

超過作用に対する桁橋の損傷シナリオに関する検討

秋本 光雄¹・西 弘明²・佐藤 京²

¹ 非会員 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所
(〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

² 正会員 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所
(〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

1. はじめに

近年、南海トラフ巨大地震や首都直下地震等の大規模地震発生の切迫性が指摘され、これらの地震や津波による道路橋の被害防止・軽減対策が喫緊の課題となっている。現行の耐震設計基準¹⁾により、設計地震動（レベル2地震動）に対し橋を構成する各構造が限界状態を超えないよう耐荷性能を満足する設計が行われるが、設計地震動を超える作用（以下、「超過作用」という。）に対しては、具体的な規定が示されていない。

道路橋には緊急輸送道路等、地域の防災計画等において期待される機能を担うことが求められ、被害を最小化するため、超過作用に対しても早期復旧、早期機能確保の観点から致命的な損傷を回避する必要がある。補修しやすい部位に損傷を誘導・制御するような設計方法の確立が必要と考えられる。

本報では、超過作用を受けた場合の桁橋の損傷過程（以下、「損傷シナリオ」という。）と、損傷制御の一例を報告するものである。

造という単純な構造単位を抽出した場合、地震時の上部構造の慣性力は支承→橋脚→基礎の直列の構造系を通して基礎に伝達される。このような構造系の損傷シナリオは、支承、橋脚、基礎の3つの構造要素における耐力の大小関係により異なったものとなる。橋脚と基礎の関係では、一般に基礎の耐力が橋脚より大きくなるよう設計が行われるため、橋の損傷は支承あるいは橋脚のいずれか耐力が小さい側の部位となる。図-1は免震構造を対象に橋脚と支承の耐力の大小関係を示した水平荷重－水平変位曲線である。現行の設計では支承と橋脚は個々に耐震性能を満足すればよいとされ、両者の耐力の関係は規定されていない。実際の設計では、支承の耐力が橋脚耐力を上回るケースAと耐力関係が逆のケースBが存在することとなる。ケースAでは超過外力に対し支承より先に橋脚が損傷し、外力が大きくなるにつれて橋脚の損傷が進展するが、ケースBでは橋脚より先に支承が損傷し、以後外力が大きくなっても橋脚の損傷は進展しない。

2. 下部工の耐力階層化

(1) 検討の対象

超過作用を受けた場合の橋の損傷シナリオは、橋梁形式や構造条件、架橋条件等の違いにより様々なシナリオが想定されるが、ここでは一般的な桁橋で、かつ免震橋を検討対象とする。

(2) 下部工の耐力関係

橋全体系から1基の橋脚とそれが支持する上部構

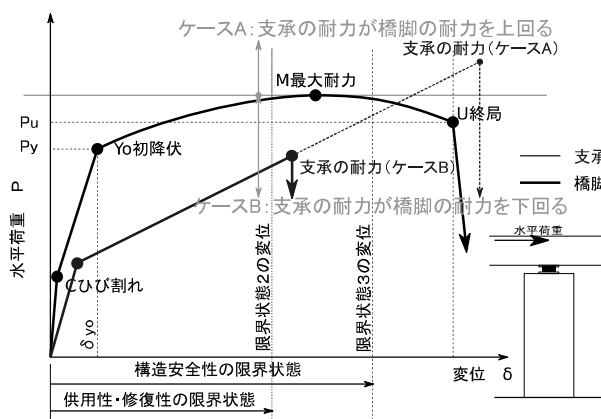


図-1 支承と橋脚の耐力の関係（免震）

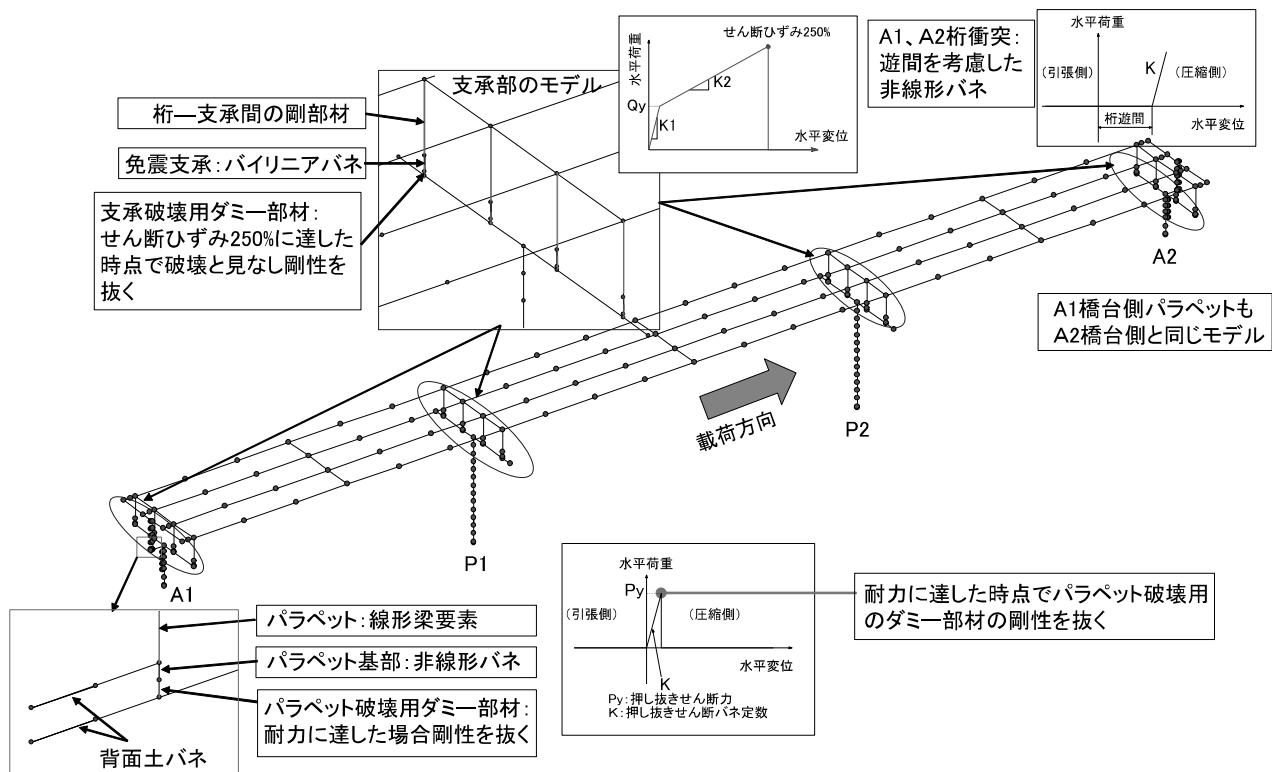


図-2 解析モデル（鋼桁橋、橋軸方向）

3. 桁橋の損傷シナリオ

(1) 解析モデル

平成 24 年道路橋示方書による設計を行ったモデル橋を基に解析モデルを作成した（以下、「基本モデル」という。）。モデル橋の諸元を表-1、解析モデルを図-2 に示す。免震支承は、非線形バイリニアモデルとし、せん断ひずみが 250%に達した時点で破壊とみなし、剛性をゼロとした。また、橋台パラペットは非線形バネとし、桁の衝突による押し込み力が耐力に達した時点で剛性をゼロとした。

表-1 モデル橋諸元

橋 梁	橋梁諸元	支承条件
鋼桁橋 (鋼 I 桁橋)	3 径間連続	橋軸方向 免震
	橋長 98.1m	直角方向 固定
下部工形式	壁式橋脚・直接基礎	
コンクリート桁橋 (PCコンボ桁橋)	3 径間連続	橋軸方向 免震
	橋長 111m	直角方向 固定
下部工形式	柱式橋脚・杭基礎	

(2) 解析方法

本解析は、図-2 の 3 次元骨組モデルを用いたプッ

シュオーバー解析とした。超過外力が作用した場合の支承と橋脚の耐力差による損傷過程を分析するため、以下の 3 ケースについて解析を行った。

ケース A：基本モデルに該当し、支承耐力＞橋脚耐力である。（図-3 実線）

ケース B₁：基本モデルの橋脚耐力を 30%増加させ、支承耐力＜橋脚耐力となるようにした。（図-3 破線）

ケース B₂：橋脚耐力はそのまま、橋脚部の支承にロックオフ構造を想定し、支承耐力を橋脚耐力より低くなるよう調整した。（図-4）

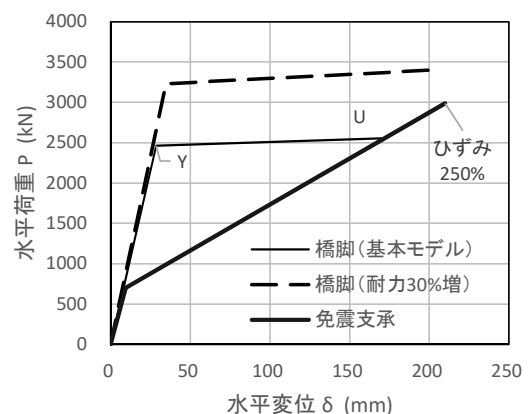


図-3 橋脚と支承の耐力の関係（鋼桁橋）

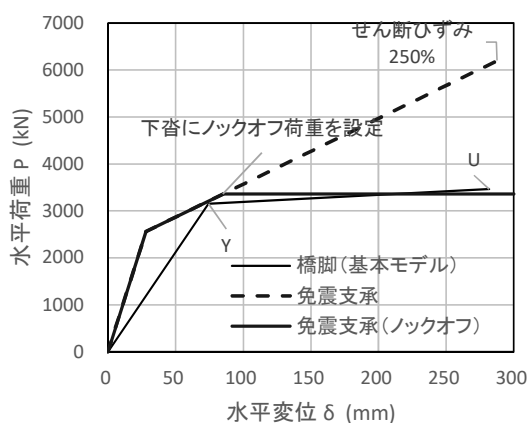


図-4 橋脚と支承（ロックオフ構造）の耐力の関係（コンクリート桁橋）

プッシュオーバー解析の結果は、図-5 に示すような水平震度－水平変位曲線（kh-δ 曲線）として整理した。左縦軸は解析における作用震度、横軸は上部構造位置での水平変位とした。kh-δ 曲線の面積累積値を橋の吸収エネルギーとし、レベル2地震動に対する吸収エネルギーと超過外力時の吸収エネルギーの比を「超過震度倍率」として右縦軸に示した。レベル2地震動から終局限界状態に至る超過震度倍率までの間が、橋全体系の超過作用に対するロバスト性（危機耐性）を示している。

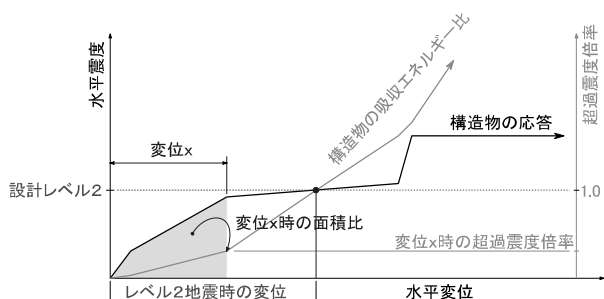


図-5 吸収エネルギー比と超過震度倍率

(3) 解析結果

ケース A の解析結果を図-6、表-2 に、ケース B₁ の解析結果を図-7、表-3 に示す。図は水平震度－水平変位関係、表はその解析過程で発生したイベント点を示したものである。

ケース A では、水平震度は支承や橋脚が降伏（イベント③、④）することで勾配が変化し、橋台位置で桁衝突（イベント⑦）が生じると橋台パラペットの抵抗により再び勾配が立ち上がる。橋台パラペットが破壊（イベント⑧）された後は水平震度が一定のまま変位が増加し、支承より先に橋脚基部が終局

（イベント⑨、⑩）に至り構造不安定となる。この時の超過震度倍率はレベル2地震動の2.3倍である。

ケース B₁ では、先に支承せん断ひずみが250%を超えて損傷（イベント⑤、⑥）し、橋脚に外力が伝わらないため、橋脚は損傷しない結果となった。支承が損傷部位となる損傷シナリオは、超過作用の規模が大きくなっても橋脚の損傷が限定的である。しかし、超過外力に対する対策として橋脚の耐力を意図的に高めることは、基礎の耐力もそれ以上に高める必要があり、適用には課題もあると考えられる。

図-8、表-4 はコンクリート桁橋におけるケース B₂ の解析結果である。レベル2地震動を超えた後、橋脚支承のロックオフが作動（イベント⑤、⑥）し、橋脚の損傷は進展しない。その後、桁がパラペットに衝突（イベント⑧）し、パラペット基部の押し込みせん断降伏（イベント⑩）に達するまで超過震度倍率5.7倍に達した。

ロックオフ構造により、橋脚の耐力を高めることなくケース B₁ と同様、橋脚の損傷を限定的とすることが可能となる。さらに桁がパラペットに衝突し、パラペット基部の押し込みせん断降伏に達するまで、橋全体として多段的に抵抗できる構造となっている。

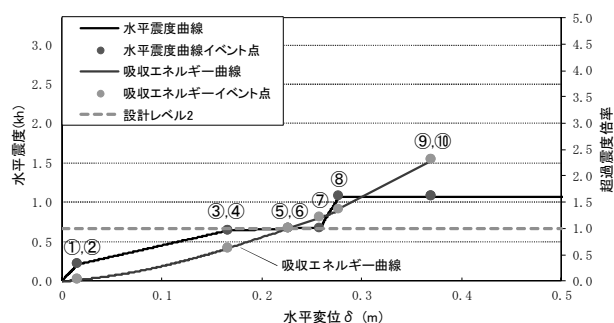


図-6 水平震度－水平変位関係（ケース A）

表-2 解析イベント結果（ケース A）

No.	水平変位 (m)	水平震度 kh	吸収エネルギー 超過震度倍率	イベント
①	0.016	0.212	0.017	P1橋脚支承降伏
②	0.016	0.212	0.017	P2橋脚支承降伏
③	0.167	0.639	0.626	P1橋脚基部初降伏
④	0.167	0.639	0.626	P2橋脚基部初降伏
⑤	0.227	0.669	1.000	A1橋台支承せん断ひずみ250%
⑥	0.227	0.669	1.000	A2橋台支承せん断ひずみ250%
⑦	0.258	0.670	1.197	A2側桁衝突
⑧	0.277	1.070	1.355	A2橋台パラペット押し込みせん断降伏
⑨	0.370	1.071	2.294	P1橋脚基部限界状態2
⑩	0.370	1.071	2.294	P2橋脚基部限界状態2

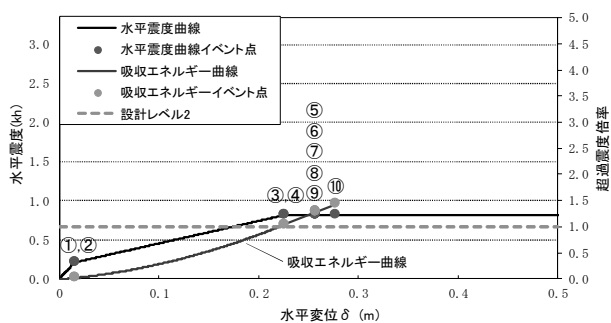


図-7 水平震度-水平変位関係（ケース B₁）

表-3 解析イベント結果（ケース B₁）

No.	水平変位 (m)	水平震度 kh	吸収エネルギー 超過震度倍率	イベント
①	0.016	0.212	0.016	P1橋脚支承降伏
②	0.016	0.212	0.016	P2橋脚支承降伏
③	0.226	0.818	1.043	A1橋台支承せん断ひずみ250%
④	0.226	0.818	1.043	A2橋台支承せん断ひずみ250%
⑤	0.257	0.819	1.281	P1橋脚支承せん断ひずみ250%
⑥	0.257	0.819	1.281	P2橋脚支承せん断ひずみ250%
⑦	0.257	0.819	1.281	P1橋脚基部初降伏
⑧	0.257	0.819	1.281	P2橋脚基部初降伏
⑨	0.257	0.819	1.281	A2側桁衝突
⑩	0.277	0.820	1.438	A2橋台バラベツ押込みせん断降伏

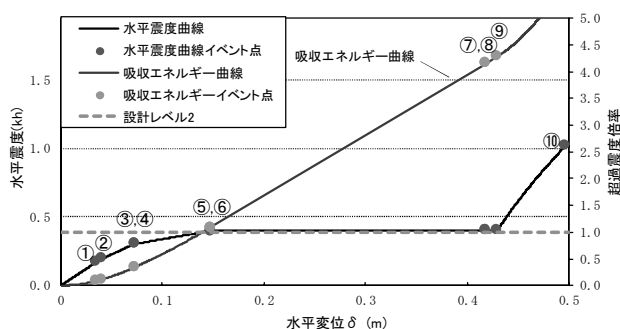


図-8 水平震度-水平変位関係（ケース B₂）

表-4 解析イベント結果（ケース B₂）

No.	水平変位 (m)	水平震度 kh	吸収エネルギー 超過震度倍率	イベント
①	0.035	0.173	0.086	A2橋台支承降伏
②	0.041	0.196	0.115	A1橋台支承降伏
③	0.073	0.303	0.341	P1橋脚支承降伏
④	0.073	0.303	0.341	P2橋脚支承降伏
⑤	0.147	0.400	1.086	P1橋脚支承ロックオフ
⑥	0.147	0.400	1.086	P2橋脚支承ロックオフ
⑦	0.418	0.401	4.154	A2橋台支承せん断ひずみ250%
⑧	0.418	0.401	4.154	A2側桁衝突
⑨	0.429	0.402	4.279	A1橋台支承せん断ひずみ250%
⑩	0.496	1.019	5.662	A2橋台バラベツ押込みせん断降伏

4. 望ましい損傷シナリオ

桁橋について、支承と橋脚の耐力階層化により損傷部位を支承に誘導することの有効性を確認した。超過作用に対して橋の供用性・修復性を保持する

という観点からは、支承にロックオフ構造を採用することなどによって損傷部位を支承に誘導し、橋脚の損傷を軽微な程度にとどめることは、望ましい損傷シナリオの一例であると考えられる。ここで、支承に損傷を誘導する方法として、下査にロックオフ型せん断ボルトを採用した事例²⁾がある。橋全体系の損傷シナリオの一例を表-5に示す。

さらに、図-9に示すように損傷部位が下査に制御できれば、路面の段差の発生が防止され供用性が確保されるほか、橋座のスペースにジャッキを設置することができ復旧性も確保される損傷形態となる。

表-5 桁橋の損傷シナリオ（免震）

支承耐力<橋脚耐力

橋梁形式	桁橋	地震動のレベル	
ケース	支承<橋脚	設計地震動	超過外力
上部構造	主要部材	弾性範囲内	
	支承取付け部	弾性範囲内	支承取付け部として弾性的
	上査	弾性範囲内	
支承	支承本体	安定した力学特性やエネルギー吸収能を確保	高さを保持し鉛直荷重を支持できる状態
	下査	弾性範囲内	破壊され水平荷重に抵抗できない状態
	最大応答値	安定したエネルギー吸収能を確保	
橋脚	地震後の傾き	支保工を必要とせず容易に復旧が可能	
	基礎	基礎として弾性的	



図-9 下査が損傷部位となった被災事例

5. おわりに

本報では、超過作用を受けた場合の望ましい損傷の一例として、支承に損傷を誘導する方法を示した。今後、損傷制御の実現性について検討していく予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編・同解説、平成29年11月。（平成24年3月）
- 2) 本荘清司・横山和昭・前原直樹・田崎賢治・姫野岳彦：ロックオフ機能付き支承構造を用いた既設橋梁の耐震補強対策，構造工学論文集，Vol.55A，pp.506-514，2009.3.