

矩形断面を有する鋼輪型拘束材（SRR）の 開発に関する研究

浅野 拳斗¹・孫 巨博²・葛 漢彬³・劉 嚴⁴・王 占飛⁵

¹学生会員 名城大学大学院 理工学研究科社会基盤デザイン工学専攻
(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501) E-mail: 213433001@ccmailg.meijo-u.ac.jp

²名城大学大学院 理工学研究科社会環境デザイン工学専攻
(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501) E-mail: 193443503@ccmailg.meijo-u.ac.jp

³フェロー 名城大学教授 理工学部社会基盤デザイン工学科
(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501) E-mail: gehanbin@meijo-u.ac.jp

⁴正会員 名城大学特任助手 理工学部社会基盤デザイン工学科
(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501) E-mail: liuyan@meijo-u.ac.jp

⁵中国瀋陽建築大学教授 交通工程学院 元名城大学外国人研究員
(〒110168 瀋陽市渾南区渾南東路9号) E-mail: zfwang@sjzu.edu.cn

考案した矩形断面の鋼輪型拘束材（SRR）は、落橋防止装置としての新たなダンパーである。本論文では、SRRの力学的挙動に及ぼす鋼輪の各種寸法と鋼種の影響を評価するために、実験と有限要素解析を通してパラメトリックな研究を行い、SRRの荷重－変位曲線の予測式を提案した。その結果、鋼輪の各種寸法と鋼種がSRRの挙動に影響を与え、特に、断面積と鋼種は最大耐力と荷重－変位曲線の剛性に、曲線部の半径はSRRの延性に最も影響することがわかった。そして、得られた予測式はSRRの荷重－変位曲線を精度良く予測できる結果となった。

Key Words : Steel ring restrainer (SRR), Unseating damage, Section type, Monotonic test, Finit element analysis, Parametric study

1. 緒言

橋梁は、社会的・経済的に重要な役割を果たしているにもかかわらず、大きな地震の影響を受けやすい。そのため、地震対策用の耐震装置が開発され、一般的に、免震装置と制震装置（エネルギー吸収部材など）に分類される。

免震装置と制震装置は、地震応答の低減に貢献しているが、過去の大きな地震では、橋梁の落下が多く発生している¹⁾。制震ダンパーが付いている橋の場合、制震ダンパーは金属製のものが多く、大きな地震で早期に破損する可能性がある。免震構造の橋の場合、免震支承の剛性が低いため、上部構造と下部構造の間に大きな変位が生じる可能性があり、落橋してしまうことがある。そのため、橋梁の落下を防止するための拘束材として、拘束用ケーブル²⁾⁶⁾やストッパー⁶⁾⁷⁾が使用される。制震ダンパー自体の剛性が大きいと、制震ダンパーと拘束材を同時に使用すると、より大きな剛性が得られ、構造物の

固有振動周期の長周期化に対する免震支承の効果が弱くなる。したがって、落橋防止用の拘束材による耐震補強の基本的な考え方は、最初のうちは拘束材が機能しない、あるいは比較的小さな剛性しか与えないことで制震ダンパーや免震支承が効果的に働くようにすることである。制震ダンパーや免震支承が破損した場合、拘束材が橋から外れないように設計することが必要不可欠となる⁸⁾⁹⁾。

落橋防止用の拘束材の中でもケーブルやストッパーは、動作時に大きな剛性が得られ、変位を制御することとなる。そのため、拘束材の非動作時の長さを非常に長くしなければならない場合がある。また、非動作時から動作時へ急激に剛性が変化すると、拘束材の連結部の安全性を損なうという問題がある。これらの問題を解決するために、著者らは、鋼輪型拘束材（Steel Ring Restrainer、以降 SRR と呼称¹⁰⁾）と呼ばれる新しい落橋防止装置を考案した。

SRR は、上部構造と下部構造の間に設置される。これは、様々な種類の橋に適用することができ、特に単純支

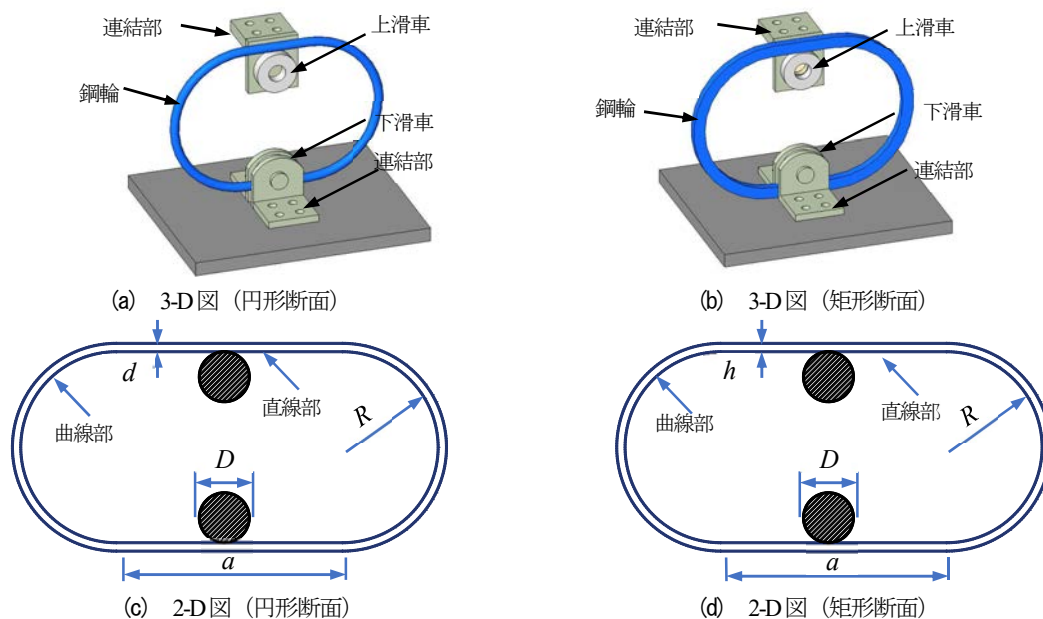


図-1 SRR の概念図

持橋と連続橋に適用することができる。SRR は、図-1(a) や (b) に示すように、鋼輪、2つの滑車および連結部から構成される。鋼輪の構成は、図-1(c) や (d) に示すように、直線部と曲線部からなり、滑車の構成は円柱であり、接続部はL字型の鋼板である。SRR と構造物との接続は高力ボルトで行う。SRR を設置する際には、まず上部構造と下部構造に連結部を固定し、次に鋼輪を2つの連結部の間に設置し、最後に滑車を連結部に固定する。また、図-1 に示すように、この構成は、鋼輪の断面の直径 d または高さ h 、鋼輪の曲線部分の半径 R 、鋼輪の直線部分の長さ a 、および滑車の直径 D の4つのパラメータによって支配されていることがわかる。

SRR の典型的な動作メカニズムを荷重-変位曲線に沿って紹介する(図-2 参照)。①は、非動作長と呼ばれており、構造物に二次的な内力がかからないように、SRR は温度や車両荷重に対して働いていない。②は、初期剛性 K_1 と呼ばれており、小・中規模の地震では、SRR は制震ダンパーや免震支承の働きに影響を与えることなく初期剛性 K_1 を与え、それらの働きをある程度補助することができる。③は、緩衝段階と呼ばれており、拘束材の剛性は小さな揺れと大きな揺れの間を円滑に経過するので、衝撃吸収装置を設置しなくても、SRR が緩衝能力を持つことができるようになっていく。④は二次剛性 K_2 と呼ばれており、SRR は、他の拘束材と同じように、大きな剛性 K_2 で変位を制限する。⑤では、強度は連続的に増加し、剛性は徐々に減少する。そして、⑥は終局変位と呼ばれ、ここで鋼輪が破壊される。このように、この曲線は6つの段階に分けられる。

以前に行った円形断面のSRRの静的解析¹⁰⁾では、鋼輪の断面の直径を大きくすることで、初期剛性、二次剛性、最大耐力を高めることができ、一方で初期剛性に対する

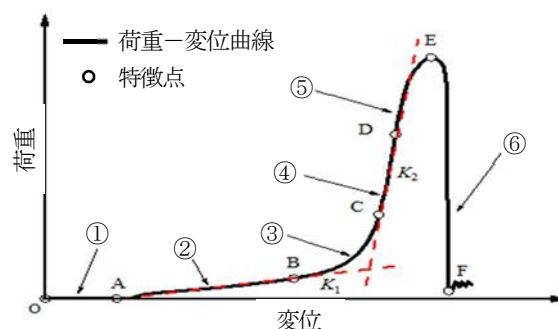


図-2 SRR の典型的な動作メカニズム

二次剛性の比を小さくすることができるとわかった。しかし、鋼輪の断面の直径 d を大きくすると、鋼輪の断面積が大きくなり、無駄が生じる。このため本論文では、断面の形状のみを変えた矩形断面のSRRを新たに開発した。このSRRは図-1(b) に示すように、円形断面のSRRと同様に、鋼輪と上滑車、下滑車、連結部で構成されているが、矩形断面のSRRは、円形断面のSRRよりも多くのメリットを持っている。断面アスペクト比 $h/w=1$ (w は断面幅) で、円形断面のSRRと同じ断面積を持つ場合、断面積や断面二次モーメントなどの断面質性が一致しているとき、互いの性能、すなわち、図-2の①～⑥の段階は大きく類似している。しかし、円形断面のSRRに比べて同じ面積の矩形断面のSRRは、異なる断面アスペクト比 h/w で設計することができる。SRRの剛性は、 h/w の値に依存する断面二次モーメントの影響を受けるため、 h/w のみを変えることで、初期剛性と二次剛性の比率を調整することができる。さらに、滑車と鋼輪の接触面積は、断面が円形のものよりも大きいため、接触部に応力が集中することを防ぐことができる。

矩形断面のSRRの開発を行うために、実験とFEM解析を実施した。そして、力学的特性に影響を与えるパラメ

ータを選定し、その影響を広範なパラメトリック解析に基づいて検討し、一連の設計式を導き出した。

2. 実験方法

(1) 材料特性

材料試験片は、SRR の試験体の製作に使用したものと

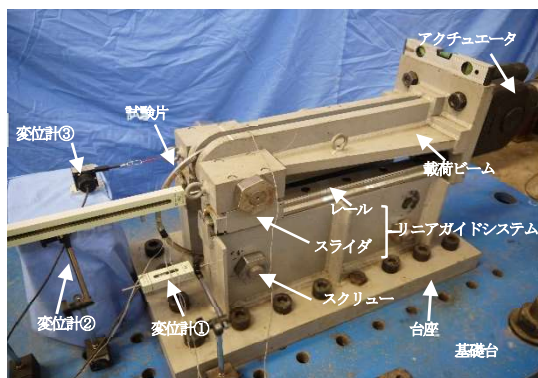


図-3 実験のセットアップ図

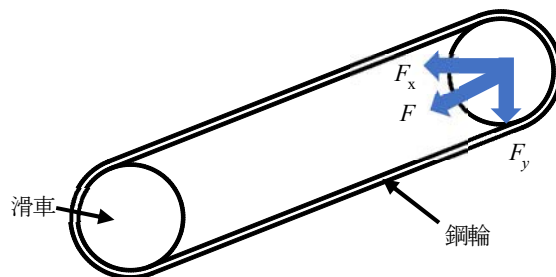


図-4 SRR 動作時の反力の方向

表-1 試験体詳細の断面寸法

シリーズ	試験片	h (mm)	w (mm)	a (mm)	R (mm)	D (mm)
h	S2h10w10R120a25D40	9.43	9.43	25.00	120.00	36.00
	S2h12w10R120a25D40	12.21	9.34	25.00	120.00	36.00
	S2h14w10R120a25D40	14.34	9.34	25.00	120.00	36.00
	S2h16w10R120a25D40	15.94	9.18	25.00	120.00	36.00
	S2h18w10R120a25D40	18.03	9.20	25.00	120.00	36.00
	S3h10w10R120a25D40	10.24	9.32	25.00	120.00	36.00
	S3h12w10R120a25D40	11.91	9.36	25.00	120.00	36.00
	S3h14w10R120a25D40	13.83	8.70	25.00	120.00	36.00
	S3h16w10R120a25D40	15.94	9.18	25.00	120.00	36.00
	S3h18w10R120a25D40	17.90	8.97	25.00	120.00	36.00
a	S2h12w10R120a0D40	11.56	9.39	0.00	120.00	36.00
	S2h12w10R120a15D40	12.26	9.25	15.00	120.00	36.00
	S2h12w10R120a25D40	12.21	9.34	25.00	120.00	36.00
	S2h12w10R120a35D40	12.00	9.31	35.00	120.00	36.00
	S2h12w10R120a45D40	12.02	9.01	45.00	120.00	36.00
	S3h12w10R120a0D40	11.45	9.41	0.00	120.00	36.00
	S3h12w10R120a15D40	12.00	9.21	15.00	120.00	36.00
	S3h12w10R120a25D40	11.91	9.36	25.00	120.00	36.00
	S3h12w10R120a35D40	11.90	9.10	35.00	120.00	36.00
	S3h12w10R120a45D40	12.19	9.25	45.00	120.00	36.00
R	S2h12w10R120a0D40	11.56	9.39	0.00	120.00	36.00
	S2h12w10R145a0D40	11.14	8.95	0.00	145.00	36.00
	S2h12w10R170a0D40	11.84	8.85	0.00	170.00	36.00
	S3h12w10R120a0D40	11.45	9.41	0.00	120.00	36.00
	S3h12w10R145a0D40	11.21	9.03	0.00	145.00	36.00
	S3h12w10R170a0D40	11.92	8.75	0.00	170.00	36.00
D	S2h12w10R170a0D40	11.84	8.85	0.00	170.00	36.00
	S2h12w10R170a0D90	11.06	8.95	0.00	170.00	86.00
	S2h12w10R170a0D140	11.56	8.85	0.00	170.00	136.00
	S3h12w10R170a0D40	11.92	8.75	0.00	170.00	36.00
	S3h12w10R170a0D90	10.63	8.55	0.00	170.00	86.00
	S3h12w10R170a0D140	11.66	9.05	0.00	170.00	136.00

Note : h =鋼輪の断面の高さ, w =鋼輪の断面幅, R =鋼輪の曲線部分の半径, a =鋼輪の直線部分の長さ, D =滑車の直径

同じ Q235 と Q345 (それぞれ SS400 と SM490 に相当) の鋼板から切り出したものを使用した。そして、静荷重 550kN、変位 ±75mm の MTS 試験装置を用いて引張試験を行った。

バイリニア型応力とひずみ曲線 (以降、バイリニアモデルと呼称) は、鋼材の弾性域および塑性域における応力-ひずみ関係を模擬するために数値解析に広く用いられている。しかし、このバイリニアモデルはひずみが非常に大きい塑性域の材料特性を表現するには、精度が低いという欠点がある。そこで、加重平均 (WA) 法¹¹⁾、修正加重平均 (MWA) 法¹²⁾、パワーロータングメント (PLT) 法¹³⁾ など、塑性域の非線形性を反映できる構成モデルがいくつかあるが、本研究では、精度の高さ¹³⁾ から PLT 法を採用した。

PLT 法の応力-ひずみ曲線は次のように表される。

$$\sigma = \begin{cases} \left(\frac{\sigma_{neck}}{\varepsilon_{neck}} \right) \cdot \varepsilon^{\varepsilon_{neck}} & \varepsilon \leq \varepsilon_{neck} \\ \sigma_{neck} \frac{(1 + \varepsilon - \varepsilon_{neck})}{1 + n} \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{neck})^{1+n} & \varepsilon > \varepsilon_{neck} \end{cases} \quad (1)$$

ここでは、 σ は公称応力、 ε は公称ひずみ、 n はモデルパラメータ、 σ_{neck} はネッキングが発生したときの応力、 ε_{neck} はネッキングが発生したときのひずみを表す。

構成モデルでもう一つの重要な要素は、延性破壊モデルである。ボイド成長モデル (VGM)¹⁴⁾、応力修正臨界ひずみモデル (SMCS)¹⁵⁾、Bao-Treidler モデル¹⁶⁾、Jia-Kuwamura モデル¹²⁾ など、いくつかの破壊モデルが提案されているが、本研究では、便利で正確な Jia-Kuwamura モデルを採用した。このモデルは次のように与えられる。

$$dD = \begin{cases} \frac{d\varepsilon_{ep}^p}{\chi \cdot e^{-3T/2}} & T \geq -\frac{1}{3} \\ 0 & T < -\frac{1}{3} \end{cases} \quad (2)$$

ここでは、 D はダメージインデックス、 χ は決定されるモデルパラメータ、 $d\varepsilon_{ep}^p$ は等価塑性ひずみ増分、 T は応力三軸度を表し、 $D=1$ のときに材料が破壊される。

数回の数値解析により、試行錯誤的して Q235 材では $n=0.9$ 、 $\chi=2.5$ 、Q345 材では $n=1.2$ 、 $\chi=2.5$ に決定した。

(2) 実験装置

実験には、荷重容量 ±250kN、変位容量 ±250mm の横型油圧アクチュエータを使用した。台座は、地上に設置された基礎台にピン結合され、载荷ビームは壁に固定されたアクチュエータにボルト接続され、水平変位を与えた。台座と载荷ビームは、リニアガイドシステムによって接続されている。リニアガイドシステムのレールは台座に支持され、ボルトで接続されている。スライドは、载荷ビームのねじ穴にボルトで接続した。SRR 試験体は、下向きと上向きのスクリーウの間に接続され、前者は台

座のねじ穴に固定され、後者は载荷ビームのねじ穴に固定された。実験には 3 つの変位計を使用した。1 つ目は、台座の変位を測定するために基礎台の上に設置した。2 つ目と 3 つ目の変位計は、上向きのスクリーウの変位を測定するために、2 つのスライダーに設置された。実験のセットアップを図-3 に示す。

上滑車と下滑車の間に相対的な変位が生じると、図-4 に示すような SRR の反力が発生する。この反力は垂直成分 F_y と水平成分 F_x に分けられ、 F_x は橋梁の上部構造と下部構造の間の水平方向の相対変位を制限するために用いられるものである。実験で測定する値は F_x であるため、台座は F_y を打ち消すように設計されており、アクチュエータで計測される力は水平成分の F_x のみとなる。 F_x と滑車の変位の測定精度を確保するためには、台座と载荷ビームが塑性変形しないような高い剛性である必要がある。そのため、台座と载荷ビームの断面積を大きくし、試験体が破壊する前に各部品が常に弾性を維持できるようにしている。

既往の解析的研究¹⁰⁾から、2 つの滑車間の変位が大きくなると反力が大きくなり、 F_y も大きくなることがわかった。また、高い軸圧下では台座が局部座屈する可能性があるため、補強材が追加されている。なお、 F_y によって摩擦が発生するため、摩擦を効果的に低減できるリニアガイドシステムを採用し、実験で得られるデータの精度を確保した。

(3) 試験体の構成

今回の実験では、Q235 と Q345 鋼を用いた 26 本の試験体を設計した。同一鋼種の試験体はすべて同じ鋼板から製作し、SRR の断面幅は板厚と同じにした。これらの試験体は、パラメータに応じて、シリーズ h、シリーズ R、シリーズ a、シリーズ D の 4 つのシリーズに分けた。表-1 に試験体の詳細を示す。試験体の名称の表記は S3h12w10R120a25D40 を例にとると、S は鋼、3 は Q345 鋼、h は鋼輪の断面の高さ、12 は h の値、w は鋼輪の断面の幅、10 は w の値となる。R は鋼輪の曲線部分の半径、120 は R の値、a は鋼輪の直線部分の長さ、25 は a の値、D は滑車の直径、40 は D の値である。

3. 実験結果

(1) 荷重-変位曲線

Q235 および Q345 鋼で製作した試験体の荷重-変位曲線を図-5～9 に示し、それぞれ h 、 R 、 a 、および D の影響を示している。

図-5 から、 h が増加するにつれて、初期剛性と最大耐

力が増加していることがわかる。一方、その他の特性は、 w , R , a , D が一定の場合、基本的に変化しない。円形断面を持つ SRR の断面の直径の影響に関する既往の研究¹⁰⁾のように、最大耐力、非動作長、終局変位に対する h の影響は h の大きさに比例関係であるという点で同様である。これは、 d または h の増加により、断面積が増加するためである。しかし、初期剛性と二次剛性は断面積の影響を受けるだけでなく、 h/w の影響も受ける。

また、 R , a , D が SRR の特性に及ぼす影響を図-6~8 に示す。 R の増加に伴い、初期剛性、二次剛性は低下するが、終局変位は増加し、非動作長は変化しない。この現象の理由は、 R が変化すると、鋼輪の全長と曲げ変形が発生する部分の長さが変化し、それが初期剛性、二次剛性、終局変位に影響するためである。 a では、非動作

長と終局変位には大きな影響を与えるが、初期剛性と二次剛性にはわずかな影響しか与えない。 a の値は、滑車の可動部の長さ直接影响到し、 a の値が大きいほど鋼輪の全長が長くなり、終局変位も大きくなる。 D が大きくなると二次剛性が高くなり、終局変位が小さくなる。非動作長さと初期剛性は基本的に変化しない。これは、 D の変化によって滑車と鋼輪の接触部分の長さが直接変化し、曲げ変形が発生する部分の長さに影響するためである。

さらに、図-9 に示すように、2つの鋼種を比較すると、材料によって決定される最大耐力を除いて、他の特性への影響はわずかである。Q235 で作られた SRR の変形性能は Q345 よりもわずかに優れている。

以上のように、初期剛性、緩衝段階での曲線の形状、

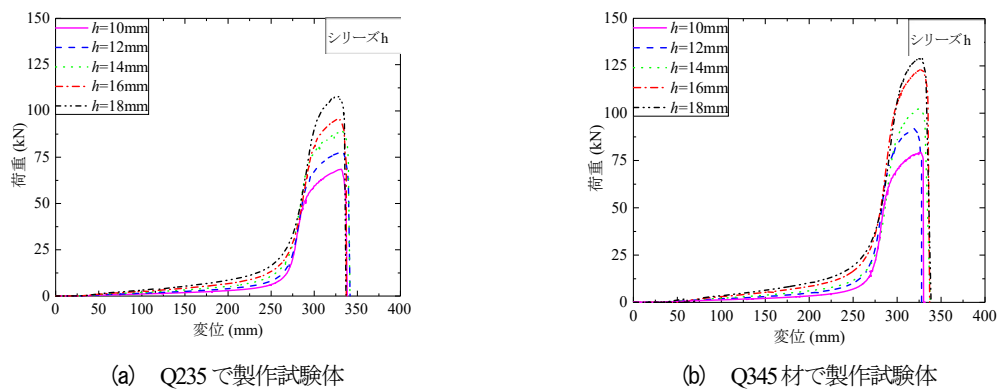


図-5 h の違いによる荷重-変位曲線

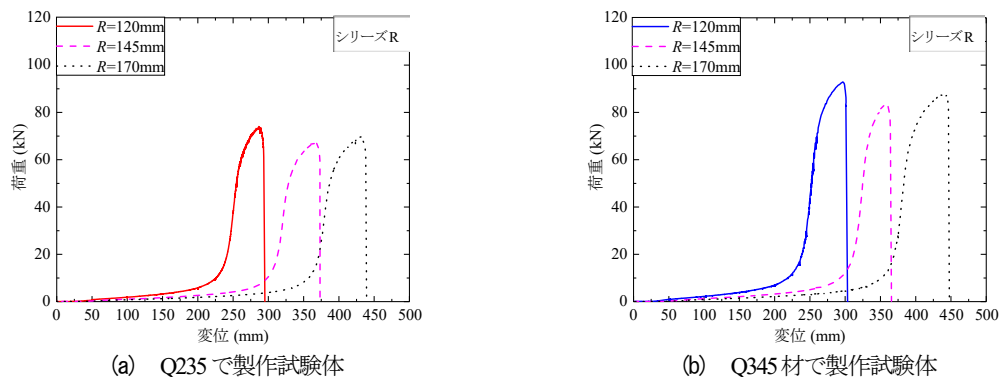


図-6 R の違いによる荷重-変位曲線

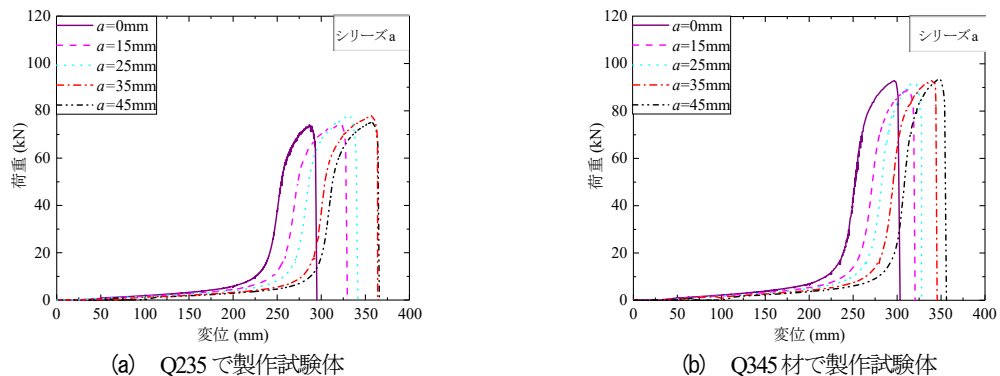
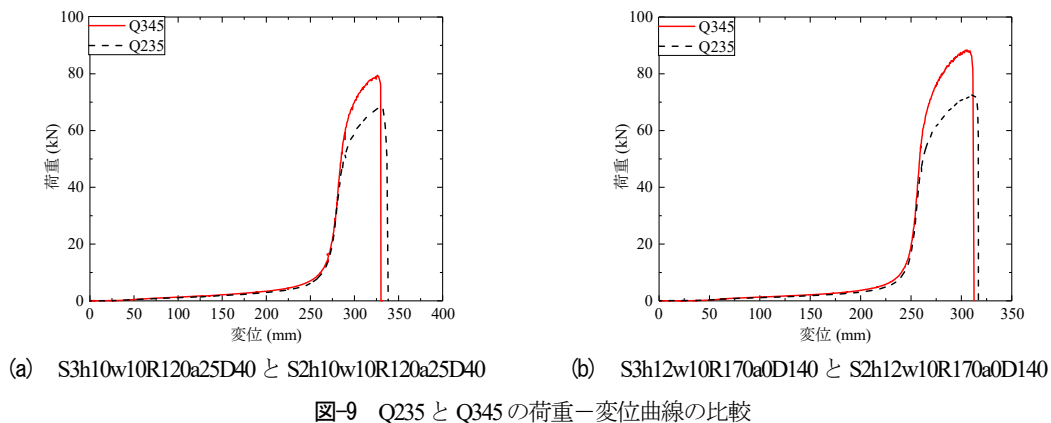
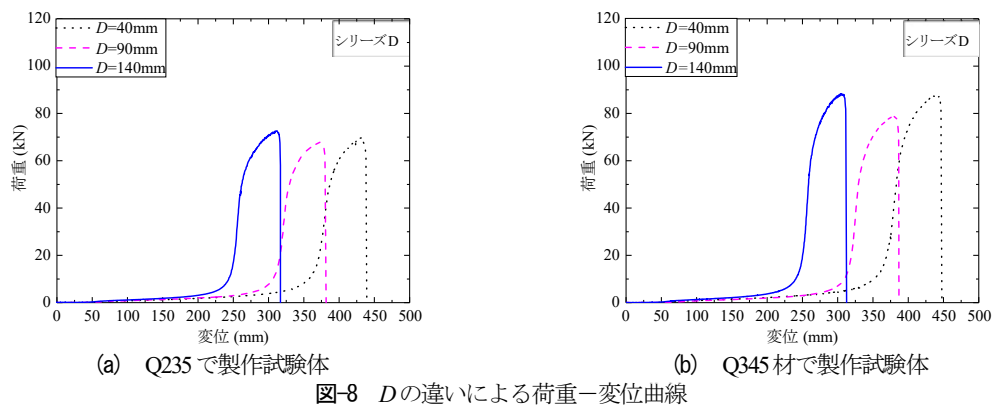


図-7 a の違いによる荷重-変位曲線



二次剛性、終局変位は、SRR の構成によって支配されることが明らかになった。材料の強度は、主に最大耐力に影響し、終局変位にもわずかに影響するが、他の特性に与える影響はほとんどない。

(2) ひずみ

鋼輪の変形状態と破壊特性を評価するために、鋼輪の曲線部と直線部のひずみを測定した。ひずみゲージの配置を図-10に示す。直線部のない試験片 ($a=0\text{mm}$) の場合、曲線部の中間位置の変形が曲線部全体の変形を概ね表すため、No.4 のゲージは円の中心とこの点を通る線が No.1 のゲージと円の中心を結ぶ線に直交する点の外面に貼り付ける。鋼輪の側面と内径面がスクリー (滑車) と载荷ビームに接触する可能性があることを考慮すると、No.4 のひずみゲージの位置のみが直線部のひずみの変化を単純に反映していることになる。

図-11 に S3h12w10R120a0D40 のケースのひずみ－変位曲線および荷重－変位曲線を示す。No.1～No.3 のゲージのひずみがそれぞれ負、ほぼ一定、正となっていることから、曲げ変形が主となっていることがわかる。緩衝段階では、No.1, No.2, No.3 のゲージのひずみはいずれも緩やかに変化している。これは、変形の形態が曲げ変形から引張り変形に変化したためである。引張り変形の段階では、No.1, No.2, No.3 の各ゲージのひずみがほぼ同じ割合で増加している。No.4 のひずみは常に増加しており、他のゲージの数値よりも大きく、二次剛性段階のひ

ずみの増加率は初期剛性段階のひずみの増加率よりも大きくなっている。これらの結果から、破損箇所は No.4 ゲージの位置付近であると考えられる。これは、既往の研究¹⁰⁾の FEM 解析の予測とも一致する。

(3) 損傷モード

本実験では、2 種類の損傷モードが存在し、第 1 のモードは、鋼輪が滑車に接触する部分での損傷、第 2 のモードは、2 つの滑車間の鋼輪での損傷である。26 個の試験体のうち、22 個の試験体が第 1 のモードを示し、残りの試験体が第 2 のモードを示した。いずれのモードであっても破壊面にネッキングが発生していたため、すべての試験体の破壊モードが延性破壊であることを示しており、第 1 のモードは、前節で予測した場所と類似している。第 2 モードの原因は、破壊面の位置に初期欠陥があるためと考えられる。

4. 数値解析

(1) FEM モデルの構築

図-12 に示すように、ABAQUS/Standard を用いて、矩形断面を持つ SRR の 2 次元平面 FEM モデルを構築した。鋼輪のモデルには、4 節点のバイリニア平面応力四辺形 (CPS4R) を採用した。非変形または微小変形が要求されるため、実験では滑車となるスクリー (滑車) の材料も

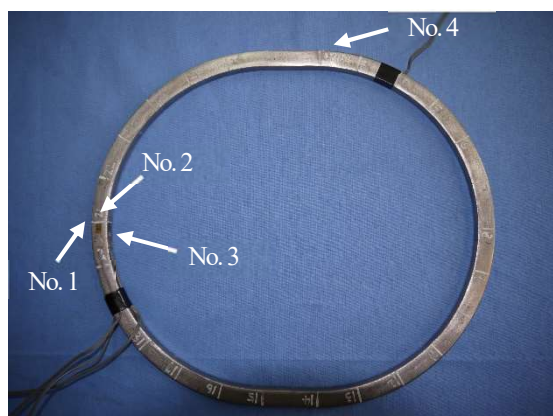


図-10 ひずみゲージ貼り付け位置

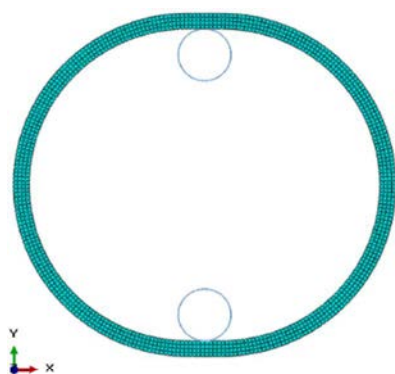


図-12 SRR の FEM モデル図

42CrMo の高強度鋼とした．そこで，解析において滑車を剛体として単純化した．

材料特性は 3 本の材料試験片の引張試験結果から決定し，詳細を表-2 に示す．また，先述のように，PLT 法と Jia-Kuwamura 破壊モデルを用いて塑性変形と損傷の非線形性を表現した．

鋼輪と滑車の間には，法線方向と接線方向の 2 種類の接触モードがある．それぞれ，硬質接触とクーロン摩擦接触を設定し，2 つの接触モードを模擬した．境界条件は，下滑車の自由度を完全に固定し，上滑車の自由度は X 軸方向を除いて固定した． X 軸方向には単調な荷重を载荷した．

(2) FEM モデルの検証

本研究では，実験で計測したひずみの値と比較するために SRR のすべての FEM モデルにおいて，ゲージの大きさと同等の 2mm のメッシュサイズを採用した．そして，予備解析の結果，シェル要素モデルの破断変位や最大耐力はソリッド要素モデルと差がほとんどなかったため，計算時間を短縮するために，モデルにはシェル要素モデルを採用した．そして，試行錯誤的に摩擦係数を 0.1 とした．

図-13 にモデル上の対応するひずみゲージの位置に局所座標を設定して，ひずみの出力値を実験結果とともに示す．解析結果は実験結果とよく一致しており，モデル

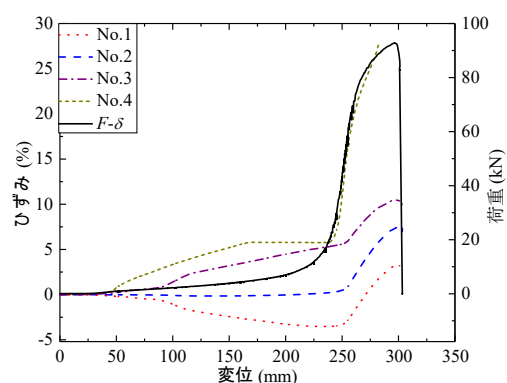


図-11 ひずみー変位曲線および荷重ー変位曲線 (S3h12w10R120a0D40 のケース)

表-2 材料特性

鋼種	E (GPa)	σ_y (MPa)	ν	σ_u (MPa)	δ (%)
Q235	216	294	0.270	424	38.1
Q345	211	377	0.270	549	37.1

Note : E : ヤング率, σ_y : 降伏応力, ν : ポアソン比,
 σ_u : 最大応力, δ : 伸び率

の妥当性が検証され，解析手法の信頼性が高いと言える．

そこで，試験体の寸法に基づいて 26 個の FEM モデルを構築した．紙面の都合上，実験結果と解析結果の比較の一部を図-14 に示す．これらの結果からも，解析による荷重ー変位曲線は実験データと高い精度で一致していることがわかる．

(3) パラメトリックスタディの補足

実験では，SRR の設計値の範囲を次のようになっている． S は $100 \sim 180 \text{ mm}^2$ ， a は $0 \sim 45 \text{ mm}$ ， R は $120 \sim 170 \text{ mm}$ ，および D は $40 \sim 140 \text{ mm}$ である．そして，力学的特性に対する h/w の影響の解明と，各構造パラメータの範囲をより広げた方がよいという 2 つの課題があるため，18 の追加モデルを作成し，設定したパラメータの値が SRR の挙動に与える影響を評価した．

すべての FEM モデルを 5 つのシリーズ : P-S, P-h/w, P-R, P-a, および P-D に分け，表-3 に各パラメータの値を示す．モデルの名称は試験体の名称と同様であり，P はパラメトリック解析用のモデルを表す．

図-15(a) に，断面積の異なる SRR の荷重ー変位曲線を示す．図-15(a) より， S の増加に伴い，初期剛性，二次剛性，および最大耐力 F_u が増加し，終局変位 δ_u は基本的に変化しないことがわかる．実際には，1 本の SRR だけでは強度が満たされず，複数の SRR が同じ橋脚や橋台に設置されることがある．数個の SRR を並列に設置

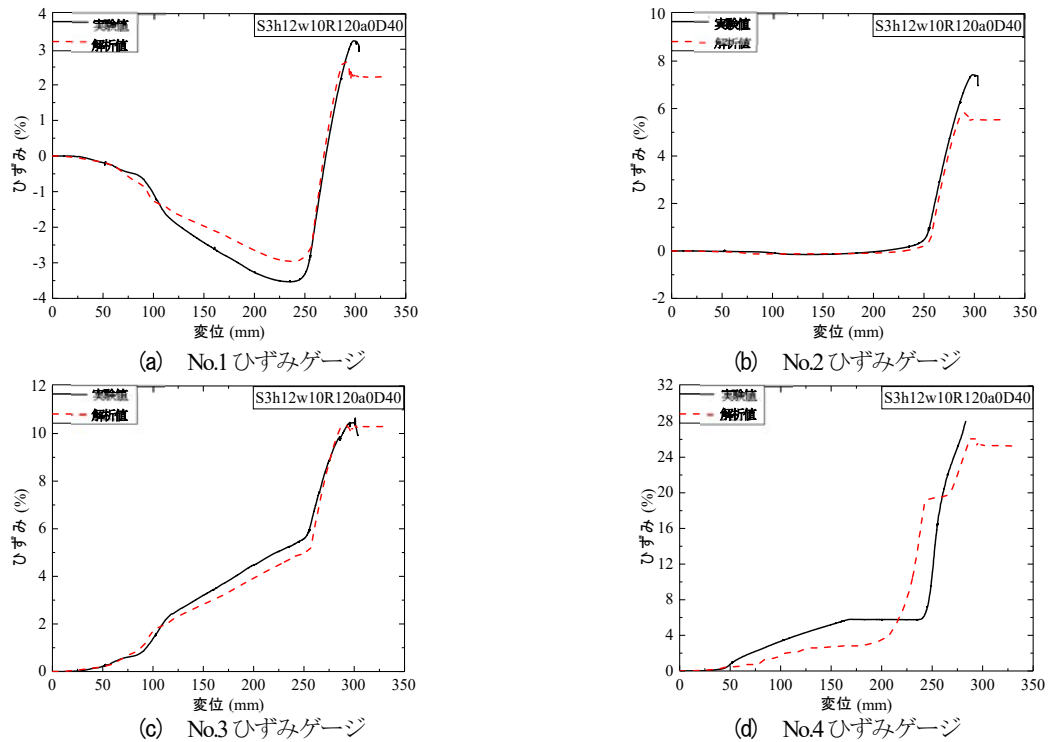


図-13 実験と解析のひずみ-変位曲線の比較

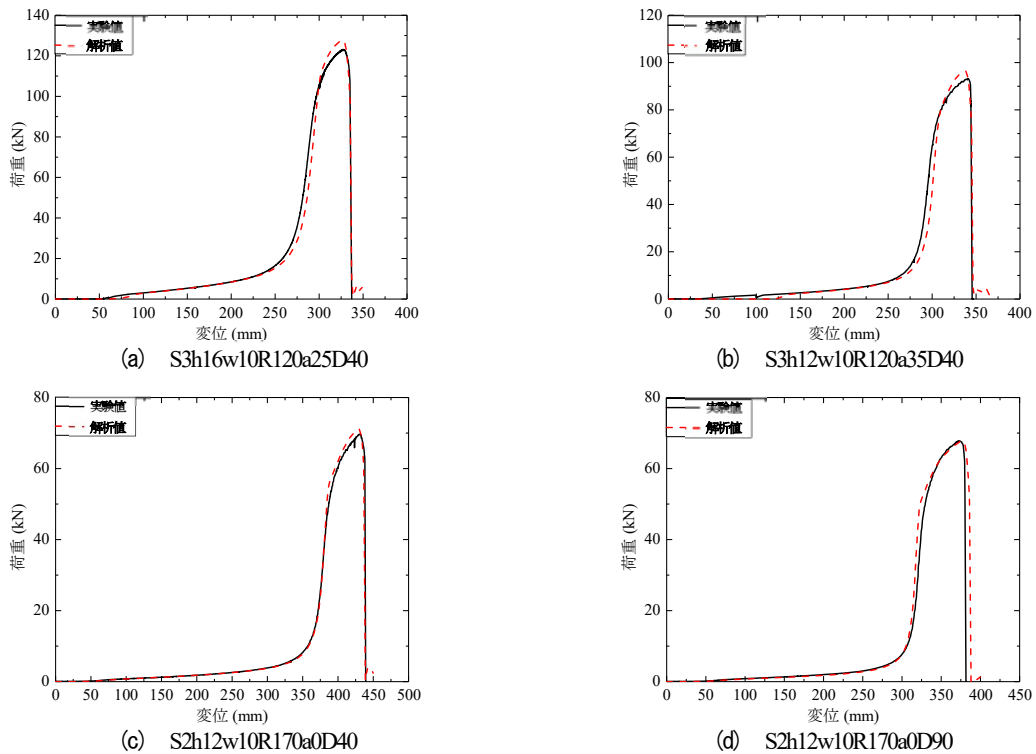


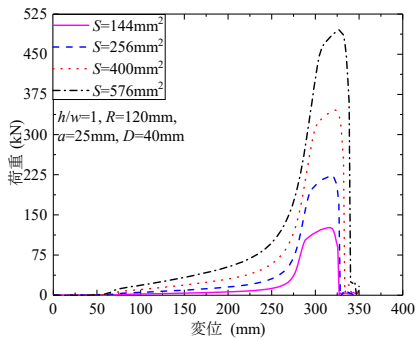
図-14 実験と解析の荷重-変位曲線の比較

するとき、最大耐力に達するが、断面積の小さい SRR を多数配置したり、断面積の大きい SRR を少数配置したりすると、最大耐力は同じでも、初期剛性や二次剛性が異なり、SRR の性能に影響を与える可能性がある。図-15(b)では、荷重を断面積で割った値を比較した。この図から、 S が大きくなると K_1/S が大きくなり、 K_2/S が小

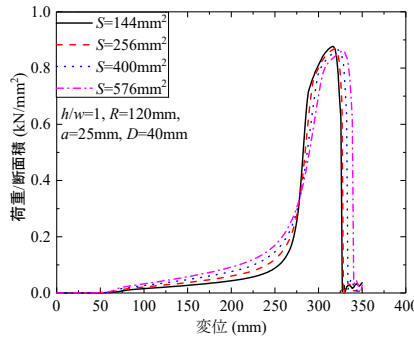
さくなるが、 F_u/S は一定であることがわかる。これは、最大耐力が等しい場合、断面積の大きい SRR を多数組み合わせたケースよりも、断面積の小さい SRR を多数組み合わせたケースの方が、 K_1/K_2 が小さくなることを意味している。その理由は、上記 2 つのケースの断面二次モーメントの総和が異なるため、 K_1 と K_2 が変化して

表-3 パラメトリック解析用のモデルの詳細

シリーズ	試験片	h/w	h (mm)	w (mm)	S (mm ²)	a (mm)	R (mm)	D (mm)
P-S	PS3h12w12R120a25D40	1	12	12	144	25	120	40
	PS3h16w12R120a25D40	1	16	16	256	25	120	40
	PS3h20w12R120a25D40	1	20	20	400	25	120	40
	PS3h24w12R120a25D40	1	24	24	576	25	120	40
P-h/w	PS3h9.9w19.8R120a25D40	0.5	9.9	19.8	196	25	120	40
	PS3h14w14R120a25D40	1	14	14	196	25	120	40
	PS3h17.15w11.43R120a25D40	1.5	17.15	11.43	196	25	120	40
	PS3h19.8w9.9R120a25D40	2	19.8	9.9	196	25	120	40
P-R	PS3h12w12R80a25D40	1	12	12	144	25	80	40
	PS3h12w12R100a25D40	1	12	12	144	25	100	40
	PS3h12w12R120a25D40	1	12	12	144	25	120	40
	PS3h12w12R140a25D40	1	12	12	144	25	140	40
P-a	PS3h18w18R120a25D40	1	18	18	324	25	120	40
	PS3h18w18R120a50D40	1	18	18	324	50	120	40
	PS3h18w18R120a75D40	1	18	18	324	75	120	40
	PS3h18w18R120a100D40	1	18	18	324	100	120	40
P-D	PS3h16w16R120a25D20	1	16	16	256	25	120	40
	PS3h16w16R120a25D40	1	16	16	256	25	120	40
	PS3h16w16R120a25D60	1	16	16	256	25	120	40
	PS3h16w16R120a25D80	1	16	16	256	25	120	40



(a) 荷重－変位曲線



(b) 荷重/断面積－変位曲線

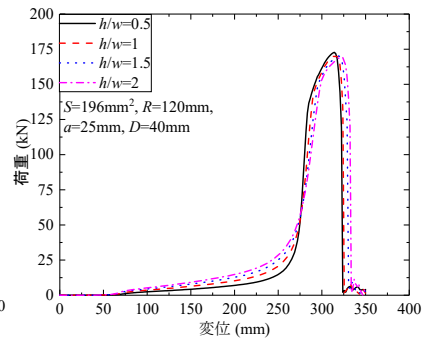


図-16 P-h/wモデルでの h/w による影響

図-15 P-Sモデルでの S による影響

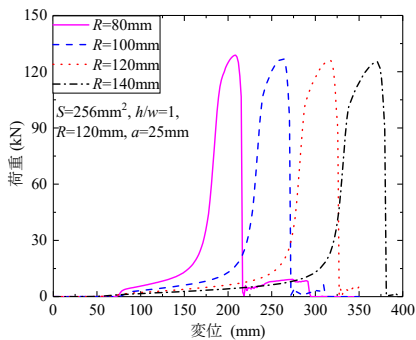


図-17 P-Rモデルでの R による影響

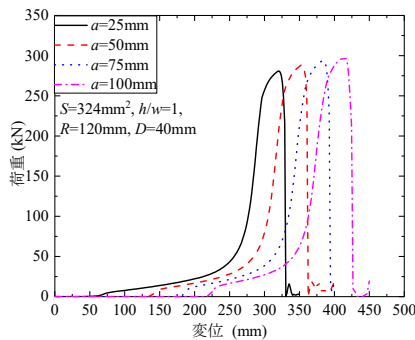


図-18 P-aモデルでの a による影響

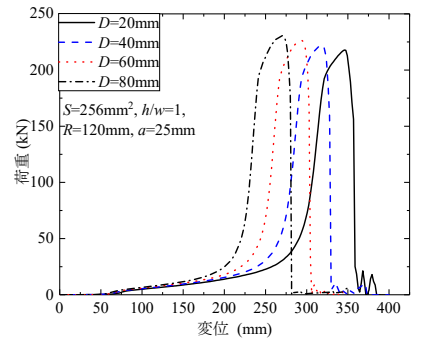


図-19 P-Dモデルでの D による影響

いるからである。

図-16 は、断面のアスペクト比が力学的特性に及ぼす影響を示している。図に示すように、 h/w を変化させた場合、非動作長、終局変位、最大耐力にはわずかな変化しかないが、 h/w の増加に伴い、初期剛性は増加するが、二次剛性は減少する。これは、 h/w の変化が主に断面二

次モーメントを変化させ、 K_1 と K_2 の値に大きな影響を与えるためである。図-17, 18, 19 は、SRR の挙動に対する R , a , D の影響を示している。これらの図から、他の力学的特性に対する R , a , D の影響は、実験結果と一致していることがわかる。

5. SRR 特性の予測式

(1) 各特性点と緩衝段階曲線の予測式

SRR の設計を容易にし、解析を行わずに SRR の特性曲線を得るためには、SRR 特性の予測式を提案することが不可欠である。前述の一連の数値解析結果に基づき、各特性点（図-2）と緩衝段階に対応する設計式を最小二乗法により算出した。これらの式では 6 つのパラメータを変数として用いた。パラメータは、(1)断面のアスペクト比 h/w 、(2)断面の面積 S 、(3)直線部の長さ a 、(4)曲線部の半径 R 、(5)滑車の直径 D 、および(6)鋼材の引張強さ σ_u である。例として点 B での変位のみを詳細に説明するが、他の計算式も同様の考えに基づいている。

a) 点 A

点 A は、SRR が動作し始めるときの地点である。すなわち、原点から点 A までの距離と非動作長は同一である。非動作長は、直線部の長さ a と摩擦係数にのみ依存する。

b) 点 B

点 B は、図-2 に示した②の終点である。ある点と点 A の間のすべての点の傾きの回帰二乗和が 0.99 未満のときはその最大値を、または 0.99 以上のときは 0.99 を点 B とみなすことができる。前節のパラメトリック解析の結果、図-11 および図-20 に示すように、 σ_u および h/w を除くすべてのパラメータが、点 B の変位に大きな影響を与えていることがわかった。さらに、各特性点の変位は、上述の結果から基本的に材料強度に依存しないため、後述する各点の変位式では、 σ_u を変数として考慮しない。したがって、点 B の変位を予測する式は以下のように示される。

$$\delta_B = \left(115 - 0.96D + 101e^{-0.036\sqrt{\frac{S}{\pi}}} \right) \cdot \left(7 \times 10^{-3}a + 0.013 \left(R + \sqrt{\frac{S}{4}} \right) - 0.458 \right) \quad (3)$$

図-18 に示すように、 a は点 B での耐力にわずかに影響を与える。この点での耐力は、次の式で与えられる。

$$F_B = 2S\sigma_u \left(-\frac{S+786}{9680}e^{\zeta} + \frac{S+112}{3090}e^{\tau} + \frac{e^{\frac{S}{283}}}{87.5} - \frac{S+481}{1.83 \times 10^6}D + 0.0852 \right) \quad (4)$$

ここで、 $\zeta = -(h/w)/(1.83 + 3.8e^{-S/79.1})$ 、 $\tau = -R/(86.4 - 2.4e^{S/198})$ である

初期剛性 K_1 が概ね一定であることを考慮すると、初期剛性 K_1 は、式(5)に示すように、点 B の力と変位を用いて求めることができる。

$$K_1 = \frac{F_B}{\delta_B - a} \quad (5)$$

c) 点 C

点 C は図-2 に示すように、④の開始点である。前述

のパラメトリック解析により、図-15(b)に示すように、断面積を変化させたときの曲線が 1 点で交わることがわかった。点 C の座標は、以下の式で求められる。

$$\delta_C = 278 \left(\frac{h}{w} \right)^{0.01} + 2.45R + 1.18a - 1.23D - 274 \quad (6)$$

$$F_C = 2S\sigma_u \left(1.5 \times 10^{-2} \ln \left(\frac{h}{w} - 0.48 \right) + 0.32e^{-R/64.14} - 0.1e^{-a/193} + 4.2 \times 10^{-4}D + 0.337 \right) \quad (7)$$

d) 点 D

ある点での荷重が $0.6 \times 2S\sigma_u$ となると、その点を点 D と定義する。点 D の変位は次式で求められる。

$$\delta_D = 0.026S + 7.92 \frac{h}{w} + 2.52R + 1.16a - 1.34D - 2.24 \quad (8)$$

二次剛性 K_2 は直線的であるため、式(9)のように C 点と D 点からも導き出すことができる。点 C と D によって、式(9)のように導かれる。

$$K_2 = \frac{F_D - F_C}{\delta_D - \delta_C} \quad (9)$$

e) 点 E

点 E は、最大耐力の点である。最大耐力は以下のようになる。

$$F_E = 2S\sigma_u \left(\frac{2.49 \times 10^4 D - 1.13 \times 10^3 S}{2.82 \times 10^7} + 0.97 + \frac{6.8 \times 10^{-3} - 3.2 \times 10^{-3} e^{\frac{S}{195}}}{976(D - 19.9)} \right) \left(\frac{0.4 \frac{h}{w}}{31.3} - \frac{S^{-0.0176} \left(\frac{h}{w} \right)^{0.0175}}{5.56} + \frac{S^{-0.018} 0.98^R}{7.14} + \frac{a}{1450} + \frac{S^{-0.98}}{1.45} + 0.916 \right) \quad (10)$$

最大耐力時の変位は、式(11)で与えられる。

$$\delta_E = \left(\frac{1.45}{1.17 + \left(\frac{D}{156} \right)^{0.9}} + 0.01 \right) \left((503 + 0.035S) \left(0.99 + 0.013 \frac{h}{w} \right) + 2.7R + 1.25a - 550 \right) \quad (11)$$

f) 緩衝段階の曲線

緩衝段階は、曲線全体の中で重要な段階であり、複数の特性点を用いて直線的に表現するだけでは不十分である。そこで、緩衝段階の曲線の式は次のような連続関数とした。

$$F_{\text{buf}} = \frac{(F_C - F_B) - K_1(\delta_C - \delta_B)}{(\delta_C - \delta_B)^{\chi}} (\delta - \delta_B)^{\chi} + K_1(\delta - \delta_B) + F_B \quad (12)$$

$$\chi = \left(2.96 + 3.87e^{-\frac{S}{144}} \right) \left(0.72 + 0.3e^{-\frac{\frac{h}{w}-1}{0.82}} \right) \left(0.98 + \frac{S^{0.31}}{2030} (R - 120) \right) \left(1 + \frac{D - 40}{144} \right) \quad (13)$$

(2) 予測式の検証

予測式の精度を検証するために、図-21 に予測結果と実験結果を比較した。B, C, D, E 点については、実験で得られた荷重値と予測された荷重値が一致したときの変位を比較した。この図は、実験結果と予測結果がよく一致していることを示しており、予測結果を実験結果で割った値は、基本的に 1.1 から 0.9 の間となった。

この比較の結果、予測式は妥当な精度を持つことが示

されたため、提案した予測式は、SRR の荷重－変位曲線を求めるために用いることができると言える。

6. 結言

断面を円形から矩形に変えた SRR を提案し、これにより、断面のアスペクト比を調整して、SRR の力学的特

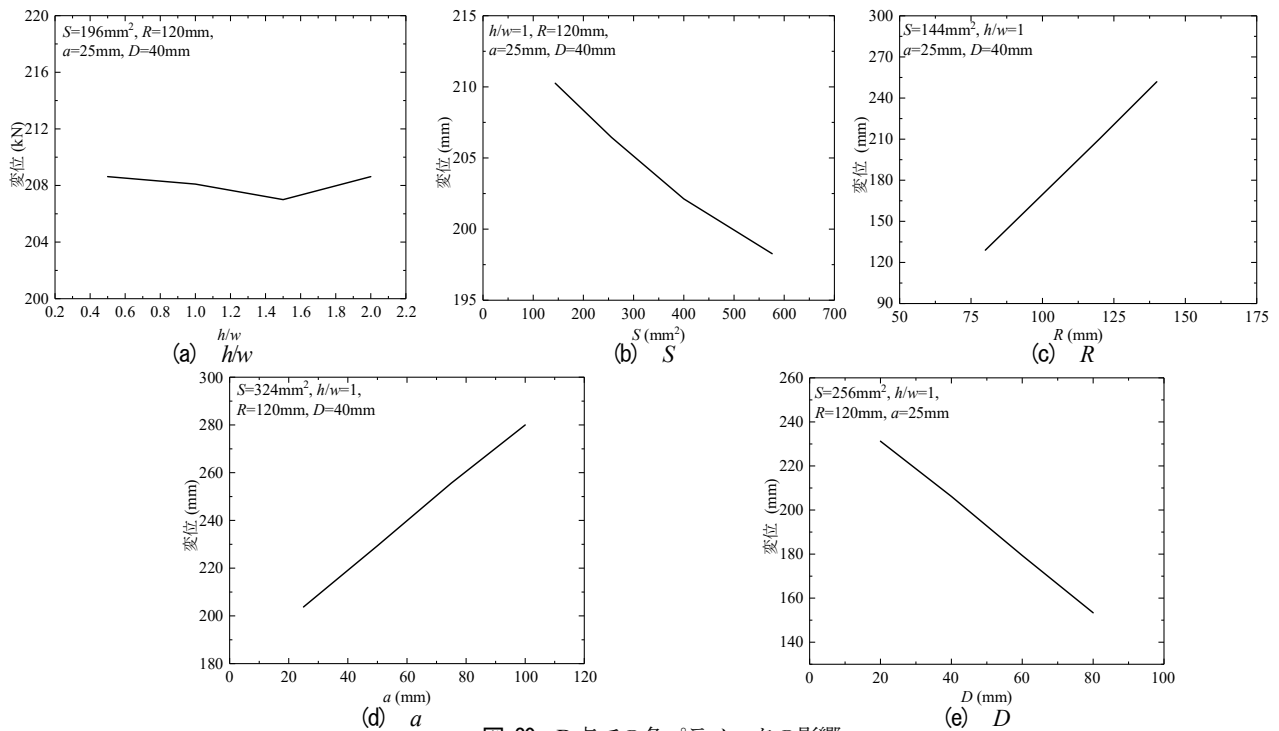


図-20 B点での各パラメータの影響

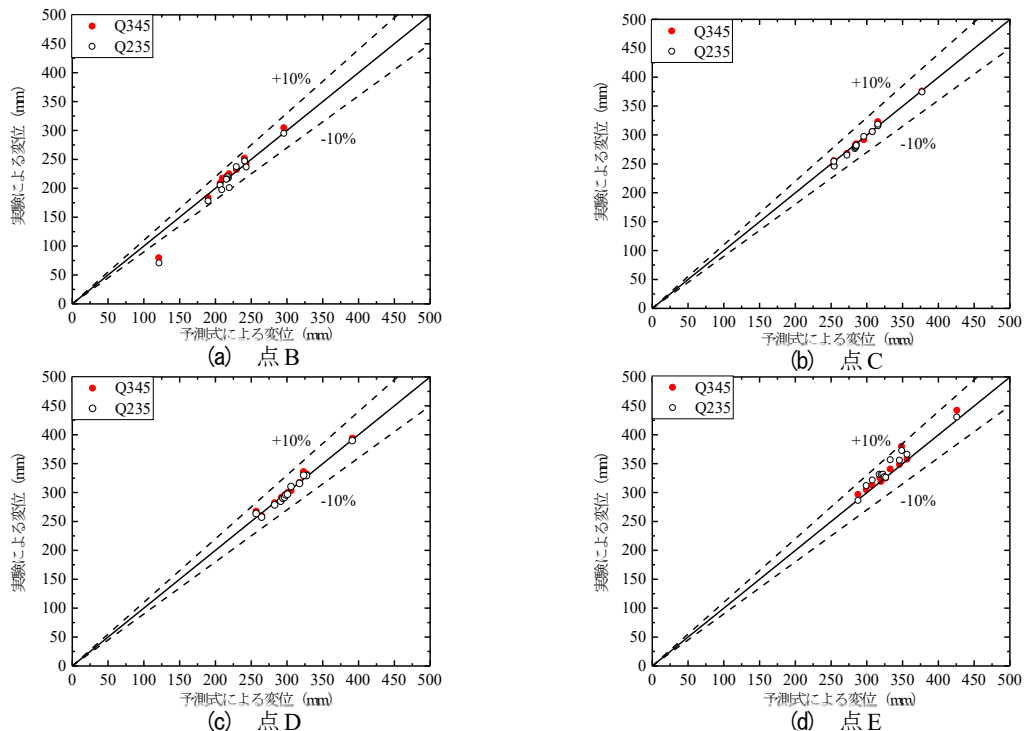


図-21 予測式と実験での各特性点の変位の比較

性を変化させることができるようになった。矩形断面を持つ SRR の力学的特性、動作メカニズムおよび損傷モードを実験と FEM 解析によって検討し、得られた知見を以下に示す。

- 1) 断面積を増やすことなく断面のアスペクト比を上げると、初期剛性が増大するが、二次剛性が低下する。
- 2) 矩形断面の SRR の挙動に及ぼす断面積、曲面部の半径、直線部の長さ、滑車の直径の影響は、円形断面の SRR のものと一致している。
- 3) 初期剛性と二次剛性は、断面積、曲線部の半径、直線部の長さおよび滑車の直径に依存する。一方、鋼輪と滑車の間の摩擦係数や鋼材の強度は、初期剛性と二次剛性にほとんど影響しない。
- 4) 提案した予測式によって算出された予測結果は、実験結果とよく一致した。したがって、この予測式は、荷重-変位曲線の評価に適用できると考えられる。

謝辞：本研究は、公益財団法人高橋産業経済研究財団からの研究助成費の補助を受けて行ったことを付記し、関係者の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 一般社団法人 日本橋梁建設協会：熊本地震橋梁被害報告書，2016。
- 2) L.G. Selna, L.J. Malvar, R.J. Zelinski : Bridge retrofit testing: hinge cable restrainers, J.Struct. Eng, Vol.115, No.4, pp.920-934, 1989.
- 3) M.S. Saiidi : Parameters in bridge restrainer design for seismic retrofit, J. Struct. Eng, Vol.122, No.1, pp.61-68, 1996.
- 4) J.H. Won, H.S. Mha, K.I. Cho, S.H. Kim : Effects of the restrainer upon bridge motions under seismic excitations, J. Struct, Eng, Vol.30, No.12, pp.3532-3544, 2008.
- 5) J.E. Padgett, R. DesRoches : Three-dimensional nonlinear seismic performance evaluation of retrofit measures for typical steel girder bridges, J. Struct, Eng, Vol.30, No.7, pp.1869-1878, 2008.
- 6) Q. Tian, T. Hayashikawa, G.Q. Song, C. Zhang : Study on the effect of cable restrainers stiffness on the seismic performance of curved viaducts combined use of steel stoppers, J. Earthq and Tsunami, Vol.13, No.2, 2019.
- 7) G. Ghosh, Y. Singh, S.K. Thakkar : Seismic response of a continuous bridge with bearing protection devices, J. Struct, Eng, Vol.33, No.4, pp.1149-1156, 2011.
- 8) 社団法人土木学会 鋼材倶楽部：鋼構造物の安全性の調査報告—阪神大震災における鋼構造物の被害報告と今後の耐震設計について，1995。
- 9) 財団法人 土木研究センター：道路橋の免震．制震設計法マニュアル（案），2011。
- 10) J.B. Sun, Z.F.Wang, D.W. Xue, H.B. Ge : Concept and behavior of a steel ring restrainer with variable stiffness and buffer capacity, J. Earthq and Tsunami, Vol.14, No.4, pp.2050020, 2020.
- 11) Y. Ling : Uniaxial true stress-strain after necking, AMP, J. Technol, Vol.5, pp.37-48, 1996.
- 12) L.J. Jia, H. Kuwamura : Ductile fracture simulation of structural steels under monotonic tension, J. Struct. Eng, Vol.140, No.5, pp.04013115, 2014.
- 13) L.J. Jia, H.B. Ge, K. Shinohara, H. Kato : Experimental and numerical study on ductile fracture of structural steels under combined shear and tension, J. Bridg. Eng, Vol.21, No.5, pp.04016008, 2016.
- 14) J.R. Rice, D.M. Tracey : On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields, J. Mech. Phys. Solids, Vol.17, No.3, pp.201-217, 1969.
- 15) J.W. Hancock, A.C. Mackenzie : On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states, J. Mech. Phys. Solids, Vol.24, No.2-3, pp.147-160, 1976.
- 16) Y. Bao, R. Treitler : Ductile crack formation on notched Al2024-T351 bars under compression-tension loading, Mater. Sci. Eng, Vol.A384, No.1-2, pp.339-385, 2004.

DEVELOPMENT OF A NOVEL STEEL RING RESTRAINER WITH RECTANGULAR SECTION

Kento ASANO, Jubo SUN, Hanbin GE, Yan LIU and Zhanfei WANG

Steel ring restrainer (SRR) with rectangular section is a new type of restrainer to prevent the unseating of bridge spans. In the present study, a parametric study on the influences of the geometric dimensions and steel grades on the static behavior of the SRR was conducted. after the experimental and numerical investigations. In addition, empirical equations predicting the force-displacement relationship of the SRRs were derived. The results show that all of the geometric dimensions and steel grades affect the static behavior of the SRRs. Among them, the sectional area and steel grades have the most remarkable effect on the ultimate strength and tangent stiffness, while the radius of the curved part most significantly affects the ductility of the SRRs. Moreover, the empirical equations have good precision to assess the static curve of the SRRs.