



発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2020年版） JSME S NC1-2020

設計・建設、材料及び溶接に係る日本機械学会の
規格の技術評価に関する第4回検討チーム会合に
おける日本機械学会への説明依頼事項への回答

2023年10月2日

(一社)日本機械学会 発電用設備規格委員会
原子力専門委員会 設計・建設分科会

目次

1. 設計・建設規格

(1) 他規格等の要求事項を取り込む際の考え方→なし

(2) クラス1支持構造物の極限解析による評価

(a) 極限解析が、運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲに適用できる技術的根拠を示して下さい。

(3) クラス1支持構造物に対する曲げ座屈評価式の見直し→なし

(4) クラス2, 3容器の上位クラス規定の適用→なし

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

(a) 極限解析が、運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲに適用できる技術的根拠を示して下さい。

<質問の背景>

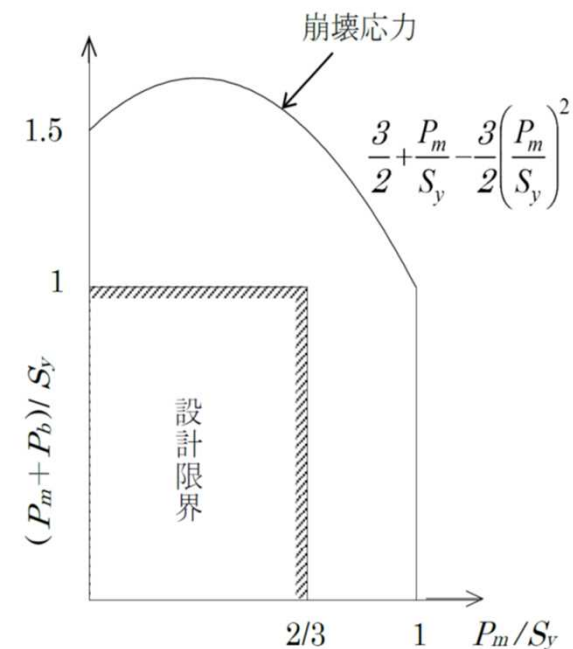
- 技術基準規則では、運転状態Ⅰ、Ⅱに対して、全体的な変形を弾性域に抑えることという要求がある。作用荷重が降伏点をF値として算出した崩壊荷重の3分の2以下としているが、必ずしも全体的な変形を弾性に抑えるという要求を満たしているかは自明ではない。極限解析における崩壊荷重は、2倍勾配法で求めており、弾性域を超えたところで設定されている。この3分の2が弾性域といえるかは、個別に確認しないと分からないのではないか。
- 技術基準規則では、運転状態Ⅲに対して、全体的な塑性変形が生じないこと、ただし、構造上の不連続部における局所的な塑性変形はこの限りではない、という要求がある。極限解析は、降伏点F値として算出するので崩壊荷重以下になるとのことだが、技術基準規則では、構造上の不連続部における局所的な塑性変形のみを許容している。極限解析で算出した場合、どこで降伏するかは分からないので、構造上の不連続部で塑性変形が起きるとは限らないのではないか。

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

(回答)

[運転状態I, II に対して]

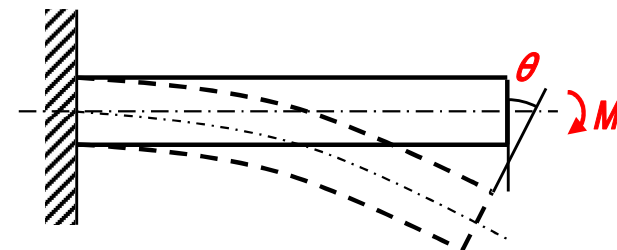
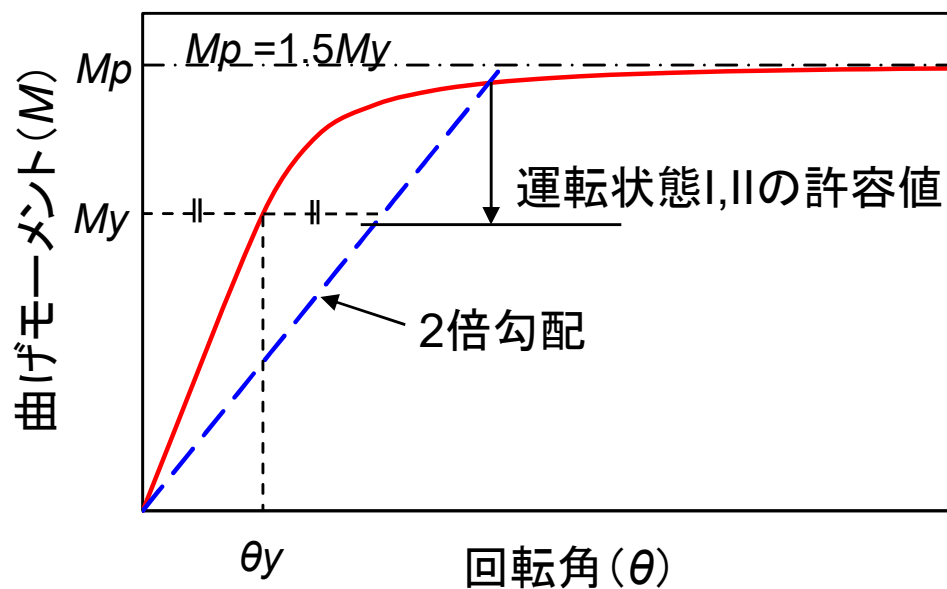
- 単純梁の曲げの場合、降伏点をF値として求めた極限解析による崩壊荷重は、全断面が降伏し塑性崩壊するときのモーメント(M_p)を算出することとなります。表面が降伏点に達するときのモーメント(M_y)は、この M_p よりも小さく、矩形断面で1/1.5、支持構造物で一般的に用いられるH型鋼では1/1.1程度となります(次ページ以降参照)。
- 従って、二倍勾配法で求めた崩壊荷重を1.5で除して求めた値(崩壊荷重の3分の2)を許容荷重とし制限することで、弾完全塑性体の崩壊応力に対して、膜+曲げ応力に対しては安全率は一定ではないものの、十分安全側に設計限界を定めています。
- 一般的な部材では、構造上の不連続部があればそこに応力集中が生じ一般部より先に構造不連続部に降伏が生じることになりますが、これは局部的で部材全体の挙動には影響を及ぼさないため、個別に確認するまでもなく、全体的な変形は弾性範囲内に抑えられることとなります。



解説図 PVB-3111-2 引張り及び曲げによる崩壊応力及び設計限界

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

- 矩形梁の曲げに対して、2倍勾配法も合わせて示したものが下図になります。
- $M_p=1.5M_y$ ですが、保守的に2倍勾配法で推定した M_p に対して $1/1.5$ 倍したものを許容荷重とするため、表面降伏時の荷重である M_y よりも低く評価され、表面でも塑性は生じません。
- これにより、「**変形を弾性域に抑える**」ことができます。



(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

- M_p と M_y の比は部材の断面形状によって変わりますが(注)、矩形断面では1.5であり、設計・建設規格でもPVB-3111 (1) c. で最大1.5としており、 M_p を1.5で除したもので制限しておけば表面でも降伏せず、板厚内には塑性域が発生しないことになります。
- 塑性断面係数と弾性断面係数の比、 (Z_p/Z) が1.5より小さい程、表面の応力は降伏点よりさらに低く制限されることとなります(H型鋼では降伏点の3/4程度)。

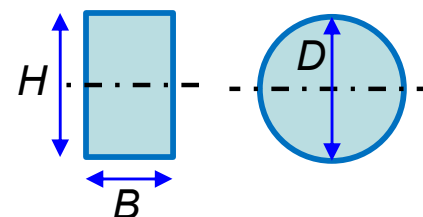
(注) [矩形断面] $M_p/M_y = Z_p/Z = (BH^2/4)/(BH^2/6) = 1.5$

[中実円形断面] $M_p/M_y = Z_p/Z = (D^3/6)/(\pi D^3/32) = 1.70$

[管状断面] $M_p/M_y = Z_p/Z = [32(1-Y^3)]/[6\pi(1-Y^4)]$

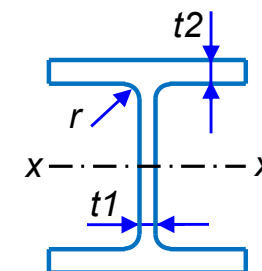
$Y = d_i$ (管の内径) / d_o (管の外径) $\Rightarrow Y = 0.65$ で $M_p/M_y = 1.5$

薄肉($Y \rightarrow 1$) で $M_p/M_y \approx 1.27$



[H型鋼: JIS G 3192-2021]

シリーズ	HxB	t1	t2	r	Z	Zp	(Zp/Z)
100x100	100x100	6	8	8	75.6	86.4	1.14
200x200	200x200	8	12	13	472	525	1.11
300x300	300x300	10	15	13	1350	1480	1.10



(2) クラス1支持構造物の極限解析による評価

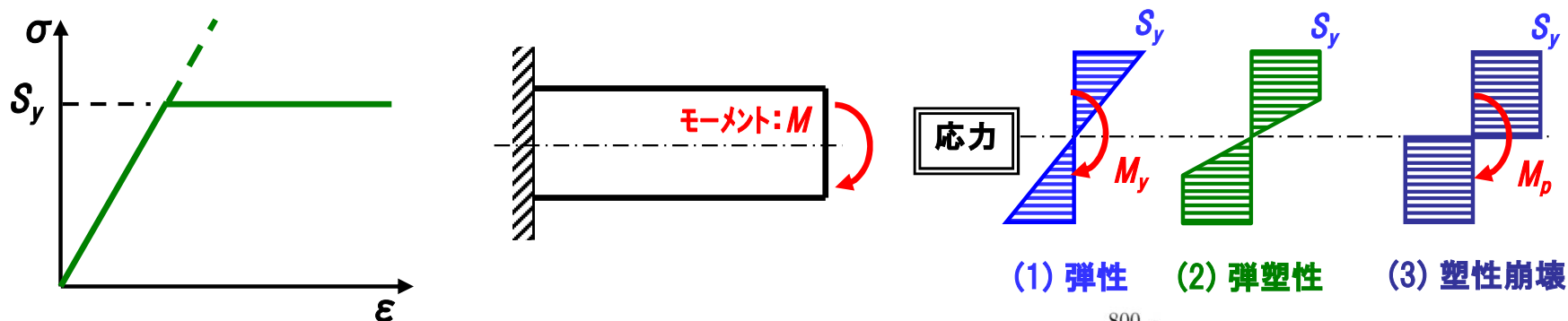
(回答)

[運転状態IIIに対して]

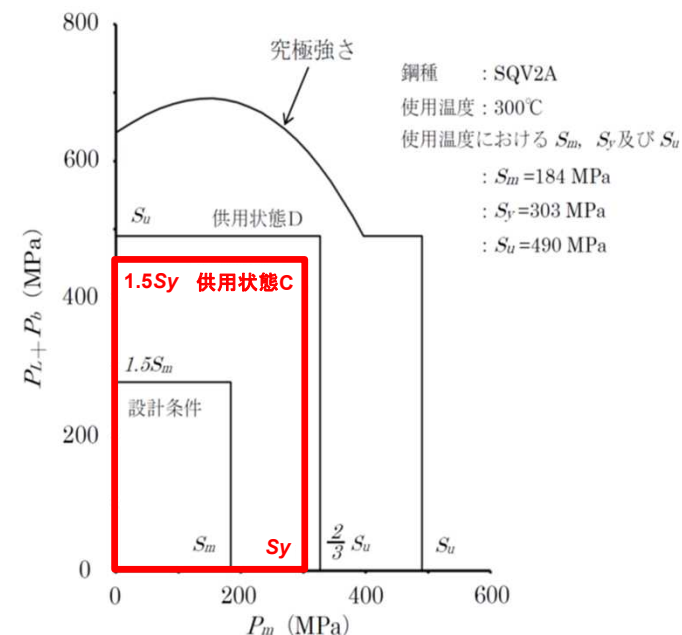
- 技術基準規則が要求する“全体的な塑性変形が生じないこと”はその後の「ただし、構造上の不連続部における局所的な塑性変形はこの限りではない」とは独立した、構造不連続部ではない部分(一般部)に対する要求であって、以前より一般部の板厚内に弾性域が残れば全体的な塑性変形が生じないとして許容されてきているものです。極限解析による評価では、降伏点をF値として求めた崩壊荷重を許容荷重とし制限すれば板厚内に弾性域が残るため、“全体的な塑性変形が生じない”こととなります(次ページ参照)。
- 一方、「構造上の不連続部における局所的な塑性変形はこの限りではない」というのは、拡がり限定された構造不連続部では、仮にある断面で見た場合に全体が降伏するような状態になっても周辺部分からの拘束によって変形量が制限されることから、限られた範囲では断面全体での塑性変形が生じることも許すことを意味していると考えられます。例えば炉容器の胴部と鏡板の接合部分などに適用される「一次局部膜応力」が運転状態IIIでは降伏応力を越えてもよいというのはこれに対応しているものと考えられます。
- 極限解析法には「局所性」などが自動的に評価できるというメリットがあると考えられます。

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

- 一次応力に対する許容値体系は、極限解析に基づいています。簡単な梁を例にとると、 S_y を降伏点とする弾完全塑性を考えた場合、表面が降伏点に達するときのモーメント(M_y)に対して、全断面が降伏し、塑性崩壊するときのモーメント(M_p)は、矩形梁の場合は M_y の1.5倍になります。



- 矩形梁を対象に許容値体系を図示したものが、例えば設計・建設規格の解説図PVB-3111-5です。
- 供用状態C (運転状態III)**では、 S_y を降伏点とする弾完全塑性体を想定した上で、右上の(3)の状態に至る前の(2)の状態を許容しており、これが「**全体的な塑性変形が生じないこと**」に対応していると考えられます。



(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

[参考：技術基準解釈との対応]

- 技術基準規則において、「クラス 1 機器にあつては、最高使用圧力、最高使用温度及び機械的荷重が負荷されている状態（以下「設計上定める条件」という。）において、**全体的な変形を弾性域に抑えること。**」とされています。これは、例えば容器（穴の周辺部、ボルト等、オメガシール及びキャノピーシールを除く）に対しては告示第501号の第13条第1項に基づくものと理解しており、技術基準規則解釈において当該部は設計・建設規格のPVB-3110に対応するとしています（容器の場合はPVB-3111(1) [設計条件]）。
- また、技術基準規則の「クラス 1 容器・・・及びクラス 1 支持構造物にあつては、運転状態Ⅲにおいて、**全体的な塑性変形が生じないこと。**ただし、構造上の不連続部における局所的な塑性変形はこの限りでない。」も同様であり、技術基準規則解釈において当該部は設計・建設規格のPVB-3110に対応するとしています（容器の場合はPVB-3111(2) [供用状態C]）。

(2) クラス 1 支持構造物の極限解析による評価

[参考：荷重解析との関係]

- 配管系の荷重解析では、支持構造物等を簡単な等価剛性としてモデル化した弾性解析を実施しており、今回の改定は、弾完全塑性体を仮定したモデルを用いた荷重解析を実施することを目的としたものではありません。
- その上で、弾性解析による荷重解析により得られた各支持構造物の荷重が、個別の支持構造物に対する極限解析で求められた制限値よりも低いことを示すことで、当該支持構造物の健全性を確認することになります。
- 運転状態I、IIでは、支持構造物の挙動がほぼ完全に弾性的なので、弾性解析による荷重解析で得られた荷重に対して極限解析による制限値を用いて評価することに問題はないと考えます。運転状態IIIでも、「全体的な塑性変形が生じない」状態は保たれており、弾性解析による荷重解析で得られた荷重を用いることに問題はないと考えます。