

鋼製ダンパーを設けた簡易橋梁の耐震性能

1100405 高橋佑輔

高知工科大学工学部社会システム工学科

仮架橋工法を応用した簡易な道路橋は、大幅なコスト削減と工期の短縮が実現できるが、設計上、橋脚の降伏を許しており、耐震性能2を満たしていない。実施設計では橋脚間にブレースを設けている例があることから、このブレースに鋼製ダンパーの考え方を適用して耐震性能2を満足する設計の検討を行った。結果、適切な断面設計を行うとブレースがエネルギー吸収機能を発揮する。さらに、限定された設計条件の下であれば、動的解析によらずにプッシュオーバー解析でブレースの最適断面を求められる可能性を示した。

Key Words : 簡易橋、ラーメン橋、鋼製ダンパー、エネルギー吸収、座屈

1. はじめに

株式会社高知丸高殿によって開発された sqc ピア工法は仮架橋工法を道路橋に応用することによって、大幅なコストの削減と工期の短縮が実現できる。

sqc 工法は、言わば杭を打ち残したような形として、地盤上にある杭をそのまま橋脚として用いるところに特徴がある。極めて合理的な構造であるが、オリジナルが仮設構造物であるため、耐震性能が課題であった。

写真1は、実用化第1号の橋梁であるが、部分的に橋脚間にブレースが設けられている。これは、橋脚長、スパンがかなり大きい部分があつて耐震設計の規定を満たしていなかったためであるが、基本的な考え方が補強であるため、設計上、橋脚の降伏を許している。すなわち、耐震性能2（地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能の回復が速やかにい行い得る性能）は満たしていない。

一方、近年、鋼製ダンパー、ダンパーブレースなどと呼ばれる2次部材を降伏させることによってエネルギー吸収を図り、耐震性を向上させる研究が報告されている。そのことを利用して、今井は、橋脚間のブレースを積極的に降伏させ、ブレースによるエネルギー吸収によって橋脚の降伏を防いで耐震性能2を満たす設計の検討を行っている。

しかしながら、ブレースによるエネルギー吸収量や、それによる動的応答の変化などの詳細は明らかにされていない。本研究では、ブレースによるエネルギー吸収とその制震効果を詳細に検証するとともに、ブレースをダンパーとして有効に機能させるための設計法を探ることとした。

2. モデル構造



写真1 実用化橋梁

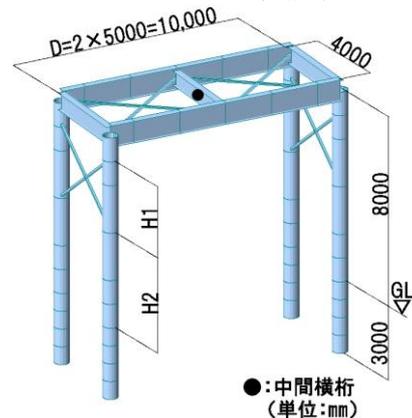


図1 ダンパー設置後のイメージ(1径間)

検討の対象は、今井が報告している基本設計の諸元を持つ橋梁の1径間分とした。図1にモデルの構造を、表1に主要部材の断面諸元を示す。橋脚に対しては、道路橋示方書耐震設計編の規定に従って非線形特性を設定した。橋脚以外の部分は弾性としている。

表1 部材断面一覧 単位(mm)

	H	B	tw	tf
主桁(H)	900	300	16	28
横桁(H)	588	300	12	20
中間横桁(H)	700	300	13	24
横構斜材(2×L)	75	75	9	9

	φ	tw
橋脚	609.6	12.7

3. ダンパーによる地震エネルギー吸収のメカニズム

3.1 鋼製ダンパーの諸元

ブレースの設置位置を図2に示す。両端2対の橋脚に同じ諸元のダンパーを設置するものとした。設置位置は図中のH1、H2に固定し、断面を変化させた。

断面は、角パイプ断面を使用する。今回の研究では、断面の増減による破壊形態の変化を解明するため、JISの規定に関わらず、広範囲の断面のデータが必要となる。そこで、今井のブレースが降伏して、橋脚が降伏しなかったケースE、Gの断面を参考に、断面100～3500mm²の範囲の解析を行った。断面の詳細は表2、3に示す。

なお、実際の鋼製ダンパーでは圧縮時にも有効に機能するように何らかの座屈防止策が必要であるが、ここでは簡単に引張、圧縮とも同じ降伏特性であるとした。降伏応力は250N/mm²、降伏後の2次剛性は初期剛性の1/10とした。

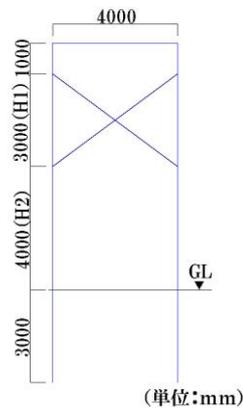


図2 橋軸方向側面

表2 ブレース断面 単位(mm²)

ケース	断面積	ケース	断面積
A	100	G	1213
B	300	H	1500
C	500	I	2000
D	700	J	2500
E	893	K	3000
F	1000	L	3500

表3 ブレース部材断面 単位(mm)

E	B 75×75×3.2
G	B 100×100×3.2

3.2 動的解析結果

ケースA～Lについて動的解析を実施した。橋軸直角方向の地震波だけを考え、タイプI、IIの地震波3波ずつ、計6波の地震動に対する応答を調べた。

タイプIの地震動では、ケースA～Lすべてで橋脚が降伏しなかった。これは、橋脚の応答が小さかったため、ブレースの断面関係なく橋脚本体で地震動に耐えたためである。

タイプIIの地震動に対する解析結果を表4に要約する。表中の○は当該部材が降伏していないことを、×は降伏していることを示す。ダンパーが降伏、橋脚が降伏していない状態とするのが本設計の目的であるから、橋脚が○、ダンパーが×となっているケースE、F、Gが目的を達成した構造である。

表4 動的解析結果の要約

ケース	橋脚	ダンパー
A	×	×
B	×	×
C	×	×
D	×	×
E	○	×
F	○	×
G	○	×
H	×	×
I	×	×
J	×	×
K	×	○
L	×	○

タイプIIの中でも応答の大きかった地震波3の動的解析のダンパー部分の応力-ひずみの関係結果を図3に示す。同様に、タイプII-地震波3の動的解析の変位を図4に示す。図4の結果は、橋脚と主桁の接合部の変位で、特に、非線形と線形で、変位差の大きい5-10秒間を示す。図4の非線形とは、ブレース部材が降伏応力を超えると塑性変形を起こす解析の結果で、線形とは、ブレース部材を降伏させずに、弾性材料のように、直線的な応力-ひずみの関係を示す設定での解析結果である。

ケースA～Dでは、ダンパーが降伏して、橋脚も降伏する結果になった。橋脚の降伏は、主桁と橋脚の接合部、又は、橋脚の地表部分から起きる。

その代表的な例のケースAでは、図3より、ブレースが地震エネルギーを吸収していることを示すリサーチが確認できる。ループも大きくエネルギー吸収していることが分かる。図4より、前半は、微小ながらエネルギー吸収しているが、後半からは、ほとんどエネルギー吸収していない。これは、ブレースの断面が過小なため、エネルギー吸収能力の不足が原因と考えられる。

ケースE～Gでは、ダンパーが降伏して、橋脚は降伏しない結果になった。

その代表的な例のケースEは、今井が、耐震性能2を満たす設計として報告しているものである。図3より、リサーチが確認できる。ループも大きくエネルギー吸収していることが分かる。図4より、非線形が線形の変位の約2割減少していることから、

ブレースがエネルギー吸収することで、応答が小さくなったことが分かる。そして、ケースE~G全てのケースで、線形より非線形の波形に少し遅れが生じることが分かった。これは、良好な断面設計が行えたとき、特有の性質と思われる。適切な断面の判断基準として利用できる可能性がある。ケースE~Gの中では、ケースEのリサージュの面積が大きく、一番エネルギーを吸収している割合が高いため、ダンパーが効率良くエネルギー吸収を行う目的に合った断面であった。

ケースH~Jでは、ダンパーが降伏して、橋脚も降伏する結果になった。橋脚の降伏は、地表部分から起こる。これは、ダンパー断面の増加に伴う、橋梁上部の剛性の増加が関係していると思われる。

その代表的な例のケースJでは、図3より、リサージュが確認できる。しかし、ループが小さいため、ダンパーのエネルギー吸収が少ない。そのため、図4より、前半は、微小ながらエネルギー吸収しているが、後半からは、ほとんどエネルギー吸収していない。これは、ケースAと似ているが原因が異なる。ケースAでは、断面過小によるダンパー自身のエネルギー吸収能力不足で、ケースJは、断面の過大なために起こる、降伏によるエネルギー吸収の減少が原因である。

ケースK、Lでは、ダンパーが降伏せず、橋脚が降伏する結果になった。橋脚の降伏は、ダンパーと橋脚の接合部の下部分から起こる。

その代表的な例のケースLでは、図3より、リサージュが確認できない。ブレースが降伏していないため、地震エネルギーを吸収していない。図4より、ダンパーが地震エネルギーを吸収していないので、変位も変化していない。結果、橋脚本体の降伏を許している。これは、断面過大で、ブレースがエネルギー吸収装置としてのダンパー機能を果たしていないためである。

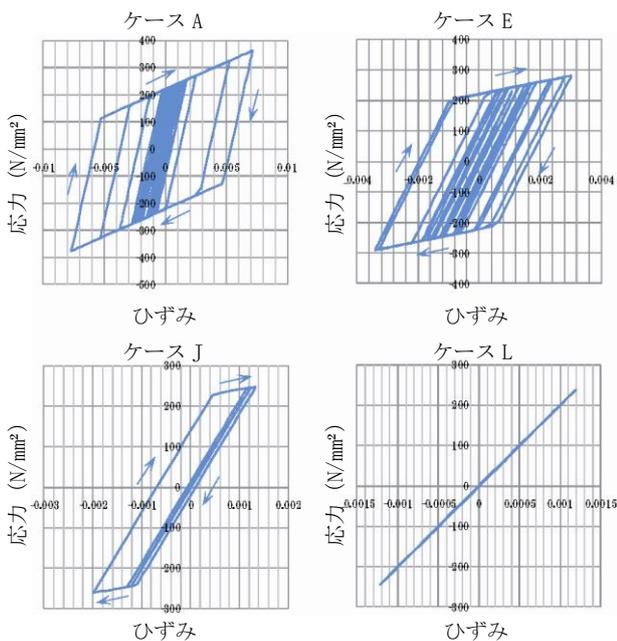


図3 動的解析(応力-ひずみ)の結果

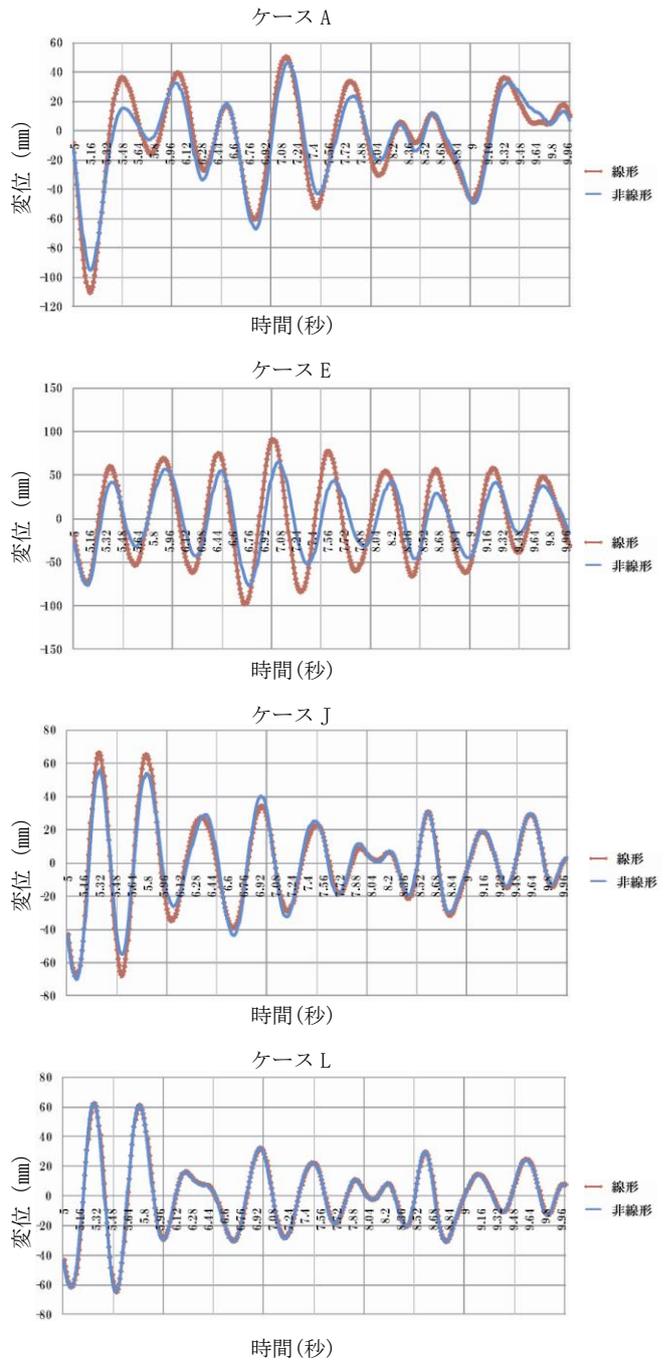


図4 動的解析(変位)の結果

4. 動的解析とプッシュオーバー解析の相関性

プッシュオーバー解析は、モデルの橋軸直角方向に単調増加荷重を載荷する静的解析である。ここでの単調増加荷重とは、各節点の質量に、水平加速度を乗じた水平荷重を示す。ブレースと橋脚の降伏時の加速度を表5に示す。加速度と荷重は比例関係にある。表5には、プッシュオーバー解析における4か所のブレースと橋脚の一次降伏時の荷重の比(橋脚降伏荷重/ブレース降伏荷重)も合わせて示した。

ブレースが降伏することで、地震エネルギーを吸収して、橋脚が降伏しないケースE、F、Gのブレースの荷重と橋脚の荷重の降伏荷重比を算出する。今

回の設計条件では、橋脚とブレースの降伏荷重比は約 1.8~2.1 である。つまり、橋脚の一次降伏時の荷重がブレースの一次降伏時の約 1.8~2.1 倍の時に良い設計が行える。

しかし、この値自体は、設計条件によって変化するため、あまり重要ではない。ここで重要なのは、静的解析であるプッシュオーバー解析から得られた降伏荷重比と、ダンパーの制震性能に高い相関が認められたことである。これは、限定された設計条件の下であれば、動的解析によらずにプッシュオーバー解析でブレースの最適断面を求められる可能性を示しているように思われる。

表 5 降伏時の水平加速度 単位(G)

ケース	ブレース	橋脚	降伏荷重比
A	0.043	0.130	3.02
B	0.055~0.056	0.150	2.67~2.72
C	0.067~0.068	0.160	2.34~2.38
D	0.080~0.081	0.174	2.16~2.19
E	0.092~0.093	0.190	2.04~2.07
F	0.098~0.099	0.198	2.00~2.02
G	0.111~0.113	0.204	1.80~1.84
H	0.130~0.131	0.212	1.63~1.64
I	0.160~0.162	0.226	1.40~1.41
J	0.191~0.195	0.240	1.23~1.26
K	0.221~0.227	0.252	1.11~1.14
L	0.253~0.256	0.252	0.98~1.00

5. ダンパーの座屈荷重の照査

3・4 での検討でダンパーが降伏して橋脚が降伏しないケース E、F、G の角パイプ断面の座屈を照査する。

座屈荷重 P_{cr} は次式で計算する。

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

P_{cr} = 座屈荷重 π = 円周率

$E = 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ (引張弾性係数)

I = 断面 2 次モーメント

$L = 2500 \text{ mm}$ (ブレース長)

細長比の定義において L を実部材長とせず境界条件を考慮した有効座屈長(換算座屈長)を用いて座屈荷重を求めることにする。

$$L_k = k \cdot L$$

L_k = 有効座屈長(換算座屈長)

k については、ブレースとブレースの接合部は固定とし、橋脚との接合部はヒンジと考え、条件に当てはまる理論値を使用した。

$$k = 0.7$$

$$L_k = 0.7 \times 2500 = 1750 \text{ mm}$$

表 6 にケース E の部材断面を示す。

表 6 ケース E の断面部材 単位(mm)

H	75	tw	3.2
B	75	tf	3.2

上表の結果から座屈荷重を計算した。

$$I = 7.91 \times 10^5 \text{ mm}^4$$

$$P_{cr} = (\pi^2 \times E \times 7.91 \times 10^5) / (1750) = 5.10 \times 10^5 \text{ N}$$

$$\sigma_{cr} = 571 \text{ N/mm}^2$$

ケース F、G も同様に座屈応力を求めた。

表 7 ケース F の断面部材 単位(mm)

H	80	tw	3.26
B	80	tf	3.26

$$I = 9.83 \times 10^5 \text{ mm}^4$$

$$P_{cr} = (\pi^2 \times E \times 9.83 \times 10^5) / (1750) = 9.83 \times 10^5 \text{ N}$$

$$\sigma_{cr} = 634 \text{ N/mm}^2$$

表 8 ケース G の断面部材 単位(mm)

H	100	tw	3.2
B	100	tf	3.2

$$I = 1.25 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$P_{cr} = (\pi^2 \times E \times 1.25 \times 10^6) / (1750) = 1.25 \times 10^6 \text{ N}$$

$$\sigma_{cr} = 1040 \text{ N/mm}^2$$

ケース E、F、G の座屈応力の計算結果をまとめて表 9 に示す。降伏応力は、3.1 で示した 250 N/mm^2 とする。表 9 から明らかのように、座屈応力は 3 ケースとも降伏応力以上となっており、耐荷力は降伏応力で決まる。このことから、今回の条件下では、圧縮時にもダンパーが有効に機能することが分かった。

表 9 座屈応力 単位(N/mm²)

ケース E	ケース F	ケース G
571	634	1040

6. 結論

ある条件では、鋼製ダンパーが地震エネルギーを吸収する機能を発揮できる。

ダンパーの断面には最適値があり、断面が過小の場合は、ダンパーはエネルギー吸収するが、エネルギー吸収不足となり、断面が過大な場合は、ダンパーはエネルギー吸収不足、又は、降伏しないためダンパーとして機能しない。

適切な設計をすれば、圧縮時にもダンパーが有効に機能することができる。

参考文献

今井恵介「鋼製ダンパーを設けた簡易橋の耐震性能」、土木学会四国支部第 15 回技術研究発表会講演概要集、平成 21 年 5 月