

3.3 「極低降伏点鋼を用いた耐震設計の研究」ワーキンググループの研究成果

3.3.1 研究概要

(1) 研究目的

履歴型のサイスミックダンパー（地震エネルギー吸収装置）を橋梁等の構造物内に組み込み、構造物全体の耐震性を向上させるという制震設計方法が注目されている。極低降伏点鋼は適度な低ひずみ特性、低降伏特性、および優れた伸び特性を有しており、履歴型ダンパー材料の一つとして、建築分野などで既に用いられている。また、極低降伏点鋼を用いた履歴型ダンパーに関する論文も、§3.3.2の文献調査で示すように相当数見受けられるが、実際に土木構造物へ適用するとすると、高度な非線形性を扱う必要があることから、未だ不明な点が多く残されている。

極低降伏点鋼のエネルギー吸収性能を明らかにするためには、目的に応じたオリジナルの材料特性を把握する必要があり、実験的研究の他にコンピュータによる3次元動的載荷シミュレーション解析などの解析的な検討も必要となる。しかし、材料特性のモデル化について詳しく検討されたものが殆どなく、特に極低降伏点鋼材の歪み速度効果についてはデータが不足している。

そこで、本WGでは、極低降伏点鋼を用いた履歴型サイスミックダンパーの基本性能を明らかにすることを目的とし、極低降伏点鋼の材料特性やエネルギー吸収性能を実験的あるいは解析的に明らかにする試みを行うことにした。また、フレームモデルによる動的応答解析を通して実橋への適応性について検討することにした。

(2) 研究概要

本WGでは、上記の目的を達成するために以下に示す4つの研究段階を設け、それぞれ半年～2年程度かけてステップ・バイ・ステップに検討を行うという研究計画を立てた。

(1) 極低降伏点鋼に関する文献調査

- ・ 極低降伏点鋼に関する文献の収集を行い、文献調査結果リストを作成する。
- ・ 各論文の分析を行い、今後検討が必要と思われる研究項目をリストアップする。

(2) 極低降伏点鋼の材料特性に関する実験的および解析的検討

- ・ 静的および動的載荷試験により極低降伏点鋼の基本的材料特性を明らかにする。
- ・ 3次元シミュレーション解析(LS-DYNA)を行い、材料特性のモデル化に関する検討を行う。

(3) 極低降伏点鋼サイスミックダンパーの動的載荷試験

- ・ 曲げ、せん断、振りの3種類の基本的変形に基づくエネルギー吸収装置を実際に設計・製作し、これらの装置に対して動的載荷実験を実施し、極低降伏点鋼を用いた履歴型サイスミックダンパーのエネルギー吸収の基本性能を明らかにする。
- ・ 上記の3種類の中から、エネルギー吸収効率の最も期待できる基本変形モードを選定する。

(4) 鋼製橋脚橋の制震対策への適応性に関する検討

- ・ 極低降伏点鋼履歴型サイスミックダンパーの実橋への適応性について、上記(3)の動的載荷試験で最も効果的であったダンパーを組み込んだ橋梁モデルを用い、プレート境界型地震と内陸直下型地震の2種類の地震波に対する動的応答解析を通して検討する。
- ・ 免震装置との比較検討を行い、それぞれの耐震性能の特徴を明らかにし、合理的な耐震・制震設計手法を探る。

3.3.2 文献調査

(1) 調査方法

極低降伏点鋼・落橋防止装置などをキーワードとして、文献調査を行った。その結果、入手することのできた50編の論文について概要を論文調査票としてまとめた。その一例を表3-3-1に示す。本報告書では、頁数の制約があるため、文献調査票をさらにまとめた要約版を示すことにし、文献調査票に関しては、添付のCD-ROMに収めることにした。なお、文献調査、および論文の入手については、東京都立大学・長嶋研究室と武蔵工業大学・皆川研究室の協力を得た。

表 3-3-1 論文調査票の一例

<p>No. 1333-1 極低降伏点鋼ダンパーに関する研究 (その1: 低サイクル疲労実験)</p> <p>出典 日本建築学会大会学術講演概要集 (北陸) 1992年8月 巻1333-1, 1333-2, 1333-3, 1333-4, 1333-5, 1333-6, 1333-7, 1333-8, 1333-9, 1333-10, 1333-11, 1333-12, 1333-13, 1333-14, 1333-15, 1333-16, 1333-17, 1333-18, 1333-19, 1333-20, 1333-21, 1333-22, 1333-23, 1333-24, 1333-25, 1333-26, 1333-27, 1333-28, 1333-29, 1333-30, 1333-31, 1333-32, 1333-33, 1333-34, 1333-35, 1333-36, 1333-37, 1333-38, 1333-39, 1333-40, 1333-41, 1333-42, 1333-43, 1333-44, 1333-45, 1333-46, 1333-47, 1333-48, 1333-49, 1333-50</p> <p>要旨 極低降伏点鋼を用いたダンパーのせん断降伏型制振部材の低サイクル疲労特性を明らかにするための実験を行い、その履歴特性や低サイクル疲労載荷時の疲労寿命の決定要因となる最終破壊状況を明らかにしている。</p> <p>図表 図1: 試験装置の概観図 図2: せん断降伏型制振部材の断面図 図3: せん断降伏型制振部材の履歴曲線 図4: せん断降伏型制振部材の低サイクル疲労試験結果</p> <p>参考文献 ① せん断降伏型制振部材の低サイクル疲労試験結果 ② せん断降伏型制振部材の履歴特性 ③ せん断降伏型制振部材のせん断降伏特性</p>	<p>著者 ① せん断降伏型制振部材の低サイクル疲労試験結果 (図1) ② せん断降伏型制振部材の履歴特性 (図2) ③ せん断降伏型制振部材のせん断降伏特性 (図3) ④ せん断降伏型制振部材の低サイクル疲労試験結果 (図4)</p> <p>図表 図1: 試験装置の概観図 図2: せん断降伏型制振部材の断面図 図3: せん断降伏型制振部材の履歴曲線 図4: せん断降伏型制振部材の低サイクル疲労試験結果</p> <p>参考文献 ① せん断降伏型制振部材の低サイクル疲労試験結果 ② せん断降伏型制振部材の履歴特性 ③ せん断降伏型制振部材のせん断降伏特性</p> <p>キーワード 極低降伏点鋼, ダンパー, せん断降伏型, 低サイクル疲労</p>
--	--

(2) 文献調査結果 (要約版)

資料番号	1-1
論文名	極低降伏点鋼を用いたせん断降伏型制振部材の低サイクル疲労実験 (その1 実験概要)
著者	泉満、可児長英、成原弘之、小倉桂治、川又康博、細沢治
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集 (北陸)
発行年	pp.1333-1334, 1992年8月
要旨	極低降伏点鋼を制振用ダンパーとして間柱部材に適用した場合の疲労特性を明らかにするための実験を行い、その履歴特性や低サイクル疲労載荷時の疲労寿命の決定要因となる最終破壊状況を明らかにしている。

資料番号	1-2
論文名	極低降伏点鋼を用いたせん断降伏型制振部材の低サイクル疲労実験（その2 実験結果の検討）
著者	川又康博、可児長英、泉満、小倉桂治、成原弘之、細沢治
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（北陸）
発行年	pp.1335-1336、1992年8月
要旨	制振部材として間柱に極低降伏点鋼を使用した場合の低サイクル疲労試験に関する報告（その1）に対して、疲労寿命の推定を試みている。さらに、制振効果の評価指標となる累積塑性変形倍率と等価粘性減衰定数の検討を行っている。極低降伏点鋼を使用したせん断降伏型制振部材の制振効果の指標となる等価粘性減衰定数などの特性を明らかにし、その疲労寿命特性を推定する資料を得ている。

資料番号	2
論文名	低降伏点鋼に関する応用研究（その1）
著者	杉沢充、山口種美、太田晴久
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（北陸）
発行年	pp.1411-1412、1992年8月
要旨	降伏以降の性状について特徴を持つ鋼材（SS400-MOD）の紹介と、そのエネルギー吸収要素としての応用についての提案をしている。

資料番号	3
論文名	極低降伏点鋼を用いた制振装置に関する研究（その1 応答解析による制振効果の検討）
著者	三山剛史、田中清、平澤光春
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（関東）
発行年	pp.593-594、1993年9月
要旨	中小地震時の居住性の向上と大地震時の構造体の損傷低減を目的に、極低降伏点鋼に着目し、その構造物へのダンパーとしての適用性について検討している。

資料番号	5
論文名	極低降伏点鋼を用いた制振装置に関する研究（その3 せん断型制振ダンパの繰り返し載荷実験）
著者	三山剛史、田中清、孟令樺、平澤光春
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（東海）
発行年	pp.1043-1044、1994年9月
要旨	建物に組み込みやすく、地震時応答について有効な方法の一つとして予想される極低降伏点鋼を用いたせん断型の制振ダンパーに着目し、その変形能力とエネルギー吸収特性を確かめる目的で、正負の繰り返し載荷試験を行っている。

資料番号	6
論文名	極低降伏点鋼を用いた制振装置に関する研究（その4 せん断型制振ダンパの復元力特性モデル及びそれを用いた地震応答解析）
著者	孟令樺、田中清、三山剛史、平澤光春
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（東海）
発行年	pp.1045-1046、1994年9月
要旨	復元力特性モデルを前報（その3）で示した実験結果にあてはめ、応答解析のためのせん断型制振ダンパーの復元力モデルを提案している。さらに、22階建ての骨組みを想定し、これにせん断型制振ダンパーを用いた場合、その諸パラメータが骨組の地震応答に及ぼす影響について調べている。

資料番号	7
論文名	極低降伏点鋼を用いた制振装置に関する研究（その5 せん断型制振ダンパーの必要耐力、および剛性の検討）
著者	孟令樺、三山剛史、加藤泰正、田中清
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（北海道）
発行年	pp.649-650、1995年8月
要旨	前報その4では得られた復元力特性を用い、22階建ての建物について応答解析を行い、その有効性を確認している。その中で降伏変位をパラメータとしたダンパーを付加しており、建物の高さ方向の剛性分布が変化する解析を行っている。そのため固有周期、モードの形の影響を受けて、ダンパーの耐力、剛性の十分な評価ができない場合があった。本報では前報同様にダンパーを耐力と剛性評価を独立とし、剛性分布に変化が生じない提案を行い、ダンパーの効果について検討している。

資料番号	8
論文名	極低降伏点鋼を用いた制振装置に関する研究（その6 リブ補強したせん断パネル付き制振ダンパーの繰り返し加力実験 -実験および実験結果の概要-）
著者	田中清、三山剛史、孟令樺、佐々木道夫
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（北海道）
発行年	pp.651-652、1995年8月
要旨	幅厚比の比較的大きなせん断パネルを用い、これをリブ材により補剛し、また剛性調整用に同パネルの上下部にSC造の剛体部を設置した間柱状の制震部材を作成し、その履歴特性の検証を目的として行っている。

資料番号	9
論文名	極低降伏点鋼を用いた制振装置に関する研究（その7 リブ補強したせん断パネル付き制振ダンパーの繰り返し加力実験 -変形能力と復元力特性の検討-）
著者	三山剛史、田中清、孟令樺、加藤泰正、佐々木道夫
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（北海道）
発行年	pp.653-654、1995年8月
要旨	前報（その6）の実験結果に既報（その3）の実験結果を含め、せん断パネルの座屈発生、変形能力、および応答解析に用いるスケルトンカーブについて検討している。

資料番号	10
論文名	極低降伏点鋼を用いた弾塑性ダンパーの開発（その1 静的実験結果）
著者	坂尾恵司、石橋久義、草場茂樹
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（東海）
発行年	pp.1041-1042、1994年9月
要旨	極低降伏点鋼を用いたせん断降伏型弾塑性ダンパーを対象に、繰り返し水平力を加えた時に生じる面外変形と耐力低下を抑えるために小さなフランジを取り付け、この面外変形抑制方法の妥当性を確認するために静的実験を行っている。

資料番号	11
論文名	極低降伏点鋼を用いた弾塑性ダンパーの開発（その2 低サイクル疲労及び静的実験結果）
著者	坂尾恵司、石橋久義、宮原貴昭
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（北海道）
発行年	pp.647-648、1995年8月
要旨	極低降伏点鋼を用いた弾塑性ダンパーを対象に、フランジの曲げ引張りずみ最も大きくなる部分の溶接部を無くした試験体について、低サイクル疲労及び静的試験を行っている。

資料番号	12-1
論文名	低降伏応力度鋼板を用いた K 型ブレース制振装置付架構の高層建物への応用 (その 1) 構造特性設定法
著者	古賀洋之、國末晃寛、玉井宏章、近藤一夫、花井正実
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集 (東海)
発行年	pp.1047-1048、1994 年 9 月
要旨	低降伏応力度鋼を用いた K 型制振ブレースを高層建物の下層部に設置した構造形式を対象に、その有効性、実用性を究明している。制振ブレースを有する高層架構の構造特性設定法と制振装置の数値復元力モデルを示している。

資料番号	12-2
論文名	低降伏応力度鋼板を用いた K 型ブレース制振装置付架構の高層建物への応用 (その 2) 実験システムの概要
著者	國末晃寛、古賀洋之、玉井宏章、近藤一夫、花井正実
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集 (東海)
発行年	pp.1049-1050、1994 年 9 月
要旨	低降伏応力度鋼を用いた K 型制振ブレースを有する高層架構の有効性、実用性を実験的に究明するために用いるオンラインコンピュータ制御実験システムの概要とその精度を紹介している。本オンライン・コンピュータ制御実験システムを用いれば、K 型制振ブレース付架構の弾性地震応答性状を十分精度よく再現できることを示している。

資料番号	12-3
論文名	低降伏応力度鋼板を用いた K 型ブレース制振装置付架構の高層建物への応用 (その 3) 21 層建物の実地震応答性状
著者	玉井宏章、古賀洋之、國末晃寛、近藤一夫、花井正実
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集 (東海)
発行年	pp.1051-1052、1994 年 9 月
要旨	低降伏応力度鋼を用いた K 型制振ブレースを有する高層架構について、応答性状およびエネルギー吸収性能等を明らかにするため、あらかじめ行った数値応答解析結果をもとに、最も損傷が集中すると考えられる層についてのみ制振装置の復元力を求めるための実験を行い、他の層については数値復元力モデルを用いた多質点系の弾塑性実地震応答解析を行っている。

資料番号	13
論文名	極低降伏点鋼の履歴減衰による制振システム
著者	細沢治、可児長英、小倉桂治、辻田修
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集 (東北)
発行年	pp.1025-1026、1991 年 9 月
要旨	形状寸法を最小限にし、メンテナンスを簡単にした極低降伏点鋼材の履歴吸収エネルギーを利用した制振システムを提案し、地震時応答解析によりその効果を確認している。

資料番号	14-1
論文名	極低降伏点鋼を用いた RC 造用ダンパーの開発 (その 1) せん断降伏型ダンパー
著者	坂尾恵司、前川利雄、石橋久義、一戸康生
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集 (関東)
発行年	pp.849-850、1997 年 9 月
要旨	RC 構造物は、S 造に比べて地震時に生じる建物変形が小さいレベルで構造部に損傷を受ける。このためダンパーにより地震時応答を低減させるためには、できるだけ小変形からより多くのエネルギー吸収を得られるダンパーが必要である。また、ダンパーに設置場所に制約がある場合、コンパクトなダンパーが望まれる。本報では、変形性能に優れている低降伏点鋼を用いたせん断

	降伏型ダンパーの性能についての定振幅下での疲労特性を把握することを目的とした動的加力実験を行っている。
資料番号	14-2
論文名	極低降伏点鋼を用いた RC 造用ダンパーの開発 (その2) スリット型ダンパー
著者	前川利雄、坂尾恵司、石橋久義、一戸康生
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集 (関東)
発行年	pp.851-852、1997 年 9 月
要旨	S 造の建物を対象に耐震性の向上を目的としたスリット型の鋼製ダンパーが考案され、既に実用化されている。このダンパーは普通鋼板にスリットを設けたもので、疲労性に優れていることが示されている。本報ではこのスリット型ダンパーを基にし、降伏変位を小さくするためにリブ幅を大きくし、より小変形からエネルギー吸収を得ることを目的とし極低降伏点鋼を用いたダンパーを扱っている。スリット型ダンパーの特性を把握する目的で、せん断降伏型と同様の動的加力実験を行っている。

資料番号	15-1
論文名	極低降伏点鋼を用いたエネルギー吸収ダンパーに関する研究 (その1 基本特性)
著者	秦雅史、浅野芳伸、中江晃彦、茂木正史、河野政典、野口聡
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集 (関東)
発行年	pp.853-854、1997 年 9 月
要旨	梁降伏型の純ラーメン構造では、その耐震性は主に部材の塑性変形能力に依存している。最近では、制震ダンパーを適用して広い入力範囲に対する被害レベル設計が行われるようになってきた。本報では、極低降伏点鋼を用いた鋼製スリット型ダンパーの基礎実験 (単調加力実験・漸動加力実験・低サイクル疲労試験) を行っている。

資料番号	15-2
論文名	極低降伏点鋼を用いたエネルギー吸収ダンパーに関する研究 (その2 地震応答解析)
著者	岸本剛、秦雅史、浅野芳伸、中江晃彦、茂木正史、河野政典
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集 (関東)
発行年	pp.855-856、1997 年 9 月
要旨	極低降伏点鋼 (LYP) を用いたダンパーの復元力モデルによる地震応答解析。地震の入力レベルと被害程度についての要求性能マトリクスを用いた、基本骨組のダンパー使用量による被害レベル低減効果についての解析的検討を行っている。

資料番号	16-1
論文名	極低降伏点鋼を用いたエネルギー吸収ダンパーに関する研究 (その3 架構実験)
著者	岸本剛、秦雅史、野口聡、川井伸泰
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集 (九州)
発行年	pp.939-940、1998 年 9 月
要旨	極低降伏点鋼 (LYP) ダンパーを組み込んだ鉄骨骨組架構の加力実験報告。ダンパーを組み込んだ鉄骨骨組の構造性能を確認することを目的とし、構造骨組へダンパーを取り付ける方法としてブレース及びプレキャスト (PCa) 壁の2タイプを対象とした実験を行っている。

資料番号	16-2
論文名	極低降伏点鋼を用いたエネルギー吸収ダンパーに関する研究 (その4 試設計)
著者	平松一夫、服部晃三、川井伸泰、秦雅史、岸本剛
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集 (九州)
発行年	pp.941-942、1998 年 9 月
要旨	LYP ダンパーを K 形ブレースと上階梁の接合部に設置したパッシブ制振構造建物の試設計。地震応答解析により、ダンパーの無い非制振建物と制振建物 (柱・梁・ブレース部材断面は同一) の応答を比較し、その効果を確認している。

資料番号	18-1
論文名	低降伏点鋼スリットダンパーに関する研究（その1：低サイクル疲労実験）
著者	青木浩幸、杉山聡、齋藤絵里子、宮原貴昭、黄一華、橋本秀知
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（九州）
発行年	pp813-814、1998年3月
要旨	低降伏点鋼を用いたスリットダンパーの低サイクル疲労についての基本的な特性を把握する実験報告ダンパーの累積塑性歪エネルギーの振幅による依存性と、ダンパーが塑性変形を受けた後の繰り返し挙動を把握することを目的とした実験を行っている。

資料番号	18-2
論文名	低降伏点鋼スリットダンパーに関する研究（その2：実速度加力実験）
著者	橋本秀知、杉山聡、青木浩幸、齋藤絵里子、宮原貴昭、黄一華、
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（九州）
発行年	pp.815-816、1998年3月
要旨	低降伏点鋼スリットダンパーを建物に組み込んだときの地震時における動的な挙動について把握することを目的とした実験報告。低サイクル疲労時及び実速度加力時の累積塑性歪エネルギーの比較するための実験を行っている。

資料番号	19
論文名	低降伏点鋼ダンパーの硬化特性が制震建物の応答に及ぼす影響
著者	平田裕一、谷垣正治、山岸邦彰
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（九州）
発行年	pp.875-876、1998年3月
要旨	応答スペクトルが同一位相の異なる地震動に対する応答解析を行い、低降伏点鋼ダンパーを用いた制震建物の応答変位およびエネルギー吸収性能について評価している。

資料番号	20
論文名	低降伏応力度鋼材を用いたX型ブレース制振装置に関する研究
著者	中野孝司、國末晃寛、近藤一夫、竹中啓之、玉井宏章、花井正実
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（北陸）
発行年	pp.1341-1342、1992年8月
要旨	低降伏応力度鋼材による履歴減衰装置を組み込んだX型ブレース剛節架構の暫増振幅繰り返し載荷実験を行い、その履歴特性と復元力特性を明らかにしている。

資料番号	21-1
論文名	鋼柱ダンパーのエネルギー吸収能力に関する基礎的研究（その1）実験概要及びダンパーの基本的な履歴特性の検討
著者	佐藤彰展、岩田範生、福地博晃、曾田五月也
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（九州）
発行年	pp.935-936、1999年9月
要旨	低降伏点鋼を用いたせん断プレート型のダンパーを製作し、そのエネルギー吸収能力と耐久性を実験的に検証している。

資料番号	21-2
論文名	鋼柱ダンパーのエネルギー吸収能力に関する基礎的研究（その2）幅厚比と材料の違いによる影響
著者	岩田範生、佐藤彰展、福地博晃、曾田五月也
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（九州）

発行年	pp.937-938、1999年9月
要旨	極低降伏点鋼を用いたせん断プレート型ダンパーについて、幅厚比と使用鋼材の種類の違いが履歴特性に及ぼす影響を検討している。
資料番号	22
論文名	極低降伏点鋼せん断パネルの動的加力実験
著者	佐藤沢、和田章、奥田賢持、栗林博之、稲葉拓、前田良治
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（中国）
発行年	pp.941-942、1999年9月
要旨	極低降伏点鋼せん断パネルを中低層の損傷制御設計建物の耐震デバイスとして適用する場合、高層の場合と比べ建物の固有周期が短いことから歪速度による影響を適正に評価する必要がある。そこで、極低降伏点鋼せん断壁の動的加力実験を行い、履歴エネルギー特性、累積塑性変形量に与える歪速度の影響について評価を行っている。

資料番号	23-1
論文名	低降伏応力度鋼材を用いたK型ブレース制振装置に関する研究（その3）制振装置付架構模型実験の概要
著者	國末晃寛、中野孝司、近藤一夫、竹中啓之、玉井宏章、花井正実
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（北陸）
発行年	pp.1337-1338、1992年8月
要旨	低降伏応力度鋼材による履歴減衰装置を組み込んだK型ブレース剛節架構の暫増振幅繰返し載荷実験を行い、その履歴特性と復元力特性を明らかにしている。

資料番号	23-2
論文名	低降伏応力度鋼材を用いたK型ブレース制振装置に関する研究（その4）制振装置付架構模型実験の結果と考察
著者	竹中啓之、中野孝司、近藤一夫、國末晃寛、玉井宏章、花井正実
発行期間	日本建築学会大会学術講演概要集（北陸）
発行年	pp.1339-1340、1992年8月
要旨	低降伏応力度鋼材による履歴減衰装置を組み込んだK型ブレース剛節架構の暫増振幅繰返し載荷実験を行い、その履歴特性と復元力特性を明らかにしている。

資料番号	101
論文名	低降伏点鋼のヒステリシス及びヒステリシスエネルギー特性に関する研究
著者	佐伯英一郎、杉沢充、山口種美、望月晴雄、和田章
発行期間	日本建築学会大会構造系論文集
発行年	第473号、pp.159-168、1995年7月
要旨	低サイクル疲労試験により得られた種々のヒステリシスカーブを分析することにより、低降伏点鋼のヒステリシス特性及びエネルギー吸収特性を歪速度、歪レベルの観点から考察している。応力振幅特性について、最大応力-サイクル関係とサイクリック応力歪関係を示している。

資料番号	102
論文名	極低降伏点鋼を用いた制振パネルダンパーの静的履歴減衰性能に関する研究
著者	田中清、佐々木康人
発行期間	日本建築学会構造系論文集
発行年	第509号、pp.159-166、1998年7月
要旨	極低降伏点鋼を使用した「制振パネルダンパー」の静的履歴減衰性能を、静的加力試験により定量的に把握している。

資料番号	103
論文名	鋼種が異なるせん断型パネルダンパーの静的履歴特性に関する実験研究
著者	田中清、佐々木康人、米山真一朗
発行期間	日本建築学会構造系論文集
発行年	第520号、pp.117-124、1999年6月
要旨	無補剛正方形パネルを対象として、軸力ゼロ下での静的せん断実験により鋼種によるパネル履歴特性を比較し要求変形性能への適合性を検討している。使用鋼種は2種類の低降伏点鋼(LYP100, LYP235)と普通鋼(SS400)である。実験では、パネルダンパー試験体に正負交番繰返しせん断力を載荷している。また、既提案式(同誌No.509, p159-166(1998))により最大せん断耐力等の履歴性能を検討しモデル化を行っている。

資料番号	104
論文名	風応答振動による弾塑性履歴ダンパーの疲労損傷
著者	成原弘之、泉満
発行期間	日本建築学会構造系論文集
発行年	第518号、pp.119-126、1999年4月
要旨	高層建築物に設置されるシアーパーネル型履歴ダンパーの疲労損傷を定量的に評価することを目的に、低サイクル疲労実験と時刻歴風応答解析に基づいて検討を行っている。

資料番号	105
論文名	鉄骨コンクリート造コア壁の耐震性状に関する研究
著者	宮内靖昌、毛井崇博、東端泰夫
発行期間	日本建築学会構造系論文集
発行年	第508号、pp.151-156、1998年6月
要旨	鉄骨造建物のコア部にコンクリート系連層壁(コア壁)と短スパン境界梁を組合せて設置することによって地震エネルギーを吸収する構造方式の有効性を静的水平加力実験と地震応答解析により検証している。

資料番号	106
論文名	金属系素材の素材特性及び履歴挙動に関する研究
著者	小野徹郎、上之郷貴重、吉田文久、岩田衛、林賢一
発行期間	日本建築学会構造系論文集
発行年	第498号、pp.137-143、1997年8月
要旨	各種鋼材やステンレス鋼、アルミニウム合金などの構造用金属素材の特性を総合的、かつ相対的に取扱うため、素材試験と繰返し載荷実験を行っている。対象とした素材は代表的な一般構造用、建築構造用、機械用、溶接構造用、溶接構造用高張力の各鋼材やニッケル-クロム-モリブデン鋼、低降伏点鋼、ステンレス鋼、アルミニウム合金であり、基本的な素材特性値を変数として相対関係を調べ、その相関図から対象素材の相対的な位置関係を明らかにしている。

資料番号	107
論文名	低降伏点鋼の低サイクル疲労特性に関する研究
著者	佐拍英一郎、杉沢充、山口種美、望月晴雄、和田章
発行期間	日本建築学会構造系論文集
発行年	第472号、pp.139-147、1995年6月
要旨	減衰部材、ダンパーに利用することを目的に低降伏点鋼の開発を行っている。履歴ダンパーとして用いる鋼は構造部材に先行して塑性化することが必要で、塑性域の挙動が重要である。本研究では、低降伏点鋼の大歪下における低サイクル疲労特性を歪速度、歪レベルの観点から明らかにする目的で、SS400及び低降伏点鋼の疲労試験を行っている。

資料番号	308
論文名	超低降伏点鋼を用いた片持梁式ダンパーの開発に関する研究
著者	鈴木一彦、平井卓、聖生守雄
発行期間	土木学会学術講演会講演概要集
発行年	第 51 回、pp.108-109、1996 年 9 月
要旨	超低降伏点鋼材を用いた片持式の橋梁用ダンパーを開発し、静的載荷と動的載荷の実験を実施してその性能を検証している。

資料番号	401
論文名	特集 技術開発と評価 道路橋の免震設計技術の開発
著者	田村正秀 (土木研)
発行期間	土木学会誌
発行年	Vol.78、pp.26-27、1993 年
要旨	平成元年度から 3 箇年間、官民連帯共同研究制度を活用して次に示すような特徴的な技術を開発し、計画中のものを含め約 30 橋の実績を有することなどの紹介をしている。1) 変形するとエネルギーを吸収する特殊な高減衰ゴムを用いた高減衰積層ゴム支承、2) 過度な長周期化を避けた我が国独自の免震設計法とマニュアル、3) 免震装置の試験方法の開発。

資料番号	501
論文名	低降伏応力度鋼板接着による鋼製橋脚の耐震補強法に関する基礎的研究
著者	中島章典、小野寺理、大塚久哲、鈴木基行、佐藤貴志
発行期間	土木学会構造工学論文集
発行年	Vol.43A、pp.889-896、1997 年 3 月
要旨	既設鋼製橋脚のうち、中埋めコンクリート上端付近が弱点となる場合に対してこの付近の外側の橋脚鋼板パネルよりも降伏強度の低い鋼板を接着して、この接着鋼板の塑性変形により地震によるエネルギーを吸収させる耐震補強方法について述べている。この耐震補強法の有効性を確認するために、接着鋼板の特性が中埋めコンクリートを有する鋼製橋脚の大地震時挙動に及ぼす影響を、弾塑性地震応答解析を用いて検討している。

資料番号	502
論文名	低降伏比高張力鋼を用いた H 型断面部材の曲げ強度と塑性変形能力について
著者	岩坪要、小金丸卓也、山尾敏孝、崎元達郎
発行期間	土木学会構造工学論文集
発行年	Vol.43A、pp.167-176、1997 年 3 月
要旨	種々の幅厚比を有する低降伏比高張力鋼(LYR 鋼)及び SM570 鋼からなる H 形断面部材が、弱軸回りの純曲げを受ける場合の強度特性と変形能特性を実験とパラメトリック解析によって検討し、最大強度推定式を提案している。

資料番号	1302
論文名	大変位吸収システムを適用した免震橋梁の地震時振動特性
著者	大住道生、運上茂樹、近藤益央
発行期間	土木学会学術講演会講演概要集
発行年	第 53 回、pp.694-695、1998 年 10 月
要旨	常時、および震度法により設計する桁の変形に対しては従来の伸縮装置で対処し、大規模地震時には鋼板をアスファルト舗装中に潜り込ませることで変位を吸収する「大変位吸収システム」を開発している。大変位吸収システムは、桁の移動により作動するシステムであるが、このシステムの抵抗が過大な場合には橋の振動特性に悪影響を及ぼすことも想定される。桁端部に施行する大変位吸収システムの抵抗特性が、免震橋梁の地震時振動特性に及ぼす影響について検討を行っている。

資料番号	1303
論文名	斜橋に対する PC ケーブル式落橋防止装置の設置方向に関する検討
著者	渡邊学歩、川島一彦、庄司学
発行期間	土木学会学術講演会講演概要集
発行年	第 53 回、pp.310-311、1998 年 10 月
要旨	PC ケーブル方式の落橋防止装置を支承線直角方向に配置した場合と橋軸方向に配置した場合の有効性についての解析を行っている。

資料番号	1304
論文名	分散支持された斜桁および曲線桁の地震時衝突事象における遊間の影響
著者	奥山巧、井嶋克志、後藤茂男、帯屋洋之
発行期間	土木学会学術講演会講演概要集
発行年	第 53 回、pp.308-309、1998 年 10 月
要旨	掛け違い部のない分散支持された桁について、地震時衝突事象における一次応答ともいべき桁の剛体運動から、支承最大変形量や橋台への打撃力を求めることにより、遊間を小さくすることの効果について考察している。

資料番号	1306
論文名	長大橋と隣接中小橋の地震時相互応答に及ぼす移動制限装置の影響
著者	武野志之、伊津野和、中井博
発行期間	土木学会学術講演会講演概要集
発行年	第 53 回、pp.298-299、1998 年 10 月
要旨	沿岸部高架橋で長大アーチ橋に中小橋が隣接する場合、大地震時には設計で考慮しなかった大きな外力が中小橋に作用し、大きな被害が生じると考えられる。固有周期が著しく異なる構造系が隣接して存在するため、その連結部に大きな被害が生じる可能性がある。さらに、軟弱な地盤を想定すると、地盤による側方流動も考慮しなければならない。本研究では、数値シミュレーションを行い、地盤流動を含めた橋梁三次元応答解析を試みている。

資料番号	1309
論文名	斜橋の回転に伴う落橋を防止するための落橋防止構造の効果
著者	渡邊学歩、川島一彦、庄司学、武村浩志
発行期間	土木学会学術講演会講演概要集
発行年	第 52 回、pp.236-237、1997 年 9 月
要旨	支承部が破壊した後の斜橋をモデル化して非線形動的解析によって斜橋の回転を再現すると共に、落橋防止構造を取り付けた場合の効果を検討している。

資料番号	1501
論文名	桁間衝突の影響に対するゴム製緩衝装置の有効性に関する実験的検討
著者	庄司学、川島一彦、Anat Ruangrassamee、運上茂樹、足立幸郎、長屋和宏
発行期間	土木学会構造工学論文集
発行年	Vol.45A、pp.891-902、1999 年 3 月
要旨	1995 年の兵庫県南部地震以降、免震橋や地震力分散式橋梁などの長周期の連続橋梁が積極的に設計されている。しかし、構造系が長周期化するため、桁の応答変位が増大し、隣接桁間の衝突が生じる可能性がある。そのため、桁間衝突を防止するための緩衝装置の開発が急務となっている。本研究では、固有周期が異なる 2 連の桁端部にゴム製緩衝装置効果について実験的に検討を行っている。

資料番号	1502
論文名	鋼製支承の破損を考慮した連続高架橋の地震時応答性状と落橋防止装置の有効性の検討
著者	梶田幸秀、渡邊英一、杉浦邦征、丸山忠明、永田和寿
発行期間	土木学会構造工学論文集
発行年	Vol.45A、pp.903-914、1999年3月
要旨	多径間連続高架橋の全体系構造解析において、鋼製支承の破損、損傷後の摩擦力の大きさを考慮してモデル化し、兵庫県南部地震における実際の被災状況との比較検討を行っている。さらに桁-脚連結ケーブルによる耐震補強の有効性について検討している。

資料番号	1503
論文名	直橋および斜橋の桁間衝突とその影響
著者	矢部正明、武村浩志、川島一彦
発行期間	土木学会構造工学論文集
発行年	Vol.43A、pp.781-791、1997年3月
要旨	衝突ばねを用いて、固有周期が異なる直橋が隣接する場合、および単径間の斜橋が両端を橋台によって支持される場合を対象として、大きな地震力の作用を受けた場合の桁の振動特性について検討している。

資料番号	1902
論文名	免震橋梁に適用する変位吸収システムの開発
著者	近藤益央、運上茂樹、大住道生
発行期間	第10回日本地震工学シンポジウム
発行年	pp.2923-2928、1998年
要旨	免震橋梁の桁端部に設ける大変位吸収システムの動的応答特性と抵抗特性が、橋梁の振動特性に及ぼす影響について検討している。

(3) 文献調査のまとめ

今回調査した文献は日本建築学会系が39編、土木学会系が11編であった。

日本建築学会系論文では、構造分類としては大多数が「せん断型」であり、他は「ブレース型」が数編見られた程度である。また、殆どの文献は極低降伏点鋼を利用した制震装置に関するものであるが、素材に着目した材料試験に関する論文も4件(No.21-1、21-2、101、107)抽出されている。これらの研究では、歪み速度、低サイクル疲労等がキーワードとなっている。

土木学会系の論文の内訳は、極低降伏点鋼に関するものが3件、その他9件が橋梁の地震応答、落橋に関するものである。したがって、土木構造物(橋梁)では極低降伏点鋼が殆ど利用されていないと言える。極低降伏点鋼に関する3件の論文は、①桁端に設置するダンパーとしての提案、②鋼製橋脚を対象とした鋼板接着に関する提案、③H断面を対象とした曲げに対する性能確認試験である。

今回の文献調査により、サイズミックダンパー(制震構造)として極低降伏点鋼を鋼橋に利用するためには、材料特性のモデル化についての検討が不足していることが分かった。特に、「歪み速度効果」と「歪み硬化の影響」に関する実験データが不足している。両者とも、応力-歪み関係曲線が上方へシフトし、材料強度が高くなる現象である。したがって、これらを考慮しない場合に比べて、構造材としての設計を行う場合には、一般に安全側の設計ができる。しかし、エネルギー吸収効率を考えた鋼製サイズミックダンパーの設計をする場合には、十分な塑性化をさせる必要があるため、強制変位量や強制力(または反力)を小さく見積もってしまう危険性がある。

歪み硬化の影響というのは、降伏以後の履歴曲線の応力レベルが現在の塑性歪みに依存して僅かに漸増する現象であり、加工硬化とも呼ばれる。上下方向に拘束されたせん断試験などのように、拘束度の強い場合には加工硬化の影響も幾分かはあるようであるが、歪み速度効果に比べて影響は少ないものと判断される。したがって、当WGでは「歪み速度効果」を優先して調査・研究するのが良いと思われる。

文献調査から得られた事柄をまとめると、以下ようになる。

- ・ 材料特性に関する資料はあるが、殆どが静的載荷試験の結果である。また、標点間距離が固定されているため、精度の高い材料特性のモデル化を行うには資料が不足している。したがって、極低降伏点鋼の歪み速度効果に関する検討が必要であり、試験片を用いた静的引張試験と高速引張試験を実施する必要がある。
- ・ 極降伏点鋼を用いたサイズミックダンパーの合理的な設計手法を確立するためには、曲げ、せん断、振りの基本形状に関するエネルギー吸収の基本性能を実験的あるいは解析的に明らかにする必要がある。
- ・ 上記の研究成果に基づき、極降伏点鋼サイズミックダンパーを橋梁構造物へ適用するときの適切な設置場所やその制震効果に関する検討を動的応答解析を用いて行う必要がある。

3.3.3 極低降伏点鋼の材料特性に関する検討

(1) はじめに

極低降伏点鋼を用いた高減衰装置の有効性を検証するためには、実験的研究の他に解析的な検討が必要である。しかしながら、極低降伏点鋼の材料特性のモデル化について詳しく検討されたものは殆ど無く、特に歪み速度効果についてはデータが不足している。

そこで、静的および高速載荷試験を行い極低降伏点鋼の材料特性を明らかにし、実験結果を精度良くシミュレートできる解析モデルについての検討を行った。

(2) 静的引張試験

(a) 試験概要

静的載荷試験は5本の丸型試験片（材質 BT-LYP100, $\phi 10.4\text{mm}$, $L=400\text{mm}$ ）について行った。試験片には、残留歪み量が求められるように中央部に 10mm 間隔で印を付けた。

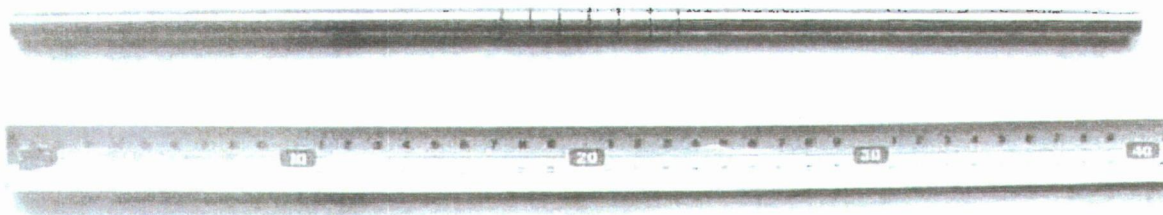


図 3-3-1 静的載荷試験に用いた試験片

(b) 試験結果および考察

破断後の試験片（図 3-3-2）と、試験結果として公称応力-公称歪み曲線（図 3-3-3）を示す。5回の引張試験の平均として降伏応力は、 95.7N/mm^2 、引張強度は 233.4N/mm^2 となった。破断歪みは標点間距離を 20mm とした場合で 1.15 であった。なお、弾性係数は平均で $E=8.6 \times 10^4\text{N/mm}^2$ となり、一般構造用鋼材の $E=2.1 \times 10^6\text{N/mm}^2$ に対し 1/2.4 程度であった。

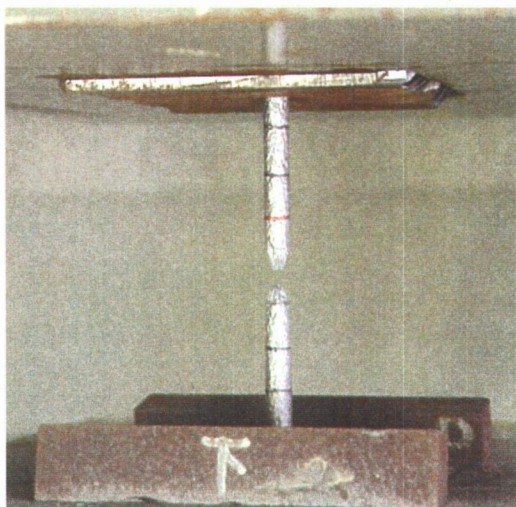


図 3-3-2 破断後の試験片

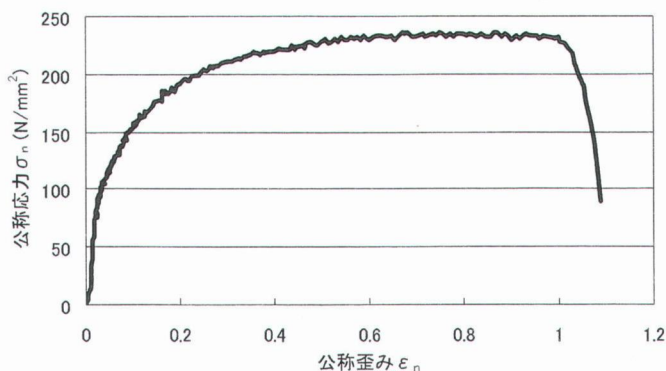


図 3-3-3 静的載荷試験 応力-歪み曲線

(3) 高速引張試験

(a) 試験概要

高速載荷試験は、図 3-3-4、図 3-3-5 に示す試験機を使用した。載荷速度は図 3-3-6 に示すように助走区間を設けて載荷時に等速となるようにして試験を行った。

解析ケースは、表 3-3-2 に示す 8 ケースとした。なお、ここでの歪み速度とは載荷速度を試験片の標点間距離 20mm で除したものであり、試験はケース毎に 2 回行った。(試験片総数：16 本)

図 3-3-7 に試験片形状と寸法を示す。

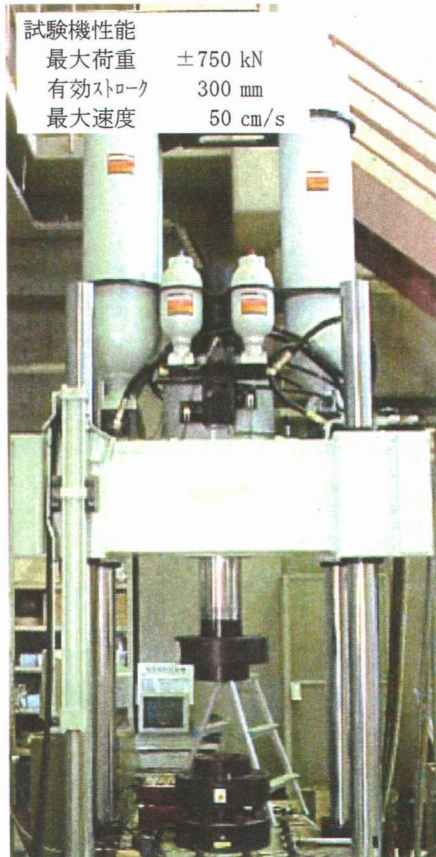


図 3-3-4 高速載荷試験機

表 3-3-2 解析ケース

CASE	載荷速度 (cm/sec)	歪み速度 (sec-1)
1	0.1	0.05
2	0.5	0.25
3	1.0	0.50
4	2.0	1.00
5	5.0	2.50
6	10.0	5.00
7	15.0	7.50
8	30.0	15.00

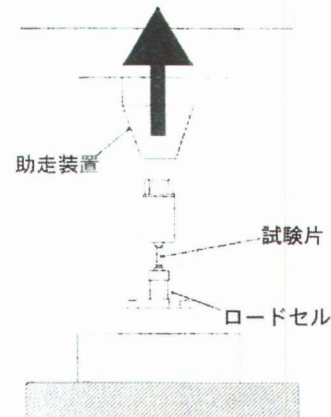


図 3-3-5 試験片設置図

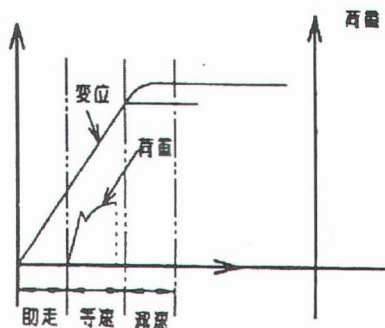


図 3-3-6 載荷方法

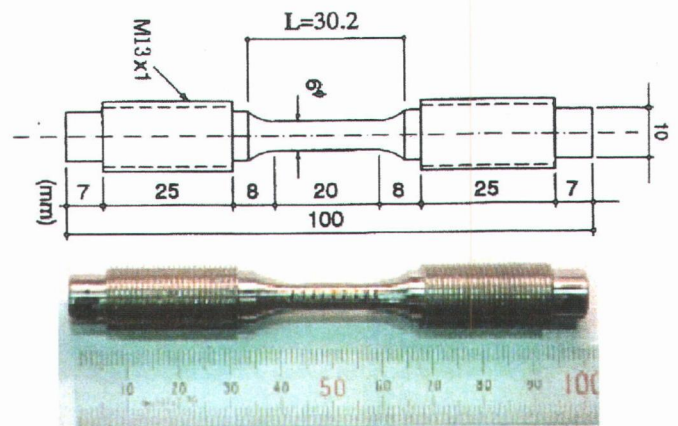


図 3-3-7 高速載荷試験用試験片

(b) 試験結果

1) 試験結果

図 3-3-8 に 4 種類の歪み速度 (0.05, 0.5, 5.0, 15.0 sec⁻¹) における公称応力-公称歪み曲線を示す。なお、図に示す公称歪みは、標点間距離を 20mm として算出したものである。試験は歪み速度毎に 2 回行っているが、2 回の試験結果はほぼ同じであったため、図 3-3-8 は、一方の結果を示している。

破断歪みは最低速の 0.05sec⁻¹ の時やや大きく、他は歪み速度による差は見られなかった。弾性係数は静的載荷試験とほぼ等しい結果を示し、歪み速度による変化は殆ど見られなかった。

歪み速度の増加により、降伏応力、引張強度が増加しており、歪み速度効果の影響が確認できた。

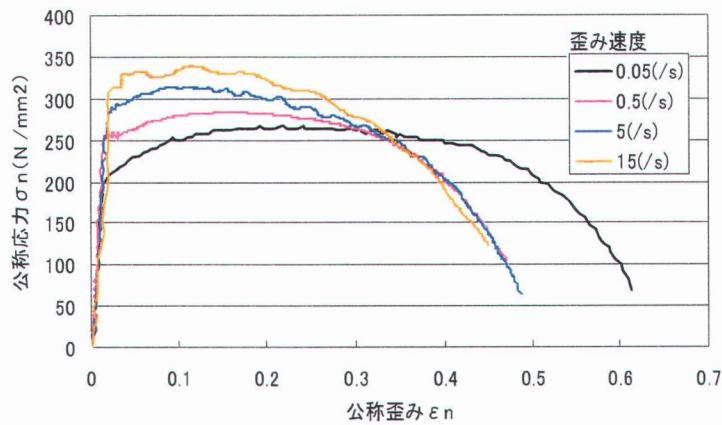
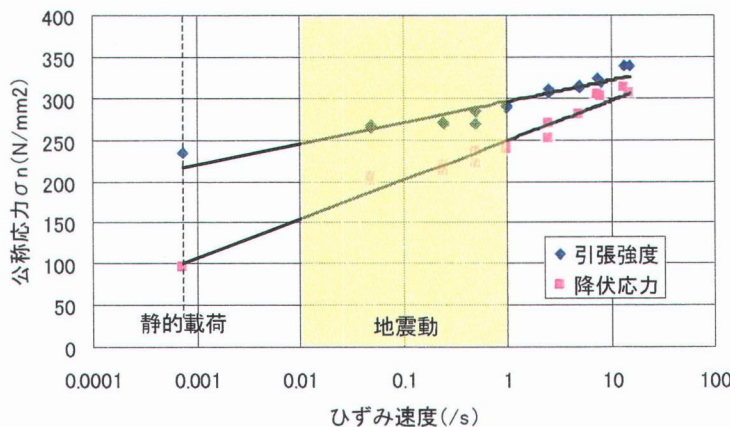


図 3-3-8 高速載荷試験 応力-歪み曲線

2) 歪み速度と降伏応力・引張強度

図 3-3-9 は歪み速度の変化による降伏応力、引張強度の変化を示したもので、両者とも歪み速度に対して片対数グラフ上ではほぼ線形関係にあり、歪み速度が 10⁻¹sec⁻¹ の時は、静的荷重に比べて降伏応力は約 2 倍、引張強度は約 1.2 倍ほど上昇する事がわかった。

地震動により土木構造物が受ける局所的な衝撃荷重の歪み速度が 10⁻²~10⁰ sec⁻¹ 程度であることを考えると、歪み速度を考慮しない静的荷重による設計は、安全側の設計となることが多いといえる。式 3-3-1, 式 3-3-2 は、降伏応力、引張強度を歪み速度に関して回帰分析して得られた関数である。



$$\sigma_y = 20.76 \ln(\dot{\epsilon}) + 248.8 \quad (3-3-1)$$

$$\sigma_{max} = 11.0 \ln(\dot{\epsilon}) + 296.1 \quad (3-3-2)$$

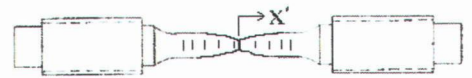
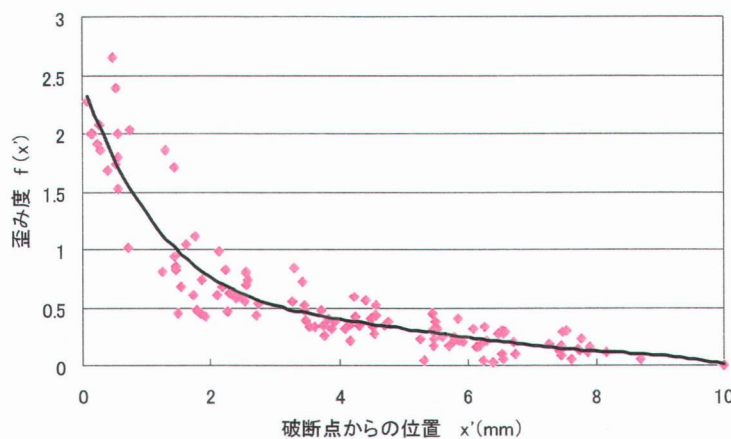
図 3-3-9 歪み速度と降伏応力・引張強度の関係

3) 歪み分布特性

シミュレーション解析における材料特性のモデル化には、任意形状の有限要素メッシュに応じた材料特性が必要である。つまり、任意の標点間距離に応じた真応力-真歪み関係を求める必要がある。特に、極低降伏点鋼は塑性域から破断に至るまでは歪み量が大きく、広範囲に歪みが生じるため、破断点からの距離に応じた平均伸び量を算出し、任意の標点間距離に応じた真応力-真歪み関係を求めた。

図 3-3-10 は、塑性歪み分布曲線 $f(x')$ を破断点からの位置 (x') に対してを示したものである。この関係式から任意の標点間距離に応じた真応力-塑性真歪み関係を求める。

塑性歪みとは、試験片に記された 2mm 間隔のマークで分割された 8 領域 ($n=1,2,\dots,7,8$) の残留伸び量 Δl_n の l_n に対する比である。



$$f(x') = -0.0002x'^5 + 0.0067x'^4 - 0.0828x'^3 + 0.4987x'^2 - 1.5583x' + 2.4423 \quad (3-3-3)$$

$$(\Delta l_{L_0})_{ave} = 2 \int_0^{L_0/2} f(x') dx' \quad (3-3-4)$$

図 3-3-10 歪み度曲線

表 3-3-3 平均伸び量

標点間距離 L_0 (mm)	2	4	6	8	10	16	20
平均伸び量 $(\Delta l_{L_0})_{ave}$ (mm)	3.62	5.61	6.85	7.76	8.48	10.34	12.82

4) 真応力*—塑性真歪みの関係

次頁、図 3-3-11、図 3-3-12 に真応力*—塑性真歪み関係を示す。真応力*は各標点間距離に対して円柱形を保持し、かつ体積不変の条件を用いて求めたものであるため、破断直前に低下することになる。

標点間距離を有限要素メッシュと読み替えて、解析モデルのメッシュに応じた真応力*—塑性真歪み関係を用いることができ、精度の高いシミュレーション解析が可能となる。

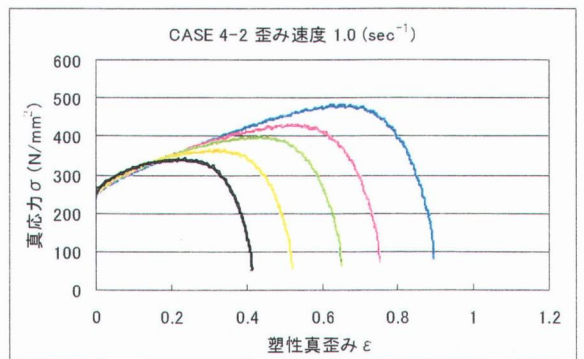
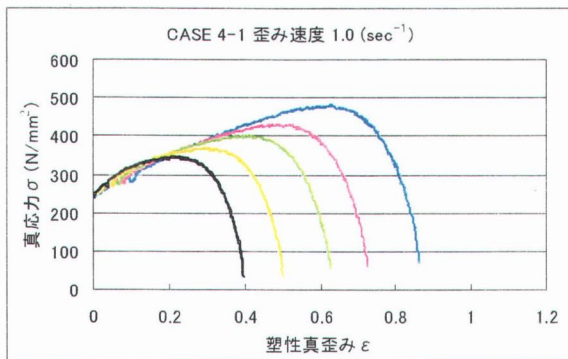
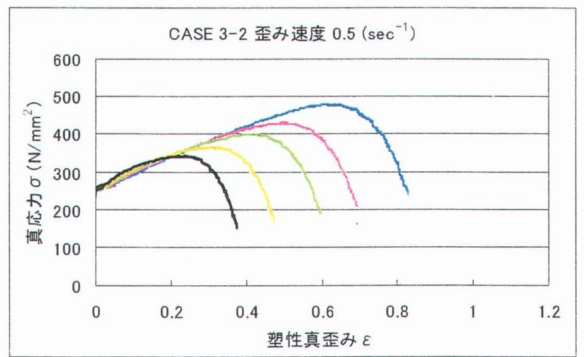
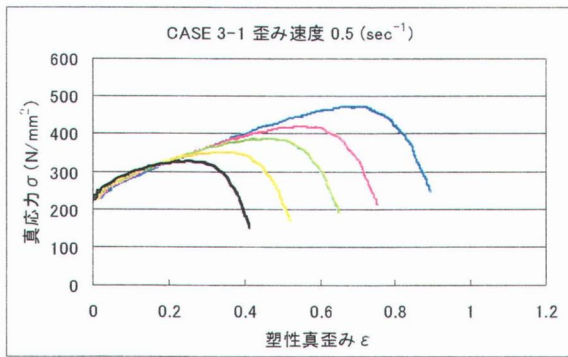
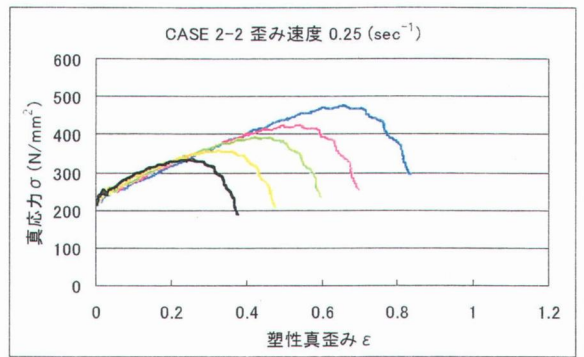
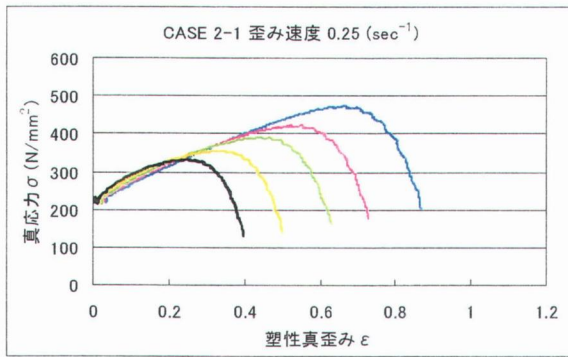
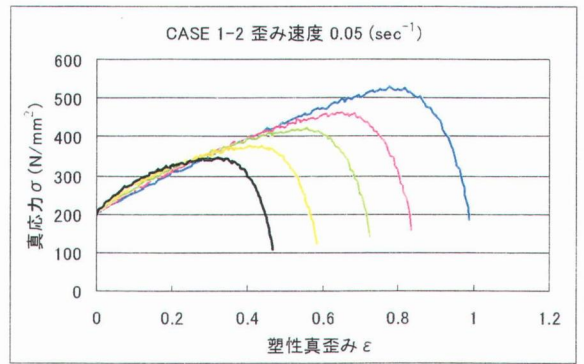
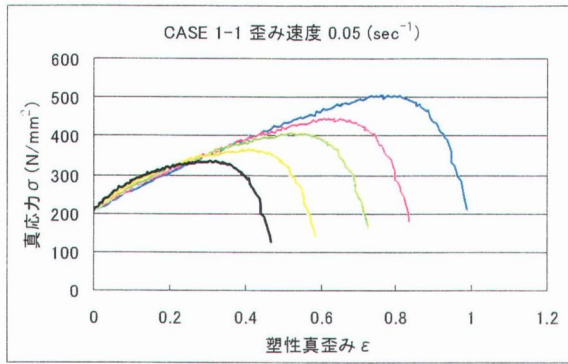


図 3-3-11 高速載荷試験 真応力*—塑性真歪み曲線(1)

標点間距離



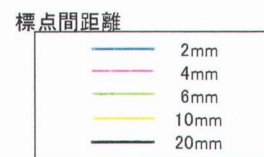
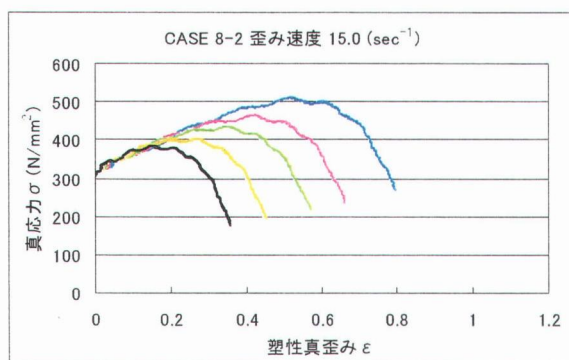
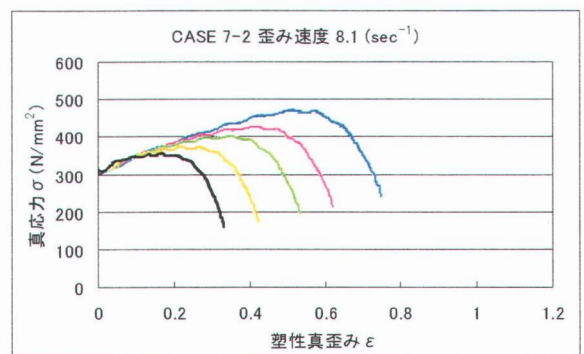
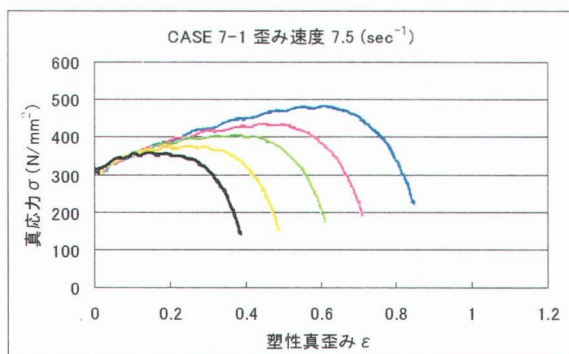
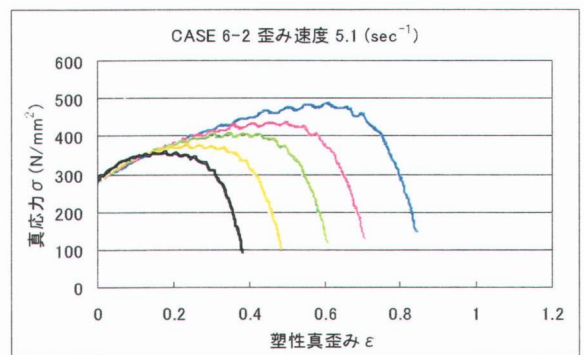
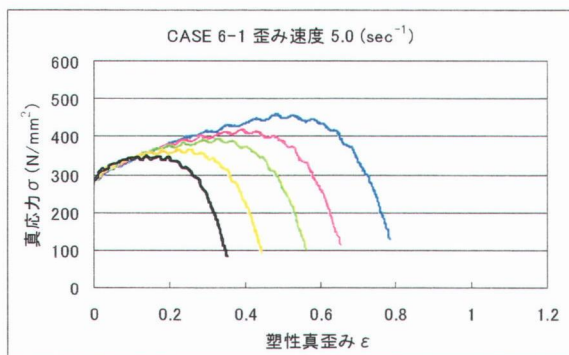
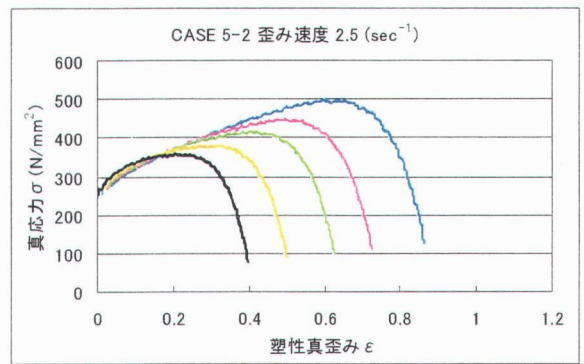
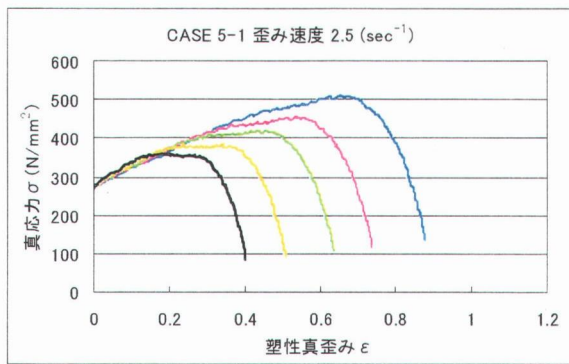


図 3-3-12 高速載荷試験 真応力*—塑性真歪み曲線 (2)

(c) 材料特性のモデル化

図 3-3-13 は、真応力 σ -塑性真歪み ϵ 曲線を示しており、この曲線を基にトリリニア型のモデルを設定した。 (ϵ_0, σ_0) 、 (ϵ_2, σ_2) 、 (ϵ_3, σ_3) はそれぞれ、降伏点、引張強度、破断点を示している。また、 (ϵ_1, σ_1) は $(\epsilon_0, \sigma_0) - (\epsilon_2, \sigma_2)$ 間を最も元の曲線に近くなるような点として選んだ。引張強度以降において真応力 σ が低下しているが、実際の真応力は破断するまで増加するため、モデル化においては $\sigma_3 = \sigma_2$ とした。

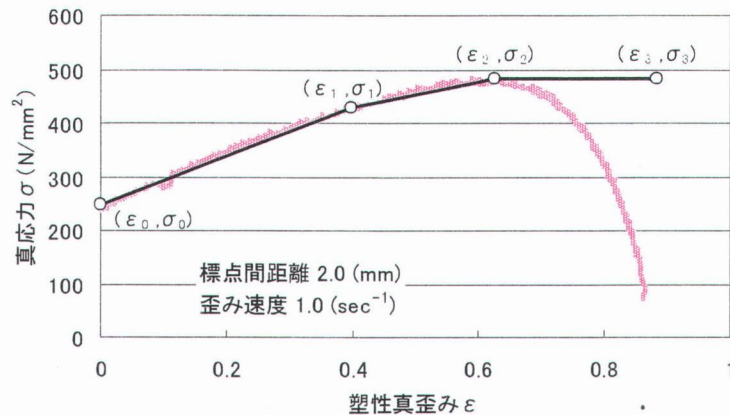


図 3-3-13 真応力-塑性真歪みのモデル化

表 3-3-4 は、高速載荷試験による真応力 σ -塑性真歪み ϵ 関係から、降伏点の歪み ϵ_1 をまとめたものである。また、この表から歪み速度をパラメータとしてプロットしたものが図 3-3-14 であり、近似曲線は片対数上で線形関係を示すことから、 A, B を係数として $\epsilon_1 = A \cdot \ln(\dot{\epsilon}) + B$ と表すことができる。

式 3-3-5 は標点間距離毎に回帰分析を行った結果を示しており、傾き A は標点間距離による差は少ないので平均値を使用した。一方、切片 B は標点間距離をパラメータとしてプロットしたところ図 3-3-15 となり、回帰分析の結果 式 3-3-6 を得た。以上より、 ϵ_1 は 式 3-3-7 として表すことができる。

表 3-3-4 歪み速度・標点間距離による ϵ_1 の値

歪み速度 $\dot{\epsilon}$ (sec ⁻¹)	標点間距離 L_0 (mm)				
	2	4	6	10	20
0.05	0.465	0.355	0.255	0.190	0.115
0.25	0.415	0.315	0.225	0.165	0.105
0.50	0.430	0.335	0.235	0.155	0.100
1.00	0.395	0.315	0.210	0.145	0.090
2.50	0.395	0.275	0.210	0.160	0.100
5.00	0.395	0.300	0.205	0.120	0.065
7.50	0.355	0.245	0.195	0.120	0.060
15.00	0.360	0.300	0.240	0.130	0.080

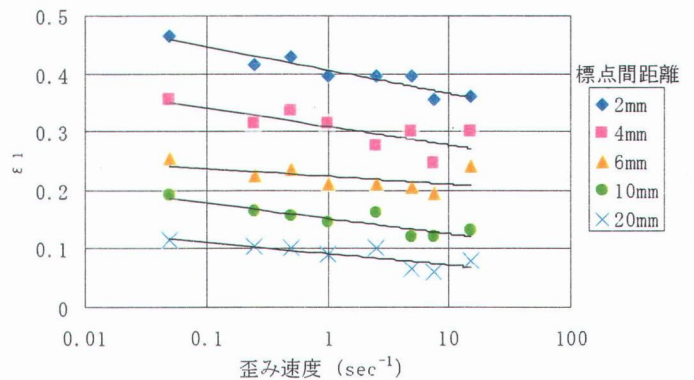
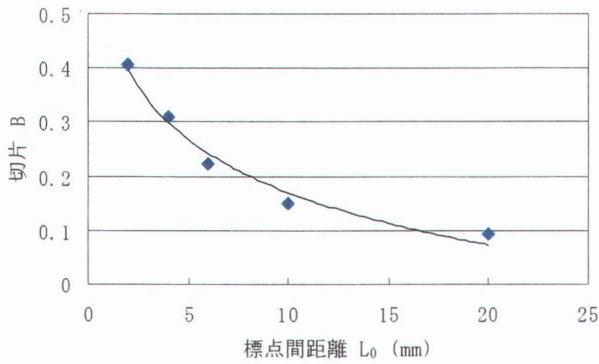


図 3-3-14 歪み速度と ϵ_1 の関係

$$\begin{cases}
 \epsilon_1 = -0.018 \ln(\dot{\epsilon}) + 0.406 & (L_0 = 2mm) \\
 \epsilon_1 = -0.014 \ln(\dot{\epsilon}) + 0.309 & (L_0 = 4mm) \\
 \epsilon_1 = -0.005 \ln(\dot{\epsilon}) + 0.224 & (L_0 = 6mm) \\
 \epsilon_1 = -0.012 \ln(\dot{\epsilon}) + 0.151 & (L_0 = 10mm) \\
 \epsilon_1 = -0.009 \ln(\dot{\epsilon}) + 0.092 & (L_0 = 20mm)
 \end{cases}
 \quad (3-3-5)$$



$$B = -0.14 \ln(L_0) + 0.495 \quad (3-3-6)$$

図 3-3-15 式 3-3-5 における切片 B と標点間距離の関係

$$\varepsilon_1 = -0.01 \ln(\dot{\varepsilon}) - 0.14 \ln(L_0) + 0.495 \quad (3-3-7)$$

ε_1 と同様に σ_1 を求めると σ_1 は、式 3-3-10 として表すことができる。

表 3-3-5 歪み速度・標点間距離による σ_1 の値

歪み速度 $\dot{\varepsilon}$ (sec ⁻¹)	標点間距離 L_0 (mm)				
	2	4	6	10	20
0.05	420.5	379.5	338.5	315.0	293.5
0.25	409.0	369.0	335.0	314.5	295.0
0.50	429.0	384.5	348.0	324.5	306.0
1.00	425.0	391.5	357.5	335.5	315.5
2.50	447.5	403.0	380.0	361.5	339.0
5.00	451.0	410.0	379.0	354.0	335.5
7.50	440.5	400.5	383.0	360.5	340.0
15.00	476.0	444.0	421.0	385.0	369.0

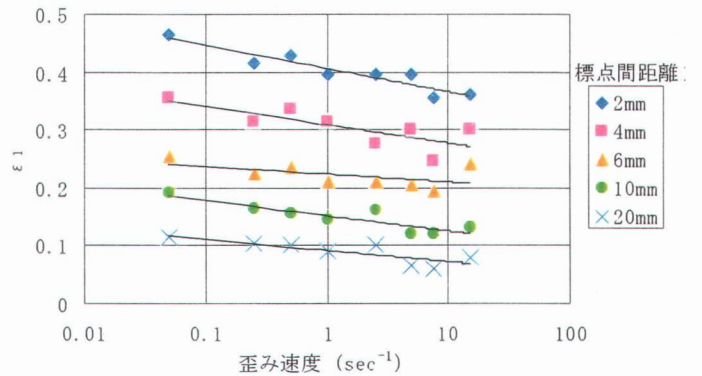
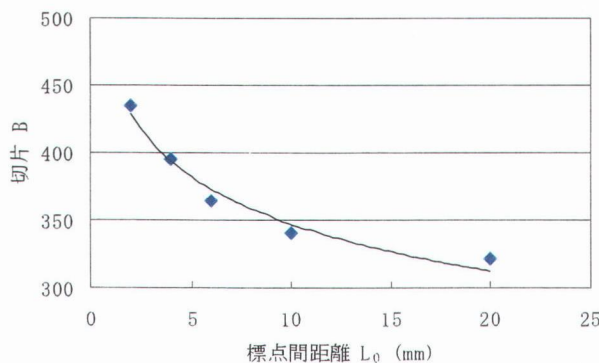


図 3-3-16 歪み速度と σ_1 の関係

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = 9.3 \ln(\dot{\varepsilon}) + 435 & (L_0 = 2mm) \\ \varepsilon_1 = 10.1 \ln(\dot{\varepsilon}) + 395 & (L_0 = 4mm) \\ \varepsilon_1 = 13.7 \ln(\dot{\varepsilon}) + 364 & (L_0 = 6mm) \\ \varepsilon_1 = 12.4 \ln(\dot{\varepsilon}) + 340 & (L_0 = 10mm) \\ \varepsilon_1 = 12.9 \ln(\dot{\varepsilon}) + 321 & (L_0 = 20mm) \end{cases} \quad (3-3-8)$$



$$B = -50 \ln(L_0) + 464 \quad (3-3-9)$$

図 3-3-17 式 3-3-5 における切片 B と標点間距離の関係

$$\sigma_1 = 11 \ln(\dot{\varepsilon}) - 50 \ln(L_0) + 464 \quad (3-3-10)$$

同様に $(\varepsilon_2, \sigma_2)$ 、 $(\varepsilon_3, \sigma_3)$ のモデル化の結果を以下に示す。これらをまとめた結果、歪み速度を考慮した極低降伏点鋼の材料特性は、式 3-3-14 として表すことができる。また、真応力*一塑性真歪み曲線とモデルの比較を図 3-3-21 に示す。

有限要素解析には、図 3-3-22 に示すように最大および最低歪み速度をカバーする複数本の材料特性モデルを入力データとして与えることにより、各時刻における各要素の歪み速度に応じた真応力*一塑性真歪み関係が補間され、計算に用いられることになる。

表 3-3-6 歪み速度・標点間距離による ε_2 の値

歪み速度 $\dot{\varepsilon}$ (sec ⁻¹)	標点間距離 L_0 (mm)				
	2	4	6	10	20
0.05	0.770	0.630	0.535	0.415	0.320
0.25	0.660	0.530	0.440	0.330	0.245
0.50	0.640	0.525	0.445	0.315	0.230
1.00	0.640	0.510	0.420	0.305	0.220
2.50	0.640	0.510	0.420	0.320	0.225
5.00	0.540	0.435	0.330	0.245	0.175
7.50	0.555	0.435	0.360	0.250	0.165
15.00	0.510	0.420	0.350	0.260	0.180

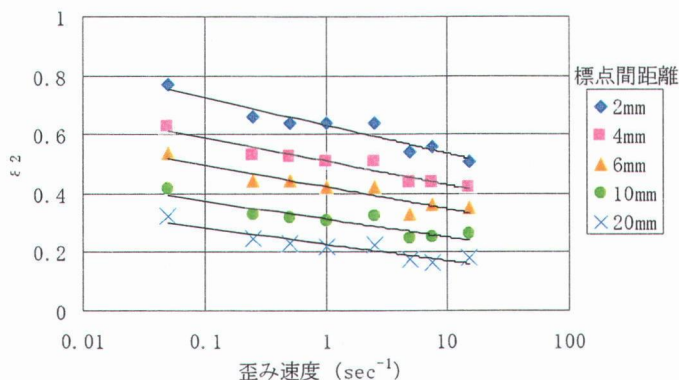


図 3-3-18 歪み速度と ε_2 の関係

$$\varepsilon_2 = -0.03 \ln(\dot{\varepsilon}) - 0.18 \ln(L_0) + 0.751$$

(3-3-11)

表 3-3-7 歪み速度・標点間距離による σ_2 の値

歪み速度 $\dot{\varepsilon}$ (sec ⁻¹)	標点間距離 L_0 (mm)				
	2	4	6	10	20
0.05	517.0	455.0	416.0	371.5	340.5
0.25	476.0	424.5	391.5	356.5	332.0
0.50	476.5	425.5	394.0	358.0	334.5
1.00	482.5	431.0	400.0	366.5	343.5
2.50	505.0	452.5	418.0	381.0	360.5
5.00	473.5	428.5	401.0	373.0	354.5
7.50	477.0	432.0	404.0	374.0	357.5
15.00	512.0	466.0	436.0	402.0	384.0

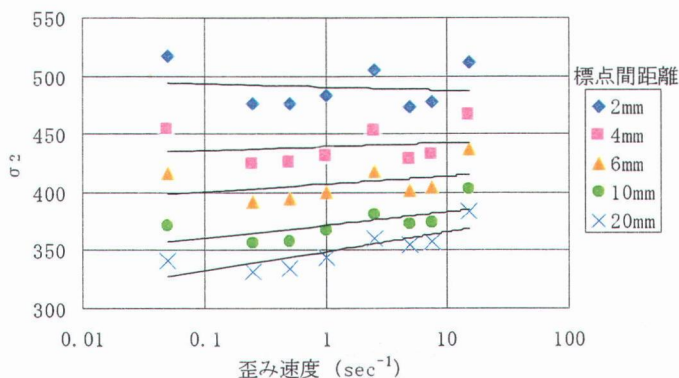


図 3-3-19 歪み速度と σ_2 の関係

$$\sigma_2 = (0.43 L_0 - 0.54) \ln(\dot{\varepsilon}) - 63 \ln(L_0) + 527$$

(3-3-12)

表 3-3-8 歪み速度・標点間距離による ε_3 の値

歪み速度 $\dot{\varepsilon}$ (sec ⁻¹)	標点間距離 L_0 (mm)				
	2	4	6	10	20
0.05	1.000	0.845	0.730	0.590	0.450
0.25	0.875	0.740	0.635	0.510	0.410
0.50	0.900	0.755	0.650	0.515	0.375
1.00	0.885	0.745	0.640	0.510	0.410
2.50	0.880	0.735	0.635	0.505	0.405
5.00	0.830	0.695	0.595	0.475	0.380
7.50	0.825	0.690	0.590	0.470	0.375
15.00	0.830	0.700	0.610	0.480	0.380

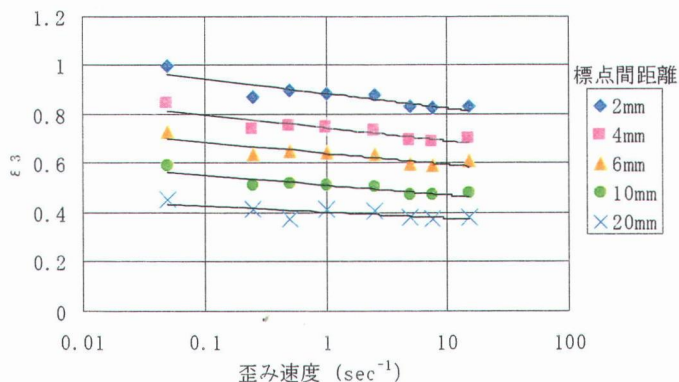


図 3-3-20 歪み速度と ε_3 の関係

$$\varepsilon_3 = -0.02 \ln(\dot{\varepsilon}) - 0.22 \ln(L_0) + 1.033$$

(3-3-13)

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_0 &= 0.0 \\
 \sigma_0 &= 20.76 \ln(\dot{\varepsilon}) + 248.8 \\
 \varepsilon_1 &= -0.01 \ln(\dot{\varepsilon}) - 0.14 \ln(L_0) + 0.495 \\
 \sigma_1 &= 11 \ln(\dot{\varepsilon}) - 50 \ln(L_0) + 464 \\
 \varepsilon_2 &= -0.03 \ln(\dot{\varepsilon}) - 0.18 \ln(L_0) + 0.751 \\
 \sigma_2 &= (0.43 L_0 - 0.54) \ln(\dot{\varepsilon}) - 63 \ln(L_0) + 527 \\
 \varepsilon_3 &= -0.02 \ln(\dot{\varepsilon}) - 0.22 \ln(L_0) + 1.033 \\
 \sigma_3 &= \sigma_2
 \end{aligned}
 \tag{3-3-14}$$

適用範囲

$$\left(\begin{array}{l} 0.05 \leq \dot{\varepsilon} \leq 15 \text{ (sec}^{-1}\text{)} \\ 2.0 \leq L_0 \leq 20 \text{ (mm)} \end{array} \right)$$

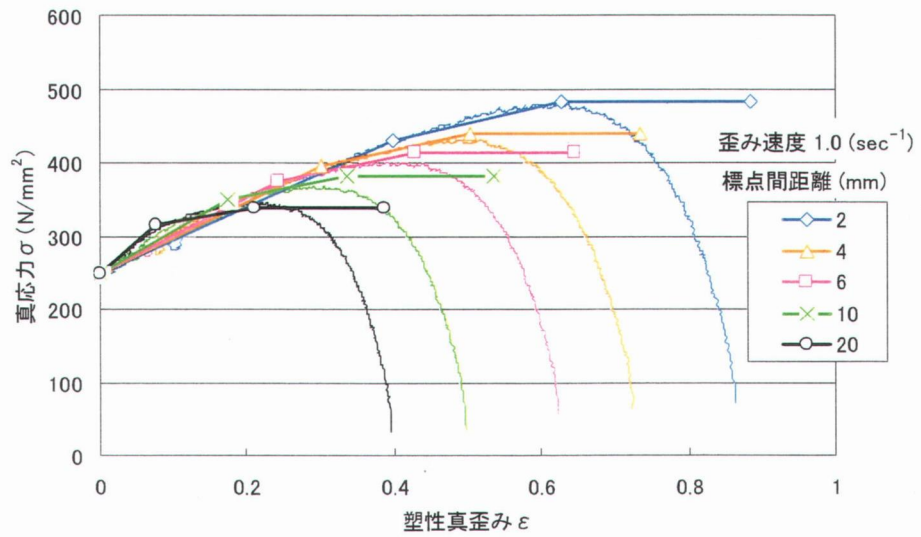


図 3-3-21 真応力-塑性真歪み曲線とモデル化の比較

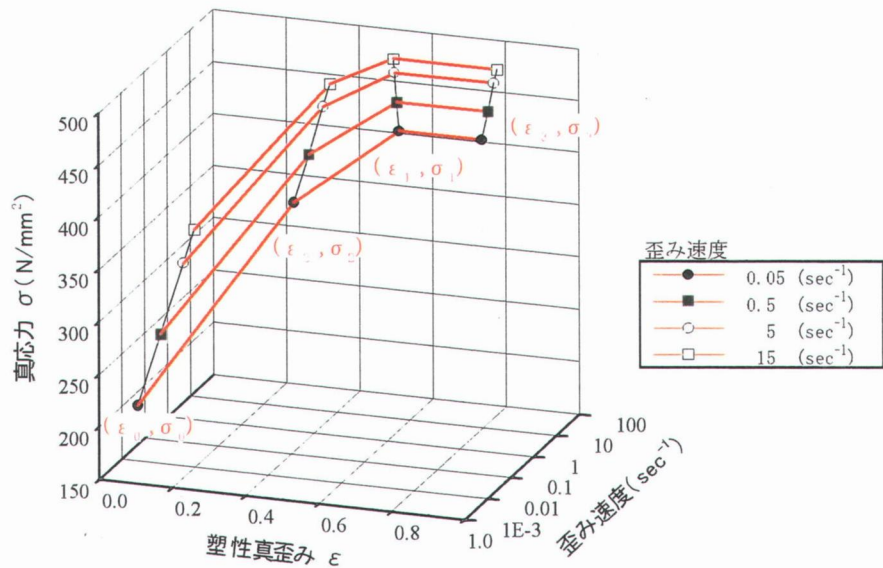


図 3-3-22 歪み速度の違いによる材料特性モデル化

(d) 高速引張試験のシミュレーション解析結果

図 3-3-23 に荷重速度 10sec/cm, 30sec/cm における解析値と実験値の荷重-変位曲線の比較を示す。また、実験と解析による試験片の変形形状の比較と解析条件を図 3-3-24 と表 3-3-9 に示す。最大荷重と破断歪みに関しては解析値と実験値は良く合っているが、最大荷重以降に差が見られる。これは、モデル化に用いている真応力* - 塑性真歪み関係（体積不変の法則を使用）では、最大荷重以降に生じるくびれ（図 3-3-24 の破断箇所付近）の影響が反映されないためであると思われる。

破断直前の荷重低下を除けば、実験結果を良好に再現でき、モデル化の妥当性が確認できたといえる。

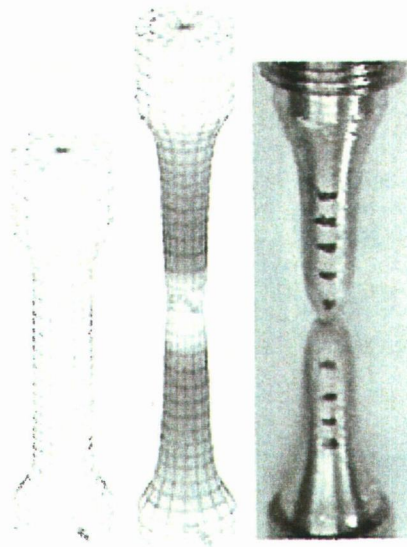


図 3-3-24 荷重前および破断直後の解析結果と実験による破断後の試験片

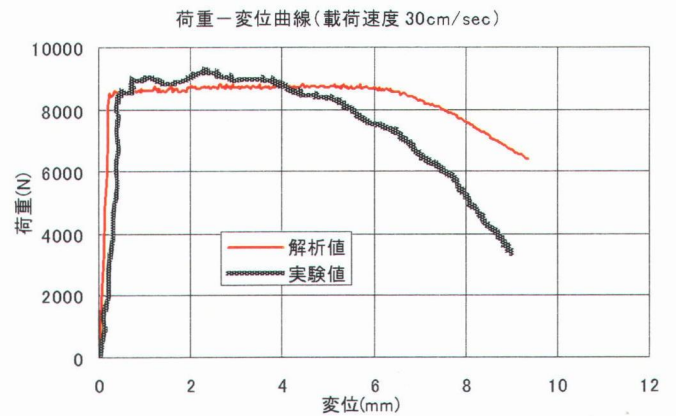
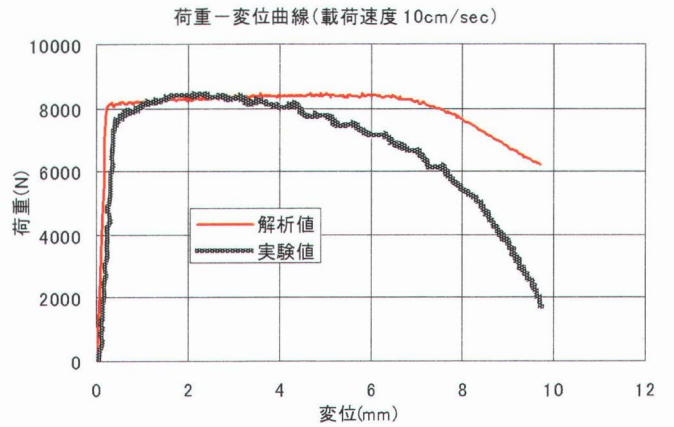


図 3-3-23 荷重-変位曲線

表 3-3-9 解析条件

使用プログラム	: LS-DYNA
作成モデル	: 1/4 モデル(184 要素)
質量密度	: $8.01 \times 10^{-10} (\text{kgf sec}^2/\text{mm}^4)$
弾性係数	: $4.845 \times 10^3 (\text{kgf}/\text{mm}^2)$
ポアソン比	: 0.3
刻み時間	: 約 8.0×10^{-8} 秒
解析時間	: 歪み速度 $1(\text{sec}^{-1})$ のとき約 20 時間

3.3.4 極低降伏点鋼サイスマックダンパーの動的載荷試験

(1) 実験の背景と目的

最近、地震エネルギー吸収装置を建築物や橋梁等の構造物内に組み込み、構造物全体の耐震性を向上させるという耐震設計方法が、注目されている。このエネルギー吸収装置について、本 WG では、極低降伏点鋼を使用したサイスマックダンパーに着目した。

極低降伏点鋼とは、降伏点が 100N/mm^2 以下の鋼材料である。一般鋼材と極低降伏点鋼の化学成分および機械的性質の比較を表 3-3-10 に、応力ひずみ曲線の比較を図 3-3-25 に示す。極低降伏点鋼は降伏点が低いため、小さな力で塑性変形を開始するが、普通鋼の 2 倍以上の破断伸びを有しており、変形能力は大きい。このため、極低降伏点鋼を用いた履歴型サイスマックダンパーは、地震時における構造物の、小さな揺れから大きな揺れの範囲まで、同一のデバイスで効率良くエネルギーを吸収することができる。また、極低降伏点鋼材は優れたエネルギー吸収性能を有している他に、加工性が良好で、溶接、切断、曲げなどの加工を、SS 材等の一般鋼材と同様に行うことができること、材料価格も一般鋼材と殆ど変わらない、などの利点を有しており、サイスマックダンパーの構成材料として優れている。

本研究では、極低降伏点鋼を用いた履歴型サイスマックダンパーの基本的な履歴特性を明らかにすることを目的とした。曲げ、せん断、振りの 3 種類の基本的変形に基づくエネルギー吸収装置を、実際に設計製作し、これらの装置に対して動的載荷実験を実施し、極低降伏点鋼を用いた履歴型サイスマックダンパーのエネルギー吸収の基本性能を明らかにする試みを行った。

表 3-3-10 化学成分および機械的性質の比較

鋼種	化学成分					機械的性質	
	C	Si	Mn	P	S	引張強さ	伸び
						(N/mm^2)	(%)
SS400	—	—	—	0.05以下	0.05以下	400~500	21
SM400B	0.20以下	0.35以下	0.60~1.40	0.035以下	0.035以下	400~510	22以上
極低降伏点鋼 (BT-LYP100)	0.02以下	0.02以下	0.20以下	0.03以下	0.03以下	200~300	50

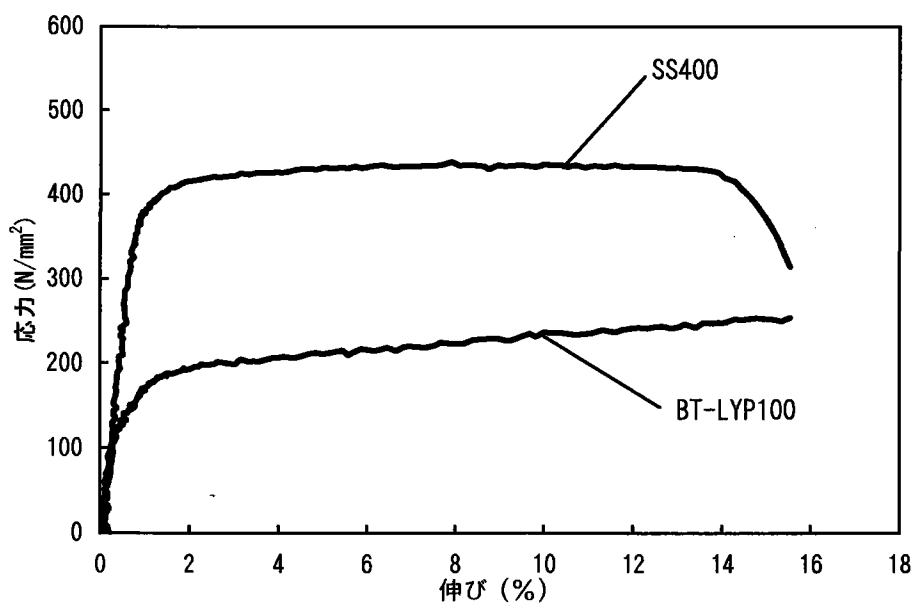


図 3-3-25 応力-ひずみ曲線の比較

(2) 载荷装置と実験方法

極低降伏点鋼として、BT-LYP100を使用した。この材料を用い、曲げ型、せん断型、振り型、全方向せん断型の4種類の実験供試体を設計、製作し、各々に対して载荷試験を行った。試験装置は、専用の载荷装置を作成した。载荷装置を図3-3-26、および図3-3-27に示す。

各供試体は、下端部分を試験装置に固定し、上端部分に2本のレールを抱いて滑るそり状のスライダ部を介して、油圧アクチュエーターと連結される。この、油圧アクチュエーターにより、供試体に動的な载荷、変形を与える。油圧アクチュエーターの载荷能力は250kN、変位の加振能力は最大500mmである。

各供試体の試験機への取り付け方向と、油圧アクチュエーターによる载荷、変形の方法を図3-3-28に示す。

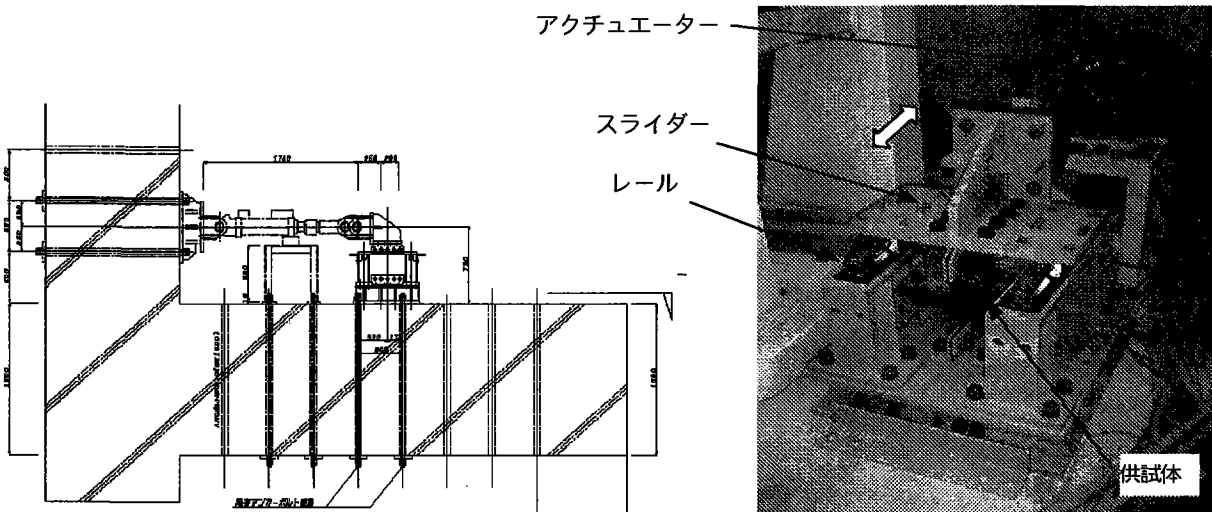


図 3-3-26 試験装置設置図

図 3-3-27 動的载荷試験装置

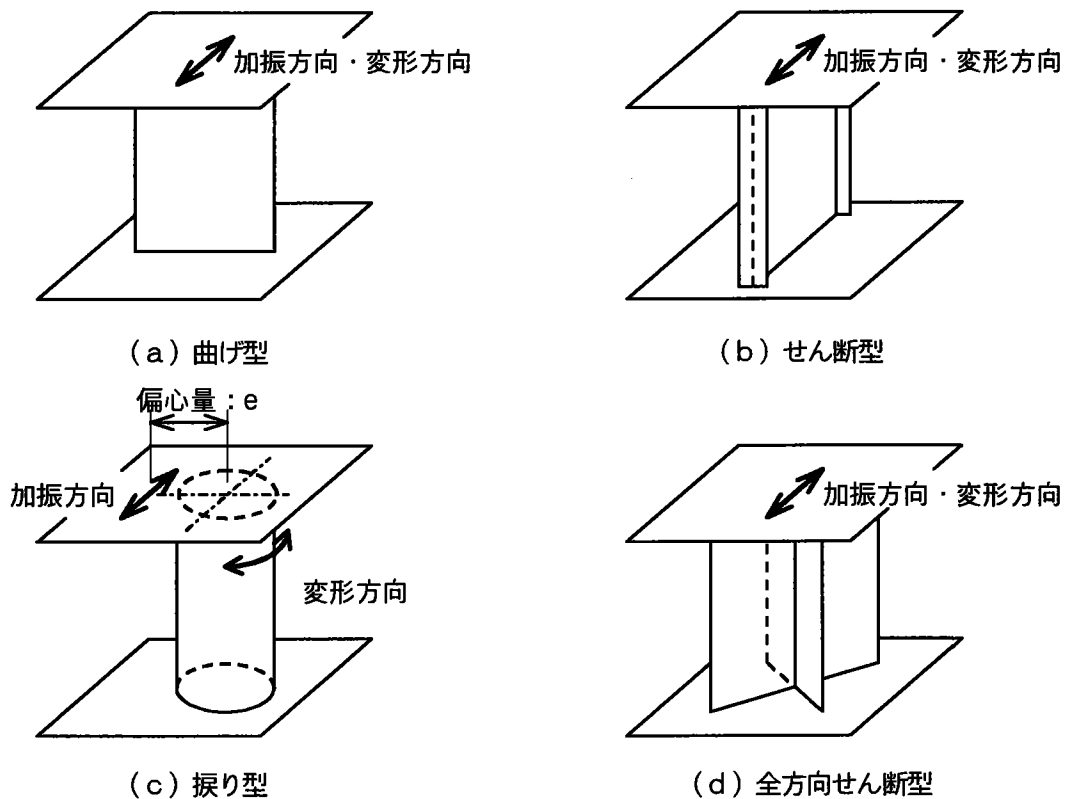


図 3-3-28 各供試体の加振方向および変形方向

各供試体に大変形を与えた場合、変形が大きくなるにつれて、供試体には引張力が作用する。このため、計測される抵抗力には、曲げ、せん断、振り変形における、ダンパーとしての抵抗力の他に、この供試体に作用する引張力も入り込むことになる。この問題点を解決するため、載荷試験装置のレールとスライド部の間には、硬質ゴムの層を挟み込んだ。この硬質ゴム層の圧縮変形により、計測される抵抗力において、「曲げ、またはせん断抵抗力」→「引張力」への移行が緩和されることを期待した。今回の動的載荷試験では、この供試体に作用する引張力が顕著となる以前の範囲に限定して、データを採取することにした。

加振波形は正弦波とし、周波数は 0.01~1.0Hz とした。また、漸増加振の振幅パターンは、①ステップ漸増型、②連続漸増型、③一定振幅型の3種類とした。供試体の変形する際の抵抗力は、油圧アクチュエーター先端部に取付けたロードセルにより計測し、供試体の変位はレーザー変位計によって計測を行った。これらセンサーの計測値は、A-D 変換を行った後、荷重または変位のデジタル値として PC 中に取り込み、ハードディスクに記憶することにした。

(3) 供試体の種類と特徴

供試体は図 3-3-29 に示すように作用する断面力に応じた曲げ型 (Type-B)、せん断型 (Type-S)、捩り型 (Type-T) の 3 つの基本型と、せん断型を直交させて組み合わせた全方向型 (Type-A) の計 4 種類を設定した。なお、各型式で設定された各々の実験ケースに対して 2 体の供試体を製作して繰り返し載荷実験を実施した。

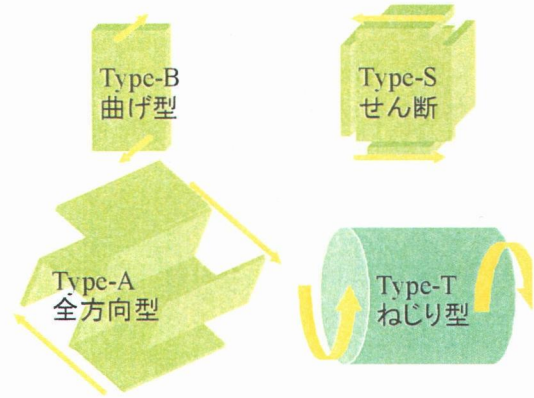


図 3-3-29 供試体種類

(a) 曲げ型供試体

曲げ型試験は、供試体の下端を固定し上端に水平方向の繰り返し荷重を載荷して、鋼板の弱軸まわりに曲げモーメントを繰り返し作用させた。供試体は、幅 (B=100,125,150) と板厚 (t=9,16) の異なる図 3-3-30 に示す 4 ケースを設定した。

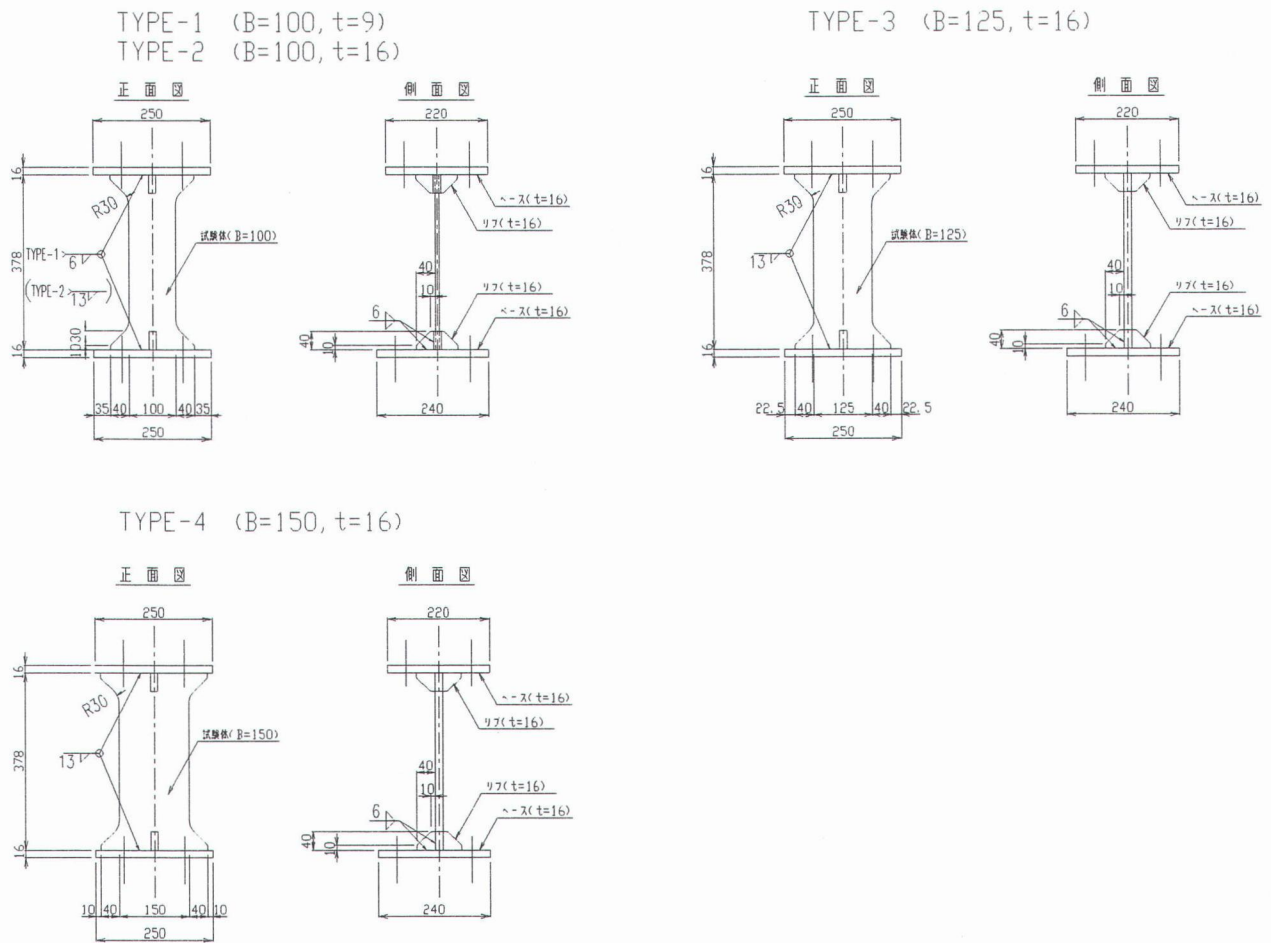


図 3-3-30 曲げ型供試体形状

(b) せん断型供試体

せん断型試験は、供試体の下端を固定し上端に水平方向の繰り返し荷重を鋼板の幅方向に載荷して、せん断力を繰り返し作用させた。供試体には補強リブを水平及び鉛直方向に取り付け、なるべく純粋なせん断特性を得るために補強リブのコーナー部を不連続とした。また、幅厚比は比較的小さく面外座屈は先行しない供試体となっている。供試体の板厚は 6mm とし、鋼板の幅 (B=100,125) と高さ (H=100,150) の異なる図 3-3-31 に示す 4 ケースを設定した。

(c) 全方向せん断型供試体

全方向せん断型試験は、鋼板を直交させた十字断面を持つ供試体の下端を固定し上端に水平方向の繰り返し

TYPE-1(円柱板厚9mm)
(TYPE-2(円柱板厚6mm))

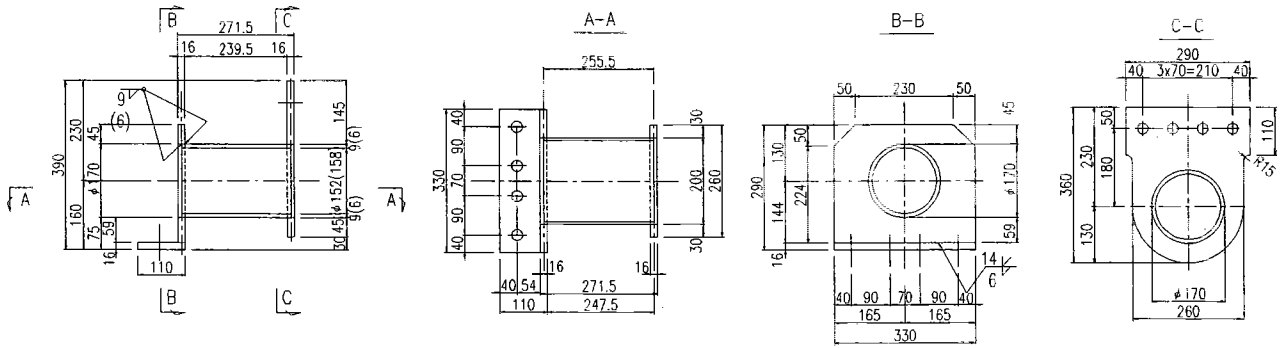


図 3-3-33 ねじり型供試体形状

設定した4つの型式に対する供試体ケースと形状寸法及び加振方法を表3-3-11に示す。また、表3-3-12には極低降伏点鋼 (BT-LYP100) の機械的特性を示す。この鋼材で製作した28体の供試体について動的繰り返し載荷実験を実施した。

表 3-3-11 供試体ケース

供試体番号	作用断面力	形状寸法					載荷角度	加振方法 (周波数 Hz)
		板厚 (t)	幅 (B, W), 径 (D)	高さ (H)	B/t, W/t, D/t	H/t		
Type-B1-1	曲げモーメント	9.5 mm	100 mm	298 mm	10.5	39.8	—	—
Type-B1-2		9.7 mm			10.3	40.0	—	連続漸増 (0.1, 1.0), ステップ 漸増 (0.5)
Type-B2-1		16.5 mm	100 mm		6.1	22.9	—	単一 (0.1)
Type-B2-2		16.4 mm			6.1	23.0	—	単一 (0.1, 0.5)
Type-B3-1		16.3 mm	125 mm		7.7	23.2	—	ステップ 漸増 (0.1, 0.5, 1.0)
Type-B3-2		16.3 mm			7.7	23.2	—	ステップ 漸増 (1.0), 連続漸増 (1.0)
Type-B4-1		16.3 mm	150 mm		9.2	23.2	—	ステップ 漸増 (0.1, 0.5, 1.0)
Type-B4-2		16.4 mm			9.1	23.0	—	ステップ 漸増 (0.01, 0.1, 0.5)
Type-S1-1	せん断力	6.6 mm	150 mm	150 mm	22.7	22.7	—	単一 (0.1), 連続漸増 (0.1), ステップ 漸増 (0.5)
Type-S1-2		6.6 mm					ステップ 漸増 (0.1, 0.01, 0.05), 単一 (0.01)	
Type-S2-1		6.6 mm	100 mm	15.2	—	連続漸増 (0.01, 0.1, 0.5)		
Type-S2-2		6.6 mm	—	—	—	連続漸増 (0.01), ステップ 漸増 (0.1, 0.5)		
Type-S3-1		6.5 mm	100 mm	150 mm	15.4	23.1	—	連続漸増 (0.1)
Type-S3-2		6.5 mm		100 mm	15.2	15.2	—	連続漸増 (0.01)
Type-S4-1		6.6 mm	100 mm	100 mm	15.2	15.2	—	ステップ 漸増 (0.01)
Type-S4-2		6.6 mm		ステップ 漸増 (1.0)				
Type-A1-1	せん断力	6.8 mm	2×150 mm	50 mm	22.1	7.4	0°	ステップ 漸増 (0.01, 0.1, 0.5)
Type-A1-2		6.6 mm			22.7	7.6		ステップ 漸増 (0.01, 0.1, 0.5)
Type-A2-1		6.7 mm			22.4	7.5	30°	ステップ 漸増 (0.01, 0.1, 0.5)
Type-A2-2		6.6 mm			22.7	7.6		ステップ 漸増 (0.01, 0.05, 0.1)
Type-A3-1		6.7 mm	1×150 mm		22.4	7.5	45°	ステップ 漸増 (0.01, 0.1, 0.5)
Type-A3-2		6.5 mm			23.1	7.7		ステップ 漸増 (0.01, 0.1, 1.0)
Type-A4-1		6.7 mm	1×150 mm		22.4	7.5	0°	ステップ 漸増 (0.01, 0.1, 0.5)
Type-A4-2		7.1 mm			21.1	7.0		単一 (0.1)
Type-T1-1	ねじりモーメント	9 mm	φ170 mm	271.3 mm	18.9	30.1	—	ステップ 漸増 (0.1), 連続漸増 (0.5)
Type-T1-2				271.8 mm		30.2	—	ステップ 漸増 (0.01, 0.05)
Type-T2-1		6 mm		271.3 mm	28.3	45.2	—	単一 (0.01), ステップ 漸増 (0.01, 0.05)
Type-T2-2				271.5 mm		45.3	—	単一 (0.01, 0.05), ステップ 漸増 (0.01)

表 3-3-12 使用材料の機械的特性

鋼材	板厚	0.2% 耐力	引張強度	降伏比	伸び
BT-LYP100	6 mm	84 N/mm ²	254 N/mm ²	33%	63%
BT-LYP100	9 mm	84 N/mm ²	252 N/mm ²	33%	66%
BT-LYP100	16 mm	83 N/mm ²	254 N/mm ²	33%	64%

(4) 動的載荷試験結果と考察

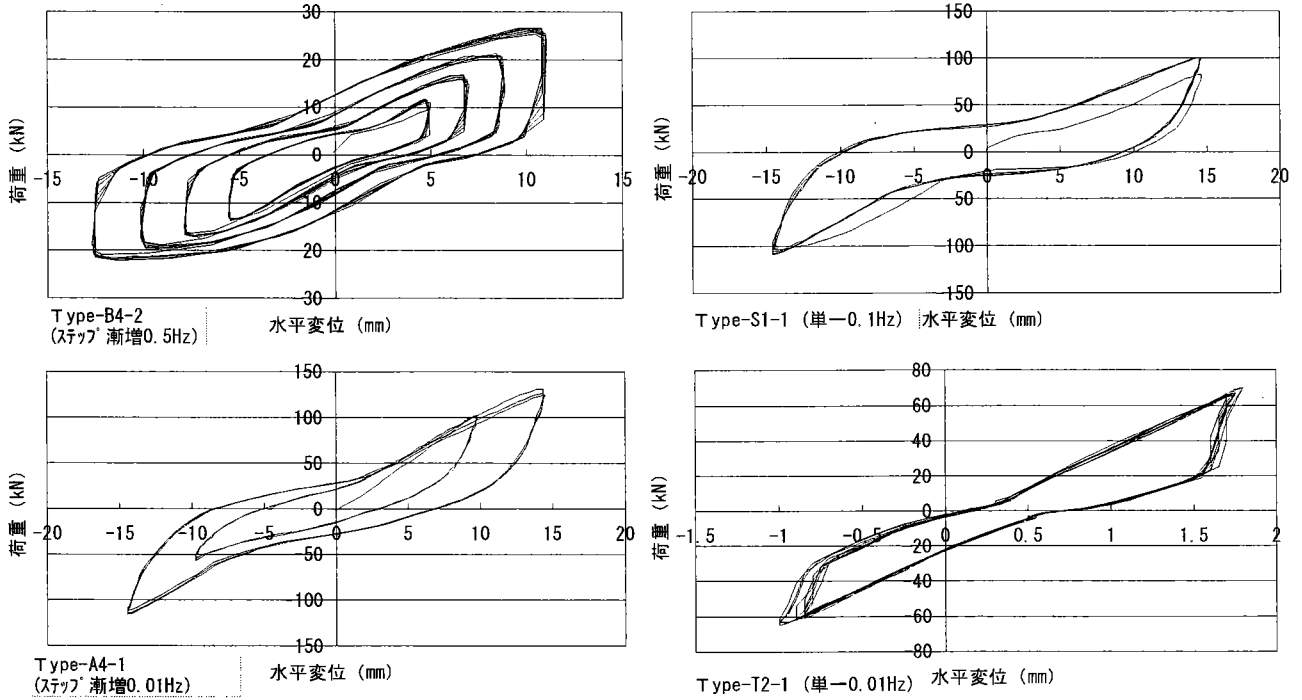


図 3-3-34 各荷重タイプ^oの履歴曲線

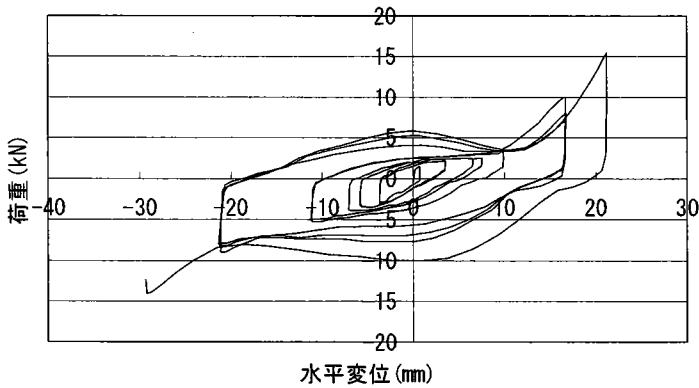


図 3-3-35 曲げ型の履歴曲線 (軸力の影響)

図 3-3-34 に 4 タイプの代表的な供試体における動的載荷試験結果を荷重と水平変位の関係で示す。どの減衰装置においても安定的なヒステリシスループを示している。

表 3-3-13 各タイプ^oの吸収エネルギー

B4-2		S1-2	
変位 (mm)	履歴曲線面積 (kN・mm)	変位 (mm)	履歴曲線面積 (kN・mm)
7.225	181.928	3.600	130.885
8.100	232.968	4.400	287.700
11.550	536.324	5.050	394.585
12.825	647.573	6.600	685.258
13.925	826.442	7.725	1,004.715
合計	2,411.977	合計	2,503.142

A3-2		T2-1	
変位 (mm)	履歴曲線面積 (kN・mm)	変位 (mm)	履歴曲線面積 (kN・mm)
0.950	11.868	1.625	73.243
1.500	31.320	1.650	77.380
2.750	94.387	2.775	232.355
3.325	147.937	3.000	271.003
4.700	333.902	3.200	294.305
合計	619.414	合計	948.286

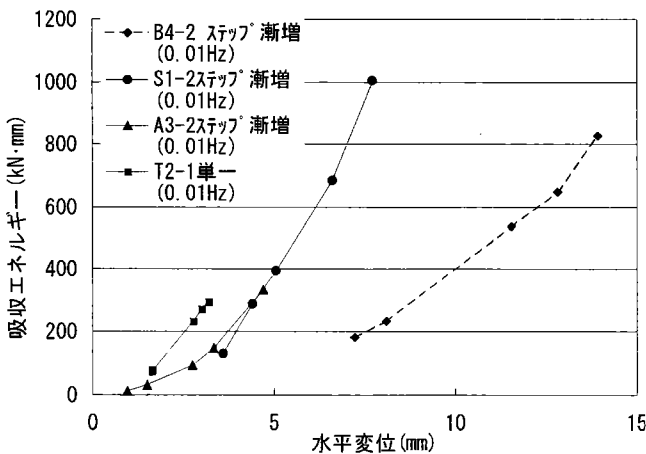


図 3-3-36 各タイプ^oの変位と吸収エネルギー関係

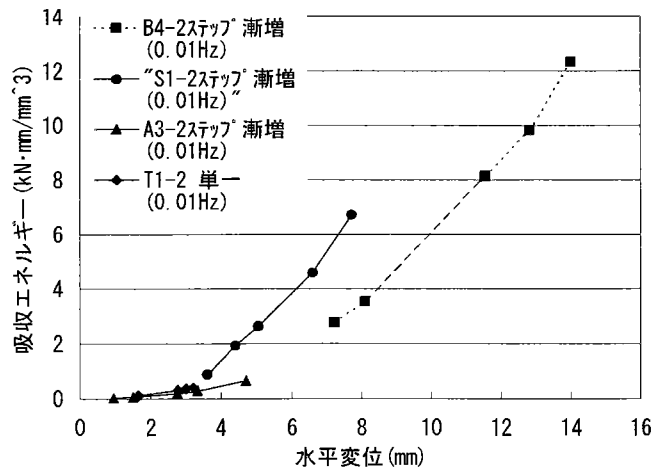


図 3-3-37 各タイプ^oの変位と吸収エネルギー関係 (体積による基準化したもの)

図 3-3-35 は軸力の影響を調べるために行った動的载荷実験で、曲げ型供試体の連続漸増入力における履歴曲線である。降伏流れ場を経て復元力は一時低下するが、暫くすると再び上昇に転じる。これは加振装置の鉛直軸方向変位を拘束したまま横変位させることに伴う軸力の発生原因で生じる現象である。また、鉛直軸方向の拘束によるもう一つの問題であるひずみ硬化現象については、幾つかの実験で報告されている。本実験では水平方向のスライド面に硬質ゴム（スライト[®]シター）を使用した影響によるものか、図 3-3-35 のような強い軸力が作用する場合を除いて顕著なひずみ硬化現象は見られなかった。

表 3-3-13 はタイプ別の各サイクルにおけるエネルギー吸収量をヒステリシスループの面積から算出したもので、図 3-3-36 にエネルギー吸収量と最大水平変位の関係を、図 3-3-37 は供試体の体積で基準化したエネルギー吸収量と最大水平変位の関係を示す。ここで、せん断型の減衰装置は、4 タイプの中で最もエネルギー吸収効率がよいことが分かる。また、全方向せん断型のエネルギー吸収量と最大変位の関係がせん断型の曲線に重なることから、任意の地震波の入射角に対しても十分にその機能を発揮することが分かった。

図 3-3-38 は動的実験実施後のせん断型供試体の写真であるが、補強リブの隅角部を不連続としているため、隅角部に面外変形を生じさせるケースがあった。せん断型実験における変形の繰り返しによって生じた疲労亀裂は、やはり隅角部から発生しせん断面に沿って進展した。したがって、本実験で採用したせん断型供試体の構造は、隅角部が弱点になると考えられる。

本実験で得られた結果から、各減衰装置の総合的な評価を実施して、その結果を表 3-3-14 に示す。

表 3-3-14 各履歴ダンパーの総

	曲げ型	せん断型	ねじり型
製作性	◎	○	△
施工性	◎	○	△
経済性	○	○	○
エネルギー吸収効率	△	◎	○
総合評価	○	◎	▲
特徴	・構造が単純である ・大变位に対しても追随可能である	・リブ溶接がやや煩雑である ・全方向型も可能である ・効率がよい	・小変位で吸収が大きい ・荷重の載荷方法が難しい ・曲げ加工の手間がかかる



図 3-3-38 せん断型供試体

(5) 設計手法に関する考察

今回用いた極低降伏点鋼の静的降伏応力度と強度はそれぞれ 84N/mm^2 、 254N/mm^2 である。しかし、この静的降伏応力度に基づいてサイスミックダンパーを設計すると、復元力値 P を過小評価することになる。むしろ、図 3-3-39 に示すように、極低降伏点鋼の応力-歪み関係を簡略してバイリニアで表わす方が実際の復元力に合致することが分かった。この理由として歪み速度の影響が考えられ、歪み速度の上昇と共に急激に降伏応力度が上昇し、バイリニア型の応力-歪み曲線に近づくためであると思われる。初期剛性 k と、図 3-3-39 に示すバイリニア曲線より求めた復元力 P から降伏時の変形 D_y が求められ、次に塑性変形量 D_p が求められることになる。

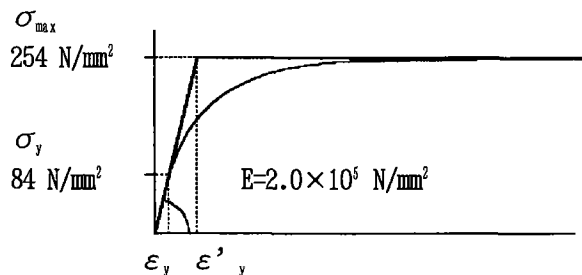


図 3-3-39 極低降伏点鋼の応力-歪み関係のモデル

曲げ、せん断、振りの初期剛性 k をそれぞれ以下に示す。

(a) 曲げ

たわみ角法により、曲げ型の初期剛性 k_{B0} を求める。

$$\begin{cases} M_{AB} = 2EK_{AB}(2\theta_A + \theta_B - 3R_{AB}) + C_{AB} \\ M_{BA} = 2EK_{AB}(2\theta_B + \theta_A - 3R_{AB}) + C_{AB} \\ \theta_A = \theta_B = 0, \quad C_{AB} = C_{BA} = 0 \end{cases}$$

$$M_{AB} = 2EK_{AB}(-3R_{AB}) = -6EK_{AB}R_{AB} = -\frac{6EI\delta}{L^2}$$

$$M_{BA} = 2EK_{AB}(-3R_{AB}) = -6EK_{AB}R_{AB} = -\frac{6EI\delta}{L^2}$$

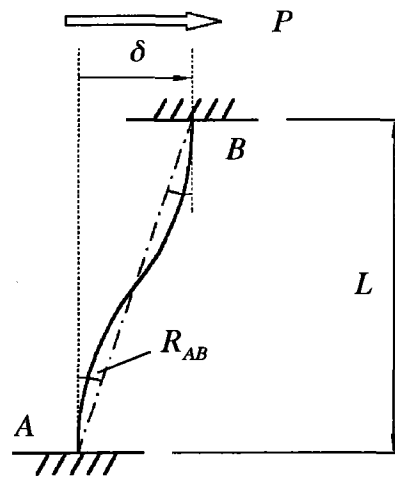
せん断力の釣合い式より、

$$2M + PL = 0$$

$$\therefore P = \frac{12EI}{L^3} \delta$$

よって初期剛性 k_{B0} は

$$k_{B0} = \frac{12EI}{L^3}$$



ここに、

M : 部材の材端モーメント

θ : 接点回転角

R : 部材回転角 ($\doteq \delta/L$)

I : 部材の断面二次モーメント

L : 部材の長さ

K : 部材剛度 ($= I/L$)

E : 部材のヤング係数

C : 荷重項

(b) せん断

右に示すせん断モデルにより、せん断型の初期剛性 k_{s0} を求める。

$$P = A_s \tau = btG \gamma = btG(\delta/h) = (btG/h)\delta = \frac{btE}{2(1+\nu)h} \delta$$

よって、初期剛性 k_{s0} は

$$k_{s0} = \frac{btE}{2(1+\nu)h}$$

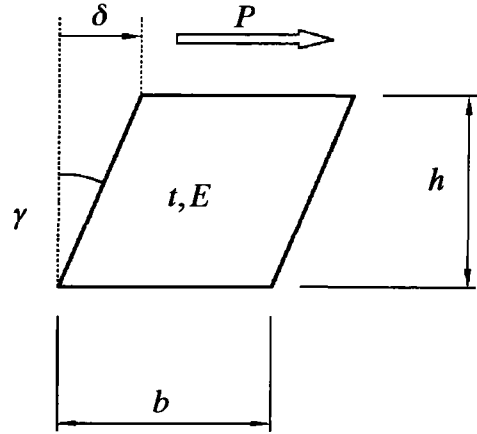
ここに、

A : 部材の断面積

G : せん断弾性係数(= $E/2(1+\nu)$)

ν : ポアソン比

γ : 部材のせん断角($\doteq \delta/h$)



(c) 捩り

円管モデルにより、捩り型の初期剛性 k_{T0} を求める。

$$\varphi = \frac{Tl}{GI_P} \quad \therefore T = \frac{GI_P}{l} \varphi$$

トルクの荷重を P 、アーム長を L とすれば、

$$T = PL = \frac{GI_P}{l} \cdot \frac{\delta}{L}$$

$$\therefore P = \frac{GI_P}{lL^2} \delta$$

よって、初期剛性 k_{T0} は

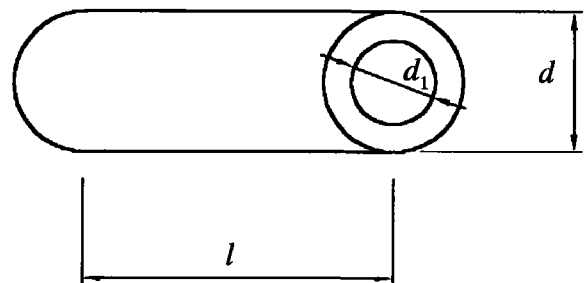
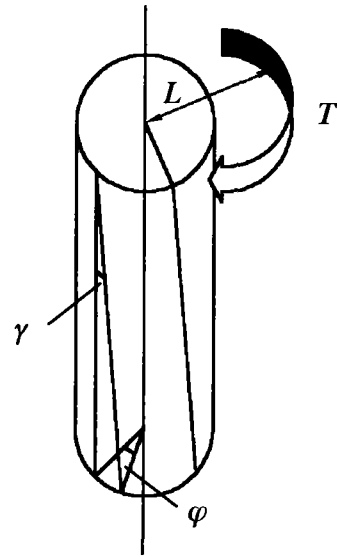
$$k_{T0} = \frac{GI_P}{lL^2}$$

ここに、

T : トルク

φ : 部材のねじれ角($\doteq \delta/L$)

I_P : 部材の極二次モーメント



$$I_P = \iint r^2 dx dy = \int_{d_1/2}^{d/2} r^2 2\pi r dr = 2\pi \left[\frac{r^4}{4} \right]_{d_1/2}^{d/2} = \frac{\pi}{32} (d^4 - d_1^4)$$

(6) サイズミックダンパーの動的載荷試験のまとめ

本項で得られた結果を箇条書きにしてまとめると以下のようになる。

- ・曲げ・せん断・振りの3種類の基本的な変形に基づいた減衰装置を作製して動的載荷試験を行ったところ、いずれのタイプの減衰装置においても繰り返し載荷に対する安定性が優れていることが分った。
- ・最も大きく塑性域に入っている曲げタイプにおいても、交番載荷数10回程度の試験を4回連続しても殆ど同様の履歴曲線が得られた。
- ・3種類の減衰装置の基本的な特性、エネルギー吸収性能、製作性、施工性などについて明らかにし、総合的な評価を行った。
- ・全方向せん断型ダンパーは、任意の地震波の入射角に対しても十分その機能を発揮することがわかった。
- ・設計に必要な初期剛性の算定式を提案した。
- ・極低降伏点鋼の応力-歪み関係のモデル化の方法とサイズミックダンパーの設計手法を提案した。

3.3.5 鋼製橋脚橋の制震対策への適応性に関する検討

前項 §3.3.3, §3.3.4では、極低降伏点鋼の材料特性と極低降伏点鋼を用いた履歴型サイズミックダンパーの動特性について明らかにし、そのモデル化に関する検討を行った。これらに基づき、本項では、鋼製履歴型サイズミックダンパーの実橋への適応性について、プレート境界型地震と内陸直下型地震の2種類の地震波に対する動的応答解析を通して検討する。履歴型サイズミックダンパーについては、兵庫県南部地震のような主要動の短い内陸直下型地震に対しては、その制震効果を疑問視するむきもあるため、両地震波による応答の比較を試みたものである。また逆に、内陸直下型地震には効きが良いが、長周期成分の多いプレート境界型地震に対しては大きな効果が期待できない免震支承と併用した場合についても検討することにした。

極低降伏点鋼の履歴型サイズミックダンパーの検討例としては、橋脚基部へ巻きつけたものやラーメン型橋脚内にブレースを設けて、この中間部分に設置したもの、あるいは橋桁と橋台（橋脚天端）との間に設置したものなどがあるが、いずれも詳しい検討がなされていない。ここでは、支間長50mの5径間連続鋼製橋脚橋を想定し、この橋脚基部にせん断型の履歴型サイズミックダンパーを設置した場合について検討している。

(1) 解析モデルと解析方法

解析モデルは、図3-3-40に示すような、支間長50mの5径間連続鋼製橋脚橋とした。この内の1橋脚を取出し、図3-3-41に示すような1本柱モデルで表わした。橋脚断面は、サイズミックダンパーの性能を示すために、敢えて旧設計示方書に基づいて設計し、その橋脚高さは20mとした（図3-3-42）。また、鋼製橋脚の基礎フーチング厚は3.0mとし、橋脚基部から2.0mまではコンクリートを充填しているものとした。

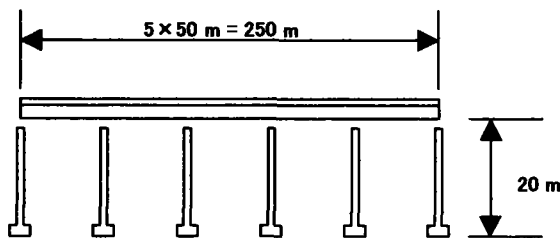


図 3-3-40 5径間連続鋼製橋脚橋モデル

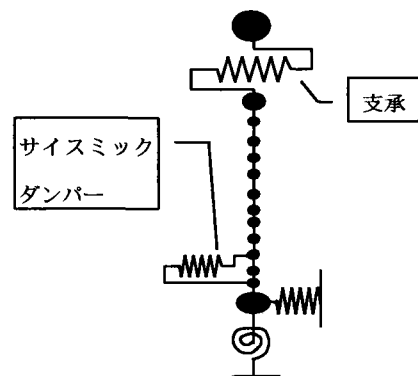


図 3-3-41 1本柱モデル

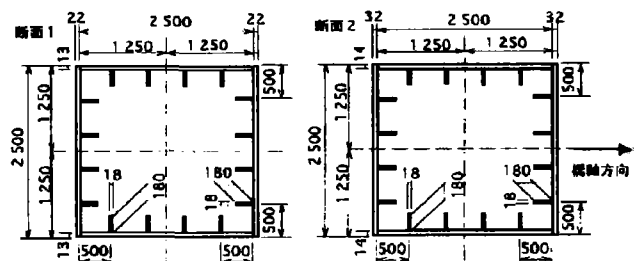
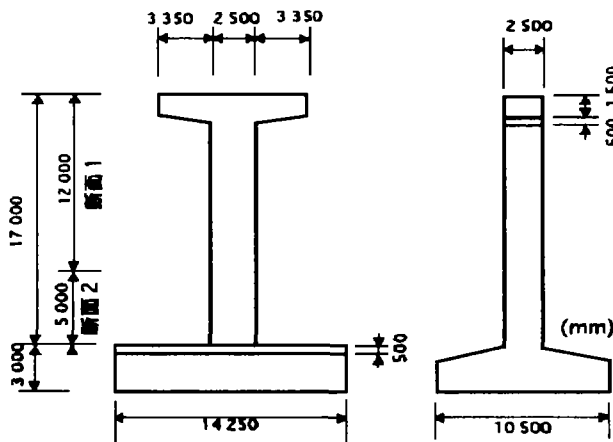


図 3-3-42 鋼製橋脚モデル

鋼材は圧縮側に劣化特性を持たせ、図 3-3-43 に示す鋼材の応力度(σ)—歪み(ε)関係で表わした。鋼製橋脚の曲げモーメント(M)—曲率(ϕ)関係は断面分割法によって求めたが、これを図 3-3-44 のように簡略化してバイリニア型の $M-\phi$ 関係で表わした。

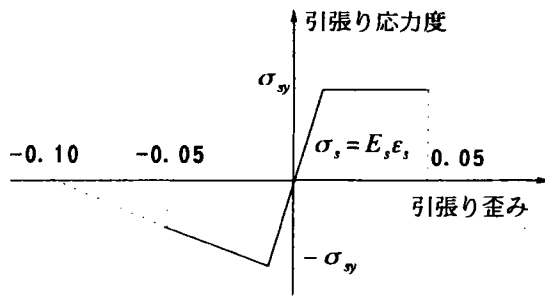


図 3-3-43 鋼材の応力度—歪み関係

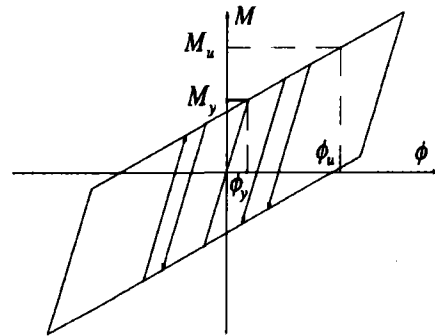


図 3-3-44 橋脚の $M-\phi$ 関係

鋼製のサイスミックダンパーは、引張・圧縮・曲げ・せん断・振り型など種々のタイプがあるが、ここでは前項における吸収エネルギー効率に関する検討で成績の良かった、せん断型を用いることにした。設置位置は、せん断変形の抽出が比較的容易であると思われる橋脚基部、充填コンクリートの上部 (図 3-3-45) とした。橋脚の曲げ変形からせん断変形を抽出するために、基部を固定する他は、橋脚本体と縁を切った構造とする。

サイスミックダンパーは、2.0m×3.0mの長方形パネル型とし、幅厚比を 80 に設定して板厚を決定した。また、あらゆる角度からの地震入力にも対応できるように、パネル 2 枚を十字に組み合わせた全方向型ダンパーを想定した。この全方向型ダンパーのエネルギー吸収性能については、前項で実証的な検討を行っている。サイスミックダンパーは履歴型の「ばね要素」としてモデル化し、その履歴特性には Ramberg-Osgood 型を用いた。

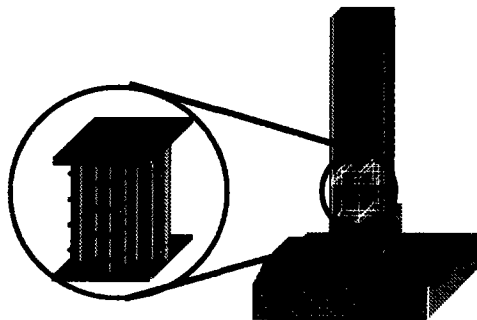


図 3-3-45 全方向型せん断パネルダンパーと設置位置

Ramberg-Osgood 型復元力特性を有するサイスミックダンパーのせん断変形角(γ)—せん断力 (τ) 関係は、図 3-3-46 に示すように、骨曲線と加力線および減力線で表わされる。前項までの検討において示されたように、極低降伏点鋼を用いたサイスミックダンパーの履歴特性は歪み速度依存型として表現するのが適切であると思われるが、ここで用いる動的応答プログラム DYN2E には歪み速度依存型は用意されていないため、式 3-3-15 で示される平均せん断歪み速度 $\dot{\gamma}_{ave}$ (1/sec) を用いて特性値を決定することにした。

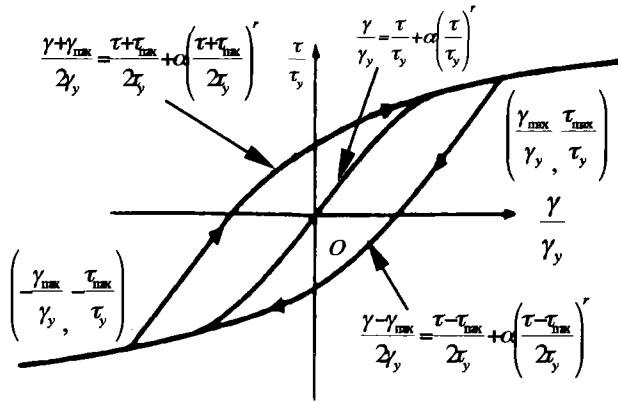


図 3-3-46 Ramberg-Osgood 型履歴モデル

$$\dot{\gamma}_{ave} = \frac{4D}{TH} \quad (3-3-15)$$

ここで、 D 、 T 、 H はそれぞれ、定常応答における最大相対変位(mm)、固有周期(sec)、せん断パネル高さ(mm)である。Ramberg-Osgood 型モデルの骨曲線は次式のように表わすこともできる。

$$\frac{\gamma}{\gamma_y} = \frac{\tau}{\tau_y} + \alpha \left(\frac{\tau}{\tau_y} \right)^r \quad (3-3-16)$$

式 3-3-16 の降伏せん断応力度 τ_y (N/mm²)、係数 α 、Ramberg 数 r は、幅厚比 80 の正方形パネル、あるいはこれを最大 1.5 の縦横比で縦と横に複数組み合わせさせた場合には、それぞれ次式で表わされることが、200×200mm (約 1/3 スケール) のパネルを用いた高速繰り返し載荷試験結果および 3 次元動的解析を行った結果から分かっている。

$$\begin{cases} \tau_y = 6.26 \cdot \ln(\dot{\gamma}_{ave}) + 100.7 \\ \alpha = -0.0038 \cdot \ln(\dot{\gamma}_{ave}) + 0.022 \\ r = 14 \\ \gamma_y = \tau_y / G_{eq} \end{cases} \quad (3-3-17)$$

ここで、 G_{eq} は τ - γ 関係曲線の初期勾配から求めた等価せん断弾性係数であり、その概略値は $G_{eq} = 4.49 \times 10^4$ N/mm² である。動的応答プログラム DYNA2E にはね要素として挿入するときには、 τ - γ 関係を、荷重 (P) - 変位 (δ) 関係に変換する必要がある。この変換は次式を用いて行った。

$$\delta = \frac{P}{k_0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{P}{P_Y} \right)^\beta \right\} \quad (3-3-18)$$

ここで、

$$\begin{cases} k_0 = \frac{G_{eq} A}{H} \\ P_y = \tau_y \cdot A \\ \alpha = -0.0038 \cdot \ln(\dot{\gamma}_{ave}) + 0.022 \\ \beta = r - 1 \end{cases} \quad (3-3-19)$$

また、ここで A はダンパーのせん断断面積である。

サイスミックダンパーの設計手順を図 3-3-47 に示す。まず、固有値解析などにより橋脚の固有周期 (T) を求め、各入力地震波の変位応答スペクトルより、応答最大変位を求める。これをもとにたわみ曲線を用いて、サイスミックダンパー設置位置における最大相対変位 (D) を求め、平均せん断歪み速度など、各パラメータを求める。以上の設計を各入力地震波に対して行い、ダンパーの特性値を決定する。

変位応答スペクトルを用いて算定されたダンパーの特性値は、実際に動的応答解析を行ったときの値とは多少異なるであろう。この差がどの程度であるかを確認するために、動的応答解析で得られた橋脚の応答変位と振動周期を用いて平均歪み速度を計算し直し、再度動的解析を行ったところ、

耐震安全性を判断するための主要な要素である橋脚基部の応答最大曲率には殆ど誤差が現れなかった。このことより、サイスミックダンパーの設計手順において、変位応答スペクトルを用いる当手法の有効性を確認することができている。

地盤ばね定数は、道路橋示方書の算出方法に従い、水平方向地盤ばね定数としては $K_y = 3.42 \times 10^5$ (tf / m) を用い、回転ばね定数は $K_{\alpha} = 9.42 \times 10^6$ (tf-m / rad) を用いた。

免震支承は等価線形化手法によりモデル化した。免震を行わない、(以後、非免震と表現する。) 支承においては、支承の線形ばね剛性に非常に大きな値を用いることで橋脚と橋桁の固定度を表わすことにした。鋼部材の減衰定数は 0.015、基礎のばねの減衰定数は並進、回転ともに 0.1 とした。また、変位応答スペクトルを求める際の減衰定数は 0.05 とした。この 0.05 という値は、サイスミックダンパーの設計で使う変位応答スペクトルが、動的応答解析時の橋脚天端の最大変位に近い値になるように設定したものである。

以上のモデルに対して動的応答解析を行い、サイスミックダンパー及び免震支承による耐震安全性を検討した。入力地震波は、表3-3-14に示すようにII種地盤用のプレート境界型(Type 1)3波と内陸直下型(Type 2)3波の計6種類を用いた。また、それぞれの入力地震波に対して非免震・免震とダンパーの有無の組み合わせ4ケース、計24ケースについて解析を行った。解析は直接積分法で、時間刻みは0.002秒とした。

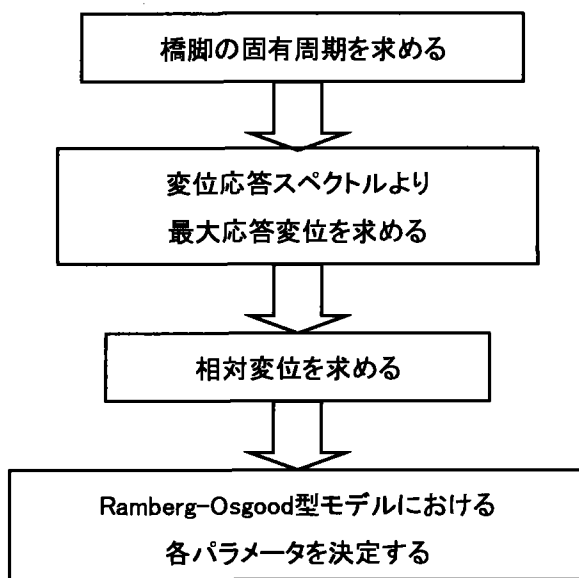


図 3-3-47 サイスミックダンパー設計フローチャート

表 3-3-14 入力地震波

プレート境界 型 Type1	1-II-1	1968年 日向灘沖地震 板島橋周辺地盤 (LG成分)
	1-II-2	1968年 日向灘沖地震 板島橋周辺地盤 (TR成分)
	1-II-3	1994年 北海道東方沖地震 温根沼大橋周辺地盤上 (TR成分)
内陸直下型 Type2	2-II-1	1995年 兵庫県南部地震 JR鷹取駅構内地盤上 (NS成分)
	2-II-2	1995年 兵庫県南部地震 JR鷹取駅構内地盤上 (EW成分)
	2-II-3	1995年 兵庫県南部地震 大阪ガス葺合供給所構内地盤上 (N30W成分)

(2) 耐震安全性の評価方法

耐震安全性の評価は指標として次式で表わされる耐震安全性評価値 α を用いることにした。

$$\alpha = \phi_{\max} / \phi_u \quad (3-3-20)$$

ここで ϕ_{\max} は最大応答曲率、 ϕ_u は圧縮側が降伏 (ϕ_y) した後に引張側端部が降伏する時の限界曲率であり、この α が 1 を超える場合に橋脚基部は極限状態に達したものと判断することができる。

また、図 3-3-48 に示すような、橋脚基部の曲げモーメント (M) - 曲率 (ϕ) 関係から、橋脚基部の 3 種類の変形状態、弾性状態 (elastic)、降伏状態 (yield)、終局状態 (ultimate) を判定して表記することにした。

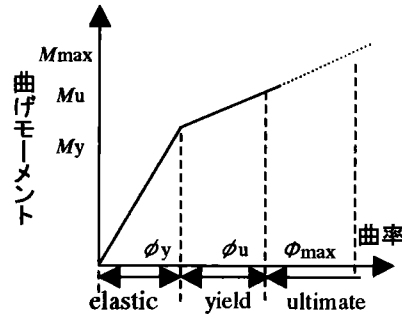


図 3-3-48 橋脚基部の状態判定

(3) 動的応答解析結果

動的応答解析結果を以下に例示する。図 3-3-49～3-3-52 は、プレート境界型地震の一つである 1968 年の日向灘沖地震・板島橋周辺地盤 (LG 成分) 波入力に対する応答解析結果であり、図 3-3-53～3-3-56 は、内陸直下型地震の一つである 1995 年の兵庫県南部地震・JR 鷹取駅構内地盤上 (NS 成分) 波入力に対する応答解析結果である。それぞれの地震波入力に対して、ダンパーのない場合の応答波形、ダンパーを設置した場合の応答波形、橋脚基部の M- ϕ 関係曲線 (ダンパーの有無と免震・非免震の組み合わせの 4 ケース)、ダンパーの P- δ 関係曲線 (免震・非免震の 2 ケース) を示した。

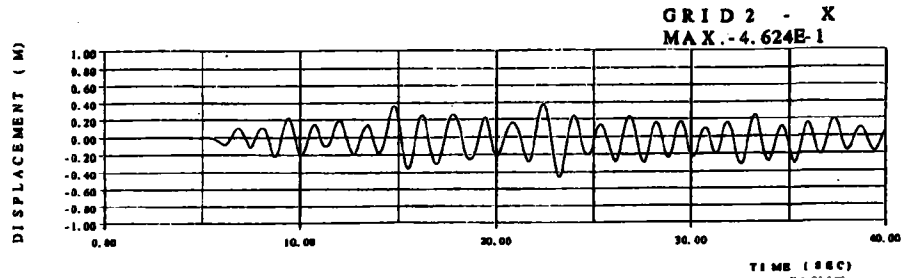
プレート境界型と内陸直下型それぞれに 3 種類、計 6 種類の入力地震波に対して非免震・免震とダンパーの有無の組み合わせ 4 ケース、全 24 ケースの解析結果をまとめて表 3-3-15 に示す。表には、上部構造と橋脚天端位置節点の最大変位・最大加速度と橋脚基部節点の最大曲げモーメント M_{\max} 、また、圧縮端降伏時の曲率 ϕ_y 、引張り端降伏時の終局曲率 ϕ_u に対する応答最大曲率 ϕ_{\max} なども示してある。

1-II-1: 日向灘沖地震 板島橋周辺地盤上 (LG 成分)

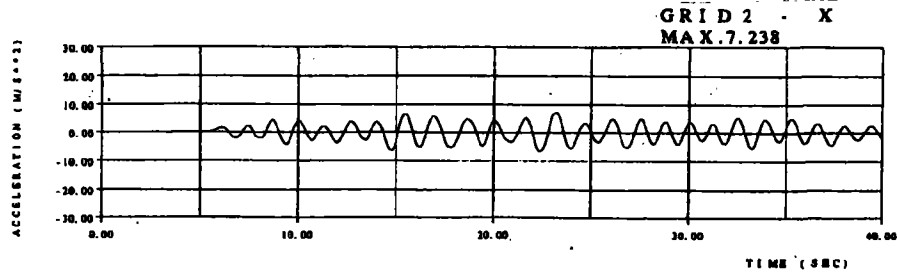
[ダンパーなし]

<非免震>

天端・変位

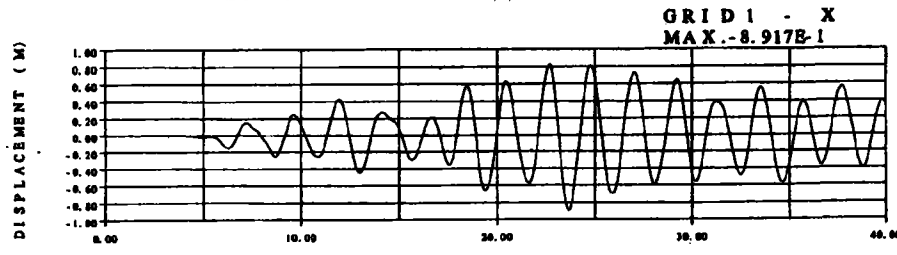


天端・加速度

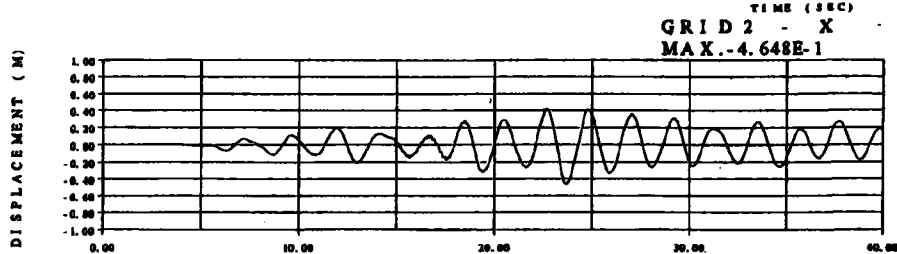


<免震>

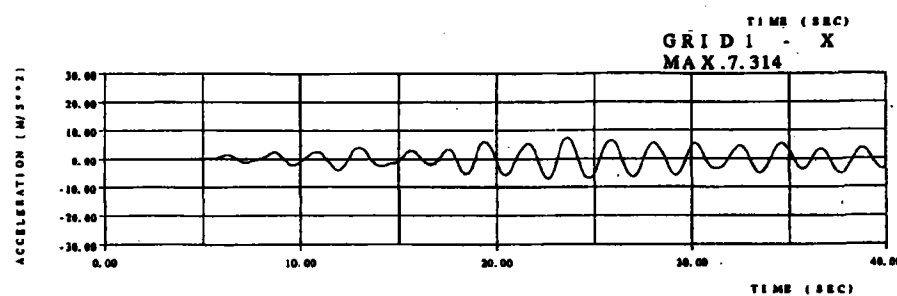
上部・変位



天端・変位



上部・加速度



天端・加速度

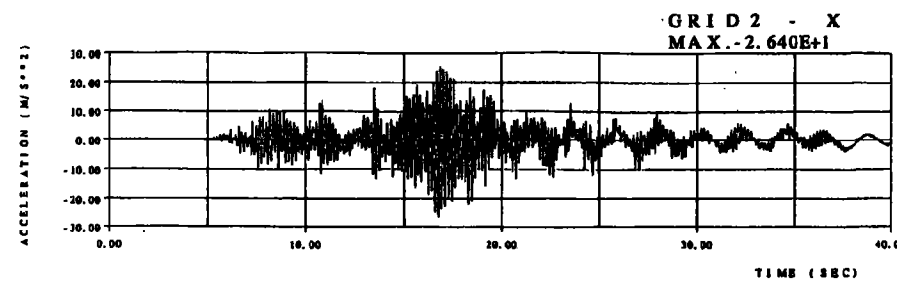
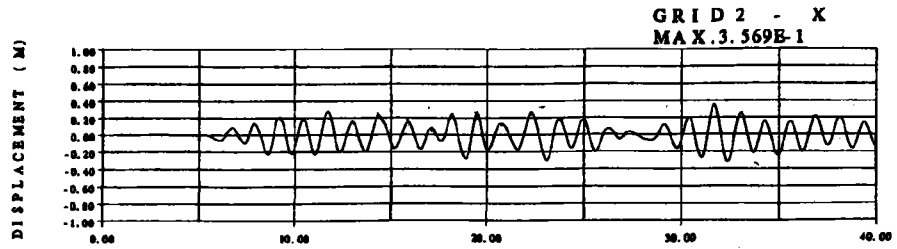


図 3-3-49 日向灘沖地震(1968)板島橋周辺地盤(LG 成分)波に対する応答波形 (ダンパーなし)

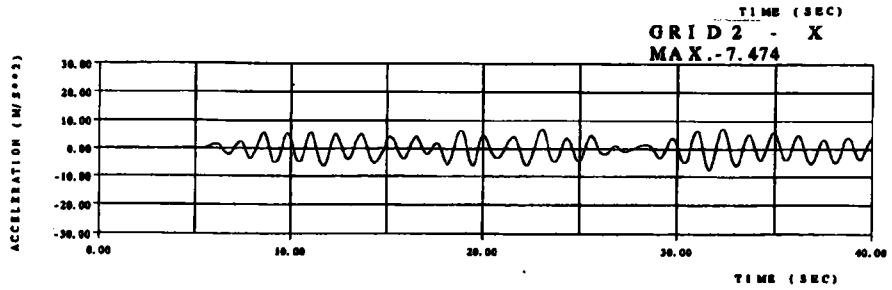
[ダンパーあり]

<非免震>

天端・変位

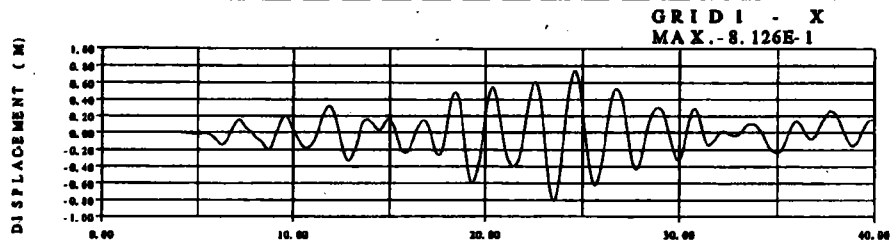


天端・加速度

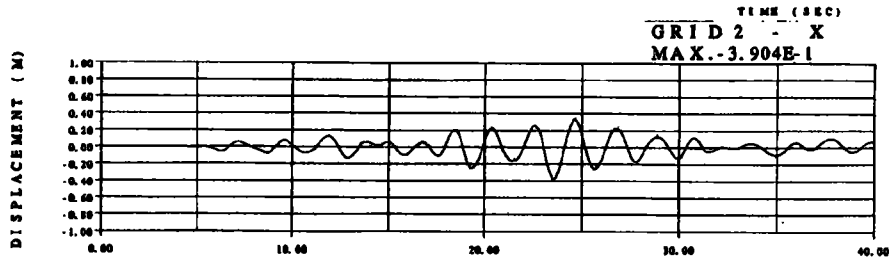


<免震>

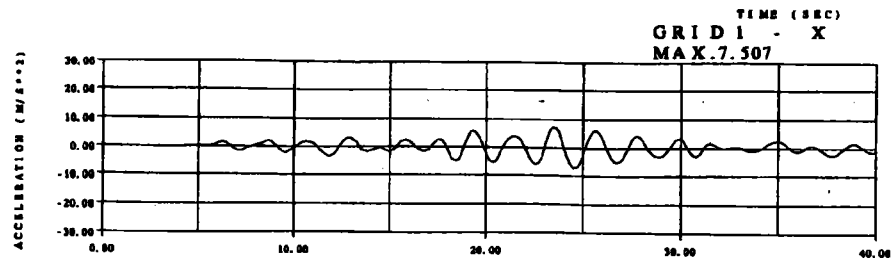
上部・変位



天端・変位



上部・加速度



天端・加速度

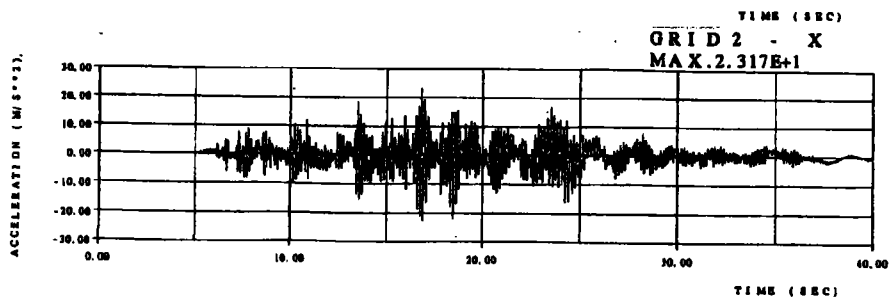


図 3-3-50 日向灘沖地震(1968)板島橋周辺地盤(LG成分)波に対する応答波形(ダンパー設置)

[曲げ (M) - 曲率 (φ) 関係]

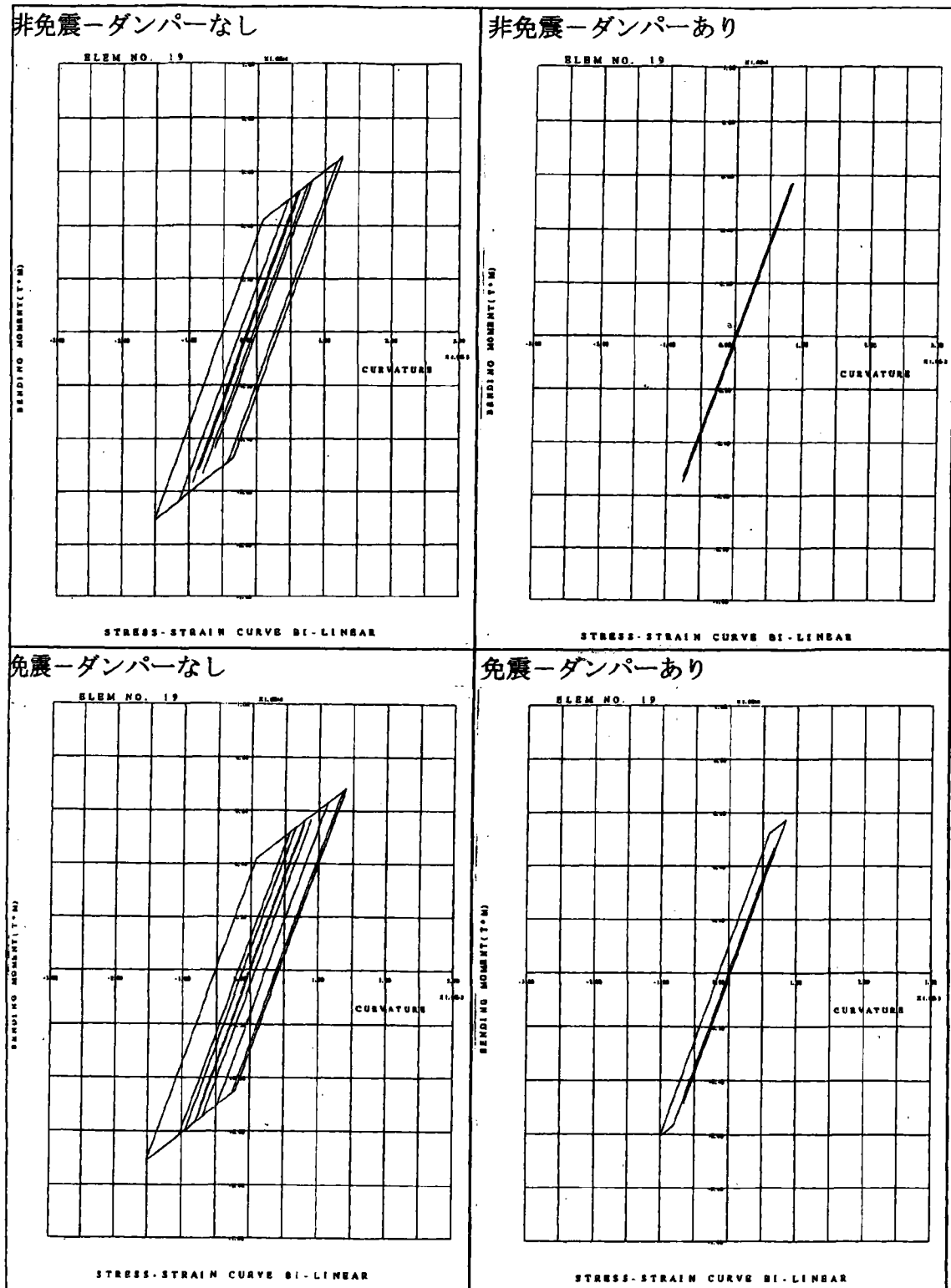


図 3-3-51 日向灘沖地震(1968)板島橋周辺地盤(LG成分)波入力に対する橋脚基部のM-φ関係曲線

[荷重 (P) - 変位 (δ) 関係]

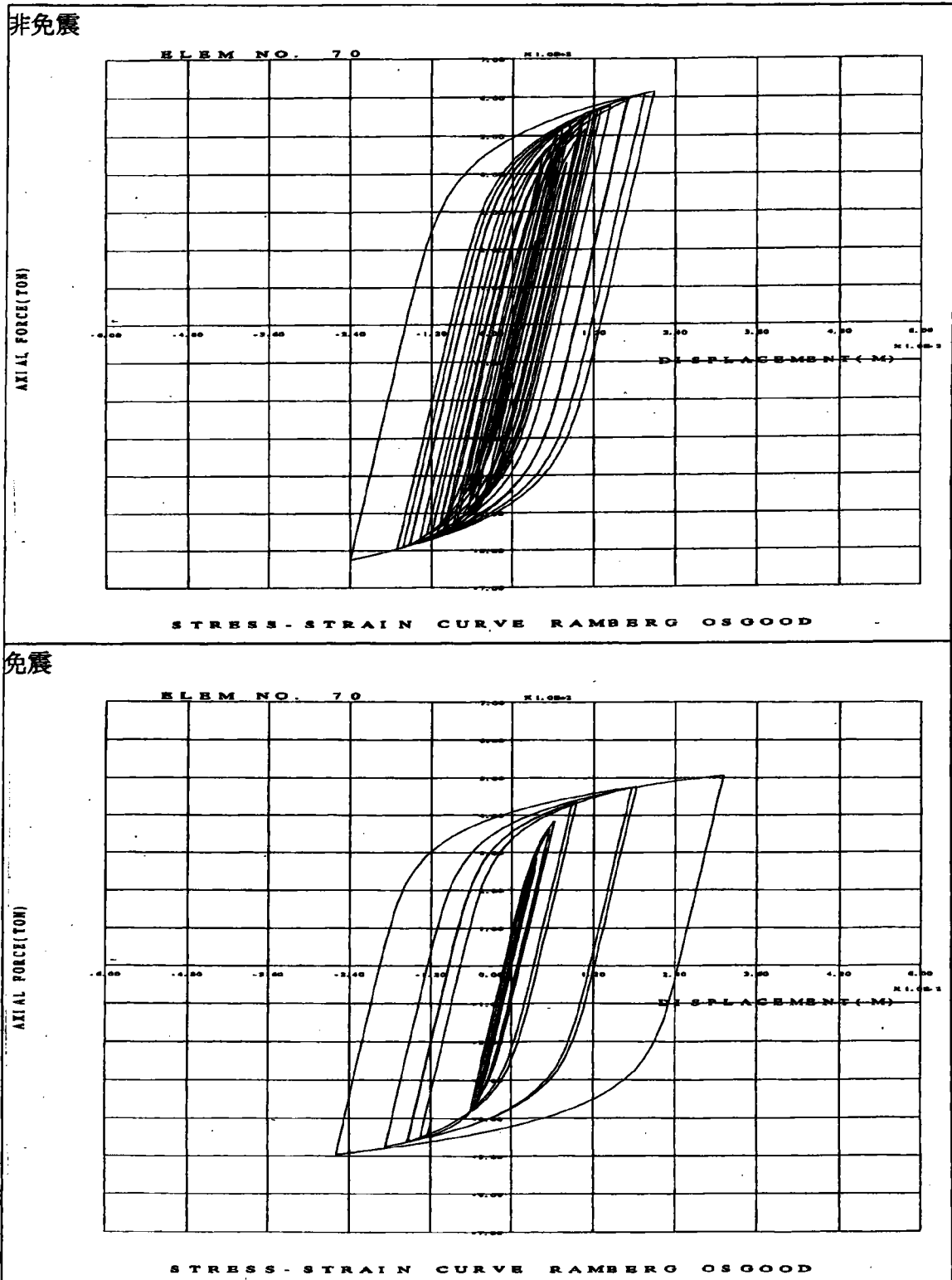


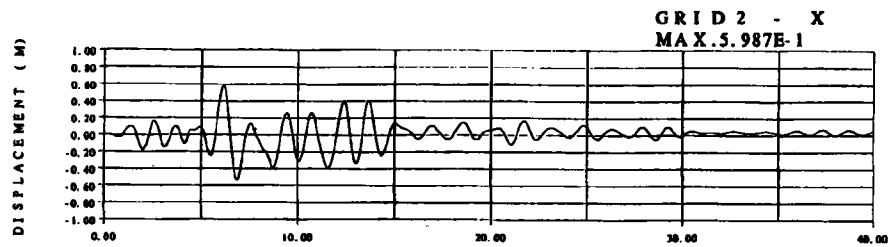
図 3-3-52 日向灘沖地震(1968)板島橋周辺地盤(LG 成分)波入力に対するダンパーの P-δ 関係曲線

2-II-1: 兵庫県南部地震 JR 鷹取駅構内地盤上 (NS 成分)

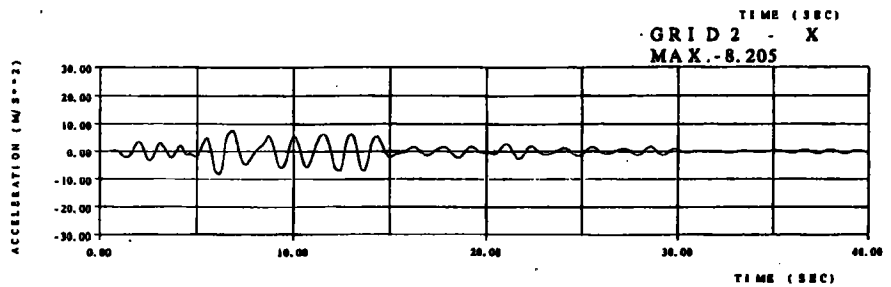
[ダンパーなし]

<非免震>

天端・変位

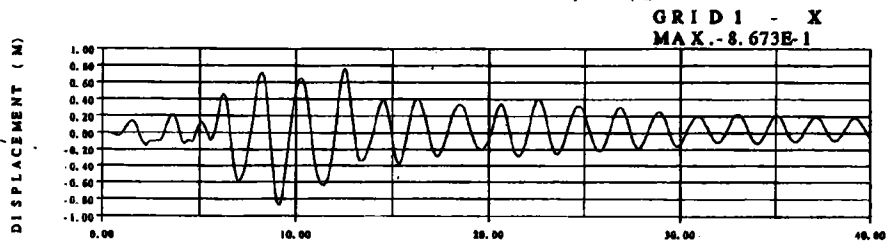


天端・加速度

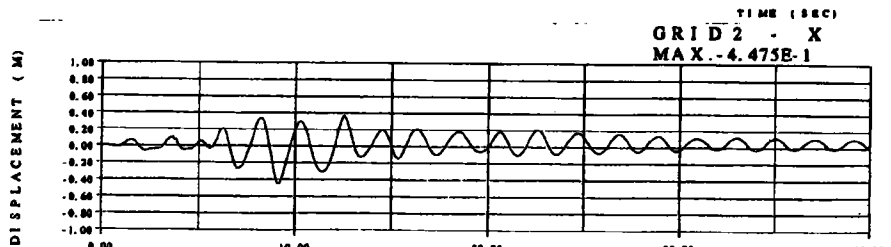


<免震>

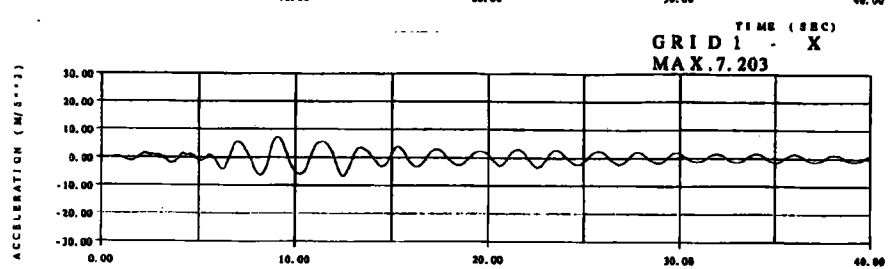
上部・変位



天端・変位



上部・加速度



天端・加速度

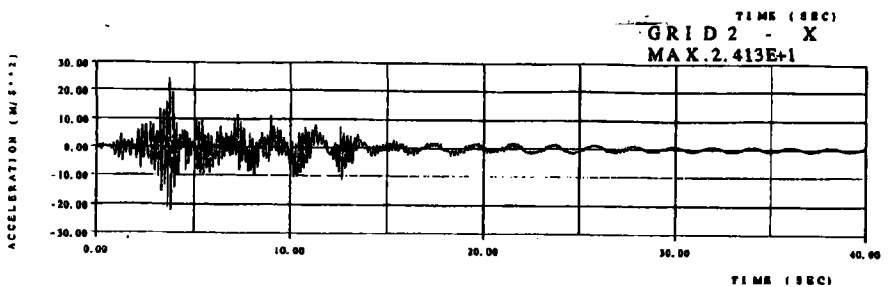
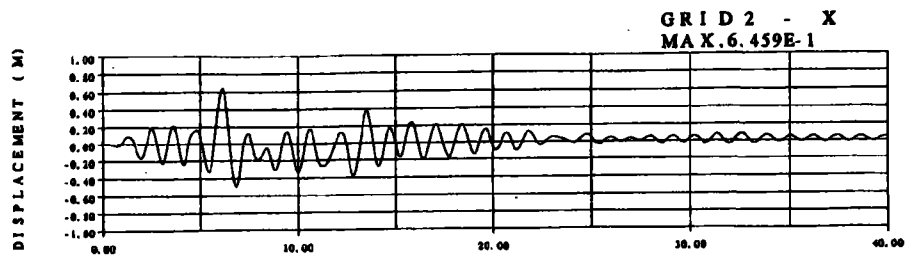


図 3-3-53 兵庫県南部地震(1995)JR 鷹取駅構内地盤上(NS 成分)波入力に対する応答波形 (ダンパーなし)

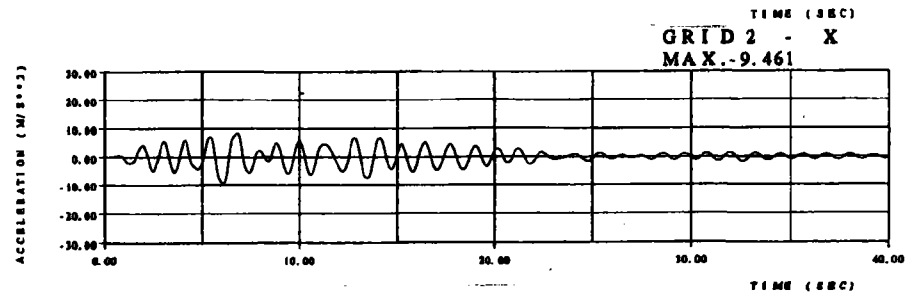
[ダンパーあり]

<非免震>

天端・変位

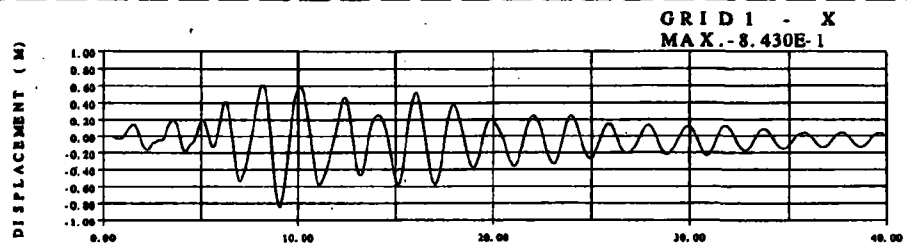


天端・加速度

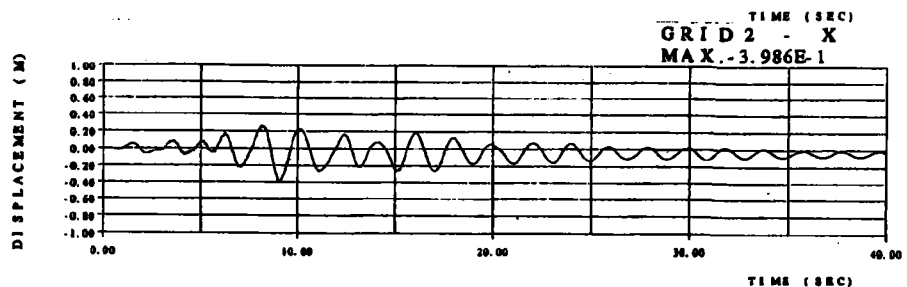


<免震>

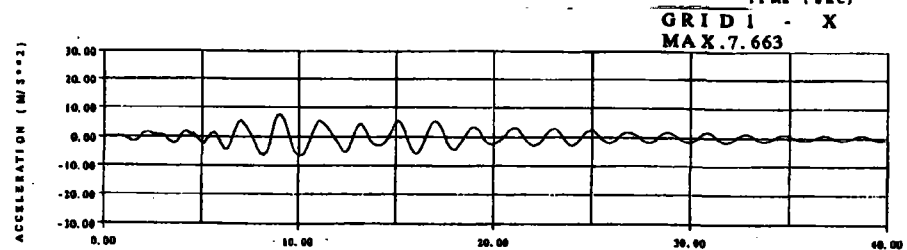
上部・変位



天端・変位



上部・加速度



天端・加速度

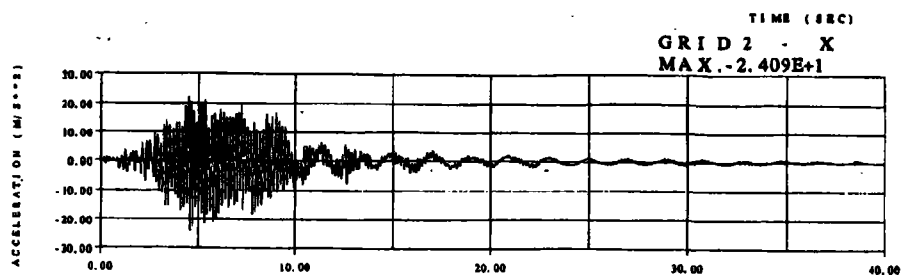


図 3-3-54 兵庫県南部地震(1995)JR 鷹取駅構内地盤上(NS 成分)波入力に対する応答波形
(ダンパー設置)

[曲げ (M) - 曲率 (φ) 関係]

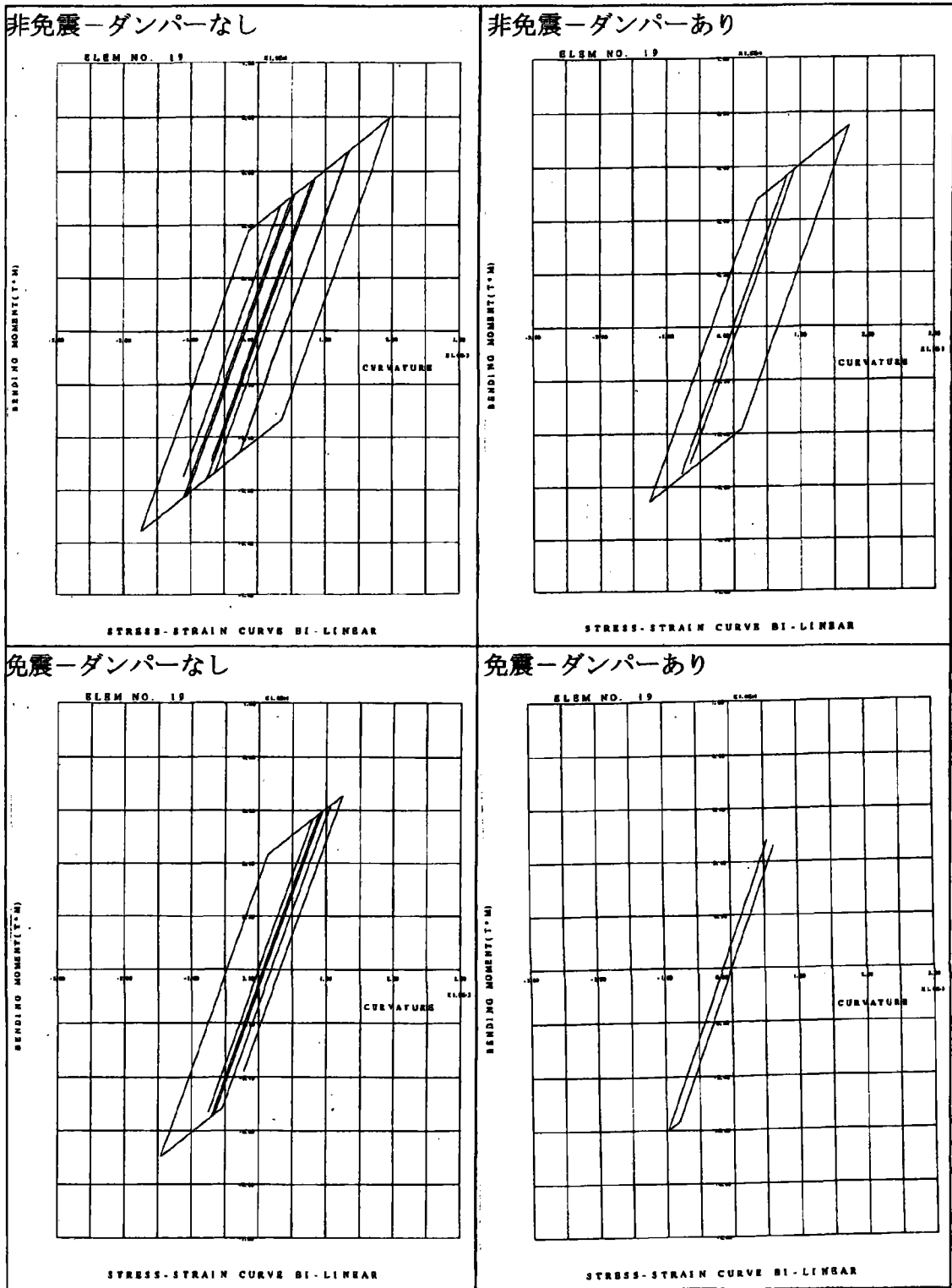


図 3-3-55 兵庫県南部地震(1995)JR 鷹取駅構内地盤上(NS 成分)波入力に対する橋脚基部の M-φ 関係曲線

[荷重 (P) - 変位 (δ) 関係]

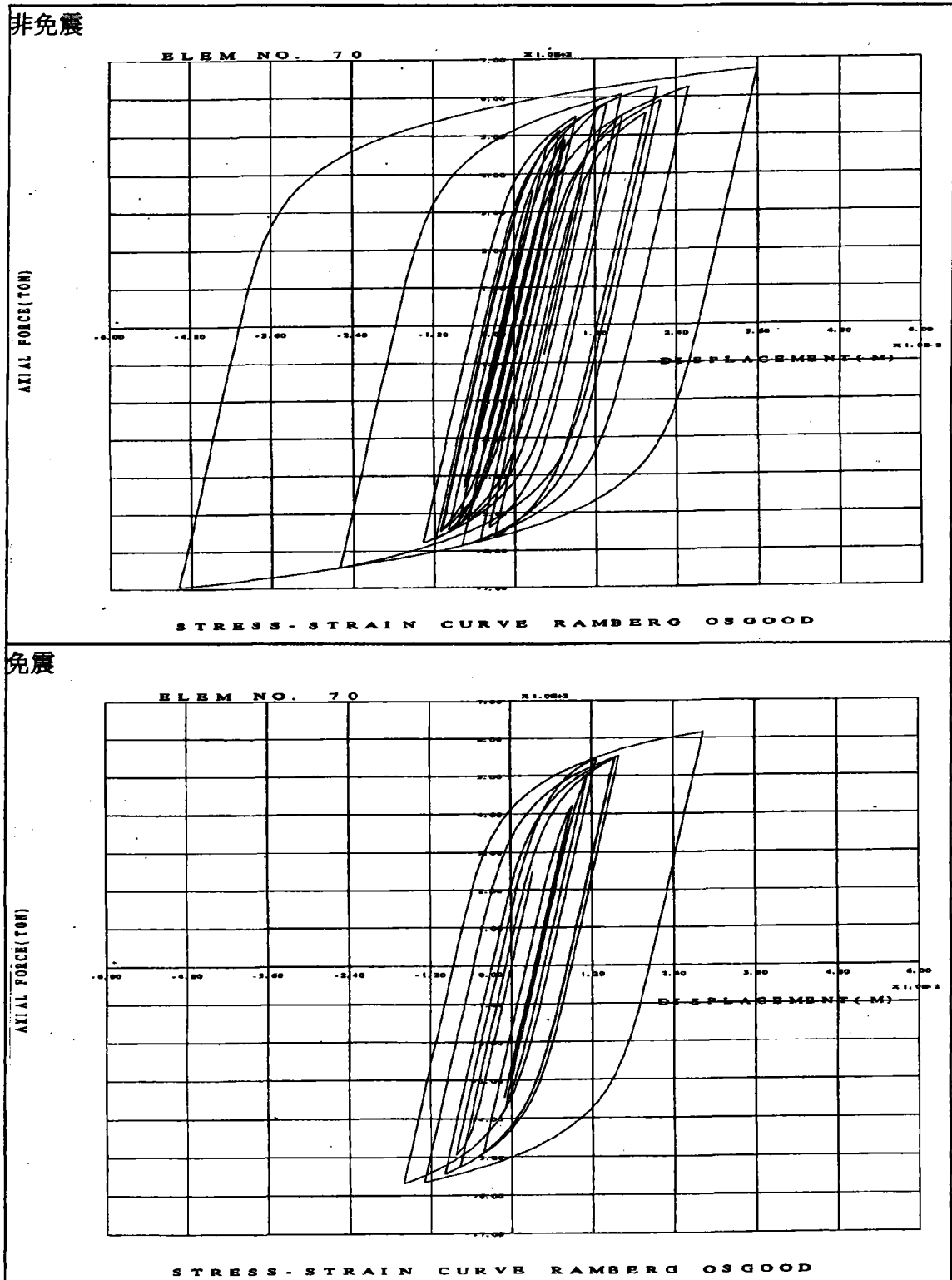


図 3-3-56 兵庫県南部地震(1995)JR 鷹取駅構内地盤上(NS 成分)波入力に対するダンパーの P-δ 関係曲線

II種基盤 非線形時刻歴応答解析結果

橋脚基部のM、φ

My	φy	Mu	φu
5650	0.0008008	6437	0.0011986

橋脚基部のバイリニア特性値

k	ko	A
7.055E+06	1.978E+06	2.804E-01

地震波	支承	パネルダンパー	最大変位		最大加速度		曲げモーメント					
			上部(m)	天端(m)	上部(m/s ²)	天端(m/s ²)	Mmax(tf-m)	φ max(1/m)	(φ max - φ' max) / φ max * 100%	φ max / φ y	φ max / φ u	状態
1-II-1	非免震	なし	0.4624	0.4624	7.238	7.238	7083	0.001527	-	1.907	1.274	ultimate
		あり	0.3569	0.3569	7.474	7.474	5721	0.000839	45.084409	1.047	0.700	yield
	免震	なし	0.8917	0.4648	7.314	26.4	7102	0.001537	-0.628931	1.919	1.282	ultimate
		あり	0.8126	0.3904	7.507	23.17	6066	0.001013	33.664350	1.265	0.845	yield
1-II-2	非免震	なし	0.486	0.486	7.418	7.417	7245	0.001609	-	2.009	1.343	ultimate
		あり	0.365	0.365	7.501	7.501	5776	0.000867	46.151429	1.082	0.723	yield
	免震	なし	0.7601	0.3779	6.606	23.28	6524	0.001245	22.651587	1.554	1.038	ultimate
		あり	0.78	0.3636	7.428	22.54	5905	0.000932	42.098649	1.164	0.777	yield
1-II-3	非免震	なし	0.4754	0.4754	7.305	7.305	7168	0.001570	-	1.961	1.310	ultimate
		あり	0.3737	0.3737	7.546	7.546	5828	0.000893	43.142305	1.115	0.745	yield
	免震	なし	0.8621	0.4489	7.169	19.53	6997	0.001484	5.505473	1.853	1.238	ultimate
		あり	0.8056	0.3631	7.382	25.7	6026	0.000993	36.767547	1.240	0.828	yield
2-II-1	非免震	なし	0.5987	0.5987	8.205	8.205	7978	0.001980	-	2.472	1.652	ultimate
		あり	0.6459	0.6459	9.462	9.462	7507	0.001742	12.027579	2.175	1.453	ultimate
	免震	なし	0.8673	0.4475	7.203	24.13	6982	0.001476	25.434116	1.843	1.232	ultimate
		あり	0.843	0.3986	7.663	24.09	6015	0.000987	50.127681	1.233	0.824	yield
2-II-2	非免震	なし	0.6329	0.6329	8.4	8.399	8194	0.002089	-	2.609	1.743	ultimate
		あり	0.5924	0.5924	9.115	9.115	7172	0.001572	24.733785	1.963	1.312	ultimate
	免震	なし	0.9406	0.4998	7.53	14.03	7336	0.001655	20.764763	2.067	1.381	ultimate
		あり	0.9405	0.4604	8.193	20.26	6389	0.001176	43.683446	1.469	0.982	yield
2-II-3	非免震	なし	0.5994	0.5994	8.131	8.131	7971	0.001976	-	2.468	1.649	ultimate
		あり	0.5585	0.5585	8.797	8.797	6952	0.001461	26.068048	1.824	1.219	ultimate
	免震	なし	0.8115	0.4039	6.955	21.18	6713	0.001340	32.182144	1.674	1.118	ultimate
		あり	0.8352	0.3877	7.654	17.02	5952	0.000956	51.650038	1.193	0.797	yield

・プレート境界型地震

- 1-II-1: 1968年 日向灘沖地震 板島橋周辺地盤(LG成分)
- 1-II-2: 1968年 日向灘沖地震 板島橋周辺地盤(TR成分)
- 1-II-3: 1994年 北海道東方沖地震 温根沼大橋周辺地盤上(TR成分)

・内陸直下型地震

- 2-II-1: 1995年 兵庫県南部地震 JR鷹取駅構内地盤上(NS成分)
- 2-II-2: 1995年 兵庫県南部地震 JR鷹取駅構内地盤上(EW成分)
- 2-II-3: 1995年 兵庫県南部地震 大阪ガス管合供給所構内地盤上(N30W成分)

表 3-3-15 非線形時刻歴応答解析結果

図 3-3-57 に、式 3-3-20 で定義した耐震安全性評価値 α の値を全 24 ケースについて示す。入力地震波の種別によるダンパーの効果と比較すると、プレート境界型地震(Type1)ではダンパーの効果が大きく、内陸直下型地震(Type2)では効果が小さいことがわかる。また免震の効果と比較すると、逆に Type1 では免震の効果が小さく、Type2 では効果が大きくなっている。また、免震とダンパーを組み合わせた場合には、どちらの地震波の種別においても α が 1 以下となり、耐震安全性が増すことがわかった。

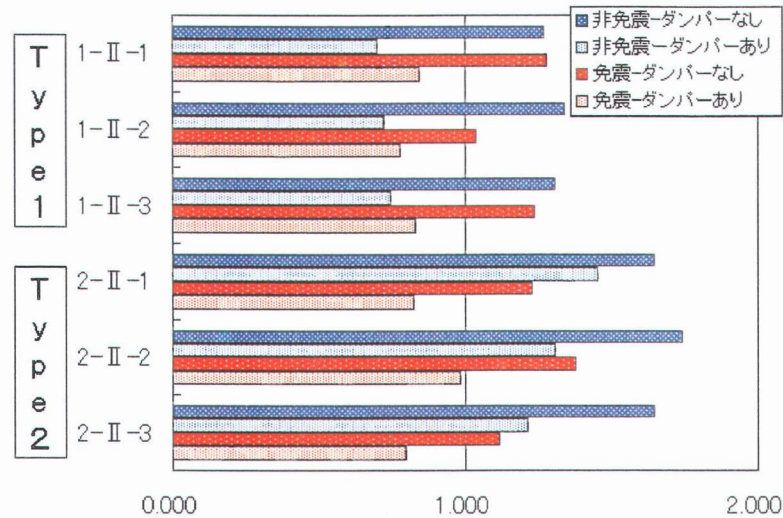


図 3-3-57 耐震安全性評価値 α

以上の解析結果をまとめると、せん断型サイスミックダンパー（制震構造）を橋脚基部に設置することによって耐震性は向上するが、プレート境界型地震（Type1）には効果が大きいものに対して、内陸直下型地震（Type2）では効果は小さいことがわかった。一方、免震構造とした場合には、内陸直下型地震（Type2）に対する耐震性は大きく向上するが、プレート境界型地震（Type1）に対してはあまり効果的ではないことがわかった。また、サイスミックダンパーと免震装置を組み合わせることの相乗効果が期待できることがわかった。

(4) 入力地震波の種別による制震および免震効果の差異に関する考察

上記のような応答解析結果が得られた原因について調べるために、まず吸収エネルギーの観点から考察を試みる。図 3-3-58 は入力地震波の種別における(a)入力地震波、(b)ダンパーの履歴曲線、(c)ダンパーの各サイクルの吸収エネルギーを示している。プレート境界型地震（Type 1）は主要動の継続時間が長く、波の繰り返し数が多いのに対し、内陸直下型地震（Type 2）は主要動の継続時間が短く、最大振幅が大きい。この入力地震波の繰り返し数が履歴型ダンパーダンパーの効きに関係するのかを調べるために、吸収エネルギー量に相当する履歴曲線(b)の 1 サイクル毎の面積とその累積面積を計算して比較を行った。その結果、Type1 では 171.46(tf·m)、Type2 では 199.96 (tf·m)となり、ほぼ同程度か、効きが悪くと思われた Type2 の方がむしろ総吸収エネルギーは大きいことがわかった。また、1 サイクル毎の吸収エネルギー(c)を見ても、やはり Type2 においてダンパーが良くエネルギーを吸収していることがわかる。以上の考察により、地震波の種別に関してダンパーの効果に差異はなく、原因は別にあると判断された。

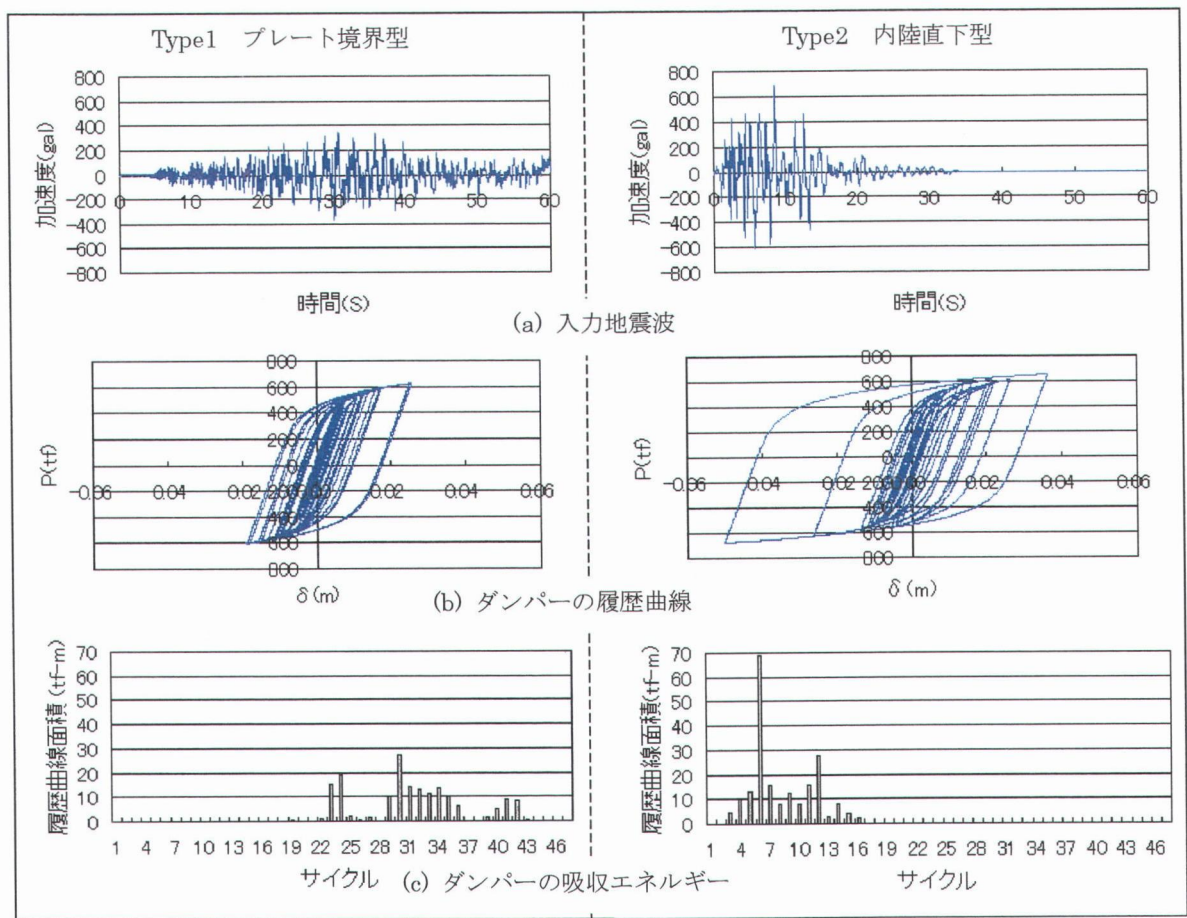


図 3-3-58 入力波形とダンパーの吸収エネルギーの比較

次に、加速度応答スペクトルの観点から免震支承とサイスミックダンパーの効果の差異について考察を試みた。図 3-3-59 (a) は減衰が 5% のときの各入力地震波に対する加速度応答スペクトルで、図中の破線は免震しないとき（非免震）と免震したときの橋脚固有周期の変化を表す。免震化によって、Type2 の応答値がかなり減少する。すなわち、内陸直下型地震に対して免震構造が効果的であることがわかる。

(b) は、Type1, 2 について減衰定数を 1.5% から 5% に変化させたときの加速度応答スペクトルを比較したものである。非免震の場合、入力地震波種別に関わらず、高減衰化により応答値が下がる。しかし Type2 は高減衰化をしても、応答値は Type1 に比べて大きい。このときには、サイスミックダンパーによる高減衰化に加え、免震化によって応答値を下げればよい。

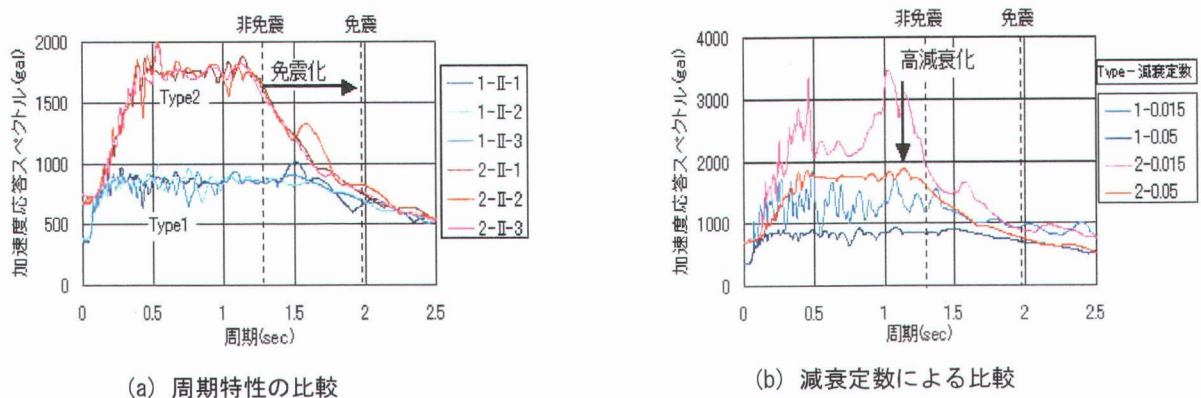


図 3-3-59 加速度応答スペクトルの比較

以上の考察により、入力地震波の種別によってサイスミックダンパーの効果が異なる原因は、地震波の繰り返し数に関係するのではなく、入力波と構造物の周波数特性に密接な関係があることがわかった。

(5) まとめ

鋼製の履歴型サイスミックダンパーの実橋への適用性について、5径間連続桁橋を例に挙げて検討を行った。鋼製橋脚基部にせん断型サイスミックダンパーを設置したときの動的応答解析を通して耐震安全性の評価を行い、鋼製の履歴型サイスミックダンパーを用いた制震設計の可能性について示した。また、入力地震波の種別によるサイスミックダンパーの効きの違いについて考察したところ、原因は波の繰り返し数ではなく、入力波と構造物の周波数特性に密接な関係があることがわかった。

本項で得られた結論を箇条書きにしてまとめると以下ようになる。

- 1) 極低降伏点鋼を用いたサイスミックダンパーの歪み依存性を表現するために、応答スペクトルから平均せん断ひずみ速度を算出して履歴特性を与えたが、このような平均的値を用いたことによる差は無視できる程小さいことがわかり、本解析手法の妥当性について検証することができた。
- 2) II種地盤のプレート境界型地震と内陸直下型地震を入力地震波として非線形時刻歴応答解析を行った結果、プレート境界型地震ではサイスミックダンパー（制震構造）の効果が大きく、免震の効果が小さいのに対して、内陸直下型地震では逆にサイスミックダンパーの効果は小さく、免震の効果が大きいことがわかった。
- 3) 地震波の種別によって、サイスミックダンパーと免震装置の効果に差異が生じる原因について検討したところ、サイスミックダンパーのエネルギー吸収量はほぼ同程度か、むしろ内陸直下型地震での吸収量のほうが大きかった。
- 4) また、各サイクルのエネルギー吸収量を相対変位とあわせて比較してみると、サイスミックダンパーは応答の大きさに比例してエネルギーを吸収していることがわかった。
- 5) したがって、サイスミックダンパーは効果が小さいのではなく、単に内陸直下型地震波の持つ強力なエネルギーを吸収しきれないものと思われる。
- 6) 応答の周波数特性について調べるために、加速度応答スペクトルを用いて検討したところ、免震化によって、内陸直下型地震では大きく応答値が減少するのに対して、プレート境界型地震での応答値はそれほど変わらないことがわかった。
- 7) 次に、減衰による比較をしてみると、非免震の場合、高減衰によって、プレート境界型地震と内陸直下型地震ともに応答値の減少は見られるが、内陸直下型地震については減衰しても高い応答を示した。
- 8) 以上の考察で、サイスミックダンパーと免震装置の効果は地震波の繰り返し数よりも、周波数特性と密接に関係していることがわかった。
- 9) また、サイスミックダンパーと免震を組み合わせることで、両地震波において共に応答値は低くなることがわかり、両者を組み合わせることで、相乗的な効果が期待できることがわかった。

本項では、入力地震波をII種地盤のものに限定した。この理由は、鋼製橋脚を有する高架橋が建設される例が多い都市部の地盤の殆どがII種地盤であるためである。しかし、良質地盤（I種地盤）や軟弱地盤（III種地盤）での制震構造、免震構造についても同様に動的解析を行い、その耐震安全性について検討することも必要であり、これは今後の課題である。

3.3.6 まとめ

耐震設計における、これからの性能設計や損傷制御設計を支える技術の一つとして、構造用高減衰材を用いた制震システムがある。従来の減衰装置は、無いよりはある方が耐震性の向上に幾分役立つであろうといった、安心材料としての扱いをされてきたように思われる。これに対して、損傷制御設計は減衰装置による地震時における構造物の揺れのエネルギー吸収能を積極的に活かし、主構の断面設計に反映する設計手法である。本WGは、この構造用高減衰制震システムと高減衰材料に関する勉強会から始まり、次第に高減衰材の一つである極低降伏点鋼に焦点を絞り、WG名も「極低降伏点鋼を用いた耐震設計に関する研究WG」と変えて活動してきた。

研究活動の段階を3段階に区切り、その第1段階では極低降伏点鋼の材料特性の把握とシミュレーション解析用の数値モデル化、第2段階では極低降伏点鋼を用いた減衰装置の試作と動的交番載荷試験による履歴特性の把握と動的応答解析用の履歴ばねのモデル化、第3段階では、動的応答解析による橋梁構造物への適用の可能性に関する検討を行った。活動内容に実験とシミュレーション解析の両方を含めたために、各活動段階におよそ1年を費やした。これらの研究成果は前節までに、活動段階毎に順を追って示したが、実験における供試体や実験装置の設計などの作業を通じて、極低降伏点鋼の材料特性や構造用高減衰システムの特徴および設計手法に関する部会員の知識が深まったことは、もう一つの成果として挙げることができる。

本WGで得られた研究成果をまとめると次のようになる。

- ・ 構造用高減衰システムに関連した文献の調査を行い、主に極低降伏点鋼に関する論文の調査票を作成した (§3.3.2)。
- ・ 極低降伏点鋼(BT-LYP100)の静的引張試験と高速引張試験を行い、歪み速度効果を加味したときの物性値の変化について検討し、有限要素解析の際に用いる数値モデルを提案した。
- ・ 3次元有限要素を用いた高速引張試験のシミュレーション解析を行い、提案した極低降伏点鋼の数値モデルの適合性を検証した。
- ・ 極低降伏点鋼を用いて3種類の基本変形(曲げ・振り・せん断)に基づいたサイスミックダンパーを製作し、それらのエネルギー吸収性能について動的繰返し載荷試験を行って明らかにした。
- ・ 歪み速度効果を加味したサイスミックダンパーの履歴曲線の数値モデルを提案した。
- ・ 極低降伏点鋼履歴型サイスミックダンパーの実橋への適応性について、プレート境界型地震と内陸直下型地震の2種類の地震波に対する動的応答解析を通して検討した。
- ・ 極低降伏点鋼履歴型サイスミックダンパーの効果について、吸収エネルギー、加速度応答スペクトル、地震動のスペクトルインテンシティなどの検討を通して詳しい分析を行った。