

身近な金属の  
マイクロ組織を読む

第 **49** 回

# 商品開発での数値

(鉄塔フランジ継手の設計)

シリーズ ● 材料の素顔に迫る

## はじめに

今回は、従来の金属のミクロ解析の話題から少し離れて、鋼材の製品に関する設計を取り上げ、**図1**に示す送電鉄塔で使用される大型鋼管フランジの開発に当たって設計上何が問題で、どのような課題があったのかを数値シミュレーションの面から考えます。

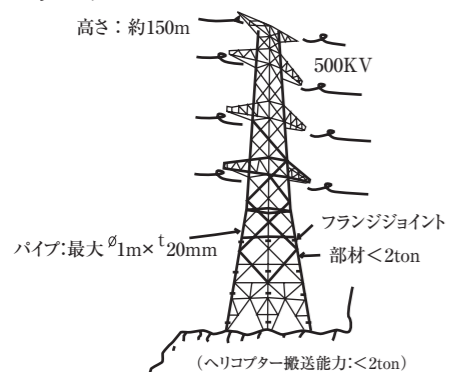


図1 送電鉄塔のフランジ継手

日本における送電は明治20年頃に始まると言われる。初期の送電用設備は今の電柱の木製程度のものと思われるが、今では日本全国で24万基ほどの大型鉄塔がそびえているようである。

20年ほど前、経済産業省に相当する通産省が青森県陸奥に大型原子力発電所を建設し、関東まで送電できないかという構想計画を基に、大型送電鉄塔に必要なフランジ鋼管継手の開発に着手することとなった。この時の鉄塔は500KVの送電用で高さが150mに及ぶもので、強度的には十分な配慮を必要とした。鉄塔が倒壊してもその原因が人為的なもの以外は予想以上の強風が吹いたためであろうとの結論で終始するのが普通であった。これらの点を考慮し、より安全な鉄塔建設に協力することにした。

さて、数値シミュレーションにおいては、実際の多くの材料は均質、等方性ではないが材料のヤング率(垂直応力を弾性縦歪みで割った値)は鉄鋼では200GPaとするのが一般的である。また大きな力が作用しても変形は微小であるという仮定で力と変形が線形関係で結ばれるものと考えられる。このように物の設計においては色々な前提条件が設定される。したがって、応力解析はあくまでも一つのモデルに関する評価であって、実際の物に対する100点の解答ではないと認識して欲しい。しかし応力解析は実用的には極めて有効な強度評価手段であって、物の形態を決めるのに欠かすことは出来ない。ここでは数値シミュレーションの有効性と限界を示して行きたい。

## 材料力学でのモデル化

数値計算を行う場合、いろいろな数式モデルを作る必要がある。板を曲げた場合、その内力は表面と内部で直線的に変化すると仮定する。厳密にはそのようなことはないが、この様な線形化を行うことが数式化の第一歩となる。材料定数のヤング率は正確には材料毎に求める必要があり、一般的には引張り試験で測定される。鋳鋼品と鍛鋼品では強度もさることながらヤング率も**表1**のように異なる。

表1 各種金属材料のヤング率 (GPa)

材料	ヤング率
球状黒鉛鋳鉄	142
炭素鋼 (0.2C)	206
SUS304	196
純チタン	106

物体の応力と変形の関係を基に境界条件として与えられる外力と釣合う内部の応力分布を求めれば、それが求める解となる。このために数値計算法が用いられ、最近では有限要素法(構造物の応力や変形を求めるため、対象物を有限個の要素に分割して解析する方法)が最も多く使用されるようになった。物体は全て三次元であり、この応力計算をするには**図2**のような三次元有限要素法を適用すればよいと思われるが、計算に必要な労力と時間は相当多くなる。そこで必要な力学モデルを抽出して二次元モデルを創出し、場合によっては一次元モデルである程度の解を得ることも重要で、技術者の技量が問われることとなる。

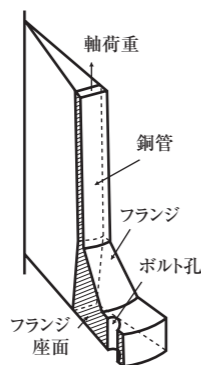


図2 三次元モデル

一般に構造物は一体で構成されることはない。溶接やボルト締結で構造物全体が構成されるのが普通である。また解析の対象となる物の領域も全体を捉えなければならぬかどうか重要な課題となる。必要な部分だけを上手くモデル化できればそれに越したことはない。これにはサンブナンの原理など(端部に集中荷重を作用させても、その部位から内部の方に遠ざかると平滑な内力分布に変わるという力学原理である。このことに関する厳密な証明はなされていない。)を適用するのが良い。

溶接部は欠陥を含め、強度的問題を有するが、これも普通の応力解析では取り扱えない。形状を忠実に扱って計算した後、その部分に安全率を考慮して強度補償するのが一般的である。

## 送電鉄塔用鋼管フランジ継手の設計シミュレーション

従来技術では**図3a**のような溶接フランジが用いられてきたが、溶接部の強度上の問題やリブの関係からボルトを2列ゲージにする必要性などからより大径となり、雨水も溜まり易い構造となっていた。そこで**図3b**に示すようなフランジを開発するに至った。有限要素法を用いたが、実質的に二次元として扱える軸対象物体に近似し、労力と時間の大幅な短縮を図った。

形状のモデル化ではボルトでの締結を考慮する必要性から境界条件を色々と模索し、**図4**のモデルで良い結果の得られることを示した。特にボルトの強度を考慮することが問題となったが、円周方向に配列される数十個のボルトとフランジの孔を軸対象のリングにモデル化した。

大型台風による風の強さからフランジに作用する外力を推定してそれに耐えられることを条件に解析を行い、最終的には実験による検証試験を実施した。最後の破断試験でフランジに塑性変形も生じないよう、ボルトの強度で支配されるような設計条件を制定することが出来た。ボルトで締結されるフランジの強度問題で思わぬ課題があった。

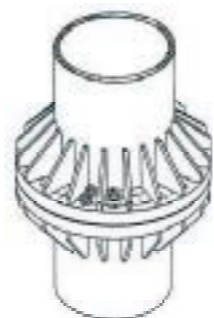


図3a 溶接板フランジ

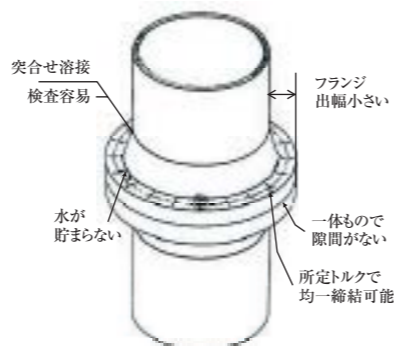


図3b 一体形フランジ

# シミュレーションの応用

今回はいつもの「身近な金属のマイクロ組織を読む」から少し離れ、鋼材の製品に関する設計を取り上げました。少々難しいお話ですが、非常に興味深いものです。余談ではありますが、本文中にある送電鉄塔ですが、いつも巨大な送電鉄塔はどこまでつながっているのだろうか、大空にそびえ立つ鉄塔をみあげては想像を巡らしたのはわたしだけでしょか。

元神戸大学教授 ● 日本機械学会フェロー  
森田喜保

遅れ破壊防止に注力されている。

大きな力が作用するとフランジのボルト座面は陥没し、ボルト導入軸力の開放となる。このことはボルト疲労強度の低下につながるのとときどき増し締め作業が行われて対処されている。以下にその理由を述べる。一般に材料の疲労強度は**図6**に示すようなSN曲線(縦軸に応力振幅、横軸に対数表示でくり返し数を取って疲労強度の表示をしたもの)で表示され、疲労強度は応力振幅に支配されることが判る。一方、実際のボルト強度を評価するために、横軸にボルトに作用する応力(ボルト軸力はトルクN・mで管理される)をとり、作用する外加重を縦軸にとってボルトに作用する応力をシミュレーションすると**図7**のようになる。導入軸力が0の場合は原点から直線的に外力に比例して右方向に応力が上昇する。大きな導入軸力を与えると、初期のボルト応力は大きくなるが、外加重が作用し始めてもボルトに作用する応力は上昇しない。導入軸力が大きいほど、外加重が増してもボルトに生じる応力振幅はあまり大きくなり、疲労強度上有利となることがわかる。それゆえ、ボルト導入軸力を大とする(強く締め付ける)のが好ましい。

ボルトの保守管理では鉄塔の下から望遠鏡でボルトの存在を確認しているようで、下からボルト孔を通して空が見えたと下にボルトが落ちていることになるようである。

一本のボルトが欠落した場合の影響を数値シミュレーションで評価した。これは軸対象物体の非対

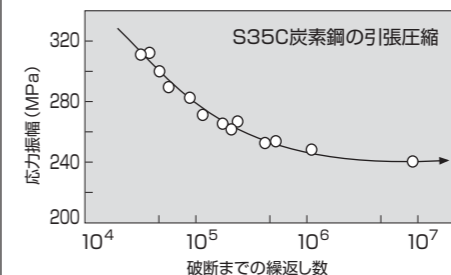


図6 S35Cの疲労強度 (SN曲線)

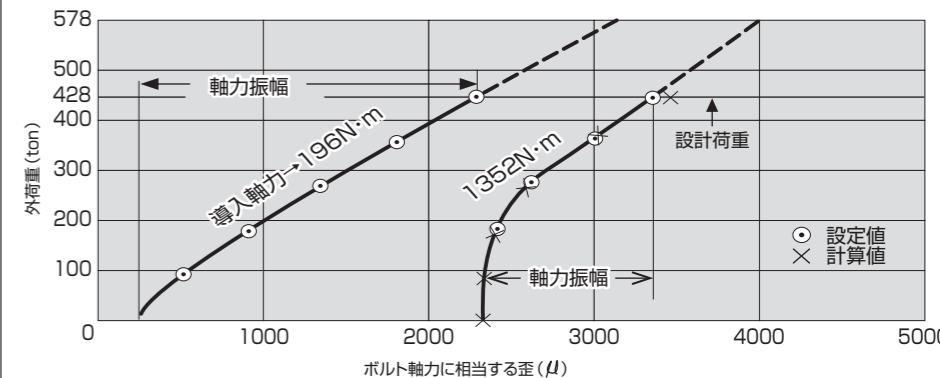


図7 ボルト導入軸力の影響

称変形解析をすることで可能となった。結論的には**図8**および**表2**に示すように52本あるボルトが一本欠落すると、その直ぐ横のボルトには10%の過重負荷となることがわかった。これよりボルトの管理には相当気をつける必要のあることが明らかとなった。

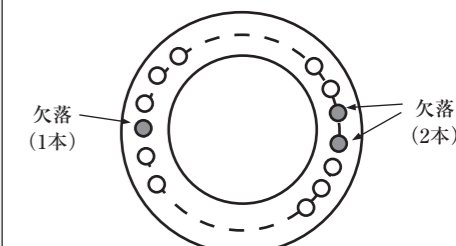


図8 ボルト欠落の影響

表2 ボルト欠落の影響 (M30×52本)

φ914.4のフランジ	正常	欠落	
		1本	2本
ボルトの発生応力 (MPa)	513	569	611
応力比	1.0	1.11	1.19

## おわりに

以上鋼管継手フランジの開発を例に数値シミュレーションについて述べましたが、他の問題にも一般的に適用できます。対象物の設計開発が目的であって、数値シミュレーションは工学における有効な道具に過ぎません。その使用方法を工夫することで実際の開発を効率よく実施できます。そして重要なのは工学的センスを前提に、数値シミュレーションを定性的な方向付けから定量的な評価へと用いることにより、一層効率的な開発、検討が可能となることを特に主張したい。数値シミュレーションを道具として有効に利用すれば設計開発をタイムリーに楽しく行えるものと信じます。

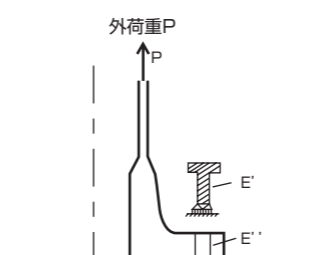


図4 解析モデル

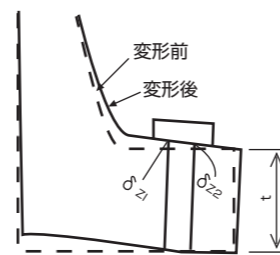


図5 てこ反力とボルトの曲げ

それは**図5**に示すような「てこ反力」が生じることであった。上下のフランジ座面が相互に完全に離間すると上下で締結される鋼管はボルトだけを介して外力と釣合うことは容易に理解されるが、フランジの端部で繋がっているような場合には端部が「てこの支点」となりボルトに大きな力が作用する。これと同時にボルトに大きな曲げが作用することもわかる。これを抑制することはフランジ継手の強度を補償することにも繋がるので、フランジの設計ではこのことに対する配慮が必要となった。「てこの支点」までの距離は小さいほど反力も小さくなるのでフランジの寸法においてボルト孔のセンター位置からフランジ端部までの長さを極力小さくした。ボルトに生じる曲げを小さくするにはフランジの厚さを大きくする必要があり、これらの点を考慮してフランジの最終形状を決定した。

フランジの初めての引張り試験で30mm径のボルト数十個が破断して、建屋の天井を数箇所突破したことがあった。人に当たれば即死間違いなしである。それ以降はネットでボルト周辺を囲い、飛散防止に努めたが今思い出すとぞっとする。しかし、ここまで辿り着くのに数値シミュレーションは有効な手段であり、労力と時間の節約において大きな効果があった。

## 数値シミュレーションで評価しにくい課題

出来上がったフランジは支柱の鋼管と溶接接合して使用される。これら全体を最終的に亜鉛メッキして耐食処理を施すが、この処理で酸洗いやメッキ時に水素割れや液体金属脆性を起こす危険もあり、十分な配慮を必要とした。ボルトについては焼入れのし易い材質の選定と9T (90kgf/mm<sup>2</sup>まで切れない)以下の強度のものが使用され、