

第6章 初期不整

6.1 概 説

鋼構造物には鋼材の製造，製作，組み立て，架設，供用の各段階で，種々の不完全因子が生じる．これらを総じて初期不整と称する．この初期不整には，幾何学的初期不整 (*Geometric Imperfection*) と材料的初期不整 (*Material Imperfection*) があり，前者には初期たわみ，後者には残留応力等が対応する．本章では，初期不整として考慮しておくべき基本的な部分のみを記述する．

6.2 初期たわみ

6.2.1 数値解析を行う際の初期たわみ

初期たわみは，主に鋼材の製造段階，製作，組み立て時の各段階で，溶接や折り曲げなどの加工を行う際に生ずる．近年の技術革新により初期たわみは小さくはなってきたものの，初期不整が大きすぎると，正確な架設が出来なかったり，時には耐荷力の大幅な減少により，重大な事故を引き起こす可能性もある．

数値解析を行う際に，全く初期不整を与えずに行うと，実際とは異なる挙動を示すことがある．例えば，真に垂直な部材を純粋に軸圧縮した場合，曲げ座屈を再現できないことがある．したがって，実際の挙動を再現するためには，多くの場合予め何らかの初期不整を与えておく必要がある．最近では，計算機と解析技術の進歩により，初期たわみと残留応力の両方を考慮した解析を行うのが一般的となっている．数値解析の際に与える初期たわみの量は，旧版 [土木学会，1987] で述べられている初期不整量の最大値を与えた上で解析が行われる場合がほとんどである．[藤井ら,1998a；藤井ら,1998b；三輪ら,1998；渡邊ら,1998；大賀ら,1999；小澤ら,1999；川西ら,1999；北田ら,1999；寺沢ら,1999；藤井ら,1999；望月ら,1999；渡辺ら,1999；大倉ら,2000；北田ら,2000；久保ら,2000；田中ら,2000；中村ら,2000；藤井ら,2000；足立ら,2001；宇佐美ら,2001；田中ら,2001；葛西ら,2002；宇井ら,2002；奈良ら,2002；原田ら,2002；森下ら,2002；Praween et al.,2002；葛西ら,2004]

6.2.2 構造部材の初期たわみと偏心

(1) 柱

図 6.2.1 のように単純支持された柱に偏心圧縮力 N が作用する場合を考える．このような場合には偏心圧縮力により初期たわみが発生するような場合が考えられる．軸力が作用した場合の柱の例を考えると，偏心量を e ，最大初期たわみ量を w_0 とするならば，例えば，溶接H型断面柱の初期不整の統計的分布は旧版による

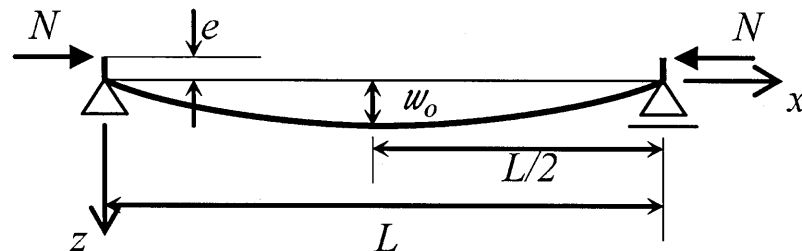


図 6.2.1 単純支持柱

と、 w_0/L の平均値は、実測値によるとおよそ $w_0/L = 1/1000$ 以下となる。従って初期たわみの基準値として $L/1000$ が採用されている。解析においては、この $L/1000$ を用いた例が多い。

(2) 桁

桁に対しては横たわみ量に関する考慮が必要である。旧版の実橋計測によると、図 6.2.2 に示すように、最大横倒れ量 w_0 はスパン L に対しておよそ $w_0 = L/2000$ 以下である。また、圧延ばりに対する計測によると、およそ $w_0 = L/5000$ 以下となっている。さらに、溶接ばりに対する計測によると、およそ $w_0 = L/1000$ 以下となっている。したがって解析では $w_0 = L/1000$ を用いる。

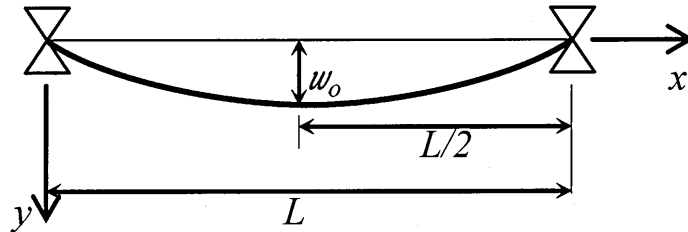


図 6.2.2 桁の横方向たわみ

(3) 自由突出板

1 桁の自由突出圧縮フランジに関しては、道路橋示方書にフランジが降伏するまでねじり座屈（局部座屈）を生じないように突出フランジの幅厚比に関する制限が設けられている。図 6.2.3 の自由辺の初期たわみ量を w_0 とすると、旧版における調査では、最大初期たわみ w_0 と各種の断面寸法の間には、ほとんど相関が認められない。ただし、自由辺の初期たわみ波形は 1 次モードが卓越しており、 $|w_0/b|$ の平均値 M は $1/270$ 程度である。2 次～5 次のモードに対する $|w_0/b|$ の平均値 M はほぼ $1/670$ 以下である。したがって、解析では 1 次モードのみを考慮し、 $w_0 = b/250$ 程度を用いる。

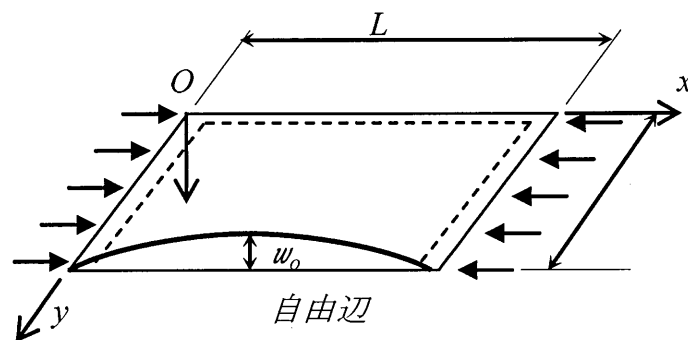
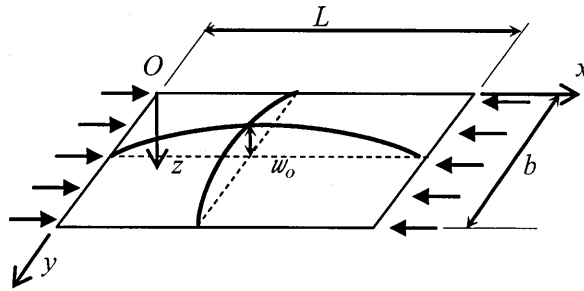


図 6.2.3 自由突出フランジ

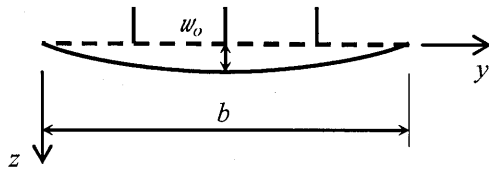
(4) 圧縮板

旧版での調査結果によると、縦横比、幅厚比、幅厚比パラメータ、縦リブ剛比、縦リブ断面積比、縦リブ本数、横リブ剛比、横リブ断面積比、横リブ本数といったパラメータと初期たわみの相関性は明確には認められないようである。

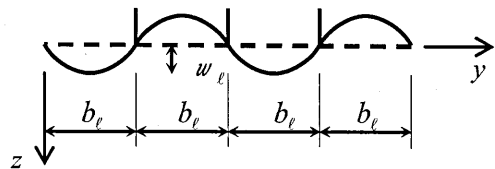
無補剛板パネルの初期たわみの代表的な形状は、図 6.2.4(a) のようになる。板パネル幅 b (図 6.2.4(a) 中の y 軸方向の長さ) に対して初期たわみ量 w_0 (図 6.2.4(a) 中の z 軸方向の変位) は $b/150$ 程度以下となる。



(a) 無補剛板の初期たわみ例



(b) 補剛板 (全体モード)



(c) 補剛板 (局所モード)

図 6.2.4 初期たわみモードの概略図

補剛板パネルについての初期たわみは、無補剛板のような全体モードの初期たわみと補剛材間の板パネルに生じる局所モードの初期たわみを合成した形状となる。全体モードの初期たわみは、板パネル長を L (図 6.2.4 中の x 軸方向の長さ) とすると、 $L/1000$ 程度となる。局所モードの初期たわみは、 $w_l = b_l/150$ 以下となる。数値解析を行う際には、どちらのたわみ形状も半波長の正弦波の形状に近似して導入する。

(5) 腹板

旧版では、図 6.2.5 に示されているような腹板系の初期不整について調査研究を行っている、下添字 s, w はそれぞれ補剛材と腹板を、また、 h, v はそれぞれ水平と垂直補剛材を表わす。

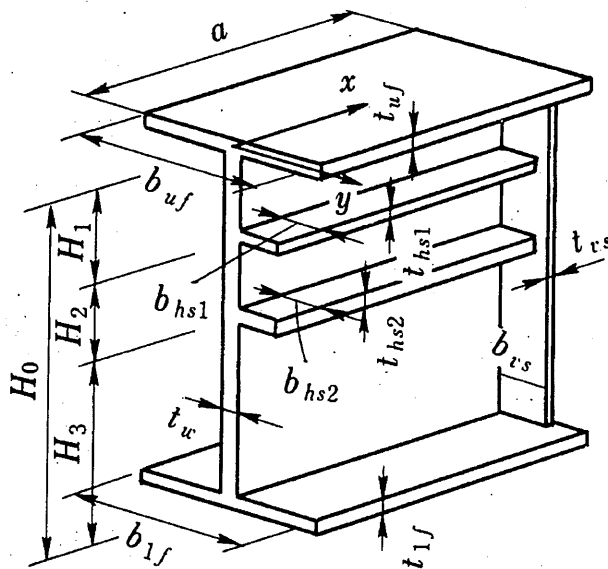


図 6.2.5 腹板の概略図

腹板の初期たわみの制限値は $H_0/250$ である。実橋の統計をみるとこの制限値は非常に小さな超過確率に対応していて 1%未満である。一方垂直補剛材や水平補剛材、あるいはフランジの水平初期たわみに対する一般的な制限値 $a/1000$ または $H_0/1000$ は相当高い超過確率、14~20%に対応している。解析において、これらの初期不整を考慮した例は少ない。

(6) ダイヤフラムおよび支点上補剛材

旧版において行われた調査結果によると、一般にダイヤフラムの形状は複雑であり、しかもマンホールや、支点上ダイヤフラムの場合の支点上補剛材の存在により、なお一層複雑な形状を示す。

支点上補剛材および板パネルの初期たわみに関しては測定データ数が少ないが、圧縮補剛板の場合と比較して次のような事柄が認められる。

- a) 支点上鉛直補剛材の初期たわみは、圧縮補剛板の縦補剛材の初期たわみに比較し、平均値で約 1/30 である。このように小さい理由としては、支点上補剛材の断面が大きく、しかも板パネルの両側に対称に取り付けられているためと考えられる。
- b) 板パネルの初期たわみについては、圧縮板パネルの初期たわみと同じ程度の大きさである。圧縮板パネルの初期たわみが縦補剛材の剛比に左右されないことから妥当な結果と思われる。

(7) 目違い・角折れ

板継ぎ溶接部には、図 6.2.6 に示されるような目違い量 e および角変形量 δ などの初期不整が存在する。図 6.2.6 に示すように、実測した目違い量 e および角変形量 δ のそれぞれの最大量 e_{\max} および δ_{\max} を統計処理した旧版の調査結果によると、これらの初期不整の分布モードは、図 6.2.6(a) に示すような平行モードが特に卓越していることが分かった。実橋では、 e と δ は混在している。

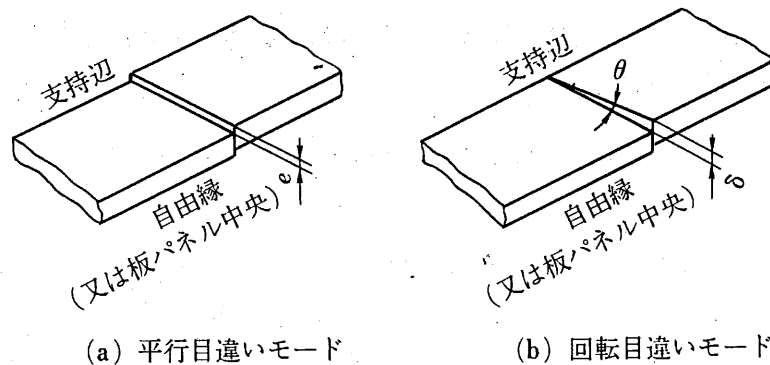


図 6.2.6 目違いモード

(8) 溶融めっき桁

鋼材の最大の欠点は腐食することであろう。この点溶融亜鉛めっき処理の効果は大きいものがある。しかし、めっきの過程で高温にさらされるため、初期不整が通常の橋桁以上に出るのではないかと、また、耐力の低下も大きいのではないかと懸念がある。

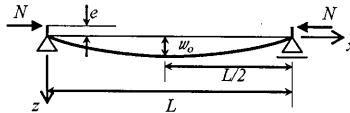
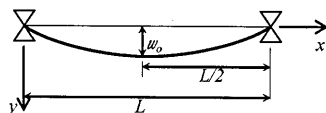
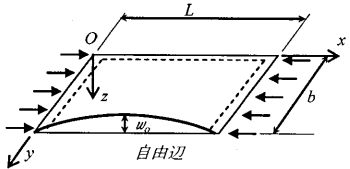
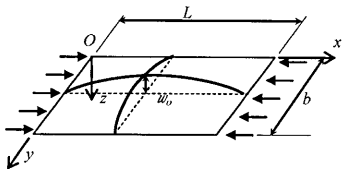
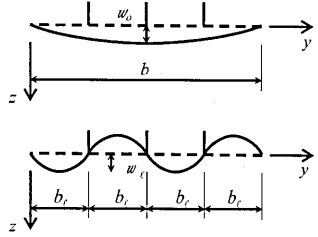
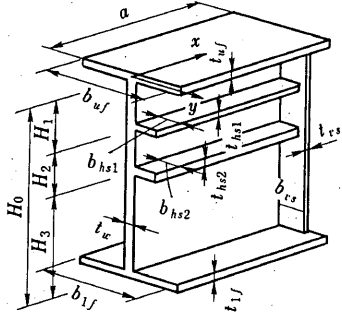
亜鉛めっきされた鋼桁は単独に置いただけの場合に顕著な初期ねじり変形が生じる。しかし、対傾構や横構によって組み立てられれば、この初期ねじり変形も簡単に矯正される。旧版の初期たわみのデータはいずれもこの最後の状態で計測されたものである。

垂直補剛材やフランジの初期たわみやパネルの単純ねじりモードの初期たわみの大きさに関しては、おおむね通常の桁のそれらの値と比較して特に大きいとはいえない。しかし、水平補剛材の初期たわみはかなり大きい。

6.2.3 初期たわみ規定

主要な初期たわみに値については，わが国の道路橋示方書 [日本道路協会，2002]（以下道示と略記する）で部材精度として規定されている．道示の規定と，旧版での推奨値を対比してまとめてみると，表 6.2.1 のようになる．これらの値は，測定された最大値，もしくは制限値に相当する値であり，実際の部材について測定を行うとさらに小さな値となる．しかし，数値解析ではこれらの最大値を導入する場合はほとんどである．その他の初期たわみや各国の設計基準での初期たわみは旧版にまとめられている．

表 6.2.1 主要な初期たわみ値の比較

項目	初期たわみ	備考
柱 (圧縮材の曲がり)	推奨値： $w_0 = L/1000$ 道示： $w_0 = L/1000$	
桁	推奨値： $w_0 = L/1000$ 道示： $w_0 = L/500 \sim L/2000$ (RC 床版) $w_0 = L/500$ (鋼床版)	
自由突出板 (フランジ直角度)	推奨値： $w_0 = b/100$ 道示： $w_0 = b/100$ w_0 ：自由辺の最大初期たわみ	
圧縮板 (板の平面度)	推奨値： $w_0 = b/150$ 道示： $w_0 = b/150$	
圧縮補剛板 (板の平面度)	推奨値：全体 $w_0 = b/1000$ 局所 $w_1 = b_1/150$ 道示：全体 $w_0 = b/1000$ 局所 $w_1 = b_1/150$	
腹板 (板の平面度)	推奨値： $\delta = H_0/250$ 道示： $\delta = H_0/250$ δ ：面外方向の初期たわみ量	

6.3 残留応力

6.3.1 概 説

残留応力とは外力が作用しないときでも物体内に残存している応力のことであり、固有応力、初期応力、元応力ともいわれる。その発生原因としては、(1) 溶接やガス切断などにより一部分の容積変化から生じる場合、(2) 一部の塑性変形または不均一な塑性変形から生じる場合、(3) 幾何学的な適合条件が満足されていない無理な組立てから生じる場合、などが挙げられる。残留応力は溶接、圧延をはじめ、冷却、フレームカット、冷間圧延あるいは引き抜き等の製作過程によっても生じる。

6.3.2 残留応力の計測法

溶接による残留応力の測定法について整理すれば、次のような手法に大別できる。[土木学会, 1987; 安福ら, 1986; 三木ら, 1998, 2003]

- A. 応力緩和法
- B. X-線回折法
- C. 応力に敏感な材料の使用による方法
- D. 亀裂法
- E. 磁歪法 (じわいほう)

このうち応力緩和法は、供試体を細く切断したときの弾性ひずみの解放を調べるものであり、原理的には電気あるいは機械的ひずみゲージを用いる。X-線回折法は非破壊試験であり材料の原子格子パラメータを測定により明らかにするものである。X-線フィルム技術やX-線回折メータの技術を用いる。ボールベアリング、歯車の歯、あるいは研磨後の材料表面を計測するのに利用されている。従来、一方向の計測を行うのに相当の時間を要していたが、最近では数秒での計測が可能となり、また精度も向上してきた。応力に敏感な材料の使用による方法はさらにC1. 超音波法と、C2. 硬さの応力による変化を捉える方法に分類でき、C1は(a) 偏超音波法と(b) 超音波探査法に細分される。(a)は光弾性と似た原理を利用しているが、(b)は超音波の吸収率が応力によって変化する原理を利用するものである。磁歪法は「磁気ひずみ応力測定法」とも呼ばれ、鋼材等の強磁性体が応力により磁気的な異方性を生じることを利用したもので、非破壊検査の分野で発達してきた手法である。

6.3.3 残留応力の大きさと分布

以下の項目について数値解析の際に導入すべき残留応力の代表的な分布形状、大きさ、許容値および注意点を示す。各項目とも詳細な計測データについては、旧版に記載されている。

(1) 圧延材

圧延材の残留応力は冷却過程における不均一な温度分布により生じるものである。I形断面を例にとれば、次のような幾何学的な比により残留応力が支配されるということが経験上わかっている。

$$h/b, t_f/h, t_f/b, t_w/h, t_w/b$$

ここに、 h は断面の高さ、 b はフランジ幅、 t_w は腹板厚、 t_f はフランジ厚である。表 6.3.1 は様々なI形断面の典型的な残留応力分布を示している。

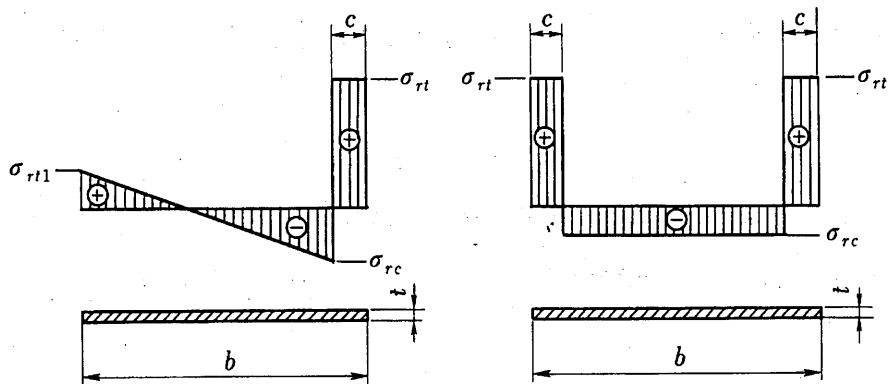
(2) ガス切断による残留応力

ガス切断を行えば局所的な熱効果により、残留応力分布が形状および分布量ともに変化する。加熱部の近傍では引張残留応力が生じ、その最大応力度は材質の降伏応力度 σ_Y に達する。したがって、その他の部分では

圧縮応力が生じ、平衡状態を保つことになる。図 6.3.1(a) は平板の一端 (右端) だけを、(b) は両端ともガス切断したときの板の残留応力分布を示す。σ_{rt} はおよそ降伏応力度 σ_Y に達する。

表 6.3.1 各種圧延 I 型断面の典型的残留応力分布 (T:引張, C:圧縮)

h/b	断面形状	残留応力分布	t _w /h	t _w /b	t _f /h	t _f /b		
		a	Web	Flanges	0.032	0.032	0.045	0.045
					to	to	to	to
< 1.2		b			0.075	0.078	0.091	0.093
					to	to	to	to
> 1.2		c			0.062	0.068	0.104	0.113
					to	to	to	to
					0.068	0.073	0.114	0.121
					to	to	to	to
					0.031	0.042	0.048	0.062
					to	to	to	to
					0.032	0.048	0.051	0.080
< 1.7		b			0.030	0.046	0.051	0.077
> 1.7		e			0.018	0.039	0.025	0.063
					to	to	to	to
					0.028	0.056	0.043	0.085



(a) 一端のみガス切断

(b) 両端をガス切断

図 6.3.1 ガス切断による残留応力分布

(3) 溶接による残留応力

溶接部の近傍ではガス切断と同様に局所的な入熱により伸びようとするが、溶接部から離れた母材により拘束され、残留応力が発生する。この残留応力は溶融部およびそのごく近傍では、通常の構造用炭素鋼では降伏

応力度 σ_Y にも達する。しかし、降伏応力度の高い高強度鋼においては、残留応力は降伏応力度以下である。そして塑性縮みを起こす。次に冷却が始まると、この収縮によって溶融部およびそのごく近傍部は引張り応力を受けるようになり、ここではほぼ降伏応力度に達する。したがって、平衡を保つために母材内で溶接部より離れたところには圧縮の残留応力を生じることになる。

圧延によって生じる残留応力と溶接によって生じる残留応力は本質的に異なる。圧延では冷却が始まる直前までは一様な温度分布であるが、溶接の場合には入熱箇所が極めて局部的である。溶接過程の影響は、入熱量、溶け込み深さ、ビード断面積に依存し、これらが大きければ大きいほど圧縮残留応力度も大きくなる。

溶接 I 形断面の典型的残留応力分布を図 6.3.2 に示す。一般に、熱影響の少ない腹板中央付近では、圧延ばりが $0.6\sigma_Y$ 程度以上に達する場合があるが、溶接ばりでは $0.3\sigma_Y$ 程度である。解析ではこの残留応力を考慮する必要がある。

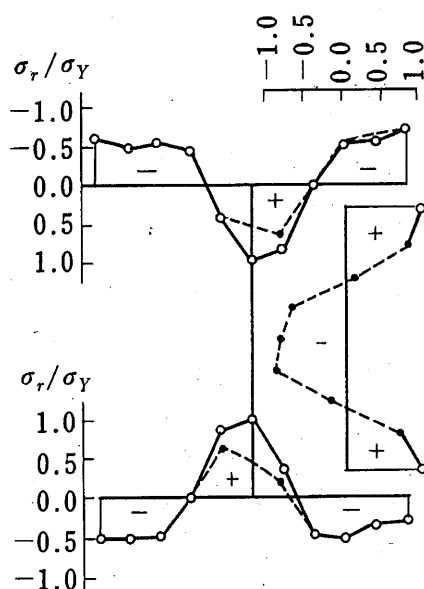


図 6.3.2 溶接 I 型断面の典型的残留応力分布 (実測例) [青木ら, 1972]

(4) パイプ部材の残留応力

パイプ部材はその製作方法によって残留応力分布形状が著しく異なる。構造用鋼管として最も一般的に用いられている電縫鋼管は、板を管状に曲げて電気抵抗により圧着加熱して溶接する。熱残留応力は極めて少ない代わりに、溶接成形後の形状補正のためのローラーによる塑性加工を行うため管内には肉厚方向にも引張りから圧縮へと変化する残留応力が生じ、これが円周方向にも部材軸方向にも存在している。このため軸方向の作用応力に対し、部材は 2 軸応力状態で降伏する。電縫鋼管よりやや大きな口径の部材に用いられる溶接鋼管は板を冷間で曲げて管状にした後、通常の溶接によって接合されるため、溶接部に大きな引張残留応力が生ずる。また板の曲げ加工により残留応力は板の厚さ方向にも変化する。ただし、平板と比較すると、円形断面部材においては、残留応力の影響よりも初期たわみの影響の方が大きい。

(5) 補剛板の残留応力

補剛材 (リブ) 付板は鋼桁橋の他に、吊橋、斜張橋の主塔、アーチ弦材等、鋼構造物の主要部材の構成要素であり、初期たわみと同様、残留応力はその負荷力を決定づける要因の 1 つとなっている。特に圧縮力が卓越するような、鋼製橋脚のフランジなどの解析では考慮すべき項目である。

a) 板パネル

リブ間の板パネル部の圧縮残留応力は、リブを板パネルに溶接により接合するため、溶接部近傍で降伏に近い引張残留応力 σ_Y が生じる。そのためリブ間の板パネルには、応力が釣り合うように、図 6.3.3 に示すような圧縮の残留応力が生じる。解析では応力分布を台形に近似して用いることが多い。残留応力の圧縮領域の幅 b_c をパネル幅 b との比 b_c/b で表わすと、 b_c/b は高張力鋼では、0.8~0.9、普通鋼では、0.7~0.8 の間にある。また平均圧縮残留応力 σ_{rc} を鋼材の降伏応力 σ_Y で無次元化した値 σ_{rc}/σ_Y は、SS400 で 0.2 前後となっている。これらの値は、板の幅厚比 b/t にあまり影響されない。

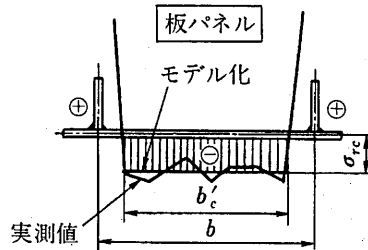
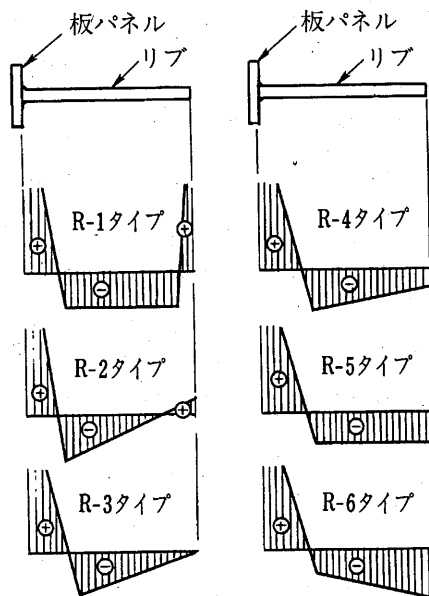


図 6.3.3 板パネルの典型的残留応力分布

b) リブ

リブ内の残留応力はリブ自由端を機械切断して製作した場合とガス切断した場合とで分布形状が異なる。板パネルとリブの溶接部では残留応力量は降伏応力度 σ_Y に達するが、リブ自由端では、ばらつきが非常に大きい。代表的な分布形状モデルを図 6.3.4 に示す。最大圧縮応力を σ_{rc} とすると、リブ内の圧縮応力は SS400 で $\sigma_{rc}/\sigma_Y = 0.3$ 程度である。数値解析では、R-2 タイプまたは R-5 タイプを用いることが多い。なお、一部の残留応力分布は自己釣り合い条件を満足していないが、それが耐荷力に及ぼす影響は大きくないようである [宇佐美ら, 1996]。



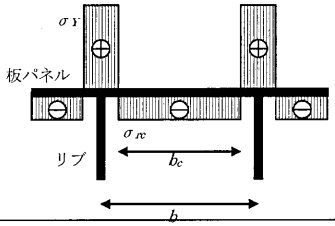
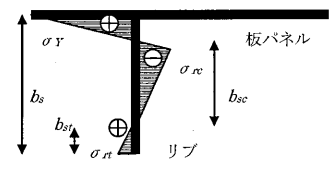
R-1: ガス切断した場合 R-2~R-6: 機械切断した場合

図 6.3.4 リブの残留応力分布形状

6.3.4 数値解析における残留応力

ここでは、数値解析において、以上に示した残留応力を用いる際の代表的な例を表 6.3.2 にまとめる。

表 6.3.2 箱型断面鋼製橋脚に用いる代表的残留応力

項目	残留応力量	備考
板パネル部分	σ_Y : 引張降伏応力度 $\sigma_{rc} = 0.3\sigma_Y$ の圧縮応力度 $b_c/b = 0.7$	
リブ内	σ_Y : 引張降伏応力度 $\sigma_{rc} = 0.3\sigma_Y$ の圧縮応力度 $\sigma_{rt} = \sigma_{rc}/(2 - \sigma_{rc}/\sigma_Y)$ $= 0.176\sigma_Y$ の引張応力度 $b_s = 0.824b_{st} + 1.3b_{sc}$	

6.4 まとめと今後の展望

旧版の座屈設計ガイドラインが出版される前後には、盛んに初期不整の計測やその検討が行われていたが、ここ 10 年程は、新たなデータの蓄積がほとんど行われていないなど、精力的に検討されていない領域である。しかし、極厚の板に対する検討や、降伏応力の異なる板を組み合わせた場合などの検討がされ始めているなど、地道ではあるが、研究は進められている。さらに火災等を想定したような高温下での初期不整と温度の関係などに関する研究も行われてはいるが、常温での状態ではなく、通常の土木構造物の座屈設計では検討する必要のない領域である。

初期不整の計測方法としては、たとえば、レーザーによる 3D スキャンや写真撮影などのように、非接触型の計測方法が開発され、その精度も向上している。しかしながら初期不整量そのものが製作現場の努力により劇的に小さくなっている。さらに、残留応力が発生しにくい溶接方法も開発されるなど、材料レベルでの改善も行われている。これらの努力により、一部には初期不整は従来の約半分くらいにまで減少したとの報告もある。したがって、より安全性の高い構造物を設計することが出来るようになってきているのが現状である。

計算機の処理能力の向上により、より精緻な解析が比較的容易に行えるようになり、初期たわみと残留応力の両方を考慮した解析が主流となりつつある。その際には安全側の評価をするために、旧版で示されている初期不整量の最大値を与えた上で解析が行われている傾向が強い。しかしながら、最大点を見極めるだけの解析など、大まかな傾向をつかむための解析や繰り返しにより初期不整の影響が顕著に生じないような挙動を解析する場合などには、これらの初期不整を導入せずにモデル化を行う場合もある。解析に導入する初期不整量も時代と共に、また用途に応じて変化する必要があるのかも知れない。

参考文献

- 青木徹彦, 福本嘸士 (1972) : 鋼柱の座屈強度のばらつきにおよぼす残留応力分布の影響について, 土木学会論文集, 第 201 号, pp.31-41, 1972.
- 安福精一, 磯野吉正 (1986) : 磁気プローブによる溶接残留応力分布の測定, 非破壊検査, Vol.35, No.11, pp.805-810, 1986.
- 土木学会 (1987) : 座屈設計ガイドライン, 土木学会鋼構造委員会, 座屈設計ガイドライン作成小委員会 (委員長: 福本嘸士), 鋼構造シリーズ 2, 1987.

- 宇佐美勉, 葛漢彬 (1996): 薄板集成短柱の強度推定法, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.171-178, 1996.
- 藤井堅, 三木千壽, 寺田宏行, 田中和成, 有尾一郎 (1998a): ステンレスクラッド鋼の材料特性および残留応力とその発生メカニズム, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.103 - 114, 1998.
- 藤井伸彦, 堂垣正博, 三上市蔵 (1998b): 鋼 H 形部材の全体座屈と局部座屈の連成強度, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.115 - 126, 1998.
- 三木千壽, 白旗弘実, 塩崎匡克 (1998): 厚板突き合わせ溶接部に存在する面状欠陥の超音波非破壊評価に対する基礎的検討, 土木学会論文集, No.598/I-44, pp.323-332, 1998.
- 三輪昌弘, 長谷部宣男, 中島将貴, 館浩司 (1998): 荷重作用下での変位拘束による残留応力とそれによる生ずるクラックの解析, 土木学会論文集, No.598/I-44, pp.391-400, 1998.
- 渡邊秀貴, 高橋実, 増田陳紀, 西脇威夫 (1998): 局部座屈を受けるプレートガーダーパネルの弾性座屈荷重, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.135 - 146, 1998.
- 大賀水田生, 高上顕, 崎濱忍 (1999): 座屈時の変形モードを初期不整として用いた薄肉断面部材の耐荷力解析, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.157 - 164, 1999.
- 小澤一誠, 石川貴士, 王慶雲, 後藤芳顕 (1999): 鋼製橋脚を対象とした圧縮補剛板の単調載荷挙動における平均応力—平均ひずみ関係のモデル化, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.125 - 136, 1999.
- 川西直樹, 後藤芳顕 (1999): 鋼構造物の有限要素法解析における残留応力と初期たわみの導入方法について, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.137 - 148, 1999.
- 北田俊行, 中井博, 加賀山泰一, 松村政秀 (1999): 既設鋼製橋脚における補剛板の耐震補強に関する研究, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.215 - 226, 1999.
- 寺沢直樹, 白戸真大, 岩熊哲夫, 後藤彦彦 (1999): くり返し作用を受ける薄板の構成モデルと塑性ひずみ分布, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.9 - 17, 1999.
- 藤井堅, 三木千壽, 藤井崇文 (1999): ステンレスクラッド鋼板の圧縮耐荷力と残留応力, 土木学会論文集, No.633/I-49, pp.181-192, 1999.
- 望月清彦, 松田宏, 和地輝雄, 増田陳紀, 白旗弘実, 細江隆 (1999): プレートガーダー橋主桁腹板の初期たわみが座屈耐荷力に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.149 - 156, 1999.
- 渡辺智彦, 葛漢彬, 宇佐美勉 (1999): 繰返し載荷を受ける補剛板の強度と変形能に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.185 - 195, 1999.
- 大倉一郎, 瓦林誠, 嘉指敦 (2000): 水平補剛材端ギャップによるプレートガーダーの曲げ終局強度の低下, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.171 - 178, 2000.
- 北田俊行, 中井博, 越智内士 (2000): 高張力鋼を用いた圧縮板・圧縮補剛板の終局強度に関する研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.179 - 190, 2000.
- 久保全弘, 西口和宏, 杉山宣央 (2000): 横ねじれ崩壊した圧延鋼はりの矯正効果, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.199 - 206, 2000.
- 田中克弘, 北田俊行, 向山寿孝 (2000): 降伏棚のない鋼材からなる部材, および変断面部材の弾塑性有限変位解析, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.271 - 279, 2000.
- 中村一史, 前田研一, 紺野誠, 師山裕, 林正 (2000): 長大斜張橋の分岐座屈特性に及ぼす初期たわみの影響と荷重条件, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.229 - 240, 2000.
- 藤井崇文, 藤井堅, 三木千壽 (2000): 圧縮を受けるステンレスクラッド鋼板の弾塑性非線形挙動, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.191 - 198, 2000.
- 足立正和, 崎元達郎, 村上秀樹, 今田進平, 渡辺浩 (2001): 鋼製八角形断面柱脚も局部座屈を考慮した応力—ひずみ型復元力モデル, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.65 - 76, 2001.
- 宇佐美勉, 織田博孝 (2001): 鋼構造物の耐震解析法および耐震照査法に関する研究展望, 土木学会論文集, No.668/I-54, pp.1-16, 2001.
- 田中克弘, 北田俊行 (2001): 鋼橋構造物の耐荷力算定のための弾塑性有限変位解析について, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.125 - 136, 2001.
- 葛西昭, 渡辺智彦, 宇佐美勉, Praween CHUSLIP (2002): 線断力を受ける無補剛箱型断面部材の強度と変形能, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp.129-140, 2002.
- 宇井崇, 汐待公二郎, 西村宣男, 鈴木博之 (2002): 炭素繊維強化樹脂板を接着した圧縮鋼板の極限強度解析, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.43 - 50, 2002.
- 日本道路協会 (2002): 道路橋示方書・同解説, 2002.
- 奈良敬, 村上茂之, 江間康人 (2002): 面内曲げ引張りを受ける鋼桁腹板の極限強度, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.59 - 66, 2002.

- 原田秀則, 山尾敏孝, 村本裕樹 (2002): 高軸力下の補剛箱型断面部材の曲げ繰返し解析に関する研究, 構造工学論文集, Vol.48A. pp.119 - 128. 2002.
- 森下邦宏, 宇佐美勉, 阪野崇人, 葛西昭 (2002): 鋼製橋脚の動的耐震照査法に関する検討, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.181-190, 2002.
- Praween CHUSILP, 葛漢彬, 宇佐美勉 (2002): せん断力を受ける補剛箱型断面鋼部材の強度と変形能に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.48A. pp.657 - 666. 2002.
- 三木千壽, 西川和廣, 白旗弘実, 高橋実 (2003): 鋼橋溶接部の非破壊検査のための超音波自動探傷システムの性能確認, 土木学会論文集, No.731/I-63, pp.103-117, 2003.
- 葛西昭, 宇佐美勉, 水谷正樹 (2004): 繰返しせん断力を受ける斜め補剛パネルの強度と変形能, 構造工学論文集, Vol.50A. pp.131 - 142. 2004.