

終局強度地震動に基づく落橋防止システムの検討例

竹田周平¹・幸左賢二²・伊津野和行³・谷脇一弘⁴・藤田憲和⁵

¹正会員 博（工）福井工業大学 講師 工学部建設工学科（〒910-8505 福井県福井市学園3-6-1）

²正会員 Ph.D. 九州工業大学 教授 工学部建設社会工学科（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

³正会員 工博 立命館大学 教授 理工学部都市システム工学科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

⁴正会員 博（工）福井工業大学 准教授 工学部建設工学科（〒910-8505 福井県福井市学園3-6-1）

⁵正会員 株式会社エスイー 設計CADセンター（〒754-0894 山口県山口市佐山3-42）

1. はじめに

近年、国内外において比較的規模の大きな地震が多く発生している。特に海外では、1999年に発生したトルココジャエリ地震と台湾・集集地震では、断層変位によって落橋が発生、2004年のスマトラ沖地震では津波により沿岸部の橋梁が落橋し、また2008年5月に発生した中国四川大地震でも高架橋やアーチ橋で落橋が確認された。日本では、道路橋示方書・同解説V編¹⁾にて、想定外の地震力や変位が橋に生じることを懸念し、落橋防止システムに関する規定を示している。その後、平成17年7月に落橋防止構造設計ガイドライン（案）²⁾により、終局照査用の加速度応答スペクトルや落橋防止構造の部材の塑性化を期待した設計例が示された。しかしながら、このガイドラインでは、落橋防止構造に対する実験や解析的な検討は未だ限定され、今後の継続的な検討に基づく内容の充実が回避であると記載されている。すなわち、このような地震動を対象とした検討事例は少ないことが現状である。以上の様な背景を踏まえ、本研究では終局照査用の地震動に基づく落橋防止システムの検討を実施することを目的とした。

2. 解析概要とモデル化

(1) 解析概要

図-1にこの橋梁の構造概要図を示す。基本的な諸元は著者らが検討した橋梁³⁾と同じである。解析モデルは、橋梁を二次元の骨組み要素でモデル化し、時刻歴応答解析で積分法はNewmark β 法、積分時間間隔を $\Delta t=0.001$ sと設定した。解析対象方向は、橋脚部の落橋防止装置（PCケーブル連結方式）に着眼しているため、橋軸方向のみを検討対象とした。また減衰はRayleigh型とし、解析ソフトはDYNA2Eを採用した。

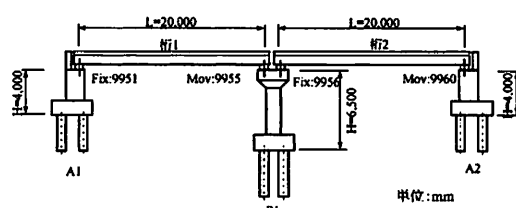


図-1 対象橋梁の構造概要図

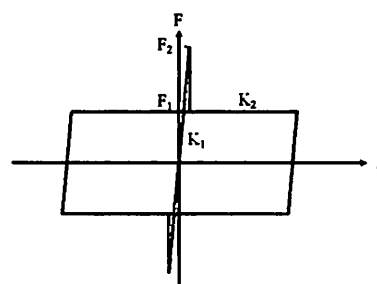


図-2 固定支承の復元力モデル

(2) 主要部材のモデル化

上部構造は線形梁要素、基礎構造は線形バネ要素とし、下部構造の橋脚柱部は、ひび割れや鉄筋の降伏を考慮した劣化型トリリニアモデルである修正武田型（ $\beta=0.5$ ）を適用した。ただし、今回の入力地震動は非常に大きく、状況によっては柱部の終局状態を超過する可能性もあるが、ここでは終曲のイベントを越えても剛性変化を行わないモデルとした。なお橋台は、上部構造と同様に線形梁要素としてモデル化した。図-2に固定支承の復元力モデルを示す。この破壊を考慮する復元力モデルは、固定支承と可動支承共に梶田ら⁴⁾のモデルを適用した。固定支承のモデル化は、水平変位を支持しているアンカーバーが降伏するまでは弾性挙動を示し、降伏超過後は、動摩擦係数 μ と死荷重反力 R_d を乗じた摩擦力を上限值とするバイリニア型に移行するモデルとした。今回の解析における動摩擦係数 μ は0.05と設定した。

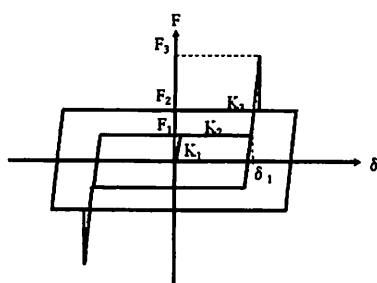


図-3 可動支承の復元力モデル

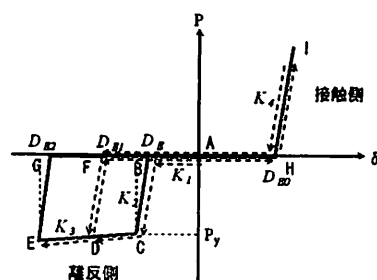


図-4 従来型の落橋防止装置の復元力モデル

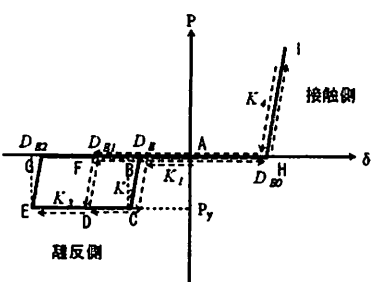


図-5 TE型の落橋防止装置の復元力モデル

図-3に可動支承の復元力モデルを示す。可動支承のモデル化は、常時の移動量に対する遊間が設けられているため、この遊間に達するまでは自由に可動し、この遊間に達したイベントからアンカーバーが塑性化するまでは弾性挙動を示し、さらにアンカーバーが降伏してからは、動摩擦係数 μ と死荷重反力 R_d を乗した摩擦力を上限値とするバイリニア型に移行するモデルとした。今回の解析における動摩擦係数 μ は0.05と設定した。

(3) 落橋防止構造のモデル化

本解析では、2つの落橋防止構造のモデルを対象とした。まず最初に従来型について説明する。図-4に従来型の落橋防止装置の復元力モデルを示す。ここに示す接触側は桁端部が接触する方向を表し、離反側は桁端部が離れていく方向を表している。この接触側は、桁が衝突したときの剛性変化を表現している。この履歴特性は、降伏するイベントを超過した以降(C点)は、一度経験した履歴部は理論上無視するモデル、すなわちスリップ型であることが特徴である。履歴の特性は、 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow F \rightarrow A \rightarrow H \rightarrow I \rightarrow H \rightarrow A \rightarrow F \rightarrow D \rightarrow E$ と移動する。この落橋防止装置は、道路橋示方書¹⁾に基づきケーブルの本数と径を決定した。一方接触側は、 K_4 は川島ら⁵⁾の検討結果を参考に桁間衝突による塑性化を考慮しない線形追突バネによりモデル化した。

続いて新しい機能を有している落橋防止装置について説明する。図-5にTE型の落橋防止装置の復元力モデルを示す。TE型の特性は、基本的に従来型と同じである。異なる部分は、図上に示す P_y 点、すなわち装置の降伏荷重は従来型がPCケーブルの耐力で決定していることに対し、TE型はこの装置に付属されているコントロールパイプの中に設置されているウェッジプレートが移動し始める荷重であることである。

(4) 入力地震動と解析ケース

入力地震動について、今回の解析ではガイドライン²⁾に示されている終局照査用地震動を目標としているため、一般的な観測波形(解析で用いる加速度波形)を調整する必要がある。今回の解析では、採用したいくつかの観測波形の $h=5.0\%$ に対する加速度応答スペクトルをあらかじめ計算し、その加速度応答スペクトルのピーク値と、目標とする終局照査用地震動の加速度応答スペクトルのピークとの比率を算定し、この比率を入力加速度に乗じる方法を採用した。採用した加速度波形と倍率を表-1に示す。

表-2に、本研究における解析ケースを示す。解析ケースは、図-1に示す第2径間部(桁2部)のみ支承が破壊する条件とし、それぞれにPI橋脚上の桁かかり部に、桁1と桁2を連結する落橋防止装置を従来型とした場合、およびTE型とした場合にて組み合わせた。また、今回は、2ケース×6波形の全12ケースの非線形動的解析を実施した。なお表中の波形番号(11~16)は、表-1で示す番号と一致している。

表-1 採用した加速度波形

番号	波形名称	入力倍率
11	板島橋周辺地盤	5.56
12	津軽大橋周辺地盤	3.00
13	JR鷹取駅構内NS	3.33
14	ポートアイランドFNS	2.31
15	川口EW	2.00
16	小千谷EW	1.50

表-2 解析ケースの一覧

ケース名	支承条件	落橋防止	波形番号
Case-1	第二径間のみ破壊考慮	TE型	11~16 (全6ケース)
Case-2	第二径間のみ破壊考慮	従来型	11~16 (全6ケース)

表-3 支承部の最大相対変位

	A1支承:9951		PIL支承:9955		PIR支承:9956		A2支承:9960	
	落橋方向	非落橋方向	落橋方向	非落橋方向	落橋方向	非落橋方向	落橋方向	非落橋方向
11	-	-	0.208	-0.277	0.498	-0.072	0.610	-0.121
12	-	-	0.058	-0.104	0.311	-0.075	0.357	-0.093
13	-	-	0.120	-0.244	0.347	-0.018	0.553	-0.103
14	-	-	0.039	-0.096	0.281	-0.086	0.370	-0.103
15	-	-	0.092	-0.027	0.487	0.000	0.509	-0.015
16	-	-	0.085	-0.115	0.217	-0.051	0.287	-0.080
Ave.	-	-	0.100	-0.144	0.357	-0.050	0.447	-0.086

	A1支承:9951		PIL支承:9955		PIR支承:9956		A2支承:9960	
	落橋方向	非落橋方向	落橋方向	非落橋方向	落橋方向	非落橋方向	落橋方向	非落橋方向
11	-	-	0.191	-0.205	0.288	-0.072	0.414	-0.162
12	-	-	0.080	-0.068	0.180	-0.078	0.230	-0.099
13	-	-	0.098	-0.251	0.224	-0.022	0.412	-0.105
14	-	-	0.030	-0.078	0.142	-0.093	0.241	-0.132
15	-	-	0.095	-0.013	0.156	-0.131	0.177	-0.064
16	-	-	0.063	-0.127	0.126	-0.052	0.249	-0.113
Ave.	-	-	0.093	-0.124	0.186	-0.075	0.287	-0.112

(上段：Case-1，下段：Case-2)

3. 解析結果と考察

(1) 対象とした解析ケースと解析の着目点

対象とした解析ケースは、第二径間の支承のみが破壊する場合において、落橋防止装置の構造特性の違いが与える影響を把握するため、表-2に示すCase-1（第二径間の支承破壊+TE型）、Case-2（第二径間の支承破壊+従来型）の2つとした。解析では、支承部の最大相対変位と桁かかり長との関係、桁間（桁1と桁2の遊間部）の相対変位と落橋防止装置への作用力や桁間の衝突回数に着目した。

(2) 支承部の相対変位と桁かかり長の関係

表-3に各支承部の最大相対変位（単位：m）を示す。これらの解析は第二径間の支承のみ破壊を考慮しているため、A1橋台部の支承は固定であり変位が発生しないことから一で示している。落橋方向の変位に着目すると、PIR支承におけるCase-1の波形番号：11と15でそれぞれ498mmと487mmの大きな変位が発生しているが、桁かかり長800mmを超過するに至らなかった。また、このPIR支承に着目すると、波形番号：11ではCase-1の応答変位が498mmであることにに対し、Case-2では288mmと約58%に低減されている。この理由は、TE型の見かけの遊間が増大したためである。なお、A2支承はいずれのケースにおいても桁かかり長よりも十分小さな応答変位であるため問題とならなかった。

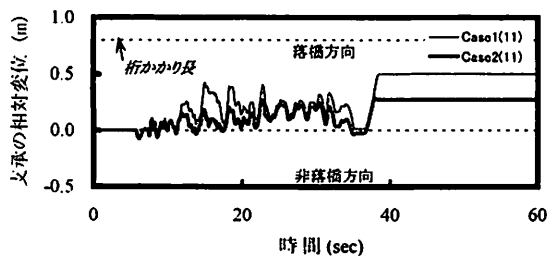
図-6に代表的な支承の時刻歴応答変位を示す。これらの波形は、波形番号：11と15を示しているが、波形番号：11では約10s付近まで同様な応答性状を示しているが、その後TE型（Case-1）の相対変位量が増大し従来型（Case-2）よりも長周期化している

ことが判る。これは、TE型は見かけの遊間が増大すると同時に変位も増大したが、従来型は遊間の増加はTE型に比較し小さく、かつ降伏荷重も大きいことから桁2を桁1側に復元させる効果が発揮され、その結果としてTE型よりも短周期となった。なお、波形番号：15の結果は、水平支持を失いかけた桁2の移動を拘束できる従来型は、変位がTE型よりも小さくなっている。これより桁の残留変位を小さくするにはある程度降伏荷重を大きく設定しなければいけないことを示唆している。

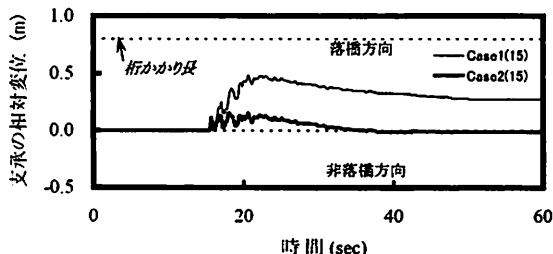
(3) 桁間の相対変位と衝撃力の関係

図-7に代表的な桁間の時刻歴相対変位を示す。図中に示す①から④はCase-1における主な桁間衝突が発生したイベントを示すが、Case-2はCase-1（TE型）よりも弾塑性変位が小さいことから桁2が桁1の方向へ復元する効果が大きく、その結果として桁間衝突回数が増加していることが判る。ただし④以降は概ね同じ挙動を示している。さらに図-8に示す落橋防止装置の時刻歴衝撃力より、Case-2はCase-1よりも桁間衝突および落橋防止装置への衝撃力の回数が多いことが判る。

PCケーブルに作用する最大引張力では、Case-1（TE型）は1,197kNでCase-2（従来型）の5,769kNに対し21%と小さい。これは装置の降伏荷重の違いであるが、PCケーブルに作用する荷重が小さいことは、定着する部材、例えば端横桁や取り付ける鋼製ブラケットへの作用力も低減できる効果が期待できる。すなわち、TE型の降伏荷重を、支承に発生する相対変位が桁かかり長を超過しない程度で適切に設定すると、終局照査用地震動相当においても落橋防止装置をサイズダウンできる効果があるものと考えられる。

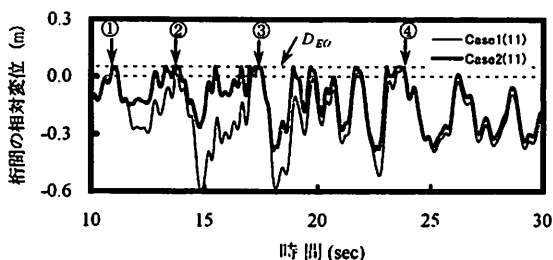


(a) 波形番号 : 11



(b) 波形番号 : 15

図-6 代表的な支承部の時刻歴相対変位



(波形番号 : 11)

図-7 桁間の時刻歴相対変位

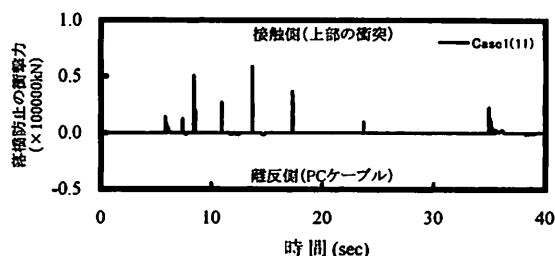
(4) 考察

第二径間のみ支承の破壊を考慮する場合における、落橋防止装置の構造特性の違いが応答性状に及ぼす影響について解析を実施した。これらの結果、TE型であるCase-1は、支承部の相対変位が大きくなりやすい傾向であり、また従来型であるCase-2は桁間衝突の回数とPCケーブルに作用する引張力の発生回数がCase-1に比較し増大する結果を得た。

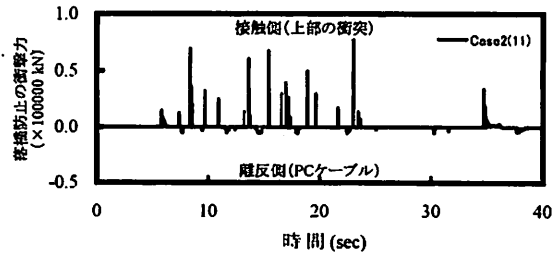
しかしながら、TE型はPCケーブルに作用する最大引張力を低減できる効果も期待できる。さらに今回のケースでは、支承の最大相対変位が桁かかり長を超過していない。このように、桁かかり長を越えるような相対変位が発生しない場合においては、落橋防止装置の降伏荷重を小さくすることができるTE型の方が落橋防止装置のコンパクト化もできる可能性があることを示唆している。

4. まとめ

本研究では、落橋防止構造設計ガイドライン⁸⁾で初めて示されることになった終局照査用加速度応答スペクトルを目標とした入力地震動に基づき、汎用



(a) Case-6 波形番号 : 11



(b) Case-7 波形番号 : 11

図-8 落橋防止の時刻歴衝撃力

な橋梁である橋梁を対象に、第二径間部の支承破壊を考慮した場合における数値解析を実施し検討例として示した。なお今回の非線形動的解析ではいくつかの条件設定を行っているため、今後の改良の余地や課題は残っているが、ここで得られた結果を以下に示す。

- 1) 第二径間の支承のみ破壊させた場合は、支承に作用する相対変位が桁かかり長を超過しなかった。すなわち、落橋には至らなかった。
- 2) TE型は桁間衝突とPCケーブルへの衝撃力や衝撃回数を低減できる効果が確認された。すなわち、桁かかり長を超過しない範囲でTE型の降伏荷重を設定すると、落橋防止装置のコンパクト化を行える可能性があることが確認された。

謝辞

本研究は、福井工業大学学内特別研究費の一環で実施されました。本研究を行うにあたり、Kik-netの波形データを利用した。落橋防止構造設計ガイドライン(案)の運用にあたり、株式会社長大の矢部正明様、土木研究所の運上茂樹様より貴重なご指導とコメントを頂きました。ここに記して感謝を表す次第です。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 V編, 平成14年3月。
- 2) 落橋防止構造設計ガイドライン(案), 平成17年7月。
- 3) 竹田周平, 北浦 勝, 宮島昌克, : エネルギー吸収機能を有する落橋防止装置の設計に関する解析的検討, 構造工学論文集, Vol.52A, pp. 315-326, 2006。
- 4) 梶田幸秀, 杉浦邦征, 渡邊英一: 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。
- 5) 川島一彦, 植原健治, 庄司学, 星恵津子: 桁衝突及び落橋防止装置の効果に関する模型振動実験及び解析, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp. 221-236, 2002。