

局部座屈によるエネルギーを吸収する構造形式の基礎的研究

石川 龍星¹ 岩坪 要^{2,*} 藤井 恵悟³

Fundamental research on structural design forms that absorb energy due to local buckling

Ryusei Ishikawa¹, Kaname Iwatsubo^{2,*}, Keigo Fujii³

The 2016 Kumamoto earthquake caused extensive damage to road bridges in mountainous areas, it needs to be restored quickly and temporarily, and it is necessary to take measures to prevent the main structure from sustaining serious damage. In this study, it proposes a structure that absorbs energy when the abutment moved and pushed the main girder. It is set at the tip end of main girder. In this paper, the method is to avoid damage to the main structure by causing partial damage at girder ends. The method was to reduce the stiffness in a certain location to cause local buckling, and a nonlinear analysis was performed using the stiffness reduction as a parameter. The results of an analysis to confirm the effectiveness of the method are shown.

キーワード：局部座屈，エネルギー吸収，2016年熊本地震，損傷制御

Keywords：local buckling, energy absorption, 2016 Kumamoto earthquake, damage control system

1. はじめに

2016年熊本地震では、断層ずれや斜面崩壊、河川堤防の損傷、住宅地での液状化現象の発生などの被害が発生していた⁽¹⁾。巨大地震が発生すると、橋梁上部構造の損傷以外でも構造物周囲の地盤の変状のために、下部構造が損傷することもある。県道28号線の橋梁群は大きな損傷を受けたが、ここの橋梁群は典型的な山岳橋梁で、ほとんどが谷を渡すように架橋されているため橋台が谷側に移動する傾向が見られ、遊間の消滅と主桁端部と橋台との接触（衝突）も確認された⁽²⁾。俵山大橋では、支承間の主桁下フランジに図1に示すような局部座屈が発生していた。局部座屈が発生した原因としては圧縮力が作用したことに他ならず、主桁に逆曲げの変形が生じたことが分かる。さらに、その

逆曲げ変形の原因は、両橋台の移動による圧縮力であると考えられる。主構造である主桁の損傷は橋梁の耐荷力に与える影響が大きいため図1に示す損傷は避けるべきである。そこで、このように主構造を守る観点で、外力作用によるエネルギーを何らかの形で吸収する部位や部材があると主構造へ伝わる部材力を軽減でき、損傷を軽減することが可能になる。これまでも橋台のパラペット部を主桁の衝突から守るクッション材の開発⁽³⁾や、下部構造と上部構造に過大な相対変位が発生した時、支承部の一部を破壊して拘束を解くロックオフ構造などが提案されている^{(4),(5)}。そこで本研究では、これらに変わる新たな方法として、主桁端部に局部座屈を発生させることで橋台が移動して主桁に作用する圧縮エネルギーを吸収し、主桁を守る構造システムの開発に取り組んでいる。本稿では、この部位の設計に関する数値解析によるアプローチの結果を示す。

¹ 専攻科 生産システム工学専攻 学生
〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627
Student,
2627 Hirayama-Shinmachi, Yatsushiro-shi, Kumamoto, Japan 866-8501

² 生産システム工学系 AP グループ
〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627
Faculty of Products System Engineering (AP Groupe),
2627 Hirayama-Shinmachi, Yatsushiro-shi, Kumamoto, Japan 866-8501

³ エム・エムブリッジ株式会社
〒733-0036 広島県広島市西区観音新町一丁目20番24号
20-24, Kannonshinmachi 1-chome, Nishi-ku, Hiroshima-shi,
Hiroshima, Japan 733-0036

* Corresponding author:
E-mail address: iwatsubo@kumamoto-nct.ac.jp (K. Iwatsubo).



図1 俵山大橋の座屈被害

2. エネルギー吸収部材

俵山大橋の損傷状態から桁橋の橋台からの圧縮力に対応するための構造として図2の構造形式を考案した。一般的な桁橋の端部は、支承部のソールプレートから僅かに延長した形式をとられており、桁端部と橋台パラペットの間には遊間を設けることになっている。しかしながら、道路橋示方書では、桁端部の延長部の長さの規定はない⁽⁶⁾。そこで、図2に示すように主桁の桁端部の長めの延長部を設ける。主桁の縦補剛材の最大間隔の主桁高さの1.5倍となっているため、延長部の長さの最大値とし、この部分で外力エネルギーを吸収させる構造とする。橋台の移動が発生すると、主桁と橋台はゴム支承で連結されているため、ゴム支承の変形によって主桁の移動量と橋台の移動量は1対1ではない。変位量が、橋台の主桁側へ遊間が消滅するほど発生すると、橋台パラペットが主桁に接触し、主桁に圧縮力が作用することになる。橋台の変位量は地盤の変位に伴うため、その変位量を制御することは難しいため、圧縮変位が増大することがあり得る。この時に延長した桁端の部分で局部座屈を発生させ、圧縮力を与える変位を低減させ、主桁の支承部に作用する力を軽減させることで図1のような損傷を回避するシステムである。

このシステムを採用するには、特定の場所で局部座屈が発生するように延長部の剛性を調整する必要があり、さらに局部座屈の変形に伴う主桁に変形が出ないようにしなければならない。このシステムが実現可能かを検討するために、主桁のウェブ部を取り出した4辺単純支持でアスペクト比が1となる圧縮板を設定し、板の寸法と部分的な剛性低下の割合をパラメータにしてパラメトリック解析を行い、その実現性について検討を行う。また、エネルギーが吸収されていることを調べるための評価指標を設定する。

このシステムは、自動車における衝撃吸収ボディと考え方が同じである。支承部は複数の縦補剛材を設置することが一般的であるために、支承部の剛性は非常に高い。従って、壊すべき部位を設定し、上手に局部座屈を発生させることが出来ると、エネルギー吸収の構造システムとして展開できる。

また、桁端部の延長部は橋梁の維持管理面でも有効である。橋梁点検で支承部周辺の腐食損傷の確認は重要事項であるが、支承部の腐食損傷が激しい原因は当該部位が狭小であるためであり、砂の堆積や風通りが悪いために湿気が溜まりやすいことが原因とされている。本形式ではこの狭隘が解消されることが期待できるため点検効率も上げることが出来、腐食損傷が減少することが期待できる。

3. 数値解析

3.1 解析手法

本システムの有効性を検討するために、数値解析を行った。解析にはMSC software社製のMSC.Marc2016を用い、幾何学的非線形と材料的非線形を考慮した有限変位弾塑性

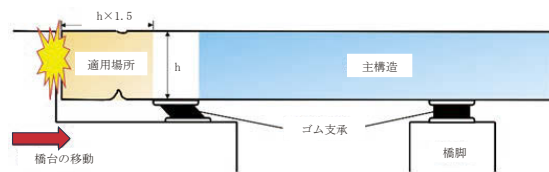


図2 損傷制御構造 概要図

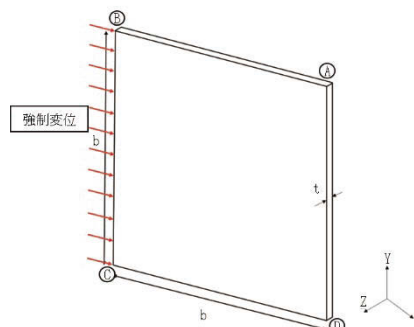


図3 構造形式検討モデル

表1 解析モデルの寸法と強制変位

R	0.5	1	1.5
b (mm)	280	560	840
u_y (mm)	0.321	0.642	0.963
$5u_y$ (mm)	1.605	3.210	4.815

表2 解析モデルの諸元

厚さ	$t = 10\text{mm}$
ヤング率	$E = 205\text{kN/mm}^2$
ポアソン比	$\nu = 0.3$
降伏応力	SM400 $\sigma_y = 235\text{N/mm}^2$
座屈係数	$k = 4.0$ (4辺単純支持)

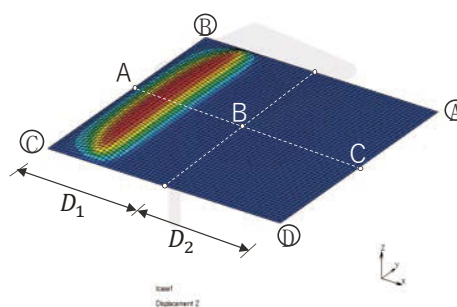


図4 目標とする変形状態

を行う。作用させる外力として、圧縮変位を漸増荷重させる変位制御法を用い、耐荷挙動の他、変形モードをしらべることとする。

3.2 解析モデル

解析モデルは図3に示す4辺単純支持板とする。初期不整は一般的なシングルプレートの解析で用いる、道路橋示

方書に示す $b/150$ を最大とする sin 波形を初期たわみとして導入した。荷重は強制変位を漸増させる変位制御法とし、降伏変位を基本変位 u_y とし、その5倍まで載荷することにする。一般的な解析では、初期たわみ形状に合わせて座屈変形が発生するが、本検討では図4に示す部分で局部座屈を発生させる。目標とする損傷制御の方法を実現するために、任意の場所で構造の剛性低下を行なうこととする。1つ目は鋼板に複数の孔を設けて断面幅方向に並べることで部分的な断面積を減少させる方法とし、2つ目は部分的に板厚を減少させる方法とした。解析モデルと材料諸元を表1と表2に示す。シングルプレートの寸法 b は、幅厚比パラメータ R と厚さ t を決定して次式から導いた。

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (k = 4.0) \quad (1)$$

$$u_y = b \cdot \frac{\sigma_y}{E} \quad (2)$$

3.3 評価基準

図4に示すように、部分的な局部座屈が発生し、作用変位を吸収し主構造にも影響を与えていないことを確認するために、目標とする変形状態を設定した。図4に目標とする変形状態を示すが、この変形状態については、次の条件を満足することとした。

- ① 荷重辺に近い箇所でも局部座屈が発生していること。
- ② 荷重辺と反対側の辺（主構造に伝える辺）に向かって、 D_2 の範囲での面外変位が0に近いこと。
- ③ D_2 の圧縮変位量に対して、 D_1 の圧縮変位量が大きいくこと。

上記の③について、以下に示す縮み量の割合(%)を算出することにした。強制変位の最大値である降伏変位の5倍まで載荷した時の x 方向の変位を用いて算出する。図4において、解析モデルの中央ラインに沿って、荷重辺上の中点を点A、板の中央を点B、荷重辺と反対側の返上の点を点Cとする。強制変位 $5u_y$ を載荷した時の x 方向の各点の座標値を調べ、それぞれの点の x 座標を x_A 、 x_B 、 x_C とする。点Aと点Bの距離を D_1 、点Bと点Cの距離を D_2 とすると、荷重後の最終的な板幅($D_1 + D_2$)に対し、 D_1 の占める割合を計算し、縮み量の割合を b' として、(5)式を計算する。

$$D_1 = x_B - x_A \quad (3)$$

$$D_2 = x_C - x_B \quad (4)$$

$$b' = \frac{D_1}{D_1 + D_2} \times 100 \quad (5)$$

(5)式において、 D_2 よりも D_1 が小さければ b' が小さくなり、 D_1 の部分で変位を吸収していることになる。

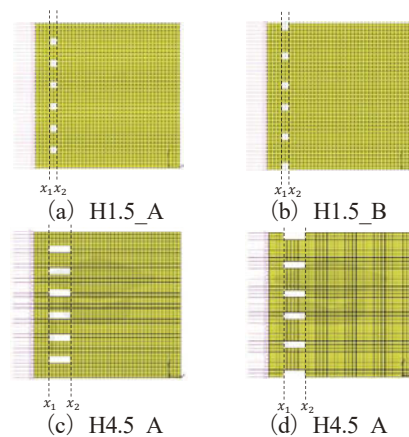


図5 孔を設ける構造モデル

表3 Hシリーズ

モデル名	R	表面積減少率(%)	x_1 (mm)	x_2 (mm)
R0.5_H1.5_A	0.5	1.5	28	42
R0.5_H3.0_A	0.5	3	28	56
R0.5_H4.5_A	0.5	4.5	28	70
R0.5_H6.0_A	0.5	6	28	84
R1.0_H1.5_A	1	1.5	56	84
R1.0_H3.0_A	1	3	56	112
R1.0_H4.5_A	1	4.5	56	140
R1.0_H6.0_A	1	6	56	168
R1.5_H1.5_A	1.5	1.5	84	126
R1.5_H3.0_A	1.5	3	84	168
R1.5_H4.5_A	1.5	4.5	84	210
R1.5_H6.0_A	1.5	6	84	252
R0.5_H1.5_B	0.5	1.5	28	42
R0.5_H3.0_B	0.5	3	28	56
R0.5_H4.5_B	0.5	4.5	28	70
R0.5_H6.0_B	0.5	6	28	84
R1.0_H1.5_B	1	1.5	56	84
R1.0_H3.0_B	1	3	56	112
R1.0_H4.5_B	1	4.5	56	140
R1.0_H6.0_B	1	6	56	168
R1.5_H1.5_B	1.5	1.5	84	126
R1.5_H3.0_B	1.5	3	84	168
R1.5_H4.5_B	1.5	4.5	84	210
R1.5_H6.0_B	1.5	6	84	252

4. 解析結果

4.1 孔を設けるモデル

座屈変形は、断面剛性の影響があると考えたためプレートに孔を設けて損傷制御が可能か確認した。孔の大きさは、シングルプレートの表面積に対して0.25%とした。表示以外に予備検討の解析結果から穴6個未満は効果が小さかったため、6個以上の孔を設けた。

(1) 孔の配置設定

座屈を発生させたい場所の剛性を低下させるために孔を縦方向に並べるように配置した。このモデルをHシリーズとする。図5に示すように、孔を設けるモデルとして8種類のモデルを作成した。板の端部の孔の設定が耐荷挙動や変形に影響を与えると考えられたため、端部に孔を設けるモデルと設けないモデルで分けた。端部に孔を設けるモデルをAシリーズ、設けないモデルをBシリーズとした。さらに、それぞれのモデル中の孔の面積を載荷軸方向に広げるように孔の大きさを広げることで、局部座屈の変形状態への影響を調べることにした。解析モデルの一覧を表3に示す。

(2) 変形状態と耐荷力挙動

各モデルの面外方向(z軸方向)の変形モードと、耐荷力曲線を図6と図7に示す。図6より、孔の部分で局部座屈が発生していることが確認できるが、孔の縦方向の位置が変化しても面外変位量には大きな差がなかった。孔の面積が増えると最大たわみ量の位置が右側(板中央部方向)に移動しているのが分かる。図7に荷重変位曲線を示すが、端部に孔を設けたモデルの方が耐荷力の値が僅かに小さくなっている。特に、幅厚比パラメータRの値が大きくと、孔の面積を増やしたときにその特長がでている。

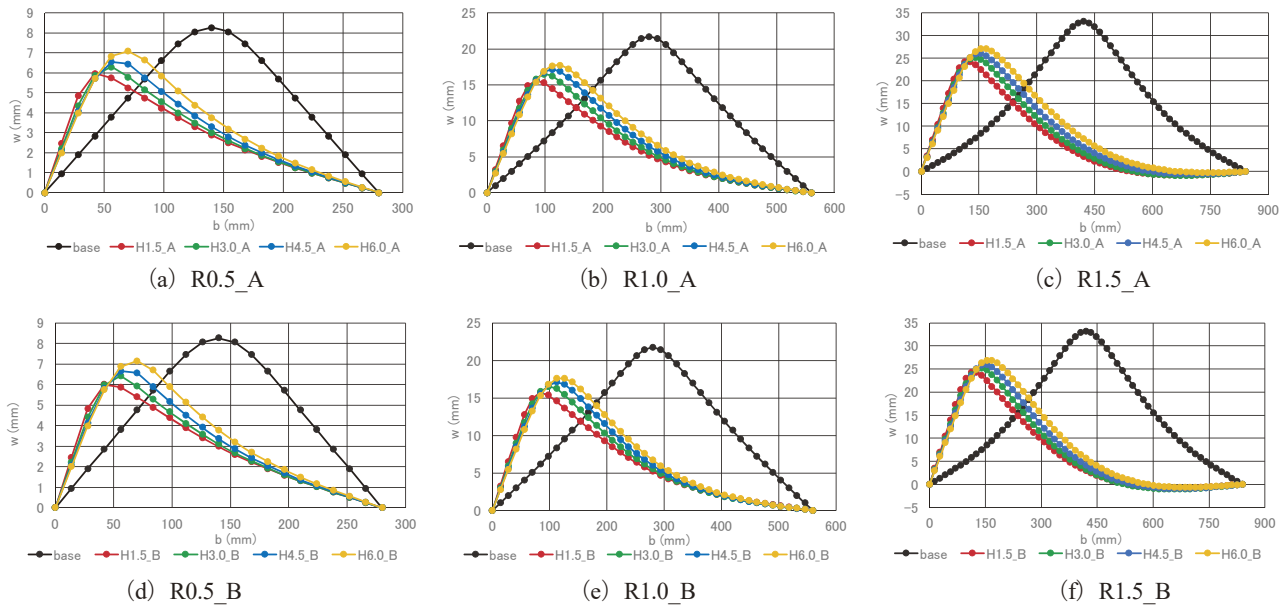


図6 変形モード図(z軸方向)

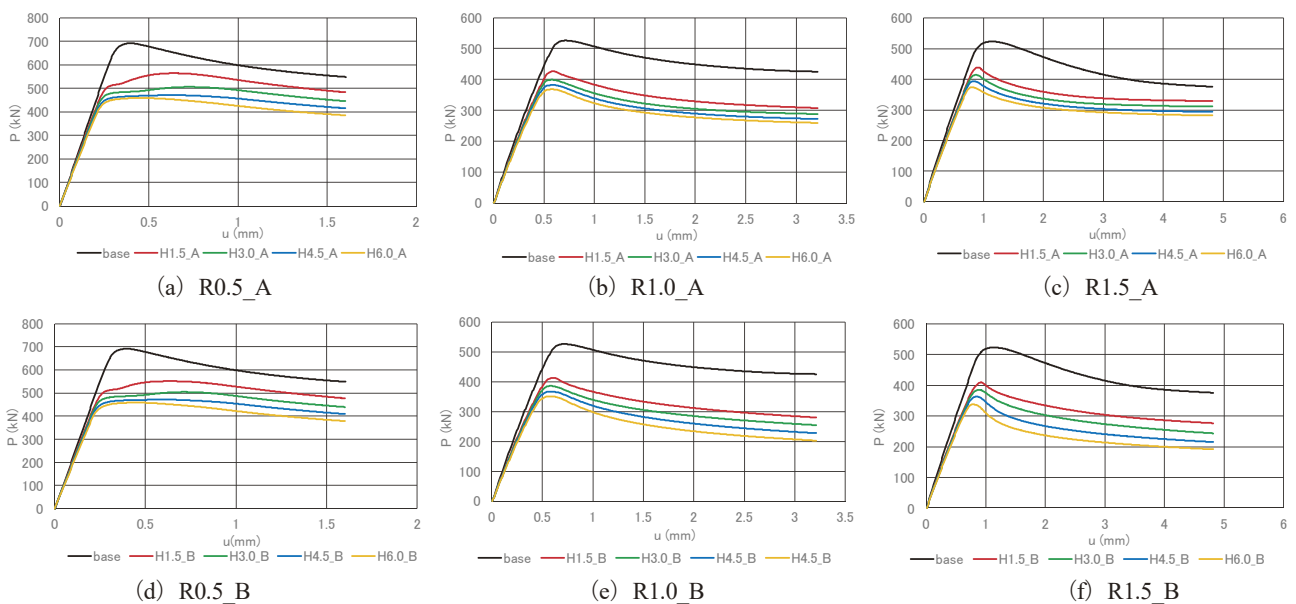


図7 荷重-変位曲線

4.2 板厚を薄くするモデル

任意の場所の板厚を薄くして剛性低下が可能かを検討するため、図8に示す青い部分の板厚を5mmとしたモデルをTシリーズとする。検討したモデルを図8に示すが、適用範囲は板の表面積に対して10%から50%の5パターンとし、表4に適用範囲を示す。

解析結果として、図9に変形モード図を、図10に荷重-変位曲線を示す。板厚を減少させたモデルでは、孔を設けるモデルに比べて耐荷力の低下が大きくなった。さらに、図9から変形モードを調べると、 R によって変形状態に違いが表れることが分かった。

$R = 0.5$ のモデルでは、全てのモデルが損傷制御構造の効果を発揮していた。特に40%~50%に適用した時の変形モード図は理想的な変形モードに近い形状となっており、適用範囲外の変形が大きく減少している。図10より、耐荷力は10%~50%まで大きな変化はなかった。以上より、 $R = 0.5$ では40%~50%が最も適した範囲であるといえる。

$R = 1.0$ では、変形状態をみると30%が適用範囲外の変形が非常に小さくなった。40%と50%では、適用範囲外でマイナス側に変形が発生していることから、波打つような座屈モードになっていることが分かる。以上より、 $R = 1.0$ では30%が最も適した範囲であるといえる。

$R = 1.5$ では、 $R = 1.0$ で確認された、波打つような変形モードがより顕著に表れており、20%の適用範囲外の変形量が非常に小さくなった。耐荷力については $R = 0.5$ と $R = 1.0$ のケースと同様、大きな変化が表れていないことから、 $R = 1.5$ は20%が最も適した範囲であるといえる。

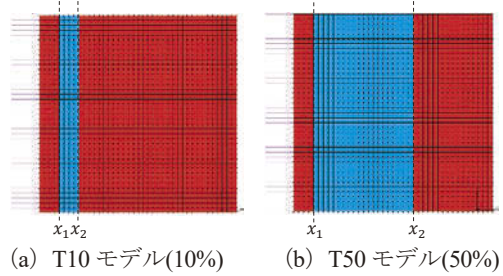


図8 構造形式検討モデル

表4 Tシリーズ

モデル名	R	適用割合 (%)	x_1 (mm)	x_2 (mm)
R0.5_T10	0.5	10	28	56
R0.5_T20	0.5	20	28	84
R0.5_T30	0.5	30	28	112
R0.5_T40	0.5	40	28	140
R0.5_T50	0.5	50	28	168
R1.0_T10	1.0	10	56	112
R1.0_T20	1.0	20	56	168
R1.0_T30	1.0	30	56	224
R1.0_T40	1.0	40	56	280
R1.0_T50	1.0	50	56	336
R1.5_T10	1.5	10	84	168
R1.5_T20	1.5	20	84	252
R1.5_T30	1.5	30	84	336
R1.5_T40	1.5	40	84	420
R1.5_T50	1.5	50	84	504

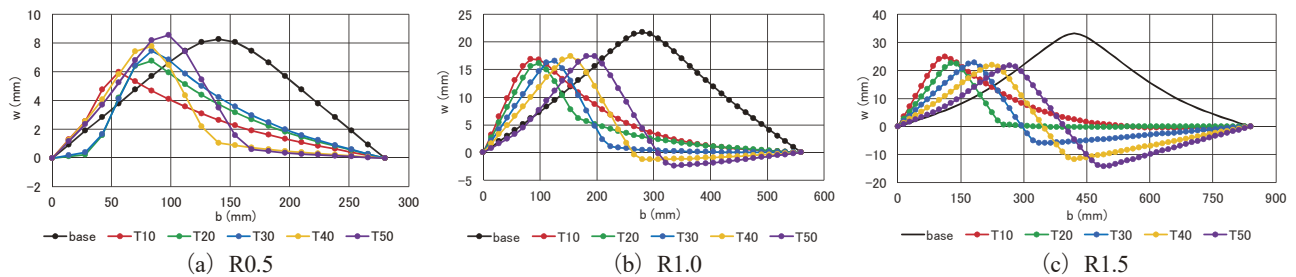


図9 変形モード図

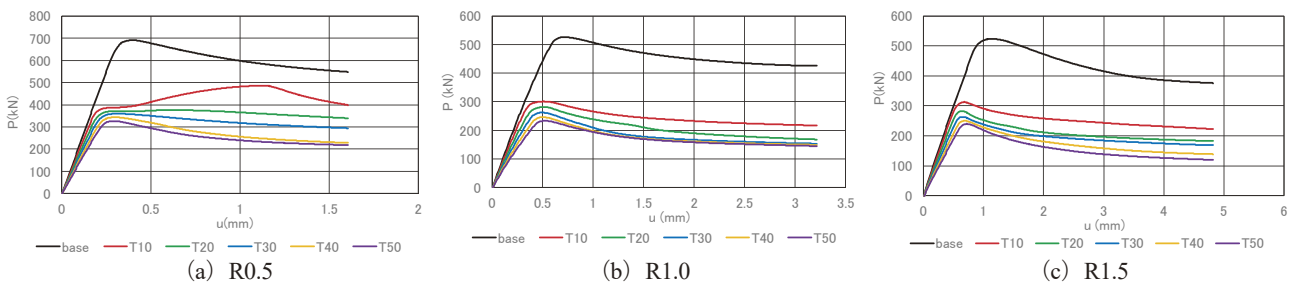


図10 荷重-変位曲線

表5 hシリーズ

モデル名	P_{max} (kN)	最大たわみ量 w (mm)	x_a (mm)	x_b (mm)	x_c (mm)	D_1 (mm)	D_2 (mm)	$D_1 + D_2$	縮み量の割合 b' (%)
R0.5_H1.5_A	564.224	5.974	1.605	140.195	280.0	138.590	139.805	278.395	49.782
R0.5_H3.0_A	505.926	6.304	1.605	140.189	280.0	138.584	139.811	278.395	49.780
R0.5_H4.5_A	471.556	6.548	1.605	140.194	280.0	138.589	139.806	278.395	49.781
R0.5_H6.0_A	459.000	7.092	1.605	140.210	280.0	138.605	139.790	278.395	49.787
R1.0_H1.5_A	426.201	15.639	3.210	280.272	560.0	277.062	279.728	556.790	49.761
R1.0_H3.0_A	398.648	16.500	3.210	280.281	560.0	277.071	279.719	556.790	49.762
R1.0_H4.5_A	381.634	17.161	3.210	280.303	560.0	277.093	279.697	556.790	49.766
R1.0_H6.0_A	367.813	17.748	3.210	280.333	560.0	277.123	279.667	556.790	49.772
R1.5_H1.5_A	438.991	24.290	4.815	420.245	840.0	415.430	419.755	835.185	49.741
R1.5_H3.0_A	414.204	25.191	4.815	420.257	840.0	415.442	419.743	835.185	49.743
R1.5_H4.5_A	393.514	26.047	4.815	420.284	840.0	415.469	419.716	835.185	49.746
R1.5_H6.0_A	374.081	27.169	4.815	420.329	840.0	415.514	419.671	835.185	49.751
R0.5_H1.5_B	551.121	6.001	1.605	140.198	280.0	138.593	139.802	278.395	49.783
R0.5_H3.0_B	504.412	6.414	1.605	140.195	280.0	138.590	139.805	278.395	49.782
R0.5_H4.5_B	472.095	6.653	1.605	140.201	280.0	138.596	139.799	278.395	49.784
R0.5_H6.0_B	458.466	7.144	1.605	140.217	280.0	138.612	139.783	278.395	49.790
R1.0_H1.5_B	413.210	15.708	3.210	280.266	560.0	277.056	279.734	556.790	49.759
R1.0_H3.0_B	385.628	16.529	3.210	280.272	560.0	277.062	279.728	556.790	49.761
R1.0_H4.5_B	366.782	17.124	3.210	280.288	560.0	277.078	279.712	556.790	49.763
R1.0_H6.0_B	351.132	17.626	3.210	280.311	560.0	277.101	279.689	556.790	49.768
R1.5_H1.5_B	409.707	24.302	4.815	420.218	840.0	415.403	419.782	835.185	49.738
R1.5_H3.0_B	386.092	25.107	4.815	420.220	840.0	415.405	419.780	835.185	49.738
R1.5_H4.5_B	363.397	25.857	4.815	420.238	840.0	415.423	419.762	835.185	49.740
R1.5_H6.0_B	338.035	26.878	4.815	420.275	840.0	415.460	419.725	835.185	49.745

表6 Tシリーズ

モデル名	P_{max} (kN)	最大たわみ量 w (mm)	x_a (mm)	x_b (mm)	x_c (mm)	D_1 (mm)	D_2 (mm)	$D_1 + D_2$	縮み量の割合 b' (%)
R0.5_T10	486.201	5.987	1.605	140.156	280.0	138.551	139.844	278.395	49.768
R0.5_T20	376.437	6.776	1.605	140.196	280.0	138.591	139.804	278.395	49.782
R0.5_T30	359.959	7.465	1.605	140.217	280.0	138.612	139.783	278.395	49.790
R0.5_T40	343.559	7.791	1.605	140.064	280.0	138.459	139.936	278.395	49.735
R0.5_T50	326.215	8.556	1.605	140.377	280.0	138.772	139.623	278.395	49.847
R1.0_T10	300.873	16.861	3.210	280.195	560.0	276.985	279.805	556.790	49.747
R1.0_T20	281.213	16.118	3.210	280.118	560.0	276.908	279.882	556.790	49.733
R1.0_T30	261.748	16.596	3.210	280.060	560.0	276.850	279.940	556.790	49.722
R1.0_T40	245.732	17.372	3.210	280.031	560.0	276.821	279.969	556.790	49.717
R1.0_T50	233.279	17.470	3.210	280.659	560.0	277.449	279.341	556.790	49.830
R1.5_T10	312.827	24.777	4.815	420.150	840.0	415.335	419.850	835.185	49.730
R1.5_T20	282.337	22.632	4.815	420.058	840.0	415.243	419.942	835.185	49.719
R1.5_T30	263.313	22.763	4.815	420.011	840.0	415.196	419.989	835.185	49.713
R1.5_T40	250.085	21.977	4.815	420.043	840.0	415.228	419.957	835.185	49.717
R1.5_T50	239.711	21.706	4.815	420.955	840.0	416.140	419.045	835.185	49.826

4.3 エネルギー吸収の効果の検討

以上の解析結果から、最大耐荷力 P_{max} 、最大たわみ量 w 、縮み量の評価のために使用した(5)式で求めた b' を表5と表6に示し、得られた知見を以下にまとめる。

- ① 縮み量では、全てのモデルで大きな差はみられず、縮み量の割合も全て 50%を下回っていることからエネルギー吸収ができたといえる。
- ② 孔を設けるモデルは、R1.5_A シリーズの変形が目標とする変形状態に近い結果が得られたと判断した。孔を設けて剛性低下を狙ったものの、孔の位置での変形は大きくなっていったが、載荷辺の反対側(主桁との接続辺)でのたわみ角が生じていた。
- ③ 板厚を薄くするモデルでは、R0.5 モデルでの T40 (40%)、T50 (50%) のケース、R1.0 モデルでの T20 (20%)、T30 (30%) のケース、R1.5 モデルでは T10 (10%)、T20 (20%) のケースが理想的だと判断した。板厚を薄くする範囲を大きくすると、最大たわみの位置がずれるという傾向があり、複数の座屈波形が表れるモデルもあった。当初は、変形状態は板厚を薄くする範囲でのみ大きく座屈波形が発生する(1波のみ)と想定していたが、このように複数の波形が発生することから、主桁との接続する辺のたわみ角を注視することで、主桁への影響を制御する可能性を得ることが出来た。
- ④ 最大耐荷力 P_{max} は、板厚を薄くするモデルの方が小さくなった。板厚が板本体の耐荷力に与える影響が大きかった。
- ⑤ 幅厚比パラメータ R ごとに見てもどのモデルにもほとんど差がなかった。

5. まとめ

本研究は、構造設計において危機耐性の要素を組み入れた提案を行ったものであり、今後の検討の道標となる結果を得ることができた。本研究で得られた知見を以下に列記する。

- (1)部分的な剛性を低下させる方法として、孔により断面積を減少させる方法と板厚を部分的に減少させる方法を提案した。
- (2)本システムの効果が表れる変形状態の提案を行った。
- (3)剛性を低下させるために、孔の配置位置や、孔の大きさに着目したが、いずれの結果も目標とする変形状況は得られなかった。
- (4)板厚を薄くしたモデルでは、目標とする変形状態に近い結果が得られた。解析結果としては、幅厚比パラメータ R によって最適な適用範囲が異なることが分かった。
- (5)圧縮力の作用に伴い板全体が変形をする中で、部分的に

変形が大きく出ていること(エネルギーが吸収されていること)を確認するための式の提案を行った。

今後の研究では、フランジの影響(I型断面の場合)や、他の母材板厚の場合など、モデルとパラメータを拡大させて解析結果を収集し、今回の提案の深化を目指す予定としている。さらに、実構造での主桁端部への設置を検討するために、通常使用時の荷重状態での検討も行う予定としている。必要に応じて、座屈実験を行う予定としている。

(令和5年9月14日受付)

(令和5年10月30日受理)

参考文献

- (1)九州橋梁・構造工学研究会(KABSE):「2016年熊本地震被害調査・分析報告書」, pp.108-136 (2019).
- (2)宮本尚卓, 増尾明彦, 橋爪隆介:「熊本地震により被災した俵山大橋の復旧について」, 2019年度九州国土交通研究会論文集(2019).
- (3)山下勝久:「落橋防止装置用の緩衝材 ペルダンパー®」, 成形加工, 13巻, 2号, p.117 (2001).
- (4)本荘清司, 横山和昭, 前原直樹, 田崎賢治, 姫野岳彦:「ノ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).
- (5)中西泰之, 松村政秀, 山口隆司:「ノックオフ部材とすべり支承からなる支承形式の高架橋への適用性」, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.72, No.2, pp.322-331 (2016).
- (6)日本道路協会:「道路橋示方書・同解説」(2017).
- (7)日本道路ジョイント協会:「伸縮装置の設計ガイドライン」(2019).
- (8)野阪克義, 堀田萌:「鋼I形桁の連成座屈を考慮した曲げ耐荷力に関する解析的検討」, 鋼構造論文集, 第21巻, 第84号, pp.79-94 (2014).
- (9)三井造船株式会社:「俵山大橋上部工竣工図書」(2001).