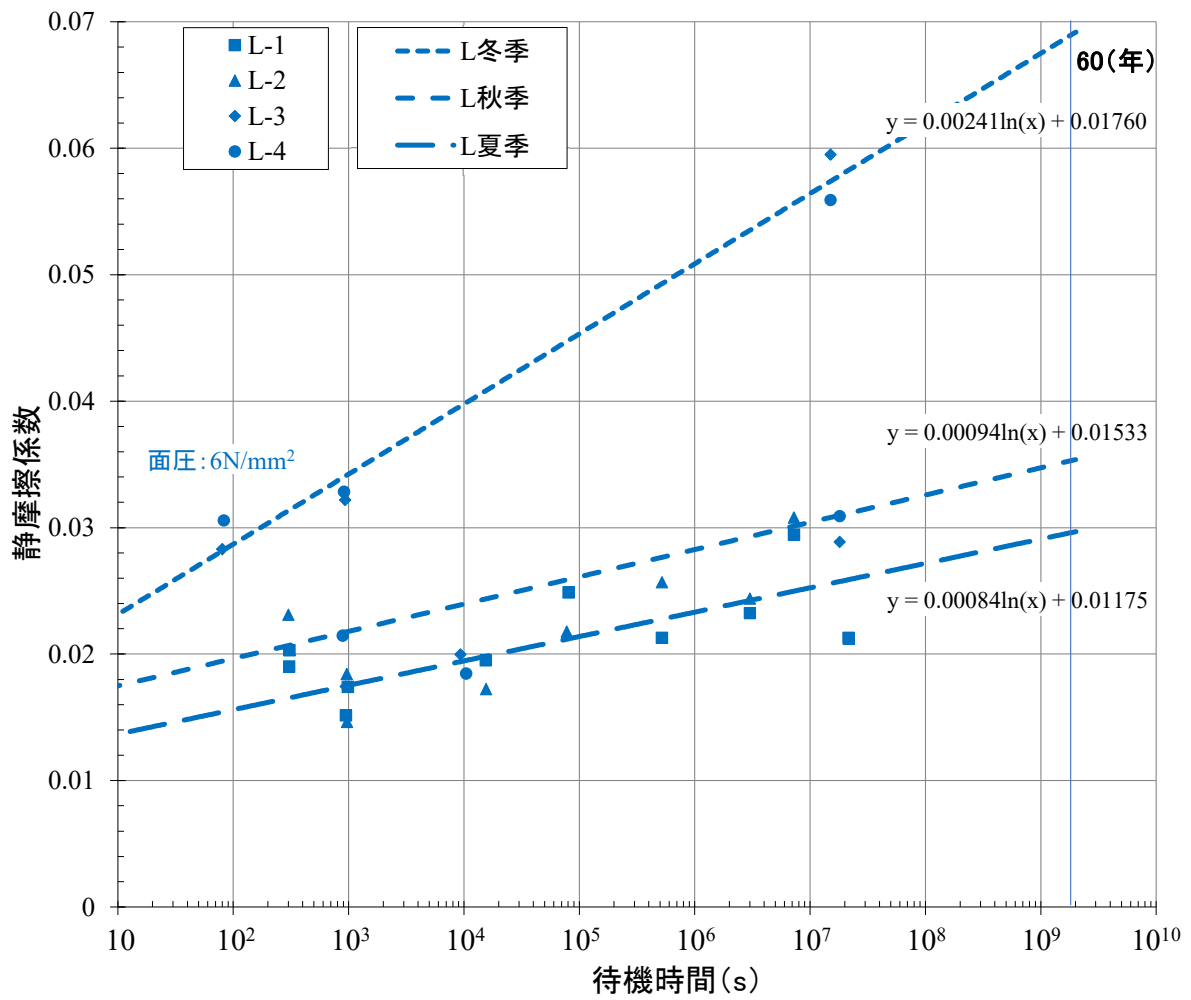


图 3.16 静摩擦系数—待機時間对数 (通季) (低面压)

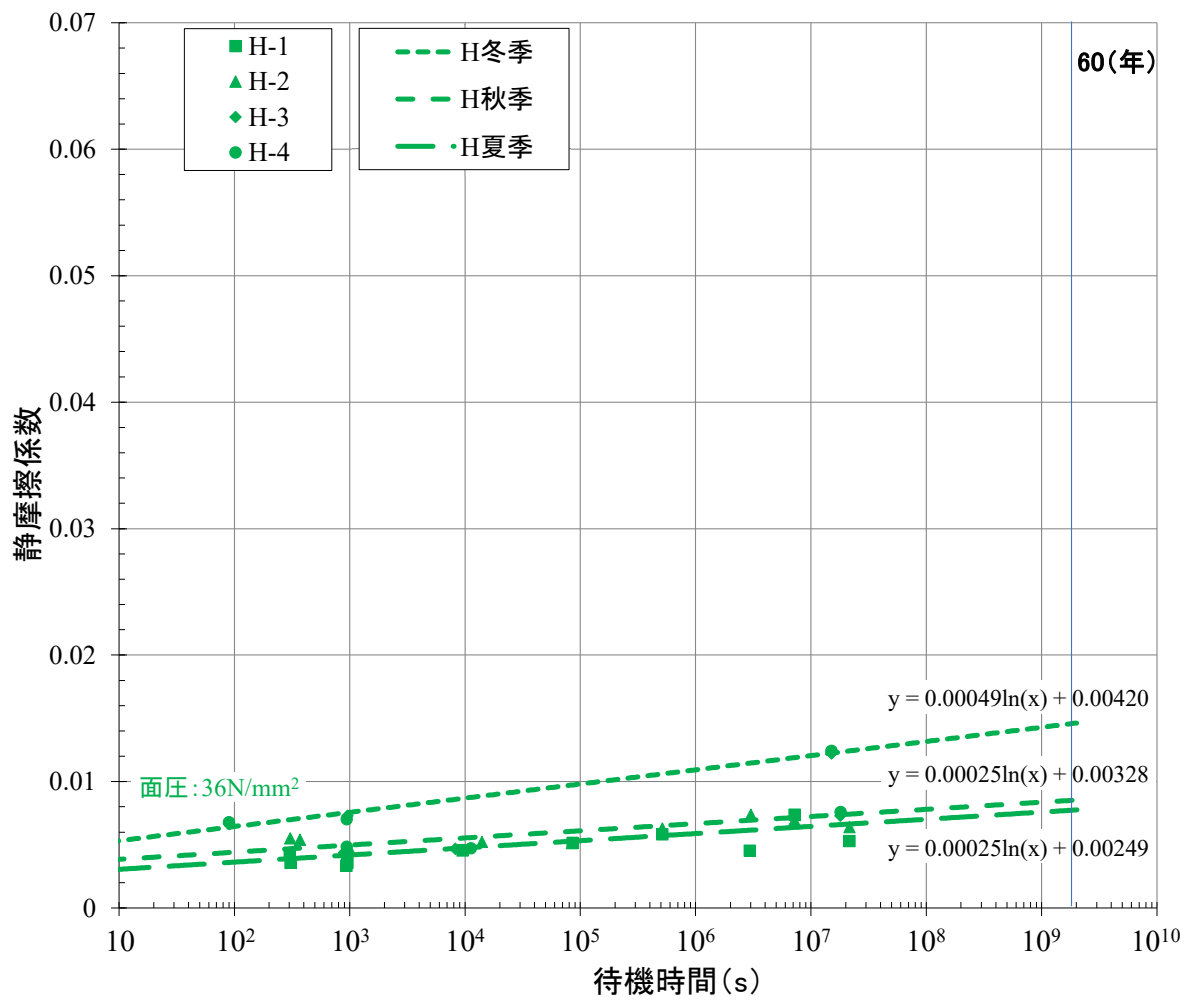


図 3.17 静摩擦係数—待機時間対数 (通季) (高面圧)

全試験結果の一覧を表 3.2(a)~(c)に示し、摩擦係数と変位の関係の全試験結果を図 3.18(a)~(f)に示す。

表 3.2(a) 全試験結果一覧

試験実施日時	試験体名			面圧 (N/mm ²)	待機時間 (s)	温度 (°C)	静摩擦係数
	番号	(日) 時間	温				
2020/6/25 13:25	M-1	(1)	h	18.06	85,768	27	0.009
2020/7/1 13:22	M-1	(7)	h	18.05	518,020	30	0.009
2020/7/1 13:47	M-1	(7)15m	h	18.05	994	30	0.006
2020/8/5 10:02	M-1	(42)	h	18.02	3,010,185	33	0.009
2020/8/5 14:09	M-1	(42)2h	h	17.97	14,507	35	0.006
2020/10/28 10:07	M-1	(126)	m	16.14	7,242,728	16	0.014
2020/10/28 10:20	M-1	(126)5m	m	16.16	365	16	0.009
2020/11/4 14:21	M-1	(126)5m'	m	18.02	314	18	0.008
2021/7/12 14:19	M-1	(250)	h	18.01	21,599,363	30	0.008
2021/7/12 14:42	M-1	(250)15m	h	18.00	940	30	0.006
2020/6/24 14:22	M-2	(1)	h	17.75	80,420	34	0.011
2020/6/30 13:27	M-2	(7)	h	17.92	514,902	26	0.011
2020/6/30 13:47	M-2	(7)15m	h	17.90	949	26	0.009
2020/8/4 12:13	M-2	(42)	h	18.03	3,018,069	33	0.012
2020/8/4 15:10	M-2	(42)2h	h	18.00	10,271	36	0.009
2020/10/27 13:37	M-2	(126)	m	17.11	7,251,728	22	0.014
2020/10/27 13:50	M-2	(126)5m	m	17.07	381	22	0.009
2020/11/4 11:18	M-2	(126)5m'	m	18.05	306	17	0.008
2021/7/12 10:13	M-2	(250)	h	18.03	21,595,579	32	0.013
2021/7/12 10:36	M-2	(250)15m	h	18.04	966	32	0.008
2020/12/22 10:11	M-3	(175)	c	18.01	15,119,798	7	0.024
2020/12/22 10:37	M-3	(175)15m	c	18.03	998	7	0.014
2020/12/22 10:52	M-3	(175)1m	c	18.05	68	7	0.014
2021/7/19 9:46	M-3	(209)	h	18.50	18,053,062	32	0.014
2021/7/19 10:11	M-3	(209)15m	h	18.50	926	34	0.008
2021/7/19 13:12	M-3	(209)2h	h	18.56	10,210	35	0.007
2020/12/22 12:35	M-4	(175)	c	18.01	15,124,906	11	0.021
2020/12/22 13:00	M-4	(175)15m	c	17.98	983	11	0.012
2020/12/22 13:10	M-4	(175)1m	c	17.99	75	11	0.012
2021/7/19 10:45	M-4	(209)	h	18.41	18,048,450	34	0.013
2021/7/19 11:12	M-4	(209)15m	h	18.39	937	35	0.007
2021/7/19 14:49	M-4	(209)2h	h	18.32	12,358	36	0.007

表 3.2(b) 全試験結果一覧

試験実施日時	試験体名			面圧 (N/mm ²)	待機時間 (s)	温度 (°C)	静摩擦係数
	番号	(日) 時間	温				
2020/6/25 10:39	H-1	(1)	h	36.06	85,807	28	0.005
2020/7/1 10:03	H-1	(7)	h	36.04	516,084	27	0.006
2020/7/1 10:24	H-1	(7)15m	h	36.03	959	27	0.004
2020/8/4 14:15	H-1	(42)	h	36.02	2,951,188	36	0.005
2020/8/4 16:59	H-1	(42)2h	h	35.98	9,536	35	0.005
2020/10/27 14:34	H-1	(126)	m	33.37	7,248,521	22	0.007
2020/10/27 14:46	H-1	(126)5m	m	33.34	303	22	0.004
2020/11/4 12:07	H-1	(126)5m'	m	36.02	308	17	0.004
2021/7/12 11:18	H-1	(250)	h	36.00	21,596,507	31	0.005
2021/7/12 11:42	H-1	(250)15m	h	36.01	941	31	0.003
2020/6/25 11:37	H-2	(1)	h	36.09	84,691	28	0.005
2020/7/1 10:58	H-2	(7)	h	35.98	515,866	27	0.006
2020/7/1 11:20	H-2	(7)15m	h	36.01	1,002	29	0.005
2020/8/5 9:13	H-2	(42)	h	36.00	3,015,822	33	0.007
2020/8/5 13:13	H-2	(42)2h	h	36.00	14,083	34	0.005
2020/10/27 15:38	H-2	(126)	m	34.41	7,179,481	23	0.007
2020/10/27 15:52	H-2	(126)5m	m	34.37	371	23	0.005
2020/11/4 13:41	H-2	(126)5m'	m	36.03	306	17	0.005
2021/7/12 13:17	H-2	(250)	h	36.01	21,597,994	30	0.006
2021/7/12 13:42	H-2	(250)15m	h	35.99	947	30	0.004
2020/12/22 14:05	H-3	(175)	c	36.02	15,116,829	13	0.012
2020/12/22 14:30	H-3	(175)15m	c	35.95	962	13	0.007
2020/12/22 14:41	H-3	(175)1m	c	35.96	91	13	0.007
2021/7/19 13:50	H-3	(209)	h	36.43	18,054,099	35	0.007
2021/7/19 14:16	H-3	(209)15m	h	36.40	896	36	0.004
2021/7/19 16:43	H-3	(209)2h	h	36.74	8,262	36	0.005
2020/12/22 15:38	H-4	(175)	c	36.01	15,117,722	12	0.012
2020/12/22 16:03	H-4	(175)15m	c	36.01	947	12	0.007
2020/12/22 16:12	H-4	(175)1m	c	36.00	90	12	0.007
2021/7/20 9:30	H-4	(209)	h	36.44	18,117,588	33	0.008
2021/7/20 9:54	H-4	(209)15m	h	36.48	944	33	0.005
2021/7/20 13:12	H-4	(209)2h	h	36.67	11,270	36	0.005

表 3.2(c) 全試験結果一覧

試験実施日時	試験体名			面圧 (N/mm ²)	待機時間 (s)	温度 (°C)	静摩擦係数
	番号	(日) 時間	温				
2020/6/25 14:01	L-1	(1)	h	5.95	80,849	28	0.025
2020/7/1 14:24	L-1	(7)	h	6.04	519,596	30	0.021
2020/7/1 14:46	L-1	(7)15m	h	6.02	981	30	0.017
2020/8/5 10:50	L-1	(42)	h	6.01	3,009,461	34	0.023
2020/8/5 15:13	L-1	(42)2h	h	5.97	15,414	35	0.020
2020/10/28 10:58	L-1	(126)	m	5.60	7,241,932	18	0.029
2020/10/28 11:23	L-1	(126)5m	m	5.62	306	18	0.020
2020/11/4 14:59	L-1	(126)5m'	m	6.03	305	18	0.019
2021/7/12 15:13	L-1	(250)	h	6.19	21,600,440	30	0.021
2021/7/12 15:38	L-1	(250)15m	h	6.18	947	30	0.015
2020/6/25 14:38	L-2	(1)	h	6.03	77,657	28	0.022
2020/7/1 15:18	L-2	(7)	h	6.05	520,624	30	0.026
2020/7/1 15:43	L-2	(7)15m	h	6.04	968	30	0.015
2020/8/5 11:27	L-2	(42)	h	6.01	3,008,232	34	0.024
2020/8/5 15:53	L-2	(42)2h	h	6.01	15,519	36	0.017
2020/10/28 13:51	L-2	(126)	m	5.44	7,249,889	21	0.031
2020/10/28 14:07	L-2	(126)5m	m	5.44	300	21	0.023
2020/11/4 15:41	L-2	(126)5m'	m	6.03	309	18	0.020
2021/7/13 9:16	L-2	(250)	h	6.08	21,662,861	30	0.021
2021/7/13 9:42	L-2	(250)15m	h	6.09	964	30	0.018
2020/12/23 10:12	L-3	(175)	c	6.01	15,032,247	9	0.059
2020/12/23 10:36	L-3	(175)15m	c	6.01	932	9	0.032
2020/12/23 10:45	L-3	(175)1m	c	6.01	80	9	0.028
2021/7/20 10:31	L-3	(209)	h	6.22	18,056,278	34	0.029
2021/7/20 10:58	L-3	(209)15m	h	6.15	944	34	0.017
2021/7/20 13:45	L-3	(209)2h	h	6.20	9,344	36	0.020
2020/12/23 12:51	L-4	(175)	c	6.02	15,038,020	11	0.056
2020/12/23 13:15	L-4	(175)15m	c	6.02	914	11	0.033
2020/12/23 13:25	L-4	(175)1m	c	6.02	83	11	0.031
2021/7/20 11:36	L-4	(209)	h	6.15	18,050,489	35	0.031
2021/7/20 12:01	L-4	(209)15m	h	6.13	889	35	0.021
2021/7/20 15:04	L-4	(209)2h	h	6.18	10,408	35	0.018

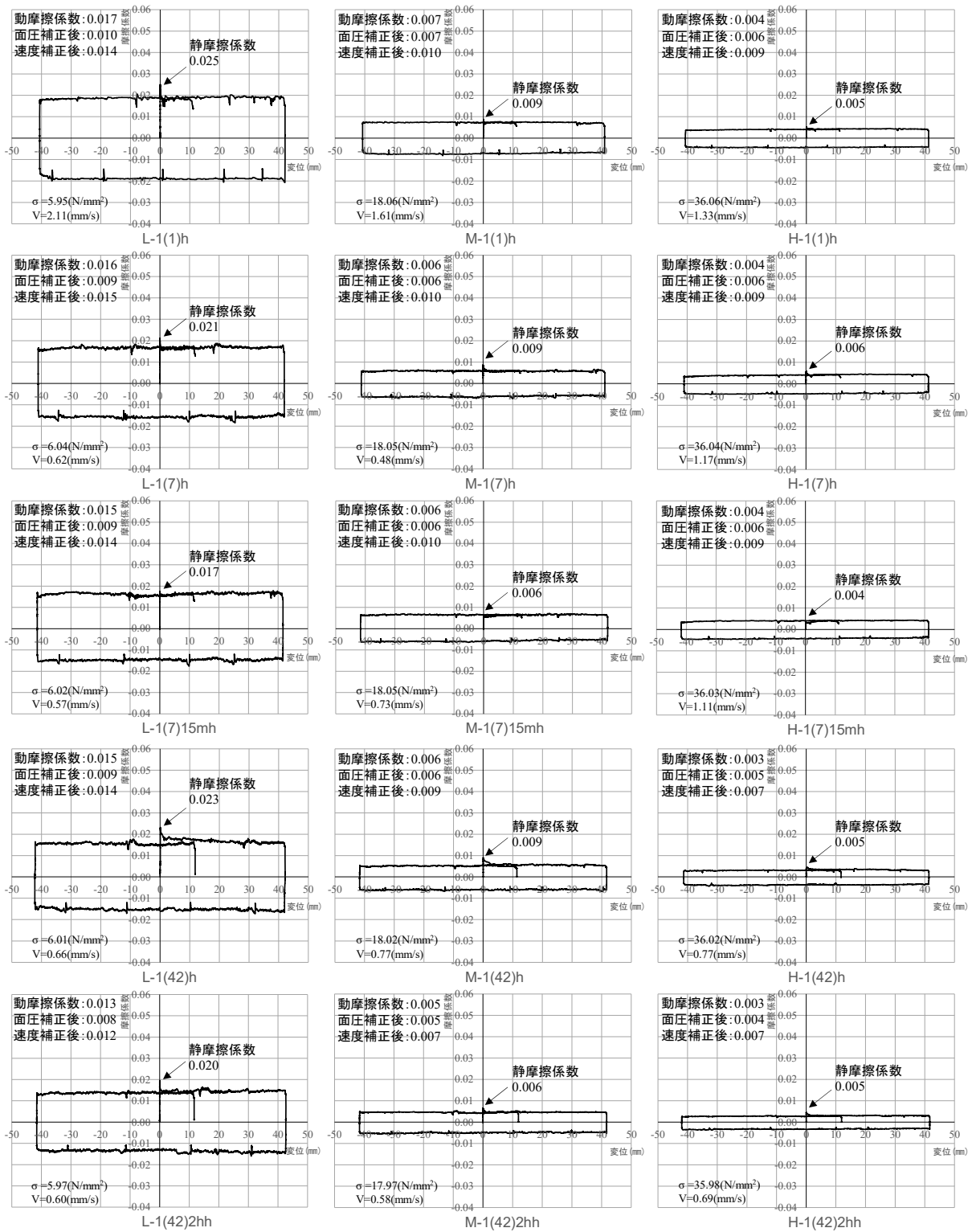


図 3.18(a) 摩擦係数-変位曲線全試験結果

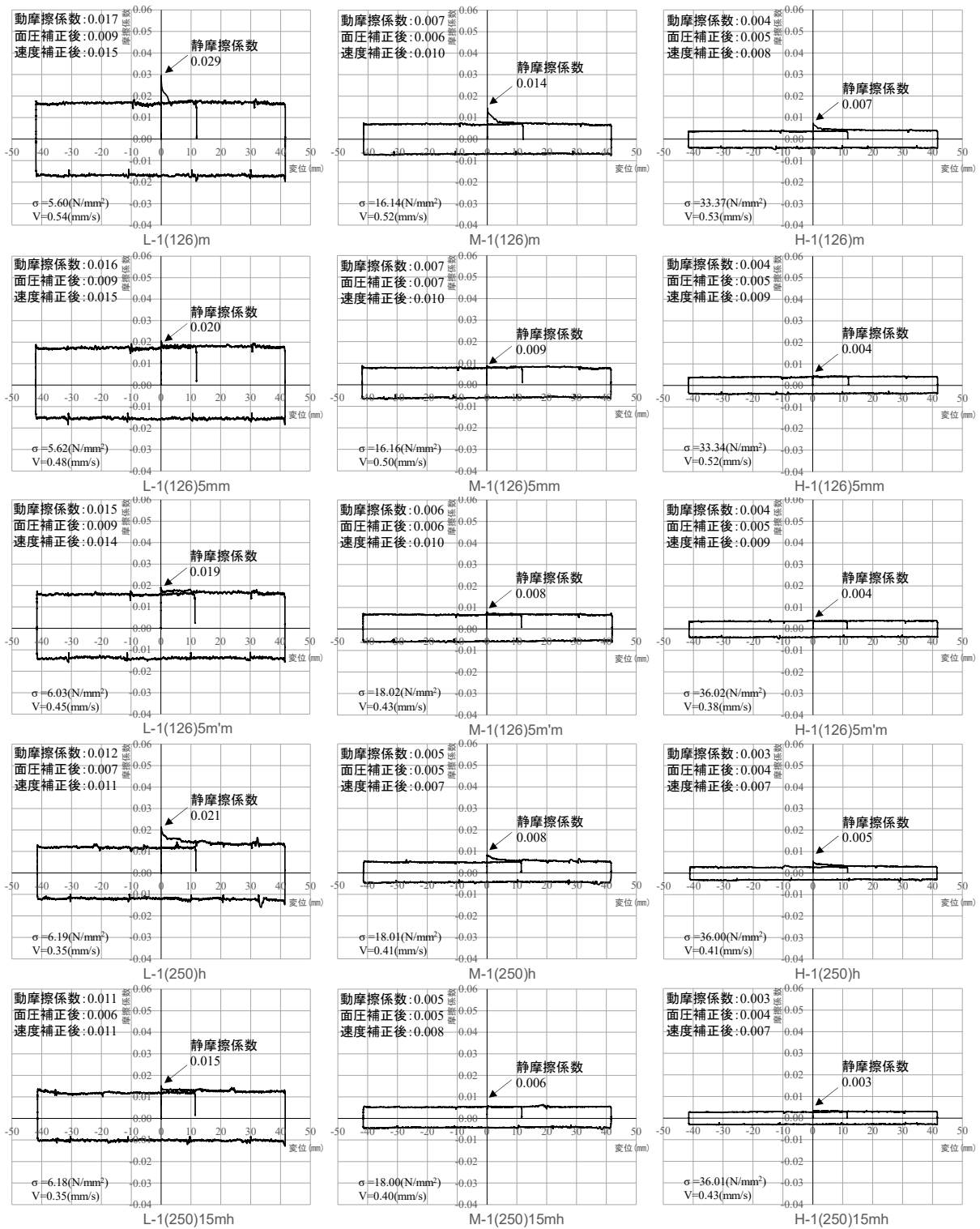


図 3.18 (b) 摩擦係数－変位曲線全試験結果

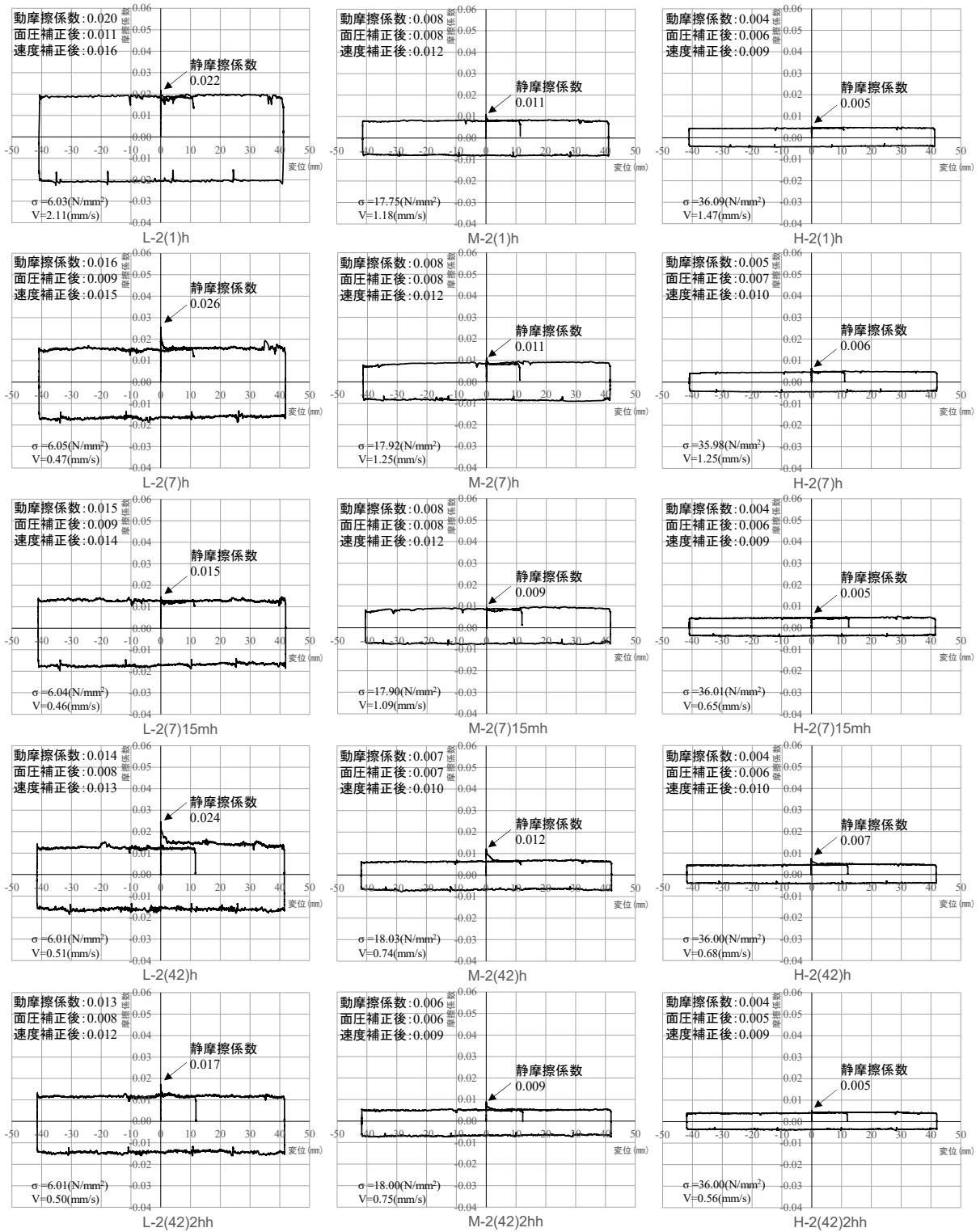


図 3.18(c) 摩擦係数－変位曲線全試験結果

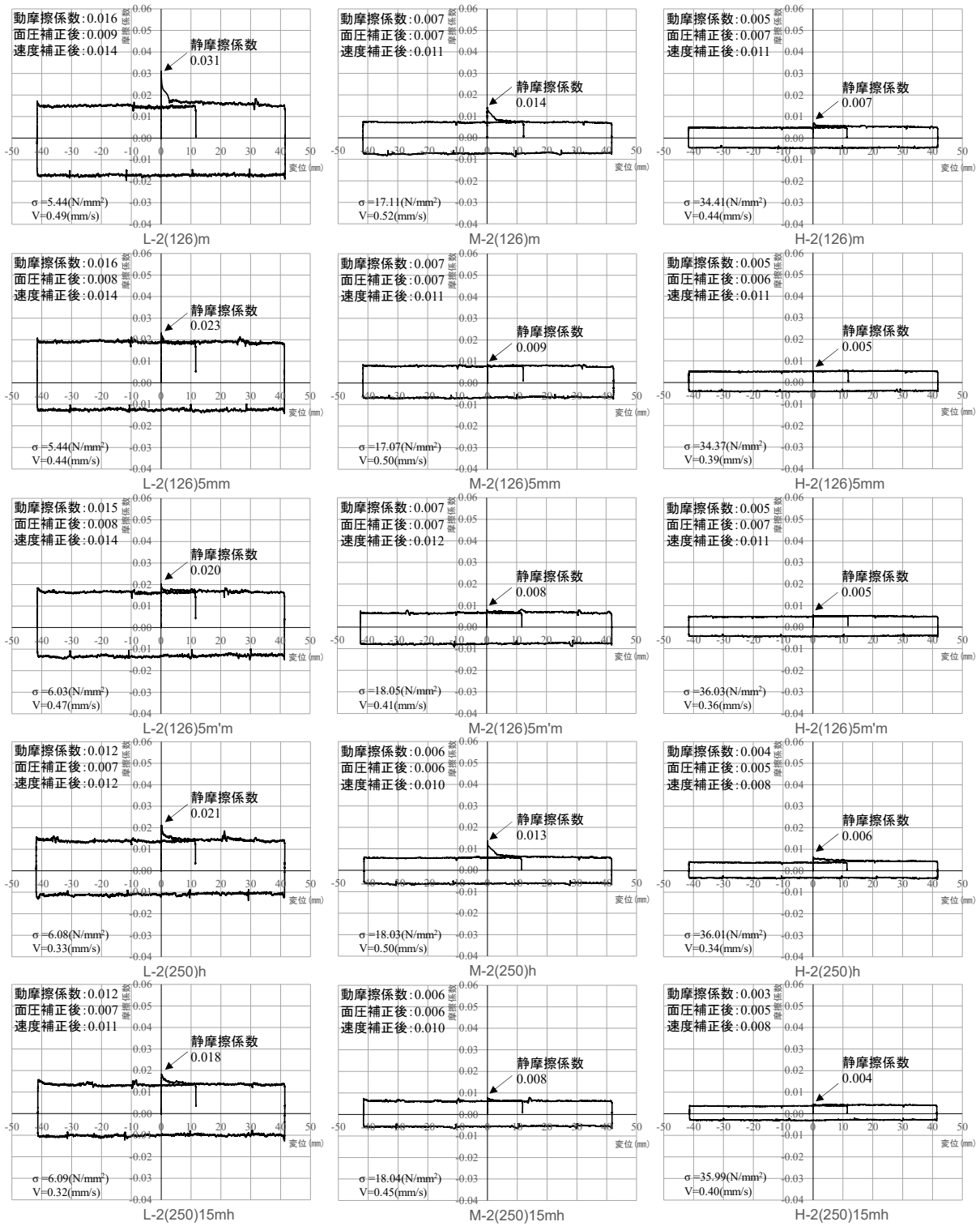


図 3.18 (d) 摩擦係数一変位曲線全試験結果

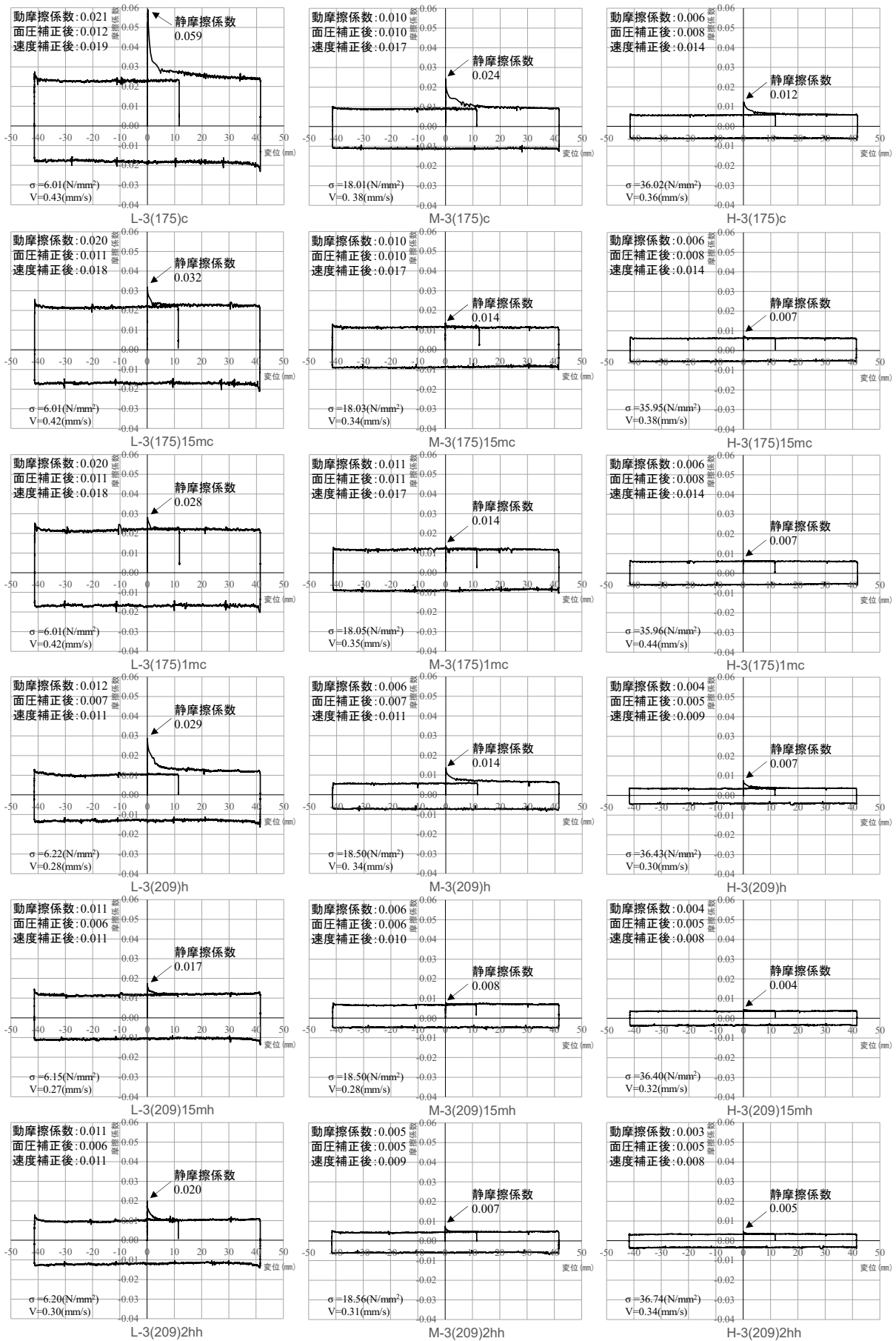


図 3.18 (e) 摩擦係数－変位曲線全試験結果

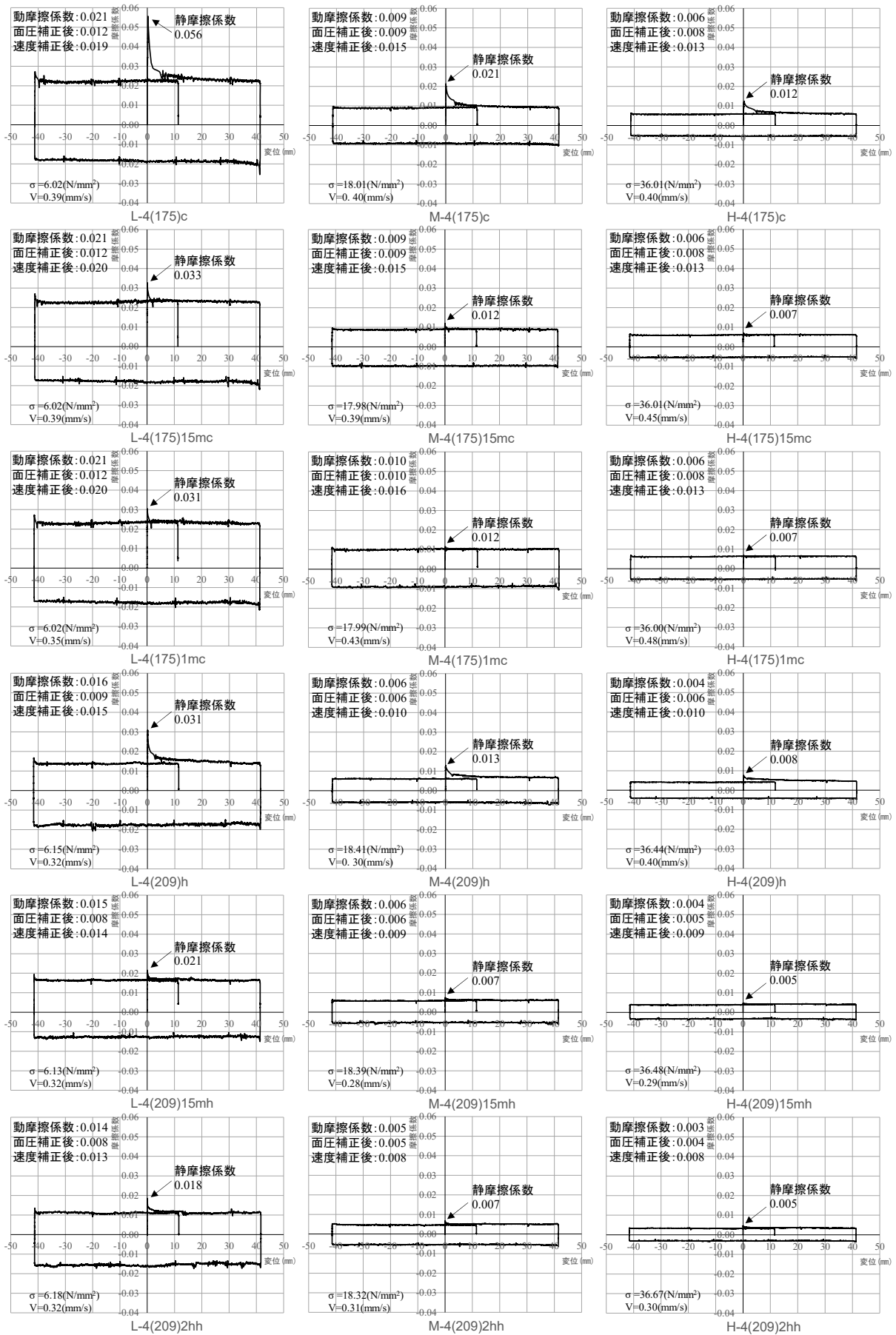


図 3. 18(f) 摩擦係数－変位曲線全試験結果

3.4 静摩擦係数と待機時間の関係式

図 3.13 に示す各試験結果から、目的変数は静摩擦係数 μ_s 、説明変数を待機時間 t_w 、面圧 σ 、気温 T として重回帰分析を行う。重回帰モデルは、交互作用効果を見込んだ式(3.3)とした。

$$\hat{y} = a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4XY + a_5XZ + a_6YZ + a_7XYZ + a_0 \quad (3.3)$$

ここで、待機時間の影響については、前述のように対数関数に近似するため式(3.4)とし、面圧は後述するようにべき乗関数に近似するため式(3.5)、気温は、文献 3.11) の実験および図 3.19 に示す本実験結果の気温と静摩擦係数の関係から 2 次関数に近似すると考えられるため式(3.6)とすると、重回帰モデルは式(3.7)と置くことができる。

$$X = \mu_s(t_w) = b_1 \ln t_w + b_0 \quad (3.4)$$

$$Y = \mu_s(\sigma) = c_1 \sigma^{c_2} \quad (3.5)$$

$$Z = \mu_s(T) = d_1 T^2 + d_2 T + d_0 \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \hat{\mu}_s = & A_1 \ln t_w + A_2 \sigma^{c_2} + A_3 T^2 + A_4 T + A_5 \sigma^{c_2} \ln t_w + A_6 T^2 \ln t_w + A_7 T \ln t_w + A_8 \sigma^{c_2} T^2 + A_9 \sigma^{c_2} T \\ & + A_{10} \sigma^{c_2} T^2 \ln t_w + A_{11} \sigma^{c_2} T \ln t_w + A_0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

ここで、 $A_1 \sim A_0$ は $a_1 \sim d_0$ をまとめた定数項である。

面圧の影響をべき乗関数に近似としたのは、ひとつは文献 3.10) にてべき乗回帰されているように、動摩擦係数に関する多数の実験結果からべき乗回帰がよく特性を示していると評価されているためであり、もうひとつは、真実接触点を 2 つの弾性球体が荷重 W で接触しているものとしたとき、その真実接触面積 A は $W^{2/3}$ に比例する^{3.6)}ので、摩擦力 F も $W^{2/3}$ に比例し、すなわち F/W で表される摩擦係数は $W^{-1/3}$ に比例すると考えられるためである。ただし、指数部分 $-1/3$ の値については複数の仮定を前提としているため、実験の結果から導いた値を用いる。面圧と静摩擦係数の関係で表した図 3.20 に示すように、同時期(同日または翌日)に実施した 3 面圧 2 体ずつの試験結果をそれぞれべき乗回帰した式の指数部分である $-0.725 \sim -0.861$ の平均値 -0.80 を式(3.7)における c_2 と設定する。

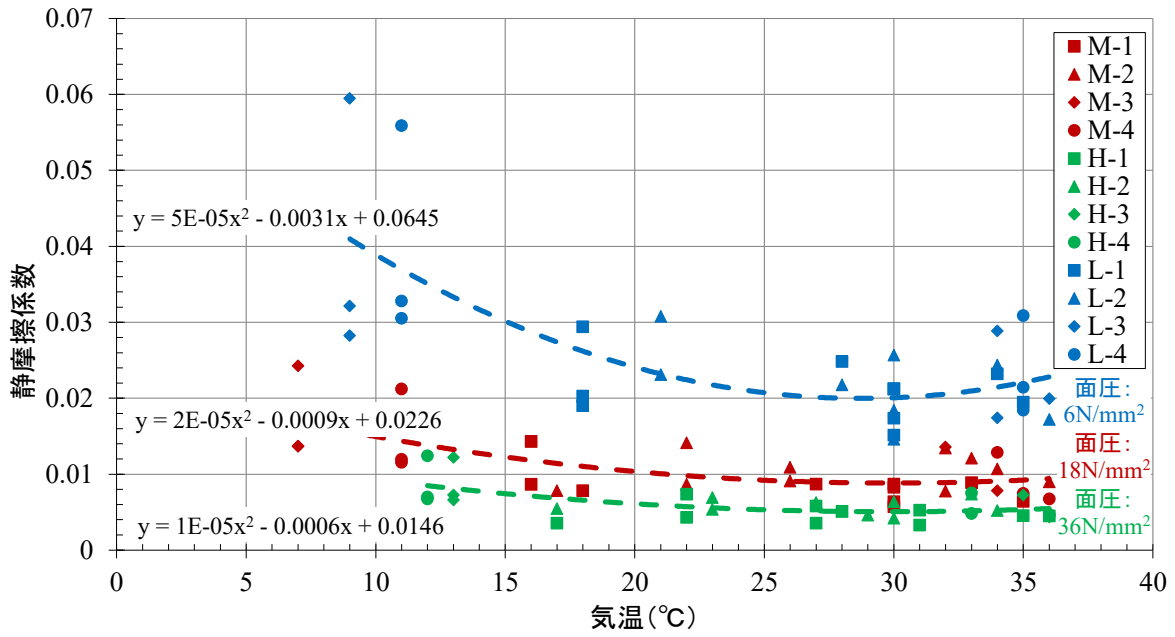


图 3.19 静摩擦系数—气温

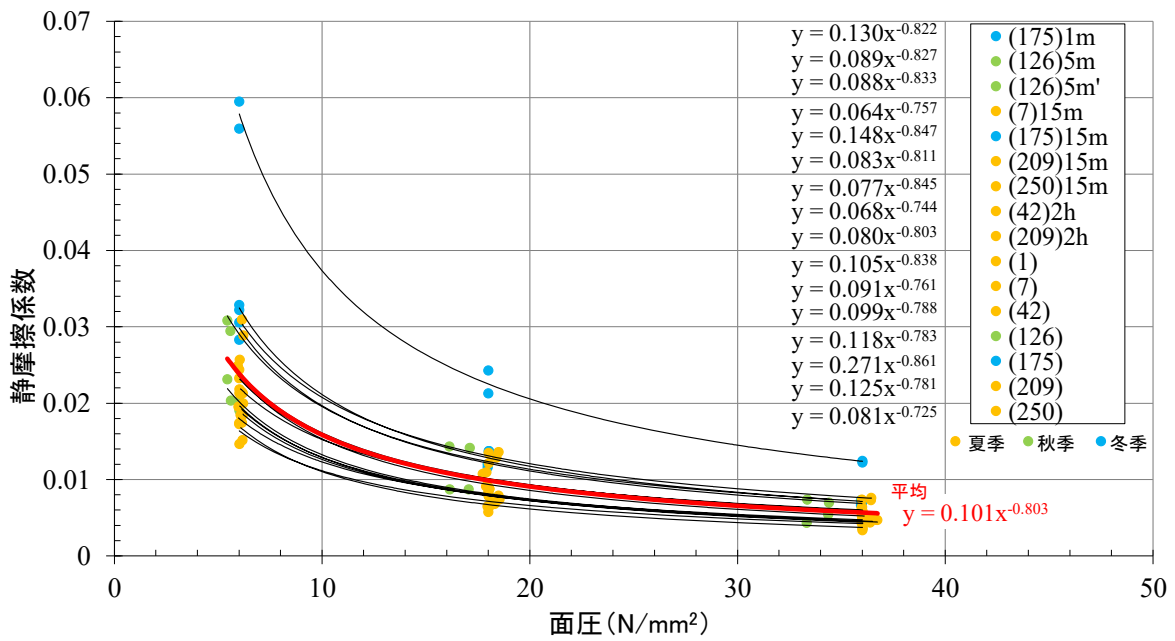


图 3.20 静摩擦系数—面压

式(3.7)に設定した c_2 を代入し重回帰分析を行うと、表 3.3 に示す結果となる。補正後決定係数 R^2 は 0.966、有意 F 値は 4.21×10^{-59} となり、回帰モデルは有意性があると判断される。しかし各説明変数の有意性については P-値が 0.05 を超えるものがあり、また、説明変数が多いのは分析上の問題を起こす可能性がある。少ない説明変数で合理的な回帰式とするために、種々の組合せでの重回帰分析を試行し、説明変数が少なく、かつ補正後決定係数が大きく、また各説明変数についても有意性がある判定となった $\sigma^{-0.80}$ 、 $\sigma^{-0.80} \ln t_w$ 、 $\sigma^{-0.80} T^2 \ln t_w$ および $\sigma^{-0.80} T \ln t_w$ の 4 変数を用いることとし、その重回帰分析の結果を表 3.4 に示す。全ての説明変数において P-値は 0.01 を下回り高度に有意となり、補正後決定係数 R^2 は 0.961、有意 F 値は 4.27×10^{-64} となった。得られた偏回帰係数を式(3.7)に代入すると式(3.8)となる。

$$\mu_s = 5.74 \times 10^{-2} \sigma^{-0.80} + 2.21 \times 10^{-2} \sigma^{-0.80} \ln t_w + 2.38 \times 10^{-5} \sigma^{-0.80} T^2 \ln t_w - 1.37 \times 10^{-3} \sigma^{-0.80} T \ln t_w + 1.58 \times 10^{-4} \quad (3.8)$$

これを待機時間の項 $\ln t_w$ でまとめると、待機時間の対数に比例し面圧のべき乗と気温の 2 次関数に依存する提案式(3.9)が得られる。

$$\mu_s = \sigma^{-0.80} \ln t_w (2.38 \times 10^{-5} T^2 - 1.37 \times 10^{-3} T + 2.21 \times 10^{-2}) + 5.74 \times 10^{-2} \sigma^{-0.80} + 1.58 \times 10^{-4} \quad (3.9)$$

なお、本提案式の適用範囲は面圧 6~36N/mm²、待機時間の適用下限は図 3.10 の下段に示すように動摩擦係数との差が小さくなることを実験で確認したため 15 分 (10³ 秒) 程度、気温 10~30°C 程度であるが、気温については 2 次関数であり適用範囲を外れると変化が大きくなるため、本提案式を使用する際は注意が必要である。また、気温の適用範囲を拡大するための検討は今後の課題である。

表 3.3 重回帰分析結果 (全変数)

	係数	標準誤差	t	P-値
切片	6.23E-03	7.04E-03	0.885	0.378
$\ln t_w$	-1.06E-03	6.47E-04	-1.636	0.106
$\sigma^{-0.80}$	4.19E-02	4.52E-02	0.925	0.358
T^2	1.42E-05	1.59E-05	0.895	0.373
T	-6.81E-04	7.16E-04	-0.951	0.344
$\sigma^{-0.80} \ln t_w$	2.67E-02	4.15E-03	6.426	7.53E-09
$T^2 \ln t_w$	-2.23E-06	1.46E-06	-1.535	0.129
$T \ln t_w$	1.09E-04	6.56E-05	1.656	0.101
$\sigma^{-0.80} T^2$	-1.03E-04	1.03E-04	-0.993	0.323
$\sigma^{-0.80} T$	3.57E-03	4.65E-03	0.768	0.445
$\sigma^{-0.80} T^2 \ln t_w$	3.87E-05	9.44E-06	4.105	9.32E-05
$\sigma^{-0.80} T \ln t_w$	-1.98E-03	4.25E-04	-4.662	1.16E-05

表 3.4 重回帰分析結果 (有意変数)

	係数	標準誤差	t	P-値
切片	1.58E-04	4.10E-04	0.39	0.701
$\sigma^{-0.80}$	5.74E-02	4.20E-03	13.67	8.70E-24
$\sigma^{-0.80} \ln t_w$	2.21E-02	9.55E-04	23.12	7.34E-40
$\sigma^{-0.80} T^2 \ln t_w$	2.38E-05	1.98E-06	12.05	1.49E-20
$\sigma^{-0.80} T \ln t_w$	-1.37E-03	9.04E-05	-15.13	1.42E-26

実験で測定された静摩擦係数と提案式(3.9)での計算値の対比を図 3.21 に示す。縦軸は実験で得られた静摩擦係数を示し、横軸は提案式での計算値を示す。図には±20%のラインを併せて示しており、提案式による計算値と実験値はよく対応していると考えられる。

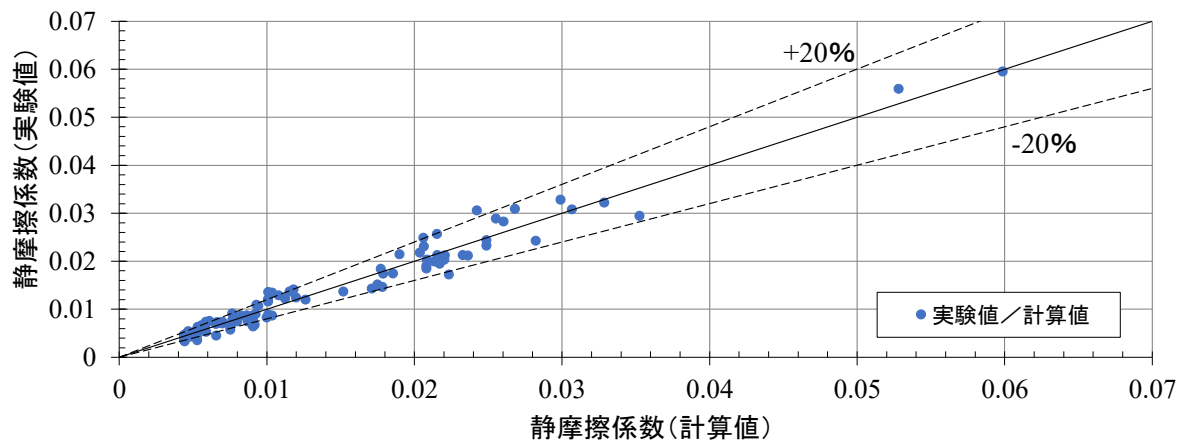


図 3.21 提案式による計算値と実験値の関係

仮に、既往研究の三山ら^{3,4)}による PL 試験体の実験時（冬季に実施）の気温を 10℃と仮定した場合と 5℃と仮定した場合の結果、および第 2 章の水平加力実験における表 2.4 に示した概算静摩擦係数の実験値/計算値を追記して図 3.22 に示す。三山らの実験時の気温は不明であるが、10℃と仮定すると高めの実験結果であり、5℃と仮定すると概ね提案式での計算結果とよく対応していると考えられる。また、気温による影響は大きいことが分かる。水平加力実験における静摩擦係数は、精確に算出した値ではないものの概ね対応していると考えられる。

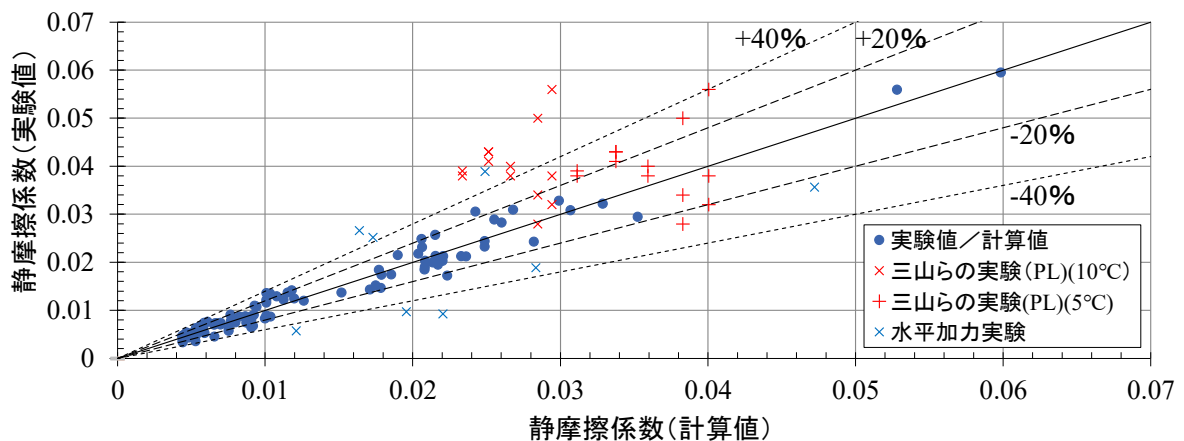


図 3.22 提案式による計算値と既往実験値の関係

3.5 まとめ

弾性すべり支承に使用されるすべり材（PTFE 材）とすべり板（PTFE コーティングステンレス板）を組合せた試験体を用いて実験を行った結果から，待機時間，面圧および気温を変数とした重回帰分析を行い，弾性すべり支承の静摩擦係数と待機時間の関係式を提案した．得られた知見を以下に示す．

- 1) 弾性すべり支承の静摩擦係数について，待機時間の対数に比例し，面圧のべき乗および気温の2次関数に依存する関係式(3.9)を提案した．提案式による計算値は実験値とよく対応することを示した．

参考文献

- 3.1) Hiroshi MATSUKAWA: Physics of Friction, Iwanami Syoten, 2012 (in Japanese)
松川宏：摩擦の物理，岩波書店，2012
- 3.2) Ichiro NAGASHIMA, Masayoshi HISANO, Hideki FUNAHARA: Slide bearing method Seismic isolation building confirmation experiment of aging characteristics, TAISEI Technical Research Institute Report Vol.30, pp.131-134, 1997 (in Japanese)
長島一郎，久野雅祥，船原英樹：すべり支承方式免震建物の経年変化特性の確認実験，大成建設技術研究所報，第30号，pp.131-134，1997
- 3.3) Hiroki HAMAGUCHI, Masahiko HIGASHINO, Shigeo MINEWAKI, Masashi YAMAMOTO, Takuya ISHII: Aged Deterioration in the Coefficient of Friction of Sliding Bearings, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures- II, pp.645-646, 2001 (in Japanese)
浜口弘樹，東野雅彦，嶺脇重雄，山本雅史，石井卓哉：すべり支承の摩擦係数の経年変化，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造II，pp.645-646，2001
- 3.4) Takafumi MIYAMA, Shinsuke INAI, Keiji MASUDA, Takashi KATO: A Study on the Aged Adhesion of the Sliding Bearing under the Axial Stress. Part2, The characteristic of Sliding Bearing of 3-years progress, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures- II, pp.1047-1048, 2007 (in Japanese)
三山剛史，稲井慎介，増田圭司，加藤貴司：面圧を加えた滑り免震支承における摩擦係数の経年変化に関する研究 その2 3年経過時のすべり支承特性について，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造II，pp.1047-1048，2007
- 3.5) Architectural Institute of Japan: Recommendation for the Design of Seismically Isolated Buildings, Maruzen Publishing, pp.302-304, 2013 (in Japanese)
日本建築学会：免震構造設計指針，丸善出版，pp.302-304，2013
- 3.6) F. P. Bowden and D. Tabor, Translation by Norimune SODA: The friction and lubrication of solids, Maruzen, 1961 (in Japanese)
バウデン・テイバー，曾田範宗訳：固体の摩擦と潤滑，丸善，1961
- 3.7) Ernest Rabinowicz: Friction and Wear of Materials, John Wiley and Sons, Inc., 1965
- 3.8) Tristan Baumberger, Christiane Caroli: Solid friction from stick-slip down to pinning and aging, Advances in Physics Vol.55, pp.279-348, 2006 (DOI: <https://doi.org/10.1080/00018730600732186>)
- 3.9) Japan Meteorological Agency: Search past weather data, Kyotanabe Observatory, Kyoto, (accessed 2021.12.11) (in Japanese)
気象庁：過去の気象データ検索，京都府京田辺観測所，気象庁 HP（参照 2021.12.11）
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 3.10) Bridgestone: Elastic Sliding Bearing (Low Elasticity Type) Performance Evaluation report, The Building Center of Japan, 2013 (in Japanese)
ブリヂストン：弾性すべり支承（低弾性タイプ）性能評価書，日本建築センター，2013
- 3.11) J.C.Burton, P.Taborek and J.E.Rutledge: Temperature dependence of friction under cryogenic conditions in vacuum, Tribology Letters, Vol.23, No.2, pp.131-137, 2006 (DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-006-9115-7>)

第4章

静摩擦係数の待機時間依存性を考慮した
解析モデルの構築と設計法の提案

第4章 静摩擦係数の待機時間依存性を考慮した解析モデルの構築と設計法の提案

4.1 はじめに

免震建物の設計では、弾性すべり支承の復元力特性として積層ゴム部分の弾性剛性およびその端面に取付けられたすべり材とすべり板との摩擦係数を用いたバイリニア型の特性が用いられる。このときの摩擦係数には材料試験による動摩擦係数が用いられ、製造のばらつき等による性能変動が考慮されるが、摩擦係数の経年変化については一般に考慮されておらず^{4.1)}、設計指針^{4.2)}でも不明な点が多いとされている。一方、摩擦係数には静摩擦係数と動摩擦係数があり、静摩擦係数は待機時間（2つの物体が接触または静止してから次に滑動するまでの時間）に依存して増大することがわかっており^{4.3)}、既往の研究^{4.4)}～^{4.6)}を概観すると近年主流となっている低摩擦タイプでは特に大きくなる傾向がみられる。

第3章では、待機時間による静摩擦係数の変化を定量的に把握するために、すべり材（PTFE材）とすべり板（PTFEコーティングステンレス板）を組合せた試験体を用いた実験から、待機時間、面圧および気温を変数とした重回帰分析を行い、静摩擦係数と待機時間の関係式を提案した。

本章では、免震建物の実施設計において静摩擦係数の待機時間による増大を考慮するための設計手法を提案する。まずは提案式を使用する際の考え方と復元力モデル例を示し、次に既往のプログラムでは静摩擦係数を考慮した解析ができないため、摩擦モデルを有するプログラムを開発したので、その解析モデルと試解析結果を概説する。さらに、モデル建物での試設計として、バイリニア型の動摩擦モデルでの応答と、提案式により待機時間による静摩擦係数の増大を考慮した静摩擦モデルでの応答を、実建物の設計モデルにて開発プログラムを用いて解析し、結果の比較により提案した設計手法を用いた場合の応答への影響を示す。

4.2 設計法の提案

免震建物の実施設計で時刻歴応答解析を行うには、免震部材の復元力特性が必要となる。通常、弾性すべり支承の復元力特性は、図 4.1(a)に示すような完全弾塑性のバイリニアモデル（以下、動摩擦モデル）が設定されるが、本章では同図(b)に示すような静摩擦力の待機時間（地震により最初に静摩擦荷重に達し摩擦面が滑動するまでの時間）による増大を考慮した静摩擦モデルでの応答解析を提案する。静摩擦係数は、第3章にて提案した式(4.1)にて設定する。

$$\mu_s = \sigma^{-0.80} \ln t_w (2.38 \times 10^{-5} T^2 - 1.37 \times 10^{-3} T + 2.21 \times 10^{-2}) + 5.74 \times 10^{-2} \sigma^{-0.80} + 1.58 \times 10^{-4} \quad (4.1)$$

ここで、 μ_s は静摩擦係数を示し、 σ は設計面圧(N/mm²)、 t_w は待機時間(s)、 T は気温(°C)を示す。式(4.1)の適用範囲は面圧6~36(N/mm²)、待機時間の適用下限10³(s)、気温10~30(°C)である。

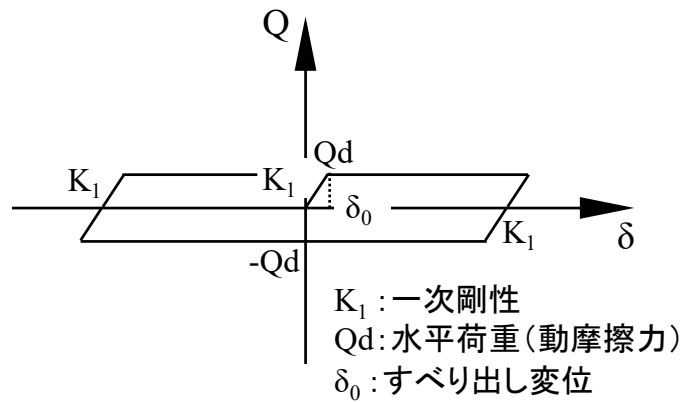
一般に、免震建物の設計では免震部材の耐久性を60年と設定されていることが多い。凝着による静摩擦係数の増大は地震や台風などで弾性すべり支承が滑動した場合には待機時間がリセットされるが、その時間軸が対数であり、数年程度と60年での静摩擦係数の差は設計上過大ではないと考えられるため、待機時間は60年(1.89×10⁹sec)にて設計するのが妥当であると考えられる。なお、すべり出し以降の地震による振動中は、静摩擦と動摩擦が繰り返されるが、その時間間隔は極めて短いため、振動中は動摩擦のみを考慮したモデルとする。また、気温については、第3章にて示したように常温範囲では低温であるほど静摩擦係数は増大するため、安全側の設定として適用範囲の下限値である10°Cとして設計すると、式(4.1)は式(4.2)のようにまとめられる。

$$\mu_s = 0.288 \sigma^{-0.80} \quad (4.2)$$

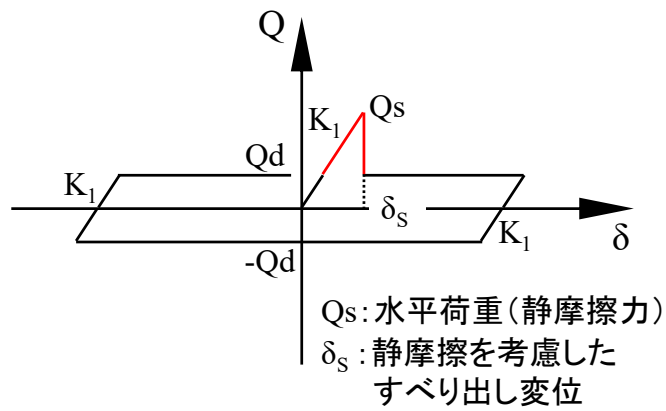
ここで、 μ_s は静摩擦係数を示し、 σ は設計面圧(N/mm²)を示す。なお、式(4.1)での切片項は計算結果への影響が小さいため省略している。

静摩擦係数が大きく算定されるのを安全側の設定としたのは、静摩擦係数が増加すると後述するように応答層せん断力が増加する場合があるだけでなく、応答変位も変位振幅の偏りにより増加する場合があるため、動摩擦係数での解析と増加した静摩擦係数での解析の両方を行うことで、応答せん断力にも応答変位に対しても安全側に設計できると考えられるためである。したがって、上記により得られた静摩擦係数を実施設計に反映する手法としては、免震部材の性能変動として通常設定される Normal, Hard, Soft の3特性での地震応答解析に加え、静摩擦係数の増大を考慮した3特性の復元力モデルを設定し計6特性での応答解析を行う。静摩擦係数のばらつきには、動摩擦係数と同じ±40%を見込む。動摩擦係数の性能変動には環境温度による影響は考慮されないが、これは式(4.1)の考えとも一致する。動摩擦係数には経年による変化はなく、静摩擦係数は地震により最初に静摩擦荷重に達し摩擦面が滑動するときのみ考慮する。このように設定した復元力特性にて建物の地震応答解析を行うことが望ましいと考える。

また、免震部材の接合部設計においては、静摩擦モデルの特性 Hard における応答値が最も負担水平力が大きくなるため、このときの応答せん断力を用いて取付ボルト等の接合部設計を行うことが望ましいと考える。



(a) 従来の復元力モデル
(動摩擦モデル)



(b) 提案する復元力モデル
(静摩擦モデル)

図 4.1 設計復元力モデル

4.3 解析プログラムの開発

既往の時刻歴応答解析プログラムでは、静摩擦荷重の立上りを解析に反映できなかった。その理由は、静摩擦力を超えた後に動摩擦力として解析するために復元力を低下させると、解析が不安定となってしまいそのような設定ができなかったためである。そのため、摩擦機構を組み込んだ新たな解析モデルを構築し解析プログラムに組み込んだ。

4.3.1 弾性すべり支承の解析モデル

静摩擦荷重の立上りを解析に反映するための解析モデルを構築する。すなわち、待機時間依存性による静摩擦係数の上昇は、地震により最初に静摩擦荷重に達し摩擦面が滑動するときのみ考慮する。以降の地震による振動中は、静摩擦と動摩擦が繰り返されるが、静摩擦が生じる時間間隔は極めて短いため、振動状態では設計摩擦係数（動摩擦係数）のみを評価するような簡便モデルを構築する。

通常、図 4.1(a)に示した従来の復元力モデルは、解析モデルとしてはひとつのバイリニア特性ばねとして設定される。しかし、図 4.1(b)に示した復元力モデルは、一次剛性の弾性ばね部分は一定であるが、静摩擦力から動摩擦力への移行を考慮すると摩擦部分の解析モデルは分離する必要がある。したがって、解析モデルはそれぞれを分離した図 4.2 に示す3要素モデルとする。 K_b 、 FR_1 、 FR_2 はそれぞれ弾性すべり支承における積層ゴム部のバネ機構、設計摩擦係数による動摩擦機構、待機時間依存性を考慮した上昇分による静摩擦機構を表す。

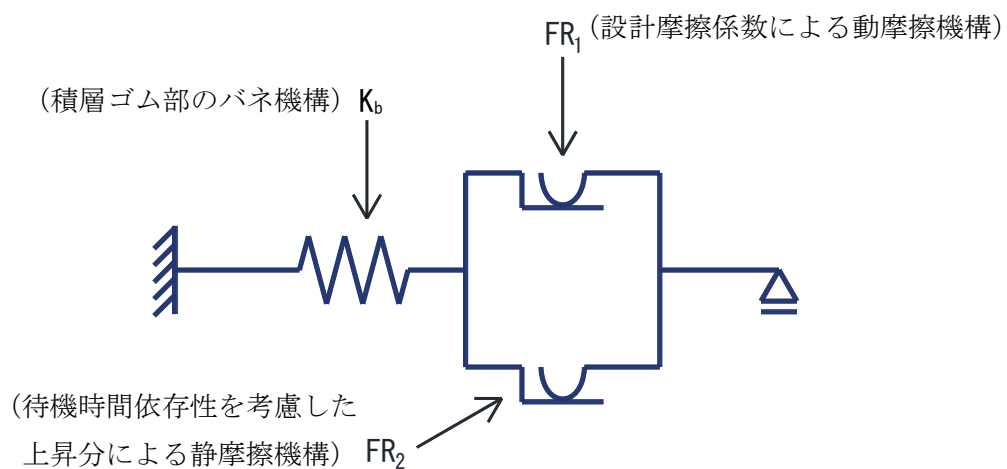


図 4.2 弾性すべり支承の解析モデル

しかし、FR₁およびFR₂のすべり部分が滑動していないときのモデルを完全剛体とすると、解析結果に不要な高振動モード（実際には起こらない高振動数の加速度波形）が現れ解析上の問題があるため、FR₁およびFR₂の数学モデルはダッシュポットモデルとする^{4.7)}。すなわち、図4.3に示すようにK_bは線形ばねモデル、FR₁は速度依存型のバイリニア特性のダッシュポットモデルとして振動中は設計摩擦係数により摩擦挙動（静止と滑動）を繰り返す、FR₂はリニア特性のダッシュポットモデルとして最初に静摩擦荷重に達した時点で消滅させる。このときのFR₁およびFR₂の減衰係数を十分に大きくすることで、不要な高振動モードを抑制することができる。図4.3の解析モデルにて一定振動数の正弦波入力を設定した場合の履歴曲線を描くと図4.4に示すような復元力モデルとなり、K_b、FR₁、FR₂を合成することで図4.1(b)に近似した復元力モデルが得られる。

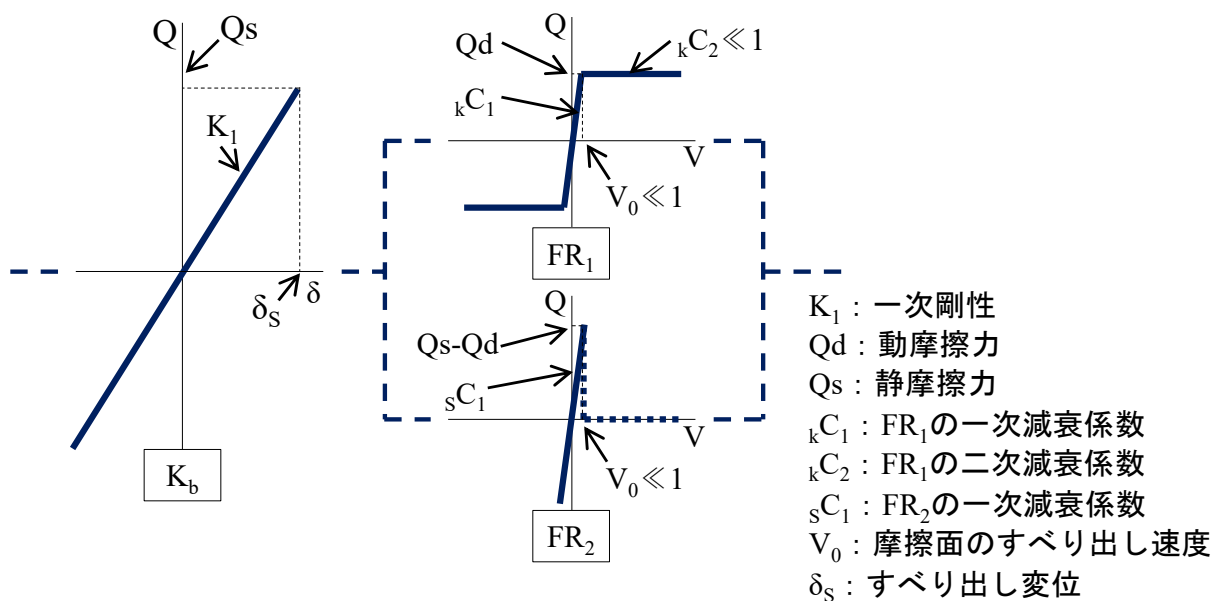


図 4.3 弾性すべり支承の解析モデル（特性表示）

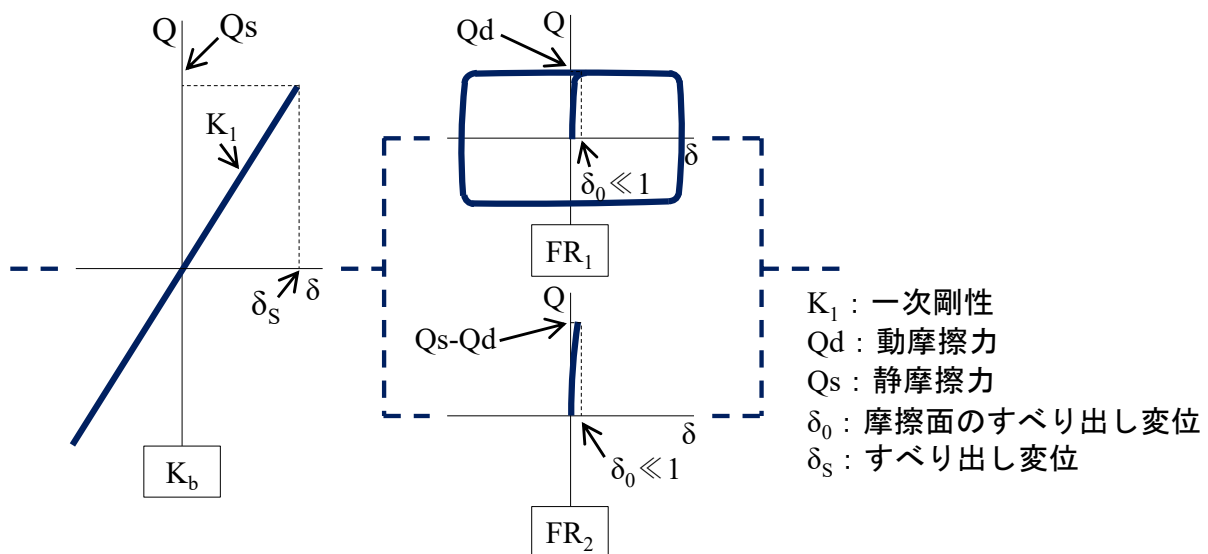


図 4.4 弾性すべり支承の復元力モデル（合成前）

4.3.2 試解析結果

解析モデルに対し、バネ定数 $K_b=10\text{kN/cm}$ 、FR₁の摩擦係数 $\mu_1=0.01$ 、FR₂の摩擦係数 $\mu_2=0.05$ 、支持荷重 $W=100\text{kN}$ とし、変位振幅 $U=\pm 5\text{cm}$ を与え静的に試解析を行った。摩擦面のすべり出し速度は $V_0=0.05\text{cm/s}$ 、二次減衰係数は $C_2=C_1\times 10^{-5}\text{Ns/m}$ とした。図 4.5 に摩擦係数－変形関係を、図 4.6 に変位および速度の変化をバネ部と摩擦機構部の負担分とともに示す。図 4.5 の摩擦係数－変形関係より、待機時間による摩擦係数の上昇分が最初に静摩擦荷重に達するときに反映されて、それ以降は消滅できている。図 4.6(a)に示す変位の推移では最初の静摩擦荷重に達するまでは K_b 部が全体変位を占めるが、それ以降の K_b 部の変位は $\pm 0.1\text{cm}$ 以内であり、残りを FR 部が負担している。また図 4.6(b)に示す速度の推移では、FR 部が静止している間は K_b 部の速度が全体速度に一致し、FR 部が滑動している間は FR 部の速度が全体速度に一致している。 K_b 部または FR 部のいずれか一方のみが変形する挙動が再現できている。

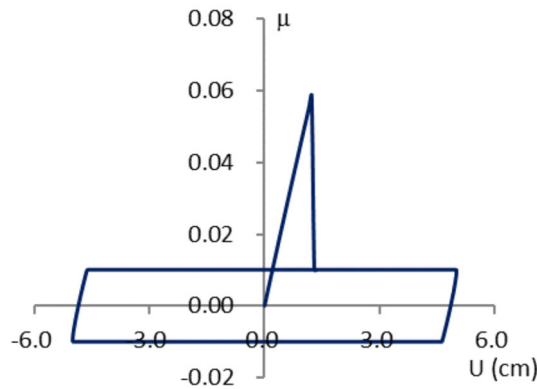


図 4.5 摩擦係数－変形関係

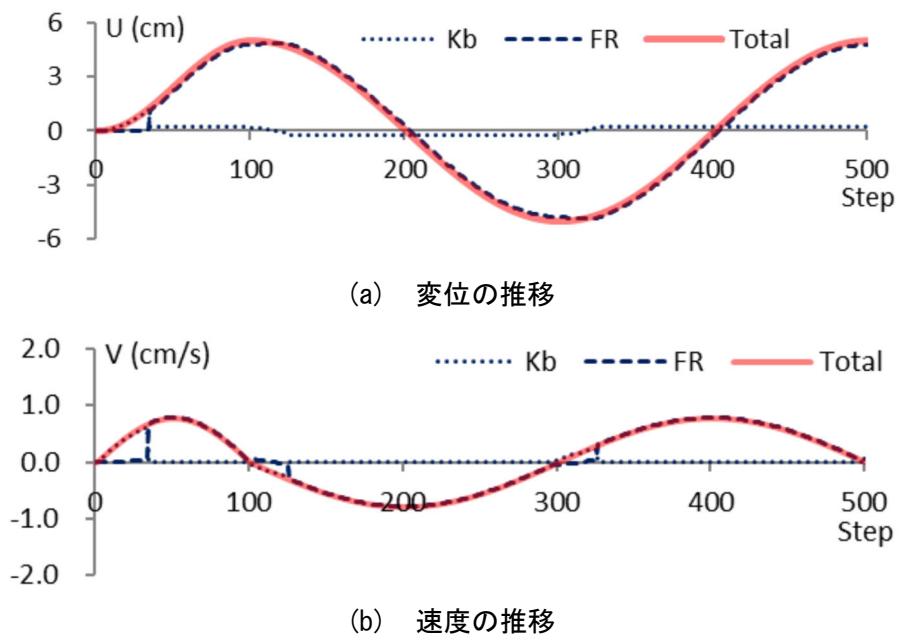


図 4.6 変位と速度の推移 ($\Delta t=0.1\text{s/Step}$)

4.4 モデル建物での試設計

4.2 節にて示した設計法を用いてモデル建物にて試設計を行う。バイリニア型の動摩擦モデルでの応答と、提案式により待機時間による静摩擦係数の増大を考慮した静摩擦モデルでの応答を、開発プログラムを用いて時刻歴応答解析により求める。

4.4.1 解析モデルの設定

試設計に用いるモデル建物は、第2章にて概要を示した建物とする。本建物の解析モデルは、図4.7に示す動摩擦解析モデルと図4.8(a)および(b)に示す静摩擦解析モデルとする。図4.7の動摩擦解析モデルは、弾性すべり支承の動摩擦モデルを組み込んだ建物の解析モデルであり、免震層は免震部材の種類毎にモデル化し、弾性すべり支承は11基分をまとめた動摩擦モデルとしている。図4.8(a)に示す静摩擦解析モデルでは、11基分の弾性すべり支承の静摩擦モデルを個別に設定している。これは、各支承が同じ静摩擦係数であっても支承毎に支持荷重が異なればすべり出し荷重が異なるためであり、同図(b)は比較のために弾性すべり支承を11基分まとめた静摩擦モデルとしており、免震層は免震部材の種類毎にモデル化している。

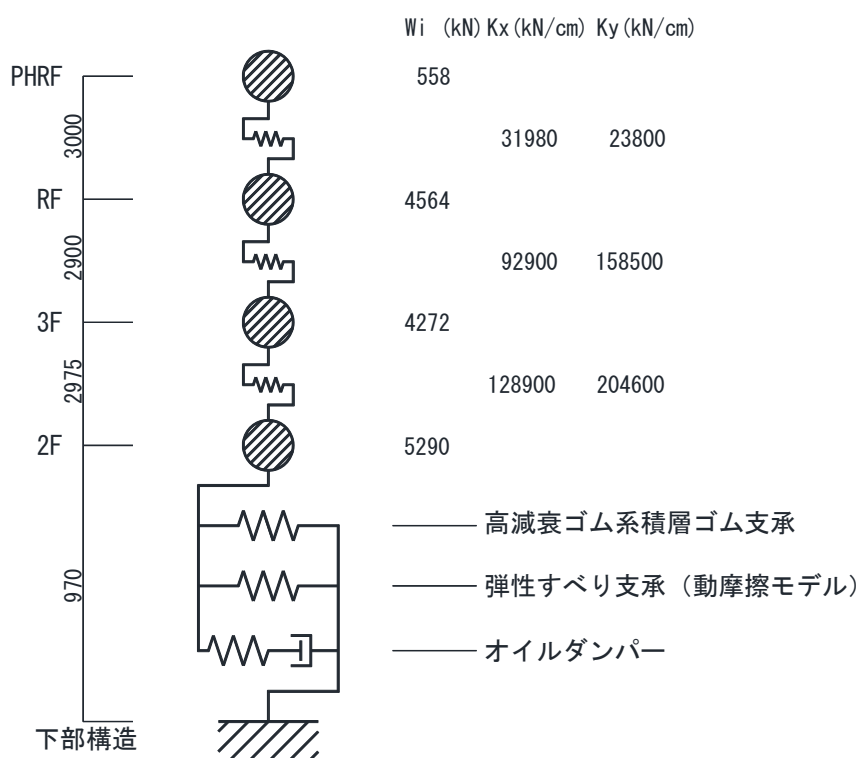
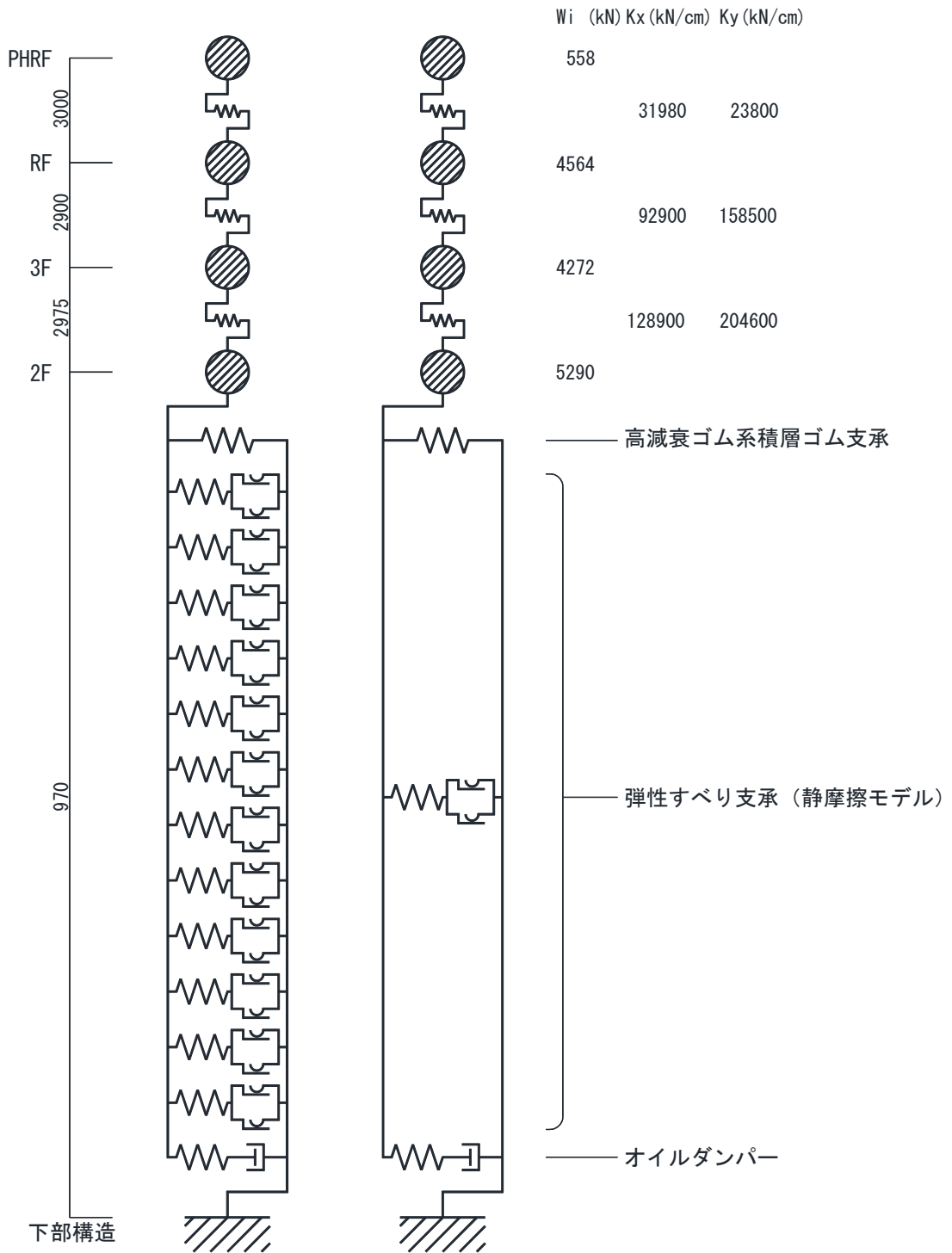


図 4.7 建物の解析モデル (動摩擦解析モデル)

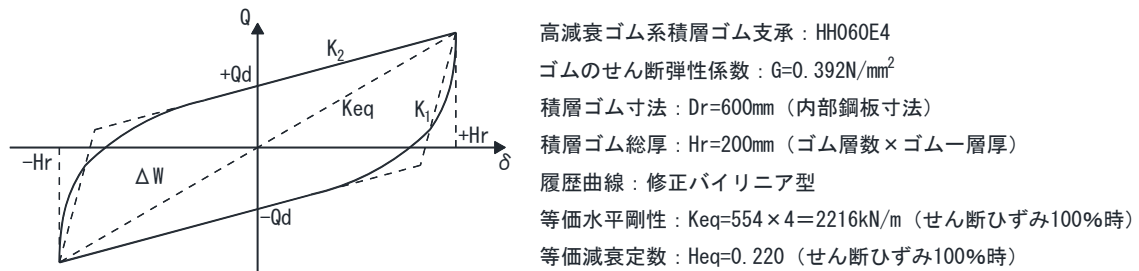


(a) 静摩擦モデル

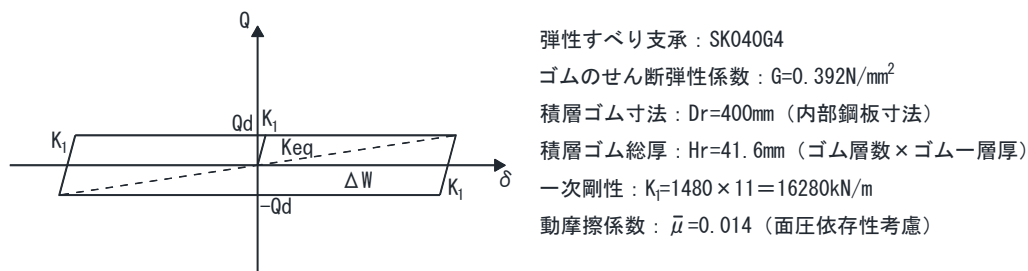
(b) 静摩擦モデルまとめ

図 4.8 建物の解析モデル（静摩擦解析モデル）

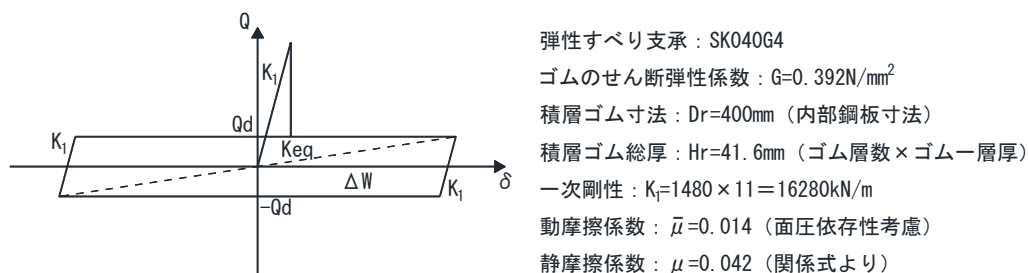
免震部材の復元力特性を図 4.9 に示す。同図(a)は高減衰ゴム系積層ゴム支承の復元力特性を示し、(b-1)および(b-2)は弾性すべり支承の復元力特性、(c)はオイルダンパーの復元力特性を示す。(b-1)動摩擦モデル、(b-2)静摩擦モデルともに摩擦係数は 11 基の平均値を記載しており、提案式により算出した各支承の静摩擦係数、文献 4.1) により算出した各支承の動摩擦係数および摩擦係数の増分も併せて表 4.1 に示す。表中の数値は特性 Normal での数値であり、特性 Hard および特性 Soft では静摩擦係数および動摩擦係数に製造ばらつきとして±40%を見込む。



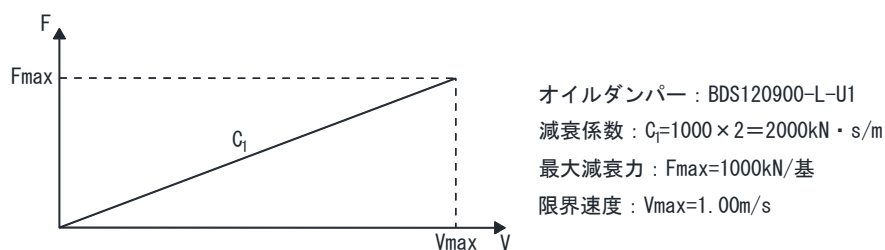
(a) 高減衰ゴム系積層ゴム支承



(b-1) 弾性すべり支承（動摩擦モデル）



(b-2) 弾性すべり支承（静摩擦モデル）



(c) オイルダンパー

図 4.9 免震部材の復元力特性

表 4.1 静摩擦係数と動摩擦係数

配置	待機時間 (s)	気温 (°C)	面圧 (N/mm ²)	静摩擦 係数	動摩擦 係数	増分 摩擦係数
X2Y1	1.89×10 ⁹	10	9.12	0.0492	0.0156	0.0336
X3Y2	1.89×10 ⁹	10	12.84	0.0375	0.0131	0.0244
X2Y2	1.89×10 ⁹	10	15.93	0.0316	0.0117	0.0199
X1Y2	1.89×10 ⁹	10	10.63	0.0436	0.0144	0.0292
X3Y3	1.89×10 ⁹	10	7.76	0.0560	0.0169	0.0391
X2Y3	1.89×10 ⁹	10	14.62	0.0338	0.0123	0.0215
X1Y3	1.89×10 ⁹	10	9.92	0.0460	0.0149	0.0311
X3Y4	1.89×10 ⁹	10	7.61	0.0569	0.0171	0.0398
X2Y4	1.89×10 ⁹	10	12.79	0.0376	0.0131	0.0245
X1Y4	1.89×10 ⁹	10	10.55	0.0438	0.0145	0.0293
X2Y5	1.89×10 ⁹	10	9.12	0.0492	0.0156	0.0336
11 基分 まとめ	1.89×10 ⁹	10	10.99	0.0424	0.0142	0.0282

4.4.2 入力地震動

入力地震動は、レベル1およびレベル2として建設地での解放工学的基盤（設計 GL-83.57m, $V_s=480\text{m/s}$ ）における加速度応答スペクトルにより作成した地震動（以下、告示波）3波、最大速度を 25cm/s , 50cm/s に基準化した観測波3波とレベル2では南海トラフ地震波^{4.8)}を使用した。設計用入力地震動の一覧を表4.2に、各地震動波形を図4.10～図4.22に、各レベルの三軸（加速度、速度、変位）応答スペクトルを図4.23および図4.24にそれぞれ示す。

表 4.2 入力地震動一覧（基礎位置）

レベル	地震動	最大加速度 (mm/sec^2)	最大速度 (mm/sec)	継続時間 (sec)
稀に 発生する地震動 (レベル1)	告示波1 (位相：JMA Kobe 1995 NS)	680	140	120.0
	告示波2 (位相：Hachinohe)	700	91	120.0
	告示波3 (位相：一様乱数)	756	110	120.0
	EL Centro 1940 NS	2550	250	54.0
	Hachinohe 1968 NS	1670	250	51.0
	Taft 1952 EW	2490	250	54.0
極めて稀に 発生する地震動 (レベル2)	告示波1 (位相：JMA Kobe 1995 NS)	3402	930	120.0
	告示波2 (位相：Hachinohe)	3500	562	120.0
	告示波3 (位相：一様乱数)	3778	749	120.0
	サイト波 (位相：南海トラフ NS)	3030	521	328.7
	EL Centro 1940 NS	5160	500	54.0
	Hachinohe 1968 NS	3490	500	51.0
	Taft 1952 EW	4970	500	54.0

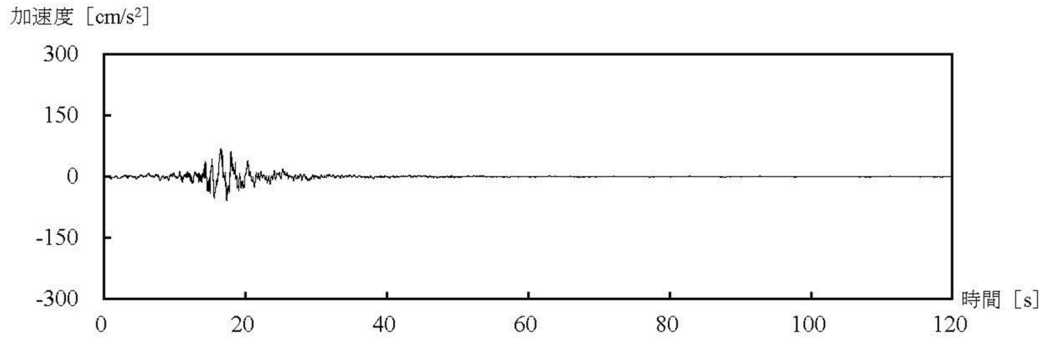


図 4.10 告示波 1 (稀に発生する地震動) 時刻歴波形

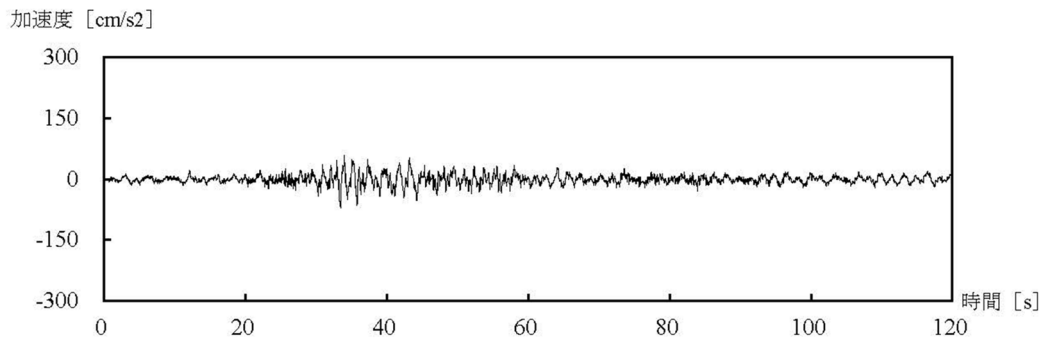


図 4.11 告示波 2 (稀に発生する地震動) 時刻歴波形

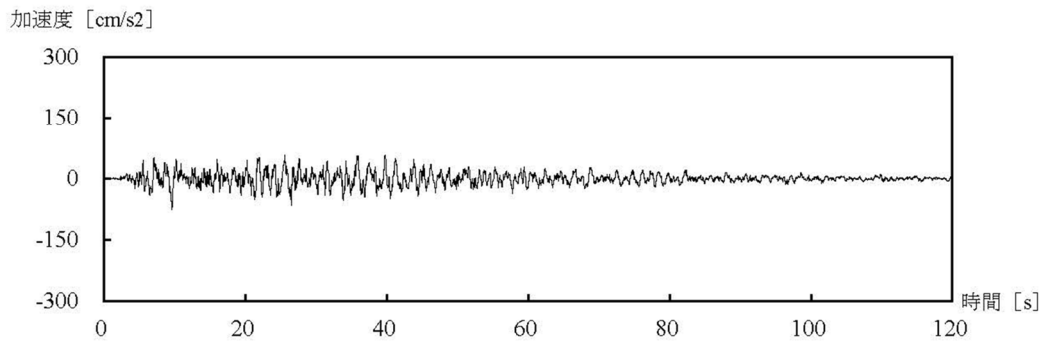


図 4.12 告示波 3 (稀に発生する地震動) 時刻歴波形

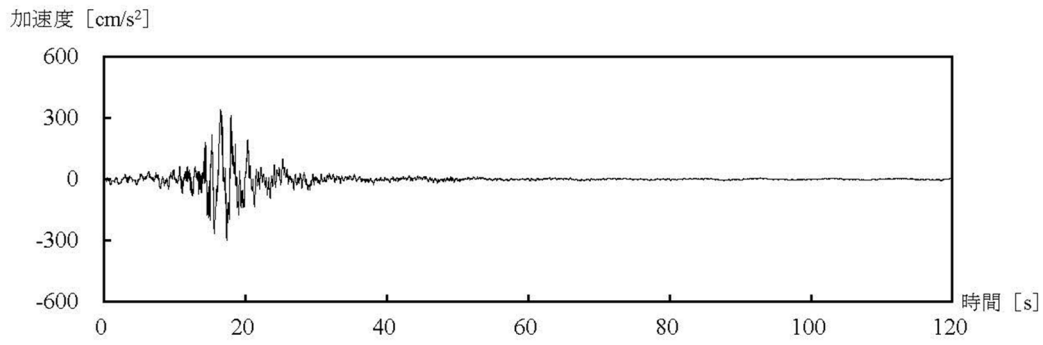


図 4.13 告示波 1 (極めて稀に発生する地震動) 時刻歴波形

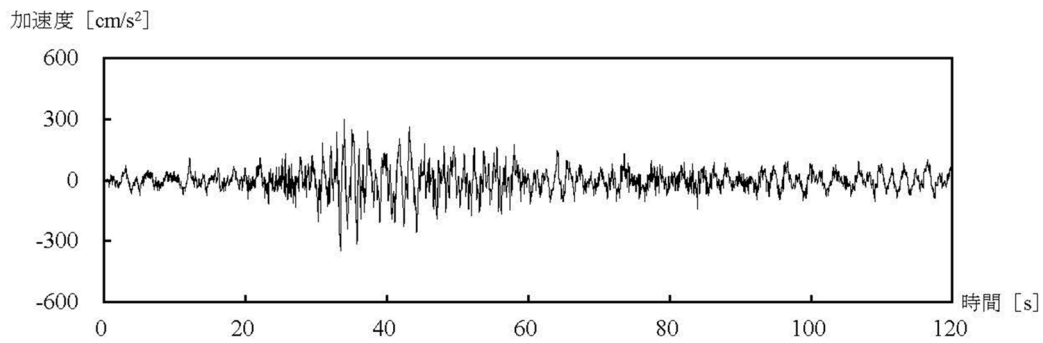


図 4.14 告示波 2 (極めて稀に発生する地震動) 時刻歴波形

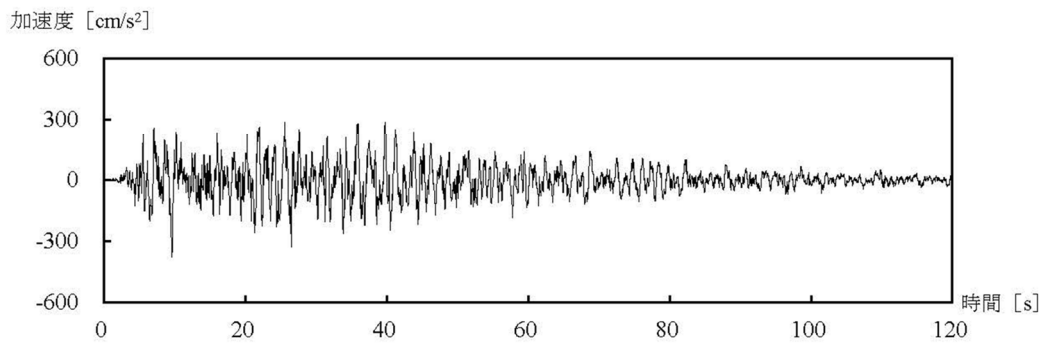


図 4.15 告示波 3 (極めて稀に発生する地震動) 時刻歴波形

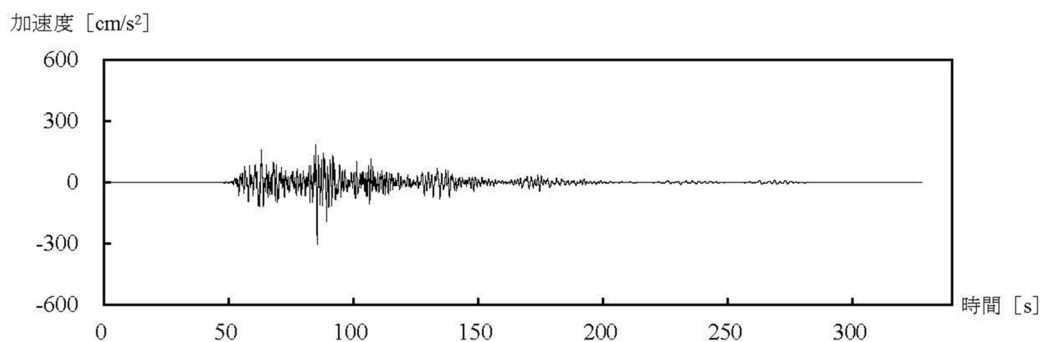


図 4.16 サイト波 (極めて稀に発生する地震動) 時刻歴波形

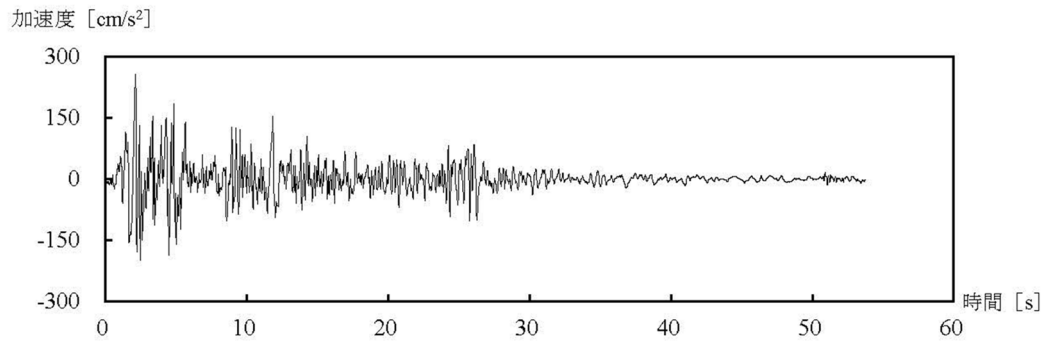


図 4.17 観測波 (EL Centro 1940 NS 稀に発生する地震動) 時刻歴波形

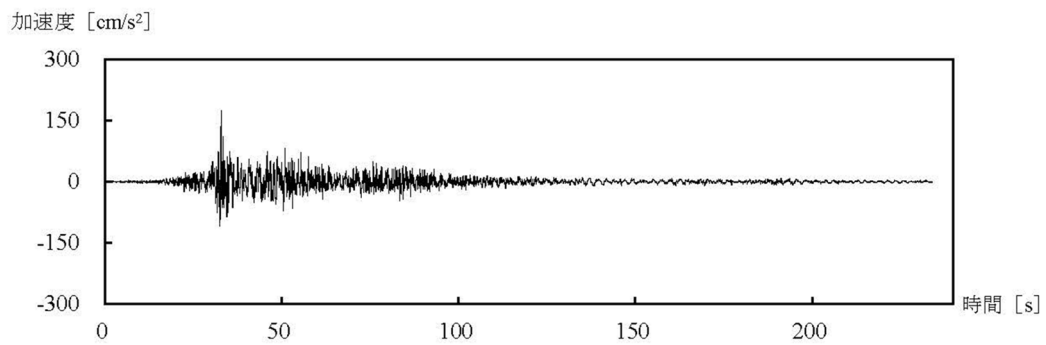


図 4.18 観測波 (Hachinohe 1968 NS 稀に発生する地震動) 時刻歴波形

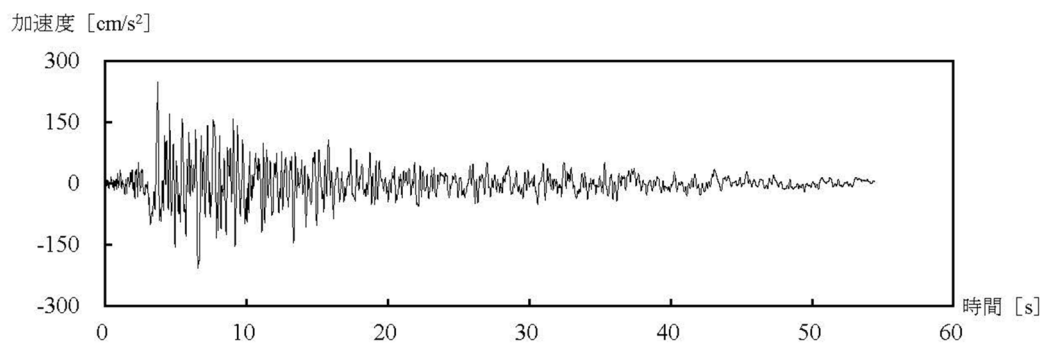


図 4.19 観測波 (Taft 1952 EW 稀に発生する地震動) 時刻歴波形

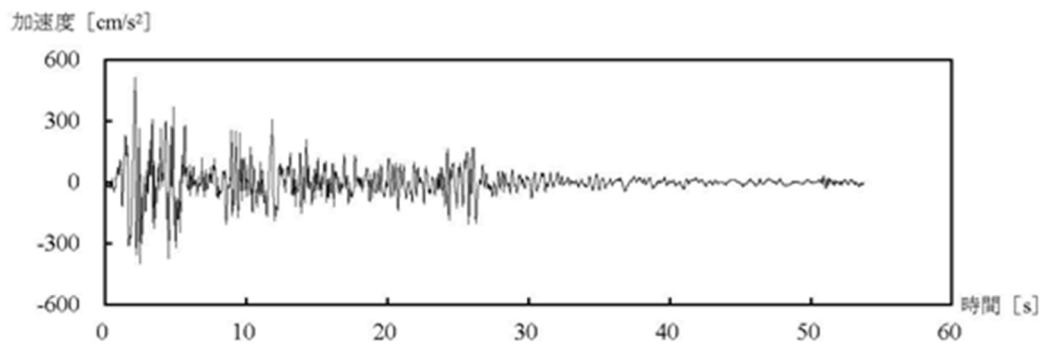


図 4.20 観測波 (EL Centro 1940 NS 極めて稀に発生する地震動) 時刻歴波形

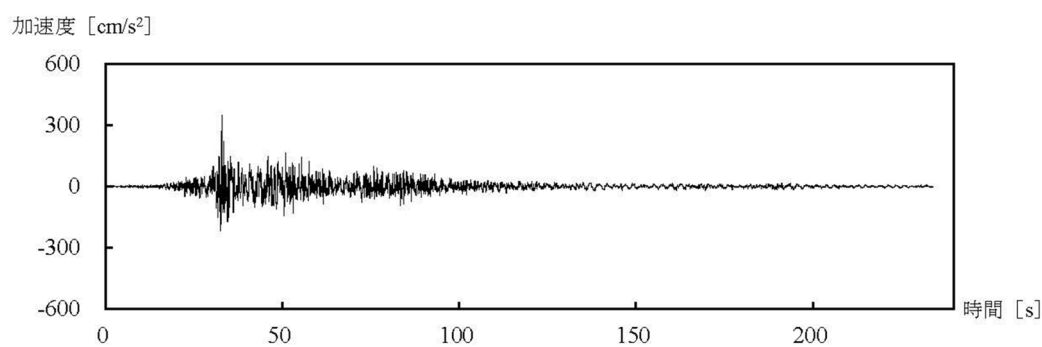


図 4.21 観測波 (Hachinohe 1968 NS 極めて稀に発生する地震動) 時刻歴波形

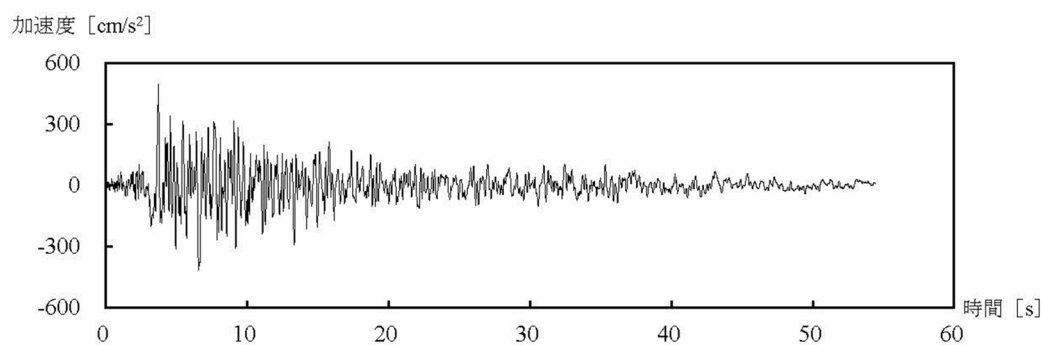


図 4.22 観測波 (Taft 1952 EW 極めて稀に発生する地震動) 時刻歴波形

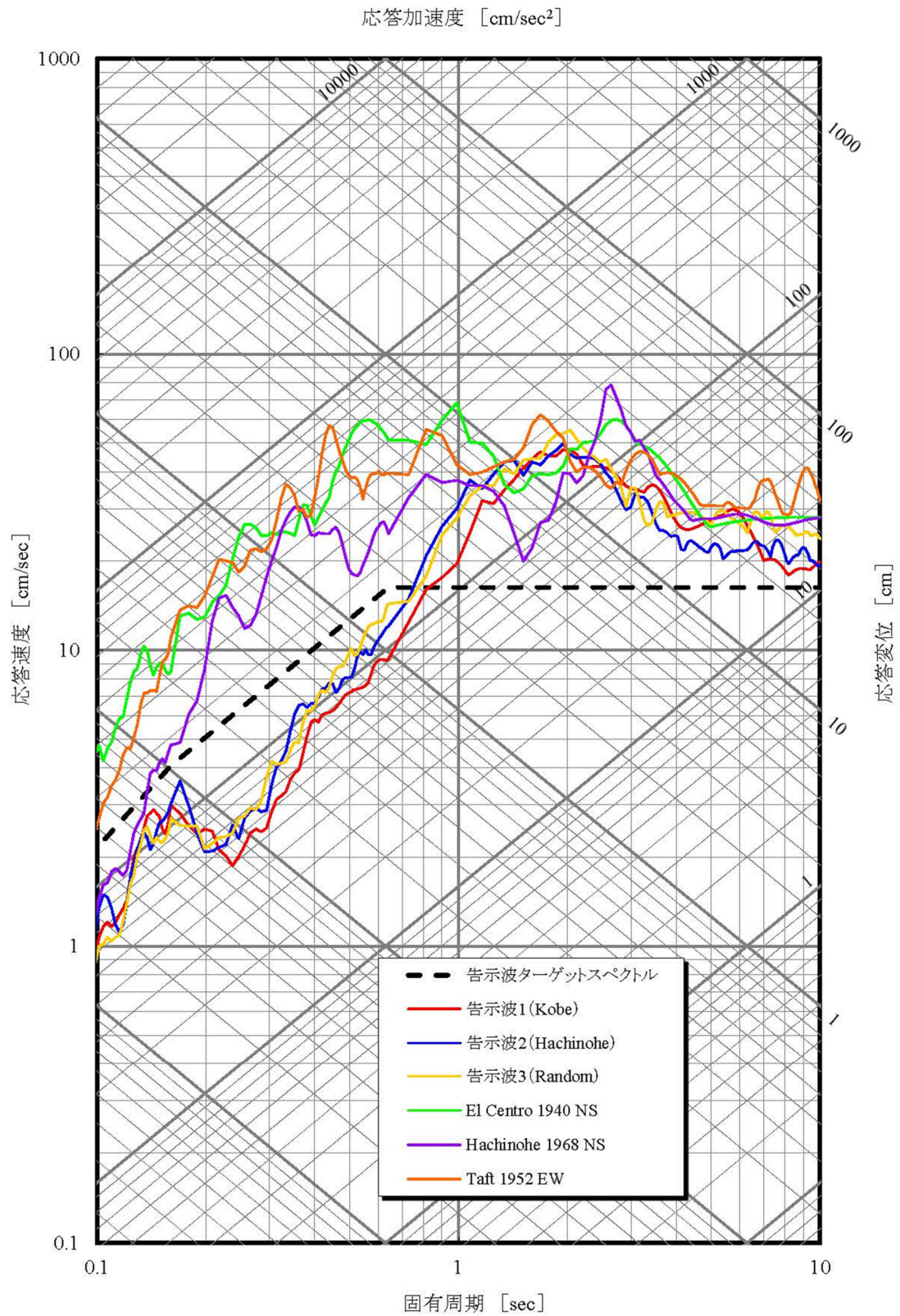


図 4.23 稀に発生する地震動の三軸応答スペクトル (h=5%)

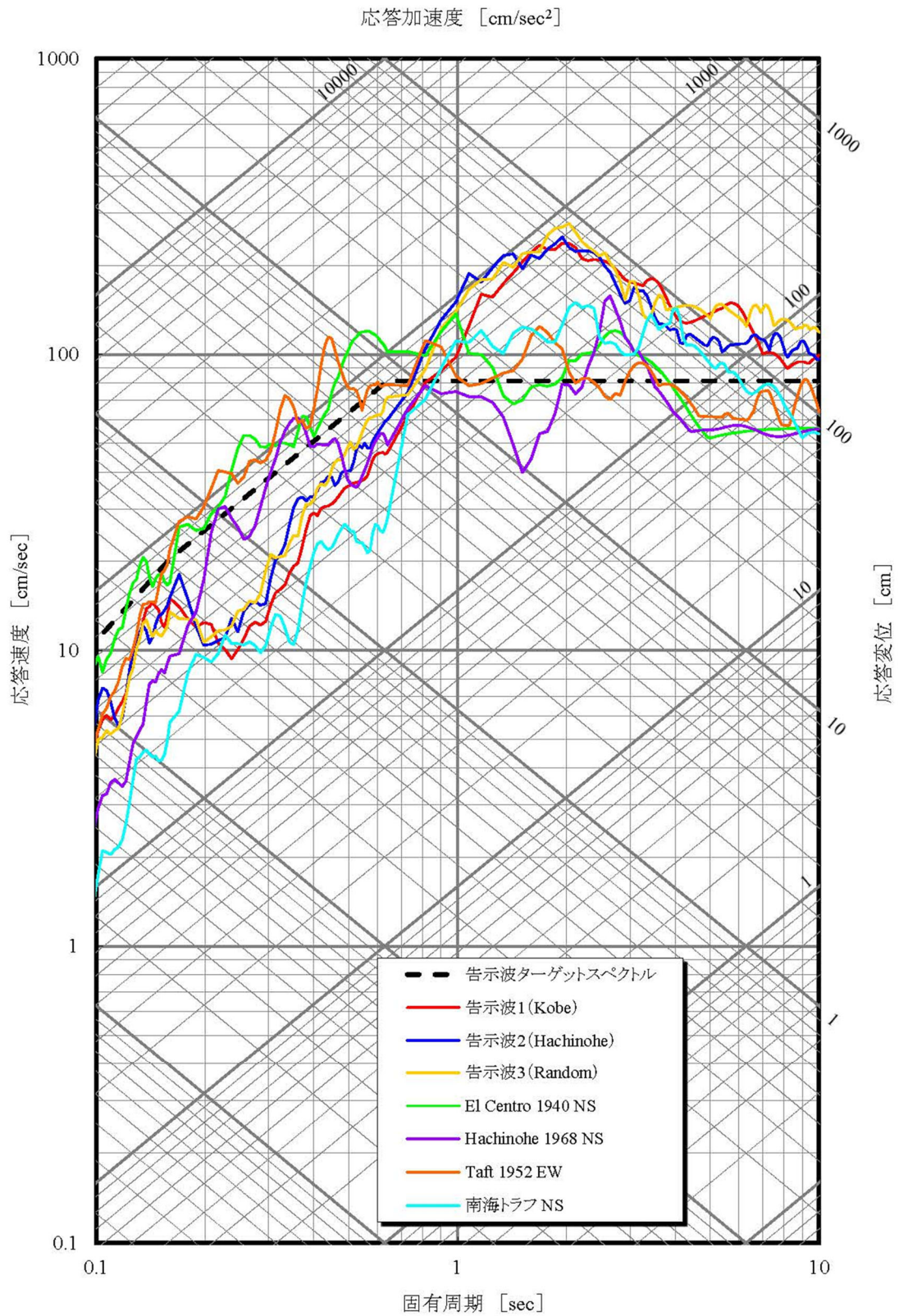


図 4.24 極めて稀に発生する地震動の三軸応答スペクトル (h=5%)

4.4.3 時刻歴応答解析結果

図4.25および図4.26に層せん断力係数と変位の最大値の解析結果を示す。以下に動摩擦モデルを基準として静摩擦モデルでの応答の変化を解説する。全体的には、本建物の場合は告示波1で最大応答値となり、設計値である最大層せん断力係数および最大変位は動摩擦モデルでの最大値とほぼ同じであった。しかし、図4.25に示すように、レベル1では静摩擦モデルでの最大応答値が動摩擦モデルとほぼ変わらないケースもあるが、EL-CENTROとHACHINOHEでは層せん断力および変位が増大した(+19%~+60%)。図4.26のレベル2では、同様に最大応答値がほぼ変わらないケースもあるが、EL-CENTROとTAFTでは変位が増大した(+11%~+16%)。変位の最大応答値が増大した理由としては、弾性すべり支承が滑動した時点で免震層としての剛性が低下し、変位振幅が最大応答値側に偏ったためであると考えられる。なお、弾性すべり支承は全てのケースで滑動しており、上階での応答は3階建ての耐震壁付鉄筋コンクリート造のモデル建物であるためほぼ同様である。

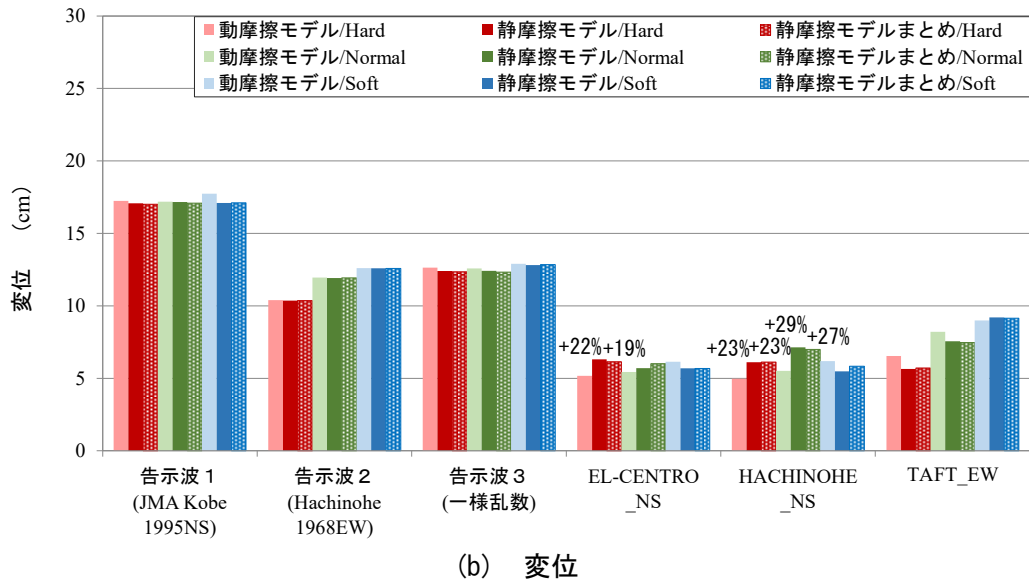
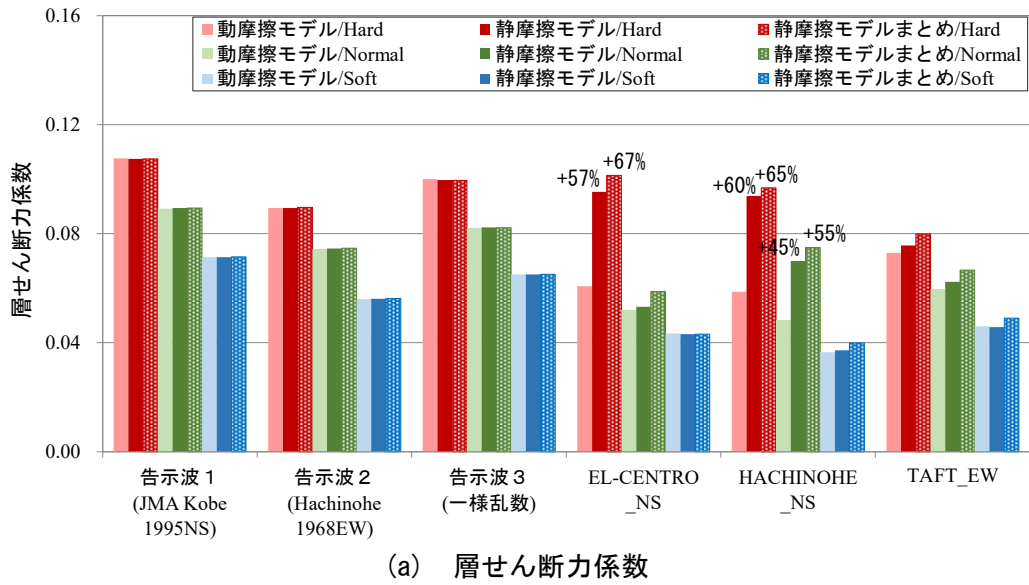
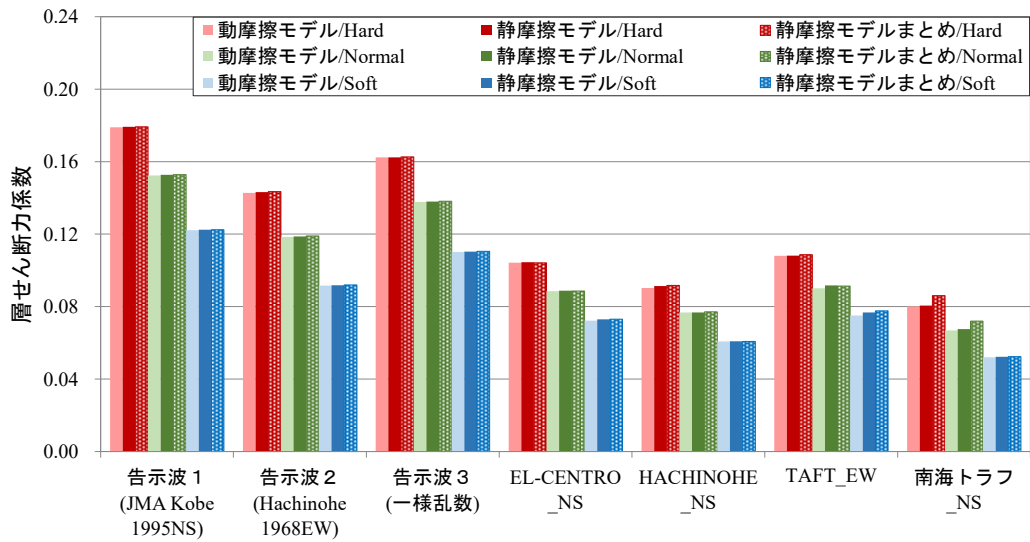
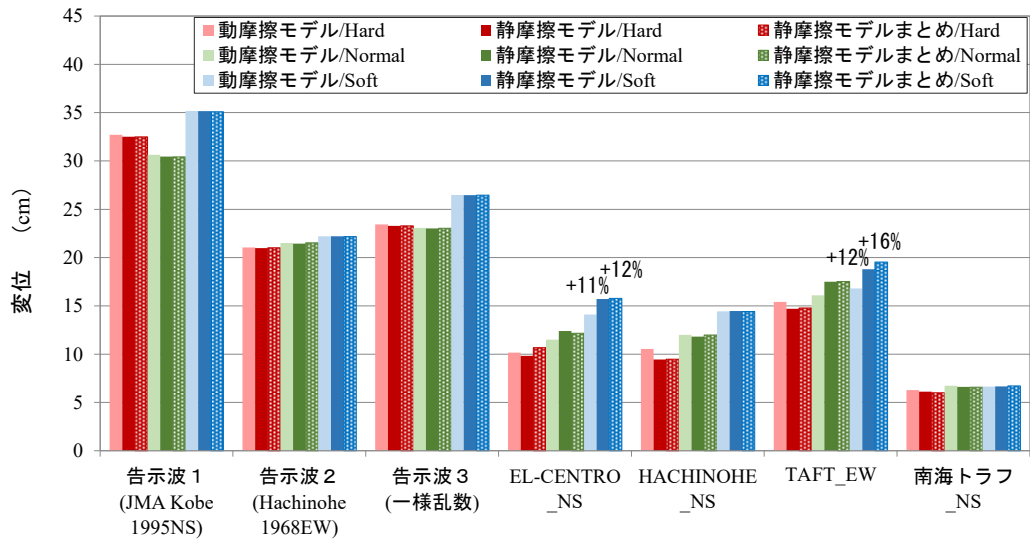


図 4.25 最大応答値の比較 (レベル 1)



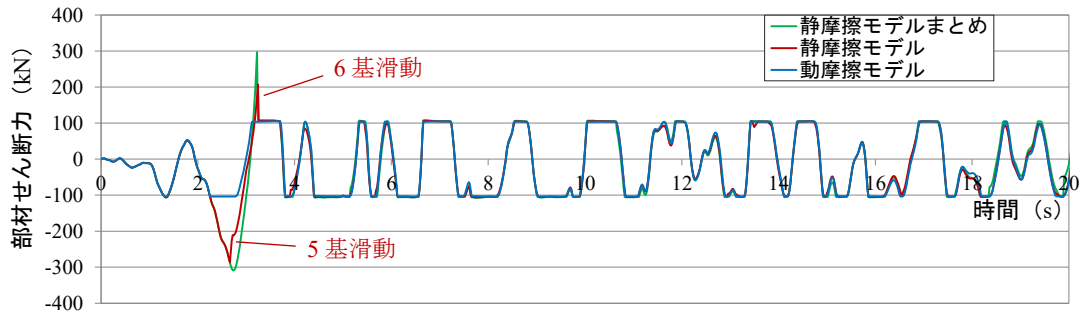
(a) 層せん断力係数



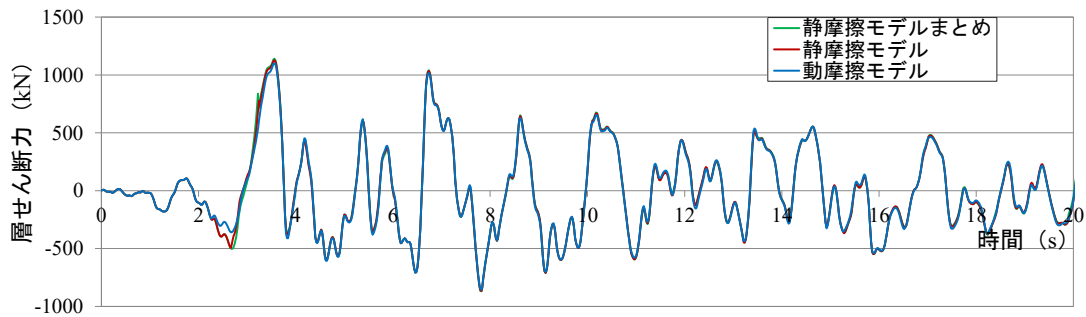
(b) 変位

図 4.26 最大応答値の比較 (レベル2)

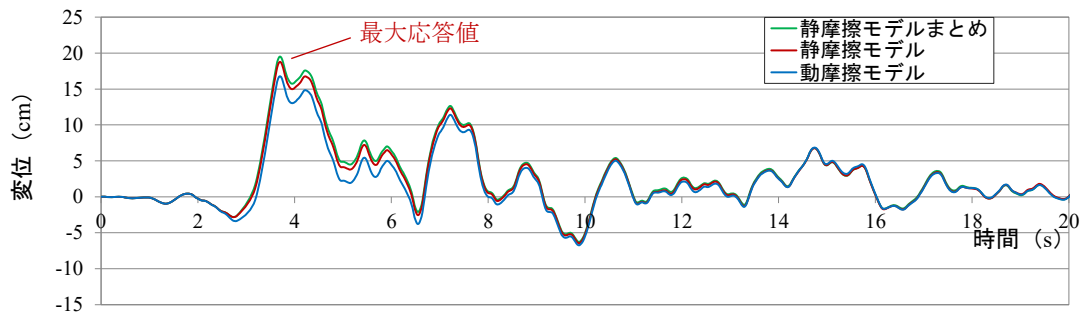
図 4.27 では、約 2~3 秒では弾性すべり支承の負担せん断力が増大したために負側の変位が制限され、約 3 秒での正側への移動中に 6 基が滑動したことで正側への変位が大きくなり、約 3.5 秒での最大応答変位が増大したことが分かる。



(a) 弾性すべり支承の部材せん断力



(b) 層せん断力

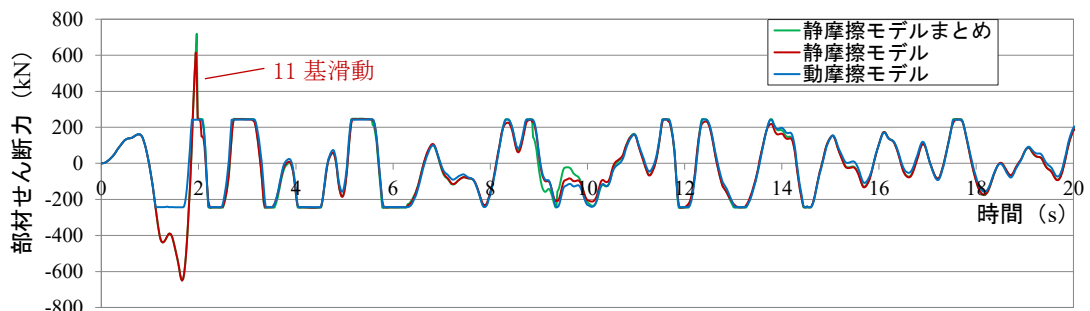


(c) 変位

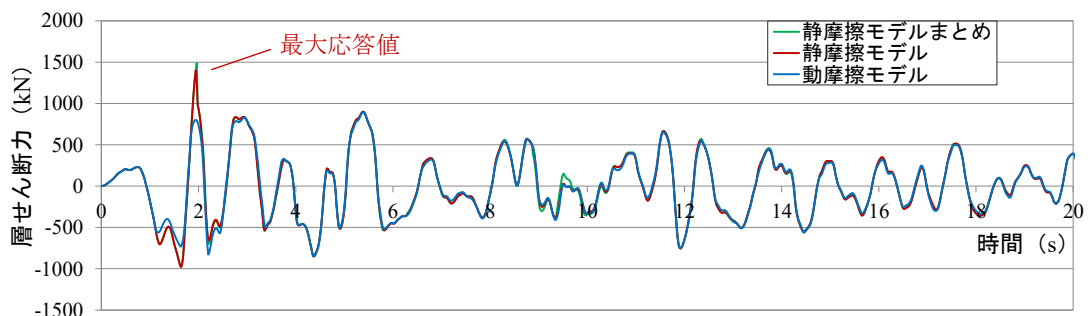
図 4.27 時刻歴応答の比較 (レベル2 TAFT_EW 特性 Soft)

図 4.28 では、レベル 1 の層せん断力および変位が増大した地震波での時刻歴応答の比較を示し、約 1~2 秒で弾性すべり支承の負担せん断力が増大したために負側の変位が制限され、また正側の層せん断力の最大応答値も増大し、約 2 秒で正側に移動中に滑動したことで免震層としての剛性が低下して正側への変位が増大し、約 3 秒での最大応答変位が増大したことが分かる。

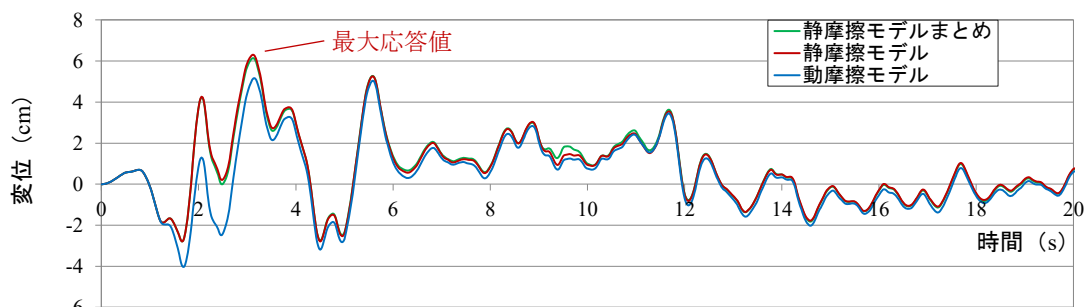
また、各地震動での結果を図 4.29(a)~(j)に示す。これらによると、地震動の最大振幅直近まで弾性すべり支承が滑動しない場合は層せん断力と変位両方の最大応答値に影響する場合があります、それ以前で滑動する場合も変位振幅の偏りにより変位の最大応答値に影響する場合がありますと考えられ、また弾性すべり支承を多く用いた建物で特に影響があると考えられる。



(a) 弾性すべり支承の部材せん断力



(b) 層せん断力



(c) 変位

図 4.28 時刻歴応答の比較 (レベル 1 EL-CENTRO NS 特性 Hard)

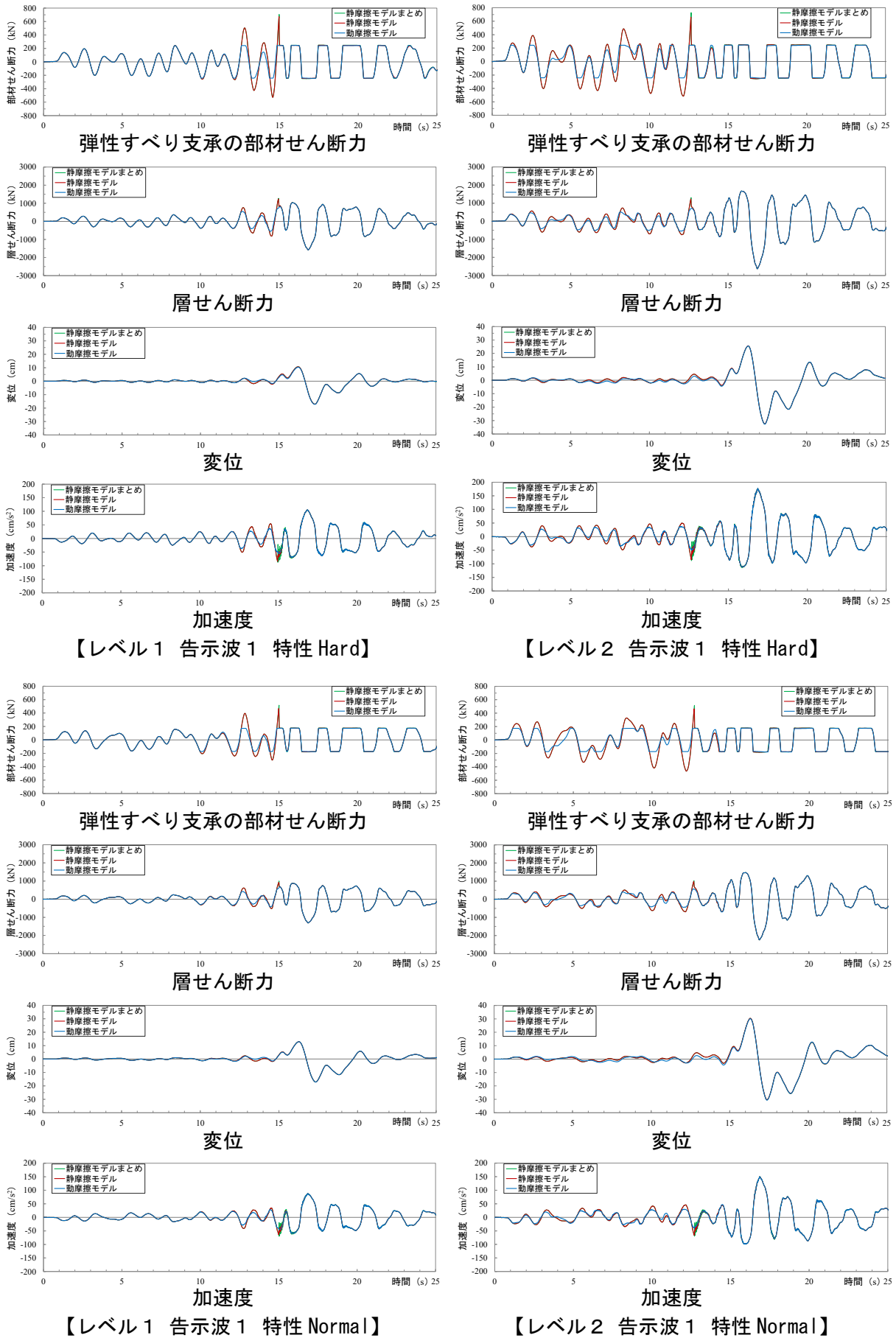
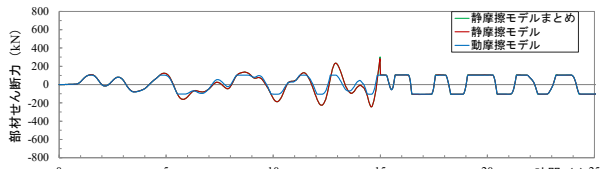
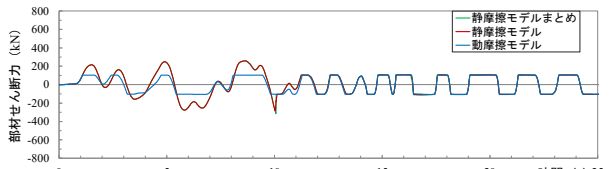


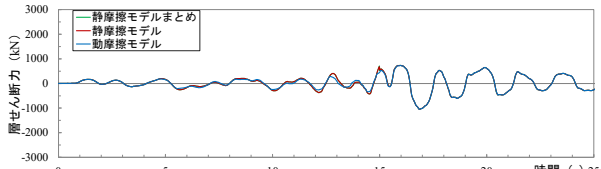
図 4.29(a) 時刻歴応答の比較



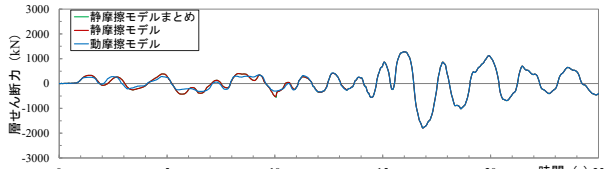
弾性すべり支承の部材せん断力



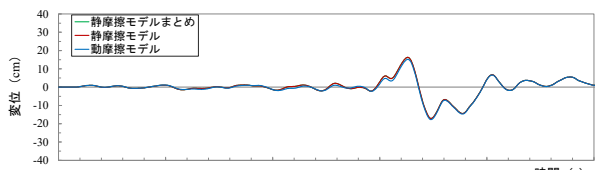
弾性すべり支承の部材せん断力



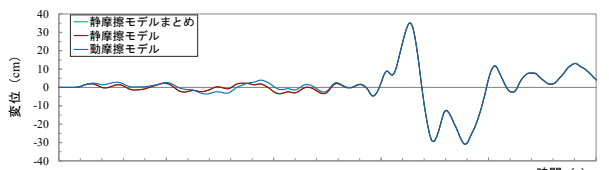
層せん断力



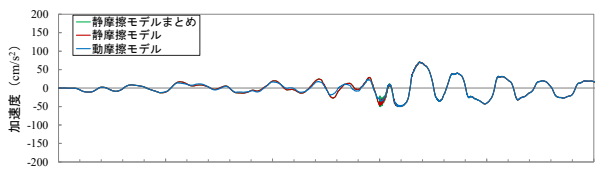
層せん断力



変位

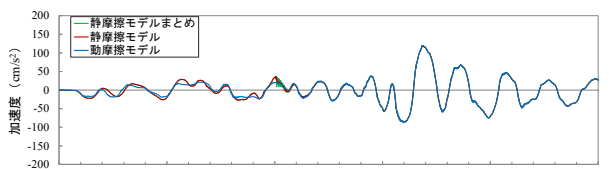


変位



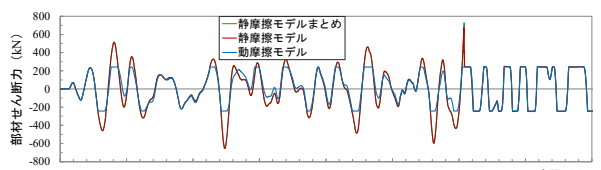
加速度

【レベル1 告示波1 特性Soft】

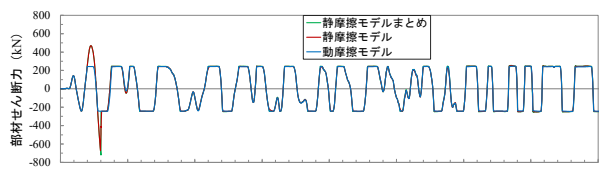


加速度

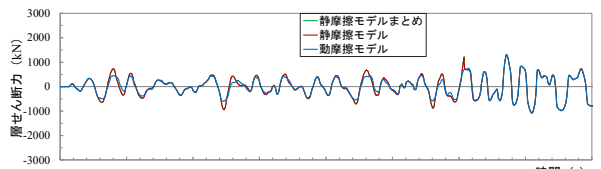
【レベル2 告示波1 特性Soft】



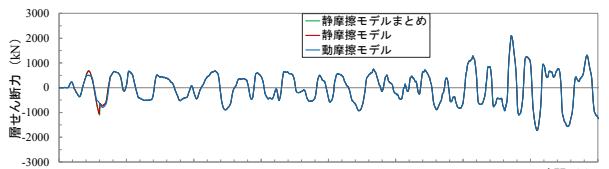
弾性すべり支承の部材せん断力



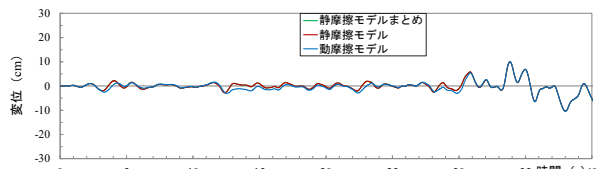
弾性すべり支承の部材せん断力



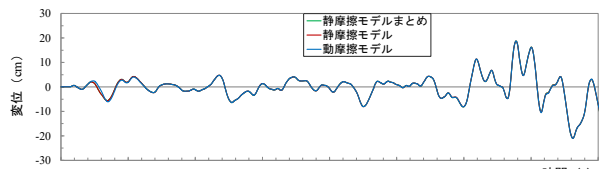
層せん断力



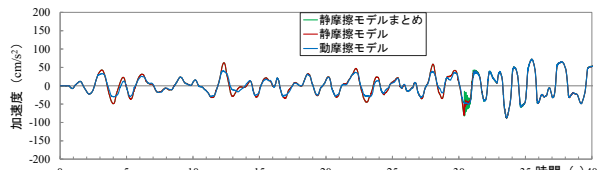
層せん断力



変位

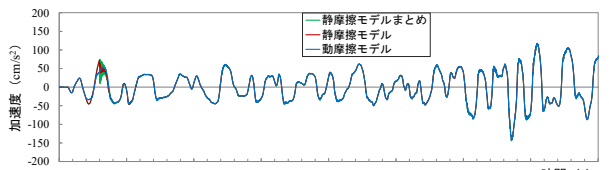


変位



加速度

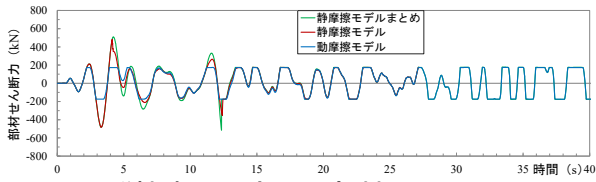
【レベル1 告示波2 特性Hard】



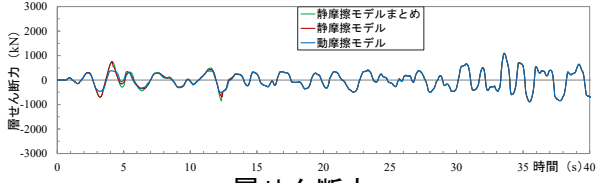
加速度

【レベル2 告示波2 特性Hard】

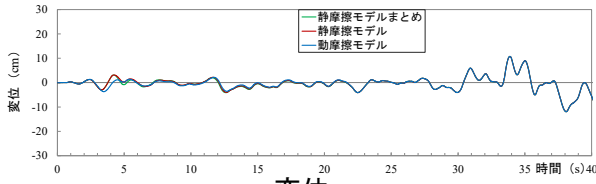
図 4.29 (b) 時刻歴応答の比較



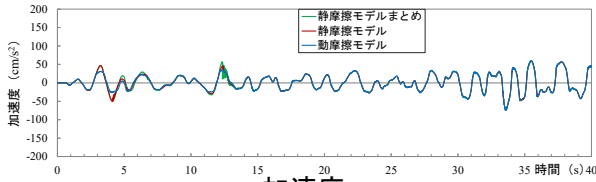
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力

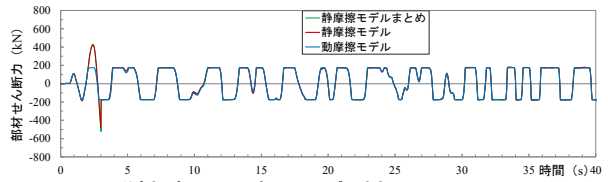


変位

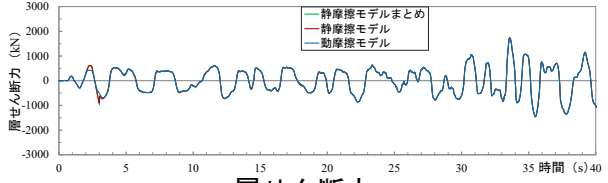


加速度

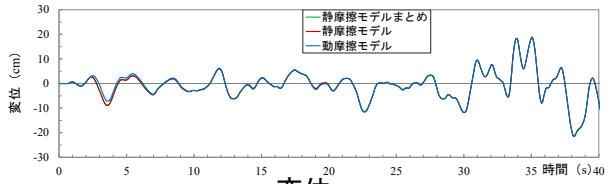
【レベル1 告示波2 特性 Normal】



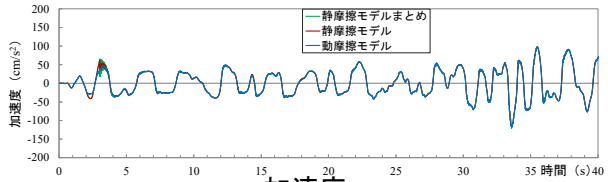
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力

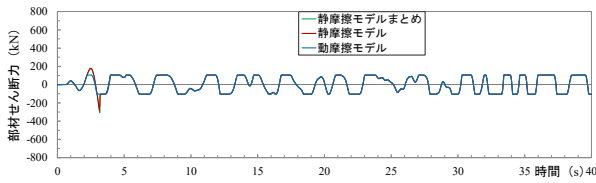


変位

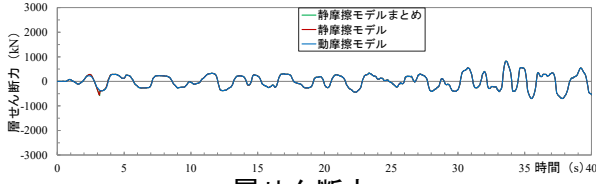


加速度

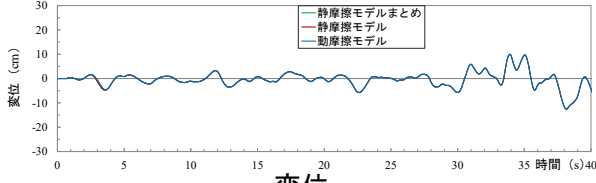
【レベル2 告示波2 特性 Normal】



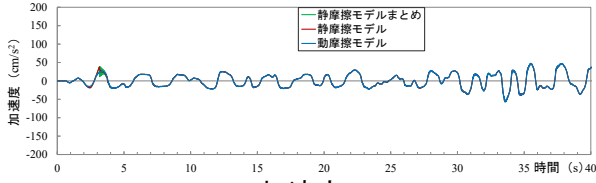
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力

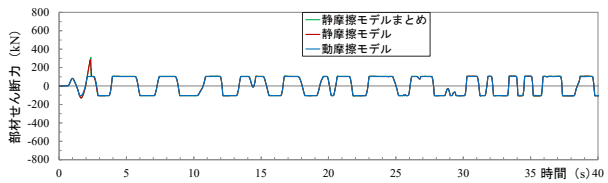


変位

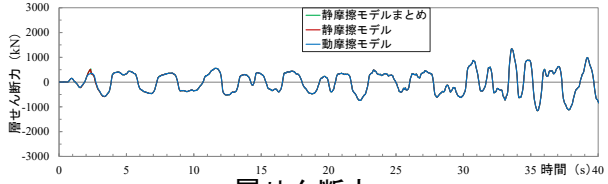


加速度

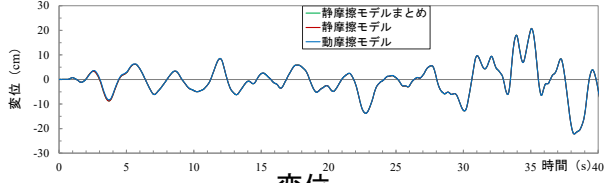
【レベル1 告示波2 特性 Soft】



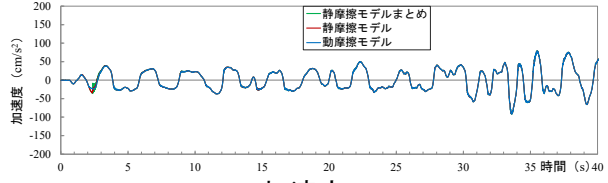
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力



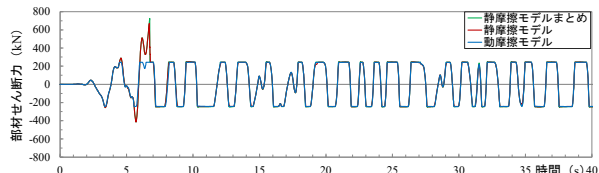
変位



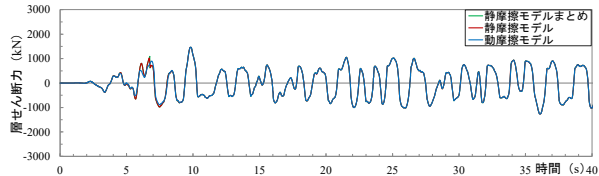
加速度

【レベル2 告示波2 特性 Soft】

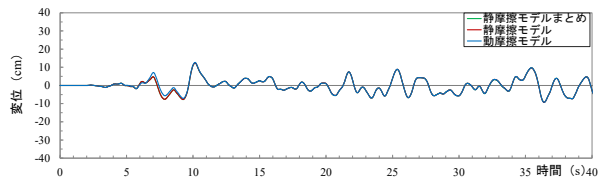
図 4.29(c) 時刻歴応答の比較



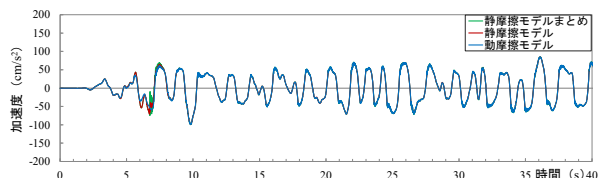
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力

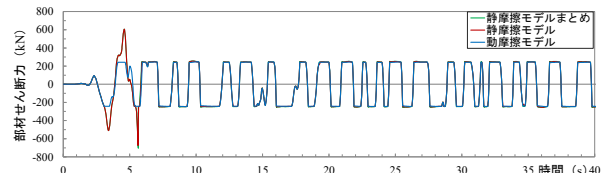


変位

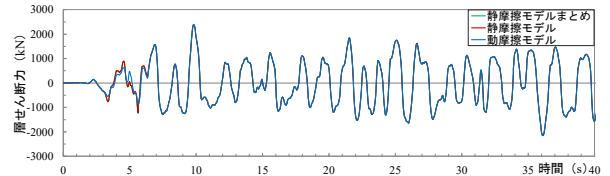


加速度

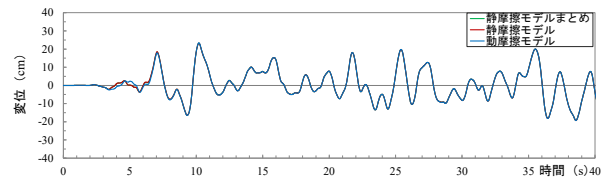
【レベル1 告示波3 特性Hard】



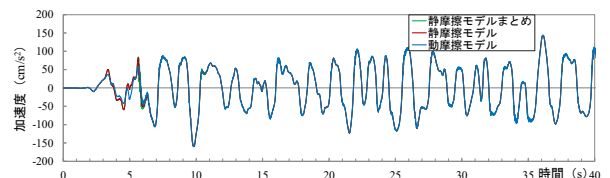
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力

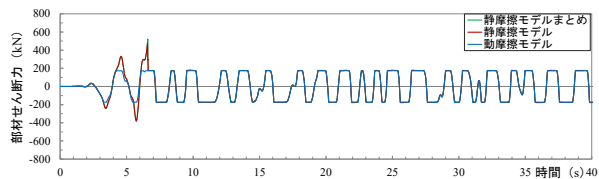


変位

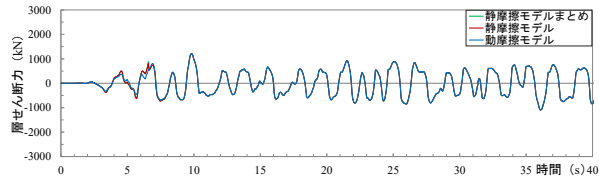


加速度

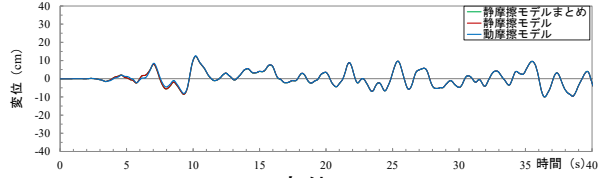
【レベル2 告示波3 特性Hard】



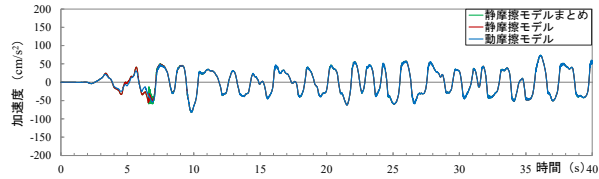
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力

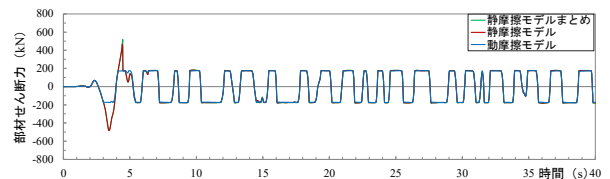


変位

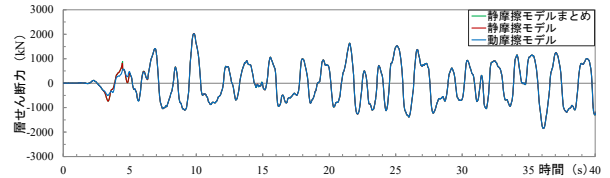


加速度

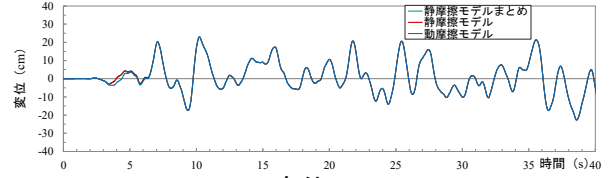
【レベル1 告示波3 特性Normal】



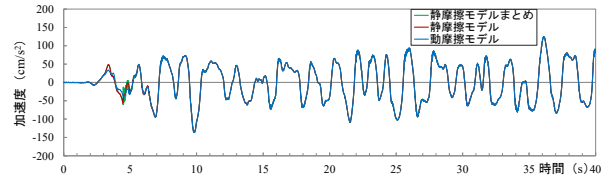
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力



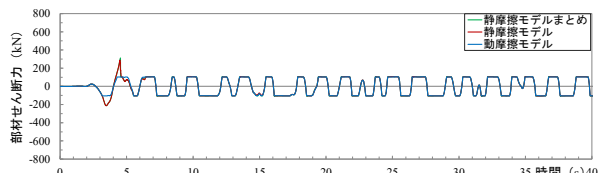
変位



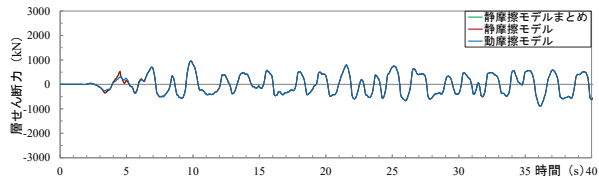
加速度

【レベル2 告示波3 特性Normal】

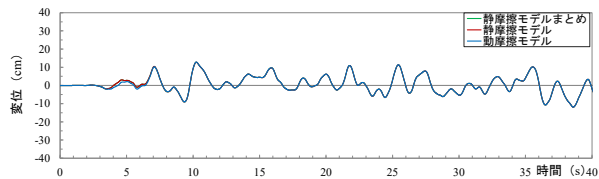
図 4.29(d) 時刻歴応答の比較



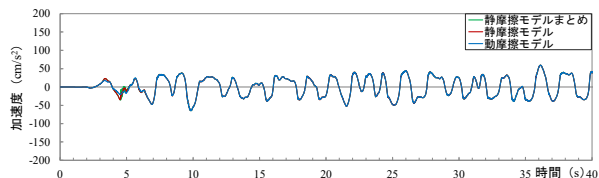
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力

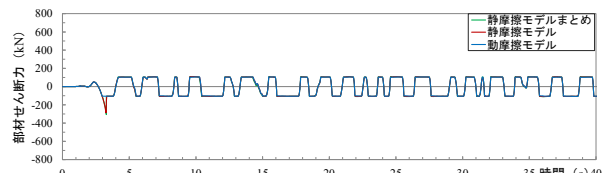


変位

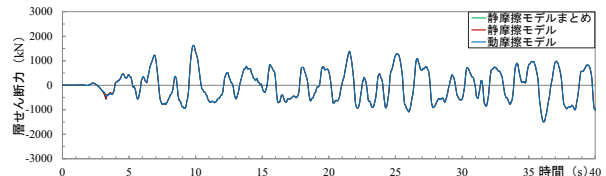


加速度

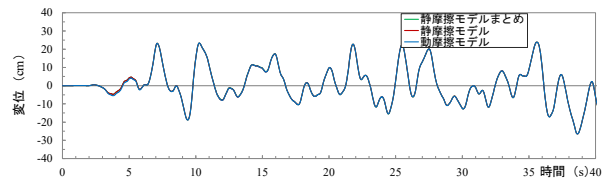
【レベル1 告示波3 特性 Soft】



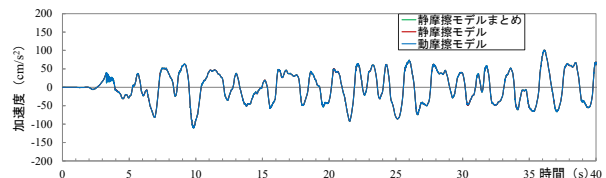
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力

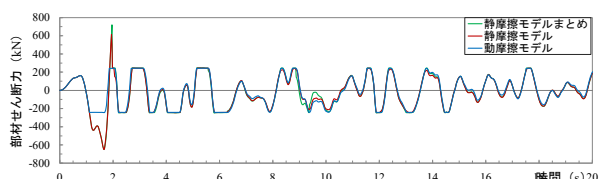


変位

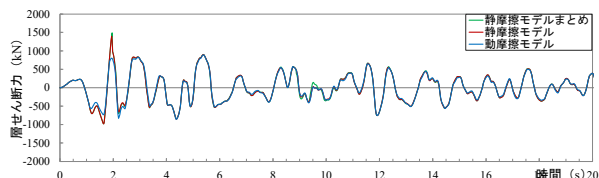


加速度

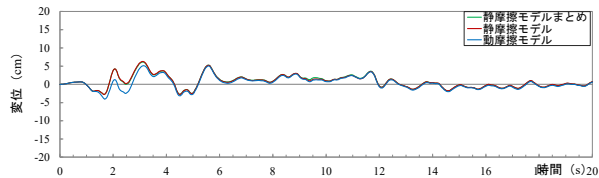
【レベル2 告示波3 特性 Soft】



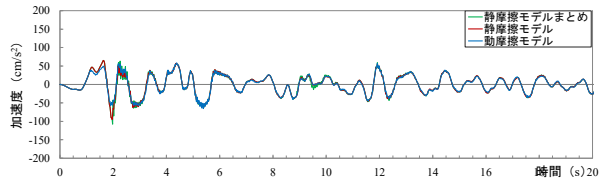
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力

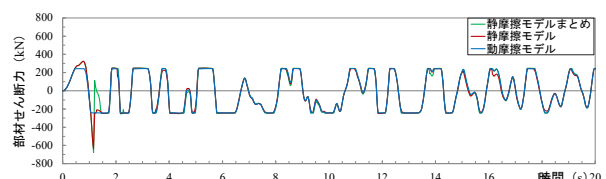


変位

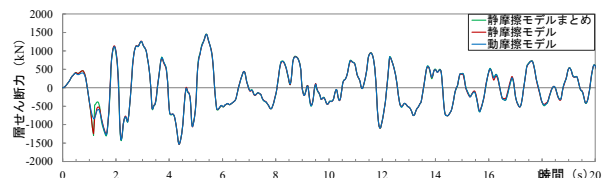


加速度

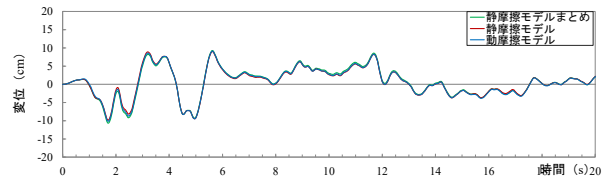
【レベル1 EL-CENTRO_NS 特性 Hard】



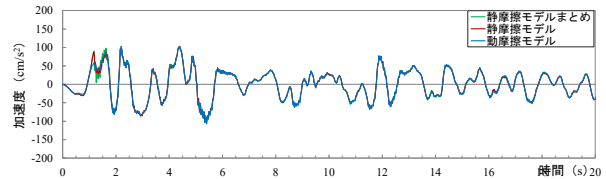
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力



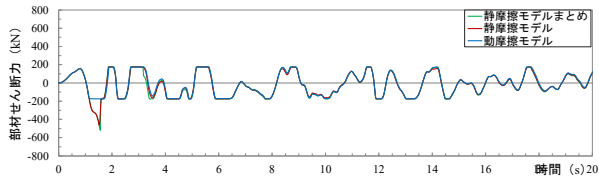
変位



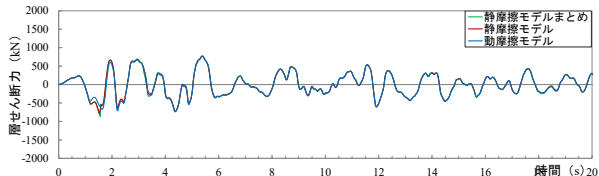
加速度

【レベル2 EL-CENTRO_NS 特性 Hard】

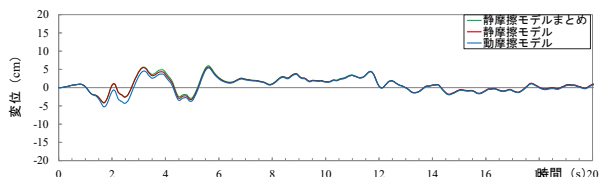
図 4.29 (e) 時刻歴応答の比較



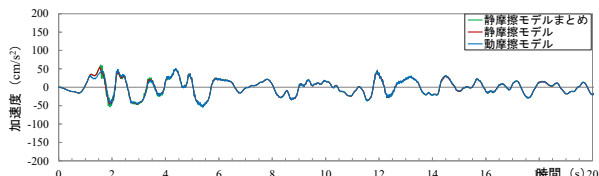
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力

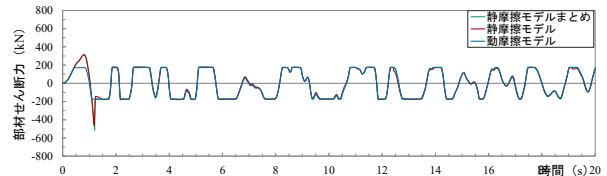


変位

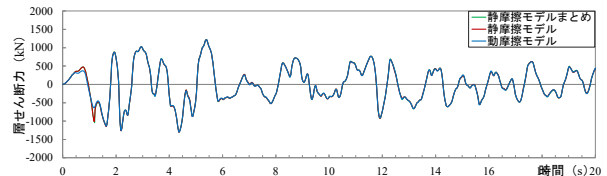


加速度

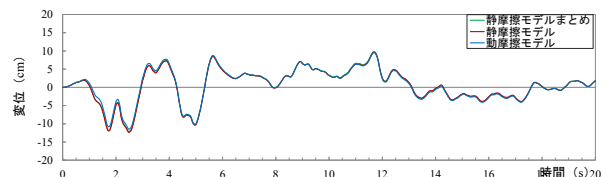
【レベル1 EL-CENTRO_NS 特性 Normal】



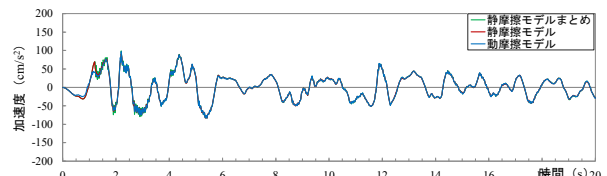
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力

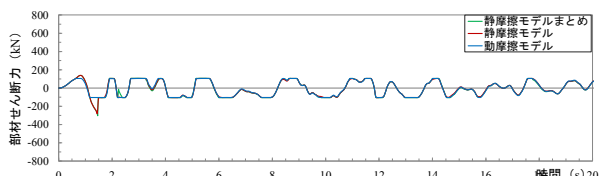


変位

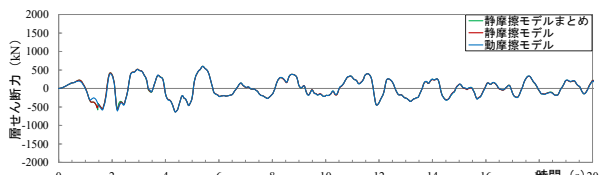


加速度

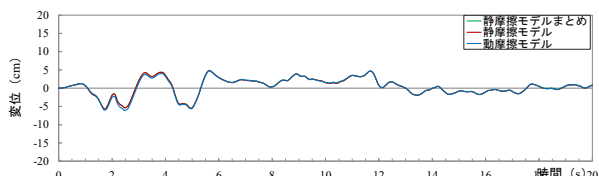
【レベル2 EL-CENTRO_NS 特性 Normal】



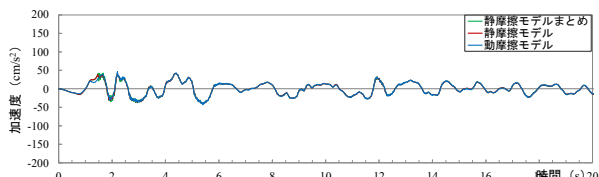
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力

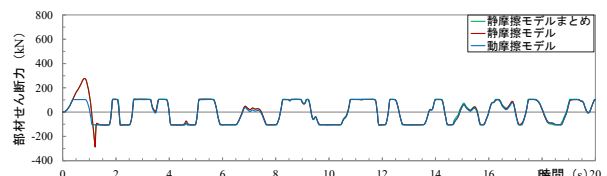


変位

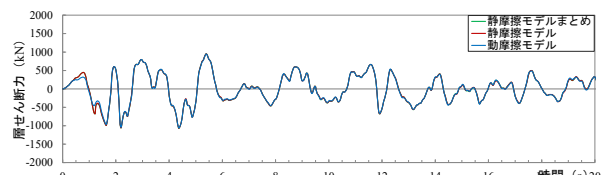


加速度

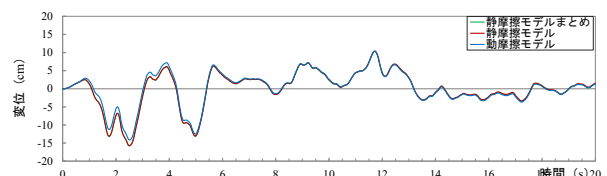
【レベル1 EL-CENTRO_NS 特性 Soft】



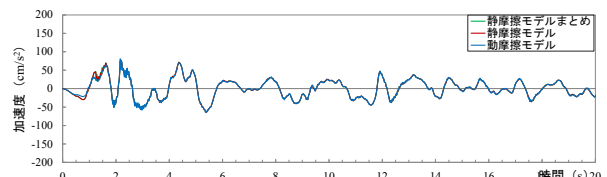
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力



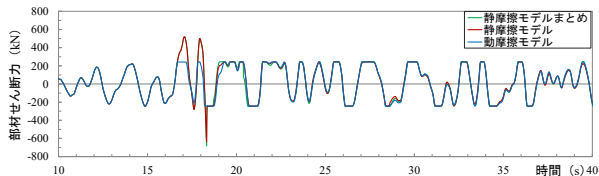
変位



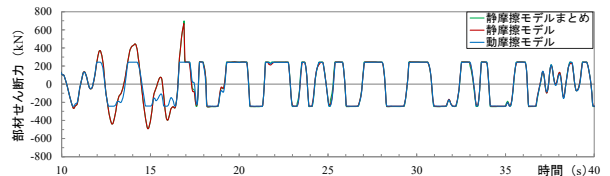
加速度

【レベル2 EL-CENTRO_NS 特性 Soft】

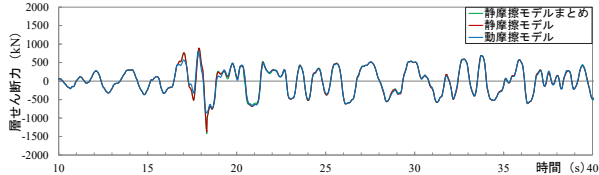
図 4.29 (f) 時刻歴応答の比較



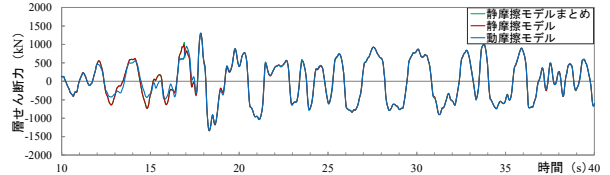
弾性すべり支承の部材せん断力



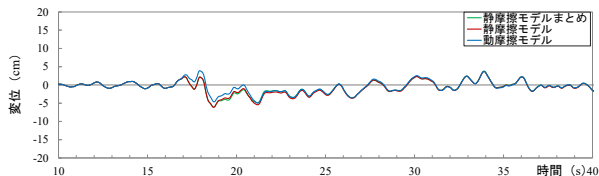
弾性すべり支承の部材せん断力



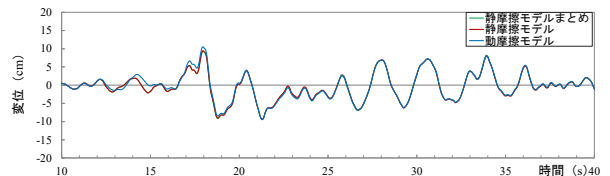
層せん断力



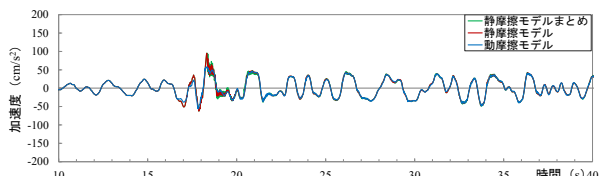
層せん断力



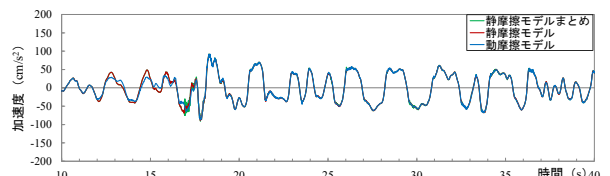
変位



変位



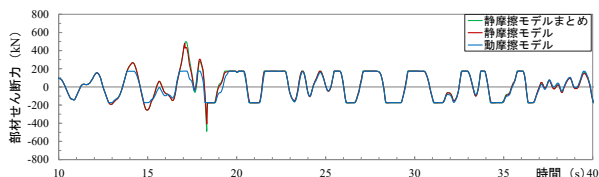
加速度



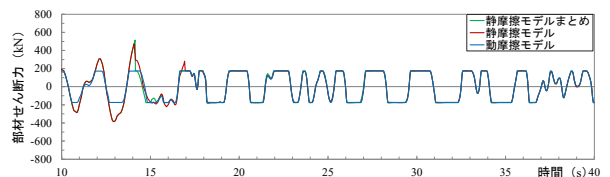
加速度

【レベル1 HACHINOHE_NS 特性Hard】

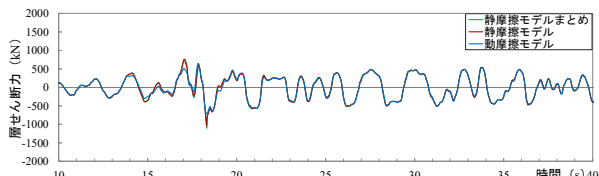
【レベル2 HACHINOHE_NS 特性Hard】



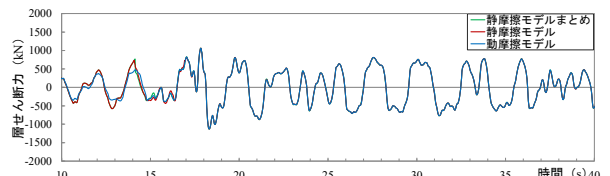
弾性すべり支承の部材せん断力



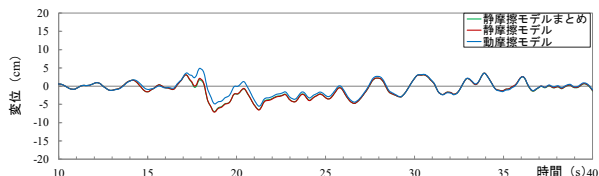
弾性すべり支承の部材せん断力



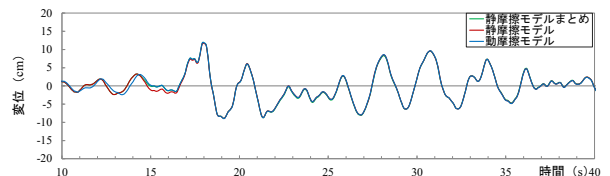
層せん断力



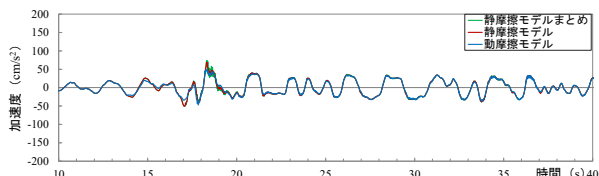
層せん断力



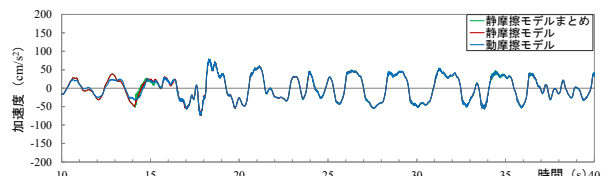
変位



変位



加速度

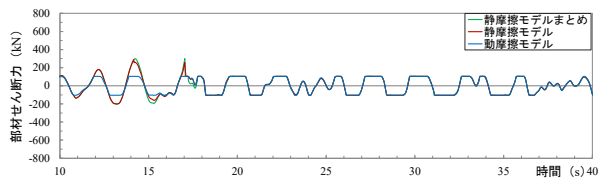


加速度

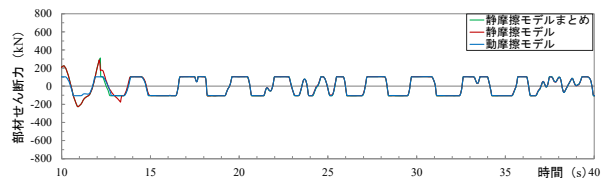
【レベル1 HACHINOHE_NS 特性Normal】

【レベル2 HACHINOHE_NS 特性Normal】

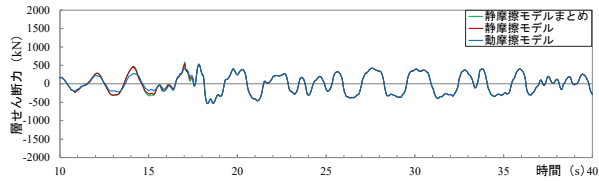
図 4.29 (g) 時刻歴応答の比較



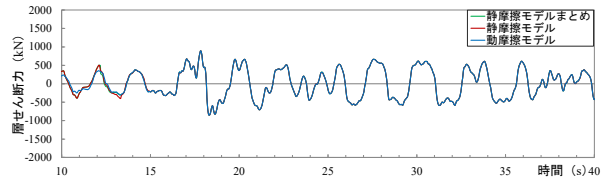
弾性すべり支承の部材せん断力



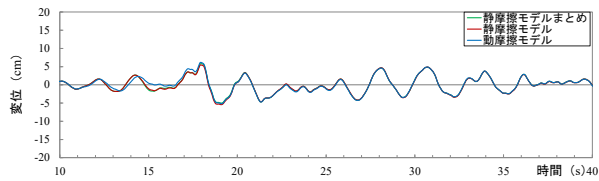
弾性すべり支承の部材せん断力



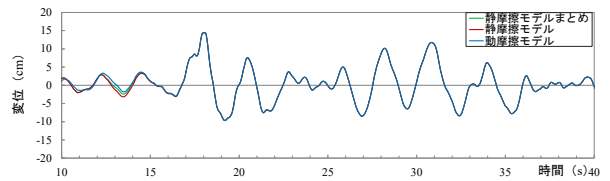
層せん断力



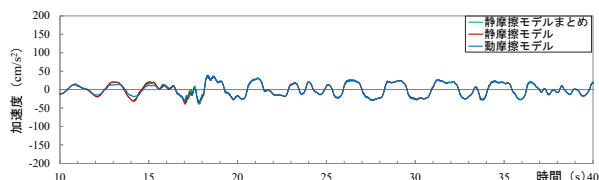
層せん断力



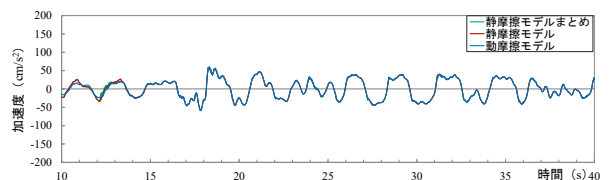
変位



変位



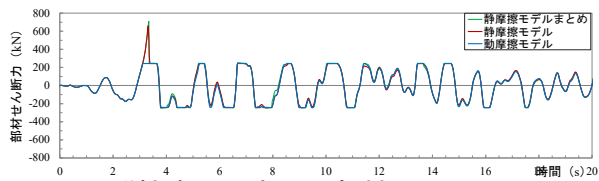
加速度



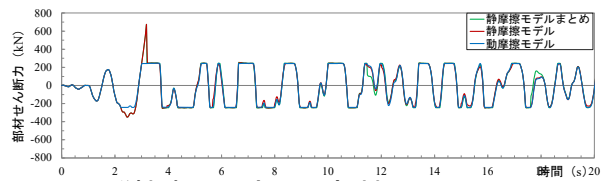
加速度

【レベル1 HACHINOHE_NS 特性 Soft】

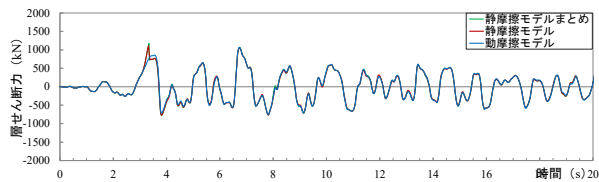
【レベル2 HACHINOHE_NS 特性 Soft】



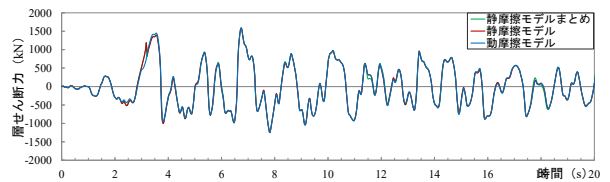
弾性すべり支承の部材せん断力



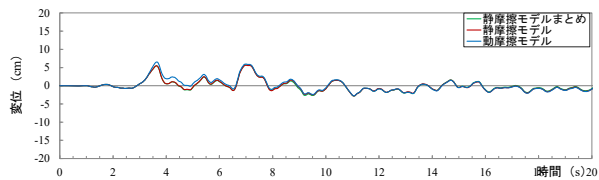
弾性すべり支承の部材せん断力



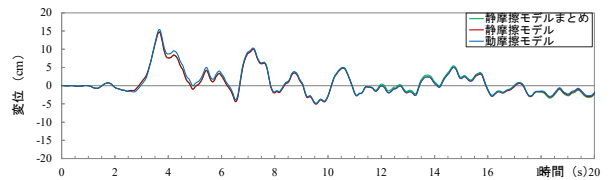
層せん断力



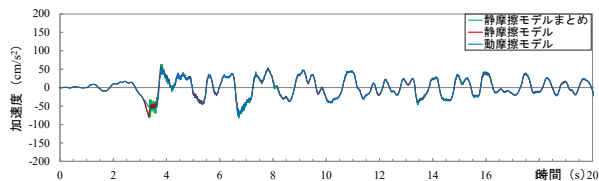
層せん断力



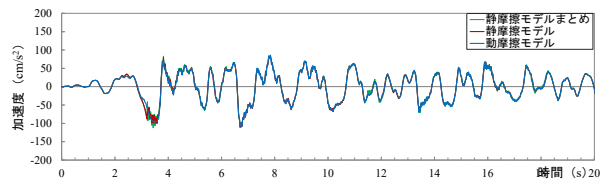
変位



変位



加速度

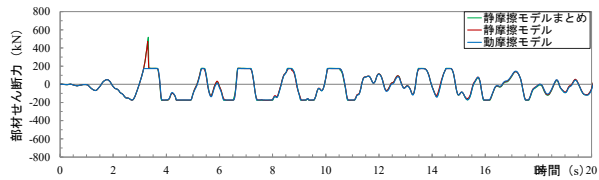


加速度

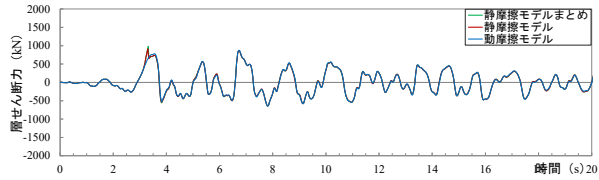
【レベル1 TAFT_EW 特性 Hard】

【レベル2 TAFT_EW 特性 Hard】

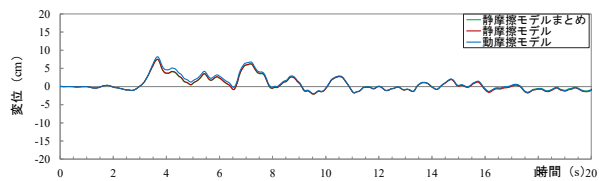
図 4.29 (h) 時刻歴応答の比較



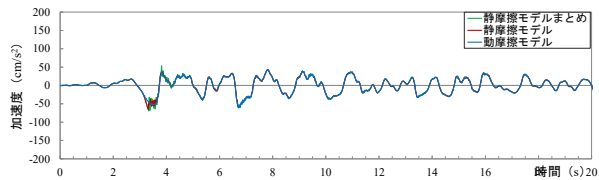
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力

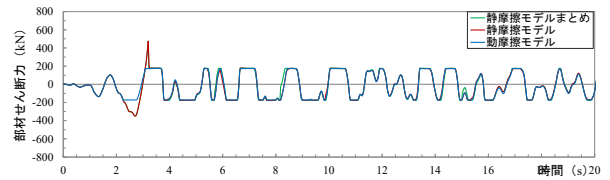


変位

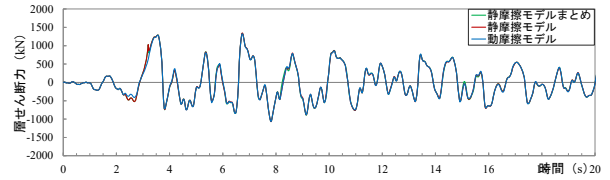


加速度

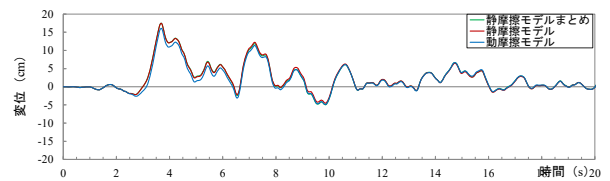
【レベル1 TAFT_EW 特性 Normal】



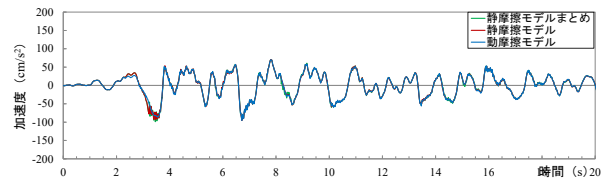
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力

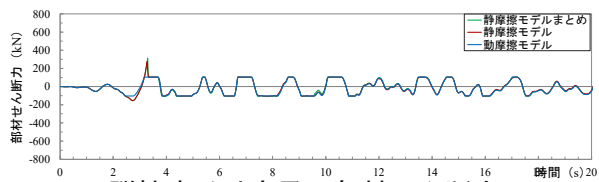


変位

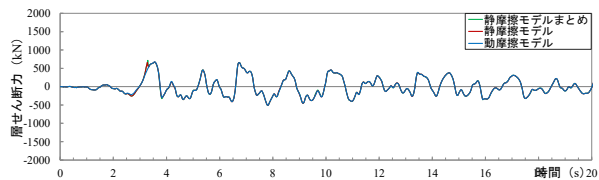


加速度

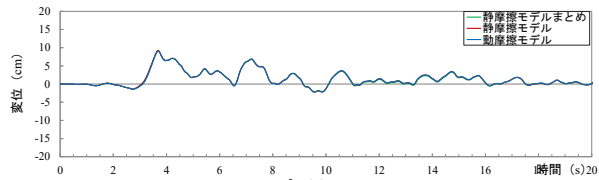
【レベル2 TAFT_EW 特性 Normal】



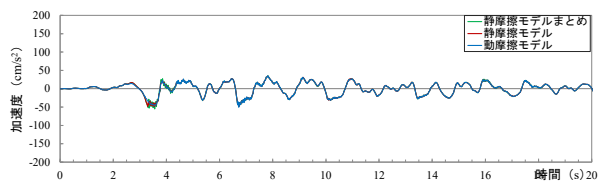
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力

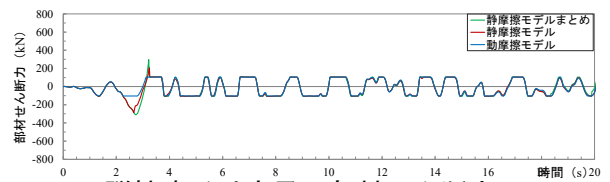


変位

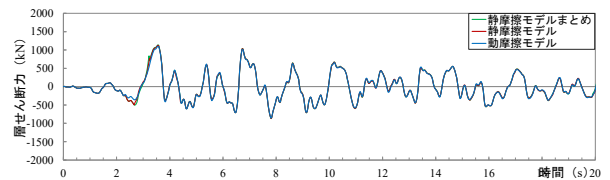


加速度

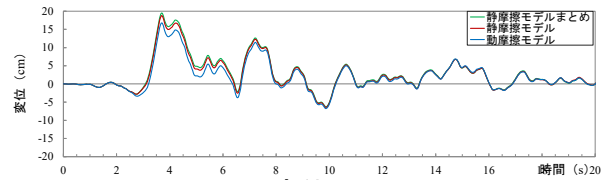
【レベル1 TAFT_EW 特性 Soft】



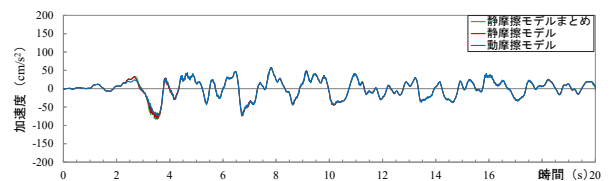
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力



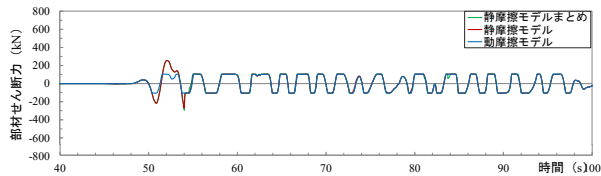
変位



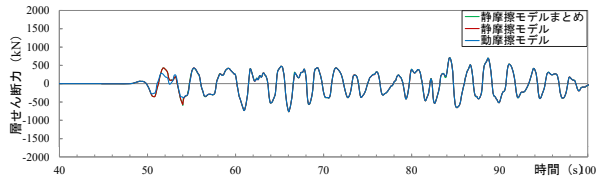
加速度

【レベル2 TAFT_EW 特性 Soft】

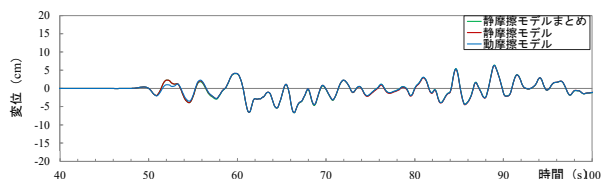
図 4.29 (i) 時刻歴応答の比較



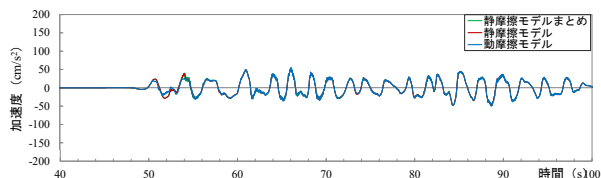
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力

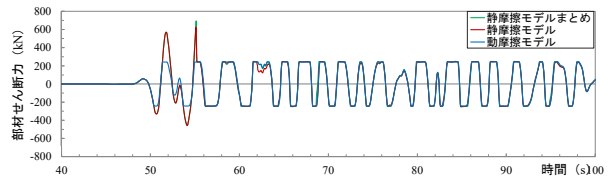


変位

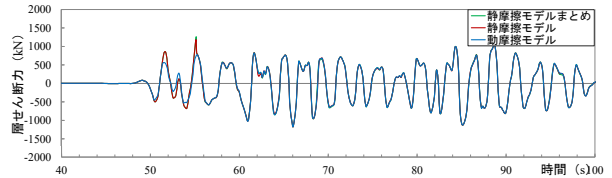


加速度

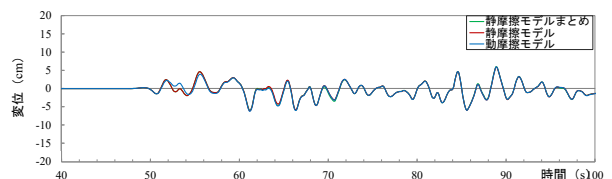
【レベル2 南海トラフ_NS 特性 Soft】



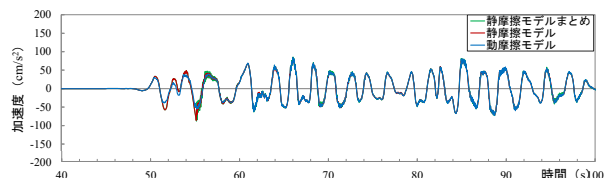
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力

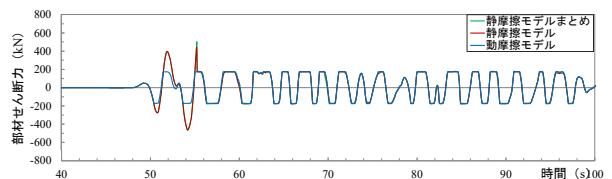


変位

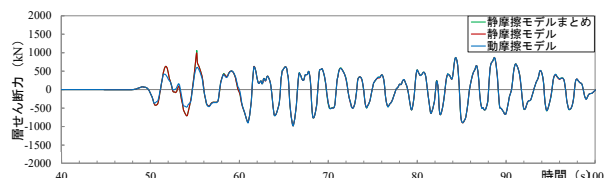


加速度

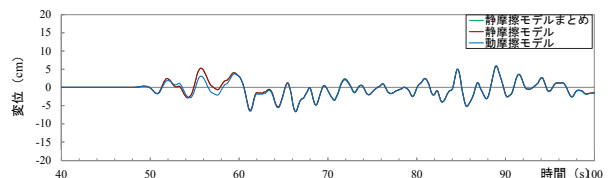
【レベル2 南海トラフ_NS 特性 Hard】



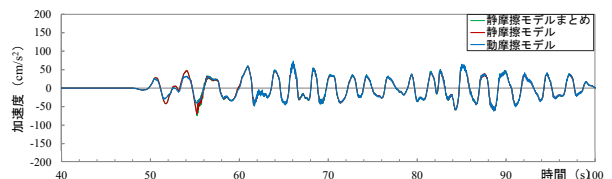
弾性すべり支承の部材せん断力



層せん断力



変位



加速度

【レベル2 南海トラフ_NS 特性 Normal】

図 4.29 (j) 時刻歴応答の比較

また、弾性すべり支承の復元力特性を 11 基分とした静摩擦モデルと 1 つの復元力特性にまとめたモデルでは、図 4.27(a)のように滑動するタイミングが異なる場合はあるものの、その影響は大きくないと考えられる。図 4.25 および図 4.26 では、11 基分としたモデルはまとめたモデルと同じかやや小さい結果となっている。これは、式(4.1)を用いることにより、表 4.3 に示すように静摩擦係数は配置により異なるが静摩擦力、すなわちすべり出し荷重にはあまり差が生じないためである。

表 4.3 静摩擦力と動摩擦力

配置	鉛直荷重 (kN)	動摩擦 係数	動摩擦力 (kN)	静摩擦 係数	静摩擦力 (kN)
X2Y1	928.10	0.0156	14.48	0.0492	45.66
X3Y2	1306.70	0.0131	17.12	0.0375	49.00
X2Y2	1621.10	0.0117	18.97	0.0316	51.23
X1Y2	1082.00	0.0144	15.58	0.0436	47.18
X3Y3	790.20	0.0169	13.35	0.0560	44.25
X2Y3	1488.00	0.0123	18.30	0.0338	50.29
X1Y3	1010.20	0.0149	15.05	0.0460	46.47
X3Y4	774.20	0.0171	13.24	0.0569	44.05
X2Y4	1302.00	0.0131	17.06	0.0376	48.96
X1Y4	1073.50	0.0145	15.57	0.0438	47.02
X2Y5	928.10	0.0156	14.48	0.0492	45.66

4.5 まとめ

本章では、免震建物の実施設計において、第3章にて提案した静摩擦係数と待機時間の関係式を用いた復元力特性を設定する設計手法を提案した。さらに、モデル建物にて試設計を行い、動摩擦モデルでの応答と静摩擦モデルでの応答を比較した。本章にて得られた知見を以下に示す。

- 1) 摩擦機構を有する解析モデルを組み込んだ解析プログラムにて試解析を行ったところ、弾性すべり支承の挙動を再現した解析が可能である。
- 2) 対象建物で動摩擦モデルと静摩擦モデルにて応答解析を行った結果、本建物では建物としての最大応答値は動摩擦モデルでの応答であったが、地震波の種類によって、動摩擦モデルでの応答層せん断力および変位よりも静摩擦モデルでの応答が大きくなる場合があり、正確に応答を把握するためには本章で提案した静摩擦係数を考慮した設計手法の適用が必要であると考えられる。
- 3) 面圧に依存する提案式を用いることで、弾性すべり支承の基数分を個別にモデル化した応答と、まとめて1つの復元力特性としてモデル化した応答との差は小さくなるため、本研究の範囲では後者のモデル化は妥当であると考えられる。

本建物では、2) に示したように静摩擦係数の待機時間の影響による増大を考慮しても最大応答値は変化しなかったが、これは地盤での増幅により告示波の入力が大きかったためであり、すべての地盤条件で告示波では静摩擦モデルでの応答が増加しない訳ではない。地震動の最大振幅付近まで弾性すべり支承が滑動しない場合に静摩擦係数の待機時間による増大を考慮すると応答加速度や応答変位の最大応答値が増大する可能性がある。主要動が波形の初期にある位相の地震動を使用するときには注意が必要であり、特に弾性すべり支承を多く用いた建物で影響がある可能性が考えられる。

参考文献

- 4.1) Bridgestone: Elastic Sliding Bearing (Low Elasticity Type) Performance Evaluation report, The Building Center of Japan, 2013 (in Japanese)
ブリヂストン：弾性すべり支承（低弾性タイプ）性能評価書，日本建築センター，2013
- 4.2) Architectural Institute of Japan: Recommendation for the Design of Seismically Isolated Buildings, Maruzen Publishing, pp.302-304, 2013 (in Japanese)
日本建築学会：免震構造設計指針，丸善出版，pp.302-304，2013
- 4.3) Hiroshi MATSUKAWA: Physics of Friction, Iwanami Syoten, 2012 (in Japanese)
松川宏：摩擦の物理，岩波書店，2012
- 4.4) Ichiro NAGASHIMA, Masayoshi HISANO, Hideki FUNAHARA: Slide bearing method Seismic isolation building confirmation experiment of aging characteristics, TAISEI Technical Research Institute Report Vol.30, pp.131-134, 1997 (in Japanese)
長島一郎，久野雅祥，船原英樹：すべり支承方式免震建物の経年変化特性の確認実験，大成建設技術研究所報，第30号，pp.131-134，1997
- 4.5) Hiroki HAMAGUCHI, Masahiko HIGASHINO, Shigeo MINEWAKI, Masashi YAMAMOTO, Takuya ISHII: Aged Deterioration in the Coefficient of Friction of Sliding Bearings, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures- II , pp.645-646, 2001 (in Japanese)
浜口弘樹，東野雅彦，嶺脇重雄，山本雅史，石井卓哉：すべり支承の摩擦係数の経年変化，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造II，pp.645-646，2001
- 4.6) Takafumi MIYAMA, Shinsuke INAI, Keiji MASUDA, Takashi KATO: A Study on the Aged Adhesion of the Sliding Bearing under the Axial Stress. Part2, The characteristic of Sliding Bearing of 3-years progress, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures- II , pp.1047-1048, 2007 (in Japanese)
三山剛史，稲井慎介，増田圭司，加藤貴司：面圧を加えた滑り免震支承における摩擦係数の経年変化に関する研究 その2 3年経過時のすべり支承特性について，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造II，pp.1047-1048，2007
- 4.7) Hisao YAMAZAKI, Kazuyuki OHARA, Morio YONETANI, Kazuo NAKAGOORI, Hideji NAKAMURA: A Study on Practical Analysis and Modeling of Seismic Isolation with Friction System Part1, Part2, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures- II , pp.579-582, 2015 (in Japanese)
山崎久雄，大原和之，米谷壮央，中郡一雄，中村秀司：摩擦機構を有する免震構造の実用的な解析法とモデル化に関する一考察 その1，その2，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造II，pp.579～582，2015
- 4.8) Disaster Management, Cabinet Office: Provision of data related to seismic intensity distribution and inundation area, etc. examined by the Nankai Trough megathrust earthquake model review committee, 2012 (in Japanese)
内閣府（防災担当）：南海トラフの巨大地震モデル検討会において検討された震度分布・浸水域等に係るデータ提供について，2012

第5章

観測記録のシミュレーション解析による 設計法の妥当性検証

第5章 観測記録のシミュレーション解析による設計法の妥当性検証

5.1 はじめに

免震建物の設計では、弾性すべり支承の復元力特性として積層ゴム部分の弾性剛性およびその端面に取付けられたすべり材とすべり板との摩擦係数を用いたバイリニア型の特性が用いられる。このときの摩擦係数にはメーカーから示された材料試験による動摩擦係数が用いられ、製造のばらつき等による性能変動が考慮されるが、摩擦係数の経年変化については一般に考慮されておらず^{5.1)}、設計指針^{5.2)}でも不明な点が多いとされている。一方、摩擦係数には静摩擦係数と動摩擦係数があり、静摩擦係数は待機時間（2つの物体が接触または静止してから次に滑動するまでの時間）に依存して増大することがわかっており^{5.3)}、既往の研究^{5.4) ~5.6)}を概観すると近年主流となっている低摩擦タイプでは特に大きくなる傾向がみられる。

第4章では、免震建物の実施設計において、第3章にて提案した静摩擦係数と待機時間の関係式を用いた復元力特性を設定する設計手法を提案した。また、その復元力特性を用いて時刻歴応答解析を行うための摩擦モデルを有するプログラムを開発した。さらにモデル建物にて試設計を行い、動摩擦モデルでの応答と静摩擦モデルでの応答を比較し、地震波の種類によってどちらかのモデルでの応答が大きくなる場合があるので、応答を正確に把握するためには提案した設計手法の適用が必要と考えられることを述べた。

本章では、2018年に発生した大阪府北部を震源とする地震において、モデル建物にて地震観測記録が得られたので、シミュレーション解析により第4章にて提案した設計手法の妥当性を検証する。まずは得られた地震観測記録を分析し、加速度記録とけがき板の変位記録との対応性を検討した。検討により得られた建物1階の入力地震動を設計モデルに入力し、2階床での設計応答と観測記録の比較、および免震層上下の設計相対変位とけがき板記録の比較により設計手法等の妥当性を検証した。

5.2 観測地震動

5.2.1 記録装置

2018年6月18日に大阪府北部を震源として発生した地震において、第2章に示した免震建物に設置していた加速度計およびけがき式変位計にて記録が得られた。図5.1および図5.2に計測器の配置を示し、図5.3および図5.4に設置個所の状況を示す。加速度計は、静電容量計測方式で3軸計測対応のものであり、免震層上下の1階床上と2階床下に設置している。けがき式変位計はステンレスの平板に免震層上部からけがき針にて直接傷を罫書くものである。

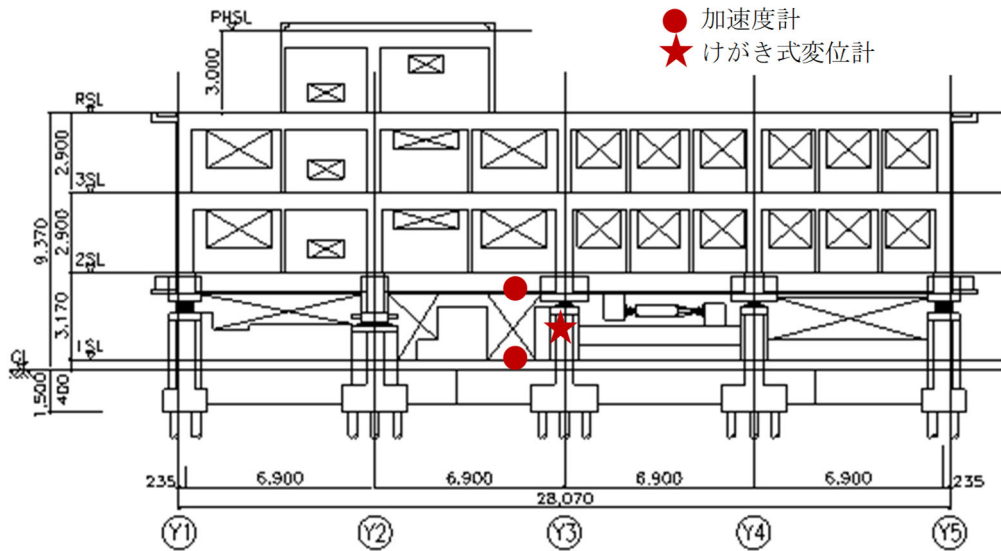


図 5.1 計測器配置軸組図

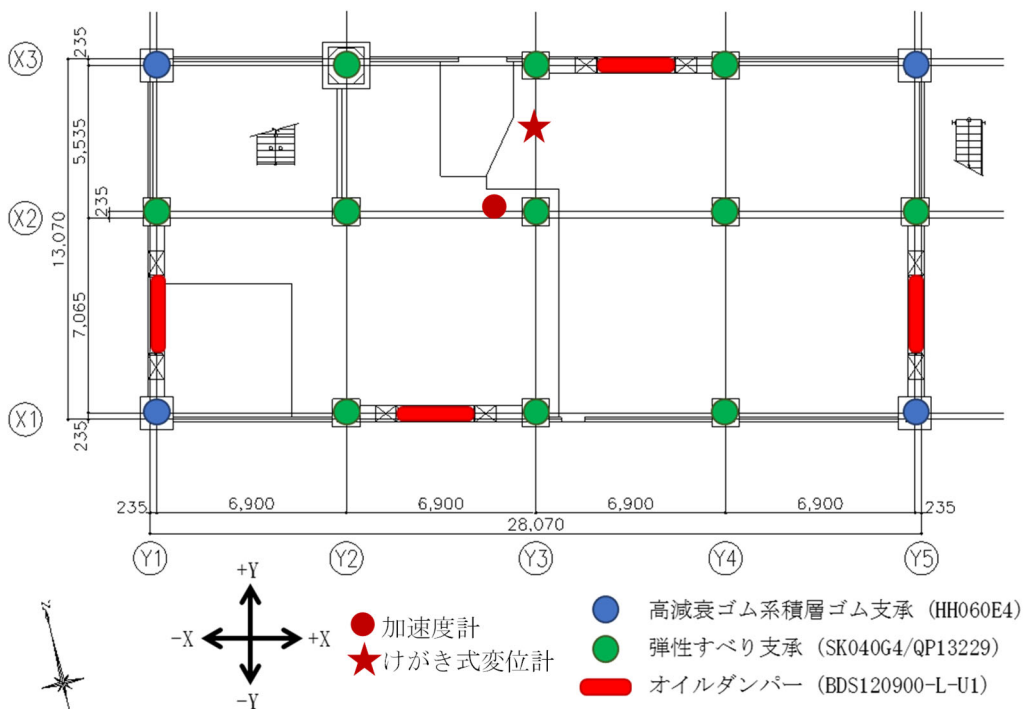


図 5.2 計測器配置平面図

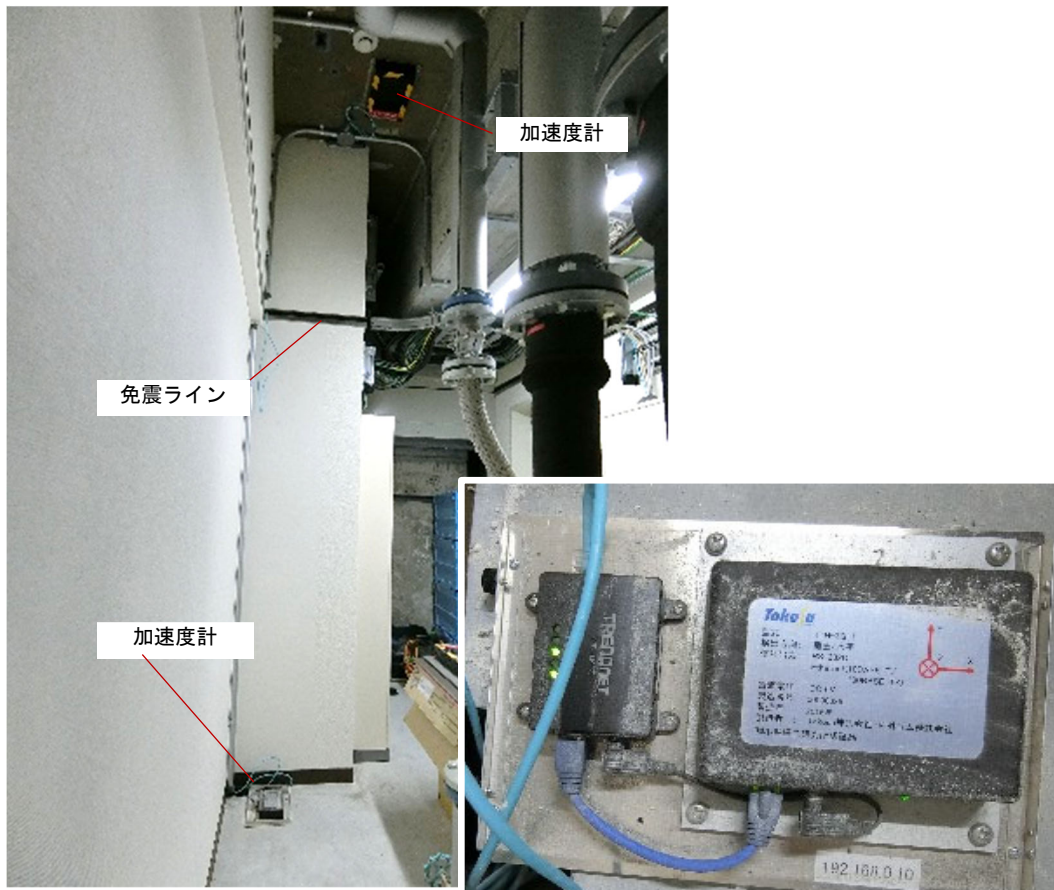


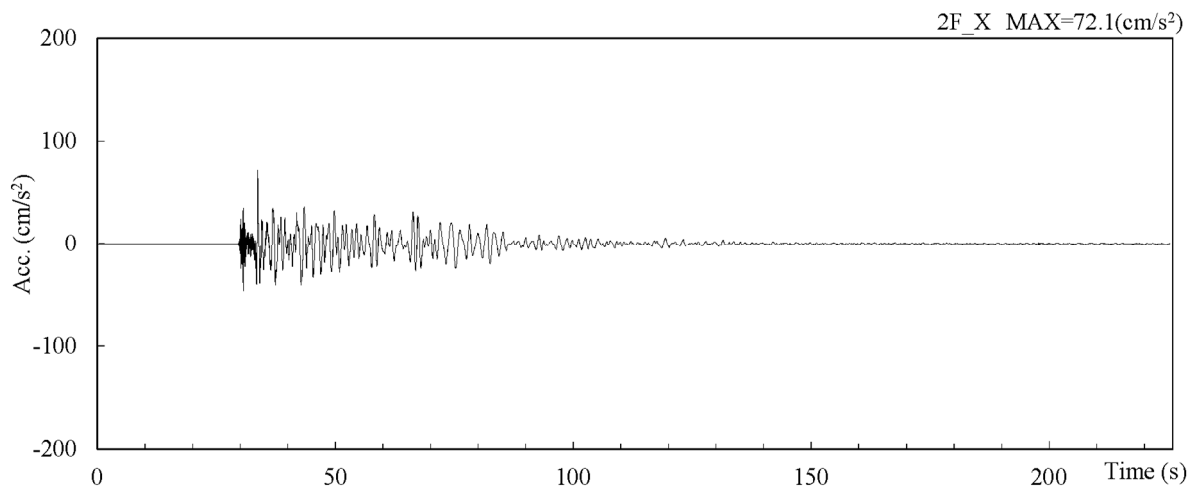
図 5.3 加速度計設置状況



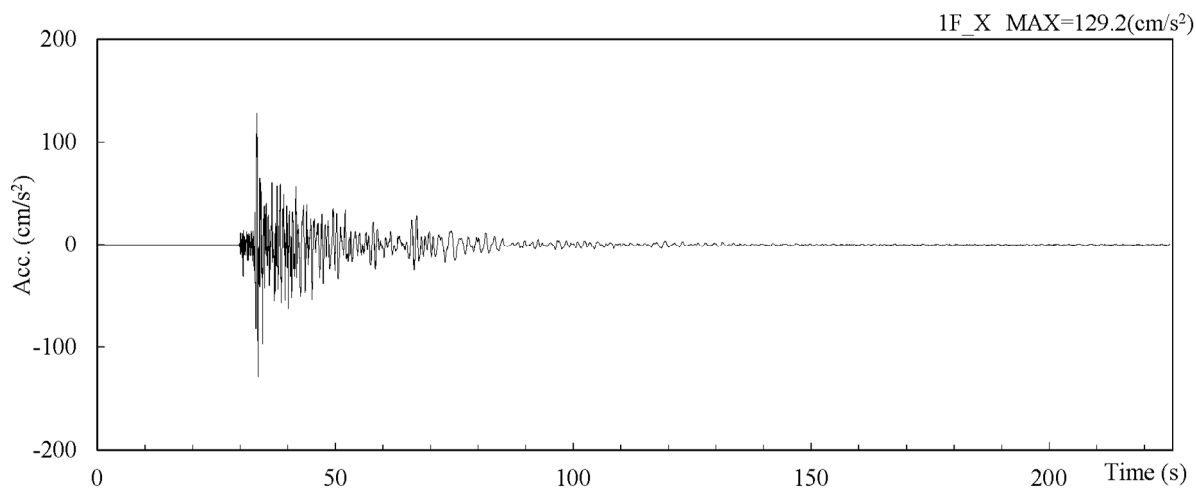
図 5.4 けがき式変位計設置状況

5.2.2 観測記録

加速度記録は午前7時58分38秒から約225秒間記録された。時刻刻みは0.01秒である。加速度観測記録を図5.5から図5.7に示す。1階床上の加速度と比較し2階床下ではX方向で56%、Y方向で36%に低減した免震効果が確認できる。なお、Z方向では131%程度に増幅しており、計測震度としては1階で震度5弱(4.8)、2階で震度4(4.3)となる。ただし、図5.8に示すようにZ方向成分の数值は大きいものの短周期であり、免震効果としてはXY方向2階での周期1秒以下の低減が顕著であることから充分発揮されたといえる。

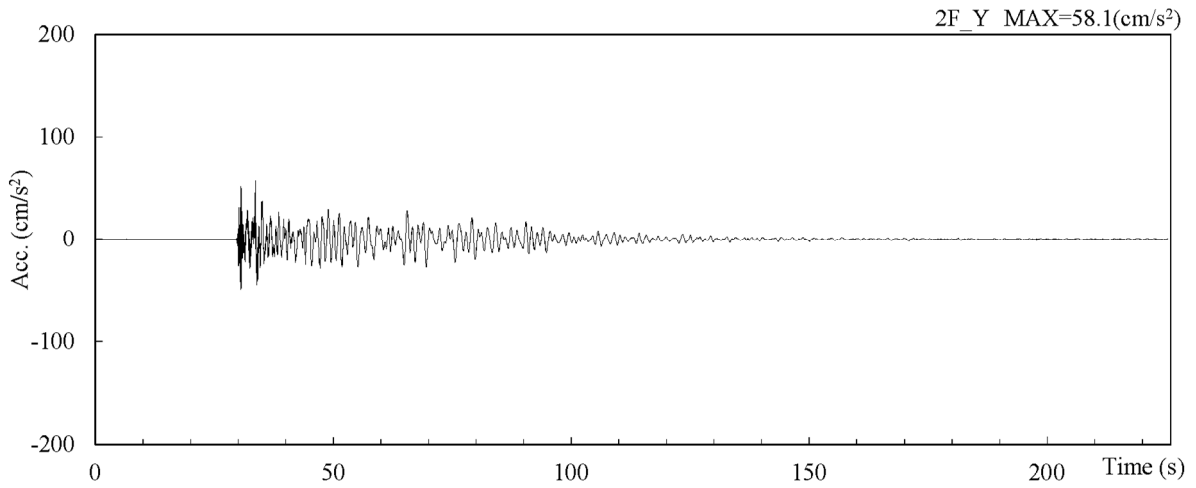


(a) 2階

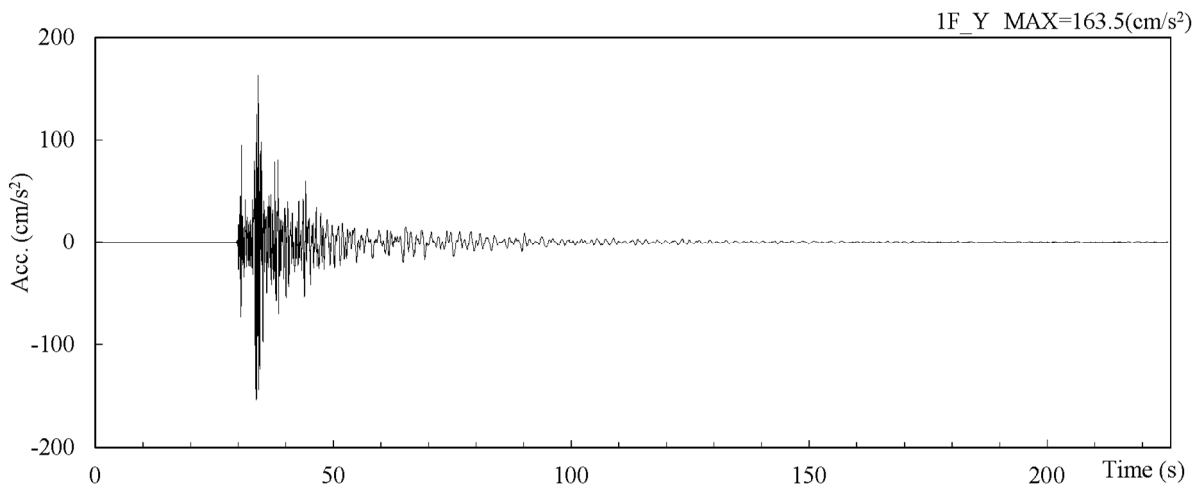


(b) 1階

図 5.5 加速度観測波形 (X方向)

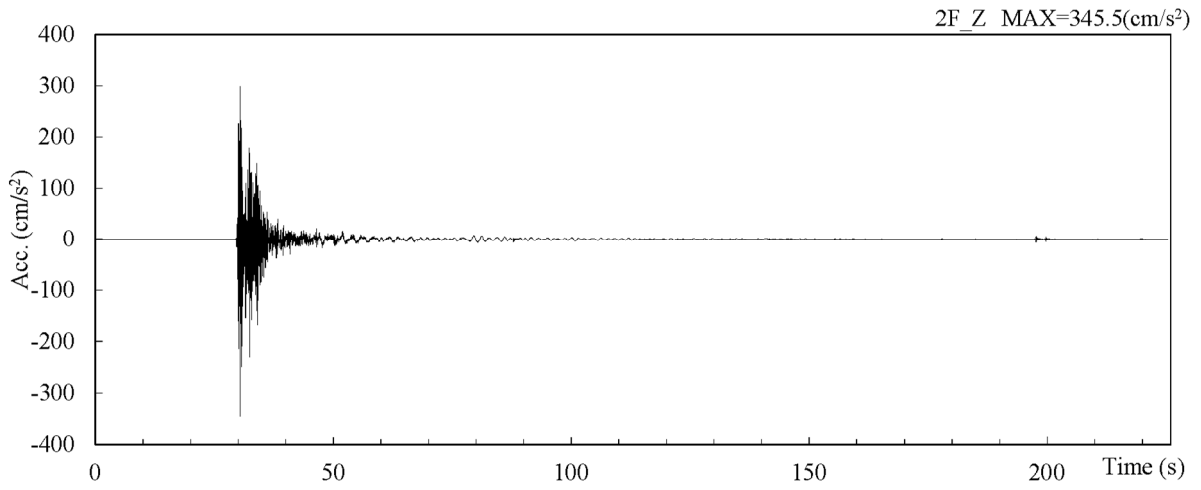


(a) 2階

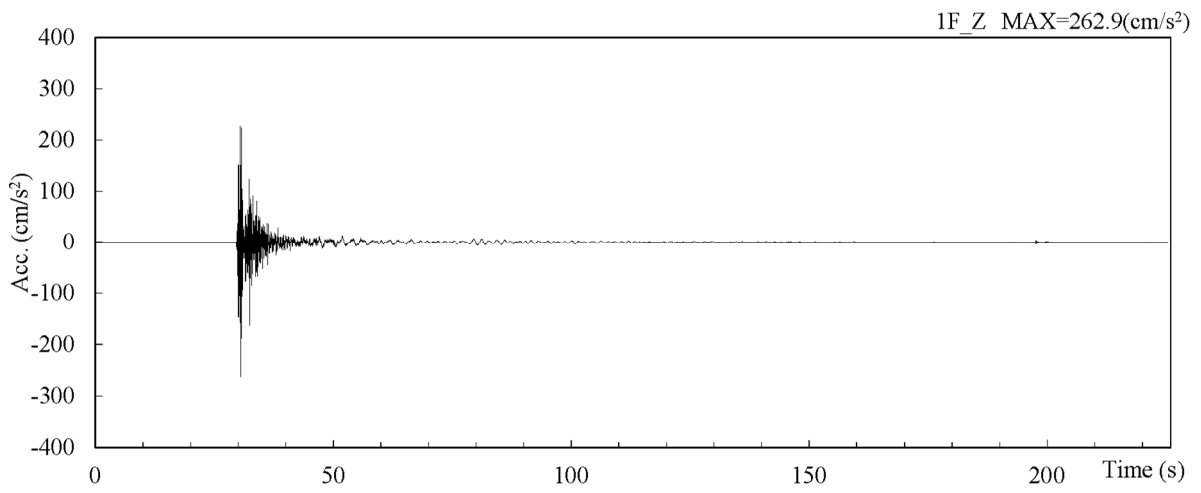


(b) 1階

図 5.6 加速度観測波形 (Y方向)



(a) 2階



(a) 1階

図 5.7 加速度観測波形 (Z方向)

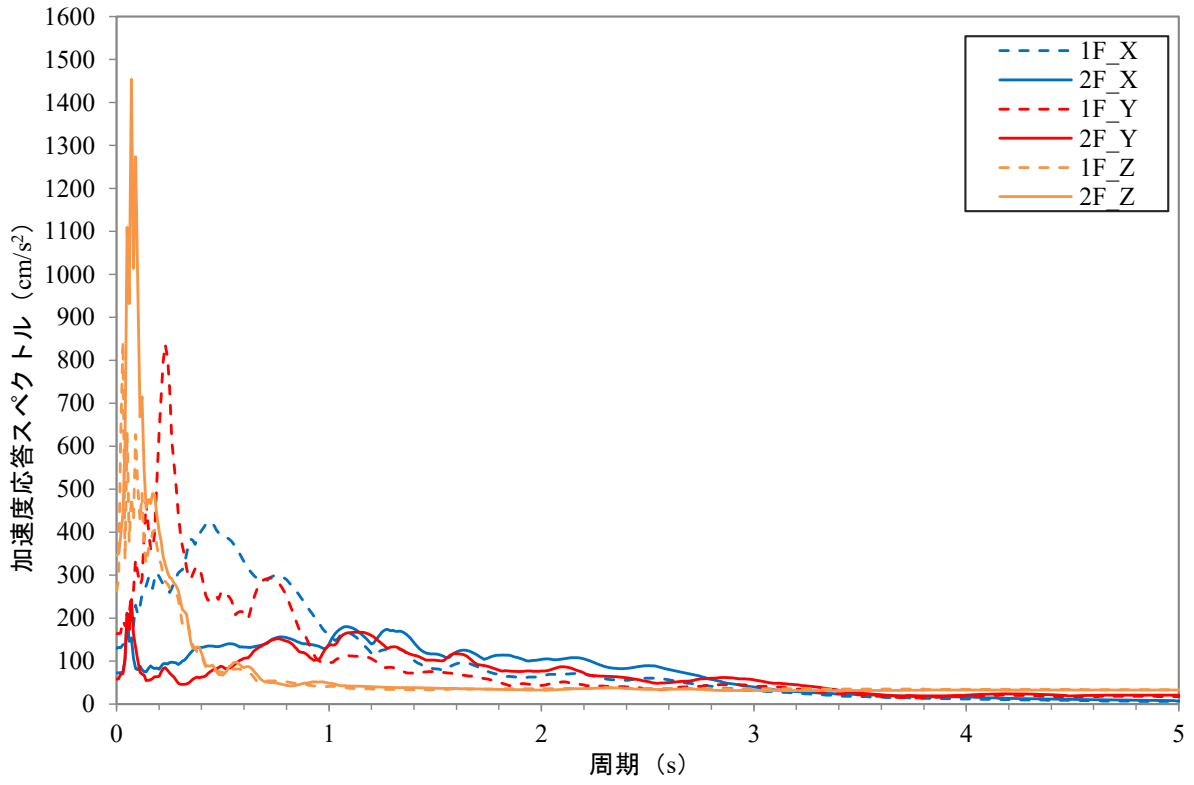


図 5.8 加速度応答スペクトル (h=5%)

けがき板の記録を図 5.9 に示す。けがき板はステンレス板に直接傷を描くタイプで、十字の基準線と半径 50mm 刻みの同心円が描かれており、地震では最大で片振幅約 32mm の楕円状の軌跡が描かれた。最大振幅の軌跡は写真のとおり途切れながら描かれており、上下動の影響と考えられる。

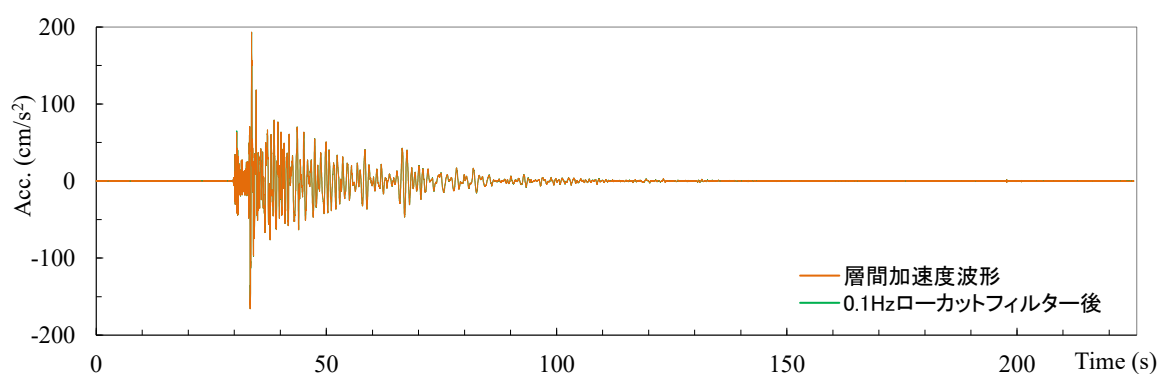


図 5.9 けがき式変位計のけがき板記録

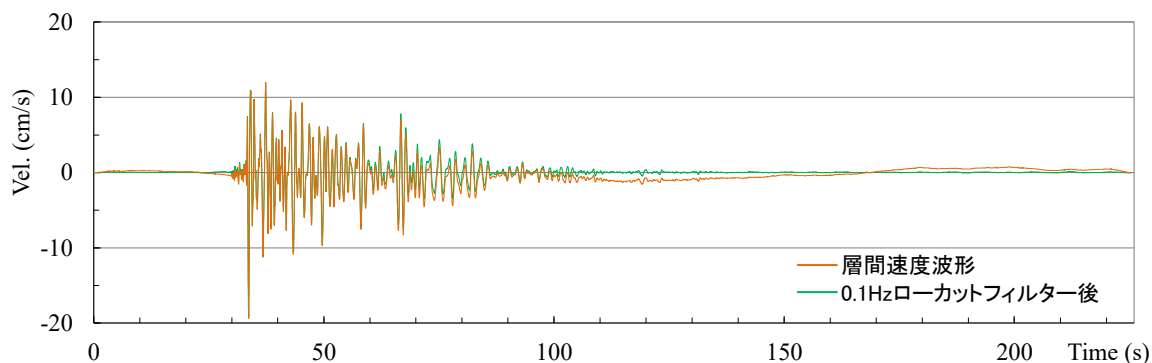
5.2.3 加速度記録とけがき板記録との対応性

観測記録を用いたシミュレーション解析に先立ち、観測された加速度波形から不要なノイズ等除去するために加速度記録とけがき板記録の対応性を検討する。検討は、観測加速度記録の上下階の差分を2階積分することで得られる変位記録とけがき板の変位記録を比較することで行い、得られた補正方法からシミュレーション解析に使用する1階床の入力加速度波形を求める。

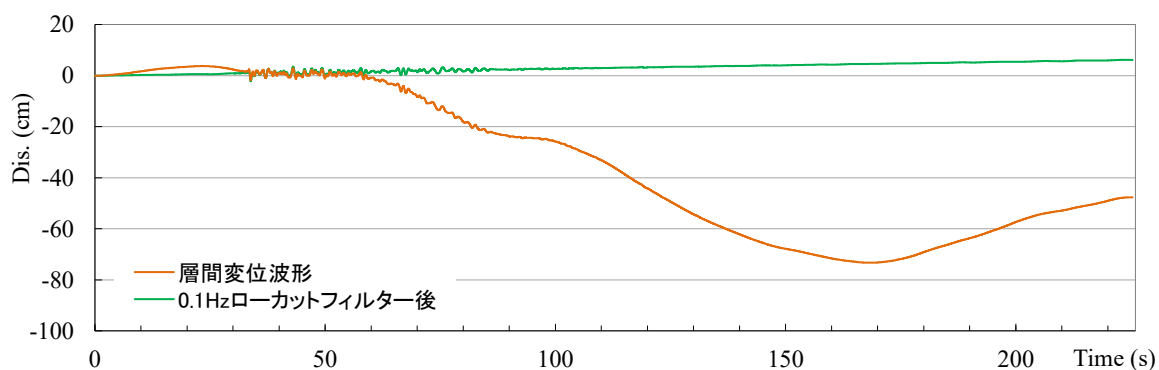
観測された加速度記録から、免震層上下の層間加速度（差分）、およびそれを平均加速度法により積分して得られる速度および変位波形を図 5.10 および図 5.11 に橙色で示し、けがき板記録写真と軌跡の重ね合せを図 5.12 に橙色で示す。速度波形には基線に対し数 10 秒から 100 秒程度の長周期（低振動数）ノイズが見られ、変位は実際の残留変位が 0.2cm 程度であったのに対して大きく発散している。このノイズを除去するため加速度波形に対し 0.1Hz のローカットフィルター処



(a) 層間加速度波形



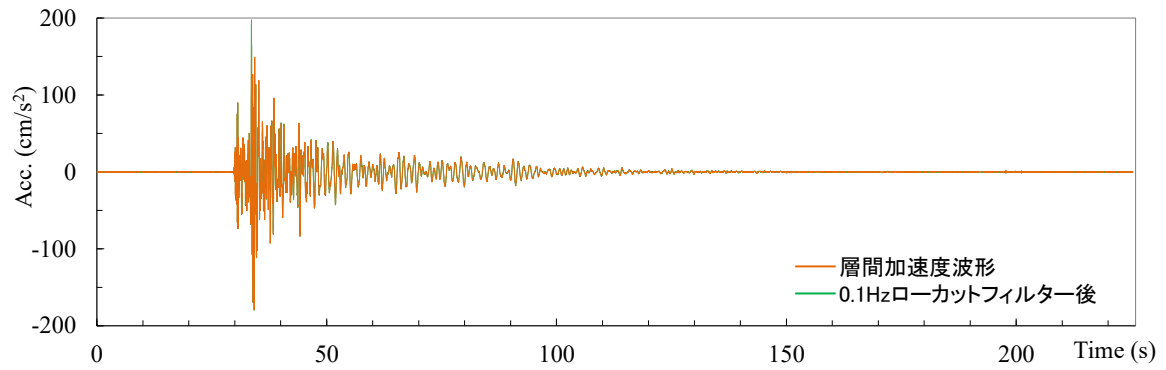
(b) 層間速度波形



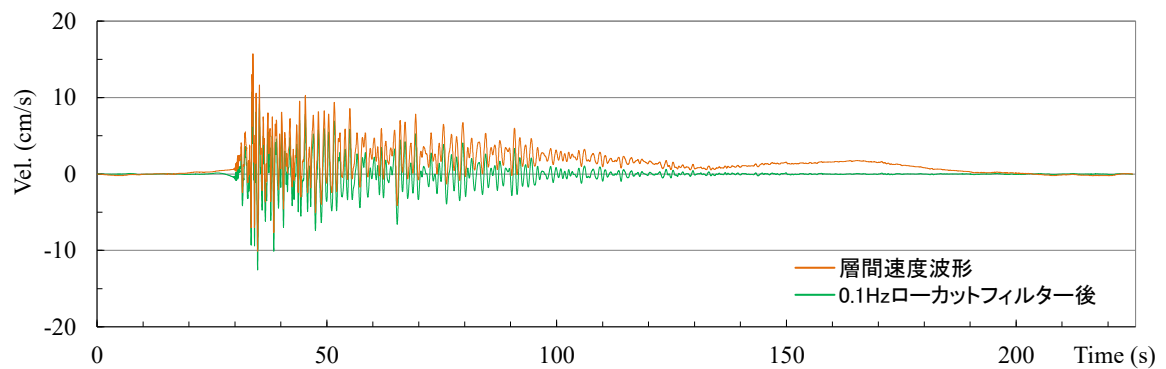
(c) 層間変位波形

図 5.10 X 方向積分波形（補正前）

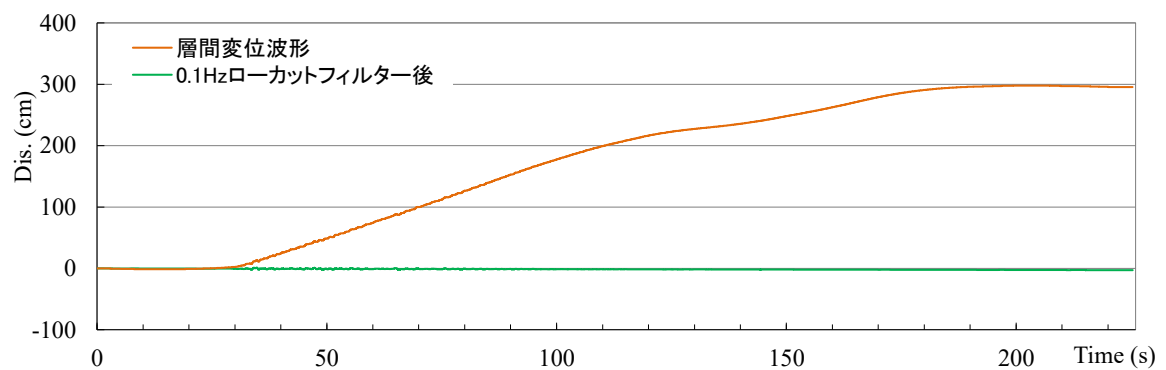
理を行った。フィルター特性は、振動数 $f < 0.1\text{Hz}$ においてフーリエ振幅=0.0 とし、0次における振幅（加速度時刻歴の平均値）も 0.0 とした。フィルター処理後の加速度、速度、変位および軌跡を図 5.10、図 5.11 および図 5.12 に緑色で示す。速度波形の長周期ノイズは除去されたが、依然として変位波形に1次関数状の基線の傾斜が確認でき、図 5.12 に濃灰で示される実際の軌跡との対応は悪い。



(a) 層間加速度波形



(b) 層間速度波形



(c) 層間変位波形

図 5.11 Y方向積分波形（補正前）

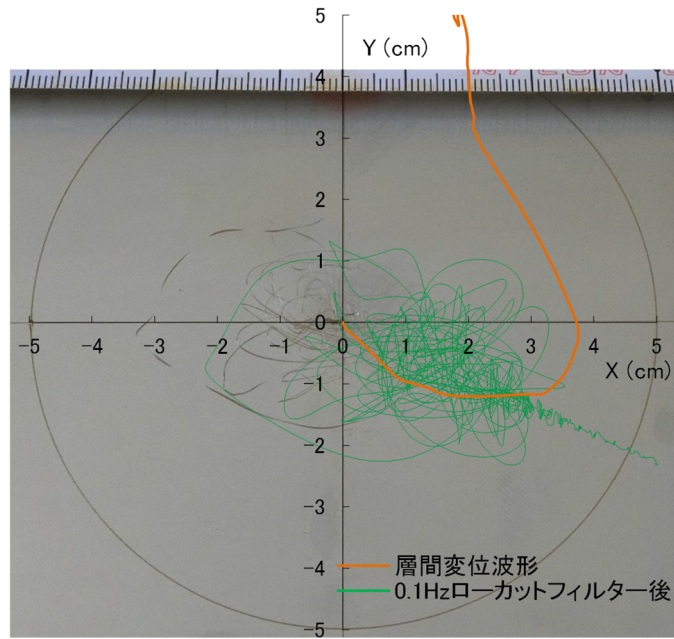
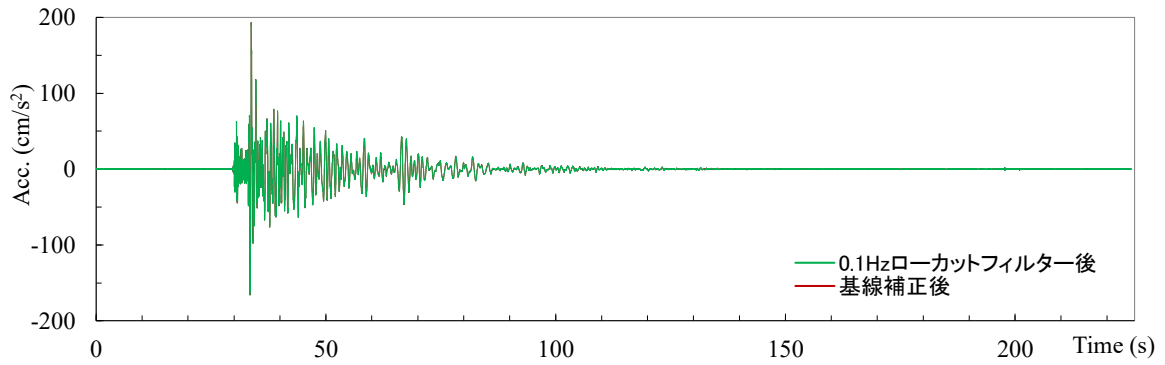
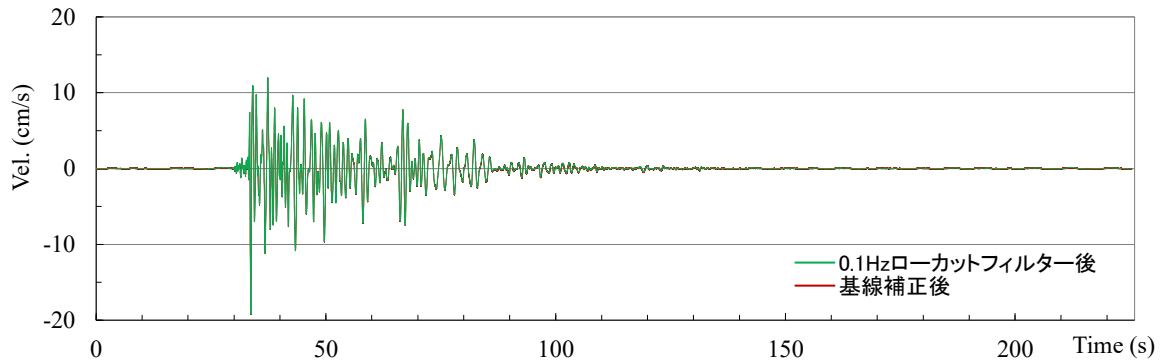


図 5.12 けがき板記録写真と軌跡の重ね合せ（補正前）

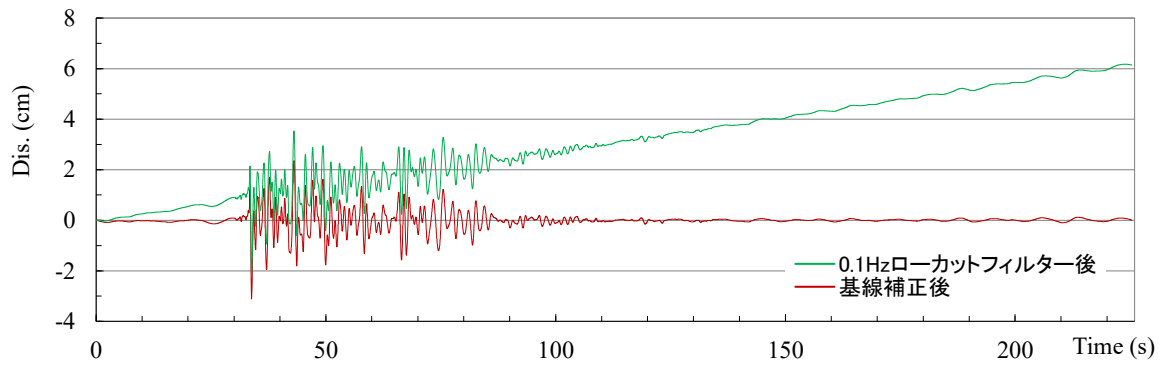
変位波形における基線の傾斜を補正するため初期速度 $V_0(x)=0.0272(\text{cm/s})$, $V_0(y)= - 0.0124(\text{cm/s})$ となる加速度を0~1秒間に加えた加速度およびそれを積分した速度, 変位および軌跡を, 図 5.13, 図 5.14 および図 5.15 に赤色で示す. 速度波形, 変位波形ともに安定しており, けがき記録との対応も概ね良好となった.



(a) 層間加速度波形

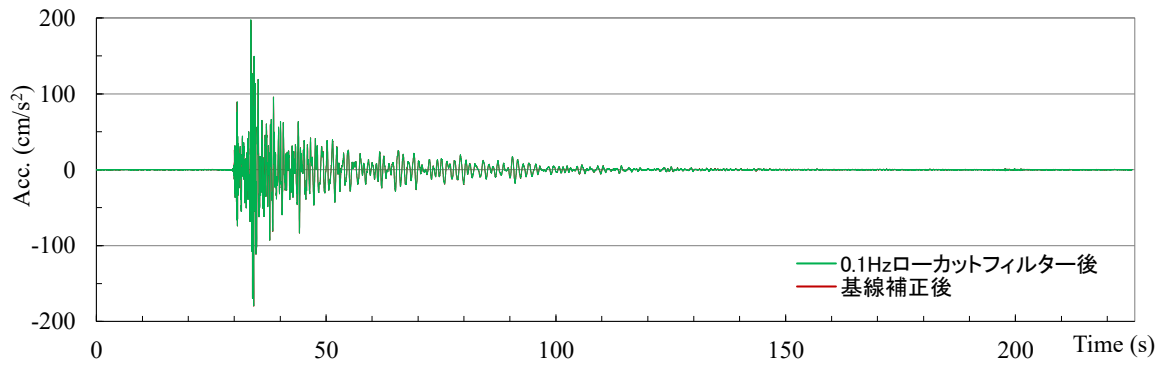


(b) 層間速度波形

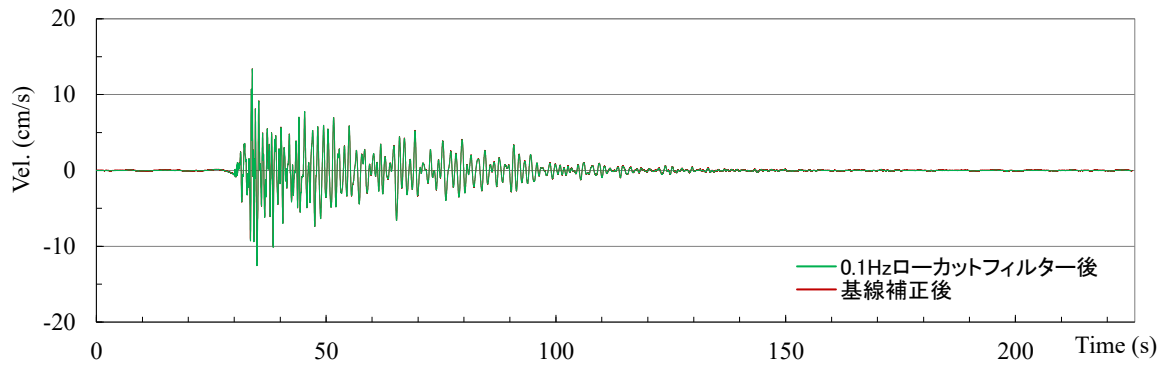


(c) 層間変位波形

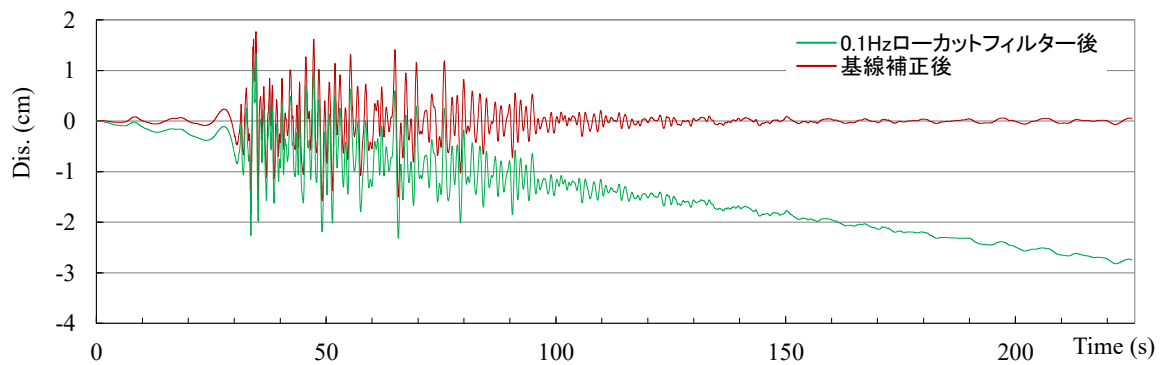
図 5.13 X方向積分波形 (補正後)



(a) 層間加速度波形



(b) 層間速度波形



(c) 層間変位波形

図 5.14 Y 方向積分波形 (補正後)

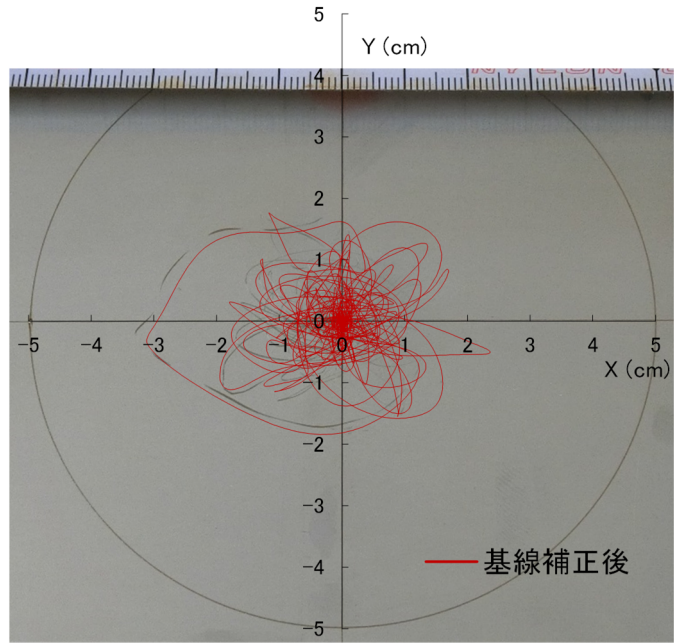
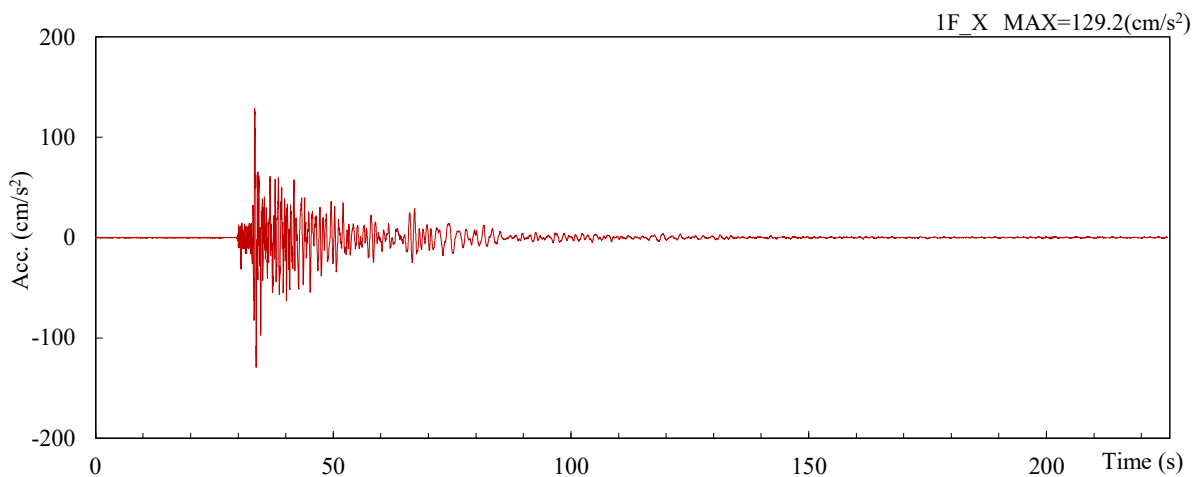


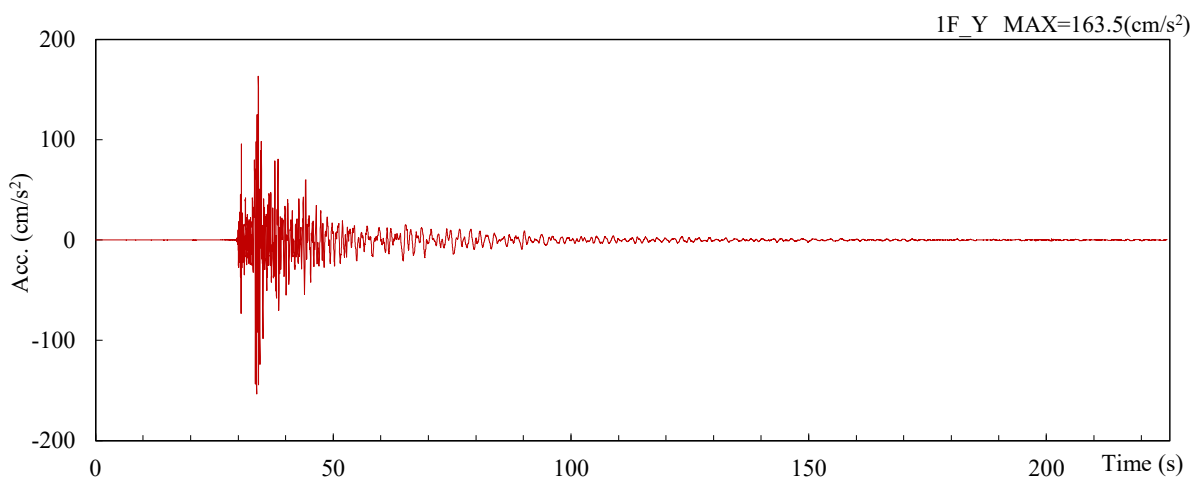
図 5.15 けがき板記録写真と軌跡の重ね合せ（補正後）

5.2.4 建物への入力地震動

得られた1階床の加速度波形を図5.16に示す。補正の数値としては最大 0.047cm/s^2 と僅かであり、観測記録(図5.5, 5.6)と比較して最大加速度も 0.1cm/s^2 未満の変化であるが、変位記録と整合の取れた加速度記録であり次節のシミュレーション解析ではこの加速度波形を建物への入力地震動として扱った。



(a) 1階床X方向(補正後)



(b) 1階床Y方向(補正後)

図5.16 建物への入力地震動

5.3 シミュレーション解析

本節では、前節で得られた1階床の観測加速度を建物の解析モデル（動摩擦解析モデルおよび静摩擦解析モデル）に入力し、解析モデルを介して得られる2階床の応答加速度を求め、2階床下面での観測記録と比較する。さらに、1階床および2階床の応答変位を求め、その相対変位とけがき記録を比較することにより、設計手法の妥当性を検証する。

5.3.1 地震時の復元力特性

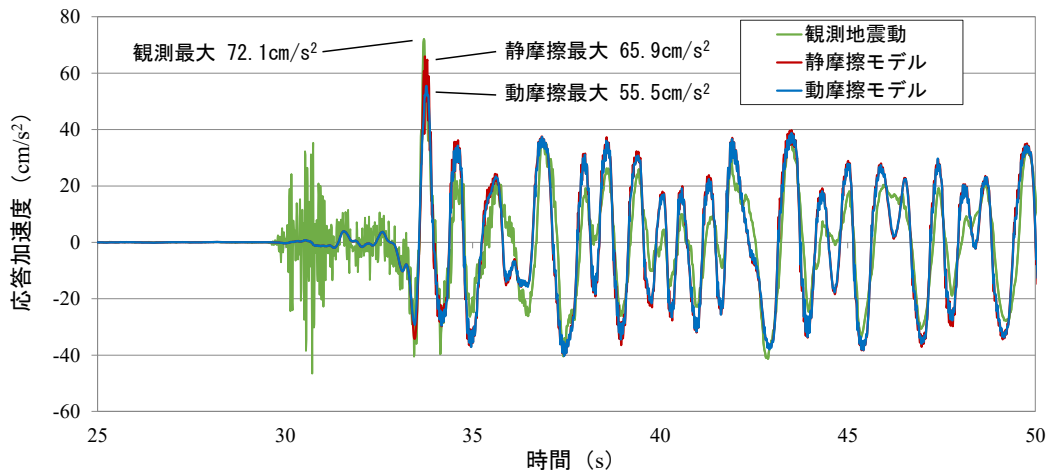
通常、免震建物の設計では、免震部材の復元力特性に製造ばらつきや気温等による性能変動が考えられるため、Hard, Normal, Soft の3つのケースにて解析を行い、最も応答層せん断力や応答変位が大きいケースでも安全となるように設計する。本節では、建物施工時の免震部材の製造ばらつきや地震発生時の気温などが既知であるため、免震部材の復元力特性の性能変動を特定した解析を行う。納入前製品検査での性能試験結果によると、高減衰ゴム系積層ゴム支承は等価水平剛性-2.7%、等価減衰定数+3.4%、オイルダンパーは等価水平剛性-2.1%の製造ばらつきであり、観測地震動の振幅や応答速度に合わせた復元力特性を設定した。弾性すべり支承の復元力特性も納入前製品検査での性能試験結果を用い、一次剛性を+1.3%、摩擦係数を-22.1%と設定した。待機時間は建物の水平加力実験（第2章）終了時（2017.2.3 16:51）から地震観測時（2018.6.18 7:58）までの 4.32×10^7 秒とし、気温は最寄りの気象庁観測所^{5.7)}における16°Cとして式(3.9)に代入し、静摩擦係数は0.0248とした。なお、今回の検討では免震EXP.Jや耐火目地材など仕上げ材による摩擦抵抗は見込んでいない。

5.3.2 時刻歴応答解析結果

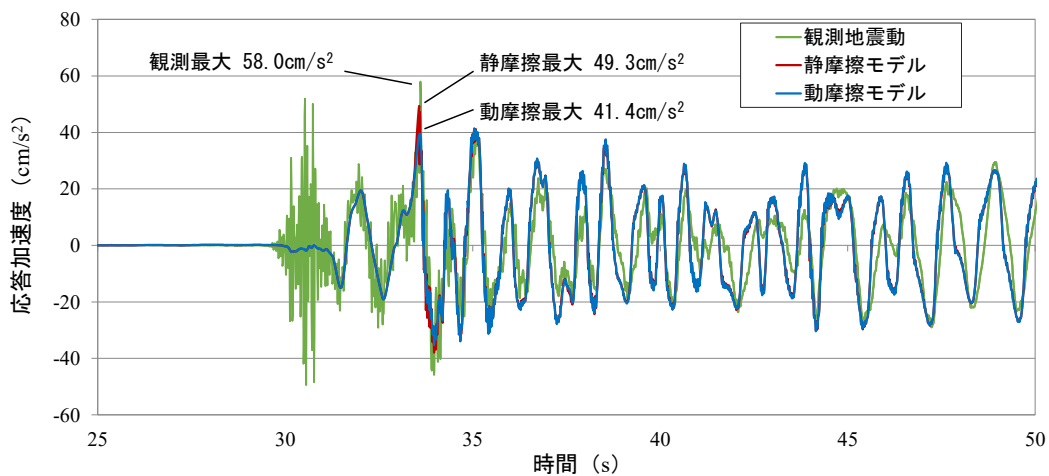
(a)X（東西）方向および(b)Y（南北）方向における応答加速度と地震観測記録の比較を図 5.17 に示す。(a)(b)ともに、加速度観測記録の上に静摩擦モデルおよび動摩擦モデルの解析結果を重ねて示している。観測記録と解析結果の違いは主に以下の2点である。

- (1) 観測記録の 30～33 秒程度に短周期の応答が見られる
- (2) 33～34 秒での観測記録の最大応答値が大きい

短周期の応答は、地震初動時の P 波の影響によるものと考えられる。当該建物は震源（深さ約 13km）^{5.8)} からほぼ真南（ $\approx Y+20^\circ$ ）約 15km に位置し、図 5.18 に示す 1 階床の入力（観測）加速度からもわかるように、地震の初動時 30～32 秒程度で到達した P 波は、鉛直動ではなく幾分かの角度をもって入力されたと考えられる。この P 波が建物の微振動となり図 5.19 に示すように免震層固定時の 1 次固有周期に近い 20Hz 弱の応答となって 2 階床下の観測加速度に表れたと考えられる。解析では、図 5.18 の X,Y 方向の加速度は入力したため水平成分の入力だけでは 2 階床応答への影響が小さかったものと考えられるが、いずれにしても建物の応答せん断力や応答変位に対する影響は小さいものと考えられる。また、最大応答加速度の増大は次節にて述べる。



(a) X（東西）方向加速度



(b) Y（南北）方向加速度

図 5.17 応答加速度と地震観測記録の比較

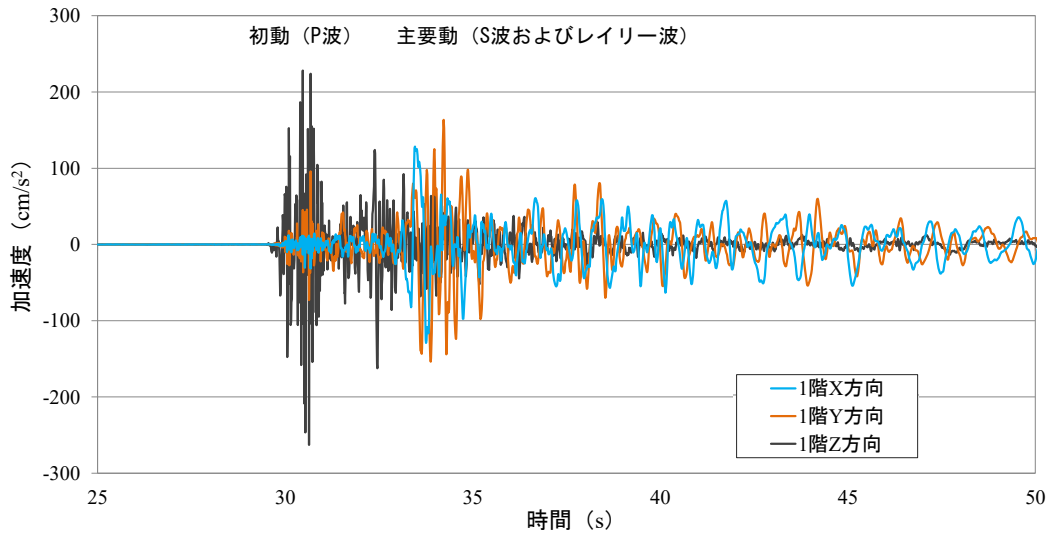


図 5.18 1 階床入力加速度

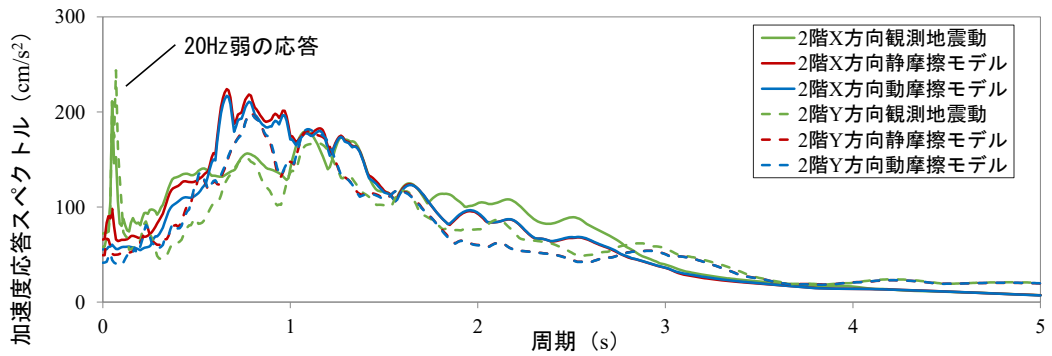


図 5.19 加速度応答スペクトル (h=5%)

5.3.3 設計法の妥当性検証

最大応答加速度の増大は、弾性すべり支承の静摩擦係数が待機時間により増大したためと考えられる。実際に、動摩擦モデルと静摩擦モデルでのすべり出し変位は 12mm と 35mm 程度であるが、今回の地震（最大変位約 32mm）後に調査したところ弾性すべり支承のすべり面に滑動の痕跡はなく、すべり面が凝着により滑動しなかったと考えられる。最大応答加速度は、観測値と比較して動摩擦モデルではその比が 0.70~0.77 倍程度であるのに対し、静摩擦モデルでは 0.85~0.92 倍であり、静摩擦モデルでの解析結果が実際の観測記録により近い結果となった。静摩擦モデルでもやや低めの結果となった要因としては、高減衰ゴム系積層ゴム支承の 2 方向加振^{5.9) 5.10)}の影響や免震層の仕上げ材等による摩擦抵抗が考えられる。また、図 5.20 は、建物に設置したけがき板の写真に解析結果を重ねたものであり、濃灰で写るけがき記録よりも解析結果は全体的に Y 側に偏りがあるものの、図 5.15 に示す軌跡が入力地震動であると考えれば概ね地震観測記録をよく再現しており、静摩擦モデルでの解析結果が実際の観測記録とよく対応していると考えられる。

以上から、第 4 章にて提案した式および解析モデルは概ね実際の地震動を再現可能なものであり、地震波の種類によって応答せん断力や応答変位が最大になるモデルが変わるため、動摩擦モデルと静摩擦モデルの両方のモデルにて解析を行い、最も大きい応答値で設計する手法は妥当であると考えられる。ただし、今回の地震動では、質点系平面モデルでの XY 両方向の記録の重ね合わせにより検証したが、平面解析の重ね合わせでは斜め加力による影響を考慮できない。今回は滑動しなかったが、より精確に軌跡を再現するには立体モデルでの解析が必要と考えられる。また、建物の免震層に仕上げ材等による摩擦抵抗が考えられる場合は、その抵抗を地震動の初期に考慮しておくことがより安全と考えられ、その評価については今後の課題である。

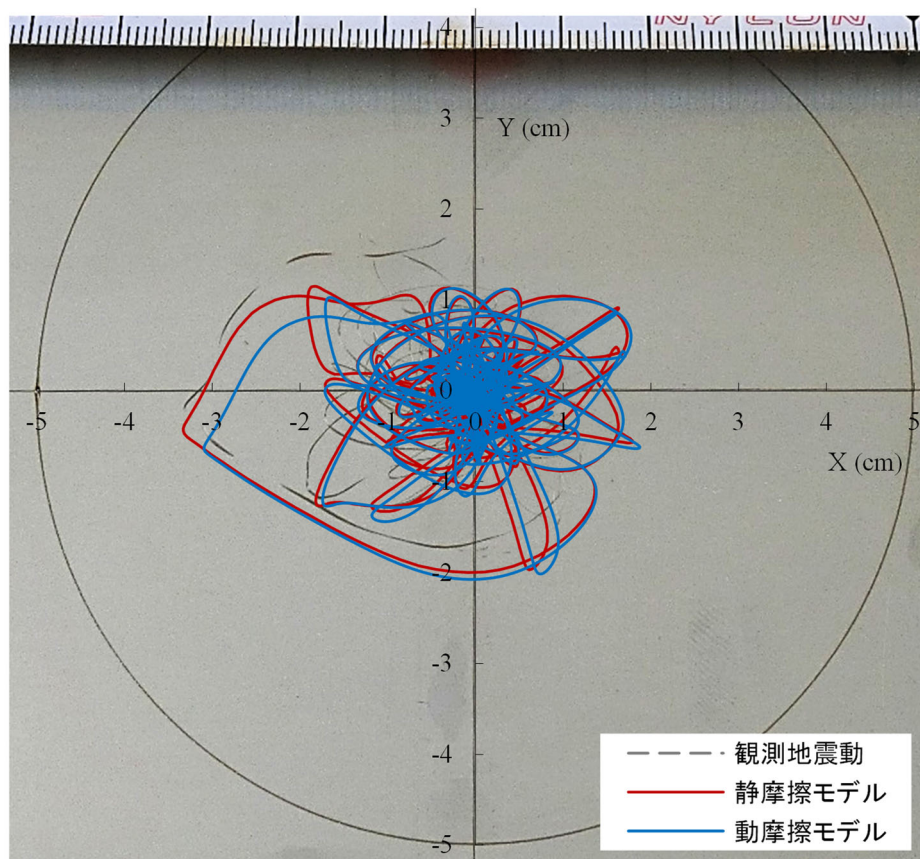


図 5.20 応答変位と地震観測記録の比較

5.4 まとめ

2018年に発生した大阪府北部を震源とする地震にて得られた観測記録を用いて、第3章にて提案した静摩擦係数と待機時間の関係式により、第4章で開発したプログラムに静摩擦モデルの復元力特性を設定し、シミュレーション解析を行った。弾性すべり支承を静摩擦モデルとした実際の地震での加速度記録や変位記録との対応性を示すことで、第4章にて提案した設計手法の妥当性を示した。本章にて得られた知見を以下に示す。

- 1) 観測した加速度記録の中には不要な長周期(低振動数)ノイズが含まれていると考えられ、ローカットフィルター処理および基線補正を行うことで、実際の変位記録であるけがき式変位計の記録との良い対応がみられた。
- 2) 補正した加速度記録を建物の設計モデル(動摩擦モデル)に入力すると概ね設計との整合がみられたが、地震動初期の短周期振動、加速度の最大応答値に違いがみられた。短周期振動はP波の影響、最大加速度は弾性すべり支承の凝着の影響と考えられる。
- 3) 地震動を建物の解析モデル(静摩擦モデル)に入力し、その応答と観測記録を比較した結果、提案式および解析モデルは概ね実際の地震動を再現可能なものであり、第4章で述べたように地震波の種類により静摩擦係数を考慮すると応答せん断力や応答変位が変わるため、動摩擦モデルと静摩擦モデルの両方で解析し、最も大きい応答値で設計する手法は妥当であると考えられる。

参考文献

- 5.1) Bridgestone: Elastic Sliding Bearing (Low Elasticity Type) Performance Evaluation report, The Building Center of Japan, 2013 (in Japanese)
ブリヂストン：弾性すべり支承（低弾性タイプ）性能評価書，日本建築センター，2013
- 5.2) Architectural Institute of Japan: Recommendation for the Design of Seismically Isolated Buildings, Maruzen Publishing, pp.302-304, 2013 (in Japanese)
日本建築学会：免震構造設計指針，丸善出版，pp.302-304，2013
- 5.3) Hiroshi MATSUKAWA: Physics of Friction, Iwanami Syoten, 2012 (in Japanese)
松川宏：摩擦の物理，岩波書店，2012
- 5.4) Ichiro NAGASHIMA, Masayoshi HISANO, Hideki FUNAHARA: Slide bearing method Seismic isolation building confirmation experiment of aging characteristics, TAISEI Technical Research Institute Report Vol.30, pp.131-134, 1997 (in Japanese)
長島一郎，久野雅祥，船原英樹：すべり支承方式免震建物の経年変化特性の確認実験，大成建設技術研究所報，第30号，pp.131-134，1997
- 5.5) Hiroki HAMAGUCHI, Masahiko HIGASHINO, Shigeo MINEWAKI, Masashi YAMAMOTO, Takuya ISHII: Aged Deterioration in the Coefficient of Friction of Sliding Bearings, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures- II, pp.645-646, 2001 (in Japanese)
浜口弘樹，東野雅彦，嶺脇重雄，山本雅史，石井卓哉：すべり支承の摩擦係数の経年変化，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造II，pp.645-646，2001
- 5.6) Takafumi MIYAMA, Shinsuke INAI, Keiji MASUDA, Takashi KATO: A Study on the Aged Adhesion of the Sliding Bearing under the Axial Stress. Part2, The characteristic of Sliding Bearing of 3-years progress, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures- II, pp.1047-1048, 2007 (in Japanese)
三山剛史，稲井慎介，増田圭司，加藤貴司：面圧を加えた滑り免震支承における摩擦係数の経年変化に関する研究 その2 3年経過時のすべり支承特性について，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造II，pp.1047-1048，2007
- 5.7) Japan Meteorological Agency: Search past weather data, Ikoma Observatory, Osaka, (accessed 2022.5.16) (in Japanese)
気象庁：過去の気象データ検索，大阪府生駒観測所，気象庁 HP（参照 2022.5.16）
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 5.8) Japan Meteorological Agency: Seismic intensity database search, 2018/06/18 Maximum seismic intensity 4 or more, (accessed 2022.07.25) (in Japanese)
気象庁：震度データベース検索，2018/06/18 最大震度4以上，気象庁 HP（参照 2022.07.25）
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html>
- 5.9) Takahiro KAKINUMA, Haruyuki KITAMURA, Toshiaki SATO, Hideaki KATO, Takahiro MORI, Sachie KOTSUKI, Kenji NAKANISHI: Proposal of a Method for Evaluating Torsional Stress for High-Damping Rubber Bearings Based on Horizontal Bi-Directional Loading Tests, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 80, No.713, pp.1091-1101, 2015 (in Japanese)
柿沼貴博，北村春幸，佐藤利昭，加藤秀章，森隆浩，小槻祥江，中西啓二：水平2方向加振

試験による高減衰積層ゴムの捩れ応力に基づく捩れ歪の評価方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 卷, 第 713 号, pp.1091-1101, 2015

(DOI: <https://doi.org/10.1080/00018730600732186>)

- 5.10) Masaru KIKUCHI, Masaki UHARA, Kazutaka SHIRAI, Masashi YAMAMOTO and Yoritaka SASAKI: Horizontal Bidirectional Mechanical Properties of High-Damping Rubber Bearings Considering Twist Shear Strain, Journal of Structural Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 61B, pp.471-480, 2015 (in Japanese)

菊地優, 鶴原正樹, 白井和貴, 山本雅史, 佐々木頼孝: ねじれひずみを考慮した高減衰積層ゴムの水平 2 方向復元力特性評価, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.61B, pp.471-480, 2015

第 6 章

結論

第6章 結論

6.1 研究のまとめ

本論文は、弾性すべり支承における静摩擦係数およびその待機時間依存性を考慮した免震建物の構造設計法に関する研究についてまとめたものである。ここで、待機時間とは、2つの物体が接触または静止してから次に滑動するまでの時間のことである。

第1章では、序論として本研究の背景と目的を示した。免震建物の地震応答解析において弾性すべり支承の復元力特性は、面圧や速度などの各種依存性を考慮して設定される。しかし、静摩擦係数およびその待機時間依存性については明らかにされていないことから、現状の実施設計では一定値の摩擦係数（動摩擦係数に対応している）が用いられている。したがって、免震建物が建設され、何年後に遭遇するか分からない地震時に想定通りの優れた構造性能を発揮するためには、静摩擦係数の待機時間依存性に対する考え方を明確にすることは重要であり、弾性すべり支承の経年を考慮した免震建物の設計手法を確立することを本研究の目的とすることを述べた。

第2章では、本研究着手の発端となった免震建物（以下、モデル建物）の水平加力実験について述べた。実験の結果、設計時に用いた復元力特性から推定される水平力よりも大きな水平力を要した荷重-変位関係が得られ、その原因と建物への影響について考察し、本研究の課題を示した。

第3章では、弾性すべり支承の静摩擦係数の待機時間による変化を定量的に把握することを目的とした実験について述べた。試験体（合計12体）は、弾性すべり支承に使用されるすべり材（PTFE材）とすべり板（PTFEコーティングステンレス板）を接触させて組み立てたものであり、所定の面圧を加えた状態で養生した。面圧は3水準に変化させた。所定の時間経過した後、試験体を加力装置に設置して水平力を載荷し、静摩擦係数を計測した。得られた実験データに基づいて、待機時間、面圧および気温を変数とした重回帰分析を行い、弾性すべり支承の静摩擦係数を求める算定式を提案した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 弾性すべり支承の静摩擦係数について、待機時間の対数に比例し、面圧のべき乗および気温の2次関数に依存する関係式を提案した。提案式による計算値は実験値とよく対応することを示した。

第4章では、免震建物の実施設計において、面圧、気温に加えて、静摩擦係数の待機時間による増大を考慮するための設計手法を提案した。まず、第3章で示した提案式を使用する際の考え方と復元力モデル例を示した。次に、既往のプログラムでは静摩擦係数を考慮した解析ができなため静摩擦モデルを有するプログラムを開発した。従来のバイリニア型の動摩擦モデルでの応答および提案式を用いた待機時間による静摩擦係数の増大を考慮した静摩擦モデルでの応答について、モデル建物を対象として開発プログラムを用いた解析を行い、提案した設計手法を用いた場合の応答への影響を示した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 従来の動摩擦係数のみではなく、静摩擦係数による摩擦機構を有する解析モデルを組み込んだ解析プログラムにて試解析を行ったところ、弾性すべり支承の挙動を再現した解析が可能である。
- 2) 対象建物で動摩擦モデルと静摩擦モデルにて応答解析を行った結果、本建物では建物としての最大応答値は動摩擦モデルでの応答であったが、地震波の種類によって、動摩擦モデルでの応答層せん断力および変位よりも静摩擦モデルでの応答が大きくなる場合があり、正確に応答を把握するためには本章で提案した静摩擦係数を考慮した設計手法の適用が必要であると考えられる。
- 3) 面圧に依存する提案式を用いることで、弾性すべり支承の基数分を個別にモデル化した応答と、まとめて1つの復元力特性としてモデル化した応答との差は小さくなるため、本研究の範囲では後者のモデル化は妥当であると考えられる。

第5章では、2018年に発生した大阪府北部を震源とする地震において得られたモデル建物の地震観測記録を用いてシミュレーション解析を行い、第4章にて提案した設計手法の妥当性を検証した。まず、得られた地震観測記録を分析し、加速度記録とけがき板の変位記録との対応性を検討した。その結果得られた建物1階の入力地震動を設計モデルに入力し、2階床位置での加速度応答値と観測記録の比較、および免震層上下の設計相対変位とけがき板記録の比較により設計手法等の妥当性を検証した。本章にて得られた知見を以下に示す。

- 1) 観測した加速度記録の中には不要な長周期(低振動数)ノイズが含まれていると考えられ、ローカットフィルター処理および基線補正を行うことで、実際の変位記録であるけがき式変位計の記録との良い対応がみられた。
- 2) 補正した加速度記録を建物の設計モデル(動摩擦モデル)に入力すると概ね設計との整合がみられたが、地震動初期の短周期振動、加速度の最大応答値に違いがみられた。短周期振動はP波の影響、最大加速度は弾性すべり支承の固着の影響と考えられる。
- 3) 地震動を建物の解析モデル(静摩擦モデル)に入力し、その応答と観測記録を比較した結果、提案式および解析モデルは概ね実際の地震動を再現可能なものであり、第4章で述べたように地震波の種類により静摩擦係数を考慮すると応答せん断力や応答変位が変わるため、動摩擦モデルと静摩擦モデルの両方で解析し、最も大きい応答値で設計する手法は妥当であると考えられる。

各章で得られた知見を総括すると、弾性すべり支承は、これまで動摩擦係数を用いたバイリニア型の復元力特性である動摩擦モデルにて設計されている。しかし、待機時間により静摩擦係数は増大し、地震時の最大加速度応答および最大変位応答に影響を与える場合があることを明らかにし、静摩擦係数の増大による静摩擦荷重の立上りを考慮した構造設計法を提案した。設計では、地震応答解析により最大応答値を求める際に、動摩擦モデルに加えて開発したプログラムを用いた静摩擦モデルを用い、静摩擦係数は提案式により求める。このように設計することで、建設後いつ遭遇するか分からない地震時に想定通りの優れた構造性能を発揮できるものとする。

6.2 今後の課題

本研究では、定量的な把握のための試験体はモデル建物で使用した免震部材のものを用いた。しかし、低摩擦タイプの弾性すべり支承は同じ PTFE 材と PTFE コーティングステンレス板でも複数のメーカーが認定を取得しており、また今後の需要が見込まれるため改良も考えられ、仕様が異なれば関係式も変化すると考えられる。そのため、性能評価の評価項目として待機時間依存性の影響評価を加えられることが望ましいと考える。本研究がその参考となり、免震構造が更に発展する一助となれば幸いである。

研究実績

【査読付き論文】

- 1) 吉田康弘, 山崎久雄 : 待機時間依存性を考慮した弾性すべり支承の静摩擦係数が建築物の地震時応答に与える影響, 日本建築学会技術報告集, 第 25 巻, 第 60 号, pp.643-648, 2019
(DOI: <https://doi.org/10.3130/aijt.25.643>)
- 2) Yasuhiro YOSHIDA, Yasuyoshi MIYAUCHI: Effect of Static Friction Coefficient of Elastic Sliding Bearings Considering Waiting Time on Building Response, Proceedings of the 17th World Conference of Earthquake Engineering, 2g-0088, 2020
- 3) 吉田康弘, 宮内靖昌 : 弾性すべり支承における静摩擦係数の待機時間依存性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 87 巻, 第 801 号, pp.1022-1027, 2022
(DOI: <https://doi.org/10.3130/aijs.87.1022>)
- 4) 吉田康弘, 宮内靖昌 : 弾性すべり支承における静摩擦係数を考慮した免震建物の設計手法について, 日本建築学会技術報告集, 第 29 巻, 第 71 号, pp.86-90, 2023
(DOI: <https://doi.org/10.3130/aijt.29.86>)

【本研究に関するその他の発表】

- 1) 吉田康弘, 今中良彦, 栗林幹夫, 江本達也 : 免震レトロフィットされた建築物の水平加力実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 構造IV, pp.247-248, 2017
- 2) 吉田康弘, 今中良彦, 栗林幹夫, 江本達也 : 大鉄免震レトロフィット工法の開発 ~仮受け方法の性能検証と建築物の水平加力実験~, (一財) 日本建築総合試験所 GBRC, Vol.42, No.4, 2017
- 3) 吉田康弘, 山崎久雄 : 2018 年大阪北部地震における免震改修建物の観測記録の再現, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 構造 II, pp.269-270, 2019
- 4) 吉田康弘, 宮内靖昌 : すべり支承における静摩擦係数の待機時間依存性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), 構造 II, pp.451-452, 2021

謝辞

大阪工業大学特任教授の宮内靖昌先生には、これまで設計、監理および施工支援業務を通じて経験してきたことを一歩進め、研究として取り組む貴重な機会をいただきました。本論文の作成にあたっては、社会人博士課程在籍の3年間だけでなく、研究の発端となった実験の指導に始まり、査読論文提出段階から本論文をまとめる段階まで、細部に亘り終始丁寧なご指導を頂きましたことをここに心から感謝いたします。また、本論文の審査においては、大阪工業大学教授馬場望先生、同教授白髪誠一先生、同准教授向出静司先生には、論文を多角的に評価、ご指導頂きましたことに深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、神戸大学大学院教授藤谷秀雄先生、大阪大学名誉教授宮本裕司先生、株式会社東京建築研究所中澤俊幸氏、ユニオンシステム株式会社山崎久雄氏、一般財団法人日本建築総合試験所安井信行氏、ブリヂストン化工品ジャパン株式会社中島陽氏には、実験の準備段階から各査読論文の執筆段階まで貴重なご助言を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

本研究にいたったのは、免震レトロフィット建物の設計や仮受け部材開発の実大実験が始まりでした。免震建物の安全審査委員会での審査や実大実験に関してお世話になり、また宮内先生とのご縁を繋いでいただいた一般財団法人日本建築総合試験所角彰氏、野村周平氏に深謝致します。また、本研究への取り組みを応援してくださり大学院進学への道を示していただいた株式会社東京建築研究所町田重美氏に深謝致します。

大鉄工業株式会社にて本論文を執筆することができましたのは、大学院進学を薦めていただきました上田信二氏はじめ江本達哉氏、藤田昌也氏、伊藤撰朗氏、開発推進でお世話になりました大池茂文氏、免震レトロフィット建物を精度よく施工していただいた今中良彦氏ほか現場関係者の皆様、業務多忙の中、本研究へのご支援ならびにご指導ご鞭撻をいただいた中野春彦氏はじめ設計部の皆様のおかげであり、厚く御礼申し上げます。

この他にも、各場面で紙面に書き尽くせないほど多くの方々からのご協力をいただきました。大阪工業大学牟礼花恵氏ほか宮内研究室の学生諸君、間瀬建設株式会社岡田和憲氏、株式会社北條建築構造研究所橋本宗明氏など、ご支援やご協力を頂きました皆様に御礼申し上げます。

最後に、これまで支えてくれた家族に感謝します。

