

鋼製緩衝装置の緩衝効果に関する解析的検討

東京都立大学 工学研究科 土木工学専攻 正 長嶋 文雄
東京都立大学 工学研究科 土木工学専攻 学 後藤 精二

1. はじめに

激震時に上部工（橋桁）と橋台のパラペットあるいは落橋防止工（サイドブロック・ストッパー）との衝突が万一起きたときのために、緩衝装置が設置されている。この緩衝装置の機能としては、上部工の損傷を防ぐだけではなく、下部工（橋脚・基礎系）へ伝達される衝撃力や衝撃エネルギーを減少・吸収させる働きを併せて持たせるべきである。筆者らは、このような観点から、比較的廉価な形鋼を使用した鋼製緩衝装置を用いることを提案してきている。図-1(a), (b)は橋桁の変位抑制機能を有する鋼製落橋防止装置に鋼製緩衝装置を設置した例を示したものである。過去の検討結果^{1), 2), 3), 4)}によれば、鋼製緩衝装置は僅かな設置スペースで大きな吸収エネルギーを見込むことができ、設計法も明解なものが用意できそうである。本報告は、過去の検討結果から最も良好な特性を示した円管タイプの鋼製緩衝装置を落橋防止工に取り付けたときの効果を衝撃挙動シミュレーション解析を通して明らかにし、鋼製緩衝装置の有効性の検討およびここで用いた耐衝撃設計法に関する照査を行ったものである。

2. 鋼製緩衝装置の衝撃挙動シミュレーション解析

2.1 円管タイプ鋼製緩衝装置の特性

材質はSS400相当とし、入手が容易な市販の形鋼を用いて製作できるものとして、図-2に示すような供試体を試作した。静的繰返し载荷試験で得られた荷重-変位関係曲線を図-3に示すが、最大荷重 P_{max} に達して以後は、圧縮変位の増加に対する荷重変動は僅かな状態がしばらく持続し、大きな吸収エネルギーが期待できる特性を有している。吸収エネルギーは、したがってほぼ最大荷重と変位量との積で近似することができる。また、緩衝材が機能している限りは、下部工への伝達荷重は最大荷重と等しいことになる。このように伝達荷重が明確なことが本緩衝工の特徴である。

最大荷重と吸収エネルギーの算定は次のように行えばよい。
円管の片側部分に作用するモーメント M は次式で示される。

$$M = (1/3)Pe \quad (\text{図-4 参照}) \quad (1)$$

ここで、 P は荷重、 e は溶接ビード端部から鋼管の中央断面の中心軸までの距離である。また、円管の片側部分の全塑性モーメント M_p は、断面内の応力の釣り合い、 $\sigma_{max} A_t + \sigma_{max} A_c = 0$ (図-2) を仮定したとき次のようになる。

$$M_p = 2 \times d \times (t/2) \times (t/4) \times \sigma_{max} = 2 \times 180 \times 3.0 \times 1.5 \times 64.8 = 105,000 \text{ kgf mm} = 105.0 \text{ tf mm} \quad (2)$$

ここで、 d は鋼管の長さ、 t は板厚(6mm)である。また、 σ_{max} には、SS400の鋼棒の引張試験で得られた真応力の最大値である 64.8 kgf/mm^2 を用いた。したがって、最大荷重 P_{max} は次のように計算される。

$$P_{max} = 3M_p / e = 3 \times 105.0 / 12 = 26.25 \text{ tf} \quad (3)$$

これは実験で得られた 24.18 tf に近い値となっている。

最大吸収エネルギー E_{max} は、有効最大変位を $\delta_{max} = 70 - 23 = 47 \text{ mm}$ とすると、次式で計算できる。

$$E_{max} = P_{max} \times \delta_{max} = 19.53 \times 47 = 917.9 \text{ tf mm} \quad (4)$$

設計は次のような手順で行えばよい。まず①衝突エネルギーワード（鋼製緩衝装置・耐衝撃設計・耐震性能・緩衝工）

連絡先（〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1, 東京都立大学工学研究科土木工学専攻, TEL 0426-77-2774, FAX 0426-77-2772）

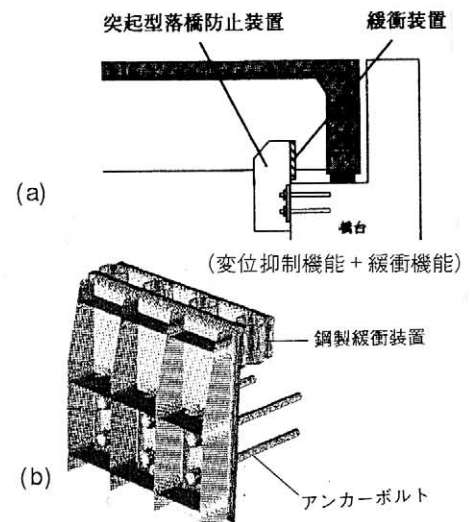


図-1 鋼製緩衝装置設置例

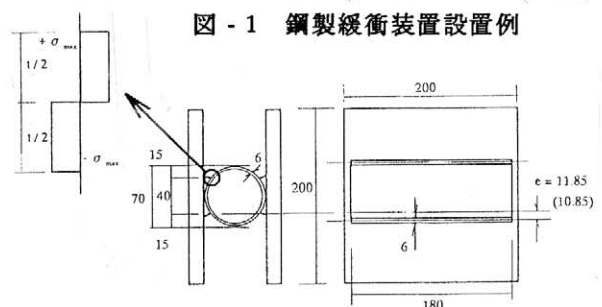


図-2 円管タイプ鋼製緩衝装置供試体

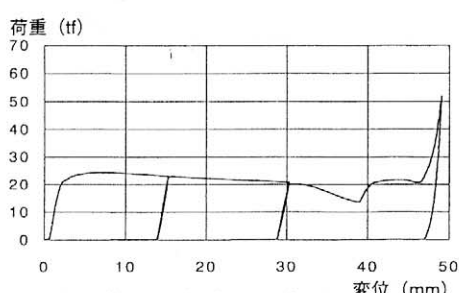


図-3 荷重-変位関係曲線

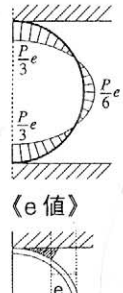


図-4 モーメント図とe値

ルギー E_0 を算定する ($E_0 = 0.5 \times mv_0^2$)。②下部工への最大伝達力 T_{max} を設定する (下部工の損傷を防ぐ目的)。③ $T_{max} \geq n P_{max}$ を満足する緩衝材断面を定める (n は緩衝材の本数)。

2.2 解析モデル

図-5に、円管タイプの緩衝装置を付けた落橋防止装置の解析モデル図を示す。スティフナのみシェル要素とし、その他は全てソリッド要素を用いている。橋桁(端横桁)は重量7.3 tfの衝突体と見なし、衝突方向のみの自由度を与えて初速度 $v_0 = 1.08 \text{ m/sec}$ で衝突させた。衝突エネルギーは $E_0 = 0.434 \text{ tf} \cdot \text{m}$ となる。鋼製緩衝装置は前述の方法で設計した [$t = 3 \text{ mm}$, $\phi = 70 \text{ mm}$, $d = 100 \text{ mm}$, $P_{max} = 2.65 \text{ tf}$, $n = 4$, $T_{max} = 10.6 \text{ tf}$ (ただし、歪み速度効果により2割程度上昇する)]。各種の解析パラメータは、実験結果に基づき予め十分吟味されたものを用いた。表-1には、ここで用いた鋼部材の物性値、表-2には動的強度増加率と歪み速度との関係を示した。また、鋼部材の材料非線形特性曲線として表3に示すような真応力-真歪み関係を用いた。

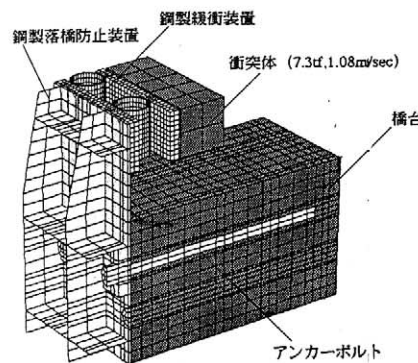


図-5 解析モデル・メッシュ図

真歪み	真応力 (kgf/mm ²)
0.000	3.270E+01
9.350	4.560E+01
2.605	5.780E+01
6.915	6.480E+01

表3 真応力-真歪み関係

SS400:
 質量密度 8.01e-10 (kgfsec²/mm⁴)
 弾性係数 2.1000e+4 (kgf/mm²)
 ポアソン比 0.3
 せん断弾性係数 8.0769e+3 (kgf/mm²)
 体積弾性率 1.7500e+4 (kgf/mm²)
 降伏応力 3.2700e+1 (kgf/mm²)
 最大応力 6.4800e+1 (kgf/mm²)
 破壊歪み 0.7

表1 鋼部材の物性値

高橋の式:

$$DIF = \frac{f_{yd}}{f_{yk}} = 1.202 + 0.04 \cdot \log \epsilon$$

DIF: 変化率

f_{yd} : 動的降伏応力

f_{yk} : 静的降伏応力

ϵ : 歪み速度

表2 動的強度増加率と歪み速度関係

2.2 衝撃挙動シミュレーション解析結果

鋼製緩衝装置の有無による損傷度の違いやエネルギー吸収能などに着目し、衝撃解析ソフト LS-DYNA を用いて解析を行った。図-6には鋼製緩衝装置の有無による落橋防止装置の変形の比較図を、図-7には同様に伝達力の時刻歴の比較を示した。また、表4には衝撃エネルギー吸収の分担率の比較を示した。

緩衝装置のない場合は、スティフナの局部座屈などによる

エネルギー吸収が60%、定着ボルトとコンクリート間の付着が部分的に切れてボルトの抜け出しが生じたことによるエネルギー吸収が40%程度であった。一方、緩衝装置を付けた場合は付着切れが起こらず、ボルトに僅かな塑性変形が発生した程度であった。鋼製緩衝工は衝突エネルギーの88%を吸収した。下部工への最大伝達力は緩衝装置がない場合28.0 tfであるのに対して、ある場合は12.5 tf程度に半減している。

3. むすび 鋼製緩衝装置を用いれば、最大伝達荷重を任意に定めることができ、下部工への影響を調整できるため、バランスのとれた耐衝撃設計が可能である。塑性設計も式(1)~式(4)を使って簡単に行うことができる。

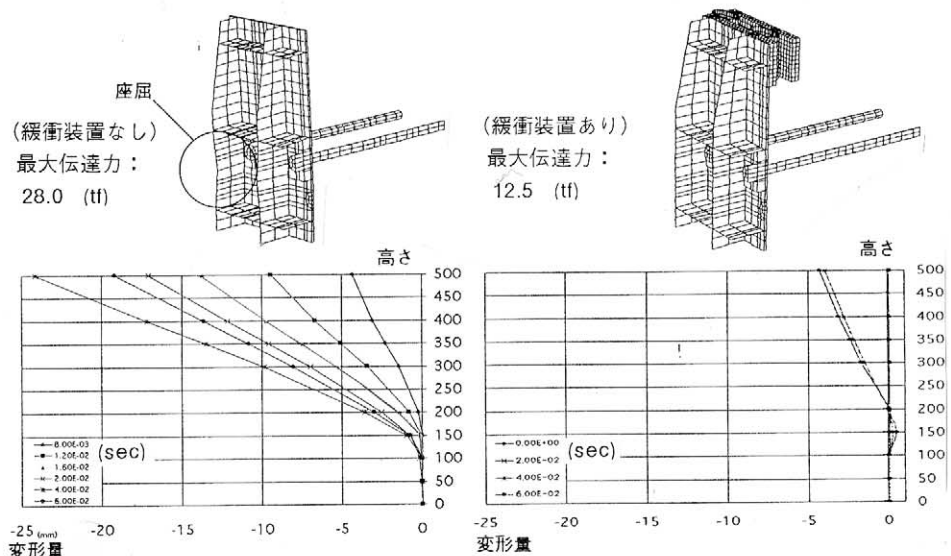


図-6 落橋防止装置背面板の変形 (緩衝装置の有無による比較)

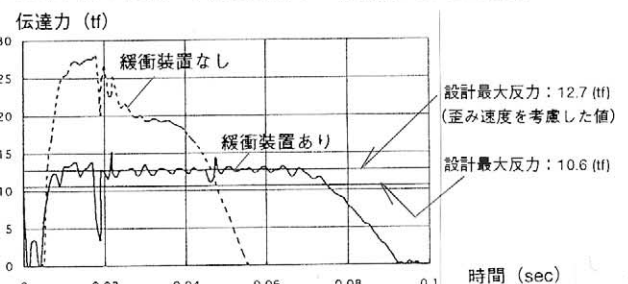


図-7 下部工への伝達力

	緩衝装置の吸収エネルギー	ボルトの吸収エネルギー	落橋防止装置の吸収エネルギー
緩衝装置あり	88.0	0.0	12.0
緩衝装置なし	0.0	40.0	60.0

表4 衝撃エネルギー吸収分担の比較表

【参考文献】1) 都築・長嶋・中田・大竹・金子: 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, '99. 2) 長嶋・皆川・島田・寺尾・佐藤: 鋼製緩衝材の荷重変形特性に関する解析的検討, 鋼構造年次論文報告集, No.7, '99. 3) 耐震・免震研究会報告書, 鋼橋技術研究会, 平成11年11月. 4) 佐々木・長嶋・大竹: 鋼製緩衝装置の設計法に関する検討, 第27回関東支部講概集, 平成12年3月.