

残留応力を考慮した鋼製斜張橋タワーの地震応答性状に関する研究

Nonlinear Seismic Response of Steel Tower of Cable-Stayed Bridge in Consideration of Residual Stress

北海道大学大学院工学研究院 ○F 会員 林川俊郎(Toshiro Hayashikawa)
 北海道大学大学院工学研究院 正会員 松本高志(Takashi Matsumoto)
 北海道大学大学院工学研究院 正会員 何興文(Xingwen He)
 北海道大学大学院工学院 学生員 古屋敷祐介(Yusuke Furuyashiki)

1. まえがき

斜張橋は、塔から斜めに張られたケーブルにより補剛桁を吊る構造形式である。その構造形式ゆえ設計の自由度が大きく、経済的な設計、合理的な架設、多様な景観設計が可能である。しかし、斜張橋はその複雑な構造形式から、地震に対して非常に複雑な振動系を呈する。そのため大規模地震に対する斜張橋の動的応答性状を正確に把握し、耐震性能を向上させることが必要とされる。

近年、熱間圧延や溶接の技術が向上したために、斜張橋の鋼製タワーには軽量で高強度な薄肉鋼板が広く用いられている。しかし、薄肉鋼板を用いた鋼製構造物の動的応答性状は初期不整の影響を受けやすい。ここで、初期不整とは初期たわみと残留応力のことを示し、構造物の製作施工過程において発生するとされている。本研究で対象としている残留応力は、工場における薄肉鋼板や構成ブロックの製造過程での熱間圧延や溶接、または施工中に行う現場溶接が原因で発生すると考えられる。鋼製タワーのような薄肉鋼板を用いた構造物の耐力力曲線は、残留応力によってかなり低下することが理論的、実験的に知られている^{1) 2)}。また、このような薄肉鋼板を用いた構造物の大地震に対する耐震性能は、強度と靱性の両方に依存すると考えられる。よって、斜張橋のさらなる安全性の向上を目的として、鋼製斜張橋タワーの動的応答性状に対して残留応力が及ぼす影響を正確に把握することが求められる。

本研究では、断面内部に垂直補剛材を有する斜張橋タワーを3次元立体骨組構造にモデル化し、ファイバー要素を用いて部材内部に残留応力分布を与え、弾塑性有限変位動的応答解析法により解析を行う。既往の研究により、タワー部材にSM490Y(降伏応力:360MPa)を用いた3種類のタワー形状に対して、兵庫県南部地震で観測された鷹取波を入力することでタワーの地震応答性状が確認されている³⁾。そこで本研究では、様々なタワー部材とタワー形状を用いたタワーモデルに対し、様々な地震波を入力することで、残留応力が鋼製斜張橋タワーに及ぼす影響を比較検討する。

2. 解析モデル

2.1 対象とした斜張橋タワー

北海道岩見沢市にあるたっぷ大橋の鋼製斜張橋タワーを基本モデルとする。タワー形状を図-1に示す。基本寸法は、塔の高さ68m、塔頂部の塔柱間隔13m、塔基部の塔柱間隔18mとし、塔基部から高さ48mの位置に水

平梁が取り付けられており、鋼材にはSM490Yが採用されている。

一方、タワー断面は内部に垂直補剛材を用いた中空長方形断面であり、タワー高さ方向と水平梁には板厚と外形断面が異なる変断面が採用されている。タワー断面は図-2、各断面寸法の詳細は表-1に示す。

また鋼製タワーの片側には9本のケーブルが定着され

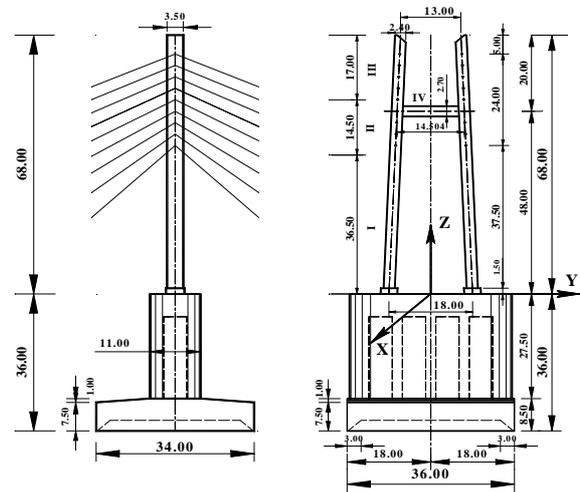


図-1 タワー形状

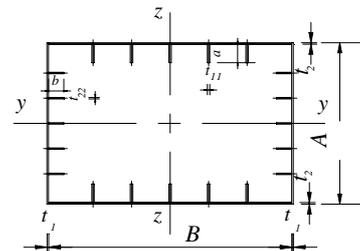


図-2 タワー断面

表-1 断面諸元(cm)

C.S.	Outer dimension				Stiffener dimension				
	Dim.	A	B	t ₁	t ₂	a	b	t ₁₁	t ₂₂
Tower parts	I	240	350	2.2	3.2	25	22	3.6	3.0
	II	240	350	2.2	3.2	22	20	3.2	2.8
	III	240	350	2.2	2.8	20	20	2.8	2.2
	IV	270	350	2.2	2.6	31	22	3.5	2.4

ており、解析ではそれぞれを水平ばね要素にモデル化する。補剛桁から斜張橋タワーに作用する慣性力は、補剛桁が橋脚によって直接支持されていることから無視する。図-3に示すように、基本モデルをH型モデルとして、タワー高さ・塔基部間隔を変えずにタワー形状のみを変更したA型モデル、門型モデルを作成する。なお、A型モデルには、水平梁が設置されていないモデルを用いる。

またH型モデルの鋼材を変更したモデルを作成した。それぞれの鋼材の降伏応力を表-2に示す。

表-2 鋼材の降伏応力(MPa)

部材の種類	降伏応力
SM400	240
SM490Y	360
HT690	590



図-3 タワー形式

2.2 残留応力のモデル化

次に残留応力のモデル化を行う。残留応力は、溶接の収縮の結果として降伏点に近い値になるとされている。また、残留応力の大きさと分布は、工場製作における溶接加工過程の熱入力や冷却率と言った溶接パラメータにより左右される。図-4に示すように、タワーモデルの中空長方形断面を有限数のファイバー要素により断面にそって分割する。本研究では、図-5のようなモデルを用いて仮定する⁴⁾。圧縮、もしくは引張の残留応力が、有限数のファイバー要素に分割された1要素に分布される。また、このモデルでは、断面全体で曲げモーメント、軸力の自己釣合状態が満足されているものと仮定する。さらに、圧縮残留応力の大きさは、普通鋼の場合、降伏応力の半分以上、およそ75%まで増加するといわれている⁵⁾。残留応力が引張側における応力を降伏応力 σ_y 、圧縮側における応力を σ_0 とそれぞれ仮定する。

ここで、引張応力と圧縮応力の関係を式(1)により表す。

$$\alpha = \sigma_0 / \sigma_y \quad (1)$$

ここで α を残留応力レベルとする。残留応力レベルは $\alpha = 0.0$ から0.6までとし、 α を0.1ごと増加させ、残留応力レベルに応じた残留応力を先ほど仮定した残留応力分布モデルに入力する。残留応力を考慮する場合の接線剛性マトリックスは、図-6に示すように、材料の非線形性とはり柱要素の応力-ひずみ関係からの初期応力状態を考慮するため、鋼材の応力-ひずみ関係はトリリニア型のモデルとする。

2.3 解析方法と入力地震波

本研究では、鋼材の降伏と幾何学的非線形性を考慮した、はり柱要素の有限要素法と Newmark β 法($\beta = 0.25$)および修正 Newton-Raphson法を併用した解析方法を用いる。接線剛性マトリックスは材料非線形とはり柱要素の応力-ひずみ関係を考慮している。基本鋼材はSM490Yを想定し、降伏応力を360MPa、弾性係数を200GPaとする。動的解析に用いた立体骨組モデルは1要素あたりの節点数は2のはり柱要素により構成され、鋼製タワーの節点数は47の要素分割数は46とした。剛性タワーの減衰には Rayleigh減衰を採用し、減衰定数は1次固有振動モードの面内、面外に対してそれぞれ2%とした。また、本研究では、入力地震波は図-7に示す3つの地震波を用い、3成分加速度波形を用い、N-S波は橋軸方向に、E-W波は橋軸直角方向に、U-D成分は鉛直方向に入力する。

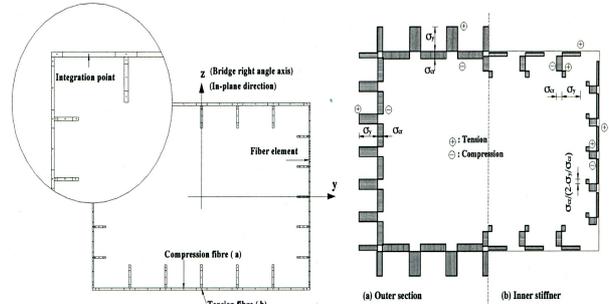


図-4 断面のファイバー要素 図-5 残留応力分布

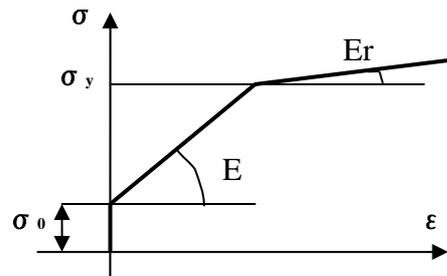


図-6 残留応力を考慮したトリリニアモデル

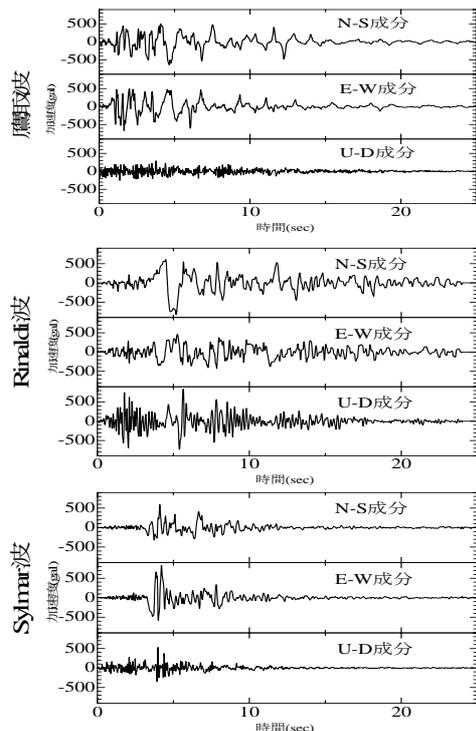


図-7 3成分加速度地震波形

3. 動的応答性状

3.1 入力地震波とタワー形状による比較

(1) 塔基部圧縮側要素の時刻歴応答応力

塔基部において圧縮側残留応力が働いているファイバー要素の時刻歴応答垂直応力を図-8に示す。これより、H型とA型は全ての地震波で残留応力を考慮しない $\alpha=0.0$ の場合に降伏応力(360MPa)に達している。さらに、残留応力を考慮すると1周期早い段階で降伏応力に達する。ただし、鷹取波を入力したA型においては2周期早い段階で降伏応力に達していることがわかる。門型では $\alpha=0.0$ の場合、鷹取波とSylmar波では降伏応力に届かず弾性領域内に留まる。しかし、残留応力を考慮するといずれも7秒付近で降伏応力に達しており、塑性化した後も残留応力の影響を受け続けている。以上より、残留応力は地震波やタワー形状の種類によらず、タワーの早期塑性化と塑性化の助長を招く可能性があると考えられる。また、塑性化後の残留応力の影響は塑性化前に比べて小さいものではあるが、地震波とタワー形状の種類によっては塑性化後も長期的に残留応力の影響を受けることが確認された。

(2) タワー全体の吸収エネルギー

タワー全体の各エネルギー応答を図-9に示す。なお、ここでいうエネルギーとはタワーが吸収したエネルギーである。まず、形状から比較すると、H型は残留応力を考慮した $\alpha=0.6$ で各エネルギーが減少している。中でもSylmar波は、この減少率が大きく、残留応力の影響を最も大きく受けていることがわかる。A型においても $\alpha=0.6$ で各エネルギーは減少しているが、Sylmar波のひずみエネルギーは増加している。そのため、残留応力を考慮した際の影響度の大きさとひずみエネルギーが増減するかどうかは、地震波によって変化するということが確認された。門型は鷹取波の入力エネルギーの増加が特徴的である。これは残留応力を考慮しない場合、門型タワー基部の変形は弾性変形であるが、 $\alpha=0.6$ で塑性変形する。これによって生じるひずみエネルギーの大きな増加が減衰エネルギーの減少を上回ったことが原因として考えられる。地震波別に比較すると、Rinaldi波は各エネルギーにおいて残留応力による変化が少なく、残留応力による影響が最も少ない地震波といえる。一方、Sylmar波はひずみエネルギーの増加と減衰エネルギーの大幅な減少が特徴的であり、最も残留応力の影響を受けている。

3.2 タワー鋼材による比較

(1) タワー基部の減衰エネルギー

タワー鋼材による比較では、入力地震波に鷹取波を採用しており、H型タワーの鋼材を変更している。塔基部の減衰エネルギー応答を図-10に、各残留応力レベルの最大エネルギー応答を表-3に、残留応力を考慮しない $\alpha=0.0$ と比較した際の各残留応力レベルでの最大エネルギー変化率を図-11に示す。降伏応力の最も低いSM400は最大エネルギー変化率において最も低い値を示している。また、 $\alpha=0.0$ での減衰エネルギーが最も大きいモデルはSM490Yであるが、最大エネルギー変化率が最も大きいモデルはHT690のモデルである。そのため、減衰エネルギーの大きさには関わらず、降伏応力の高い鋼材は

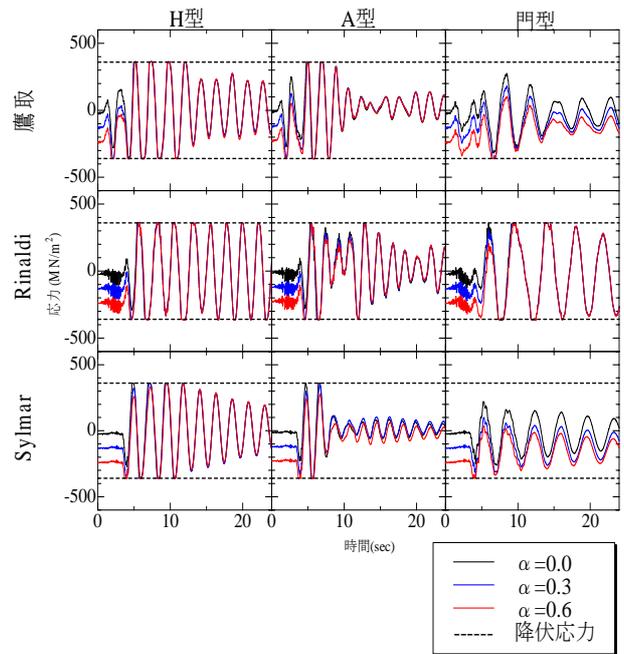


図-8 塔基部の時刻歴応答垂直応力

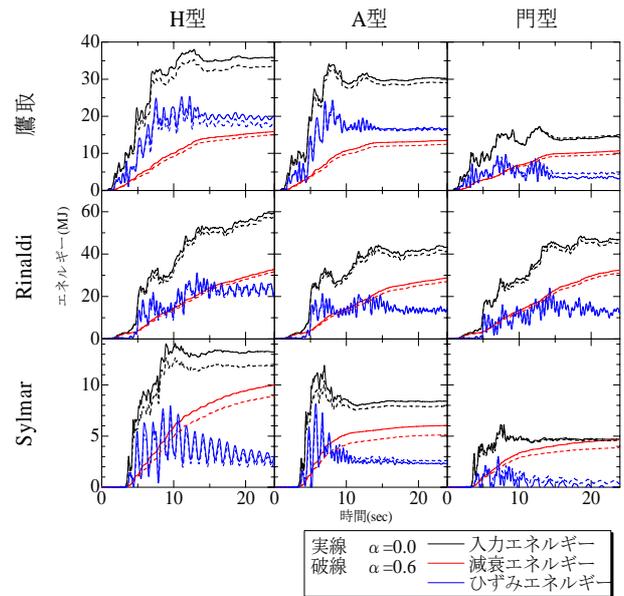


図-9 時刻歴エネルギー曲線

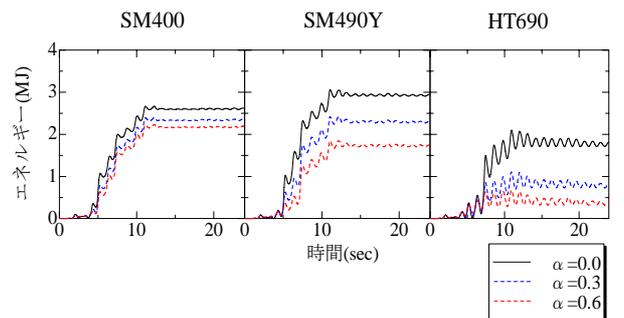


図-10 塔基部の時刻歴減衰エネルギー曲線

表-3 最大エネルギー(MJ)

α	SM400	SM490Y	HT690
0.0	2.67	3.06	2.10
0.3	2.41	2.42	1.11
0.6	2.24	1.85	0.67

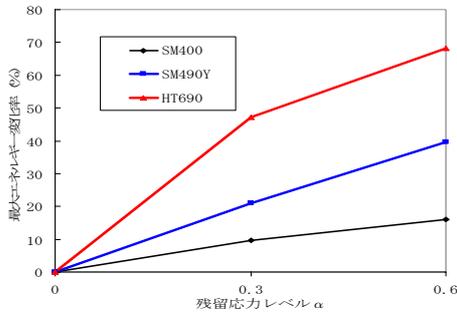


図-11 最大エネルギー変化率

ど残留応力の影響を大きく受けることが確認された。これは、降伏応力の低い鋼材ほど早期塑性化し、塑性化後の残留応力の影響が小さくなること、および降伏応力の大きい鋼材は、等しい残留応力レベルにおいて、残留応力の絶対値が大きくなるのが原因として考えられる。また、HT690の $\alpha=0.3$ での最大エネルギー変化率は他のモデルに比べはるかに大きい47.1%を示しているが、 $\alpha=0.3$ から $\alpha=0.6$ への推移傾向はSM490Yと似ている。そのため、降伏応力の大きい鋼材は $\alpha=0.3$ までに、残留応力の影響を大きく受けることが確認された。

(2) 塔基部の曲げモーメント-曲率関係

塔基部の内面方向における曲げモーメント-曲率関係を図-12に示す。降伏応力の最も大きいHT690のモデルでは、残留応力の増加につれて履歴ループが小さくなることが確認される。ただし、他のモデルでは残留応力による影響があまり見られない。タワー鋼材の降伏応力がある値以上になると残留応力の増加に伴い塔基部の履歴ループに大きく影響を及ぼすと考えられる。また、HT690の履歴ループが小さくなる原因として、残留応力を増加させることで早期塑性化していることが考えられる。

4. あとがき

本研究は鋼製斜張橋タワーを対象とし、ファイバー要素で部材内部に残留応力を与え、非線形動的応答解析を行い、地震波とタワー形状の変化、および鋼材を変化させ、残留応力の与える影響についてタワーの動的応答性状から比較検討した。

地震波とタワー形状を変化させた比較については、全てのモデルにおいて、 $\alpha=0.3$ 以上でタワーの早期塑性化と塑性化の助長を招くことが確認された。鷹取波を入力した門型モデルなど、地震波とタワー形状の種類によっ

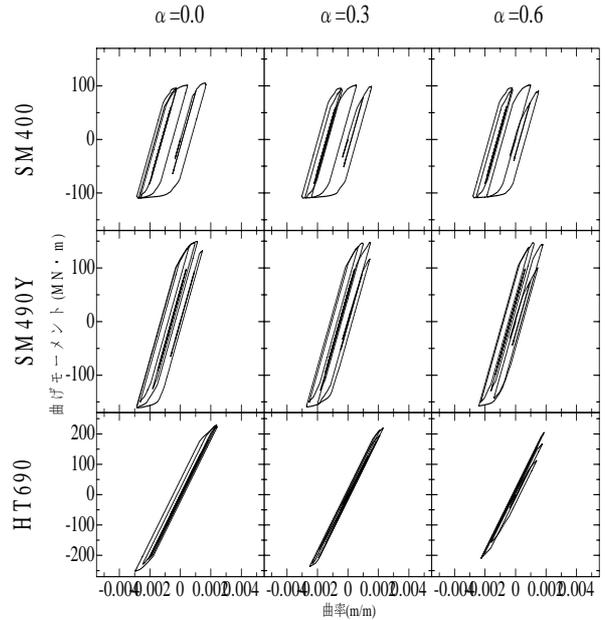


図-12 曲げモーメント-曲率関係

ては長期的に残留応力の影響を受けることが確認された。また、鷹取波とSylmar波を入力した門型モデルでは、残留応力を考慮することで降伏に至り、ひずみエネルギーを増加させることが確認され、部材の損傷が大きくなると思われる。

H型タワーの鋼材を変化させた比較については、降伏応力の大きい鋼材ほど残留応力の影響により減衰エネルギーが大きく減少することが確認された。そのため、タワー基部において、ひずみエネルギーが地震波エネルギーを吸収する割合が増え、結果的にタワー基部の負担が大きくなることが予想される。また、降伏応力の最も大きいHT690モデルでは $\alpha=0.3$ で最大エネルギー変化率が47.1%の大きな値を示した。現在の設計基準⁶⁾では $\alpha=0.3$ 以下の場合、残留応力の影響を小さいものとしている。そのため、降伏応力の高い部材を採用する場合には残留応力の性状を把握し、対策を施す必要があると思われる。

参考文献

- 1) 林川俊郎：橋梁工学、朝倉書店、2000。
- 2) 伊藤学：改訂鋼構造学、コロナ社、1999。
- 3) 川上隆司：鋼製斜張橋タワーの地震応答とその低減対策に関する研究、修士論文、2004。
- 4) Usami, T. and Ge, H.B.: Cyclic behavior of thin-walled steel structures-numerical analysis, *Thin-Walled Structures*, Vol.32, pp.41-80, 1998.
- 5) Grodin, G.Y., Elwi, A.E. and Cheng, J.J.R.: Buckling of stiffened plates-a parametric study, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.50, pp.151-175, 1999.
- 6) 土木学会：座屈設計ガイドライン、1987。