

実橋箱断面圧縮部材の耐荷力特性と基準耐荷力曲線に関する検討

Ultimate strength curves of compressive member with box sections in real steel bridges

野上邦栄*, 竹内幸治**, 山下洋平***, 岸 祐介****,
 長井正嗣†, 奥井義昭††, 野阪克義†††, 小室雅人‡, 宮下剛‡‡
 Kuniei Nogami*, Yukiharu Takeuchi**, Youhei Yamashita***, Yusuke Kishi****
 Masatsugu Nagai†, Yoshiaki Okui††, Katsuyoshi Nozaka†††, Masato komuro‡, Takeshi Miyashita‡‡

*工博, 首都大学東京教授, 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
 knogami@tmu.ac.jp

**工修, 東日本高速道路株式会社さいたま工事事務所 (〒338-8502 さいたま市岩槻区加倉 260)

***工修, 東日本旅客鉄道株式会社東京工事事務所 (〒151-8512 東京都渋谷区代々木 2 丁目 2 番 6 号)

****博(工), 首都大学東京助教, 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

†工博, 長岡技術科学大学名誉教授 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

††博(工), 埼玉大学教授, 理工学研究科環境社会基盤国際コース (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)

†††Ph. D., 立命館大学准教授, 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)

‡博(工), 室蘭工業大学准教授, 大学院工学研究科くらし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27 番 1 号)

‡‡博(工), 長岡技術科学大学准教授, 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

This paper describes the discussions on the ultimate strength characteristics for existing compression members of steel truss and arch bridges, and proposes new ultimate strength curve of welded box-section members. The investigation objects are section size, material, initial imperfections, stiffener size of compression member which designed based on Spec. for Highway Bridges 2002. In addition, ultimate strength characteristics of existing compression members with box-section are calculated for several steel types. The results of investigations shows that the $0.2\sigma_y$ is able to apply as upper limit of compression residual stress (σ_{rc}) for HTSS members. The results of numerical analyses provide the ultimate strength characteristics of welded box-section compression members for steel truss and arch bridges. Moreover, new ultimate strength curve is proposed for the compression members in this research.

Keywords : column, steel truss bridge, steel arch bridge, box section, ultimate strength
 キーワード : 圧縮部材, 鋼トラス橋, 鋼アーチ橋, 箱形断面, 耐荷力

1. はじめに

わが国の鉄道鋼・合成構造物および港湾構造物の設計は、許容応力度設計法から部分係数法による限界状態設計法へ移行した。また、土木学会の鋼・合成構造標準示方書も最新成果を反映した性能照査型設計法に改定が行われている。さらに、現在道路橋示方書は、部分係数法を用いた性能照査型設計法への改定に向けた作業が進められている。このように、わが国の各機関の基準類の性能照査型設計法への移行は、従来の形態と設計思想を踏襲した建設から、より合理的で自由な、しかも経済的な設計システムの構築を可能にするものであり、新材料、

新構造形式の開発の取組、および国際競争力アップに向けた戦略上においても重要である。

このような状況において、これまで鋼橋の座屈設計は、部材の座屈強度照査(安定照査)、応力度照査、構造系の全体座屈強度照査などを実施して安全性を確保しているが、これらの照査において重要な柱の基準耐荷力曲線は、これまで下限値に近い唯一の基準耐荷力曲線を採用している。この基準耐荷力曲線については、以前から実際の耐荷力の実験データや諸外国の基準類に比べて安全側であることが指摘され、同程度の強度を有する柱を断面形や製造法、座屈軸方向などごとに整理してグループ化し、それぞれに対応する複数耐荷力曲線を設定、採用するこ

とが要望されてきた¹⁾。

最近、既往の研究や海外基準を踏まえると、耐荷力に影響を与える断面形状などに応じて強度分類することにより、耐荷力曲線を合理的に設定できる余地があることから、鋼橋を構成する圧縮力を受ける部材の実績調査に基づいて、柱の基準耐荷力曲線の見直しが検討されてきた²⁾。その結果、平成24年3月に改定された道路橋示方書(以後、H24道示と呼称)³⁾では、溶接箱断面部材に対して従来の基準耐荷力曲線に比してより高強度の耐荷力曲線が新たに規定された。

さらに、経済的な鋼橋の実現および合理的な設計を目指して、従来の構造用鋼材に対して高降伏点鋼であるSBHS鋼材^{4)~6)}が開発され、JIS化された。しかし、これまでに東京ゲートブリッジや永田橋など数橋に採用されているものの、その適用実績は少ない。この鋼材がJIS化されたのに伴い、より適用の拡大を図るためには公的機関の基準類⁷⁾に規定化されることが望まれるため、これまでに実績の少ないSBHS鋼材を用いた溶接箱断面圧縮部材⁸⁾⁹⁾、材料特性¹⁰⁾および鋼桁¹¹⁾の耐荷力特性などの活発な研究が推進されており、今後のデータ蓄積が期待される。

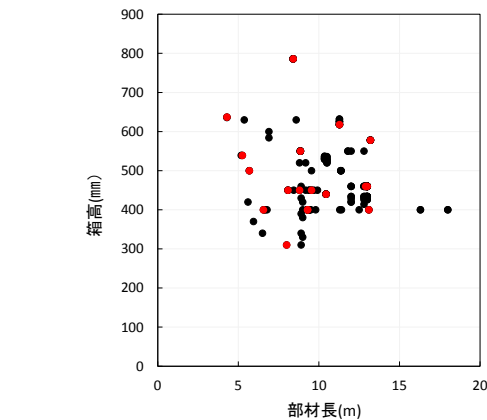
このような背景において、本研究では鋼アーチ橋および鋼トラス橋の圧縮部材として適用頻度の高い溶接箱断面部材に着目し、実橋圧縮部材の耐荷力特性および新たな耐荷力曲線の推定に向けた検討を目的としている。まず平成14年度版道路橋示方書(以後H14道示と呼称)¹²⁾の許容応力度設計法により設計された鋼トラス橋および鋼アーチ橋を構成する溶接箱断面圧縮部材の断面寸法、材質、初期不整、補剛材寸法などの実績を調査する。その後、採用された実橋の溶接箱断面圧縮部材を対象にして、断面形状、初期不整、材質などのパラメータによる耐荷力への影響を解析的に明らかにし、改定されたH24道示の基準耐荷力曲線との比較検証を行うとともに溶接箱断面圧縮部材の新たな耐荷力曲線の推定を試みる¹³⁾¹⁴⁾。

2. 実績調査

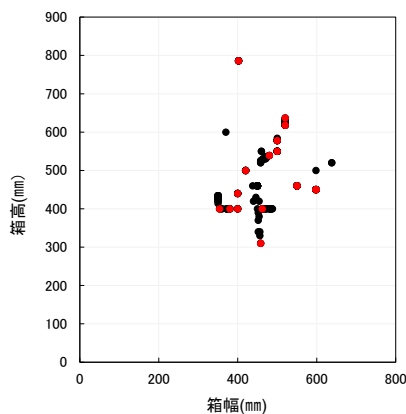
2.1 鋼トラス橋

H14道示に基づき架設された橋梁について、日本橋梁建設協会(以後、橋建協と呼称)のご協力により提供いただいた20橋の鋼トラス橋データに基づき、トラス橋を構成する部材の断面寸法、材質の実績を整理した。

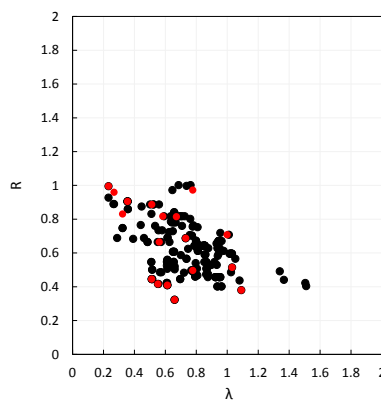
調査した20橋に対して、ワーレントラス橋梁の13橋を選択し、その橋梁を構成する圧縮部材として外形寸法の判明している167部材を抽出した。これらの抽出した部材は、無補剛箱断面を有する斜材および弦材であり、その箱断面の箱高と部材長の関係、箱高と箱幅の関係、換算幅厚比と換算細長比の関係および材質と最大幅厚比の関係を図-1に示す。ここに、 λ は式(1)で与えられる換算細長比、 R は式(2)で与えられる換算幅厚比である。式中の σ_y は降伏応力、 E はヤング係数、 L は有効座屈屈長(部材長)、 r は断面2次半径、 L/r は細長比、 μ はポアソン比、 b は板幅、 t は板厚、 b/t は幅厚比、 k は座屈係数(両縁支持板の場合4.0)を意味する。



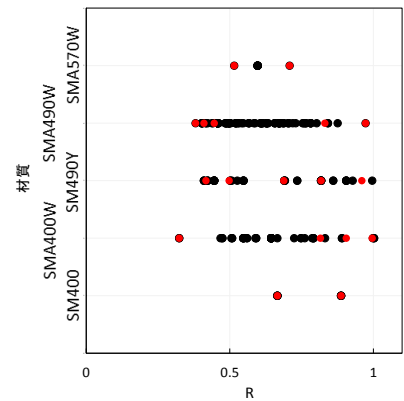
(a) 箱高～部材長の関係



(b) 箱高～箱幅の関係



(c) R～λの関係



(d) 材質～最大幅厚比の関係

図-1 トラス橋圧縮部材の実績分布

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{L}{r} \quad (1)$$

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

図-1(a)において、弦材および斜材の格点間の部材長は概ね 5~13m に分布しており、箱高との相関性は見られない。(b)より箱高は概ね 300~650mm に、箱幅は 350~600mm に分布している。また、(c)において、換算幅厚比は概ね 0.4~1.0 の領域に、換算細長比は 0.2~1.5 の範囲に分布している。また、換算幅厚比と換算細長比の間には線形的な相関性が多少見られ、換算細長比の増大に伴って換算幅厚比は低下傾向を示している。最後に、(d)より本トラス部材は SM400, SMA400W, SM490Y, SMA490W, SM570W の鋼材が使用されている。

これらの部材の中から解析対象として抽出する部材は、13 橋から各々最低でも 1 断面を抽出すること、さらに図-1(d)における全材質および最大幅厚比の最大値、最小値および中間値を包含する断面をバランスよく選ぶことを条件に、図中の赤丸印の 18 断面を採用した。その断面諸元を表-1 にまとめた。なお、表中の断面 No.において、例えば断面 TC-1 および TD-1 は各々トラス橋弦材および斜材の断面 1 を意味

する。また、 A は断面積、 I_z , r_z は各々 z 座標軸に関する断面 2 次モーメント、断面 2 次半径、 t_f , t_w は各々フランジおよび腹板の板厚を表している。

2.2 鋼アーチ橋

トラス橋と同様に、H14 道示以降で設計された鋼アーチ橋に対して、橋建協より提供された 29 橋の鋼アーチ橋データに基づき実績を整理した。アーチリブとして適用頻度の高い溶接箱断面部材については、文献 2)において一般構造用鋼材を用いた実橋断面レベルの解析的検討はすでに実施されていることから、ここでは高強度材料である SM570 に着目し、適用している 12 橋を選択した。その箱断面の箱高と橋長の関係、箱高と箱幅の関係および換算幅厚比と換算細長比の関係を図-2 に示す。ここに、式(3)で与えられる換算幅厚比 R_R における k_R は、座屈係数($4n^2$, n : 補剛材で区切られるパネル数)を意味する。

$$R_R = \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k_R} \frac{b}{t}} \quad (3)$$

図-2(a)において、調査対象としたアーチ橋の橋長は、20~350m に分布しており、箱高との間に線形の相関が見られる。つまり、橋長の増加とともに箱高も高くなる傾向にある。(b)よりアーチリブの箱高は 500~2500mm と幅広く分布しており、これに

表-1 採用したトラス橋圧縮部材の断面諸元

断面No.	TD-1	TD-2	TD-3	TD-4	TD-5	TD-6	TD-7	TD-8	TD-9
材質	SMA490W	SMA400W	SMA490W	SM400	SM490Y	SM400	SMA400W	SMA570W	SMA570W
断面 (mm)	380×9 400×9 400×9 380×9	354×22 400×22 400×22 354×22	462×29 400×23 400×23 462×29	598×16 450×16 450×16 598×16	598×16 450×16 450×16 598×16	598×12 450×12 450×12 598×12	458×10 310×10 310×10 458×10	550×30 440×16 440×16 550×30	550×38 460×22 460×22 550×38
A (mm ²)	13716	31240	42528	32512	32512	24576	14960	45800	58696
I_z (mm ⁴)	345087132	722451253	1077274816	1096262357	1096262357	843126048	246824667	1698566667	2073625781
r_z (mm)	159	152	159	184	184	185	128	193	188
L/r	60.99	67.39	76.86	41.68	35.3	38.18	46.07	66.1	66.67
λ	0.78	0.66	1.09	0.56	0.58	0.51	0.67	1	1.03
b/t_f	42.22	16.09	15.93	37.38	37.38	49.83	45.8	18.33	14.47
b/t_w	44.44	18.18	17.39	28.13	28.13	37.5	31	28.75	20.91
R	0.97	0.32	0.38	0.67	0.82	0.89	0.82	0.71	0.52
断面No.	TC-1	TC-2	TC-3	TC-4	TC-5	TC-6	TC-7	TC-8	TC-9
材質	SM490Y	SM490Y	SM490Y	SMA490W	SMA400W	SMA490W	SMA400W	SMA490W	SM490Y
断面 (mm)	620×32 618×33 618×33 520×34	620×13 637×14 637×14 620×15	600×32 550×27 550×27 500×32	820×22 578×35 578×35 500×22	600×11 539×10 539×10 480×9	470×22 440×14 440×14 400×22	500×10 500×16 500×16 420×9	500×21 400×21 400×21 400×21	480×28 786×19 786×19 402×28
A (mm ²)	69500	22660	31460	25200	54564	78308	33696	64900	35700
I_z (mm ⁴)	3521584001	1010180459	1126087865	908238571	5355883640	4660542414	2019955650	3418769579	885522328
r_z (mm)	225	211	189	190	313	244	245	229	157
L/r	58.64	24.87	55.19	29.95	26.81	46.21	17.54	38.56	41.65
λ	0.78	0.27	0.73	0.32	0.36	0.61	0.23	0.51	0.55
b/t_f	22.73	53.33	18.18	46.67	14.36	15.29	34.67	15.63	19.05
b/t_w	16.51	53.9	31.43	31.25	41.37	18.73	45.5	20.37	19.05
R	0.5	0.96	0.69	0.83	0.91	0.41	1	0.45	0.42

対して箱幅は 900~1300mm の狭い範囲の箱幅を採用している。また、全体的には線形の相関が見られる。最後に、(c)に示すように換算幅厚比と換算細長比の関係には相関性が見られない。

これらの部材の中から解析対象として抽出する部材は、補剛材の有無などを考慮して、図-2 中の赤丸印で示したアーチリブの 7 断面を抽出した。選択した 7 断面の断面諸元を表-2 に示す。A-3 および A-4 の 2 断面は、無補剛断面である。なお、表中の例えば 1FR, 2WR は、各々フランジに 1 本の補剛材が、腹板に 2 本の補剛材が設置されていることを意味している。

また、SBHS500 の箱断面部材への適用性を検討するため、上記に抽出した SM570 の箱断面圧縮部材に SBHS500 を適用した場合の耐荷力解析を実施し、現行の基準耐荷力曲線との比較検討を行う。なお、選定した 7 断面を持つ圧縮部材への SBHS500 の適用は、道示における SM570 鋼材に対する許容応力度の考

え方が SBHS500 にも適用できることを前提としている。

2.3 材料構成則

最近、鋼材の材料強度特性についての詳細な調査分析結果が報告されている¹⁵⁾。箱断面圧縮部材の耐荷力特性を解析的に明らかにする上で重要となる材料構成則については、この文献の詳細なデータを参考にした図-3 のような応力~ひずみ曲線が提示されている¹⁶⁾。本解析では、この 5 点折れ線近似曲線を適用する。なお、SBHS 鋼材の構成則は、最近参考文献 10), 11)などで報告されている。それらの研究成果では、板厚 9, 12, 32mm を有する SBHS 鋼材の引張試験が実施されており、降伏応力度 σ_y および引張強度 σ_B 、さらに降伏比 σ_y/σ_B は JIS 規格値によるそれに比してより大きな値を示している。しかし、データ数が十分でないため、本研究の SBHS500 の構成則は JIS 規格値を基礎にした図中に示すような 5 点折

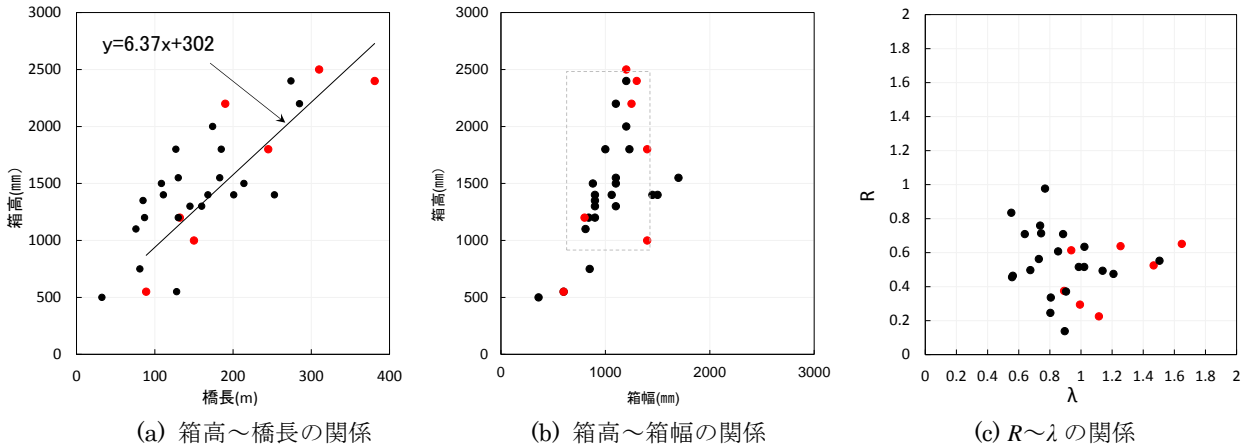
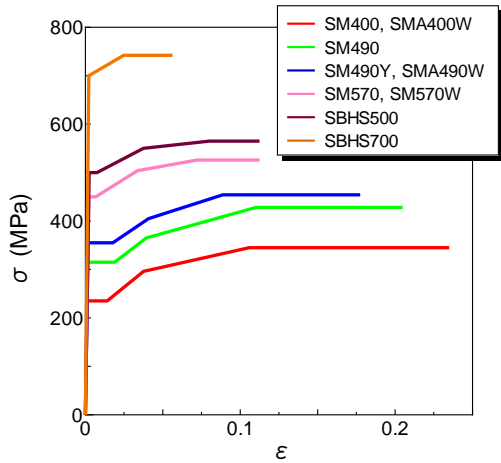


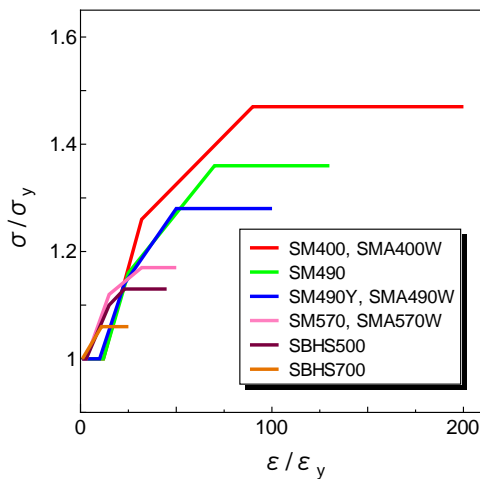
図-2 アーチ橋圧縮部材の実績分布

表-2 採用したアーチ橋アーチリブの断面諸元

断面No.	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
材質	SM570	SM570	SM570	SM570	SM570	SM570	SM570
断面 (mm)	1225×28	1200×30			800×22	1400×32	1300×20
	2200×21	2500×30			1000×22	1800×32	2400×21
	2200×21	2500×30	1400×55	600×19	1000×22	1800×32	2400×21
	1225×28	1200×30	1000×55	550×19	800×22	1400×32	1300×20
	1FR 190×19	1FR 250×28	1000×55	550×19	1FR 140×16	1FR 250×25	1FR 250×19
1FR 190×19	1FR 250×28	1400×55	600×19	1FR 140×16	1FR 250×25	1FR 250×19	
3WR 150×22	2WR 250×28			2WR 150×22	2WR 230×22	3WR 190×19	
3WR 150×22	2WR 250×28			2WR 150×22	2WR 230×22	3WR 190×19	
A (mm ²)	188020	2604000	2604000	43700	105680	237540	183960
$I_y \times 10^{-11}$ (mm ⁴)	0.312	0.35	0.511	0.016	0.06	0.422	0.273
$I_z \times 10^{-11}$ (mm ⁴)	1.224	1.933	0.521	0.024	0.195	1.063	1.245
r_y (mm)	407	364	440	191	238	422	385
r_z (mm)	807	856	444	233	429	669	823
L/r	44.07	57.7	33.6	45.54	39.92	43.17	67.5
λ	0.67	0.86	0.5	0.68	0.6	0.64	1.01
b/t_f	43.75	40	25.46	31.58	36.36	43.75	65
b/t_w	104.76	83.33	18.18	28.95	54.54	56.25	114.29
R_R	0.65	0.69	0.63	0.79	0.45	0.54	0.81



(a) 応力～ひずみ関係のモデル化



(b) 無次元化した応力～ひずみ関係

図-3 応力～ひずみ曲線

れ線近似曲線を用いる^{16),17)}。なお、解析における降伏応力度には、統一的評価を試みるため規格値を用いる。

2.4 残留応力と初期たわみ

初期不整を代表する残留応力に関する既往の研究成果として、様々な材質を用いた溶接箱断面部材の残留応力を計測したものを対象とすると、文献 1), 11), 18)~25)を挙げることができる。これらのデータを幅厚比別に降伏応力度に対する圧縮残留応力度の比で整理した結果を図-4 に示す。この図より、圧縮残留応力の比と幅厚比に相関性は見受けられないが、圧縮残留応力が概ね $\sigma_{rc}=0.25\sigma_y$ 以下であることがわかる ($0.25\sigma_y$ 以上であるデータは板厚 4.4mm および板厚 88 mm の 2 データのみである)。なお、既往の研究成果のうち、板厚が 8mm 未満の結果については道示の規定により溶接箱断面部材としては用いないことになる。

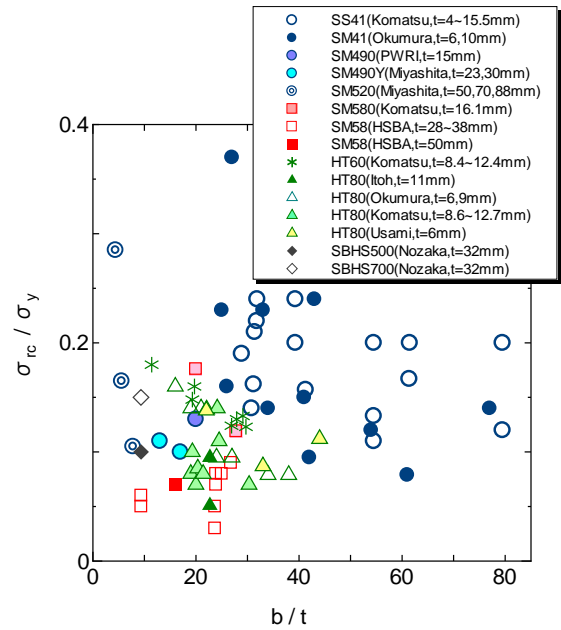


図-4 溶接型圧縮残留応力分布

これまで、各種基準類における柱の基準耐荷力曲線を規定する際に採用している圧縮残留応力度は $\sigma_{rc}=0.4\sigma_y$ であることを考慮すると、調査結果のデータ値はかなり小さいことがわかる。このような結果を踏まえて、H24 道示では箱断面部材に対して $\sigma_{rc}=0.25\sigma_y$ が採用されている。さらに、高強度鋼材について着目すると、圧縮残留応力は $\sigma_{rc}=0.2\sigma_y$ 以下とさらに小さな値となる。したがって、SM570, HT60, HT80 さらに SBHS500,700 などの高強度部材の圧縮残留応力は、 $\sigma_{rc}=0.2\sigma_y$ を採用できる可能性がある。

なお、一般に、小型供試体の圧縮残留応力は実断面のそれに比較して大きめの値となることが報告されている。また、数は少ないが補剛箱断面部材の実測引張残留応力についての調査結果では、 $\sigma_{rt}=0.67\sim 1.0\sigma_y$ の範囲に分布しており、一般的に数値解析では $\sigma_{rt}=1.0\sigma_y$ が多く採用されている。

したがって、本解析では一般構造用鋼材には $\sigma_{rc}=0.25\sigma_y$ を、SM570 および SBHS500 の高強度鋼材には $\sigma_{rc}=0.2\sigma_y$ の圧縮残留応力を採用する。また引張残留応力には $\sigma_{rt}=1.0\sigma_y$ を用いて検討する。

初期たわみについては、今回の調査において実績データが極めて少なかったため、道示において部材の寸法精度として規定している圧縮材の曲がりに対する部材長の 1/1000 を基本値としたパラメータを適用する。さらに、板の平坦度については、部材腹板には腹板高の 1/250、フランジには腹板あるいはリブ間隔の 1/150 の規定値を用いる。

3. 数値解析手法と解析モデル

解析には、汎用有限要素法解析ソフトウェアMSC.Marc2011²⁶⁾を用い、材料非線形と幾何学的非線形を考慮した複合非線形解析(弾塑性有限変位解析)を行う。その非線形数値計算には弧長増分法+NR法を用いる。また、FEM要素にはシェル要素を採用し、数値計算の収束性を考慮した上で、板厚方向には5以上の積分点を設定した。ただし、計算機の都合上、積分点の数は11を上限としている。

3.1 耐荷力評価パラメータ

圧縮部材の耐荷力特性の解明には、実験的・解析的検討が不可欠であるが、本研究では、弾塑性有限変位解析による解析的検討により耐荷力特性を明らかにする。圧縮部材の耐荷力に大きな影響を与えるのは、良く知られているように1) 初期不整(残留応力, 初期たわみ)の大きさや分布・形状, 2) 応力-ひずみ関係の非線形性, 3) 降伏点の断面内のばらつき, 4) 断面形状(箱断面, H断面, T断面, L断面など), 5) 鋼材自体の寸法のばらつき, 6) 端部拘束条件などである²⁷⁾。

本研究では、特に1), 2)に着目してパラメトリック解析を行う。具体的には、表-3のようなパラメータを考慮する。

表-3 解析パラメータ

パラメータ	形状など	パラメータ値など
初期たわみ	正弦半波	$v^0 = L/1000, L/1500, L/5000$
残留応力	理想三角形分布	無, $\sigma_{rl}/\sigma_y = 1.0, \sigma_{rc}/\sigma_y = 0.2 \sim 0.6$
構成則	折線近似モデル	図-3 参照
細長比	部材長Lの変化	$L/r = 0.1 \sim 2.0$
断面形状	箱断面	補剛材の有無 ダイヤフラムの有無

3.2 解析モデル

耐荷力評価は、下記の解析条件のもとで実施する。

(1) 荷重条件, 境界条件および要素分割

荷重・荷重点, 境界条件は、図-5に示すように端部の中立軸位置とし、初期たわみのない状態で部材に圧縮力のみ

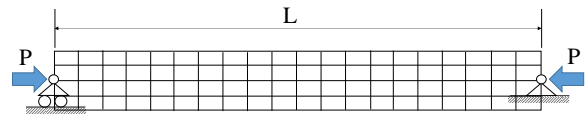


図-5 荷重・境界条件

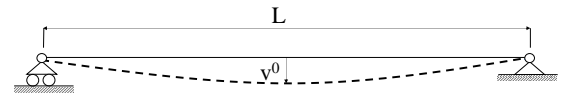


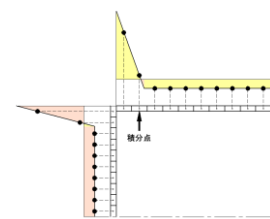
図-6 初期たわみの形状モデル

が作用するように、部材軸方向に偏心のない状態として作用する。境界条件は、図-5のように部材両端の弱軸周りをピンとし、強軸周りを固定する。左端部は水平方向移動と弱軸周りの回転を許し、強軸周りを固定にしている。右端部は回転のみ許している。解析モデルの境界部は、載荷点の局所変形を防ぐため薄い剛体板を当てて、一様圧縮力を作用するようにした。

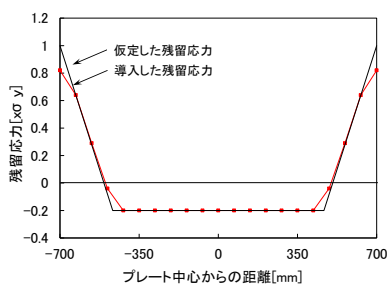
部材のモデル化はフルモデルとし、解析要素には、シェル要素を適用する。部材軸方向の要素分割については、応力に対して予想される座屈モードが表現できるように要素を細かく分割する。その部材軸方向分割はできるだけ等間隔とし、シェル要素のアスペクト比を、最大で3以下とする。また、換算細長比 λ の値にかかわらず断面内の分割数は、無補剛断面の腹板・フランジ共に20要素とし、補剛断面はリブ間を10要素にして、残留応力分布が精度よく導入できるように分割した。

(2) 初期たわみ

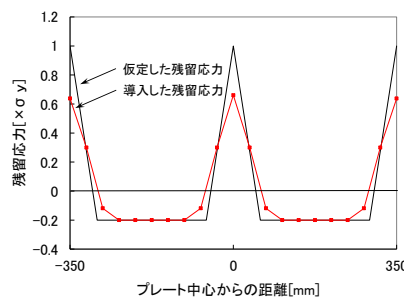
部材の初期たわみは、図-6の破線のような部材軸に対して最大鉛直変位 $v^0 = L/1000, L/1500, L/5000$ の3ケースを与えるものとする。その形状は、部材長に対して正弦半波を仮定する。なお、2.4で述べたようにフランジおよび腹板の初期たわみ(板の平坦度)は、これまでの事前の



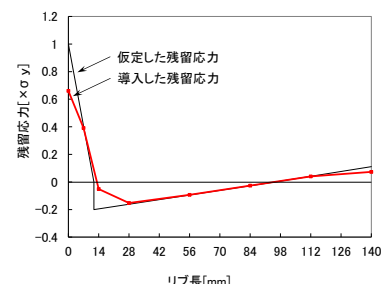
a) 断面内要素分割と積分点



b) 無補剛フランジ断面($\sigma_{rc} = 0.25\sigma_y$)



c) 補剛フランジ($\sigma_{rc} = 0.2\sigma_y$)



d) 補剛材($\sigma_{rc} = 0.2\sigma_y$)

図-7 残留応力分布の導入例

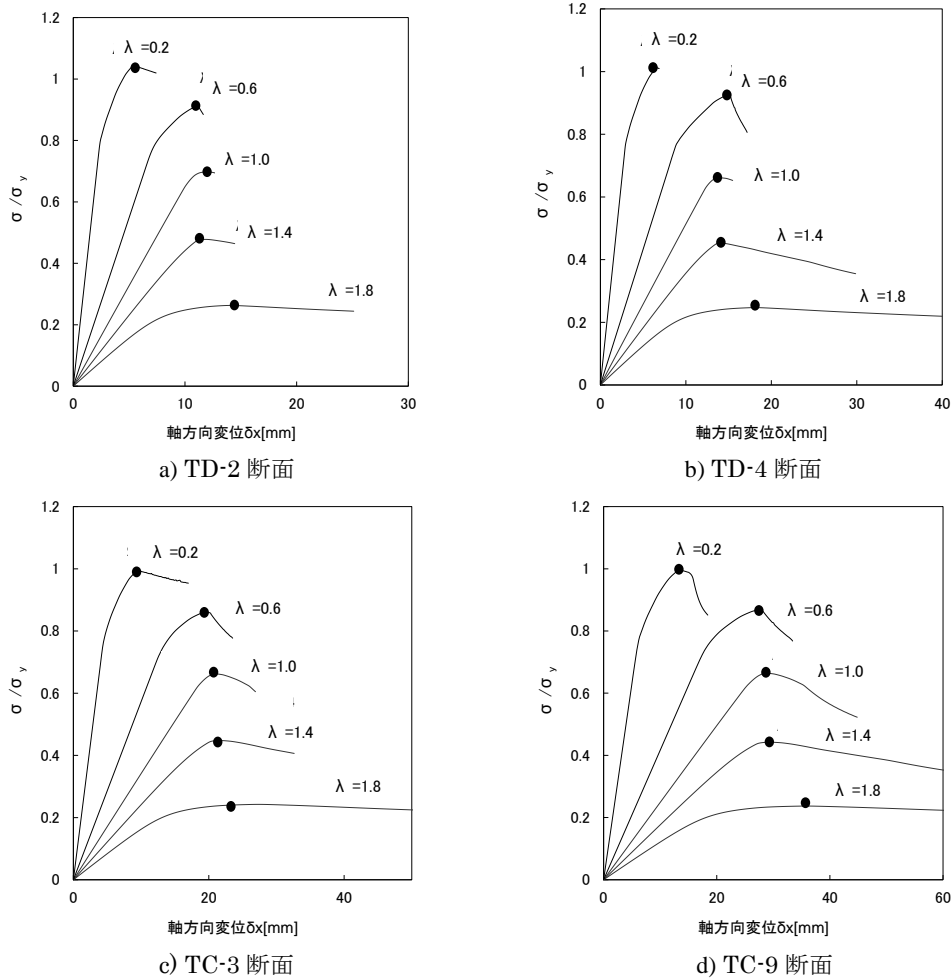


図-8 トラス橋部材の荷重～変位曲線($\sigma_{rc}=0.25\sigma_y$, $L/1000$)

解析的検討²⁸⁾において、その耐荷力への影響は小さいことおよび連成座屈は考慮しないものとして、ここでは省略している。

(3) 残留応力

残留応力は、図-7 a)のように断面内で自己つり合いが取れるように積分点に圧縮および引張残留応力を導入する。具体的には、フランジ、腹板、および縦リブで区切られたパネルおよび縦リブの各面内における引張残留応力と圧縮残留応力の面積を等しくする。縦リブの残留応力は、取り付けられているパネル板厚中心位置まわりにおいて、残留応力×距離の合計が0になるように決定している。

いま、入力設定した理想的残留応力分布(黒線)に対して無荷重状態におけるプログラムを実行し、その時の実際の自己つり合い状態にあるフランジおよび補剛材(リブ)の残留応力分布を赤線で示したのが図-7 b), c), d)である。無補剛フランジの残留応力はほぼ入力値が導入されている。また、補剛フランジや補剛材の残留応力は、図-7 c), d)に示すように引張残留応力が多少入力値を下回る断面もあるが、ほぼ設定値が導入されている。

なお、残留応力の具体的な大きさは、表-3 におい

て、引張残留応力は降伏応力を設定し、圧縮残留応力はトラス橋部材において $\sigma_{rc}/\sigma_y = 0, 0.2, 0.25, 0.4, 0.6$ の5 ケースを、アーチ橋部材において $\sigma_{rc}/\sigma_y = 0, 0.1, 0.2, 0.4$ の4 ケースをパラメータとした。

(4) 補剛材とダイヤフラム

選定したトラス橋圧縮部材は、すべて無補剛の箱断面であり、ダイヤフラムも設置されていない。一方、アーチリブ断面は、無補剛断面および補剛断面が存在している。また、ダイヤフラムの設置については、図面から読み取ることが困難な部材が多いため、補剛断面部材およびダイヤフラム設置諸元が明確な部材のみモデル化している。

4. 圧縮部材の耐荷力特性

トラス橋の圧縮部材は、表-1 に示す鋼材の異なる13橋の無補剛断面を有する弦材と斜材の18断面を、アーチ橋では、表-2 に示す SM570 の高強度鋼材を用いたアーチリブの7断面を対象にして、3.の解析条件に基づき弾塑性有限変位解析を実施した。なお、前述したように、アーチリブ断面については、抽出した SM570 の箱断面圧縮部材に SBHS500 を適用し

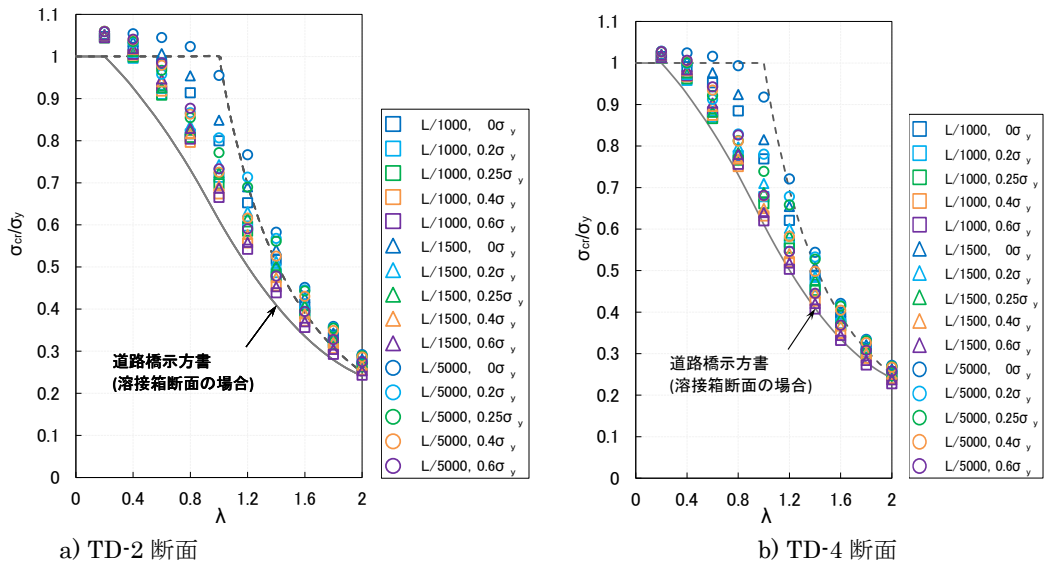


図-9 初期不整の耐荷力への影響(斜材)

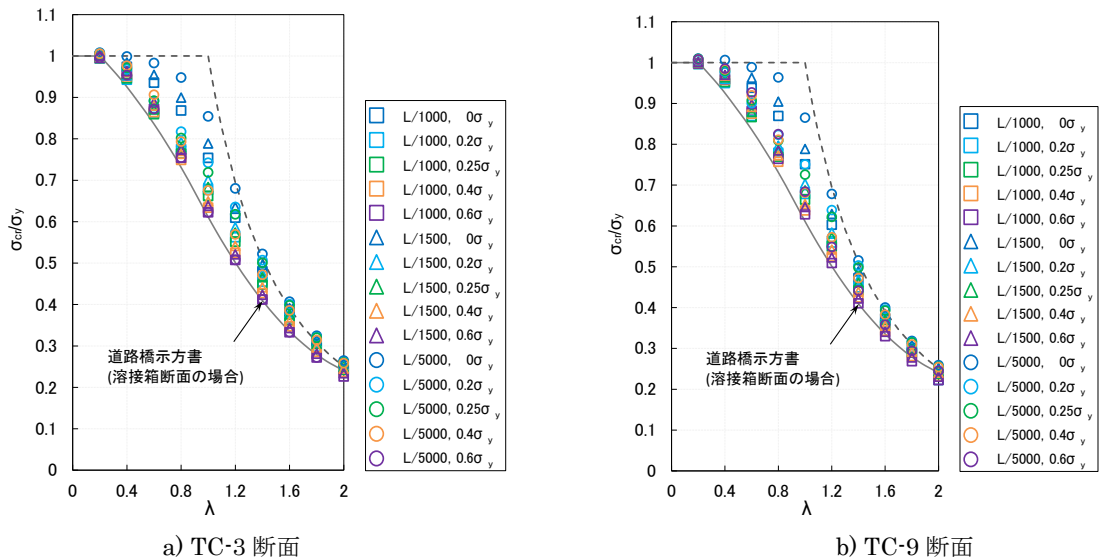


図-10 初期不整の耐荷力への影響(弦材)

た場合の耐荷力解析をも実施した。

4.1 トラス橋圧縮部材

ここでは、弦材 TC-3, TC-9 および斜材 TD-2, TD-4 の4断面部材の耐荷力解析結果について述べる。

(1) 荷重～変位関係

図-8 は、初期たわみ $L/1000$ 、圧縮残留応力 $\sigma_{rc}=0.25\sigma_y$ の初期不整を有する部材の λ をパラメータにした荷重と軸方向変位の関係を示す。4 ケースともに黒印で示した最大荷重 σ_{cr} を捉えた荷重～変位曲線が算出されており、 λ の増加とともに最大荷重が低下している曲線が得られた。表-3 の解析パラメータに対する全ケースにおいて、同様な解析結果が得られている。

(2) 基準耐荷力曲線との比較

いま、初期不整として初期たわみ $v^0/L=1/1000$ 、

$L/1500$, $L/5000$ および圧縮残留応力 $\sigma_{rc}/\sigma_y=0.0, 0.2, 0.25, 0.4, 0.6$ をパラメータにした耐荷力解析により得られた斜材および弦材の耐荷力曲線を示したのが各々図-9 および図-10 である。なお、図中には H24 道示²⁾の溶接箱断面部材の基準耐荷力曲線を実線で載せている。

初期たわみ $v^0/L=1/1000$ を有する斜材の耐荷力曲線は、図-9 から明らかなように圧縮残留応力の増大にともない耐荷力は低下している。 $\sigma_{rc}=0.6\sigma_y$ の解析結果の下限値は、H24 道示の溶接箱断面の基準耐荷力曲線に漸近しているが、 $\sigma_{rc}=0.25\sigma_y$ の解析結果はより高い値を示している。さらに、解析解は幅厚比の小さいほど(板厚が厚い)耐荷力は高くなる。

初期たわみ $v^0/L=1/1500$ の耐荷力は、圧縮残留応力が増大するにしたがって中間柱領域の耐荷力の低下は $v^0/L=1/1000$ のそれに比して大きい。また、b) に示

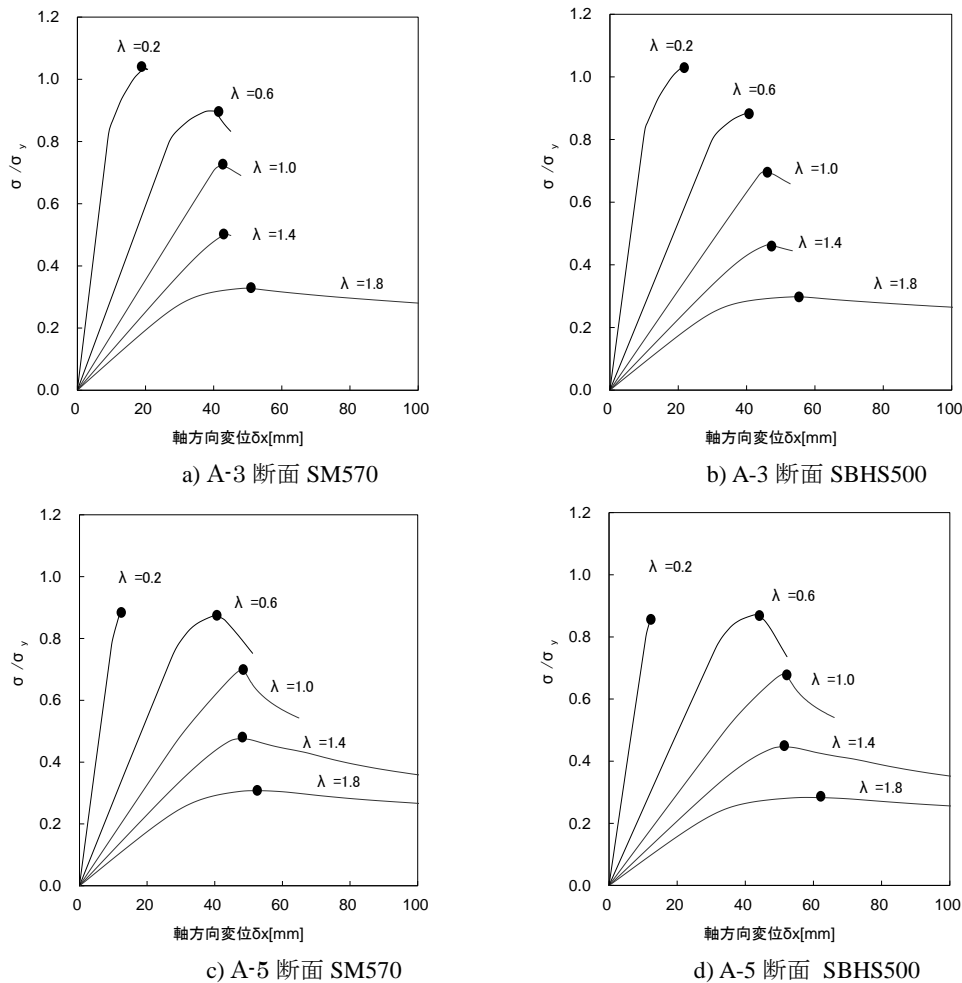


図-11 アーチ部材の荷重～変位曲線($\sigma_{rc}=0.2\sigma_y$, $L/1000$)

す $\sigma_{rc}=0.25\sigma_y$ の解析解は H24 道示の溶接箱断面部材の基準耐荷力曲線より高い値を示している。

さらに、非常に小さい初期たわみ $v^0/L=1/5000$ の場合は、残留応力を考慮しない a) の場合ほとんどオイラー曲線に一致している。また、圧縮残留応力が增大するにしたがって $\lambda=0.6\sim 1.0$ の中間柱領域の耐荷力低下が著しい。しかし、得られた耐荷力曲線は λ の全領域にわたって基準耐荷力曲線よりかなり高め の値となった。

初期たわみの相違を比較すると、耐荷力は初期たわみが大きくなるにしたがって低下しているが、溶接箱断面部材の基準耐荷力曲線を下回る解析解は見られない。

次に、初期たわみ $v^0/L=1/1000$ を有する弦材の耐荷力をまとめたのが図-10 である。圧縮残留応力の違いによる耐荷力曲線の傾向は、初期たわみ $v^0/L=1/1000$ を有する斜材のそれと同様であるが、H24 道示の溶接箱断面の基準耐荷力曲線に漸近している。

4.2 アーチリブ

ここでは、紙面の都合上、7 断面の中で無補剛圧縮部材 A-3 および補剛圧縮部材 A-5 断面部材に対す

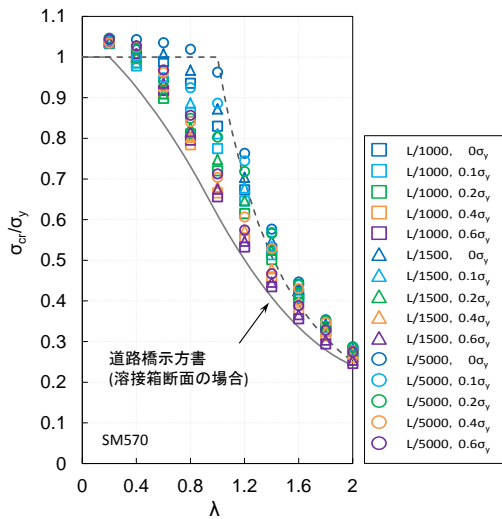
る耐荷力解析結果について述べる。

(1) 荷重～変位関係

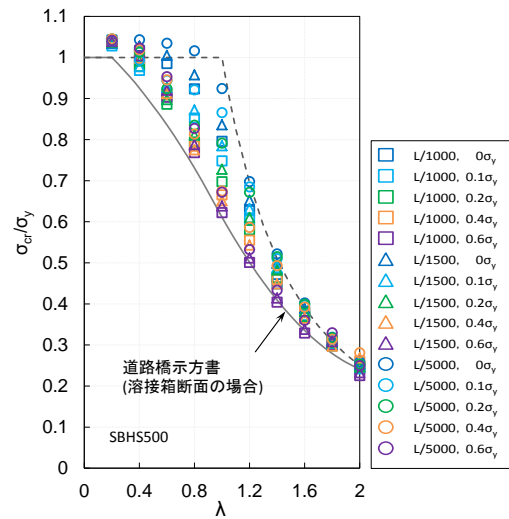
圧縮残留応力 $\sigma_{rc}=0.2\sigma_y$ 、初期たわみ $L/1000$ の場合における SM570 および SBHS500 を用いた部材の荷重～軸方向変位関係は、換算細長比 λ をパラメータにして図-11 のような曲線を得た。図-11 の a), b) は A-3 部材、c), d) は A-5 部材の荷重～軸方向変位曲線を示す。

A-3 部材は、図-11 a), b) から明らかなように最大荷重を捉えた荷重～変位曲線を算出しており、 λ の増大に対して最大荷重が低下している。A-5 部材は、図-11 c), d) に示すように $\lambda=0.2$ の短柱の場合以外は A-3 部材と同様に最大荷重を含めた曲線が得られている。しかし、 $\lambda=0.2$ の短柱の荷重～変位曲線は、最大荷重に達する前に解析が終了している。これは、補剛断面の複雑な残留応力の影響により初期降伏後まもなく局部座屈が発生した後、解析が全体座屈との連成座屈挙動となり、その後の荷重増分に対して所要収束回数に達して終了したものであり、正しい最大荷重が得られていない。

最後に、両断面の SM570 と SBHS500 の耐荷力の無次元量 σ_{cr}/σ_y を比較した場合、A-3 断面の場合

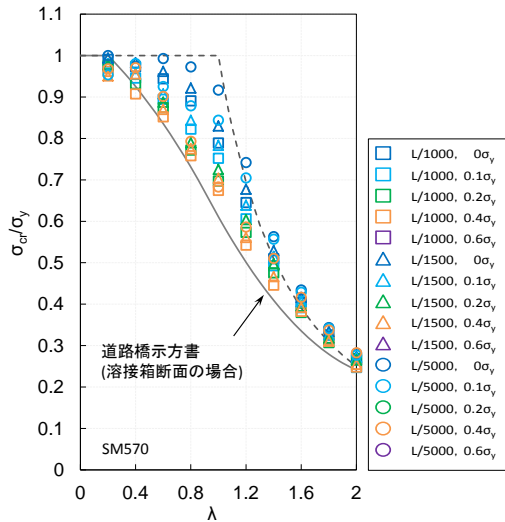


a) A-3 断面 SM570

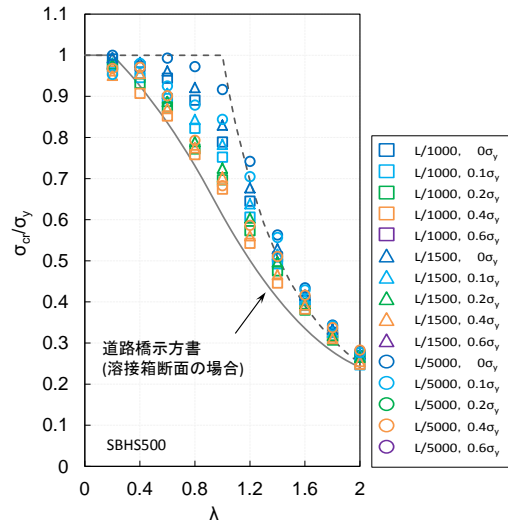


b) A-3 断面 SBHS500

図-12 初期不整の耐荷力への影響



a) A-5 断面 SM570



b) A-5 断面 SBHS500

図-13 初期不整の耐荷力への影響

SM570 に比較して SBHS500 のピーク点が最大 8% 低下しており、 λ の大きな長柱領域での低下が大きい。また A-5 断面では A-3 断面ほどの相違はみられないが多少 SBHS500 のそれが低い。これは、図-3 の関係から明らかなように SBHS500 の降伏応力度が SM570 のそれに比して高いことによるものである。したがって、実際の耐荷力 σ_{cr} は長柱領域において SM570 と SBHS500 の耐荷力は同等であるが、短柱および中間柱領域では SBHS500 の方が高めの値を示している。

(2) 基準耐荷力曲線との比較

初期不整として初期たわみ $v^0/L=1/1000, 1/1500, 1/5000$ および圧縮残留応力 $\sigma_{rc}/\sigma_y=0.0, 0.2, 0.25, 0.4, 0.6$ をパラメータにした SM570 および SBHS500 の耐荷力解析により得られた A-3 断面および A-5 断面アーチリブの最大強度と換算細長比の耐荷力の関係を

示したのが各々図-12 および図-13 である。

A-3 および A-5 部材ともに初期たわみ、さらに圧縮残留応力が大きくなるにしたがって耐荷力は低下している。特に、中間柱の耐荷力の低下が著しい。初期不整の違いによる耐荷力への影響は A-3 と A-5 断面と同様の傾向を示している。A-3 断面では SBHS500 の耐荷力曲線は SM570 のそれに比して低下しているが、A-5 断面においては材質の相違はほとんど見られない。

なお、A-5 部材の $\lambda=0.2, \lambda=0.4$ の短柱領域の耐荷力が $\sigma_{cr}/\sigma_y=1$ を多少下回ったのは、(1)において述べたように数値解析上ピーク点が十分な精度で得られていないことが要因であり、ここでは、その収束値をそのまま載せている。したがって、短柱領域における解析結果には注意が必要である。

5. 耐荷力曲線に関する検討

5.1 圧縮部材の基準耐荷力曲線の現状

H24 道示以前において、圧縮部材の基準耐荷力曲線は、式(4)の唯一曲線で規定されていた。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} &= 1.0 & (\lambda \leq 0.2) \\ \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} &= 1.109 - 0.545\lambda & (0.2 < \lambda \leq 1.0) \\ \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} &= \frac{1}{0.773 + \lambda^2} & (1.0 < \lambda) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

しかし、H24 道示では設計の合理化の観点から、圧縮部材として適用頻度の高い溶接箱断面部材を対象にして、圧縮残留応力を $\sigma_{rc}/\sigma_y = 0.25$ 、初期たわみを $L/1000$ を基本にして、新たに式(5)の基準耐荷力曲線を規定した。したがって、現在圧縮部材の基準耐荷力曲線は、溶接箱断面部材以外の場合の式(4)と溶接箱断面部材の式(5)から成る2本の基準耐荷力曲線を定めている。いま、これらの耐荷力曲線を図-14の黒実線および黒破線で示す。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} &= 1.0 & (\lambda \leq 0.2) \\ \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} &= 1.059 - 0.258\lambda - 0.19\lambda^2 & (0.2 < \lambda \leq 1.0) \\ \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} &= 1.427 - 1.039\lambda^2 + 0.223\lambda^3 & (1.0 < \lambda) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

一方、Eurocode(1983年)では、圧縮部材を5グループに分け、各々の耐荷力曲線 a_0, a, b, c, d を定めている¹⁾。これらの複数耐荷力曲線は、式(6)のPerry-Robertson式により表示でき、ECCS-aとECCS-b曲線を図-14に載せた。なお、式中の α, λ_0 のパラメータは表-4で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} &= 1.0 & (\lambda_0 \geq \lambda) \\ \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} &= \frac{1}{2\lambda^2} \left[1 + \alpha(\lambda - \lambda_0) + \lambda^2 \right. \\ & \quad \left. - \sqrt{\{1 + \alpha(\lambda - \lambda_0) + \lambda^2\}^2 - 4\lambda^2} \right] & (\lambda_0 < \lambda) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

米国のSSRCガイド5th ed.(1998年)においては、3グループの複数耐荷力曲線を定めている。ここでは、特にSSRC-2の曲線を図-14に載せている。さらに、我が国の土木学会²⁾では、表-4の係数による3グループの複数耐荷力曲線を提案しており、Group-1の曲線を図中に載せた。

図-14から明らかなようにH24道示の新しい耐荷力曲線は、SSRC-2およびECCS-b曲線に類似している。なお、H24道示の新耐荷力曲線は長柱領域において少し高め曲線となっている。

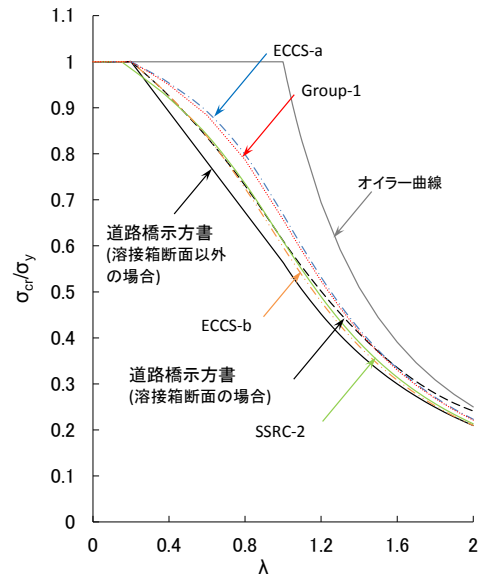


図-14 基準型の耐荷力曲線

表-4 Perry-Robertson式における α, λ_0 の係数値

欧州		米国		土木学会	
曲線	α	曲線	α	曲線	α
ECCS- a_0	0.125	SSRC-1	0.103	Group-1	0.089
ECCS-a	0.206	SSRC-2	0.293	Group-2	0.224
ECCS-b	0.339	SSRC-3	0.662	Group-3	0.432
ECCS-c	0.489				
ECCS-d	0.756				

5.2 溶接箱断面圧縮部材の耐荷力曲線

前章までの実績調査、既往の実験・解析に関する文献の分析、さらに弾塑性有限変位解析を踏まえて、一般構造用鋼材およびSBHS500を用いた溶接箱断面圧縮部材の耐荷力曲線について検討する。

(1) 鋼トラス橋圧縮部材

対象にした鋼トラス橋の溶接箱断面を有する圧縮部材の解析結果において、道示と同じ初期不整(初期たわみ $v^0/L=1/1000$ 、圧縮残留応力 $\sigma_{rc}/\sigma_y = 0.25$)のデータをまとめたのが図-15である。いま、これらの下限値となる耐荷力曲線として、道示と同じ λ の2次曲線で表すならば、式(7)で与えることができる。この提案式は、式(5)の基準耐荷力曲線に比較して、 $\lambda=0.8\sim 1.6$ の領域においてより高強度の曲線になっている。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} &= 1.0 & (\lambda \leq 0.2) \\ \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} &= 1.067 - 0.313\lambda - 0.10\lambda^2 & (0.2 < \lambda \leq 1.0) \\ \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} &= 1.489 - 1.252\lambda^2 + 0.213\lambda^3 & (1.0 < \lambda) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(2) 鋼アーチ橋アーチリブ

アーチリブの溶接箱断面圧縮部材の耐荷力解析では、図-4に示したように、溶接箱断面の残留応力の

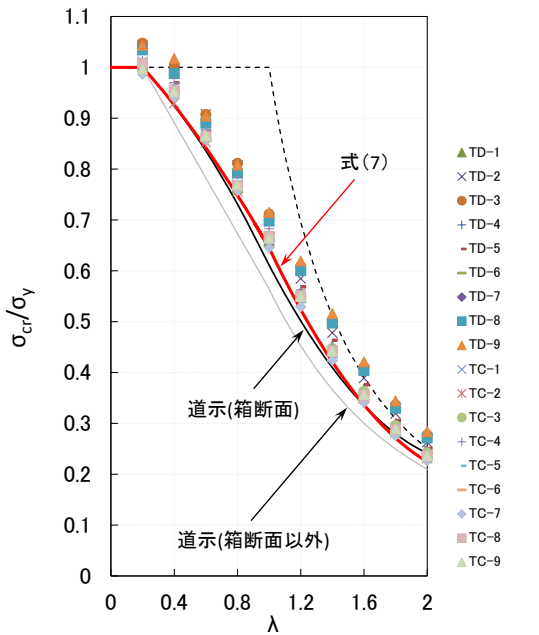


図-15 鋼トラス橋圧縮部材の耐荷力曲線

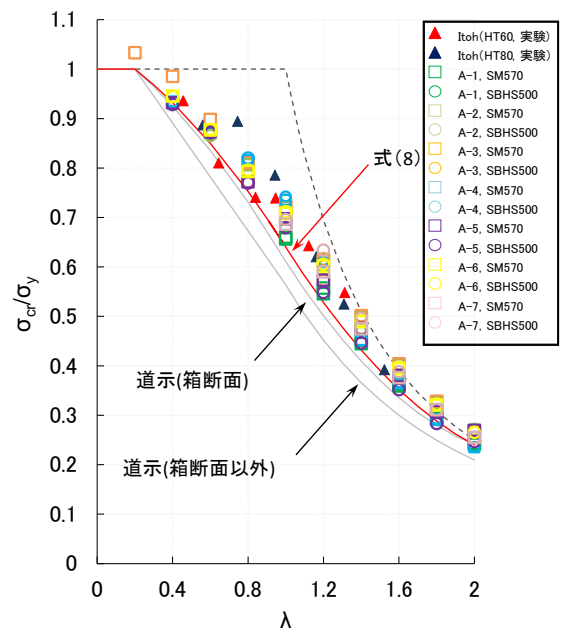


図-16 アーチリブの耐荷力曲線

計測結果によれば、SM570 および SBHS500, SBHS700 の高強度鋼材の圧縮残留応力は最大で $0.2\sigma_y$ 以下であるため、本研究では圧縮残留応力に $0.2\sigma_y$ を採用した。また、初期たわみは実橋における初期たわみの計測データがほとんどないため、ここでは部材製作・架設精度の規定である $L/1000$ を適用した。その解析結果をまとめたのが図-16 である。なお、既往の実験結果として文献 18) の HT60, HT80 の高強度鋼材を図中に載せている。これらの初期たわみは $L/1000$ 以下である。また、前述したように $\lambda=0.2, 0.4$ の短柱領域においてアーチリブの解析値は提案式を下回る結果を示したが、十分な精度の解析値ではないことから、図から削除している。

いま、高強度鋼材を用いた箱断面圧縮部材の耐荷力曲線として、H24 道示の溶接箱断面部材の基準耐荷力曲線と同様に λ に関する 2 次式で近似した式(8)を提案することができる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} &= 1.0 & (\lambda \leq 0.2) \\ \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} &= 1.053 - 0.225\lambda - 0.188\lambda^2 & (0.2 < \lambda \leq 1.0) \\ \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} &= 1.44 - 1.00\lambda^2 + 0.20\lambda^2 & (1.0 < \lambda) \end{aligned} \right\} (8)$$

(3) 新たな基準耐荷力曲線

(1) の鋼トラス橋圧縮部材および (2) の高強度鋼材を用いたアーチリブの耐荷力解析結果をまとめたのが図-17 である。鋼トラス圧縮部材の耐荷力は、鋼アーチリブのそれより下回っているため、式(7)は全データの下限值曲線になっている。したがって、式(7)

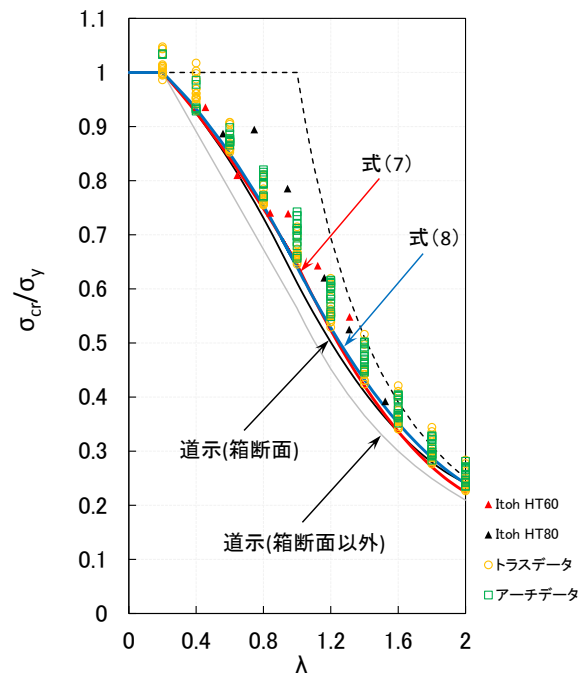


図-17 全圧縮部材の耐荷力と耐荷力曲線

を用いることで、圧縮部材において実際の設計で使用頻度の高い中間柱領域で H24 道示の耐荷力曲線(箱断面)より耐荷力が大きいことがわかる。さらに、式(7)は H24 まで唯一曲線であった式(4)に比較して、中間柱領域において最大 17% ほど高い値を示している。

なお、この提案式は、耐荷力曲線の連続性を保つこと、道示との整合性を図ること、過去の実験結果および実際の構造部材としての細長比の範囲などを考慮して提示している。

6. まとめ

本研究は、設計の合理化の観点から、H14 道示に基づき設計された鋼トラス橋および鋼アーチ橋の圧縮部材として適用頻度の高い溶接箱断面部材を対象にして、耐荷力特性について検討した。

また、すでに H24 道示では圧縮残留応力を $0.25\sigma_y$ 、初期たわみを $L/1000$ とした溶接箱断面部材に対して新たな耐荷力曲線を規定しており、この耐荷力曲線と本解析結果の比較を行い、H24 道示の耐荷力曲線の信頼性、および新たな耐荷力曲線の可能性を検討した。本研究で得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- (1) 残留応力の実績調査の結果、SM570 および SBHS500 などの高強度部材の圧縮残留応力の上限值として $\sigma_{rc}=0.2\sigma_y$ を採用できることを明らかにした。また、H24 道示で採用した一般構造用鋼材についての $\sigma_{rc}=0.25\sigma_y$ の有効性を明らかにした。
- (2) H14 道示に基づき設計された実橋梁の箱断面圧縮部材の耐荷力特性について、断面形状、初期不整、材質などをパラメータにした弾塑性有限変位解析により解明できた。
- (3) 解析対象にした H14 道示に基づき設計された鋼トラス橋および鋼アーチ橋アーチリブの溶接箱断面部材の耐荷力は、当時の唯一の耐荷力曲線を最大 17% 上回る耐荷力を有していることを明らかにした。
- (4) 鋼アーチ橋アーチリブの溶接箱断面部材の SBHS500 耐荷力は、全 7 断面に対して SM570 と SBHS500 の耐荷力曲線に大きな相違は見られないことから、SM570 と同等以上の耐荷力を有していることを明らかにした。
- (5) H24 道示に導入された溶接箱断面の基準耐荷力曲線は、本解析結果の下限值相当を表しており、実橋圧縮部材の耐荷力を精度よく評価していることを確認できた。しかし、特に中間柱領域において、本解析結果は H24 道示の新耐荷力曲線に比してより高い耐荷力になることから、これらの結果を考慮した新たな耐荷力相関式として、式(7)の耐荷力曲線を提示することができた。

謝辞

本研究は、平成 23~24 年の日本鉄鋼連盟の「実橋箱断面圧縮部材の耐荷力特性評価と基準耐荷力曲線の改訂に関する開発研究」に関する研究補助金の助成を受けて実施したものである。また、日本橋梁建設協会のご協力により、H14 道示に基づき架設された鋼トラス橋および鋼アーチ橋のデータを提供いた

だいた。ここに記して、深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：座屈設計ガイドライン，2005.
- 2) (独) 土木研究所構造物メンテナンスセンター 橋梁構造研究グループ：鋼箱形断面圧縮部材の耐荷力に関する検討，土木研究所資料，No.4221，2012.3.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2012.3.
- 4) 三木千壽，市川篤司，楠隆，川端文丸：橋梁用高性能鋼材(BHS500, BHS700)の提案，土木学会論文集，No.738/I-64，1-10，2003.7.
- 5) 日本鉄鋼連盟：一般橋梁から長大橋にいたるまで建設コスト縮減に寄与する橋梁用高性能鋼材(パンフレット)，2011.
- 6) 本間宏二：新しい橋梁用高性能鋼 SBHS について，月刊建設，2012.
- 7) 土木学会鋼構造委員会新しい高性能鋼材の利用技術調査研究小委員会：新しい高性能鋼材の利用技術調査研究報告書～SBHS500(W)，SBHS700(W)の設計・製作ガイドライン(案)～，2009.
- 8) 山下洋平，野上邦栄：高強度鋼材を用いた箱断面圧縮部材の耐荷力特性，土木学会第 66 回年次学術講演会，I-638，2011.9.
- 9) 山下洋平，野上邦栄：SBHS 鋼材を用いたアーチリブの弾塑性挙動と耐荷力曲線，土木学会第 68 回年次学術講演会，I-521，2013.9.
- 10) S.Hashimoto, K.Ono, S.Okada:An experimental study on mechanical properties and constitutive equation of SBHS500, EASEC, 2013.10 .
- 11) 野阪克義,奥井義昭,小室雅人,宮下剛,野上邦栄,長井正嗣:SBHS 鋼材を用いた鋼 I 桁の耐荷力特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.59A, 2013.3.
- 12) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2002.3.
- 13) 竹内幸治，野上邦栄,山下洋平：実橋箱断面圧縮部材の弾塑性挙動と耐荷力特性，土木学会第 67 回年次学術講演会，2012.9.
- 14) 竹内幸治，野上邦栄,山下洋平：実橋箱断面圧縮部材の耐荷力特性と基準耐荷力曲線，土木学会年次学術講演会,第 69 回，2014 .9.
- 15) (独) 土木研究所構造物研究グループ橋梁チーム：鋼材料・鋼部材の強度等に関する統計データの調査，土木研究所資料，No.4090，2008.3.
- 16) 小室雅人,奥井義昭,野阪克義,宮下剛,野上邦栄,長井正嗣：初期たわみと残留応力の統計データを用いた自由突出板の限界強度に関する数値解

- 析的検討, 構造工学論文集, Vol.60A, 2014.3.
- 17) 日本鋼構造協会: 鋼橋の強度設計の合理化, 鋼橋の合理化構造・設計法研究委員会/合理化構造・設計法研究部会, JSSCテクニカルレポート, No.98, 2013.
 - 18) 伊藤文人, 田島二郎: 高張力鋼を用いた溶接各柱の圧縮強さ, 鉄道技術研究報告, 鉄道技術研究所, No.516, 1966.1.
 - 19) 奥村敏恵, 西野文雄, 長谷川彰夫: 箱型断面柱の局部座屈強度, 土木学会論文報告集, No.205, 1972.9.
 - 20) 小松定夫, 牛尾正之, 北田俊行: 補剛板の溶接残留応力および初期たわみに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No.265, 1977.9.
 - 21) 宇佐美勉, 福本秀士, 青木徹彦: 溶接箱形断面柱の局部座屈と全体座屈の連成強度に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No.308, 1981.4.
 - 22) (株)横河橋梁製作所: 本州四国連絡橋公団主塔部材の残留応力調査, 1990.9.
 - 23) 本州四国連絡橋公団: 主塔部材の残留応力計測結果報告, 鋼上部構造委員会構造分科会報告書, 1993.
 - 24) 宮下剛, 永田賢康, 澤田守, 野上邦栄, 長井正嗣: 磁歪法による既設鋼橋の箱断面部材の残留応力計測, 第38回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 2011.3.
 - 25) 宮下剛, 稲葉尚文, 平山繁幸, 劉翠平, 長井正嗣: 極厚フランジを有する鋼 I 桁の溶接残留応力の計測方法の提案と終局曲げ耐力に与える影響, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.2, pp.465-480, 2012.
 - 26) MSC.MARC: MARC A 編 Theory and User Information, B 編 Element Library, 1988, C 編 Program Input, 1988.
 - 27) 伊藤 學: 改訂鋼構造学, コロナ社, 2012.
 - 28) 山下洋平: 高強度鋼材を用いたアーチリブの耐荷力特性と基準耐荷力曲線に関する研究, 首都大学東京都市基盤環境学域修士論文, 2012.
 - 29) 竹内幸治: 鋼トラス橋箱断面圧縮部材の耐荷力特性と基準耐荷力曲線に関する研究, 首都大学東京都市基盤環境学域修士論文, 2013.

(2014年9月24日受付)

(2015年2月1日受理)