

鋼製緩衝材の荷重変形特性に関する解析的検討 Analytical Study on Load-Displacement Properties of Steel Shock Absorbers

長嶋文雄* 皆川 勝** ○島田泰至*** 寺尾圭史**** 佐藤 豪*****

Fumio NAGASHIMA, Masaru MINAGAWA, Yasushi SHIMADA, Keiji TERAO and Takeshi SATOH

Abstract In case that seismic isolation system is introduced to bridges, shock absorbers might be effective to decrease displacement responses of bridge girders. Rubber type absorbers have been employed for the sake of absorbing seismic energy since the Hanshin-Awaji Earthquake. This paper describes analytical results to clarify the effectiveness of steel shock absorbers to mitigate the impact effect of severe earthquakes on bridge girders. A series of FEM dynamic analyses were carried out for several specimens modeling shock absorbers which were made of steel and load-displacement properties were obtained. Through those analyses the effectiveness of steel type shock absorbers were confirmed.

Keywords: 緩衝装置, 衝撃応答解析, 耐震設計
shock absorbers, impact response analysis, seismic design

1. はじめに

本報告は、激震時に橋桁とパラペットあるいは橋桁とストッパーとの衝突が万が一起きた場合に、この衝突によって発生する衝撃エネルギーを吸収する目的で設置される緩衝装置として形鋼を用いる試みを行ったものである。

旧道路橋示方書¹⁾では、従来上部構造が橋脚または橋台から逸脱、落下しないための落橋防止構造を設置するように定めていたが、高架橋の多い都市部において大地震が発生せず、明らかに落橋防止構造によって落橋を免れたといった実際的な効果については確認することができなかった²⁾。先の兵庫県南部地震では、都市部の高架橋などの橋梁構造物に甚大な被害が生じた。これを受けて震災後に改定された道路橋示方書⁴⁾では、橋梁における各構成要素の役割を明確にして桁掛かり長、落橋防止構造、変位制限構造、段差防止構造からなる落橋防止システムへと再整理された。

一方、同震災以降、橋梁に免震設計が積極的に採用されているが、この場合、橋桁の変位が大きくなるために桁と橋台間あるいは桁同士の間の変位を吸収するための大きな伸縮継手が必要となる。ニュージーランドにおいては橋梁の免震設計をする際、橋台と橋桁の間に緩衝装置を設置された例がある³⁾が、わが国ではいまだ検討段階である。

緩衝装置の材料としては、実用化の可能性や価格という観点からゴムが有望であるという見解もある⁶⁾が、市販の型鋼を用いて緩衝材を製作できれば、製作費を低く抑えることができ、また入手も容易である。また、設置スペースを小さくすることができれば施工上有利である。さらに、殆どの場合に設置スペースが限られる場所であるため、エネルギー効率の良い緩衝装置、すなわち、荷重-変位関係において荷重が殆ど不変で塑性化による変形だけが増してエネルギーが増大する形態が望ましいが、ゴムの荷重-変形特性は必ずしもそのようではない。しかしながら、鋼製緩衝材の力学的特性を検討した研究は現状では見当たらず、実験あるいは解析的検討によりその基礎的な特性を把握することで、ゴム製緩衝材との比較において、その実用化の可能性を把握することができると考えられる。

そこで、本研究では、型鋼より製作された緩衝装置を対象として、非線形衝撃応答解析により、どの荷重変形関係、衝撃エネルギー吸収性能について検討することによって、形鋼を用いた鋼製緩衝装置の有効性を調べた。

* 東京都立大学工学部土木工学科 (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

** 武蔵工業大学工学部土木工学科 (〒158-8557 世田谷区玉堤 1-28-1)

*** 首都高速道路公団 (〒100-0013 千代田区霞ヶ関 11-4-1)

**** (株) 横河メンテック (〒273-0026 船橋市山野町 27)

***** NKK (株) (〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町 1-1)

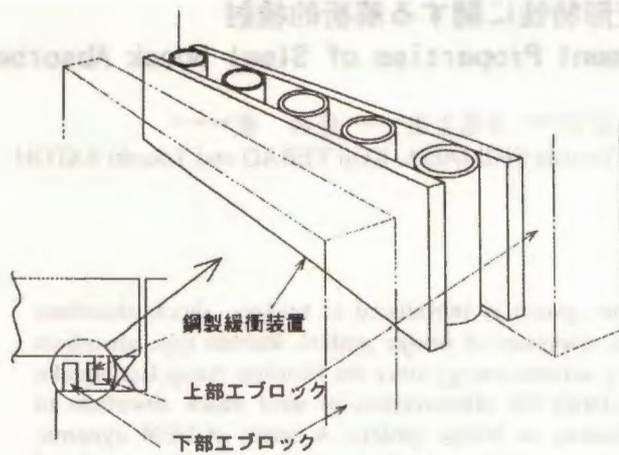


図-1 鋼製緩衝装置の実橋への設置イメージ

表-1 SS400 鋼の材料定数

材料定数	設定値
弾性係数	2.06 10^5 MPa
ポアソン比	0.3
降伏応力	321 MPa
最大応力	636 MPa
破壊ひずみ	0.7

2. 解析

2.1 解析対象

解析対象は、いずれも型钢を用いて製作された鋼製緩衝装置である。図-1に鋼製緩衝装置の設置イメージ図を示す。材質はすべてSS400相当のものを想定した。材料定数を表-1に示す。また、解析に用いた型钢の真応力-真歪関係は、1軸引張実験結果から得られる公称応力-公称歪関係(図-2)を体積一定の条件のもとで真応力-真歪関係に変換して求めた。この際、図-2に○で示した3点での応力-ひずみ点を用いて、トリリニアタイプでモデル化した。用いた真応力-真歪関係を図-3に示す。衝撃による歪速度効果は降伏点に動的倍率を掛けることで考慮した。

図-4に解析対象とした緩衝装置の寸法形状を示す。これらの寸法については、試験体が完全に圧壊した場合の幅が、比較対象としたゴム製緩衝装置とほぼ同じになるように設定した。

2.2 解析方法

有限要素動的応答解析には、市販の汎用コードであるPC/LS-DYNA-3Dを用いた。時間積分法は中心差分法であり、時間刻みは解の安定性の条件から自動的に決定される。

用いた要素は3次元破壊要素(Isotropic elastic-plastic with failure)である。この要素は、破壊基準として、相当塑性ひずみが最大塑性ひずみを超える場合と、相当応力が限界応力を上回る場合の二つを設定している。これらの条件に該当した要素は、解析上削除される。

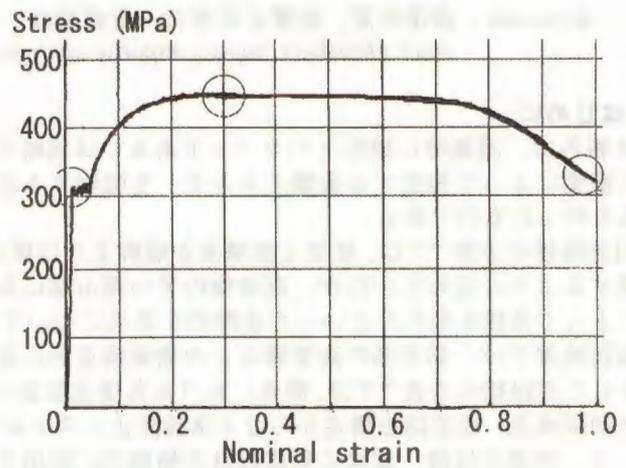


図-2 SS400 鋼の公称応力-工学ひずみ関係

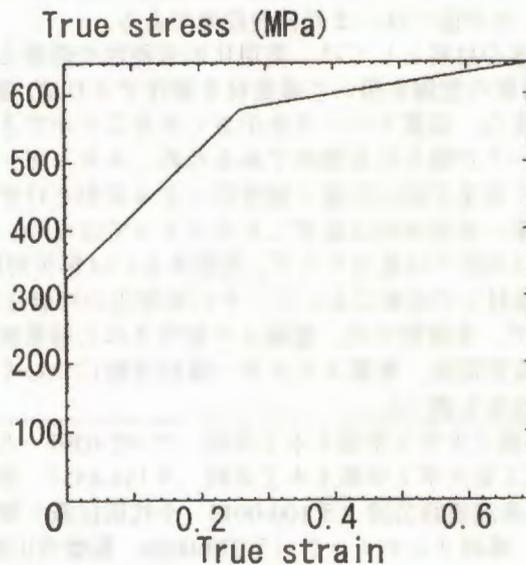


図-3 解析に用いた真応力-真ひずみ関係

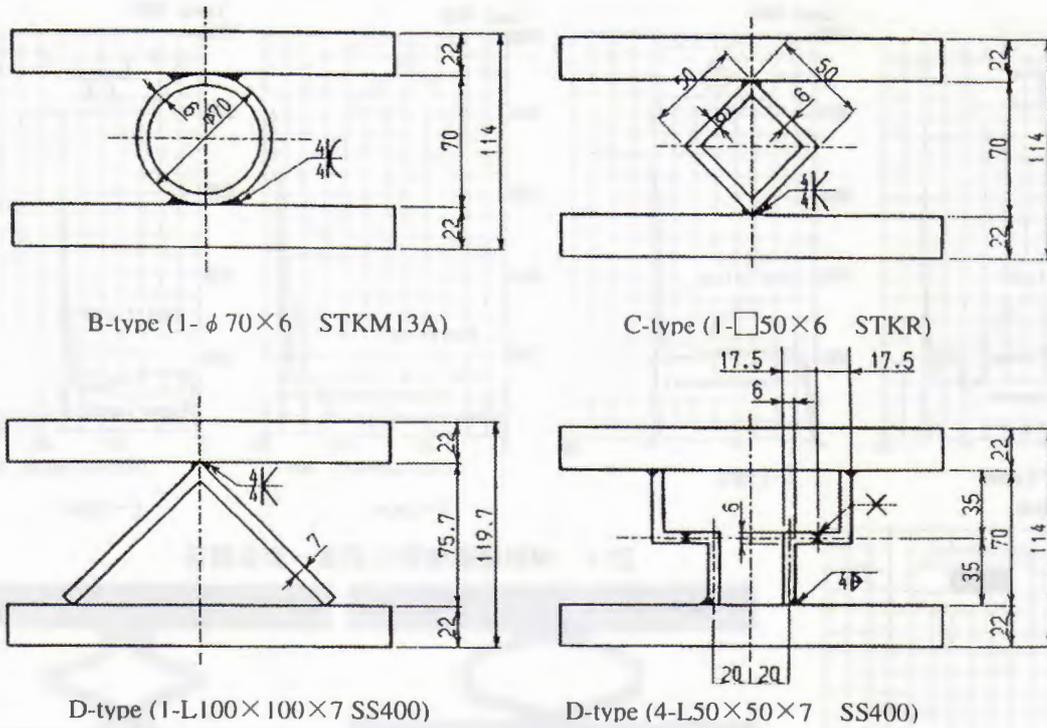


図-4 解析対象とした鋼製緩衝装置モデル

図-5 に有限要素モデルを示す。各緩衝装置モデルの上下を極厚の鋼板で挟みこんだ構造形式とした。荷重方法としては、変位を準静的に与える方法と、重量 98kN の物体を 80cm/sec の速度で衝突させる方法を用いた。以下、前者を静的荷重、後者を衝撃荷重と呼ぶ。

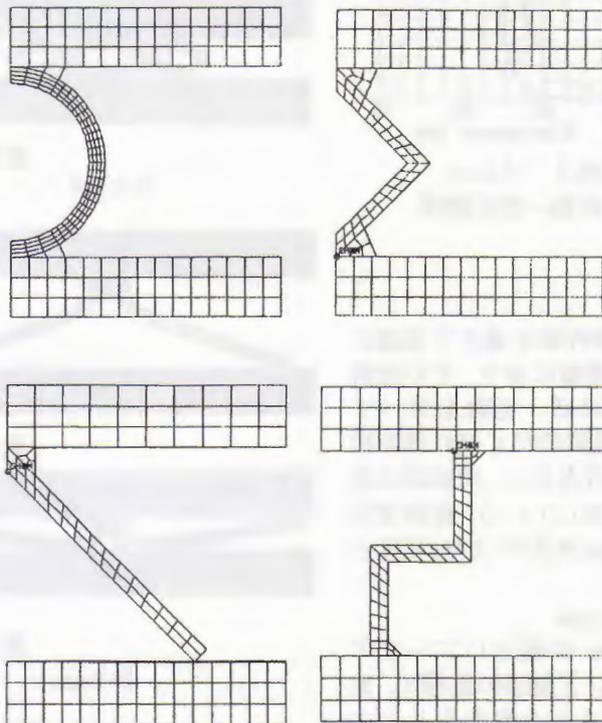


図-5 要素分割

2.3 解析結果

2.3.1 静的圧縮荷重

図-6 に静的圧縮荷重における各タイプの荷重-変位関係を示す。ここで、変位は緩衝装置上下の載荷板の相対変位である。なお、図中には、別途実施した荷重実験によって得られた荷重-変位関係も解析の妥当性を検証するために示した。また、ゴム製緩衝装置の荷重実験によって得られた荷重-変位関係を比較のために図-7 に示す⁷⁾。なお、ゴムは硬度 55 のクロロブレンゴムで、寸法は 150×150×50 である。また、図-8 には鋼製緩衝装置の変形形状の推移を示す。

(a)B-type

初期には楕円状につぶれるが、変位が 20mm を過ぎた時点から、溶接部の折れ曲がりにより、2箇所できびれが生じて波を打つような形状になり、最終的にはそのくびれ部分が互いに接触した。荷重-変位関

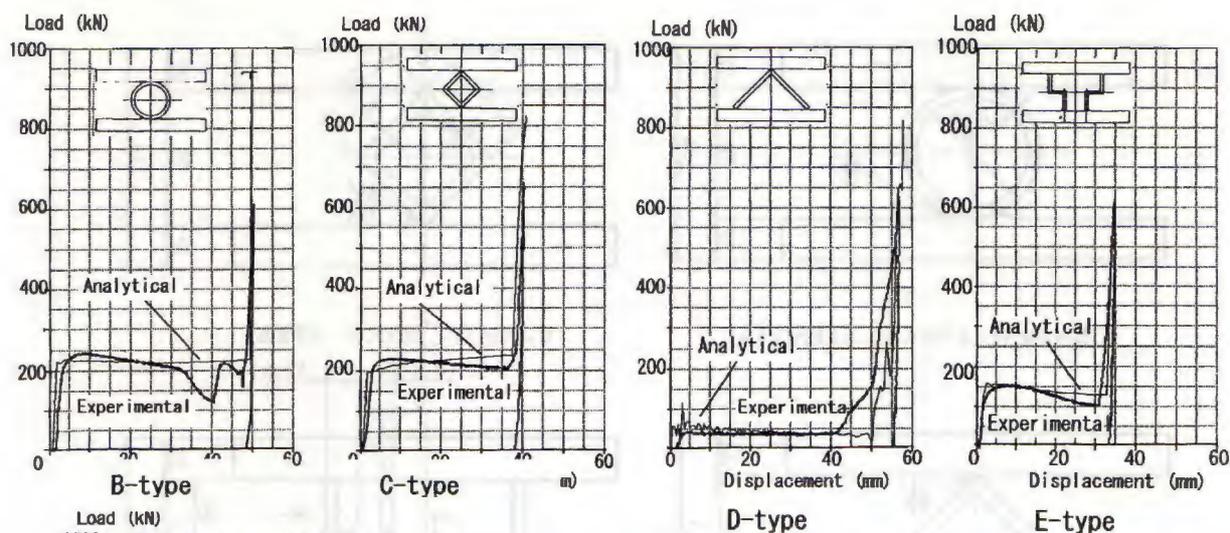


図-6 鋼製緩衝装置の荷重-変位関係

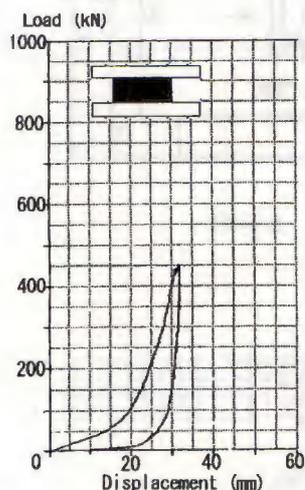


図-7 ゴムの荷重-変位関係

係は、弾性域を過ぎて急激に最大荷重値に至り、その後荷重値はほぼ一定値を保っている。最終的にくびれ部が接触した時点から、荷重値は急激に増加している。最終変位は50mm(外形の70%)程度となった。

(b)C-type

B-typeの場合にアーチアクションと溶接の影響で、波を打つような変形をしたのに対して、この形式ではくびれは生じず、均等に变形した。左右の角部はほぼ完全につぶれたが、上下の角部は溶接金属による拘束のために多少空間が残っている。荷重-変位関係については、降伏した後、荷重値が漸増して、上下の板が接触することにより、荷重値は急激に増加した。降伏荷重はB-typeとほぼ同程度であり、最終変位は40mm(外形寸法の57%)程度となった。

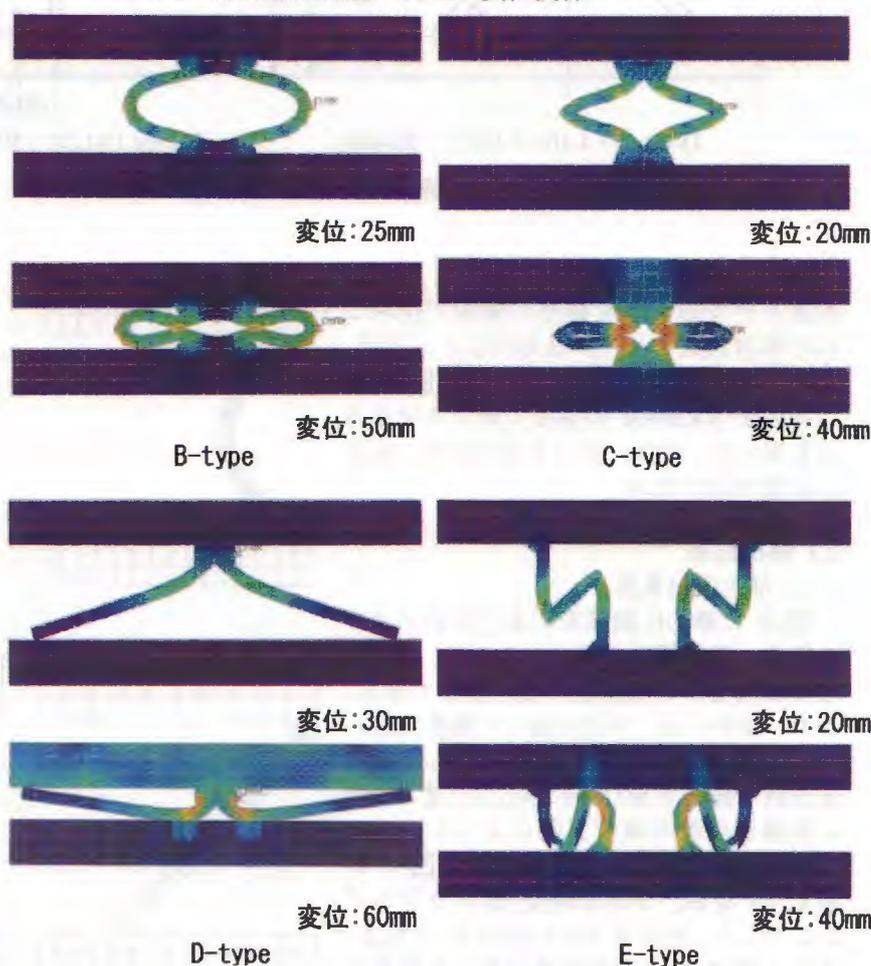


図-8 鋼製緩衝装置の変形形状

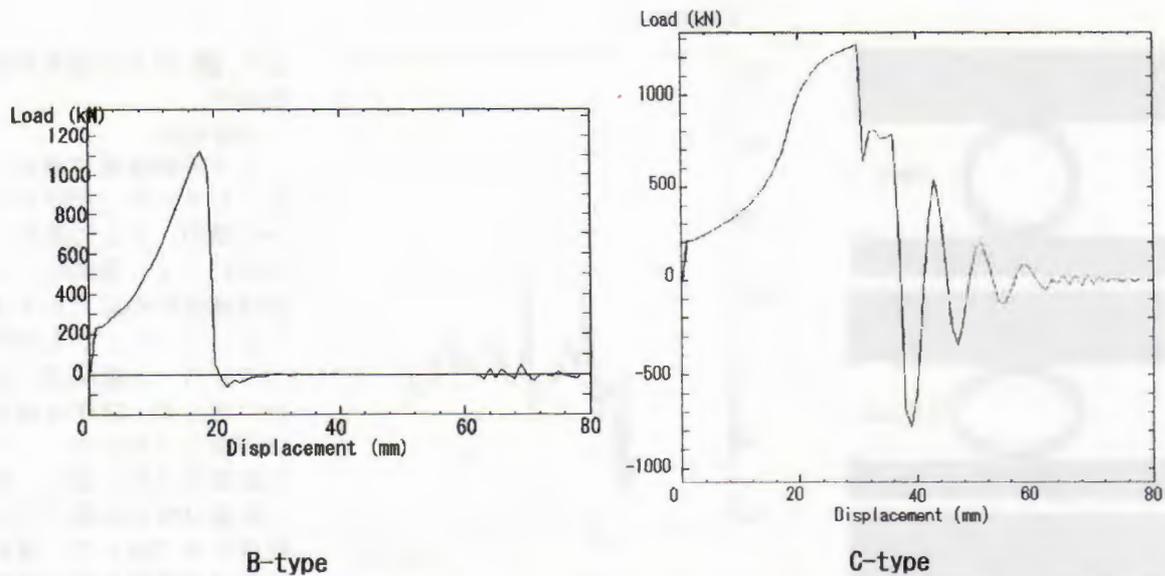


図-9 静的引張荷重における荷重-変位関係

(c)D-type

上部の溶接部の境界から弓なりに曲がり、両端部はすべて外側に移動している。その後、上部の溶接部の空間を残して完全につぶれた後、足部の両端が反り返っている。荷重-変位関係については、B-typeと同様、降伏後ほぼ一定荷重を保ったのち、圧壊に至った。最大荷重はB-typeのその20%程度であった。最大変位は他のどの形式より大きく55mm(外形寸法の79%)程度となっている。

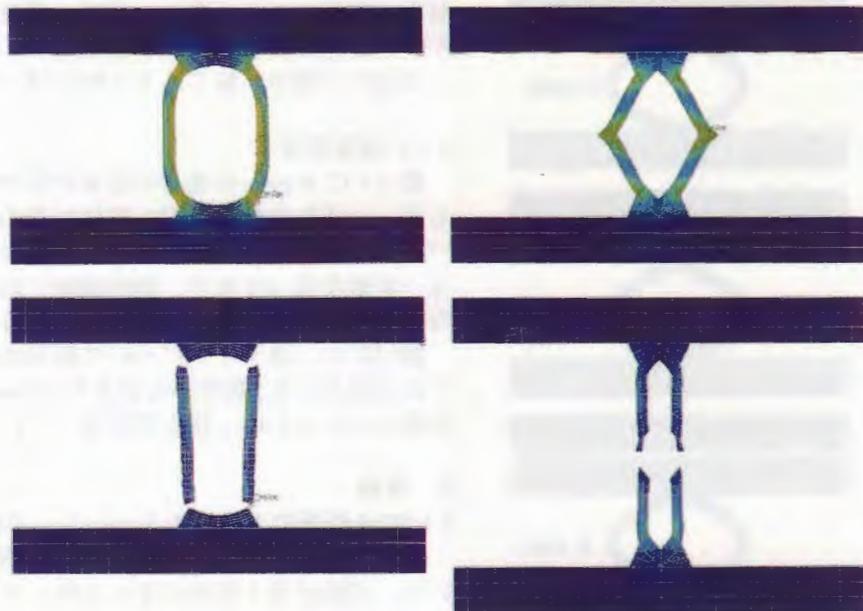


図-10 静的引張荷重における変形形状

(d)E-type

角部付近が次第に曲がってゆくが、上下の固定部の距離が変化しないために、角部が上下板に接触

して反力を取るに至り、変形はそれ以上進まなくなる。したがって、最大変位は他のどの形式よりも小さく35mm(外形寸法の50%)程度となっている。荷重-変位関係については、降伏した後、荷重値が漸減して、中央の角部が接触することにより、荷重値は急激に増加した。降伏荷重はB-typeの65%程度であった。

2.3.2 静的引張荷重

静的圧縮荷重の解析結果から、B-typeおよびC-typeが緩衝装置としては優位性が有ると判断されたため、それらの静的引張荷重における応答解析を実施した。図-9にそれぞれの荷重-変位関係を示す。

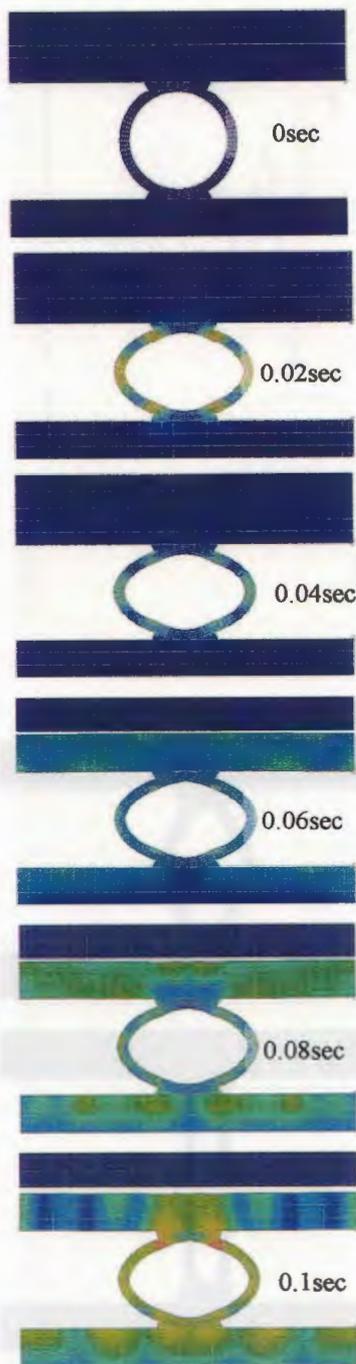


図-11 衝撃载荷における
B-type の変形時刻歴

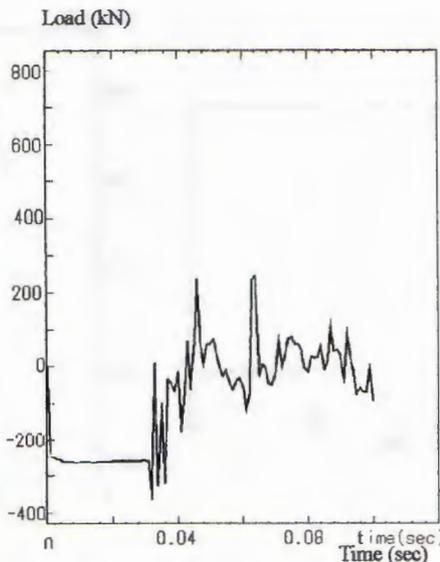


図-12 衝撃载荷における
B-type の荷重—時間線図

また、図-10には変形形状を示す。

(a)B-type

上下の溶接部で固定されているため、形状は円から楕円、そして矩形へと移行して、最終的には溶接部近傍の応力が大きくなって、そこから破断している。圧縮载荷の場合に対して、降伏荷重はほぼ同じであるが、その後荷重は上昇を続け、最大荷重は降伏荷重の5倍程度にまで達して、最終的には溶接部近傍で破断している。破断時の変位は20mm（外形寸法の30%）程度と小さい。

(b)C-type

B-typeの場合と初期形状が異なることによる違いを除けば、変形状況は同様である。また、荷重—変位関係についても、降伏後の勾配が、B-typeの場合には単調増加なのに対して、このタイプの場合には途中で減少に転じる点を除けば、ほぼ同様の傾向を示した。

2.3.3 衝撃载荷

図-11にB-typeの場合の変形形状の時刻歴を示す。この形式に限らず、いずれの緩衝装置も塑性変形の後、衝突体を跳ね返した。図-12に荷重—時間線図を示す。荷重値は衝突から0.03sec程度までほぼ一定値を保っており、静的载荷において示されたのと同様の良好なエネルギー吸収性状を示すことが分かる。

図-13に、各タイプについて衝突体の加速度の時刻歴を示す。いずれの場合にも、衝突からおよそ0.04sec程度まで衝突体の加速度は変動はあるものの一定水準を保っていることがわかる。

3. 考察

3.1 FEM解析によるシミュレーションの精度

静的圧縮载荷に対する荷重—変位関係および変形形状の推移について、実験結果と解析結果を比較した。B-typeの場合については、くびれ変形が生じるときに荷重が一旦低下する現象は解析では再現されていない。この原因については現状では不明であるが、メッシュ分割の影響、幾何的非線形性の評価の妥当性、材料特性の影響などが無いとはいえない。しかしながら、その他については、少なくとも荷重—変位のレベルにおいて解析結果は良好に実験結果をシミュレートしており、解析の妥当性は示すことができたと考えている。

3.2 エネルギー吸収性能

静的圧縮载荷に対して得られた荷重—変位関係から各変位段階における累積エネルギー吸収量を算出した。ここで、累積エネルギー吸収量は荷重—変位曲線の下面積によって評価した。図-14に得られた累積エネルギー吸収量と変位の関係をそれぞれ示す。いずれの場合にも、降伏後の荷重の変化が小さいことから、累積エネルギー吸収量は変位の増加に対して直線的に増加しており、良好なエネ

ルギー吸収性能を有している。特に、B-type 及び C-type については効率的にエネルギー吸収している。ゴムの場合、図-7で示したように、載荷初期の剛性が小さいことから、ある程度まで変位が進まないとエネルギー吸収がなされないことから、効率的とはいえない。ロックオフ構造として機能する変形初期の段階からエネルギー吸収をコンスタントにできる鋼製緩衝装置の優位性が認められる。

衝撃解析の結果より、衝突体の運動エネルギーと緩衝装置の内部仕事を等価と置くことによって簡便に計算でき、設計も容易になることが分かった。ここで、緩衝装置の内部仕事は静的圧縮試験の結果を簡略化して降伏荷重 $P \times$ 変位量 δ とした。実際には歪速度効果のため降伏荷重は上昇するが、歪速度効果を考慮しない場合安全側の設計となる。B-Type の解析では歪速度は約 10~151/sec で降伏点は 1.1 倍程度上昇した。

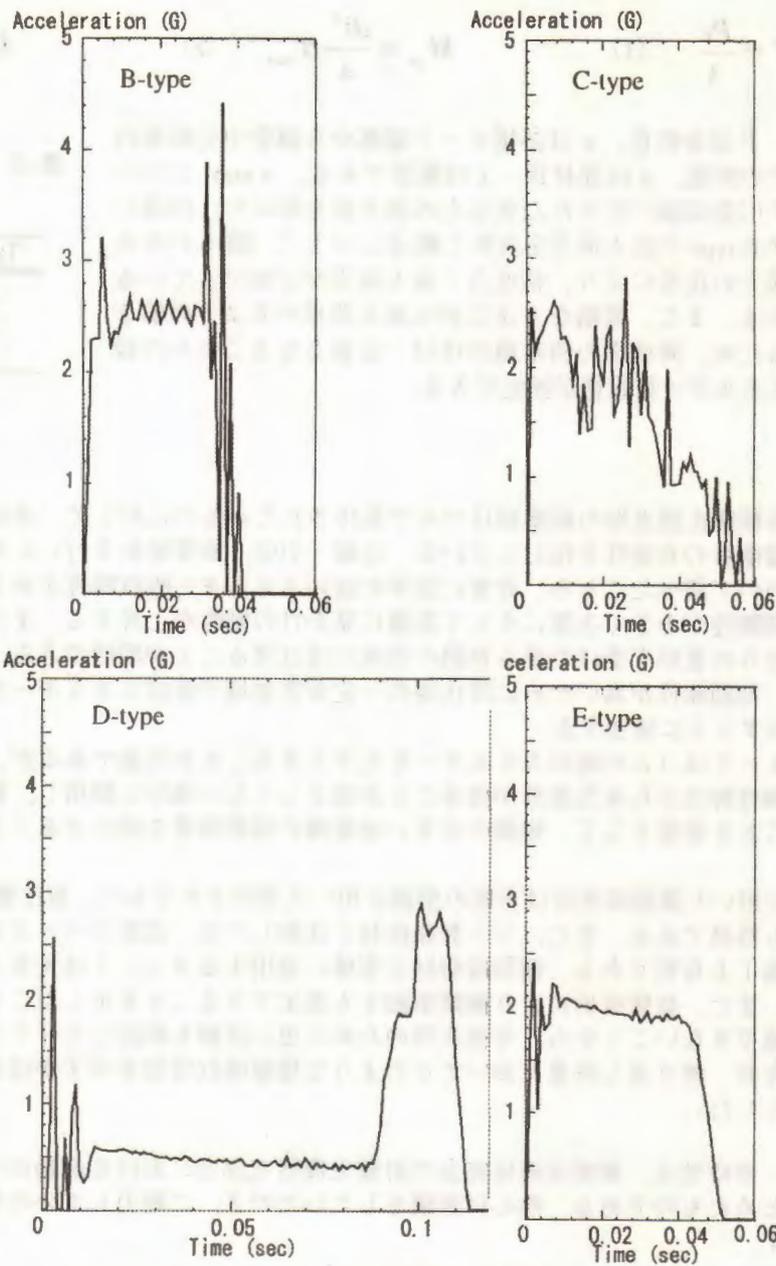
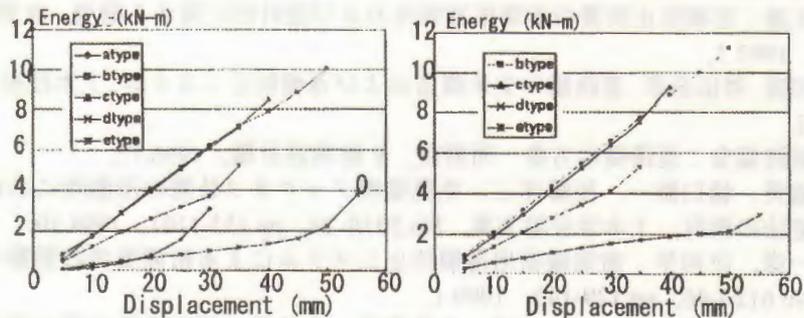


図-13 衝撃載荷における衝突体の加速度時刻歴

3.3 最大荷重の評価

B-type について、鋼管の片側部分に作用する曲げモーメントを式(1)で表すことができ、全塑性モーメントを式(2)で算出できるとすれば、式(3)により最大荷重を算出できる。



実験結果からの評価 解析からの評価
図-14 衝撃載荷における履歴吸収エネルギーと変位の関係

$$M = \frac{Pe}{3} \quad (1)$$

$$M_p = \frac{dt^2}{4} \sigma_{\max} \quad (2)$$

$$P_{\max} = \frac{3M_p}{e} \quad (3)$$

ここで、Pは全荷重、eは溶接ビード端部から鋼管中央断面の中心軸までの距離、dは部材長、tは板厚である。σ_{max}については鋼棒の引張試験で得られた真応力の最大値を用いた。同様にC-type及びE-typeの最大荷重を計算し表-2に示した。図-6の荷重-変位関係との比較により、精度良く最大荷重が評価できていることが分かる。また、簡略な方法ながら最大荷重のおよその値を評価できるため、降伏後の荷重値がほぼ一定値となるこれらの緩衝装置のエネルギー吸収量が推定できる。

表-2 簡略計算により
推定された最大荷重

Type	最大荷重(kN)
B	258
C	255
E	142

4. 結論

現在、落橋防止構造用の緩衝材はゴムで製作されているのに対して、本研究では、これまでに例のない鋼製緩衝材の有効性を検討している。圧縮・引張・衝撃解析を行いエネルギー吸収特性や衝撃応答特性について調べたところ、非常に効率の良いエネルギー吸収特性があることが分かった。ゴムの場合、初期剛性が小さく次第にそして急激に見かけの剛性が上昇する。また、非線型弾性特性を持つゴムはかなりの変形を受けた後も初期の形状にはほぼ戻ることが期待できる。これに対して、鋼製緩衝装置では、初期剛性が高いために降伏後の一定荷重領域で吸収エネルギーがいずれの変位領域においてもコンスタントに増加する。

寸法によってはゴムの吸収エネルギーを大きくすることが可能であるが、むしろゴムの場合にはその非線型弾性特性から永久変形が残ることが望ましくない部分に使用し、鋼製緩衝材の場合には、取り替えることを前提として、規模の大きい地震時の緩衝効果を持たせることは効果的であると思われる。

本研究で用いた鋼製緩衝材は市販の型钢を用いて製作されており、製作費を低く抑えることができ、また入手も容易である。また、ゴム製緩衝材と比較しても、設置スペースを小さくすることができることは、施工上有利である。鋼製緩衝材を実橋に適用するメリットは大きく、その可能性は大きいと思われる。また、数値解析により衝撃挙動をも推定できることを示したことは、衝撃実験が必ずしも容易に実施できないことから、今後実用のために更に詳細を検討して行く上で極めて意義が大きいと考える。なお、繰り返し荷重においてどのような履歴吸収性能を示すかは重要な検討項目であり、今後の課題としたい。

【謝辞】 本研究は、鋼橋技術研究会の耐震免震研究部会における活動の一部として行われた研究の成果をまとめたものである。熱心に討議をしていただき、ご助力していただいた研究部会員に感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，1990.2.
- 2) 長嶋文雄：落橋防止装置の衝撃応答特性および設計法に関する研究，文部省科学研究費補助金 基礎研究，1997.3.
- 3) 西川和廣，神田昌幸：道路橋の支承構造および落橋防止システム，土木技術資料，Vol.39，No.2，pp.62-67，1997.2.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，1996.12.
- 5) 菊地敏男，樋口俊一，後藤洋三：免震橋用ロックオフ装置の滑動時における破壊機構と最大反力簡易算定法の検討，土木学会論文集，No.501/I-29，pp.153-1161，1994.10.
- 6) 川島一彦，庄司学：衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.129-142，1999.1.
- 7) 都築昭夫，長嶋文雄，中田宏司，大竹省吾，金子修：鋼製緩衝装置の荷重変形特性に関する実験的検討，鋼構造年次論文報告集，No.7，1999.11(投稿中).