

# 残留応力を考慮した鋼製斜張橋タワーの地震応答解析

Seismic Response Analysis of Steel Tower of Cable-Stayed Bridge with Residual Stress

北海道大学大学院工学研究科 F正員 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)  
 北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 川上 隆司 (Takashi Kawakami)  
 北海道大学大学院工学研究科 シェハタ エルラハーム (Shehata E. Abdel Raheem)  
 北海道大学大学院工学研究科 F正員 佐藤 浩一 (Koichi Sato)

## 1. はじめに

兵庫県南部地震では、鋼製橋脚などの土木構造物が大きな被害を受けた。これに対して、道路橋耐震設計法の見直しが検討され、平成8年12月と平成14年3月に道路橋示方書が2度改訂された<sup>1),2)</sup>。これらの改訂によって、非線形性を考慮した動的解析は、以前にも増して重要な位置付けとなっている。また、高強度鋼を製造するために熱間圧延を用いた技術や溶接が発達した今日、鋼製構造物の工場ブロック製作の過程で、薄肉鋼板が使用されるようになってきている。これにより、薄肉鋼板を用いた鋼製箱桁橋、長スパンをもつ吊橋や斜張橋における鋼製タワー、中空長方形断面をもつ鋼製橋脚などが、高速道路建設などの分野で広く使われている。

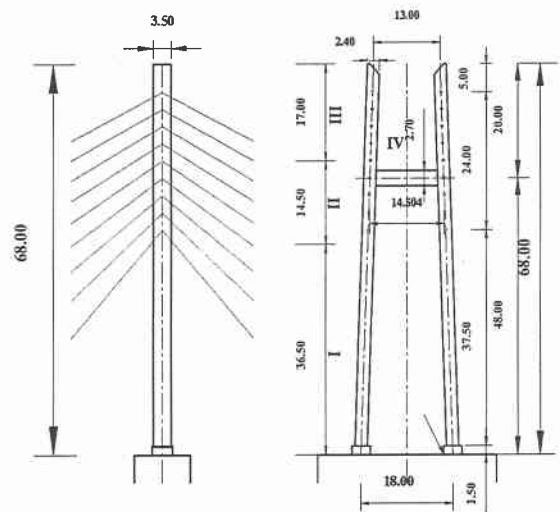
このような薄肉鋼板を用いた構造物の大地震に対する耐震性能は、強度と靱性の両方に依存すると考えられる。特に、薄肉鋼板部材の強度は、初期たわみや残留応力を含む初期不整の影響を受けやすい。しかし、鋼製タワーなどの構造物における残留応力は、多くの場合、工場における製造過程での熱間圧延や溶接が原因と考えられる。鋼製タワーのような構造物の耐荷力曲線は、残留応力によってかなり低下することが理論的、実験的に知られている<sup>3),4)</sup>。しかし、残留応力が薄肉鋼板を用いた構造物の動的応答に与える影響については不明な点も多い。今日、建設事例が増加している斜張橋においても、残留応力を考慮したタワーの動的解析を行い検討する必要があると考えられるが、そのような構造物の動的応答性状への残留応力の影響についての研究は、比較的少ないのが現状である。

そこで本研究は、中空長方形断面と断面内部に溶接された垂直補剛材を有する鋼製斜張橋タワーを3次元立体骨組構造にモデル化し、幾何学非線形性と鋼材の降伏を考慮した弾塑性有限変位動的応答解析法を用いて解析を行い、残留応力が鋼製タワーの動的応答性状に与える影響について検討する。

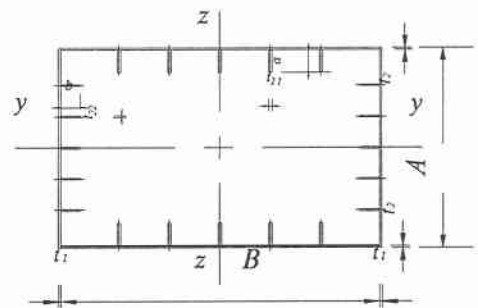
## 2. 解析モデル

本研究では、ファイバー要素により3次元骨組構造にモデル化された岩見沢大橋の鋼製斜張橋タワーを用いる。解析モデルのタワー形状は図-1に示す。基本寸法は、タワーの高さ68m、タワー塔頂部の塔柱間隔13m、タワー基部の塔柱間隔18mとし、タワー基部は固定としている。水平梁はタワー基部から高さ48mの場所に取り付けられている。タワー断面は内部に垂直補剛材をもつ中空長方形断面であり、タワーの高さ方向と水平梁には板厚と外形寸法が異なる変断面が採用されている。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ており、補剛桁の死荷重をケーブルの定着部に鉛直下向きに作用させている。ケーブルは水平ばね要素にモデル化する。また、補剛桁からタワーに作用する慣性力は、補剛桁が橋脚上で直接支持されていることから無視する。



(a) タワー形状



(b) タワー断面

図-1 岩見沢大橋の鋼製タワー

表-1 断面諸元

(単位: cm)

C. S. Dim.	Outer dimension				Stiffener dimension				
	A	B	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	a	b	t <sub>11</sub>	t <sub>22</sub>	
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

### 3. 解析方法

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  $\beta$  法および修正 Newton-Raphson 法を併用した平面骨組のための弾塑性有限変位動的応答解析を3次元的に拡張した解析手法を用いる。接線剛性マトリックスは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している。残留応力を考慮する場合、鋼材の応力-ひずみ関係は図-2 に示すようなトリリニア型のモデルとする。塑性域のひずみ硬化を0.01とし、降伏応力と弾性係数の値はそれぞれ355MPa、200GPaとする。鋼製タワーの減衰には Rayleigh 減衰を適用しており、減衰定数は1次固有振動モードの面内・面外に対して2%とした。入力地震波は兵庫県南部地震 JR 鷹取駅記録における3成分加速度波形を用いる。E-W 波は橋軸方向に、N-S 波は橋軸直角方向に入力する。

### 4. 残留応力の分布

中空長方形断面における残留応力は、鋼材の熱間圧延に加え、主に部材の溶接に原因がある。溶接部、溶接部近傍の垂直補剛材と中空断面部材における残留応力は、溶接収縮の結果として降伏点に近くなる。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ーにより左右される。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、約75%まで増加すると言われている<sup>4),5)</sup>。最大残留応力が引張側で $\sigma_y$ 、圧縮側で $\sigma_{cr}$ と仮定した残留応力の分布状態を図-3 に示す。ここで、引張応力と圧縮応力の関係を次式により表す。

$$\alpha = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} \quad (1)$$

ここで $\alpha$ を残留応力レベルとする。

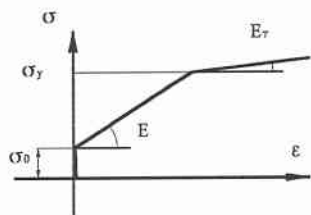


図-2 トリリニアモデル

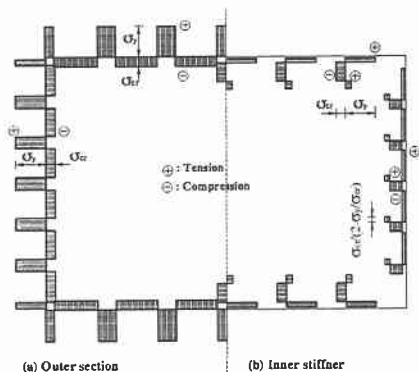


図-3 残留応力分布モデル

本研究においては、圧縮応力の大きさが降伏応力の値の0%から60%まで、10%ごとに動的解析を行った。またこのモデルでは、断面全体でモーメント、軸力の自己釣合状態が満足されているものとする。

### 5. 解析結果

非線形地震応答解析により得られた数値計算結果において着目した箇所をタワー塔頂部、水平梁端部、水平梁と塔との接合部、タワー基部とする。

#### 5.1 タワー塔頂部の変位

タワー塔頂部における変位の変化率と残留応力レベルの関係を図-4 に示す。縦軸は、各残留応力レベル $\alpha$ の変位を残留応力レベルが0.0の変位で除した値である。また、変位の時刻歴応答を図-5 に示す。

図-4より残留応力レベルが0.6の場合、面内方向で9%、面外方向で6%、鉛直方向で30%減少している。若干ではあるが面内方向が面外方向よりも大きく減少している。鉛直方向で大きな変化が確認できるが、図-5の変位の時

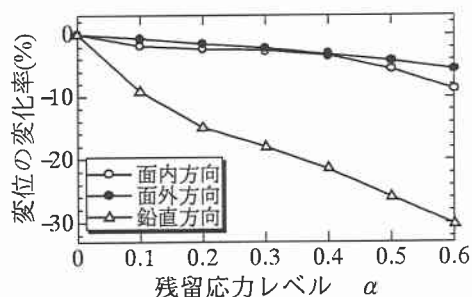


図-4 変位の変化率

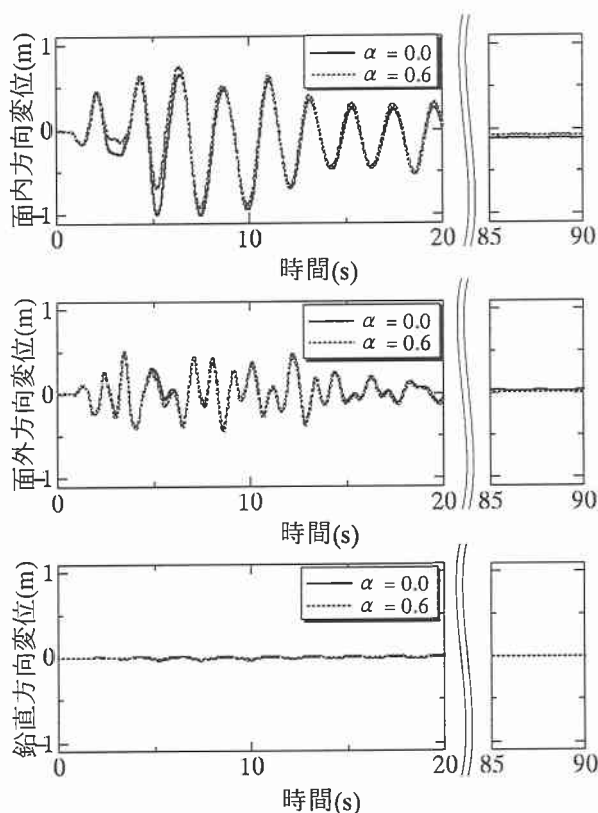


図-5 変位の時刻歴応答

刻歴応答からわかるように、面内、面外方向変位と比較すると鉛直方向変位の絶対値はかなり小さいため、鉛直方向変位の変化による影響はきわめて小さいと考えられる。また3方向の残留変位に着目すると、図-5より残留応力による影響は小さいものと思われる。この理由として、残留応力の影響は約7秒前後までの時刻歴応答変位に比較的大きく現れるが、その後の応答変位には小さいためと考えられる。

## 5.2 タワー基部のせん断力と鉛直反力

タワー基部に作用するせん断力および鉛直反力の変化率と残留応力レベルの関係を図-6に示す。縦軸は、各残留応力レベルのせん断力と鉛直反力を残留応力レベル $\alpha$ が0.0の断面力でそれぞれ除した値である。また、せん断力と鉛直反力の時刻歴応答を図-7に示す。

図-6から、残留応力レベルの増加により面内、面外方向でのせん断力が減少していることが確認できる。特に面外方向のせん断力の減少率が大きく、残留応力レベルが0.6の場合6.5%となっている。鉛直反力においては、残留応力レベルが0.2までは減少しているが、それ以降はほぼ一定で残留応力レベルが0.6の場合2%減少とな

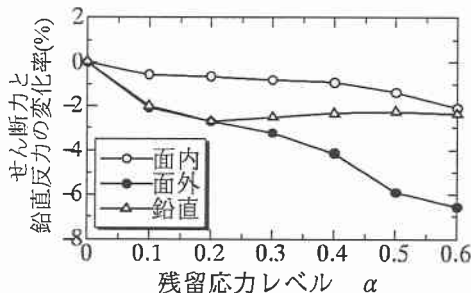


図-6 せん断力と鉛直反力の変化率

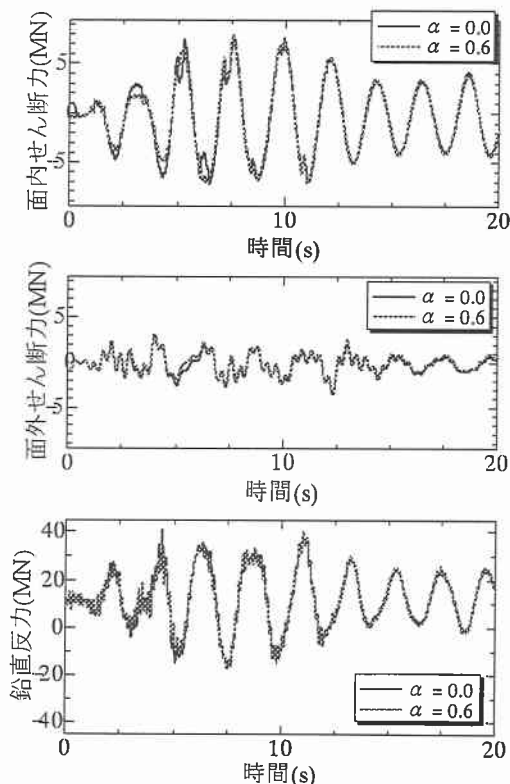


図-7 せん断力と鉛直反力の時刻歴応答

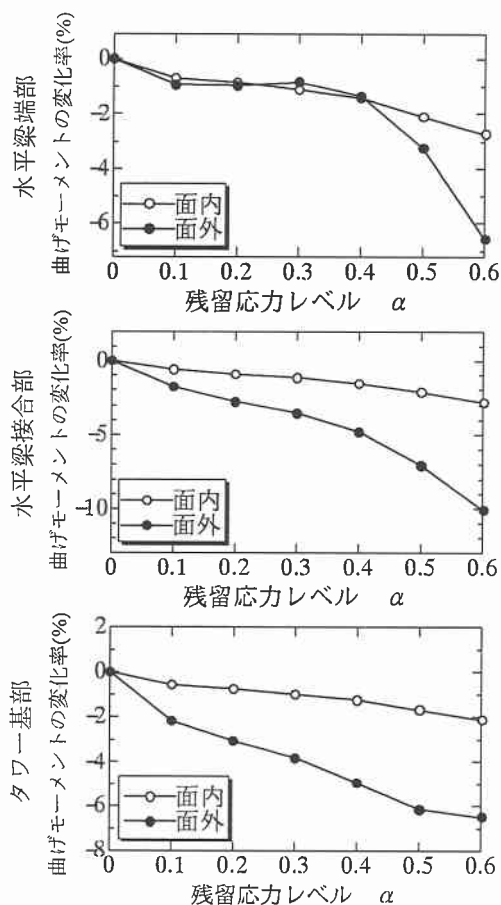


図-8 曲げモーメントの変化率

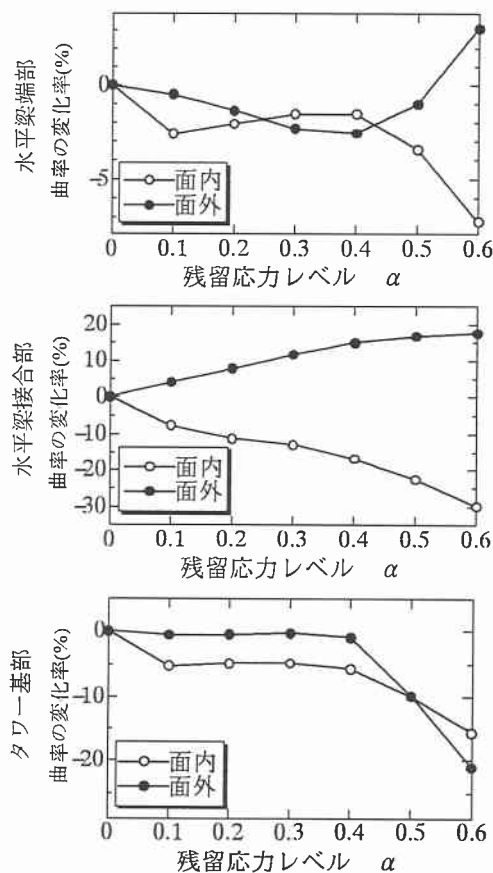


図-9 曲率の変化率

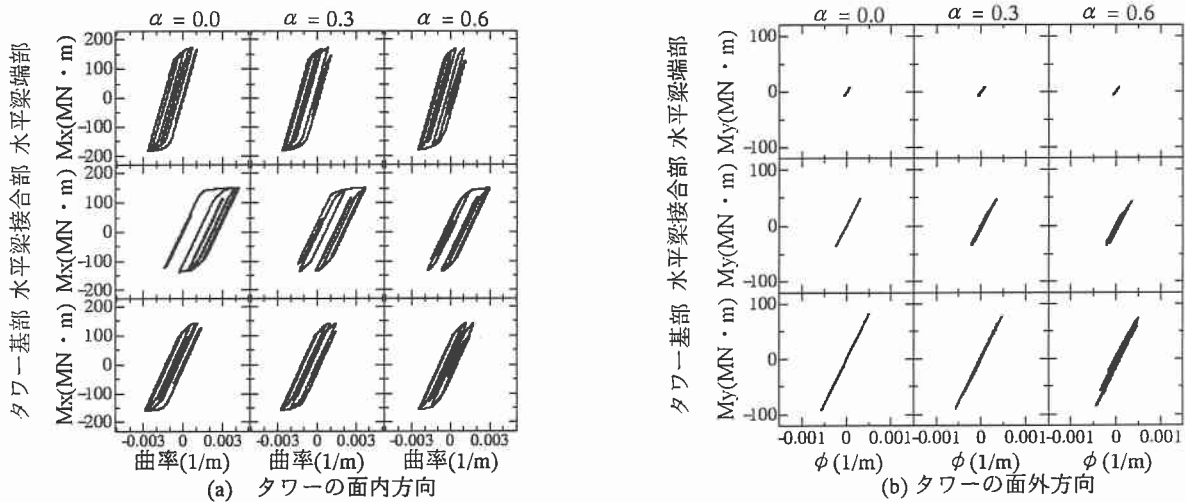


図-10 曲げモーメントと曲率の関係

っている。また図-7より時刻歴応答を比較すると、残留応力レベルの増加によりせん断力と鉛直応力は減少していることが確認できる。このことから、残留応力レベルによるせん断力と鉛直反力への影響は小さいものと思われる。

### 5.3 モーメントと曲率

曲げモーメントならびに曲率の変化率と残留応力レベルの関係を図-8と図-9に示す。縦軸は、それぞれ各レベルの曲げモーメントおよび曲率を残留応力レベルが0.0の値でそれぞれ除した値である。また、曲げモーメントと曲率の関係を図-10に示す。

図-8より、水平梁端部、水平梁接合部、タワー基部の3箇所において、せん断力の場合と同様に面外の曲げモーメントの変化率が面内よりも大きく減少していることが確認できる。残留応力レベルが0.6の場合、水平梁端部、タワー基部の変化率は6.5%程度である。しかし、水平梁接合部における変化率は10%と、他の2箇所と比べて大きく減少していることがわかる。面内方向においては、残留応力レベルが0.6の場合、水平梁端部、水平梁接合部で3%、タワー基部2%減少となっている。また図-9より、曲率においても、面内方向に関しては、3箇所とも減少しているのが確認できる。水平梁端部、水平梁接合部、タワー基部でそれぞれ7%、30%、15%減少している。このことから、変化率が大きく変化している水平梁接合部、タワー基部では残留応力により靱性が低下していると思われる。面外方向については、水平梁端部では残留応力レベルが0.4までは減少しているが、その後は増加し、0.6の場合には3%まで増加している。水平梁接合部では、残留応力レベルの増加するにつれ曲率も増加する。残留応力レベルが0.6の場合18%増加している。タワー基部においては、残留応力レベルが0.4まで大きな変化は見られないが、それ以後は大きく減少し、0.6の場合には23%程度減少している。

図-8、9より残留応力レベルが0.6の場合では、曲げモーメントと曲率の面外方向において比較的大きな変化が確認できる。しかし、実際の残留応力レベルは降伏応力の30%以下であると言われているので、これらの影響は小さいと考えられる。

次に図-10より、3箇所での塑性履歴ループは原点に対して、左右どちらかに偏っていることが確認できる。また、残留応力レベルの増加に伴い、水平梁端部とタワー基部では右側に、水平梁接合部では左側にシフトしていることが図より確認できる。さらに、面内方向では3箇所とも塑性化しているため、図-8において曲げモーメントの変化率が小さくなったものと思われる。面外においては、残留応力レベルが増加しても引き続き弾性域内に収まっていることから、曲げモーメントと曲率の変化率がたとえ大きく変化しても、その影響は小さいと考えられる。

### 6. まとめ

本研究は、鋼製斜張橋タワーを対象とし、残留応力を考慮したタワーモデルにおいて非線形動的応答解析を行い、残留応力が鋼製タワーに与える影響を検討した。

タワー塔頂部の変位においては面内方向で大きく影響を受け、タワー基部等の断面力においては面外方向で大きく減少する影響を受けることが確認できる。また、タワー基部、水平梁接合部における曲率の変化率が大きく変化することから、これらの箇所での靱性の低下が考えられる。さらに、時刻歴応答において、地震波入力後約7秒前後までに残留応力の影響が大きく現れるが、その後は小さくなることが確認できる。しかし、実際の残留応力レベルは0.3以下と考えられるため、鋼製斜張橋タワーの動的性状への残留応力の影響は比較的小さいと思われる。

#### 【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、1996.12
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、2002.3
- 3) 林川俊郎：橋梁工学、朝倉書店、2000
- 4) 伊藤学：改定鋼構造学、コロナ社、1999
- 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