

エネルギー吸収機能を有する落橋防止装置の限界変位量 に関する解析的研究

竹田 周平¹・北浦 勝²・宮島 昌克³

¹正会員 金沢大学大学院 自然科学研究科 後期課程 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

²フェロー会員 工博 金沢大学大学院 自然科学研究科 教授 (同上)

³正会員 工博 金沢大学大学院 自然科学研究科 教授 (同上)

1. はじめに

近年、今世紀前半に発生する確率が高いと言われている東海・東南海・南海地域でのプレート型巨大地震や兵庫県南部地震のような大都市直下型地震の再来を感じさせるように、2004年新潟県中越地震をはじめ各地で地震活動が活発化している。

このような状況の中、土木構造物の耐震診断や耐震補強など地震防災に対する関心が高まりつつある。特に橋梁における落橋防止装置は、想定外の地震動が発生した場合においても、致命的な被害である落橋を防止させるデバイスであることから、既設橋の耐震化対策として有効な整備項目である。

落橋防止装置においては、衝撃的な地震力を緩和するためにゴム材を緩衝材として用いられていることが多い。これまでの既往の研究^{1)~4)}では、ゴム材の圧縮変形を利用した緩衝効果やエネルギー吸収に着目したもの、繊維補強ゴムや円筒型ゴムのような新しい装置の開発等が行われてきた。ゴム材では緩衝効果は高いものの、圧縮荷重

がハードニング領域に達すると装置への地震力が増大することから限界変位量の制約を受け、その結果装置へ作用する地震力が増大する可能性がある。しかしながら、この限界変位量の影響を研究した事例は少ない。

本研究では、ゴム材よりもエネルギー吸収機能と限界変位量が大きな材料に着目し、限界変位量の違いが落橋防止装置に及ぼす影響について検討した。検討では中規模橋梁を対象に、落橋防止装置の移動量やこれらの非線形特性を変化させた地震応答解析を試みた。

2. 対象となる橋梁の概要

本研究で解析対象としたモデル橋梁においては、Ⅱ種地盤上における橋長 $L=226\text{m}$ の4径間連続形式の鋼橋を想定した。対象橋梁の概要図を図-1に示す。この橋梁の上部工形式は鋼箱桁（2箱桁）、下部工形式は逆T式橋台（ $H=8.5\text{m}$ ）及び張出式橋脚（ $H=15.0\text{m}$ ）であり、基礎形式は鋼管杭基礎により支持された構造である。また支承は鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）である。

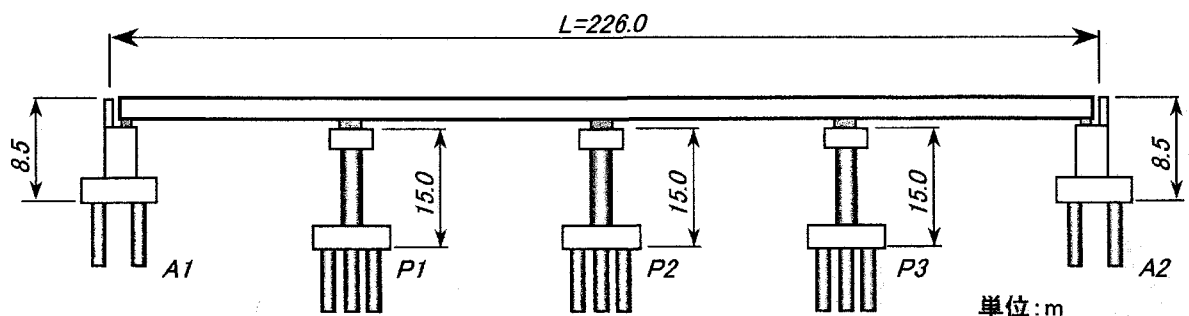


図-1 対象橋梁の概要図

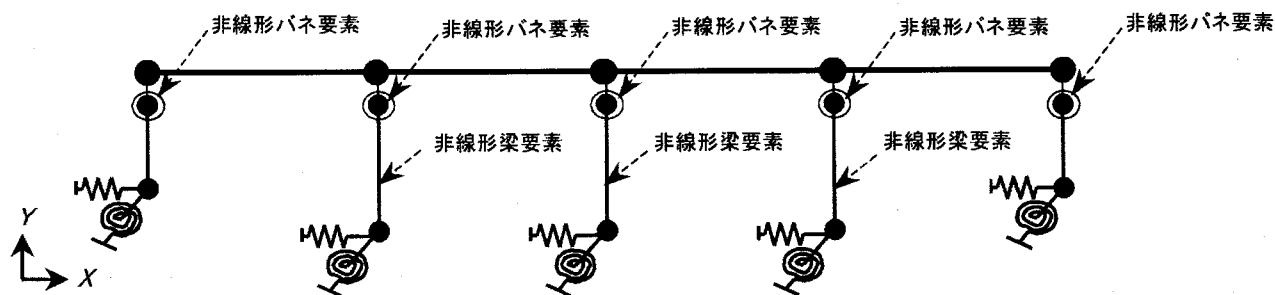
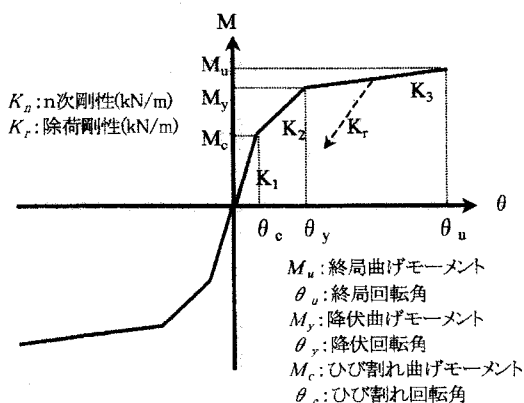
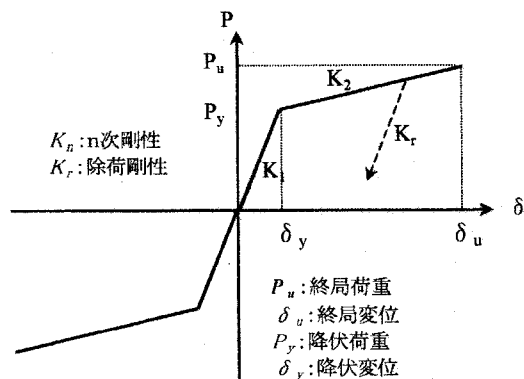


図-2 解析モデル図



(a) 橋脚柱部の復元力図



(b) 免震支承の復元力図

図-3 非線形特性図

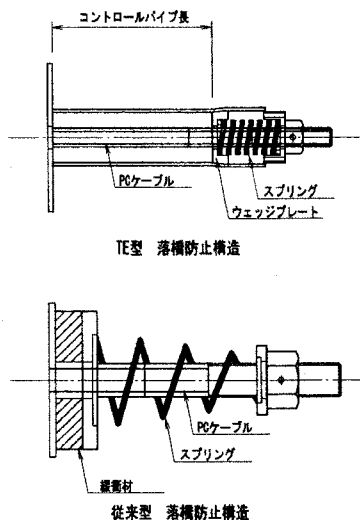


図-4 落橋防止装置の定着部

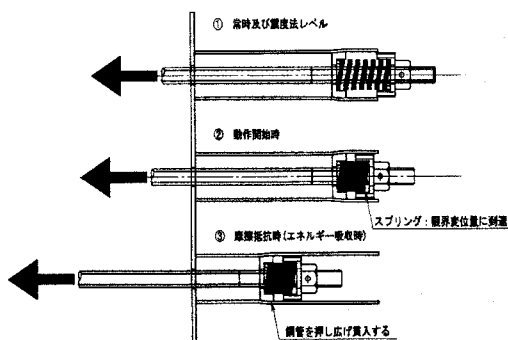


図-5 TE型の作動状況図

3. 解析のモデル化

(1) 解析モデルの概要

解析モデルにおいては、橋梁全体系を2次元でモデル化した。解析モデル図を図-2に示す。上部構造及び下部構造のモデルは梁要素、免震支承及び杭基礎はバネ要素とした。非線形を考慮する部材は橋脚柱部と免震支承及

び落橋防止装置であり、橋脚柱部は塑性ヒンジ位置に $M-\theta$ による塑性回転バネ要素、免震支承は支承位置に $P-\delta$ による水平バネ要素を設定した。

また減衰モデルは Rayleigh 型減衰とし式(1)で与えた。定数 α 及び β は、あらかじめ固有値解析を行って卓越振動数を求め、別途解析により仮定した減衰定数によるモード減衰を計算し、これらの解析より得られた $f_1=0.63\text{Hz}$, $h_1=0.02$ と $f_2=50\text{Hz}$, $h_2=0.05$ から求めた。

$$C = \alpha M + \beta K \quad (1)$$

ここに、 C は減衰マトリックス、 M は質量マトリックス、 K は剛性マトリックス、 α 及び β は定数を示す。

(2) 非線形モデル

橋脚柱部の復元力特性は、塑性ヒンジの中心位置における曲げモーメントと回転角の関係を非線形とした修正武田型トリリニアモデルとし、式(2)に示す除荷勾配係数を $\beta=0.5$ と設定した。

$$K_r = K_i \left| \frac{\theta_{max}}{\theta_c} \right|^{-\beta} \quad (2)$$

ここに、 K_r は除荷剛性、 K_i は初期剛性、 θ_{max} は最大回転角、 θ_c はひび割れ回転角、 β は除荷勾配係数を示す。

免震支承の復元力特性は、水平荷重と変位の関係を非線形としたノーマルバイリニアモデルとした。これらの非線形特性を図-3に示す。

(3) 着目した落橋防止装置の構造とモデル化

1) 着目した落橋防止装置の概要

本研究で着目した落橋防止装置は PC ケーブルによる連結形式であり、図-4はこの装置の定着部を示している。上段の TE 型はエネルギー吸収型の装置で本研究で着目したものであり、下段が従来型の装置を示している。コントロールパイプを設置していることが TE 型の特徴である。

2) TE 型落橋防止装置の構造

TE 型落橋防止装置は、PC ケーブルに張力が発生するとウェッジプレートがコントロールパイプを押し広げながら移動することでエネルギーを吸収する構造を有している。これらの作動状況を図-5に示す。また TE 型は、図-5に示すコントロールパイプの長さを変化させることによりエネルギー吸収量を調整できる。本研究では、コントロールパイプ長を限界変位量と定義した。

3) TE 型落橋防止装置のモデル化

TE 型落橋防止装置のモデル化においては、離反側と接触側で非対称のモデルとした。ここで定義する離反側は桁端部が相互に離れる方向を、接触側は桁端部が衝突す

る方向を示している。これらの非線形特性を図-6に示す。この非線形性は、 $2 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 1 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 1 \rightarrow 8 \rightarrow 9$ と移動するスリップバイリニアースリップ型の履歴特性である。

PC ケーブルの耐力は、道路橋の耐震基準⁵⁾に基づき設定した。まず式(3)を満足するような PC ケーブルの断面積を求め、式(4)により PC ケーブルのバネ剛性 K_2 (K_4 も同値)を求めた。

$$A > \frac{1.5 R_d}{N \sigma_y} \quad (3)$$

$$K_2 = \frac{EA}{L} \quad (4)$$

ここに、 A は PC ケーブル 1 本の断面積を、 R_d は橋台部の死荷重反力、 N は落橋防止装置の本数、 σ_y は PC ケーブルの降伏応力度、 E は PC ケーブルの弾性係数、 L は PC ケーブルの長さを示す。

PC ケーブルの断面積 A の決定においては、橋台部における死荷重反力 R_d を 3,600 kN、PC ケーブルの本数 N を 8 本、PC ケーブルの降伏応力度 σ_y を 1,600 N/mm²と設定

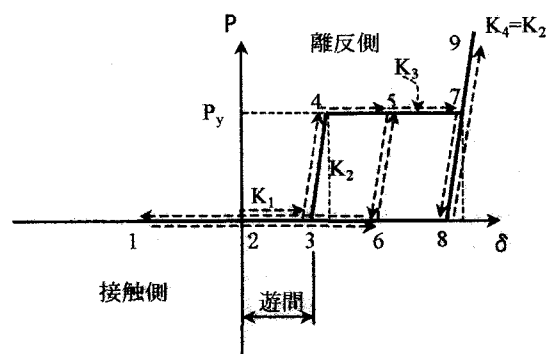


図-6 TE 型の非線形特性図

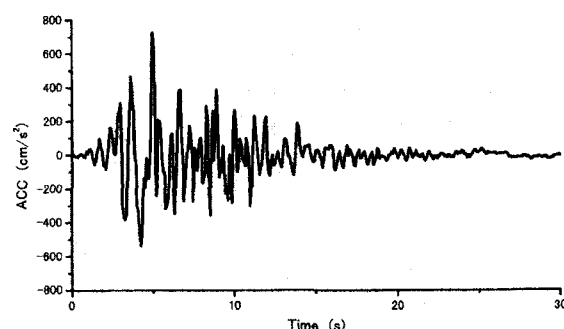


図-7 入力地震波形

し、式(3)より $A=422\text{mm}^2$ とした。また PC ケーブルのバネ剛性は、PC ケーブルの弾性係数 E を $200,000\text{N/mm}^2$ 、PC ケーブルの長さ L を $3,000\text{mm}$ と設定し、式(4)より $K_2=28,133\text{N/mm}$ (1 本当たり) とした。

また本検討におけるエネルギー吸収部の降伏荷重は、落橋防止装置の設計地震力である $1.5 \times R_d$ の 50% 程度を想定し、 $P_y=2,700\text{kN}$ とした。

(4) 入力地震波形

解析で用いる加速度波形は、落橋防止装置が作動することを想定していることから伊津野らの研究⁹⁾を参考とし、II 種地盤の標準波形 (1995 年兵庫県南部地震、大阪ガス葺合供給所構内地盤上) を単純に 2 倍した。本解析で用いた標準加速度波形を図-7 に示す。

(5) 解析におけるモデルの仮定

本解析では落橋防止装置が作用するような地震動に対して検討を行うため、部材によっては大きな非線形領域になるものや終局に達する場合も考えられる。しかしながら本解析では、モデルを単純化するために下記の①～③の仮定を設定した。

- ① 橋脚及び免震支承の非線形特性は、理論上の終局を超えても第3次勾配 K_3 (免震支承は K_2) 上を移動し、終局による剛性変化は行わない。
- ② 桁端部とパラペットの相対変位において、接触側である桁の衝突は考えない。
- ③ PC ケーブルは完全弾性モデルとし、降伏力による剛性変化や履歴減衰は考慮しない。

4. 解析結果

(1) 解析ケース

解析では、落橋防止装置の降伏荷重 (図-6 の P_y) をいずれのケースにおいても $P_y=2,700\text{kN}$ と一定とし、遊間や限界変位量を変化させることによる PC ケーブルの作用力の変化や、免震支承のエネルギー吸収量の違いに着目した。これらの解析ケースを表-1 に示す。Case-1 は基本ケースであり、レベル 2 地震動による免震支承の相対変位量を確保したケースで、Case-4 は PC ケーブル単独による従来型である。また Case-5 と Case-6 は、遊間を小さくし限界変位量を大きくしたものである。いずれのケースも、落橋防止装置の遊間と限界変位量の和、すなわち①+②=1,000mm とした。

表-1 解析ケース

ケース名	TE 型の 降伏荷重 P_y (kN)	落橋防止装置 の遊間① (mm)	限界変位量② (3~8 の距離) (mm)
Case-1	2,700kN	500	500
Case-2	2,700kN	750	250
Case-3	2,700kN	900	100
Case-4	※ ¹⁾	1000	0
Case-5	2,700kN	250	750
Case-6	2,700kN	100	900

注記) ※¹⁾ は、エネルギー吸収を行わない従来型である。

(2) 解析結果

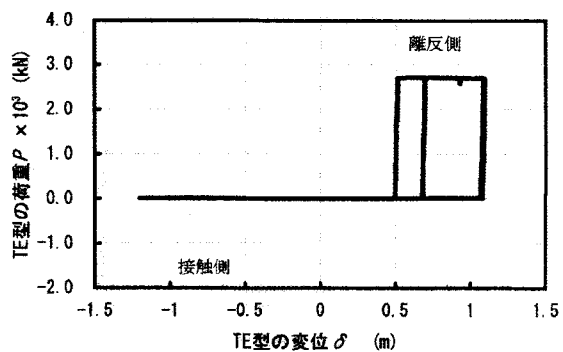
1) PC ケーブルの作用力

PC ケーブルの作用力の結果を表-2 に示す。また落橋防止装置の履歴図を図-8 に示す。表-2 より、Case-6 で 20,020kN と最も作用力が小さい。このように限界変位量が大きいケースにおいて PC ケーブルの作用力が小さくなる結果が得られた。また従来型である Case-4 では、22,540kN ともっとも大きな作用力が発生しており、Case-1 に対し 9%、Case-6 に対し 13% 大きい。以上により、TE 型を設置することで PC ケーブルの作用力を低減できることが判った。

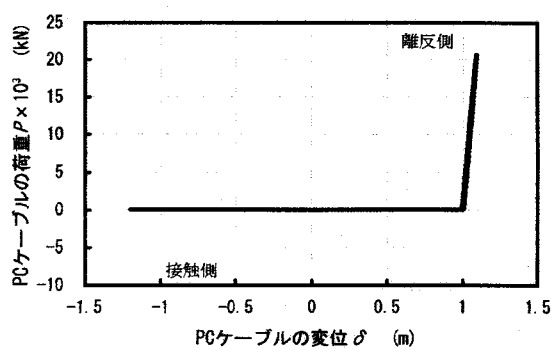
TE 型を設置したケースに着目すると、限界変位量が検討ケースの中で最も大きい Case-6 は、限界変位量が小さい Case-3 よりも PC ケーブルの作用力が 6% 程度低減している。以上より限界変位量が大きいほど、PC ケーブルの作用力を低減できることが判った。

2) 免震支承のエネルギー吸収量の推移

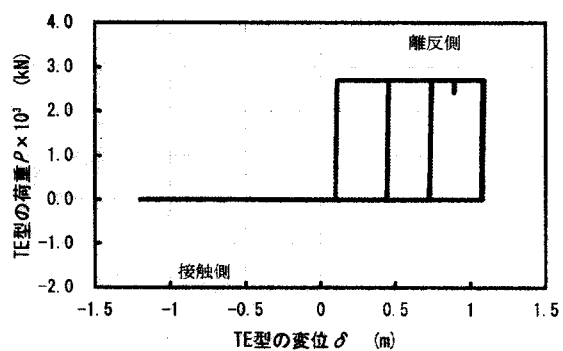
免震支承のエネルギー吸収量について、Case-1、Case-4 及び Case-6 で比較を行った。A1 橋台の免震支承におけるエネルギー吸収量の推移を図-9 に示す。図-9 より、いずれのケースにおいても大きな違いは見られないが、Case-4 の従来型はその他のケースよりもエネルギー吸収量が多く、Case-1 や Case-6 に対して 2% 程度大きい。これに対し Case-1 と Case-6 については、大きな差は確認されなかった。このようにエネルギー吸収量の差は、TE 型のエネルギー吸収能力の影響と考えられ、免震支承のエネルギー吸収量に比較しわずかなのであるが橋梁の応答性状に影響を及ぼすことも確認された。しかしながら本解析では、免震支承の終局を定義していないため、TE 型を設置した場合の厳密なエネルギー吸収量の評価については今後の課題である。



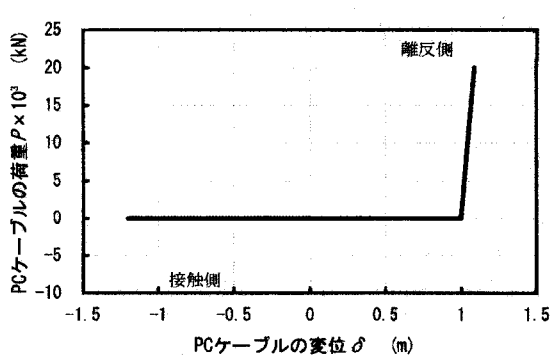
(1) Case-1 TE型落橋防止装置 履歴図



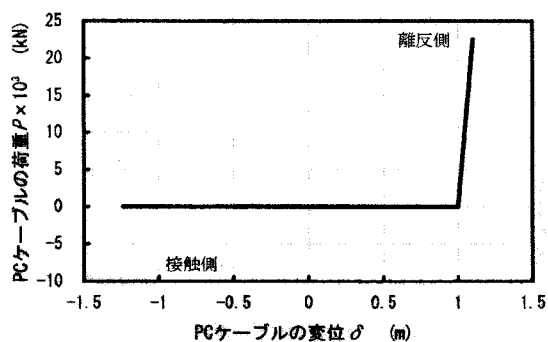
(3) Case-1 PCケーブル 履歴図



(2) Case-6 TE型落橋防止装置 履歴図



(4) Case-6 PCケーブル 履歴図



(5) Case-4 PCケーブル 履歴図

図-8 落橋防止装置の履歴図 (A1 橋台)

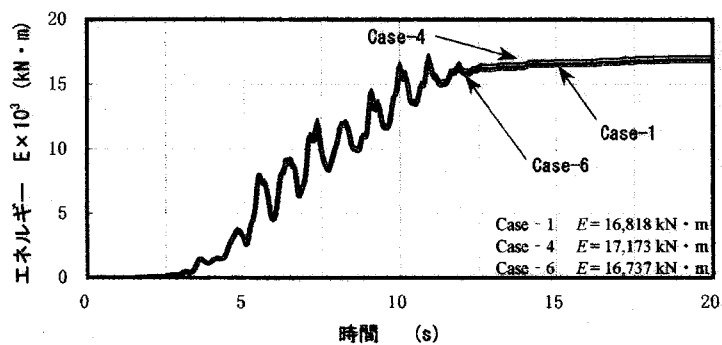


図-9 エネルギー吸収量の推移 (A1 橋台)

表-2 PC ケーブルの作用力 (A1 橋台)

ケース名	PC ケーブルの作用力 (k N)
Case-1	20,630
Case-2	20,740
Case-3	21,110
Case-4	22,540
Case-5	20,080
Case-6	20,060

5. まとめ

本研究では、4 径間連続鋼箱桁形式の中規模橋梁に着目し、想定外の地震力に対する落橋防止装置の限界変位量の影響について地震応答解析を行った。解析では単純化するためにいくつかの仮定を設定しており今後更なる検討の余地を残しているが、これらの解析で得られた結論を以下に示す。

- ・ エネルギー吸収型である TE 型を設置した場合、従来型よりも PC ケーブルへの作用力を低減できる可能性がある。
- ・ TE 型の特徴である限界変位量を大きくすることで、PC ケーブルへの作用力を低減できる可能性がある。
- ・ 想定を超えるような地震動を想定した場合において、

落橋防止装置に TE 型を設置することにより、わずかなではあるが免震支承のエネルギー吸収量に影響を及ぼす。しかし 2% 程度の差であるため、免震支承のエネルギー吸収性能への影響は少ないと考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、(株) エスイー藤田憲和氏に多大なるご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 園田佳巨他：ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板の静的及び動的応答特性に関する実験的考察，土木学会論文集，No.422/I-14，pp.333-346，1998.
- 2) 梶田幸秀他：緩衝型桁間連結ケーブルを用いた高架橋の地震時応答性状，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.297-310，2002.
- 3) 越峠雅博他：弾塑性型特性を有する円筒型ゴム緩衝材装置の衝撃緩衝効果に関する実験研究，土木学会論文集，No.675/I-55，pp.99-112，2001.
- 4) 川島一彦他：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.
- 5) 道路橋示方書・同解説（耐震設計編）：日本道路協会，平成 14 年 3 月.
- 6) 伊津野和行他：桁落下を想定した桁間ケーブル連結装置の所要条件に関する考察，土木学会論文集，No.668/I-54，pp.319-324，2001.