

卒業論文

配管強度の設計裕度の合理化手法の開発

p.1~p.67 完

平成 22 年 2 月 5 日提出

指導教員 酒井 信介 教授

80203 前田 惇貴

目次

第1章	序論	6
1.1	研究の背景	6
1.2	決定論的安全裕度と確率論的安全裕度	6
1.3	部分安全係数法	7
1.4	研究の目的	7
1.5	論文の構成	7
第2章	基礎理論	8
2.1	確率論的信頼性手法	8
2.1.1	限界状態関数	8
2.1.2	信頼性指標 β と破壊点	9
2.1.3	一次ガウス近似法	10
2.2	部分安全係数法	12
2.2.1	部分安全係数法の概要	12
2.2.2	部分安全係数の決定法	13
2.3	モンテカルロシミュレーション	13
2.3.1	破壊確率の検証の必要性	13
2.3.2	モンテカルロシミュレーションによる破壊確率の算出	14
2.3.3	重点サンプリング法	14
第3章	FEMを用いた信頼性解析手法	15
3.1	実機に即したモデルに対する信頼性解析	15
3.1.1	限界状態関数の定義	15
3.1.2	有限要素法解析	15
3.2	有限要素法解析ソフトウェア ANSYS の確率設計機能	15
3.2.1	確率設計機能の概要	15
3.2.2	モンテカルロシミュレーション	16
3.2.3	応答曲面法	16
3.3	信頼性解析への応用	17
3.3.1	破壊モードに応じた出力パラメータの設定	17
3.3.2	応答曲面の出力	18
3.3.3	一次ガウス近似法の適用	18
3.3.4	注意点	18
第4章	配管エルボ部の解析	19
4.1	モデルの設定	19

4.1.1 原子力発電所の配管系	19
4.1.2 材料の設定	20
4.1.3 荷重の設定	21
4.1.4 有限要素モデルの作成	21
4.2 破壊モードの定義	22
4.2.1 塑性崩壊	22
4.2.2 二倍勾配法	22
4.3 パラメータ設定	24
4.3.1 入力パラメータの設定	24
4.3.2 出力パラメータの設定	24
4.4 本解析における注意点	25
4.5 解析結果	28
4.6 結果の考察	29
4.7 評価手法の提案	34
4.7.1 評価手法の検討	34
4.7.2 裕度評価の例	38
第5章 結論	39
5.1 総括	39
5.2 今後の課題	39
A) 付録 解析結果	40
$COV_L = 0.1, COV_{\sigma_f} = 0.05$ の場合	41
$COV_L = 0.1, COV_{\sigma_f} = 0.1$ の場合	47
$COV_L = 0.15, COV_{\sigma_f} = 0.05$ の場合	53
$COV_L = 0.15, COV_{\sigma_f} = 0.1$ の場合	59
参考文献	65
謝辞	66

図表目次

図 2.1 信頼性指標と破壊確率の関係.....	9
図 2.2 一次ガウス近似法フローチャート	11
図 3.1 ANSYS による確率解析の流れ.....	17
図 4.1 モデルの概要	19
図 4.2 弾塑性体と弾完全塑性体.....	20
図 4.3 流動応力の概念	21
図 4.4 パイプ要素接続部.....	22
図 4.5 二倍勾配法 の概念図.....	23
図 4.6 二倍勾配法 の出力として用いる距離変化	23
図 4.7 塑性崩壊の定義に用いる値	25
図 4.8 応答曲面によって生じる物理的意味のない零点	26
図 4.9 実際に得られた応答曲面の例.....	26
図 4.1 0 $COV_L = 0.1, COV_{\sigma_f} = 0.05$ における部分安全係数と信頼性指標の関係 ...	30
図 4.1 1 $COV_L = 0.1, COV_{\sigma_f} = 0.1$ における部分安全係数と信頼性指標の関係	31
図 4.1 2 $COV_L = 0.15, COV_{\sigma_f} = 0.05$ における部分安全係数と信頼性指標の関係 ..	32
図 4.1 3 $COV_L = 0.15, COV_{\sigma_f} = 0.1$ における部分安全係数と信頼性指標の関係 ...	33
図 4.1 4 STPG370 を用いた場合の荷重変動係数 0.1 における評価線図.....	36
図 4.1 5 STPG370 を用いた場合の荷重変動係数 0.15 における評価線図.....	37
図 A.1 sch40,呼び径 65 の結果一覧	41
図 A.2 sch40,呼び径 90 の結果一覧	42
図 A.3 sch40,呼び径 125 の結果一覧	43
図 A.4 sch80,呼び径 65 の結果一覧	44
図 A.5 sch80,呼び径 90 の結果一覧	45
図 A.6 sch80,呼び径 125 の結果一覧	46
図 A.7 sch40,呼び径 65 の結果一覧	47
図 A.8 sch40,呼び径 90 の結果一覧	48
図 A.9 sch40,呼び径 125 の結果一覧	49
図 A.1 0 sch80,呼び径 65 の結果一覧.....	50
図 A.1 1 sch80,呼び径 90 の結果一覧.....	51
図 A.1 2 sch80,呼び径 125 の結果一覧.....	52

図 A.1 3 sch40,呼び径 65 の結果一覧.....	53
図 A.1 4 sch40,呼び径 90 の結果一覧.....	54
図 A.1 5 sch40,呼び径 125 の結果一覧.....	55
図 A.1 6 sch80,呼び径 65 の結果一覧.....	56
図 A.1 7 sch80,呼び径 90 の結果一覧.....	57
図 A.1 8 sch80,呼び径 125 の結果一覧.....	58
図 A.1 9 sch40,呼び径 65 の結果一覧.....	59
図 A.2 0 sch40,呼び径 90 の結果一覧.....	60
図 A.2 1 sch40,呼び径 125 の結果一覧.....	61
図 A.2 2 sch80,呼び径 65 の結果一覧.....	62
図 A.2 3 sch80,呼び径 90 の結果一覧.....	63
図 A.2 4 sch80,呼び径 125 の結果一覧.....	64
表 4.1 圧力配管 JIS (抜粋)	20
表 4.2 材料設定	21
表 4.3 確率入力パラメーター一覧.....	24
表 4.4 弾性域勾配の一覧.....	28
表 4.5 荷重 COV=0.1 における一次近似の結果	34
表 4.6 荷重 COV=0.15 における一次近似の結果	35

第1章 序論

1.1 研究の背景

原子力発電所における配管系の設計においては、従来の決定論的安全率を用いた設計が行われており、設計の各段階・部分において安全側となるように限界荷重に対する余裕幅が設定されている。この余裕幅のことを安全裕度という。配管系に直接影響を及ぼし深刻なダメージを与えうる現象として挙げられるのは地震であり、実際設計においては地震入力に耐えられる事を念頭に置いた設計が行われている。具体的には、まず設計の対象とする入力地震を発生が想定されうる最大の地震に取り、その上で、設計対象地震動を加えた場合に配管系に生じる荷重を実際に生じうる荷重よりも多めに見積もり、さらに材料の破壊限界についても実際の限界に対して余裕をもった限界を設定し破壊評価を行う、というように幾重にも安全裕度が設定された設計が行われている。しかし、各部分で設定されている安全裕度は理論的な根拠に基づいて設定されているものとは言い難く、中には明らかに不合理なものも存在する。そのため、系全体で想定荷重に対して安全裕度を持っていることはできるが、どの程度の安全裕度を持っているのかを明確に示すことは困難となる。万が一想定以上の荷重が系に加わった場合には、その荷重が実際の限界荷重にどの程度近いものなのか判断ができないため、系の安全裕度を生かすことができず、運転停止などの措置を取らざるを得なくなり、運転再開の判断も難しい状況となっている。このことが招く不利益は非常に大きく、より合理的な設計と運用のために設計裕度を明確に示す手法を確立することが求められている。

1.2 決定論的安全裕度と確率論的安全裕度

従来型の設計法である決定論的安全裕度による設計においては、強度ファクターのみに安全係数（一般に安全率といわれる）を乗じた評価式を用いて安全を確保する許容応力設計法が用いられている。許容応力設計法は荷重や強度に存在するばらつきを考慮することなく、ある唯一の係数のみで安全評価が可能であり、取扱いが簡便であるという大きな利点が存在する。しかし一方、安全係数が経験的・決定論的に定められているために破壊に対する安全裕度が不明確であるという欠点が存在する。

そこで本研究では確率論的安全裕度を用いた検討を行う。確率論的安全裕度とは、設計パラメータとして現れる各種変数をばらつきまでも考慮した確率変数として扱い、確率論的信頼性手法を用いて算出される、破壊確率 pf やそれに関連する評価指標である信頼性指標

β によって安全裕度を示すものである。これらの指標を用いることにより破壊に対する安全裕度を定量的に示すことが可能となる。

確率論的安全裕度を用いた設計においては、設計対象機器の重要度、周囲への影響度などを考慮して設定される許容破壊確率 p_{fa} や目標信頼性 β_0 に対して以下のような評価を行うことにより安全を確保する。

$$p_{fa} \geq p_f \text{ or } \beta_0 \leq \beta$$

このように確率論的安全裕度を用いた設計は理論的に意味のある安全裕度設定を可能とするが、その一方、運用者には確率論の知識が必要となり、決定論的安全裕度に比べると取扱いが難しいという欠点も持っている。

1.3 部分安全係数法

前述の確率論的安全裕度と合わせて用いられる手法として、部分安全係数法がある。部分安全係数法とは、一つのファクターに対して安全係数を設定し安全評価を行う決定論的安全裕度手法に対し、複数のファクターに安全係数を設定して安全評価を行う手法であり、あらかじめ個々の安全係数を目標信頼性 β_0 が満たされるように決定しておくことにより、単純な安全照査式によって定量的な評価を行うことが可能となるものである。

目標信頼性に対する部分安全係数を表の形式でまとめておくことにより、運用者に確率論的知識がなくとも定量的安全裕度評価が可能となるため、部分安全係数法は実用上非常に優れた手法である。

1.4 研究の目的

こうした背景に基づき、本研究では配管系に対して確率論的信頼性手法を適用し、破壊確率・信頼性指標を算出する方法を確立することを主目的とする。その上で、実用上の利便性を考慮し、単純な取扱いにより定量的安全裕度評価が可能となる手法を提案することを目標とする。

1.5 論文の構成

本論文は5章から構成される。

第2章では、本研究で用いる確率論的信頼性手法の基礎理論とそれに関連するいくつかの手法について述べる。

第3章では、有限要素法解析ソフト ANSYS を用いて確率論的安全裕度を評価する手法について述べる。

第4章では、第3章で述べた手法を用いて実機に即したモデルに対する解析を行い、各種パラメータが安全裕度に与える影響について検討し、裕度の合理化手法の提案を行う。

第5章では、得られた結果を総括する。

第2章 基礎理論^{[1][2]}

2.1 確率論的信頼性手法

2.1.1 限界状態関数

構造物の破壊確率の評価を行うには、構造物に生じる破壊モードに対応した数式表現を与える必要がある。破断、座屈などの構造物に生じる破壊モードは、一般に作用荷重、材料強度など複数の不確定要因の関数となっており、その破壊モードの生起は以下に述べるように限界状態関数を用いて定義される。

$$Z = g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0 \quad \text{破壊モードは生起しない}$$

$$Z \leq 0 \quad \text{破壊モードが生起する}$$

すなわち、限界状態関数 g_i が正である場合には破壊モード i は発生せず、少なくともこのモードに対して構造物は安全であるが、限界状態関数が 0 以下であるような場合には破壊モード i が発生し、構造物は破壊することになる。

なお、限界状態関数の形式は同一の問題に対して複数考えられるが、どのようなものであってもかまわない。また、実際の信頼性解析においては、すべての不確定要因を確率変数として扱う必要はなく、他の要因に比べて十分にばらつきが小さいとみなせる要因は定数として扱ってもよい。

もっともな単純な例として、破壊モードに関係する不確定要因が荷重ファクター S と強度ファクター R の2つのみである場合を取り上げると、 S が R を上回った場合に破壊が生じるので限界状態関数は次式で表わされる。

$$g(R, S) = R - S \quad (2.1)$$

R, S をそれぞれ確率変数とし各々の確率密度関数が $f_R(R), f_S(S)$ である場合、結合確率密度関数はこれらの積 $f_R(R) \cdot f_S(S)$ となるため、破壊確率 p_f は次式のように g が負となる領域の積分により求めることができる。

$$p_f = \iint_{g(R, S) \leq 0} f_R(R) f_S(S) dR dS \quad (2.2)$$

しかし、一般に多変数関数の結合確率密度関数を求めることはできず、仮に結合確率密度関数が求められたとしても多重積分を解くことは困難であることが多い。そのため、破壊確率の算出には後述の一次ガウス近似法やモンテカルロシミュレーションなどの近似解法

が用いられる。

2.1.2 信頼性指標 β と破壊点

確率論的安全裕度において，破壊確率 p_f と共に指標として用いられる値に信頼性指標 β がある．信頼性指標 β は，限界状態関数の平均値 μ_z と標準偏差 σ_z を用いて以下のように定義される．

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z}$$

信頼性指標 β は，構造物に破壊が生じる点（ $Z=0$ ）から平均値までの距離を，標準偏差の何倍であるかという観点から示す量であり，安全裕度を定量的に示す指標として用いることが可能である．破壊確率 p_f を厳密に求めることは前述の通り一般に困難であるが，限界状態関数を一次平面で近似して破壊確率を算出する一次近似信頼性手法(FORM)を用いることにより，信頼性指標 β と破壊確率 p_f との間に以下の関係が成り立つ．

$$p_f \cong \Phi(-\beta)$$

なお， $\Phi(\cdot)$ は標準正規累積分布関数である．

β が大きいほど p_f は小さくなり，両者は一対一で対応する．そのため，どちらか一方を求めることができればもう片方も求めることが可能である．

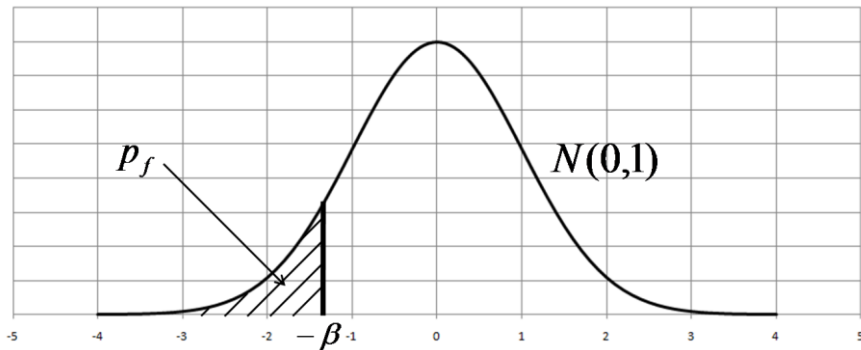


図 2.1 信頼性指標と破壊確率の関係

先ほど定義した限界状態関数に対し，破壊領域と安全領域の境目である $g=0$ となる曲面のことを限界状態曲面とよぶ．この限界状態曲面を，平均値が 0，標準偏差が 1 となる標準正規空間に写像したとき，限界状態曲面上で原点に最も近い点，すなわちもっとも破壊に至りやすい点の事を破壊点（design point，設計点とも呼ばれる）という．

この破壊点と関連して，信頼性指標 β には 2 つの重要な性質がある． 1 つ目は，この標準正規空間上における原点と破壊点との距離が，上で定義した β と一致するというものである． 2 つ目の性質は，同一問題に対し複数考えられる限界状態関数の形式に関して，どの形式であっても β の値は変化せず，破壊点の値も等しいというものである．前節で限界状態関数の形式をどのようにとってもよいとしたのは，この性質があるからである．

2.1.3 一次ガウス近似法

一次ガウス近似法は破壊モードの生起確率を求める近似解法として最も有力な方法の一つであり、この手法で求められるのは破壊点と信頼性指標 β である。(1)限界状態関数を破壊点の周りで線形近似し、(2)正規分布以外の分布を持つ変数を正規確率変数で近似する。その後、(3)正規確率変数のみからなる線形関数として近似された限界状態関数の平均値と標準偏差を求め、(4)信頼性指標 β を算出する。(1)・(4)の手順は仮の破壊点の値に対して実行されるため、 β の値が収束するまでこの手順を繰り返して行う。これが一次ガウス近似法の概要である。なお、本研究ではすべての確率変数を正規確率変数であると仮定して解析を行うため、(2)の手順は省略している。

以下詳細を述べる。

限界状態関数が以下の形で表わされているとする。

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.3)$$

この限界状態関数がある任意点 $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ の回りで線形化すると、以下のようになる

$$Z \cong g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{\mathbf{x}^*} \quad (2.4)$$

この線形化された限界状態関数に対しては、平均値、標準偏差が次のようにあらわされる。

$$\mu_Z \cong g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n (\mu_{x_i} - x_i^*) \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{\mathbf{x}^*} \quad (2.5)$$

$$\sigma_Z \cong \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{\mathbf{x}^*} \right)^2 \sigma_{x_i}^2} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \left(\left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{\mathbf{x}^*} \right) \sigma_{x_i} \quad (2.6)$$

ただし

$$\alpha_i = \frac{\left(\left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{\mathbf{x}^*} \right) \sigma_{x_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{\mathbf{x}^*} \right)^2 \sigma_{x_i}^2}} \quad (2.7)$$

である。

定義から

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_{x_i} - x_i^*) \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{\mathbf{x}^*}}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \left(\left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{\mathbf{x}^*} \right) \sigma_{x_i}} \quad (2.8)$$

となる必要があるが、常にこの関係が成り立つ条件は

$$\mu_{x_i} - x_i^* - \alpha_i \left(\frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \right) \sigma_{x_i} = 0 \quad (2.9)$$

と求められる。

次にこれらの式を用いた具体的な計算手順を説明する。

計算に先立って、 β と α_i に対して適当な初期値を与えておく必要がある。本研究では特に記述のない限り β の初期値として2.0、 α_i の初期値として各確率変数の平均値を与える。

まず、式(2.9)により線形化点 x^* を更新し、続いて式(2.7)を用いて α_i を更新する。次に、更新された線形化点 x^* と α_i に対して式(2.5)と(2.6)を用いて平均値、標準偏差を計算し、 β を求める。そして、現在の線形化点の値を限界状態関数に代入し、十分0に近い値となっているかを評価し、収束を判定する。収束したと判断できるまでこの手順を繰り返し行う。このようにして破壊点と β を算出する。

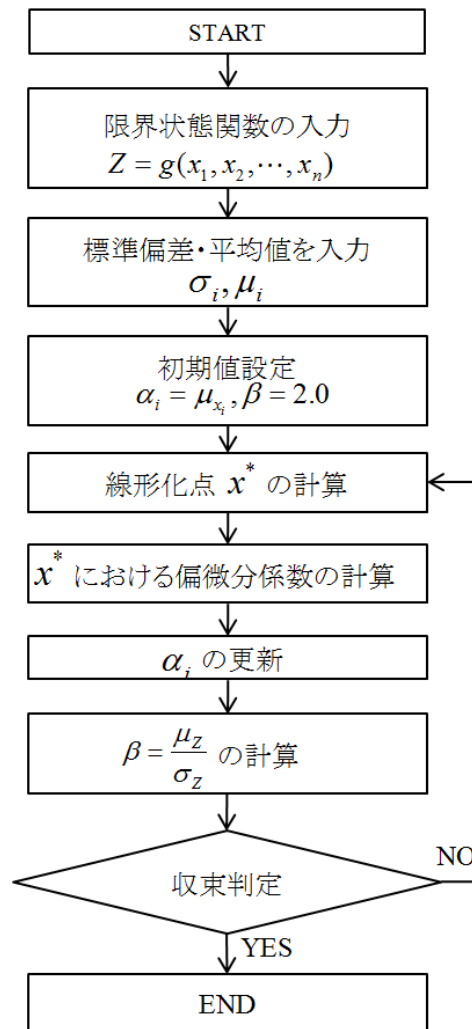


図 2.2 一次ガウス近似法フローチャート

2.2 部分安全係数法

2.1 節で述べた確率論的信頼性手法を用いると、各種不確定要因の分布情報をもとに破壊確率 P_f や信頼性指標 β を計算することができ、構造物の安全裕度を定量的に表すことが可能となる。そして、対象構造物の重要度や影響度を考慮して設定される目標信頼性 β_0 を基準にすることにより、合理的な設計を行うことができる。しかし、確率論的信頼性手法を用いるには確率論の知識が必要となるため、扱いが容易ではないという実用上の問題が存在する。

そこで用いられるのが部分安全係数法である。これは目標信頼性 β_0 を満たすように部分安全係数をあらかじめ算出しておき、安全照査式にあてはめて計算することで定量的安全裕度評価を可能とする手法である。目標信頼性に対する部分安全係数を表の形でまとめておき、安全照査式と共に示方書に記載しておけば、従来と同じ方法で設計・構造健全性評価が可能となり、確率計算も不要となる。このように、部分安全係数法は取り扱いが容易であり、実用上優れた方法である。

2.2.1 部分安全係数法の概要

部分安全係数法に類似した設計手法として、現在構造物の設計において多く用いられているのが許容応力設計法と呼ばれる手法である。許容応力設計法における安全性確認のプロセスは以下の式により概念的に示される。

$$\frac{R}{v} \geq \sum_{i=1}^n S_i$$

ただし、 v は安全率、 R は強度ファクター、 S_i は i 番目の荷重ファクターである。この式は構造物に複数の荷重が生じる場合、その荷重の総和が、強度を安全率で割った値以下に収まっていれば安全であると判断するということを意味している。許容応力設計法では、各種不確定要素に存在する不確定性は安全率 v によってまとめて処理される仕組みとなっており、その安全率は経験的に決定されている。その意味で決定論的安全率ともよばれる。この方法は唯一の安全係数で設計上の安全確認プロセスが行えるため、取扱いが非常に容易であるという大きなメリットがある。しかし一方、安全率 v が厳密な根拠に基づいて設定されているものではないために破壊からの安全裕度が不明確であり、また系全体として過大な安全裕度をもちやすいという欠点が存在する。

一方、部分安全係数法における安全性確認プロセスは以下の式によって表わされる。

$$\phi R \geq \sum_{i=1}^n \gamma_i S_i$$

許容応力設計法との大きな違いは各荷重ファクター、強度ファクターにそれぞれ安全係数を与えていることであり、これらの安全係数を部分安全係数(PSF: Partial Safety Factor)と呼ぶ。部分安全係数を各強度・荷重の確率的特性を考慮し、信頼性理論に基づき決定す

ることで、あらかじめ設定した安全裕度を確保することが可能となる。部分安全係数法は荷重・強度の確率分布特性が分かる場合でなければ適用できず、また安全係数の数が増える分、設計時の手間が増大するなど許容応力設計法に劣る部分も存在する。しかし、許容応力設計法では厳密に考慮されることのない各種不確定要素のばらつき具合や破壊に対する影響度などを含めて安全係数が設定できるため、資源の節約やコストの削減につながるという利点がある。

2.2.2 部分安全係数の決定法

この節では具体的に信頼性理論に基づき部分安全係数を決定する方法について述べる。部分安全係数の決定方法は一通りではなく、扱う問題の特徴に応じた意味のある決定法であればよい。本研究であらわれる限界状態関数は非線形であるため、非線形な限界状態関数に対して用いることのできる、破壊点を利用した決定法を用いる。

前述の一次ガウス近似法により、あるパラメータの設定に対し、信頼性指標 β と破壊点が求められる。目標信頼性を β_0 とする場合、各種パラメータを変化させ信頼性指標が β_0 となるような破壊点 $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ が見つかるまで解析を行う。そして見つかった破壊点に対して以下のように部分安全係数を定義する。

$$\phi = \frac{x_i^*}{\mu_{x_i}} : (x_i^* > \mu_{x_i} \text{ となる項})$$

$$\gamma = \frac{\mu_{x_i}}{x_i^*} : (x_i^* < \mu_{x_i} \text{ となる項})$$

すなわち、平均値と破壊点の値の比を1より大きくなるようにとったものとする。

このように定義された部分安全係数に対し、以下に表わされる安全照査式を用いて安全性評価を行う。

$$\phi \mu_R \geq \sum_{i=1}^n \frac{\mu_{S_i}}{\gamma_i}$$

設計者が設計パラメータとして設定する各平均値に対しこの照査式が満たされていれば、必然的に $\beta_0 \leq \beta$ が達成されていることが保証される。

2.3 モンテカルロシミュレーション

2.3.1 破壊確率の検証の必要性

複数の確率変数を持つ限界状態関数に対して正確な破壊確率を算出することは一般に困難であり、近似解法が用いられていることは2.1節で述べた。本研究で主に用いる一次ガウス近似法やFORMもいくつかの近似を含んでおり、その結果の妥当性を検証する必要がある。そこで、本研究ではモンテカルロシミュレーションを用いる。

モンテカルロシミュレーションは乱数を発生させることで多数の試行を行う数値実験法で

あり、乱数を確率変数に対応させることによって、構造物の破壊確率を算出することが可能である。限界状態関数が複雑な形であっても、試行回数を十分大きくすれば真値に近い破壊確率を求めることができる。

2.3.2 モンテカルロシミュレーションによる破壊確率の算出

任意の確率分布に従う乱数 u は、乱数生成アルゴリズムにより生成された $(0,1)$ の区間の一様乱数 v に対し、確率分布関数の逆関数 $F^{-1}(x)$ を用いることにより一般に以下のように生成される。

$$u_i = F^{-1}(v_i)$$

しかし、本研究で用いる正規分布は解析的に確率分布関数の逆関数を与えることができない。そのため、乱数生成にはボックス・ミュラー法を用いる。このようにして生成された、各確率変数の分布に対応した乱数の組 $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ を限界状態関数に代入することにより、構造物の破壊の判定を行う。 $x = g(u) \leq 0$ の領域で 1, その他では 0 となる関数 $I(x)$ を用いると、試行数 N のモンテカルロシミュレーションによる破壊確率は以下のように求められる。

$$p_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(x_i)$$

なお、本研究では乱数生成アルゴリズムとして高速性・長周期性にすぐれたメルセンヌ・ツイスタを用いている。

2.3.3 重点サンプリング法

構造安全性評価で問題になる破壊確率は非常に小さく、十分に精度を持った結果を算出するには多数の乱数を用いなければならないため、効率が悪い。この効率を改善できる方法として、重点サンプリング法がある。重点サンプリング法とは、発生させる乱数の分布のピークを関心のある現象の発生領域の近くに移動させて評価に使われる点の数を増し、その分一つ一つの点の重みを小さくすることにより、効率的に確率評価を行えるようにするものである。破壊確率の評価に用いる場合には、限界状態関数の確率密度関数を $f(x)$ 、破壊点にピークをもつ分布の確率密度関数を $h(x)$ とし、 $h(x)$ に従って発生させた x_i に対して次のような評価を行う。

$$p_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(x_i) \frac{f(x_i)}{h(x_i)}$$

$h(x)$ として用いる分布は何でもよいが、 $f(x)$ をそのまま移動させるのがもっとも簡単であるため、本研究でも限界状態関数の分布を破壊点にピークを持つように移動させたものを用いている。

第3章 FEMを用いた信頼性解析手法

3.1 実機に即したモデルに対する信頼性解析

3.1.1 限界状態関数の定義

第2章で述べた確率論的信頼性手法を構造物に対して適用するには、構造物の破壊モードに対応した限界状態関数を定義することが必要となる。多くの場合限界状態関数は材料力学の知見に基づいて定義されるが、破壊に関する式が解析的に与えられるのはごく単純なモデルに対してのみであり、材料力学の知見のみを用いて実機に即したモデルに対する限界状態関数を定義することは困難である場合が多い。本研究で対象とする配管系もその例外ではなく、管の曲がりなど直管以外の要素を含んだモデルに対しては、解析的に限界状態関数を定義することはほぼ不可能であるといつてよい。そのため、他の方法を用いて定義を与える必要がある。

3.1.2 有限要素法解析

有限要素法解析を用いることによって、ある一定の条件下において構造物に生じる応力やひずみ、変形量などを知ることができる。通常、一回の解析では単に数値的に結果が得られるのみで、設計寸法や荷重などの入力パラメータと応力・ひずみ等の出力パラメータとの間の関係が示される事はない。しかし、パラメータを変えて複数の解析を行うことにより、入力と出力の関係をある程度予測することが可能となる。本研究では応答曲面法と呼ばれる方法を用いることによって限界状態関数を定義する。

3.2 有限要素法解析ソフトウェア ANSYS の確率設計機能

本研究では、有限要素法解析に ANSYS を用いる。ANSYS は構造・流体など様々な解析が可能なソフトウェアであり、本研究では特に構造解析における確率設計機能を利用する。本節ではこの確率設計機能について述べる。

3.2.1 確率設計機能の概要

通常の有限要素構造解析では、予め決定された有限要素モデルに対して解析が行われ、唯

一の結果セットが得られるのみである。それに対し ANSYS における確率設計機能は、モデルに現れる各種不確定要因を予め確率入力変数と設定し確率分布特性を与えておくことにより、各々の分布特性に基づいた複数個のモデルを自動的に構築する。そしてそれぞれのモデルに対して解析を行い、その結果を総合し値の分布や確率などの結果を得るというものである。確率分布特性に基づいてパラメータを設定したモデルを構築し、そのモデルに対して解析を行い結果を得る、という手順を繰り返し行う行程をシミュレーションループと呼ぶが、必要なシミュレーションループの数は確率解析手法によって異なる。確率解析手法はモンテカルロシミュレーションによるものと応答曲面法によるものの2種類が用意されており、ユーザーが選択できる。

3.2.2 モンテカルロシミュレーション

モンテカルロシミュレーションによる確率解析は、確率変数となっているパラメータにその確率分布に従って発生させた乱数をあてはめてモデルを作成し、そのモデルに対して解析を行うという一連の解析ループを、求めたい確率的結果を得るのに十分な回数行うというものである。モンテカルロシミュレーションを用いると、数式的な関係が全く不明な問題であっても十分な回数のシミュレーションループを行えば常に真値に近い結果を得ることができる。ただし、複雑な問題や確率が小さい問題に対しては必要なシミュレーションループ数が非常に多くなってしまうため、そのような問題に対して用いることは実質的に困難であるといえる。

3.2.3 応答曲面法

応答曲面法による確率解析では、モンテカルロシミュレーションのように毎回作成された有限要素モデルに対して解析を行う代わりに、入力に対するモデルの出力応答を近似的に数式で表した応答曲面とよばれるものを作成し、この応答曲面に対してモンテカルロシミュレーションを行い確率的な結果を得る。応答曲面は、サンプリング点における出力値を取得するためのシミュレーションループを確率変数の数に応じた必要数行い、その結果をもとに二次式への回帰分析を行うことによって得られる。シミュレーションループの回数が応答曲面を作るのに必要な回数だけとなるため、モンテカルロシミュレーションに比べると非常に少なく済む。応答曲面に対して行われるモンテカルロシミュレーションは非常に高速なので、結果を得るためにかかる総時間は有限要素モデルに対するモンテカルロシミュレーションのみを用いるよりも短い。しかし、非線形性の強い問題に対しては二次式で表わされた応答曲面が実際のモデルの応答に対して十分な精度を持ったものとならなくなるため、そのような問題に対して応答曲面法を用いることはできない。なお、得られた応答曲面は外部に出力することが可能なため、本研究ではこの機能を利用して限界状態関数の定義を行っている。

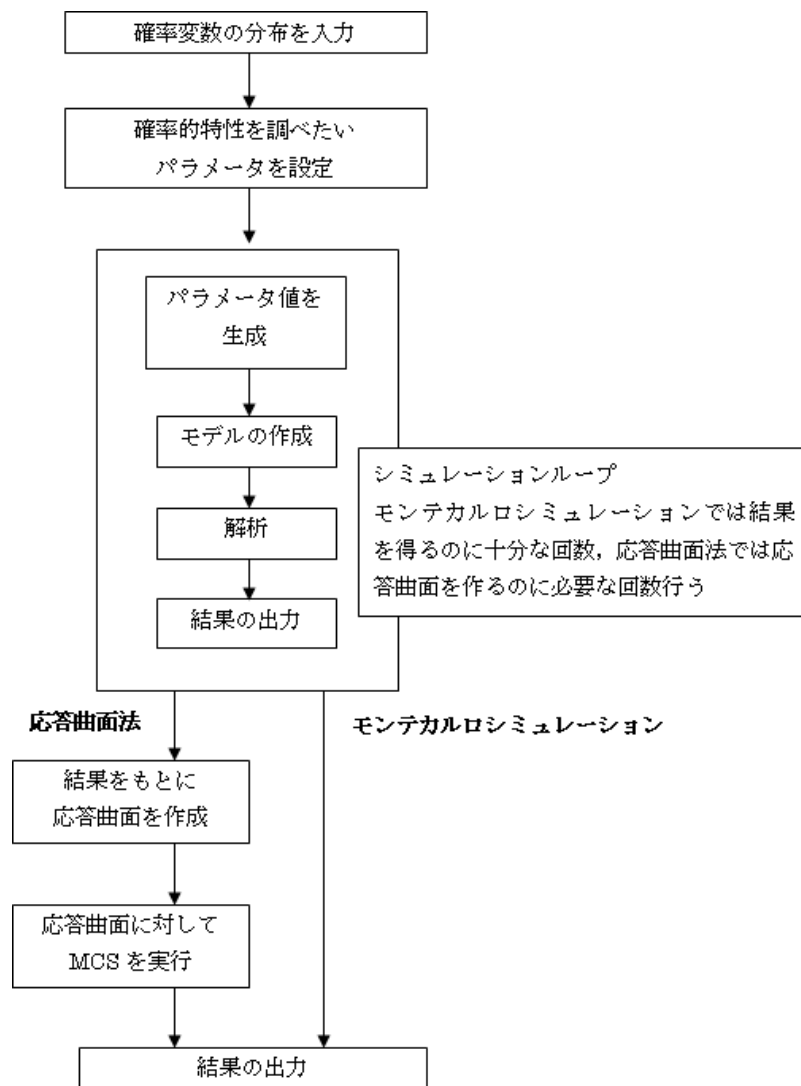


図 3.1 ANSYS による確率解析の流れ

3.3 信頼性解析への応用

本節では、3.2 節で述べた ANSYS の確率設計機能を信頼性解析に応用する方法について述べる。

3.3.1 破壊モードに応じた出力パラメータの設定

ANSYS を用いた確率解析では、確率的結果を得たいパラメータを予め確率出力パラメータと指定しておく必要がある。本研究で ANSYS を用いる目的は数式的関係の不明な問題に対して限界状態関数を定義することにあるため、限界状態関数の定義にしたがったパラメータ、すなわち破壊モードが生起する場合に値が 0 以下となるようなパラメータを確率出力パラメータとして指定する必要がある。そのようなパラメータは通常 ANSYS から標準で出力される値ではないため、ユーザーが出力パラメータを組み合わせで作成する。

例として、モデルに降伏が生じたときを破壊と定義する場合について説明する。降伏は、相当応力が材料の降伏応力を上回った場合に発生するため、破壊が生じる場合に 0 以下となるパラメータとしては、「降伏応力の値」から「モデル内に生じる最大相当応力」を引いた値を指定するのが適当であると考えることができる。そのため、材料の降伏応力の値を格納したパラメータ A と、解析の結果モデル内に生じた最大相当応力点における相当応力の値を格納したパラメータ B を用意し、新たに $C = A - B$ としてパラメータ C を作成する。このように定義された C は破壊が生じる場合に 0 以下となるため、 C を確率出力パラメータと定義し、確率解析を行えばよい。

3.3.2 応答曲面の出力

3.3.1 節のプロセスで用意されたモデルに対して確率解析を行う。ANSYS の確率解析に 2 種類の方法があることは前述したが、本研究では応答曲面法を用いる。応答曲面法を用いて確率解析を行うことにより、3.3.1 節で定義した「破壊が生じる場合に 0 となるパラメータ」と各種入力パラメータとの関係を表す近似的な数式表現が得られる。この数式表現は限界状態関数の定義を満たすため、近似的な限界状態関数とみなせる。

3.3.3 一次ガウス近似法の適用

ANSYS の確率解析によって得られた近似的に表された限界状態関数に対して、2.1.3 節で述べた一次ガウス近似法を適用し、信頼性指標 β および破壊点を計算する。

3.3.4 注意点

3.3.3 節までの手順を踏むことにより、限界状態関数を解析的に定義することができない場合についても信頼性解析を行うことができるが、求められた限界状態関数はあくまで近似的に求められたものであり、サンプリング点の存在する付近でしか意味を成さないことに注意する必要がある。問題によっては、物理的に意味のない結果が得られる事も考えられる。応答曲面による限界状態関数に対する一次ガウス近似法の適用に当たっては、求められた破壊点が物理的に意味をもつ値であることを検証する必要がある。

第4章 配管エルボ部の解析

4.1 モデルの設定

4.1.1 原子力発電所の配管系

防災科学研究所の中村らによる報告[3]によれば，実際の原子力発電所における配管を模擬した配管系に対し地震動を加えた場合，もっとも固定部に近いエルボ部分で最大応力が発生することが明らかになっている．そのため，本研究では配管のエルボ部分に注目し，以下の図のようにエルボ部分から両側に 1.0m ずつ直管が伸び，一端が固定支持され，もう一端にエルボを広げる方向に荷重が設定されているモデルを設定する．

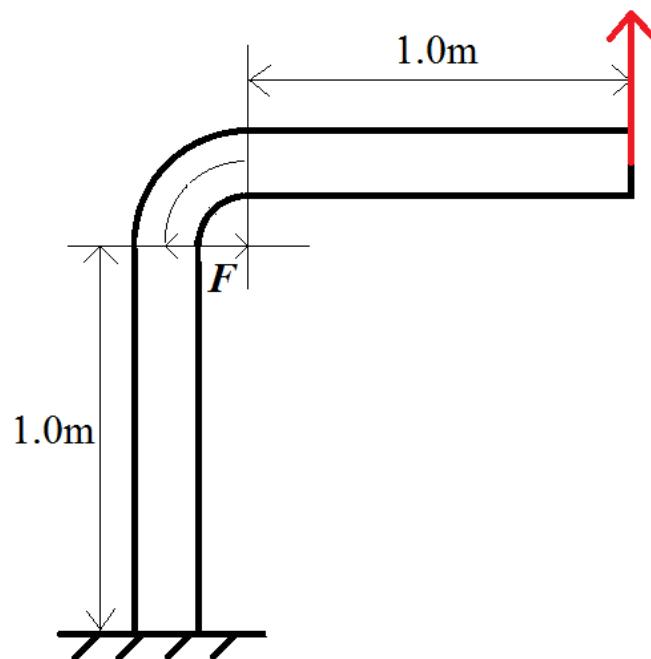


図 4.1 モデルの概要

配管の断面寸法とエルボ部寸法（上図中 F ）に関しては JIS に定められており，肉厚に関するスケジュール（以下 sch と表記），外径とエルボ部寸法に関する呼び径の 2 パラメータにより形状が決定される．本研究では sch40 と sch80 それぞれについて呼び径 65,90,125 の 3 通り，計 6 通りの寸法の配管について上に示したモデルを作成し，解析を行っている．

表 4.1 圧力配管 JIS (抜粋)

呼び径	外径 (mm)	sch40 肉厚(mm)	sch80 肉厚(mm)	エルボ部寸法 (mm)
65	76.3	5.2	7.0	95.3
90	101.6	5.7	8.1	133.4
125	139.8	6.6	9.5	190.5

4.1.2 材料の設定

原子力発電所の配管には、圧力配管用炭素鋼 STPG370 が主に用いられる。STPG370 は降伏応力 215MPa 以上、引張強さ 370MPa 以上と規定されており、本研究においてもこの STPG370 を想定した材料設定を行う。

実際の材料は弾塑性体であり、降伏点を超えない領域ではヤング率 E に従った弾性挙動を示し、降伏点を超えた後は塑性変形を生じながら緩やかに応力が増し、最終的に破断に至る。ANSYS においては、降伏以後の応力ひずみ線図を線形近似してその傾きを与えることにより、弾塑性挙動を模擬することができる。本研究では簡単化のため、降伏以後は応力ひずみ線図の傾きが 0 となる弾完全塑性体と近似して取り扱う。

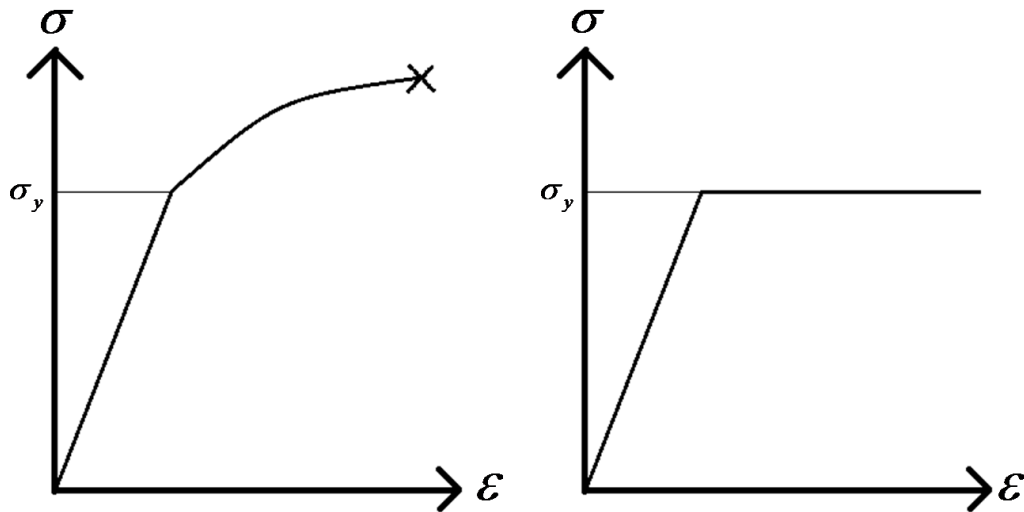


図 4.2 弾塑性体と弾完全塑性体

しかし、単純に降伏応力を超えると完全に傾きが 0 となるというモデルでは加工硬化の影響が全く考慮されないため、過度に安全側の評価を行うことになってしまう。そのため、本研究では実際に原子力関係の設計で用いられている流動応力[4]という概念を用いる。流動応力は以下のように定義される応力であり、引張強さと降伏応力の平均をとったものである。

$$\sigma_f = \frac{\sigma_u + \sigma_y}{2}$$

この流動応力において材料は降伏し以後応力ひずみ線図の傾きが 0 となる弾完全塑性体と

して扱う．この流動応力を用いることによって，降伏応力と引張強さのばらつきをまとめて扱い，簡単化して解析を行うことができる．

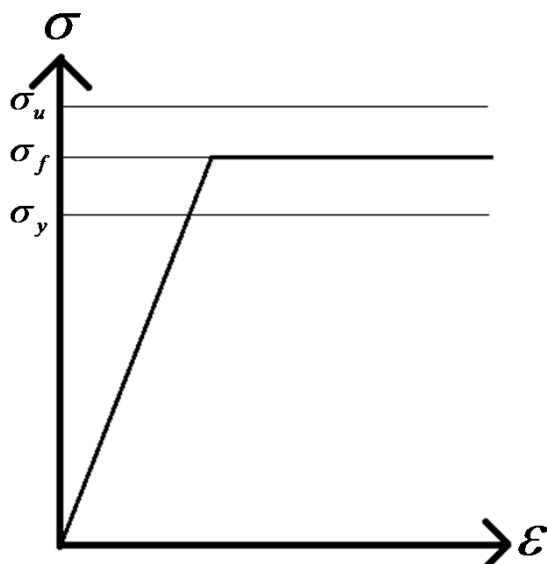


図 4.3 流動応力の概念

以上をまとめて，材料設定について表 4.2 に示す．

表 4.2 材料設定

ヤング率	206GPa
ポアソン比	0.3
引張強さ	370MPa
降伏応力	215MPa
流動応力	292.5MPa

4.1.3 荷重の設定

本研究では実際の設計に即した形で結果をまとめるため，荷重制御により解析を行う．荷重を加える場所はエルボ部から 1.0m の位置とした．これはモーメントへの変換を容易にするためである．

4.1.4 有限要素モデルの作成

4.1.3 節まで述べた内容に従い，有限要素モデルを作成する．本研究で扱うのは配管であるのでパイプ要素を用いることも考えられるが，パイプ要素を用いた場合，エルボ部に現れるはずの応力集中を再現することができないという問題がある．そのため，基本的には弾塑性を扱うことのできる 8 節点シェル要素を用いてモデリングを行う．ただし，4.1.3 節で述べたように本研究では荷重制御により解析を行うため，荷重入力部のみパイプ要素でモ

デリングし、図 4.4 に示すように剛体領域を介した接続によってシェル要素でモデリングされた部分に接続している。

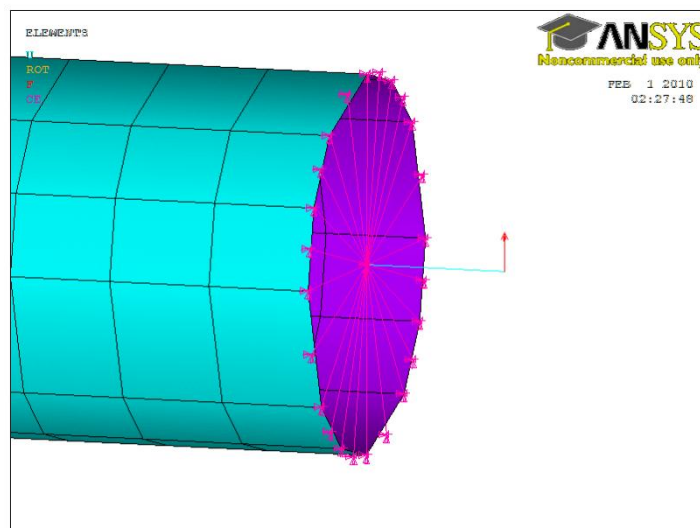


図 4.4 パイプ要素接続部

4.2 破壊モードの定義

4.2.1 塑性崩壊

破壊モードとしてよく用いられるのは降伏であり、設計規格においても構造に塑性変形を生じないこと、すなわち降伏を起こさないことが健全と判断する条件となっている場合も多い。しかし、構造の一部が降伏し塑性変形を起こしたとしても、それが直ちに構造物の機能喪失を招くということは少ない。特にエルボのような応力集中部が生じる構造においては、局部が降伏しても全体に与える影響は少ないといえる。そこで、本研究では塑性崩壊を破壊モードに設定する。塑性崩壊とは構造断面全体が降伏し、構造が不安定となった状態をいう。塑性崩壊の状態に陥った構造物は大きな変形を生じる。塑性崩壊は構造物の機能喪失に直結する現象であるため、構造物の破壊の定義としては降伏よりも適当なものであるが、生起の定義を行うことが難しいという問題がある。単純な直管であれば解析的に塑性崩壊の判定式を定義することも可能であるが、それ以外の要素が含まれる場合は不可能であるといつてよい。有限要素法解析においても、塑性崩壊点を超えると構造が不安定となるため計算が収束せず確率解析が中断されてしまうことがある。そのため、信頼性解析を行うには不安定領域に入らない範囲で塑性崩壊の判定をしなければならない。

4.2.2 二倍勾配法

そこで塑性崩壊の判定法として用いるのが二倍勾配法である。二倍勾配法とは、ある入力パラメータに対しそれに対応する出力パラメータをプロットした時に、弾性変形領域にお

ける勾配の2倍の勾配の直線を同時にプロットし、交わった点を塑性崩壊と定義するものである。入力・出力関係として用いる値は荷重・変位やモーメント・角度など対応関係が明確であるものであれば何でもよい。

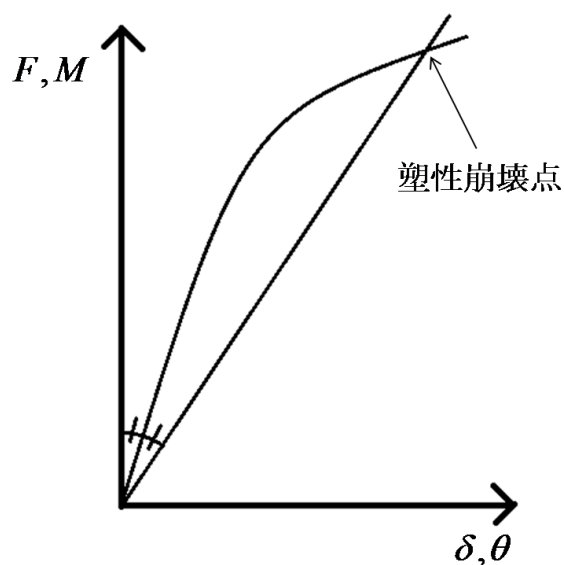


図 4.5 二倍勾配法の概念図

本解析では、端部に加える荷重とエルボの両端間の距離（図 4.6 参照）の変化量の間をプロットし、二倍勾配法を適用する。この2つの量は簡単な変換によって平均モーメント・角度変化の関係に書き直すことができ、本解析で問題となるような変形の範囲ではどちらを用いても塑性崩壊点はほとんど変化しない。変換を介さずに直接に得られる値を用いる方が効率的であるため、判定には荷重・距離変化の関係をj用いる。

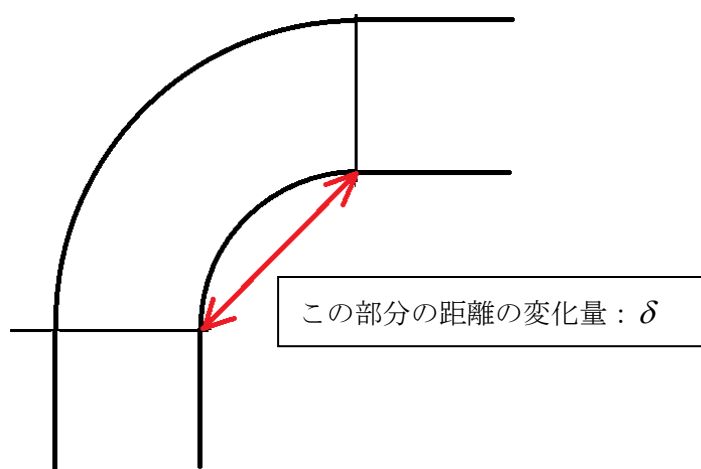


図 4.6 二倍勾配法の出力として用いる距離変化

4.3 パラメータ設定

4.3.1 入力パラメータの設定

以上の事柄を踏まえてパラメータを設定する。確率入力変数として扱うのは、荷重、外径、肉厚、流動応力の4パラメータである。分布はすべて正規分布と仮定し、それぞれのパラメータに平均値と変動係数（COV：Coefficient Of Variation）を与えて分布形状を決定する。COVは以下のように定義される値で、平均値に対する標準偏差の割合を表す。

$$COV = \frac{\sigma}{\mu}$$

外径、肉厚に関しては変動係数が小さいことが知られているため、COV=0.01で固定としている。また、sch・呼び径に応じたJIS規格値を平均値として用いることとした。流動応力については材料をSTPG370に固定した状況を想定しているため、平均値は降伏応力215MPaと引張強さ370MPaの平均をとった292.5MPaで固定とし、設計者が選択しうる値としてCOVのみを変化させる。荷重に対しては、平均値・COVともに様々な状況が想定されるため、どちらも変化させて解析を行う。確率入力パラメータについて以下の表にまとめて示す。

表 4.3 確率入力パラメータ一覧

パラメータ名	平均値	変動係数	分布形状
荷重 L	変化させる	変化させる	正規分布
外径 Do	JIS 規定値	0.01	正規分布
肉厚 t	JIS 規定値	0.01	正規分布
流動応力 σ_f	292.5MPa	変化させる	正規分布

4.3.2 出力パラメータの設定

次に確率出力パラメータの設定について述べる。4.2節で述べたように、本解析では塑性崩壊を破壊モードとして設定し、その生起の定義には二倍勾配法を用いる。二倍勾配直線を定義するには弾性変形のための領域における勾配の値が必要だが、塑性崩壊を生じる可能性のある平均値周辺の入力をモデルに加えた場合は塑性変形が含まれるため、一連の確率解析の中ではその値を得ることができない。そのため、事前に確率解析でない通常の解析を、モデルに塑性変形が生じない範囲の荷重設定に対して行い、弾性域における勾配の値を取得しておく。実際に解析に用いた弾性域勾配の値は4.5節表4.4に示している。なお、本来弾性域における勾配も形状パラメータの変化に従って変化する値でありばらつきを持つが、本解析においては外径・肉厚のばらつきを非常に小さくとしているためそのばらつきは小さい。よって定数として扱っている。このようにして取得された弾性域勾配を a 、その解析における荷重パラメータの値を L 、その解析において生じたエルボ部距離変化を δ とすれ

ば、二倍勾配法による塑性崩壊の生起時に 0 となるようなパラメータ D を以下のように定義することができる。

$$D = 2aL - \delta$$

D は、荷重-距離変化線図における横軸方向に見た直線と曲線との距離を表している。この値が 0 となるのは直線と曲線が交わる時であり、塑性崩壊の生起を表していると考えることができる。このパラメータをポストプロセスにおいて定義し、確率出力パラメータとして指定する。そして、応答曲面法を用いて解析を行うことにより、近似的な限界状態関数を得る。

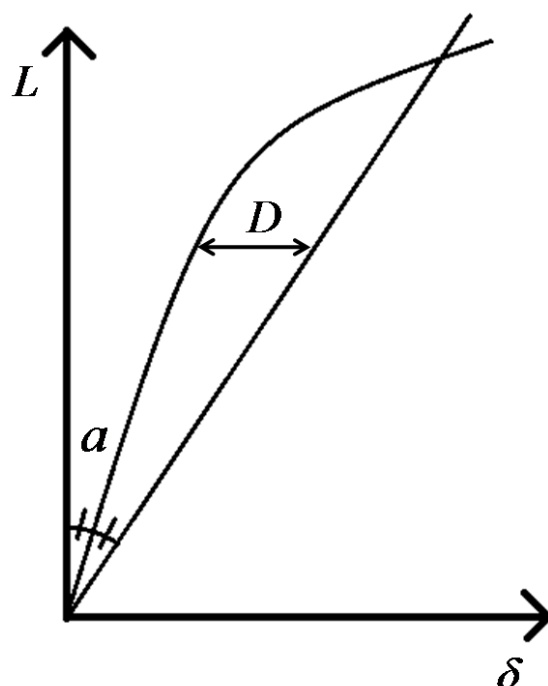


図 4.7 塑性崩壊の定義に用いる値

4.4 本解析における注意点

応答曲面法を用いて定義された限界状態関数は、サンプリング点の存在する領域、すなわち平均値の周辺でしか意味を成さないことは 3 章で述べた。本解析においては、この影響が顕著に現れる場合がある。これは塑性崩壊の定義で用いているパラメータ D が 0 となる点の近傍で極大値をとる形状をしているため、2 次曲面で近似した場合に意図した塑性崩壊点とは別のゼロ点を比較的近傍に生じる可能性が高いためである。図 4.7 に示すのは、意図しない零点が平均点の比較的近傍に生じる場合のイメージであり、図 4.8 は実際に解析において得られた限界状態曲面である。

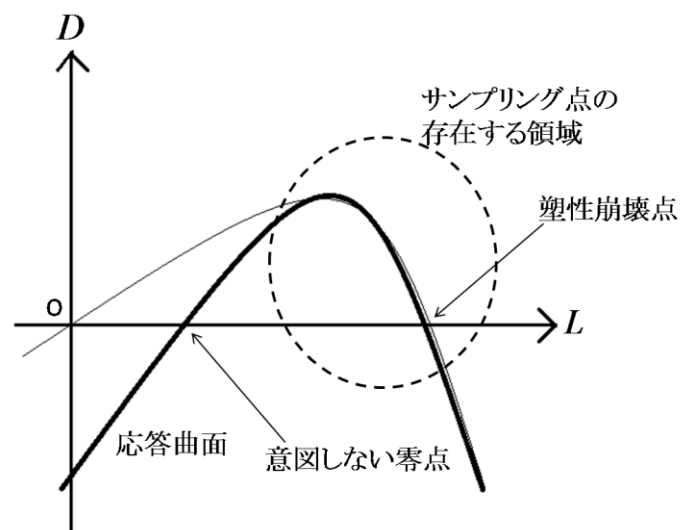


図 4.8 応答曲面によって生じる物理的意味のない零点

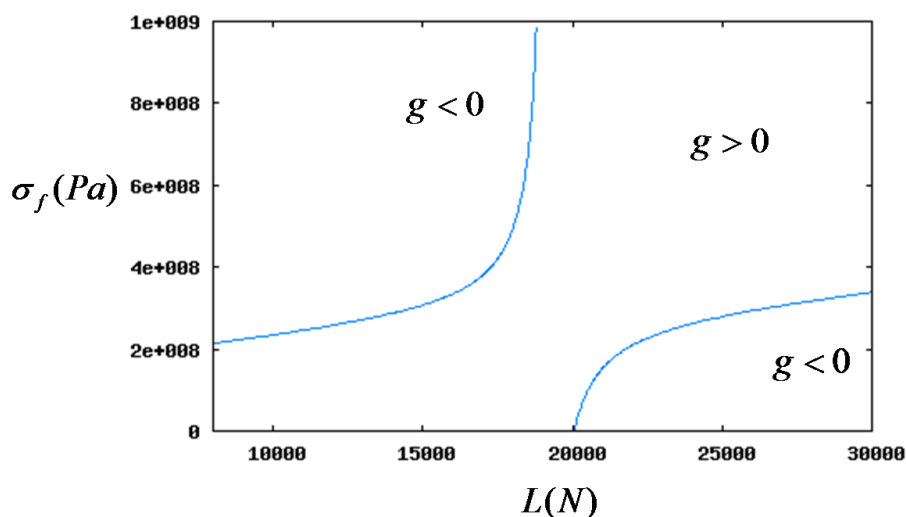


図 4.9 実際に得られた応答曲面の例

図 4.9 の右下に現れている破壊領域は物理的意味をもつ塑性崩壊の生起を表す破壊領域であるが、左上に現れている破壊領域は物理的に意味を持たない破壊領域であり、本解析で定義された限界状態関数が物理的根拠に基づいて定義されたものではないために現れたものである。

このような形状の限界状態関数に対して一次ガウス近似法を適用して破壊点を求めるとき、近似法の特徴から物理的に意味のある右下の領域に対する近接点ではなく、左上の領域に対する近接点が求められてしまう場合がある。この場合破壊点の値が平均値より安全側に入るなど明らかに物理的に不合理なものとなるため、結果を考察することにより発見は難しくない。この現象への対処として、一次ガウス近似法の初期値を適当に変えることによ

り正しい破壊点を求めることができる. 本解析ではこのような状態に陥った場合には, α_i に与える初期値の符号を反転させて一次ガウス近似法を適用している.

また, モンテカルロシミュレーションを行う場合においても注意が必要である. 左上の領域は実際に破壊に至る領域ではないため, 限界状態関数を 0 以下にするような値であってもこの領域に含まれる値の場合は破壊判定から除外しなければならない. そのため, 発生した乱数の破壊判定に際して意図しない破壊領域に含まれる値をその都度判定して影響を取りのぞく, 2.3.3 節で述べた重点サンプリング法を用いて乱数を発生させ意図しない破壊領域にサンプリング点が入らないようにする, などの工夫が必要である. 本解析では重点サンプリング法を用いて検証を行っている.

4.5 解析結果

- $COV_L = 0.1, COV_{\sigma_f} = 0.05$
- $COV_L = 0.1, COV_{\sigma_f} = 0.1$
- $COV_L = 0.15, COV_{\sigma_f} = 0.05$
- $COV_L = 0.15, COV_{\sigma_f} = 0.1$

の4通りのCOVの組み合わせに対し、それぞれ前述の6通りのモデルについて β の値がおおよそ2.0-4.0の間に入るように μ_L を変化させて解析を行った。結果は巻末の付録に示しており、各ページ上から順に

- グラフ1：荷重平均値と信頼性指標の関係
- グラフ2：荷重平均値と破壊確率の関係
- 表：各荷重平均値において求められた破壊点の一覧

となっている。なお、グラフ2において、重点サンプリング法によるモンテカルロシミュレーションを用いて得られた破壊確率を同時に記載している。一次ガウス近似法で求められた β からFORMを用いて算出された破壊確率を”FORM”，モンテカルロシミュレーションによる破壊確率を”MCS”として示している。

それぞれのモデルにおいて、二倍勾配法による塑性崩壊の生起判定に用いた弾性域勾配の値を表4.4に示す。

表 4.4 弾性域勾配の一覧

呼び径	sch40	sch80
65	7.986888169E-08	5.059046045E-08
90	6.765465444E-08	3.848440870E-08
125	5.222373549E-08	2.853721809E-08

4.6 結果の考察

どの結果においても、モンテカルロシミュレーションによる破壊確率と信頼性指標から FORM を用いて求められた破壊確率には差があり、モンテカルロシミュレーションによって求められた破壊確率の方が小さくなっている。これは FORM が限界状態関数を直線近似しているため、実際よりも破壊領域が大きくとられていることが原因である。この近似による誤差を考慮すれば一致した結果が得られていると言え、各々の解析で求められた破壊点は妥当であると判断できる。

次に荷重平均値と信頼性指標の関係に注目する。 μ_L を変化させたときの β の変化は直線でよく近似され、さらにこの傾向はどの配管モデルにおいても共通している。配管の JIS がエルボ部における応力集中度を管径によらず一定とするように設定されたものであり、形状の比率がどの管径でも同じになることから、変化するのは現象のスケールのみで全体の傾向は変化しなかったものと考えられる。

次ページからのグラフは、解析の結果から得られた部分安全係数と信頼性指標 β の関係を示したものである。横軸が信頼性指標、縦軸が部分安全係数の値である。部分安全係数は破壊点と平均点の比をとった値であり、部分安全係数が大きい変数は破壊への影響が大きく、1 に近い変数は影響が少ないといえる。 β の変化に伴って部分安全係数の値が大きく動くパラメータは荷重と流動応力の 2 変数であり、外径と肉厚は 1 の近辺でほとんど値が動いていない。つまり、肉厚と外径は破壊に与える影響が少ないといえる。これは肉厚と外径のばらつきを小さく設定していることも影響しているが、この 2 つのパラメータは管の弾性域における曲げ剛性にかかわるパラメータであり、塑性域に入ってから挙動が問題となる塑性崩壊の評価に関しては大きな影響を与えなかったということが他の要因として考えられる。この結果から、エルボ部の塑性崩壊に関しては荷重と流動応力に着目して評価を行えばよいといえる。

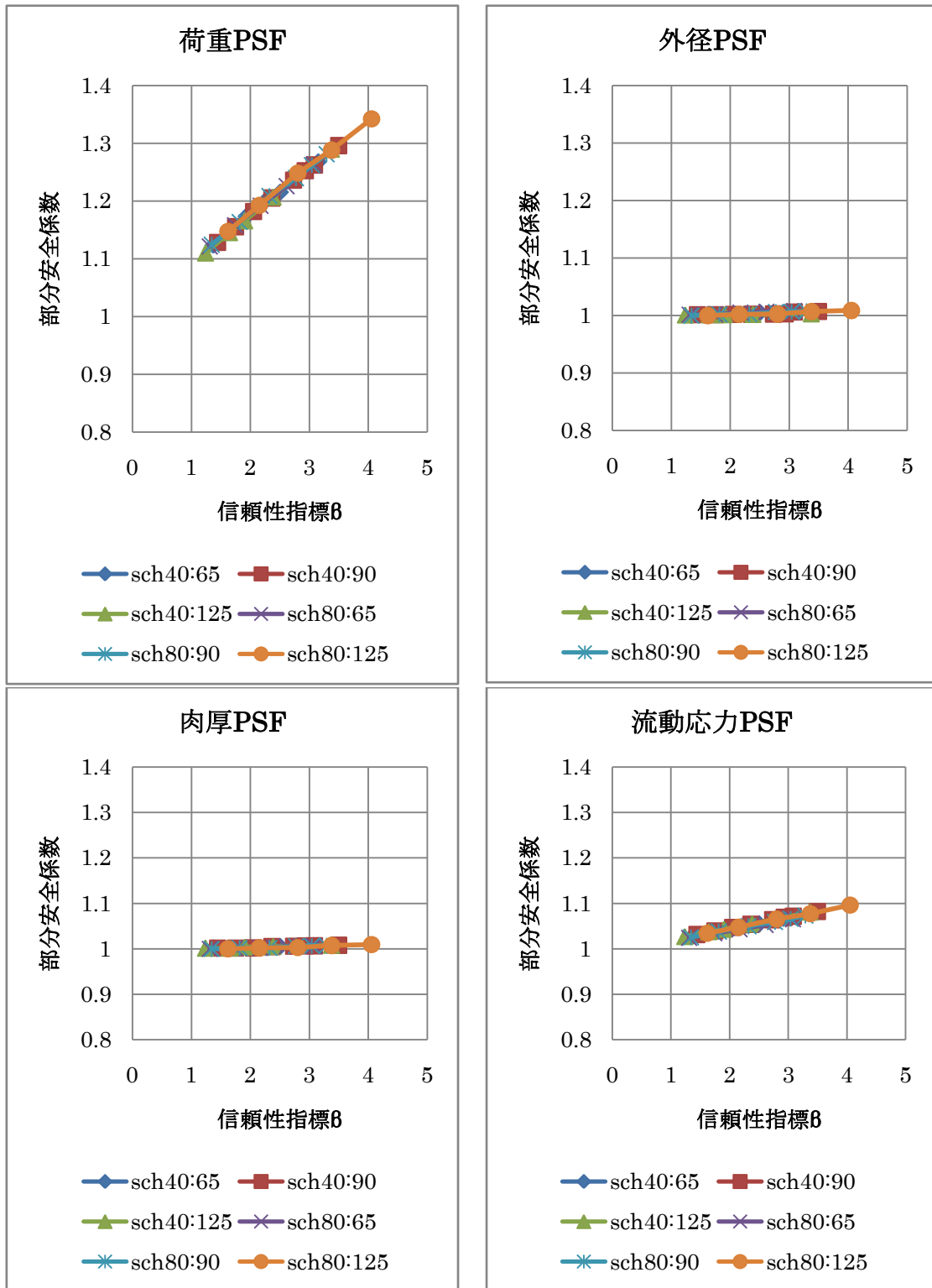


図 4.1 0 $COV_L = 0.1, COV_{\sigma_f} = 0.05$ における部分安全係数と信頼性指標の関係

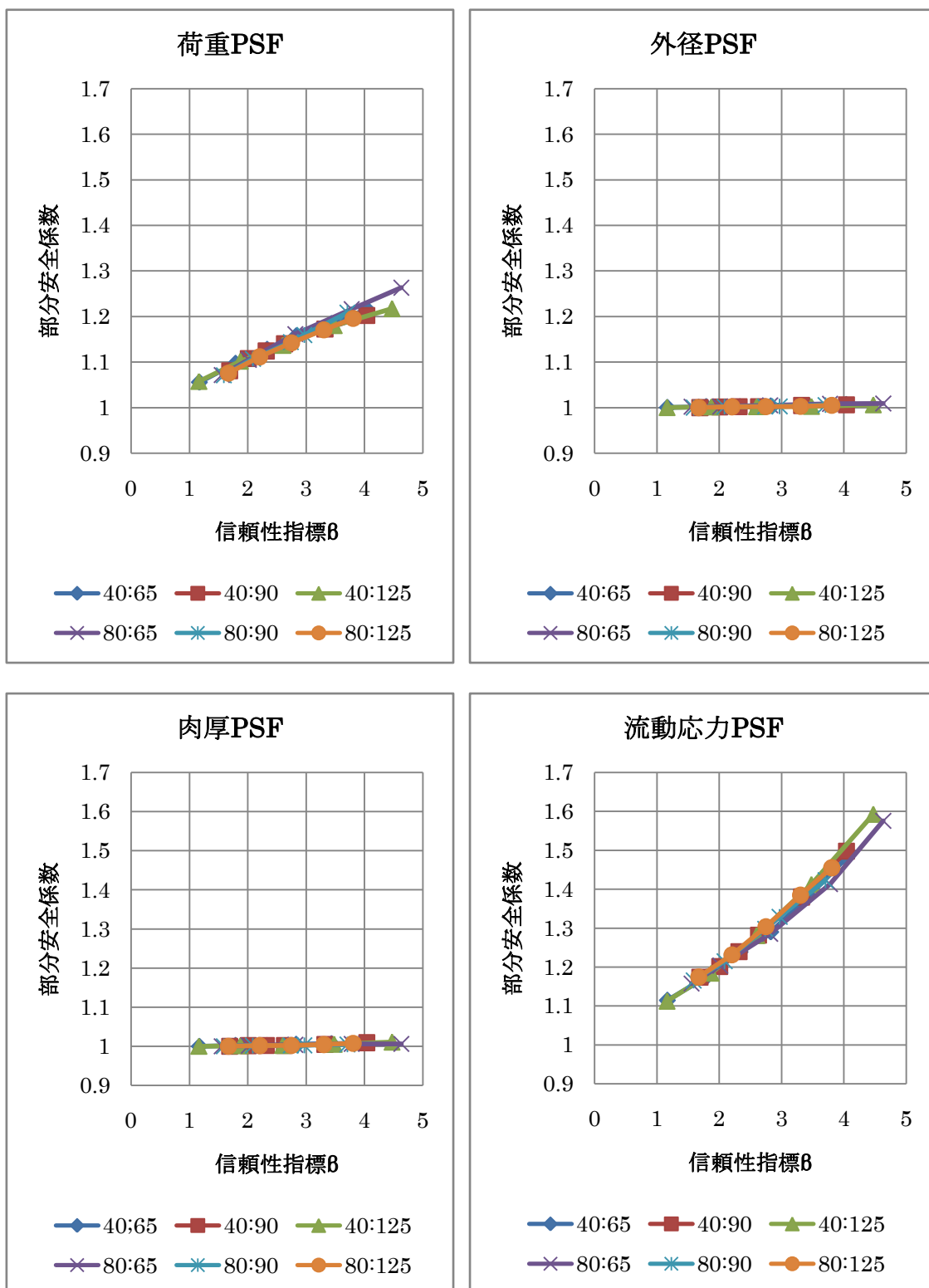


図 4.1 1 $COV_L = 0.1, COV_{\sigma_f} = 0.1$ における部分安全係数と信頼性指標の関係

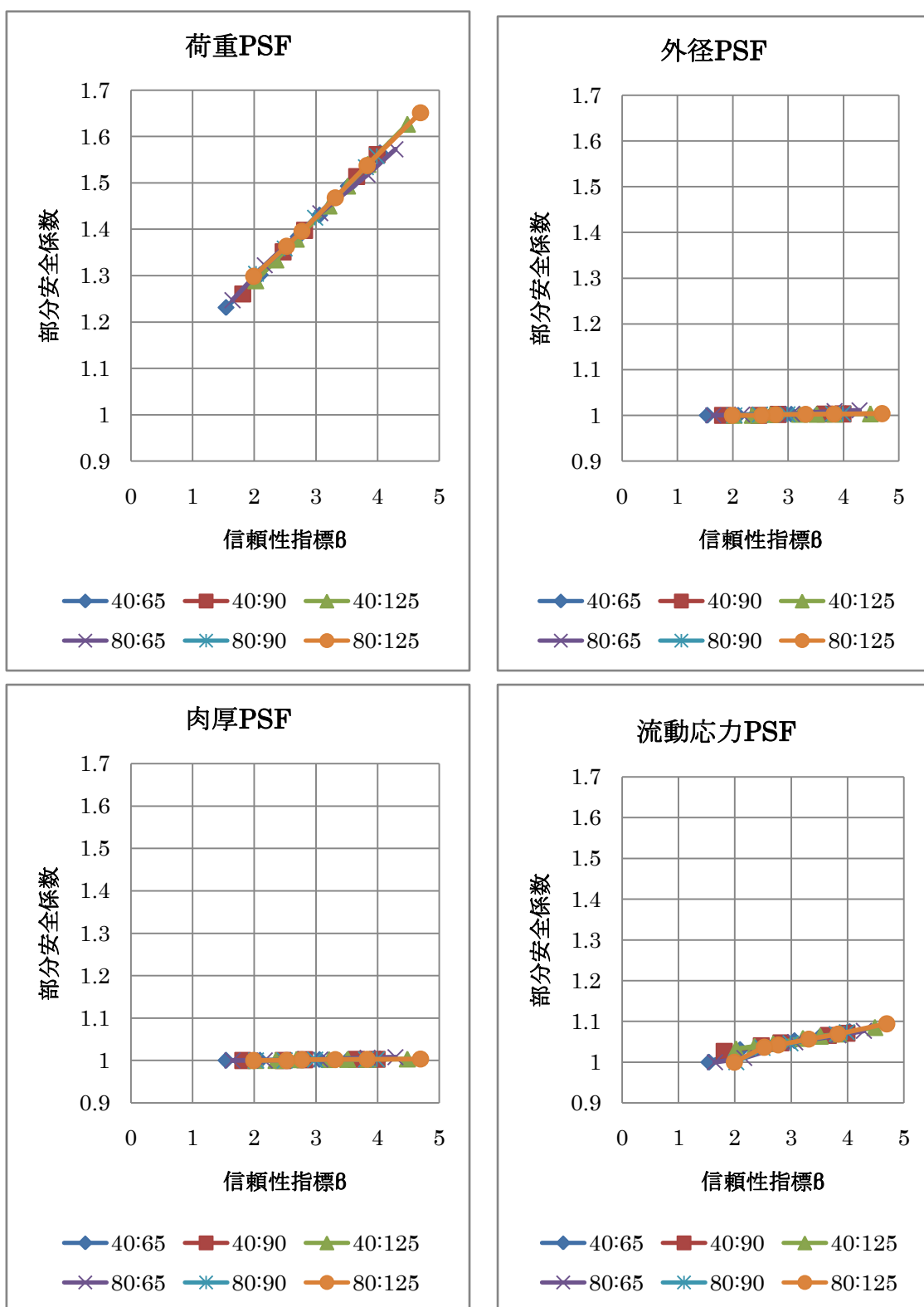


図 4.1 2 $COV_L = 0.15, COV_{\sigma_f} = 0.05$ における部分安全係数と信頼性指標の関係

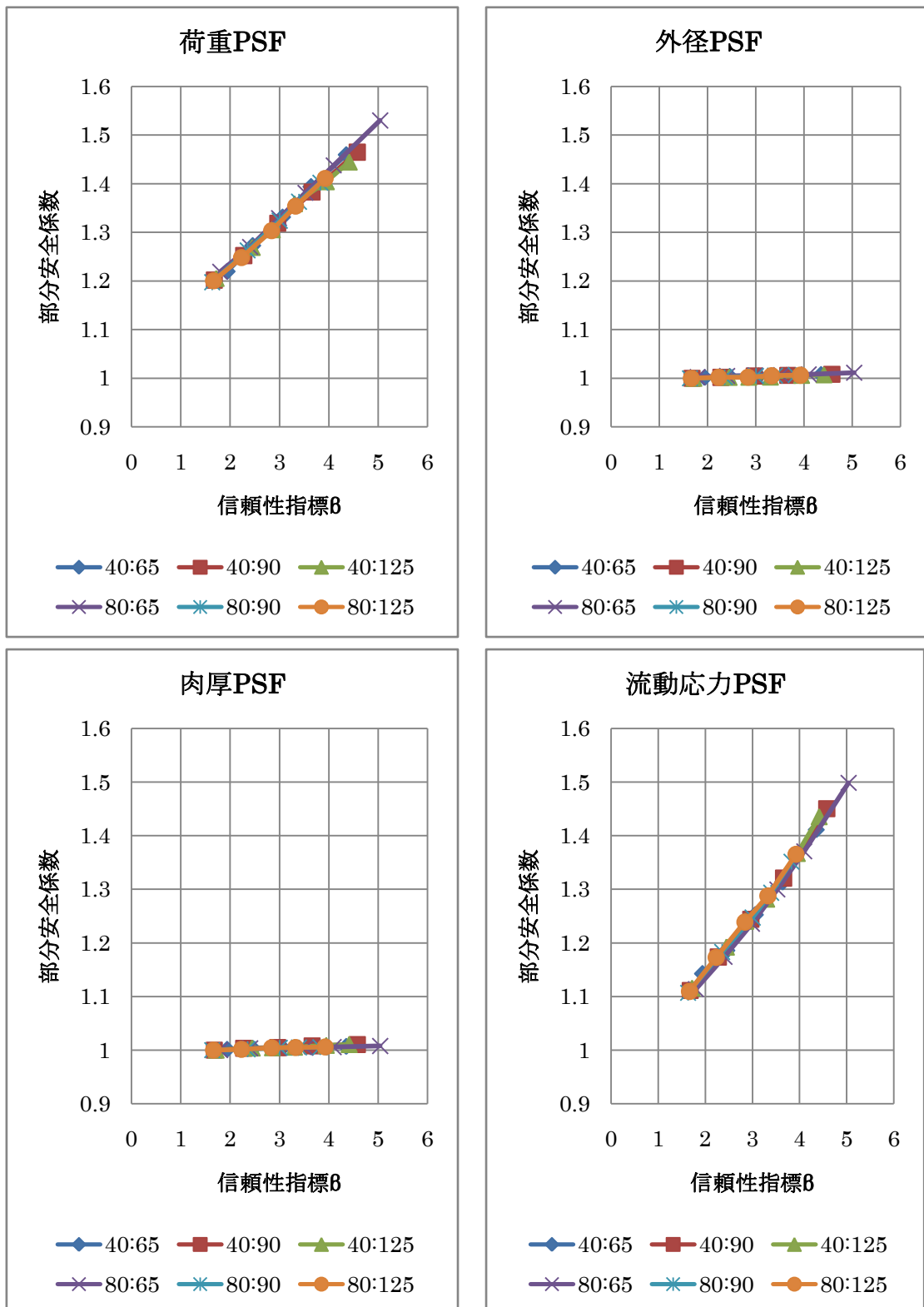


図 4.1 3 $COV_L = 0.15, COV_{\sigma_f} = 0.1$ における部分安全係数と信頼性指標の関係

4.7 評価手法の提案

4.7.1 評価手法の検討

第2章において部分安全係数法という手法について述べた。部分安全係数法は取り扱いが容易で実用上優れた方法であり、本研究においてもこの手法によって裕度評価が可能となるよう検討を行った。通常、部分安全係数を用いた評価式は限界状態関数に部分安全係数と平均値で表わした破壊点を代入することによって作られる。しかし、本解析で用いている有限要素法解析を併用した信頼性解析では、限界状態関数が解析毎に変化するため、唯一の評価式で部分安全係数を用いた評価を行うことは困難であるということが判明した。そのため、別のアプローチで安全裕度を評価できる手法について検討を行う。

解析の結果から、塑性崩壊に対して大きく影響を及ぼすパラメータは荷重と流動応力の2変数であり、流動応力の分布が固定された条件下では、信頼性指標は荷重の平均値に対してほぼ直線の変化をすることが明らかとなった。各々の解析結果として得られた、信頼性指標と荷重平均値の関係を一次近似した結果を表4.5、表4.6に示す。

表 4.5 荷重 COV=0.1 における一次近似の結果

$$\beta = a\mu_L + b$$

流動応力 COV	sch-呼び径	a	b	R ²
0.05	40-65	-0.0062	24.26	0.998
	40-90	-0.00353	24.65	0.995
	40-125	-0.00172	24.03	0.994
	80-65	-0.0042	24.42	0.998
	80-90	-0.00241	27.33	0.999
	80-125	-0.00122	28.41	0.998
0.1	40-65	-0.00565	20.96	0.998
	40-90	-0.00335	22.11	0.999
	40-125	-0.00165	21.63	0.994
	80-65	-0.00374	20.69	0.997
	80-90	-0.00212	22.79	0.996
	80-125	-0.00107	23.68	0.999

表 4.6 荷重 COV=0.15 における一次近似の結果

$$\beta = a\mu_L + b$$

流動応力 COV	sch-呼び径	a	b	R ²
0.05	40-65	-0.00641	23.292	0.9946
	40-90	-0.0037	23.983	0.9971
	40-125	-0.002	25.57	0.9902
	80-65	-0.00434	23.377	0.998
	80-90	-0.00251	26.334	0.9986
	80-125	-0.00135	28.961	0.992
0.1	40-65	-0.00602	21.151	0.9971
	40-90	-0.00359	22.421	0.9937
	40-125	-0.00179	22.211	0.9923
	80-65	-0.00398	20.891	0.998
	80-90	-0.00218	22.364	0.9987
	80-125	-0.00112	23.591	0.9991

R² は決定係数であり, 1.0 に近いほどよい近似であることを示す. 今回の結果においては, どの場合についても 1.0 に近い値が得られており, 一次近似は妥当なものであるといえる. 次ページの図 4.14, 図 4.15 は, 一次近似によって得られた荷重平均値と β の関係を, 荷重の COV が同じものをまとめて一つのグラフに示したものである. この表を用いると, 配管系のエルボ構造における確率論的安全裕度を容易に評価することができる. 例えば, ある荷重条件下において目標信頼性を達成する配管を選択したい場合には, その荷重分布の平均値の横軸をたどり, 目標信頼性よりも β が大きい部分で交点を持つような配管を選択すれば, 自動的に目標信頼性を達成していることが保証される.

また, この図には同一サイズの配管について材料の変動係数が異なる 2 通りの直線が示され, 変動係数が小さいほうが同じ荷重条件に対する安全裕度が大きくなっている事がわかる. 材料のばらつきを小さくすると手間やコストが増すが, この表を用いれば目標信頼度の達成に必要な箇所のみばらつきの小さい材料を用いるなど状況に応じた使い分けを行うことができる.

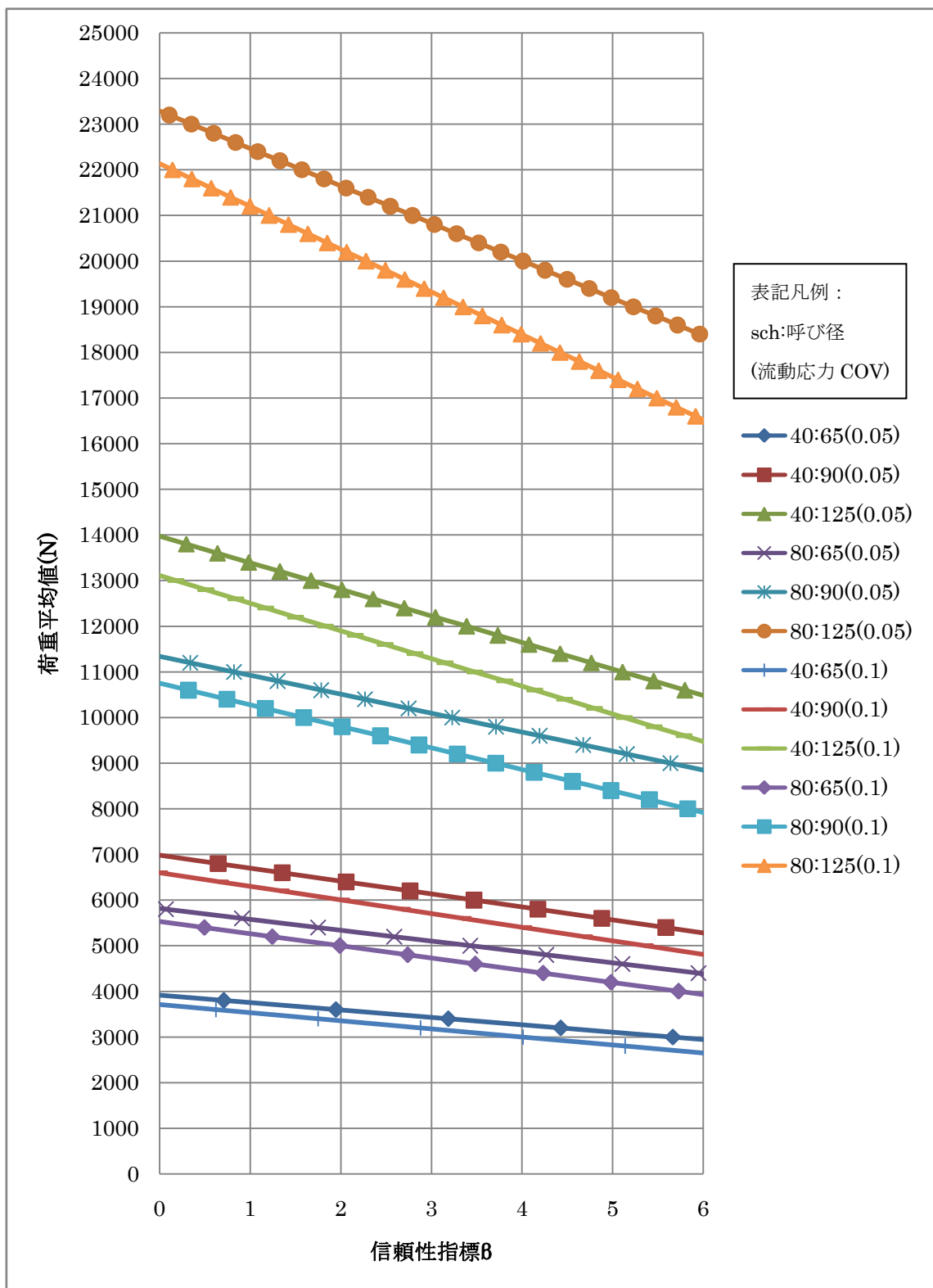


図 4.1 4 STPG370 を用いた場合の荷重変動係数 0.1 における評価線図

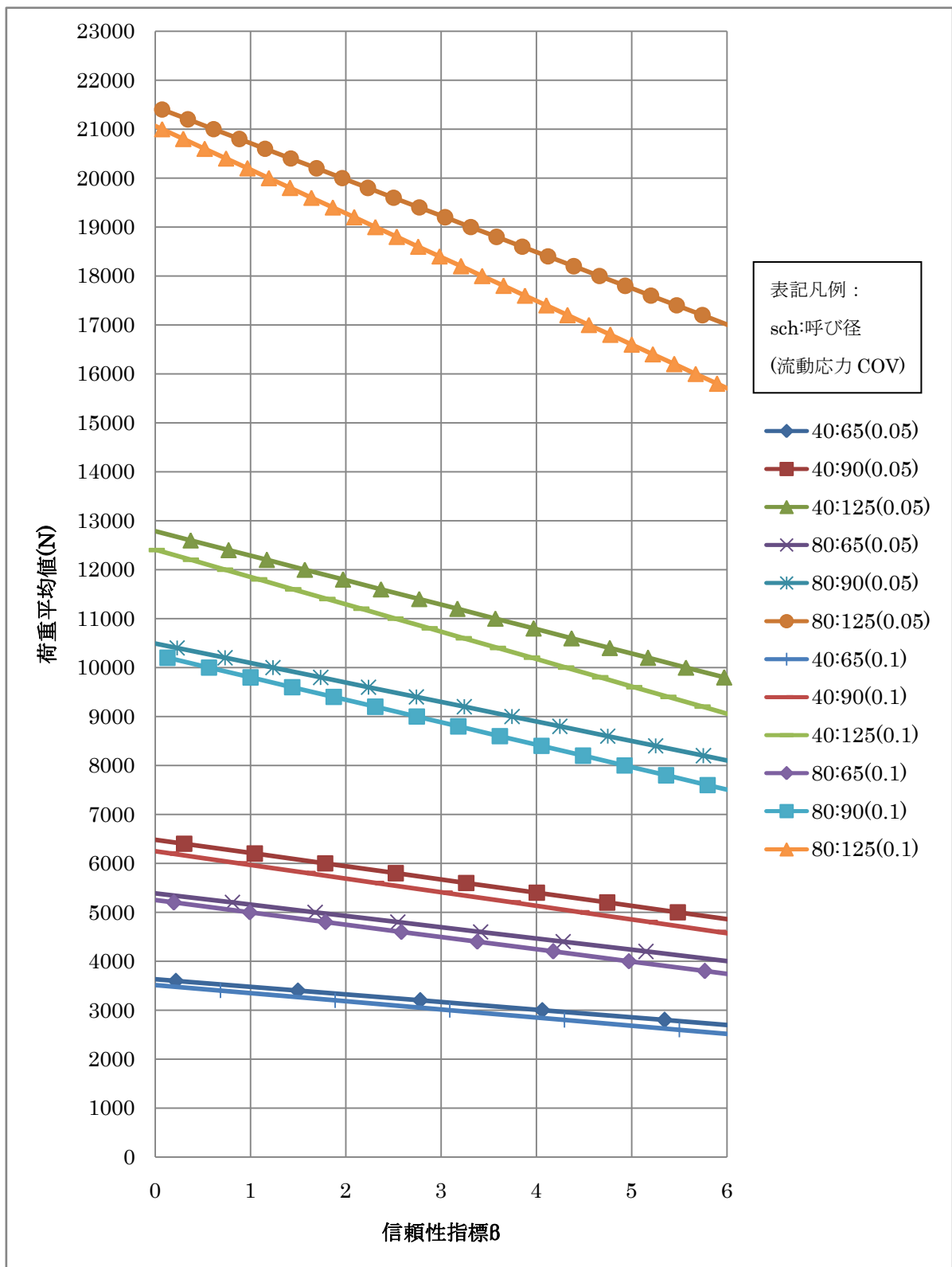


図 4.1 5 STPG370 を用いた場合の荷重変動係数 0.15 における評価線図

4.7.2 裕度評価の例

この節では、評価線図を用いて裕度評価を行う場合の例を具体的に述べる。

例 1 ・ 荷重条件が決定されている場合

荷重分布が平均値 5000N, COV=0.15 で、目標信頼度 $\beta_o = 4.0$ を達成したいとする。荷重の COV=0.15 なので図 4.14 を用い、荷重平均値が 5000N なので縦軸の 5000N の線を横にたどり、 $\beta \geq 4.0$ の範囲で交わる直線を探す。すると、”40:90(0.1)”の直線が $\beta = 4.5$ 付近で 5000N 線と交わっているのがわかる。そのため、エルボ部に sch40 呼び径 90 の配管を流動応力 COV=0.1 の STPG370 を用いて作成したものを用いるともっとも効率よく目標信頼性を達成できると判断できる。当然のことながら、この直線よりも上にある直線に対応する配管ならばどれを用いても目標信頼性を達成している。

例 2 : 配管が決定している場合

エルボ部が sch40 呼び径 125 の規格で、流動応力 COV=0.1 の STPG370 を用いてつくられたものであり、目標信頼性 $\beta_o = 4.0$ を達成する荷重条件を知りたいとする。図 4.14 で”40:125(0.1)”の直線が $\beta = 4.0$ と交わる点を探す。すると荷重平均値 11700N の付近で交わることがわかる。また、図 4.15 で同じものを探すと、荷重平均値 10800N 付近で交わっている。このことから、荷重 COV=0.1 ならば平均値が 11700N 以下、荷重 COV=0.15 ならば平均値 10700N 以下で目標信頼性が達成されるとわかる。

例 3 : 荷重条件が変更された場合

sch80 呼び径 125,用いられている STPG370 の流動応力 COV=0.1 である場合、荷重の条件が COV=0.15,平均値 19000N の下では図 4.15 から $\beta = 2.2$ ほどであることが”80:125(0.1)”の直線と 19000N の交点を探すことでわかる。この配管に対し、荷重の平均値を 17000N まで下げるとする。先ほどと同じ”80:125(0.1)”の直線と 17000N との交点を探すと、 $\beta = 4.5$ 付近で交わっていることがわかる。つまり、それだけ信頼性が増すことがわかる。

第5章 結論

5.1 総括

本論文では、確率論的安全裕度に基づいた配管設計の合理化を目的として、配管系においてもっとも破壊が生じやすいとされるエルボ部の安全裕度について評価を行い、確率論の知識がなくとも確率論的安全裕度評価が可能となる手法の提案を行った。

第3章では、限界状態関数が解析的に定義される場合にのみ適用可能である確率論的信頼性手法を、有限要素法解析を併用することによって限界状態関数が定義されない問題についても適用できる方法について述べた。

第4章では、第3章で述べた手法を配管のエルボ部分を取り出したモデルに適用し、エルボ部分の塑性崩壊についての評価を行った。その結果、エルボ部分の塑性崩壊に大きな影響を与えるパラメータは荷重と材料の強度であり、現状の荷重と強度のみを用いた評価の妥当性が示される結果となった。また、影響パラメータが2つに絞られるため、材料に関するパラメータが固定であるという仮定の下では、荷重条件のみで信頼性指標が決定できることが明らかとなった。その荷重の平均値と信頼性指標の関係は直線でよく近似されるため、この近似直線を用いて確率論的安全裕度評価が容易に行える評価線図を作ることができた。

5.2 今後の課題

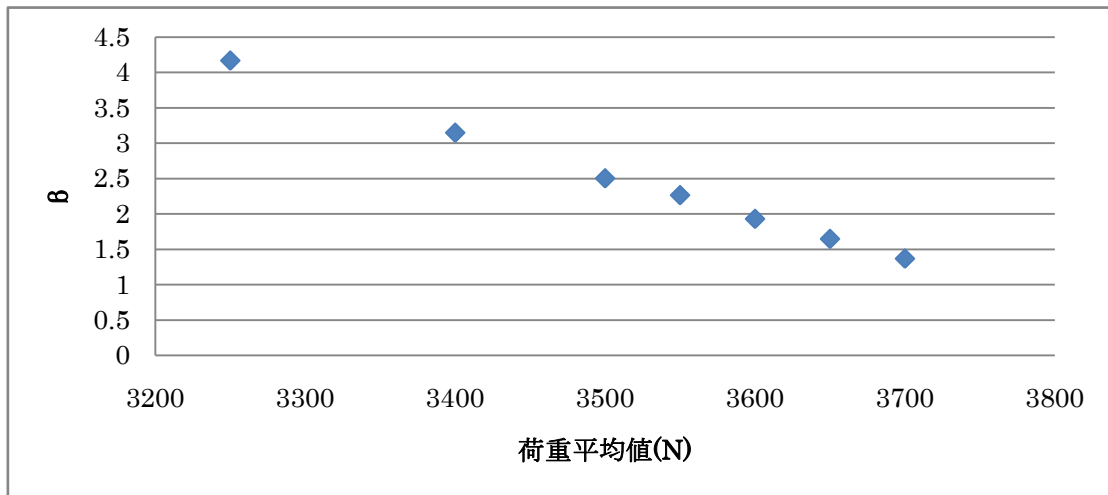
第3章において述べた手法を用いることで限界状態関数が解析的に定義できない問題についても確率論的信頼性手法を適用することが可能となるが、限界状態関数が個々の解析ごとに変化するために部分安全係数法を用いることが困難となるという問題が生じ、安全裕度評価に一般性を持たせることが不可能となった。より広範に適用できるようにするには、入力パラメータの変化に伴う応答曲面の変化について詳しい検討を加える必要がある。

A) 付録 解析結果

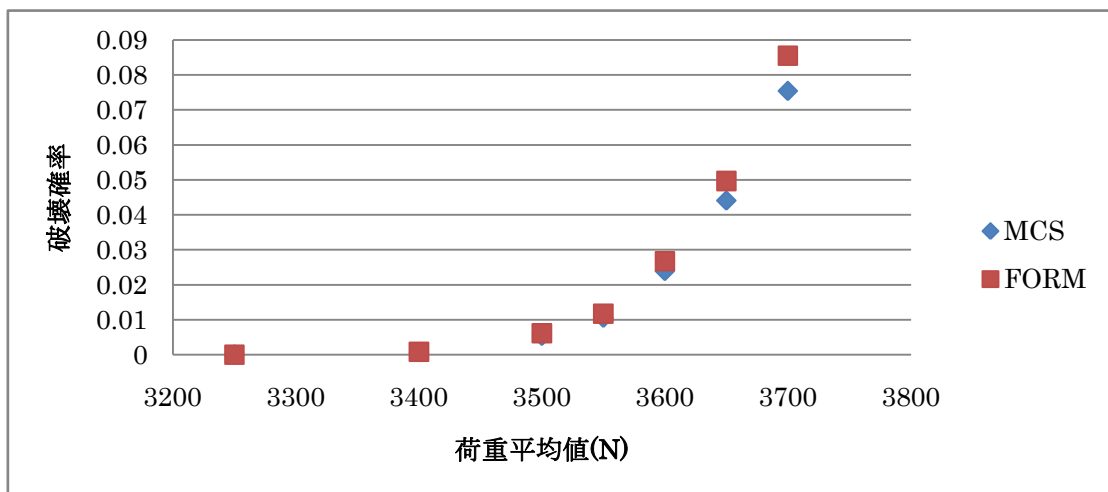
第4章において行った解析の結果を示す

$COV_L = 0.1, COV_{\sigma_f} = 0.05$ の場合

図 A. 1 sch40,呼び径 65 の結果一覧



sch40-65 における荷重平均値と信頼性指標の関係

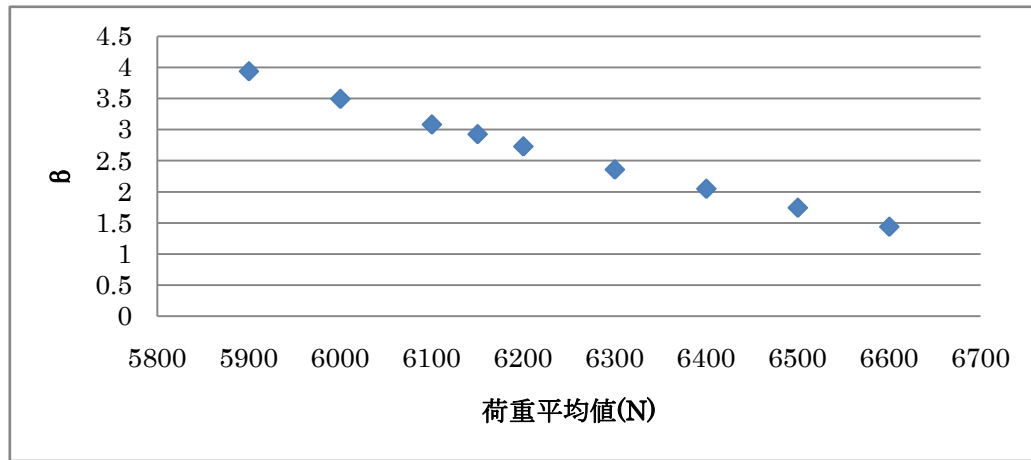


sch40-65 における荷重平均値と破壊確率の関係

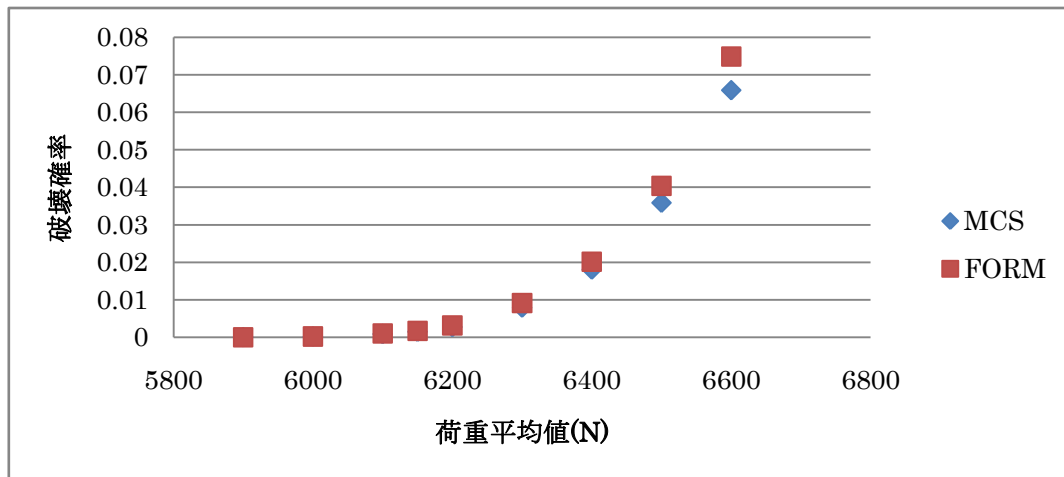
sch40-65 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
3250	4386.150378	0.075484	0.005149	266898805.2
3400	4311.306063	0.07575	0.005165	273171657.6
3500	4253.657438	0.075888	0.005173	277353564.1
3550	4264.103555	0.076092	0.005187	278197703.6
3600	4220.857404	0.076126	0.005189	280638140.8
3650	4187.742913	0.076149	0.00519	282433640.4
3700	4157.488843	0.076178	0.005192	284520720.2

図 A. 2 sch40,呼び径 90 の結果一覧



sch40-90 における荷重平均値と信頼性指標の関係

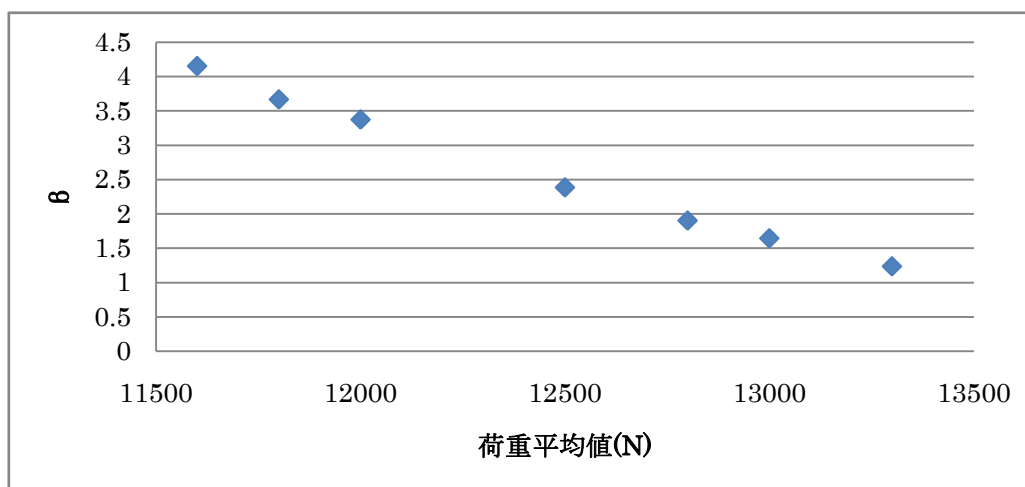


sch40-90 における荷重平均値と破壊確率の関係

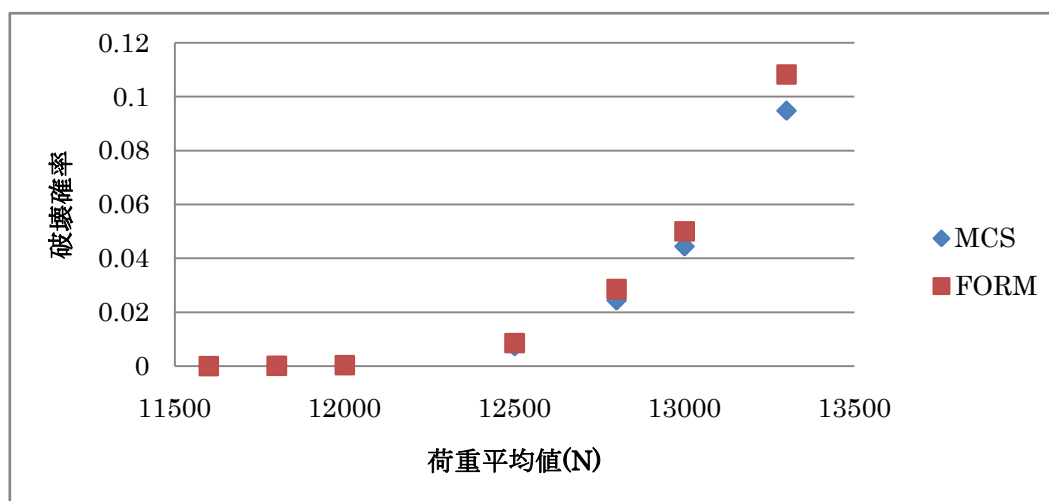
sch40-90 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
5900	7860.21754	0.10073	0.005648	267634380.7
6000	7776.90313	0.100865	0.005655	270278508.2
6100	7701.70777	0.100977	0.005662	272934300.7
6150	7704.36732	0.101301	0.005663	273511702.6
6200	7664.98166	0.101323	0.005666	274891400.7
6300	7593.49591	0.101363	0.005671	277522453.8
6400	7562.38213	0.101391	0.005688	279279522.5
6500	7507.58093	0.101421	0.005689	281354714.7
6600	7448.141	0.10145	0.005691	283518760.9

図 A. 3 sch40,呼び径 125 の結果一覧



sch40-125 における荷重平均値と信頼性指標の関係

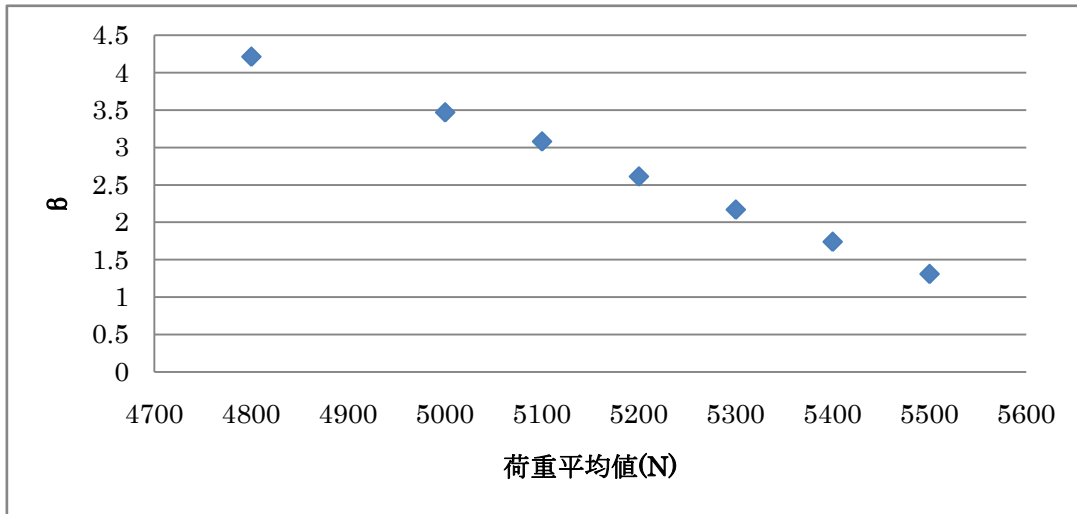


sch40-125 における荷重平均値と破壊確率の関係

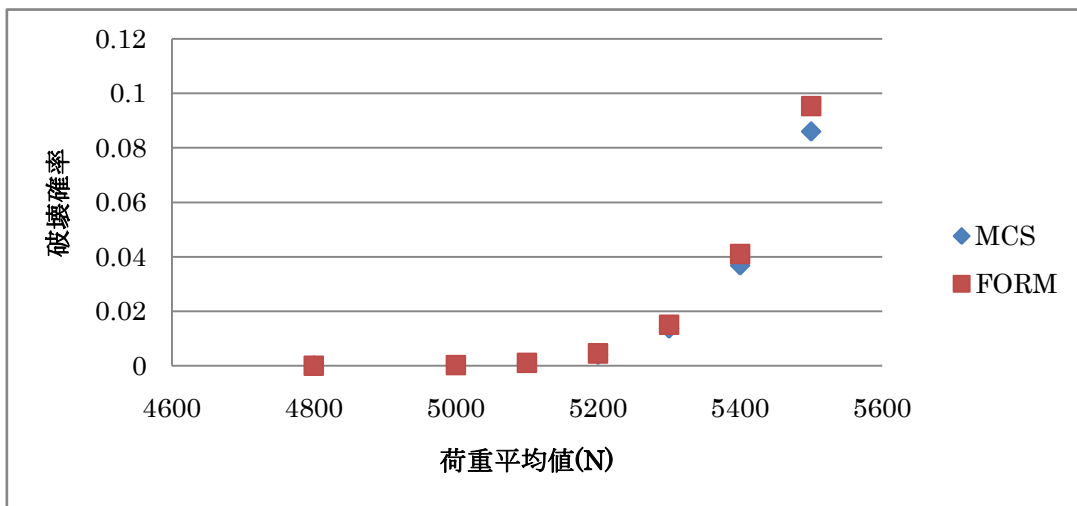
sch40-125 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
11600	15648.967	0.138599	0.006533	265940209
11800	15458.705	0.138773	0.006543	269166038
12000	15477.639	0.139362	0.006548	270559315
12500	15087.508	0.139498	0.006566	277275634
12800	14919.49	0.139556	0.006574	280393330
13000	14891.076	0.139587	0.006588	281838329
13300	14763.707	0.139631	0.006591	284728594

図 A. 4 sch80,呼び径 65 の結果一覧



sch80-65 における荷重平均値と信頼性指標の関係

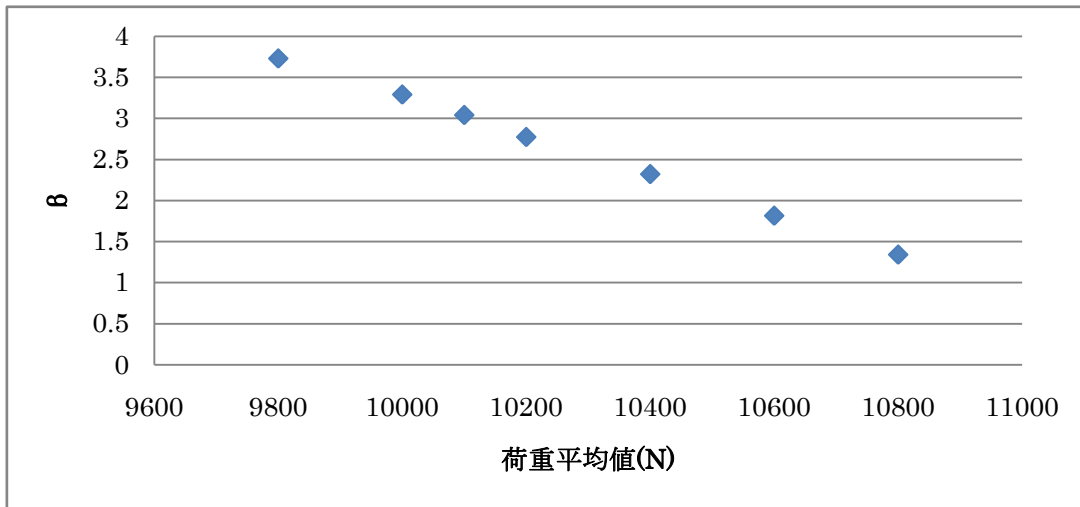


sch80-125 における荷重平均値と破壊確率の関係

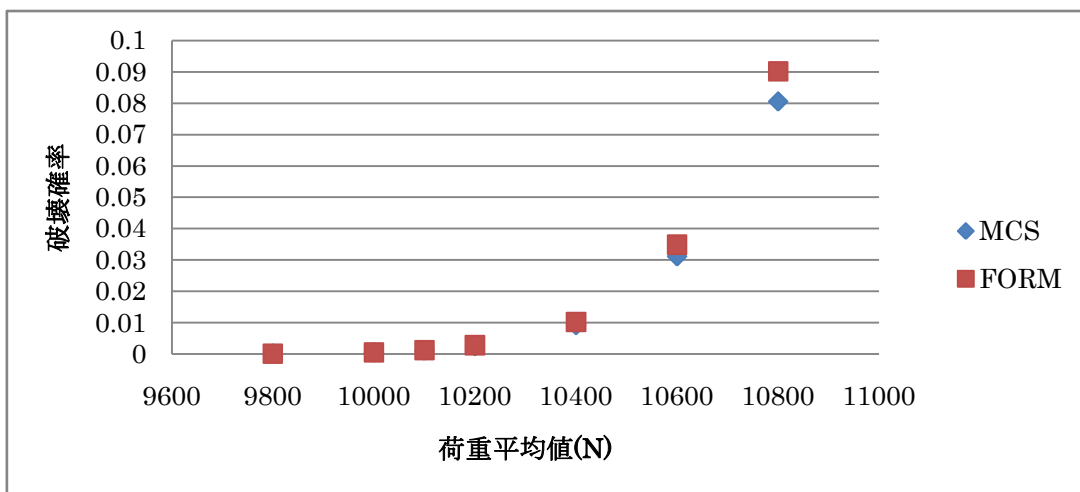
sch80-65 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
4800	6453.13305	0.075426	0.006939	263956098.5
5000	6450.57497	0.075612	0.006951	270310014.3
5100	6442.29147	0.075685	0.006955	274622306
5200	6374.52423	0.075802	0.006963	277797293.3
5300	6317.11243	0.075896	0.006984	280341127
5400	6252.36987	0.076123	0.006987	282743619.6
5500	6164.11312	0.076173	0.007	285521856.3

図 A. 5 sch80,呼び径 90 の結果一覧



sch80-90 における荷重平均値と信頼性指標の関係

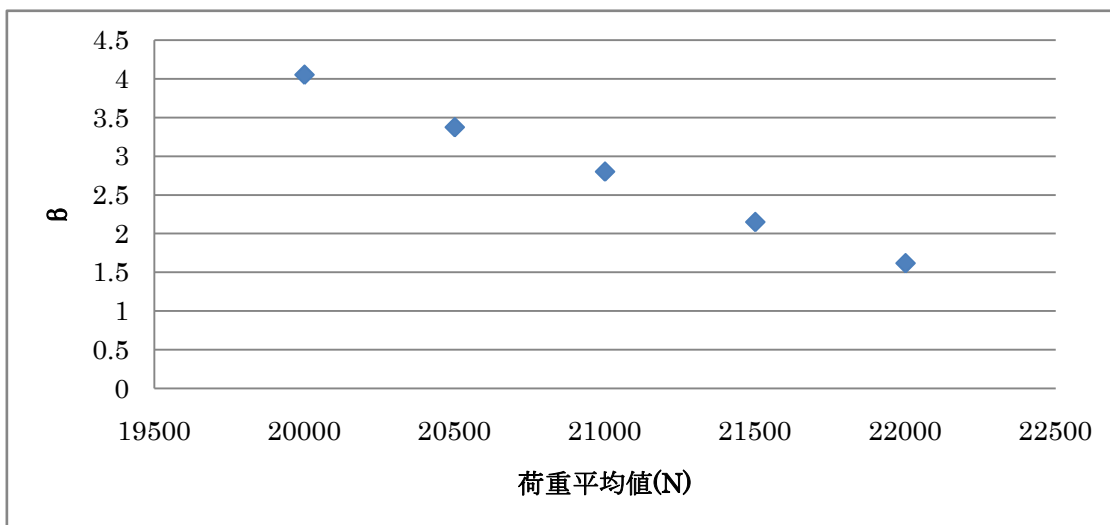


sch80-90 における荷重平均値と破壊確率の関係

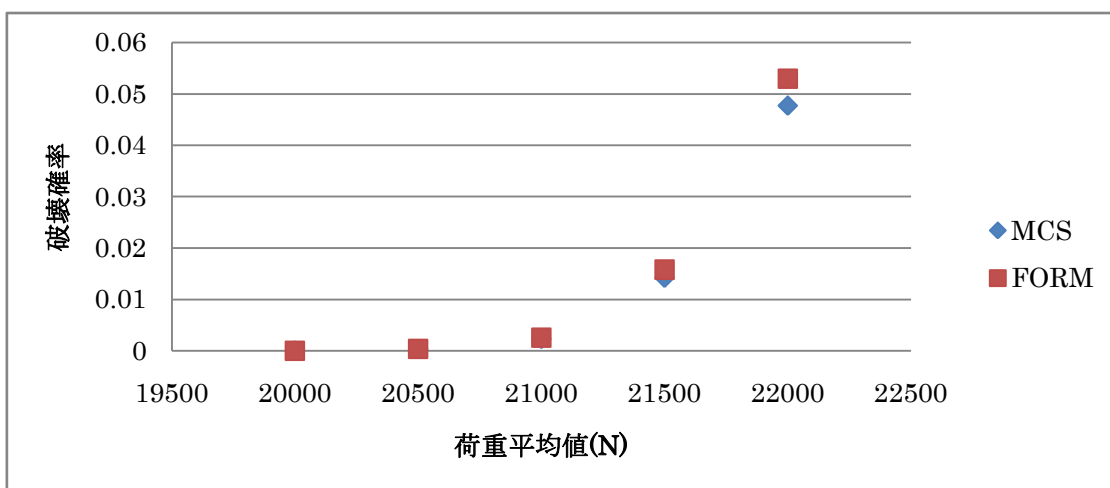
sch80-90 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
9800	12839.2166	0.100738	0.008036	267405509
10000	12805.7951	0.100832	0.008042	272526044
10100	12738.5024	0.100906	0.008048	274342226
10200	12646.0955	0.100982	0.008054	276225892
10400	12570.4692	0.101331	0.008081	278600056
10600	12332.9457	0.101388	0.008085	281771285
10800	12145.531	0.1016	0.0081	285287917

図 A. 6 sch80,呼び径 125 の結果一覧



sch80-125 における荷重平均値と信頼性指標の関係



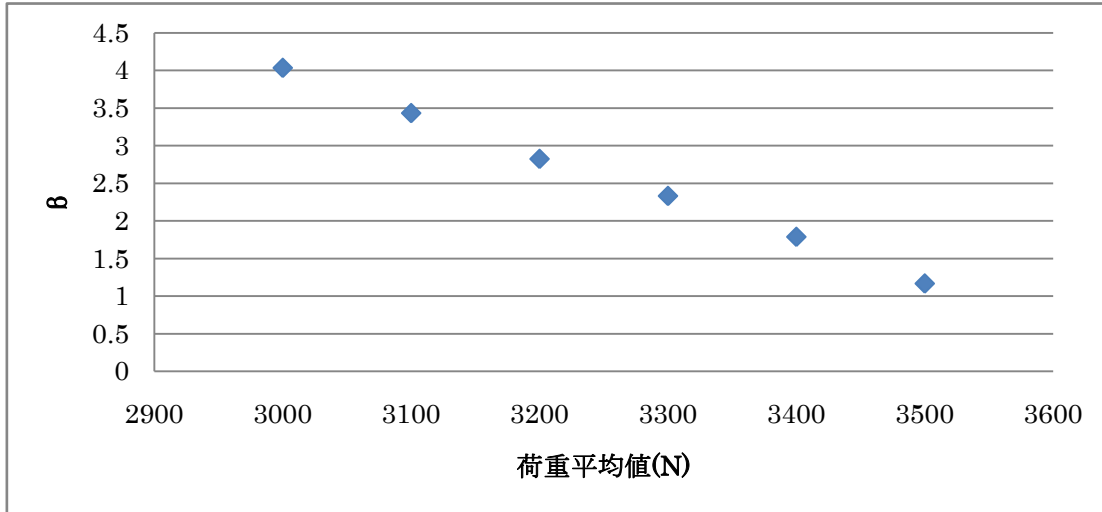
sch80-125 における荷重平均値と破壊確率の関係

sch80-125 破壊点一覧

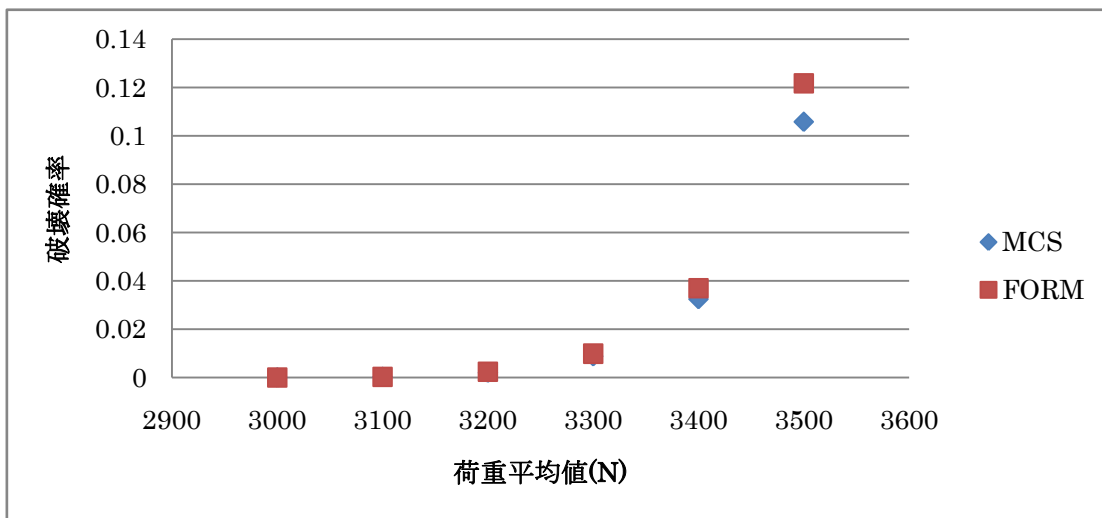
荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
20000	26840.2829	0.13856	0.009411	266858900.2
20500	26407.9651	0.138822	0.00943	271534803.4
21000	26216.4347	0.139409	0.009473	274492315.2
21500	25636.4223	0.139502	0.009479	279209968.4
22000	25242.2942	0.1398	0.0095	282770635.9

$COV_L = 0.1, COV_{\sigma_f} = 0.1$ の場合

図 A. 7 sch40,呼び径 65 の結果一覧



sch40-65 における荷重平均値と信頼性指標の関係

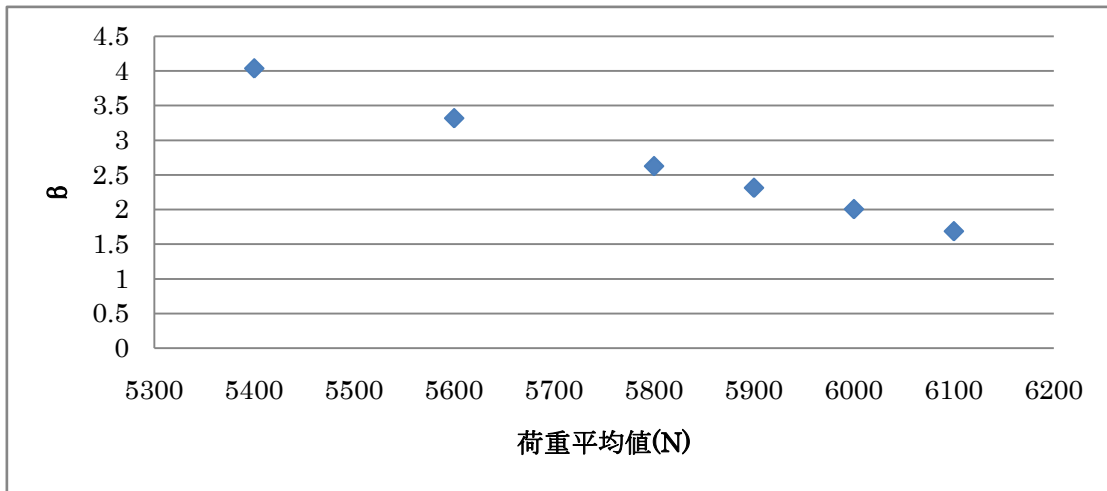


sch40-65 における荷重平均値と破壊確率の関係

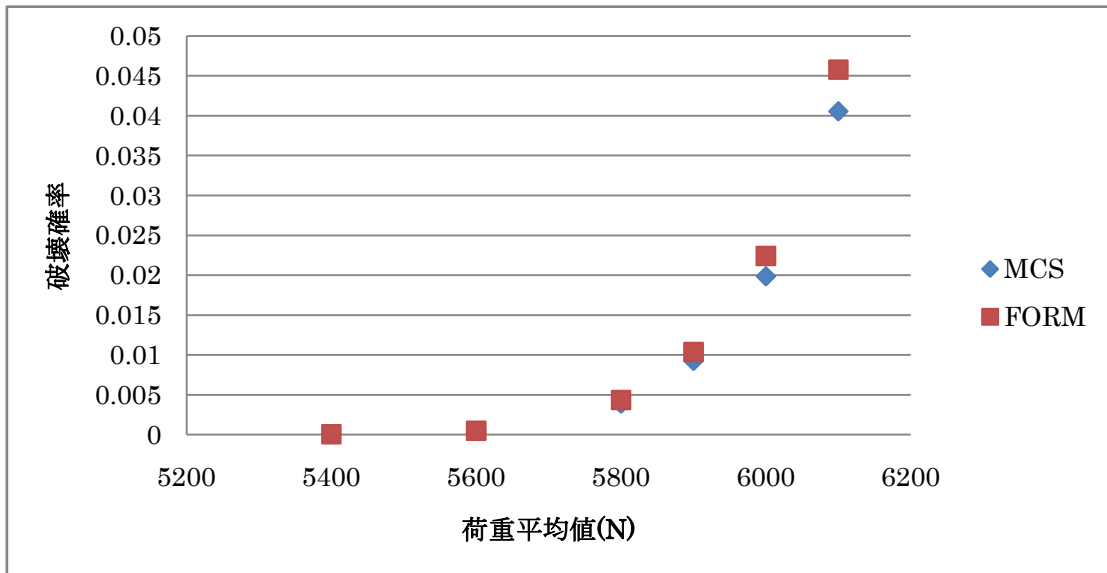
sch40-65 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
3000	3649.13513	0.075816	0.005157	197654273.6
3100	3672.31499	0.075914	0.005164	211622348.1
3200	3702.50957	0.076001	0.005171	226723068.2
3300	3722.41981	0.076138	0.00519	236123220
3400	3729.6161	0.076171	0.005192	249104008.3
3500	3693.98663	0.0763	0.0052	262475031.2

図 A. 8 sch40,呼び径 90 の結果一覧



sch40-90 における荷重平均値と信頼性指標の関係

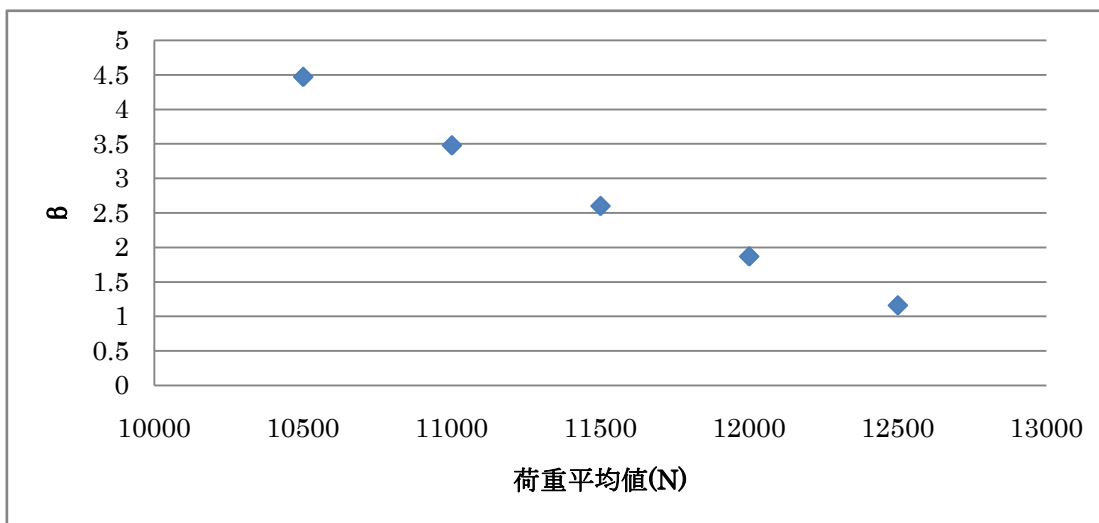


sch40-90 における荷重平均値と破壊確率の関係

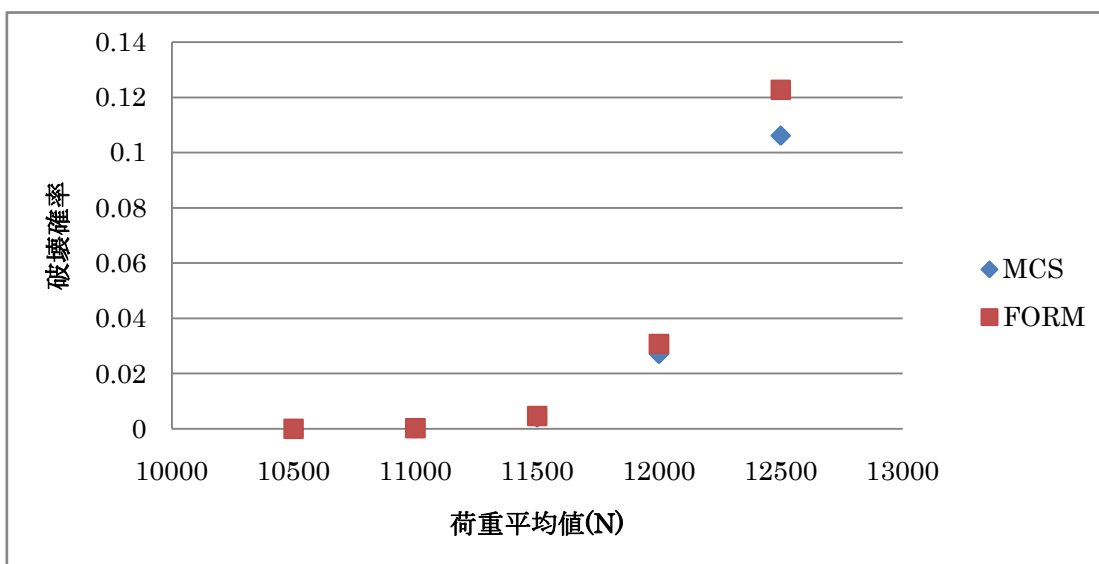
sch40-90 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
5400	6491.14774	0.100984	0.005649	195287564.7
5600	6566.56739	0.101121	0.005673	211940264.9
5800	6612.65164	0.101374	0.005688	228136303.1
5900	6633.18384	0.101405	0.005689	235961436
6000	6645.61032	0.101431	0.00569	243443580.1
6100	6593.00379	0.1016	0.0057	249174023.1

図 A.9 sch40,呼び径 125 の結果一覧



sch40-125 における荷重平均値と信頼性指標の関係

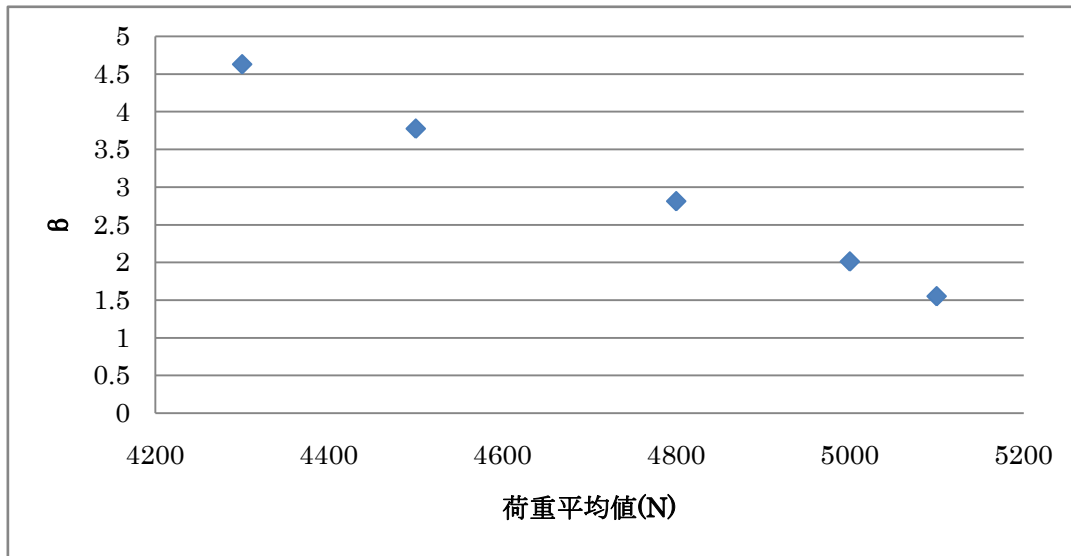


sch40-125 における荷重平均値と破壊確率の関係

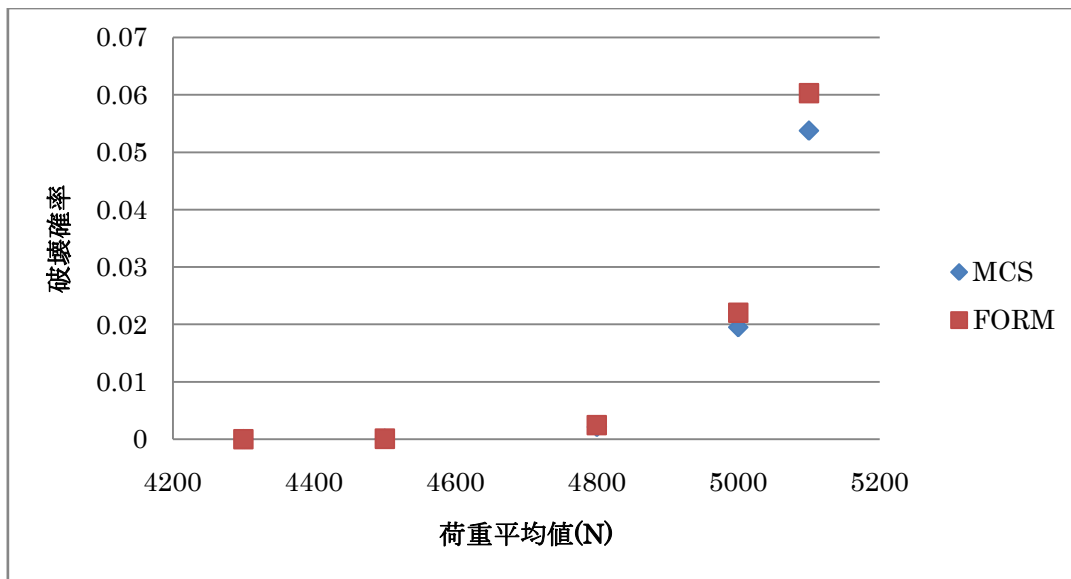
sch40-125 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
10500	12779.32312	0.138961	0.006532	183684603.4
11000	12981.4852	0.139414	0.006567	207111297.8
11500	13071.03146	0.139526	0.006586	228350320.8
12000	13220.56064	0.139609	0.00659	246994969.6
12500	13216.84167	0.1398	0.0066	262960028.5

図 A.1 0 sch80,呼び径 65 の結果一覧



sch80-65 における荷重平均値と信頼性指標の関係

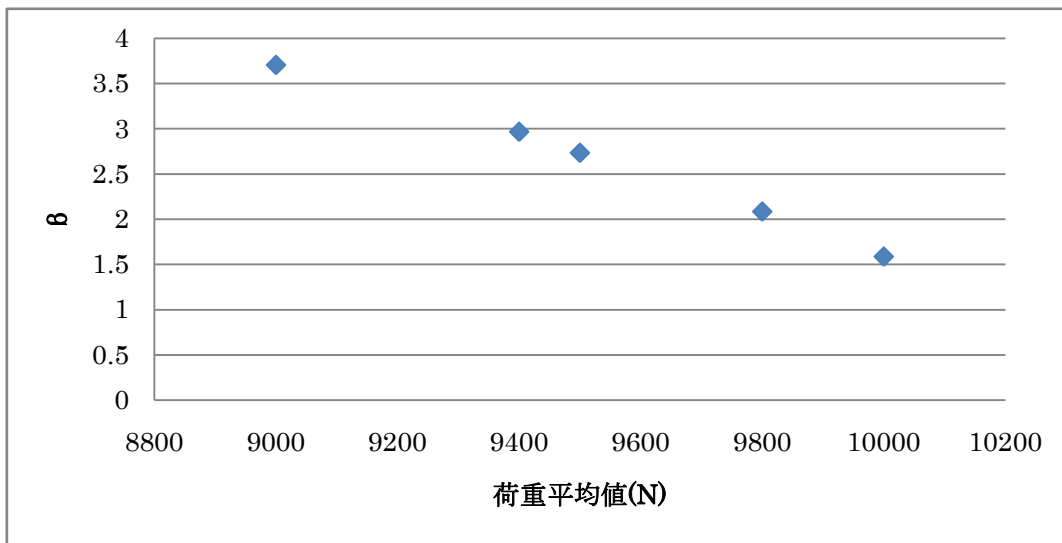


sch80-65 における荷重平均値と破壊確率の関係

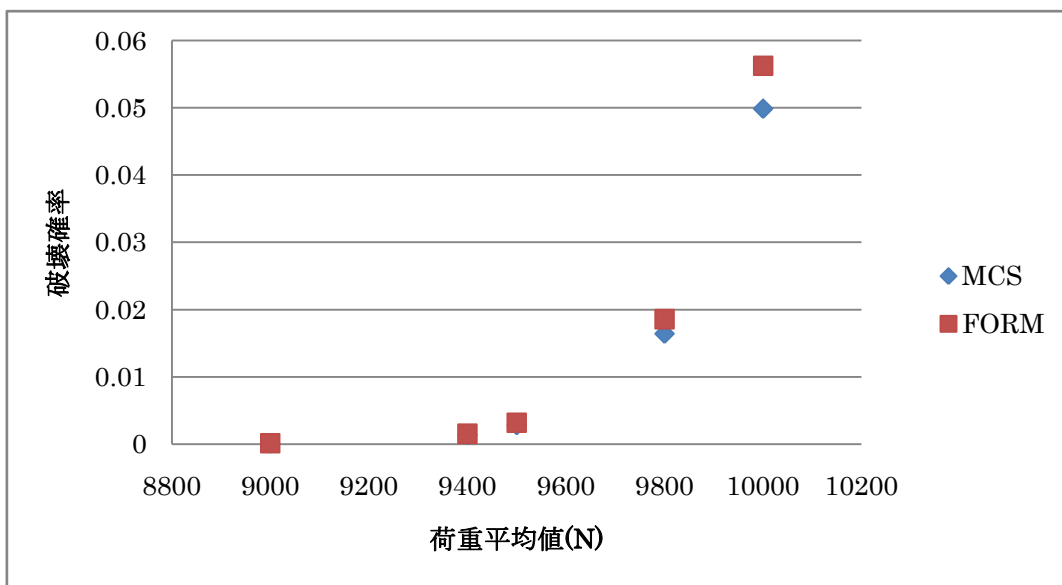
sch80-65 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
4300	5432.13652	0.075626	0.006957	185638316.6
4500	5471.76969	0.075686	0.006956	206982123.2
4800	5574.61407	0.075931	0.006974	227513528.5
5000	5524.86653	0.07612	0.006988	242985083.5
5100	5463.97658	0.076145	0.007	252608488.4

図 A.1 1 sch80,呼び径 90 の結果一覧



sch80-90 における荷重平均値と信頼性指標の関係

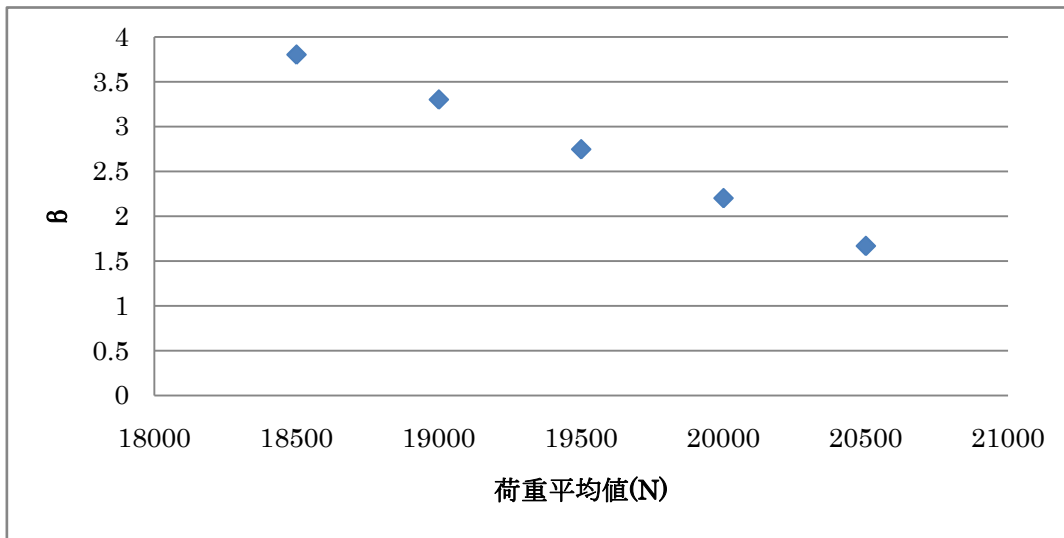


sch80-90 における荷重平均値と破壊確率の関係

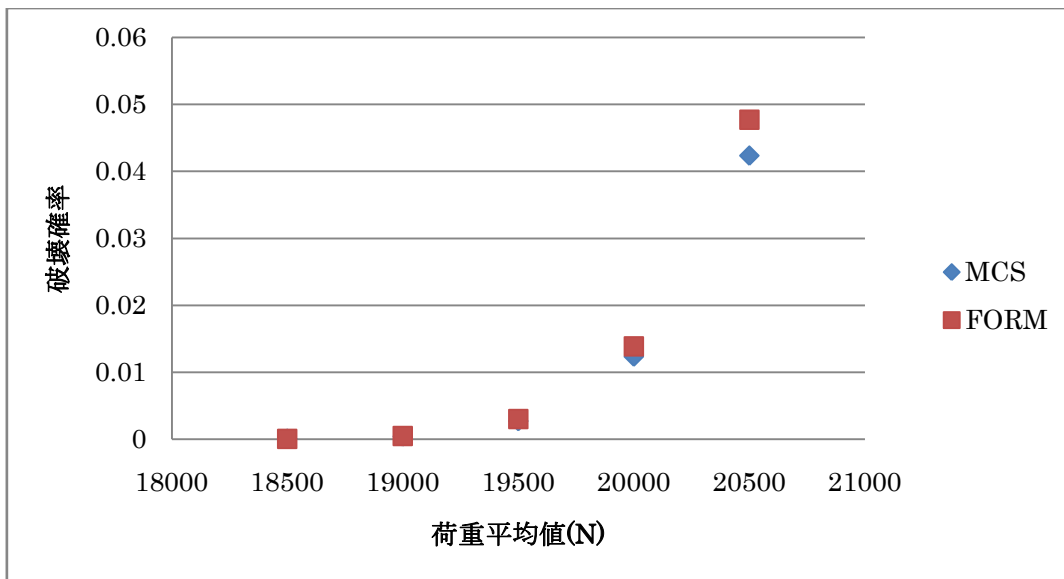
sch80-90 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
9000	10879.2352	0.101049	0.008062	205535980.3
9400	10897.5498	0.101319	0.008081	220093815.5
9500	10867.8185	0.101339	0.008082	225255796.5
9800	10849.3726	0.101396	0.008086	240768122.6
10000	10709.5268	0.1016	0.0081	250965473.3

図 A.1 2 sch80,呼び径 125 の結果一覧



sch80-125 における荷重平均値と信頼性指標の関係



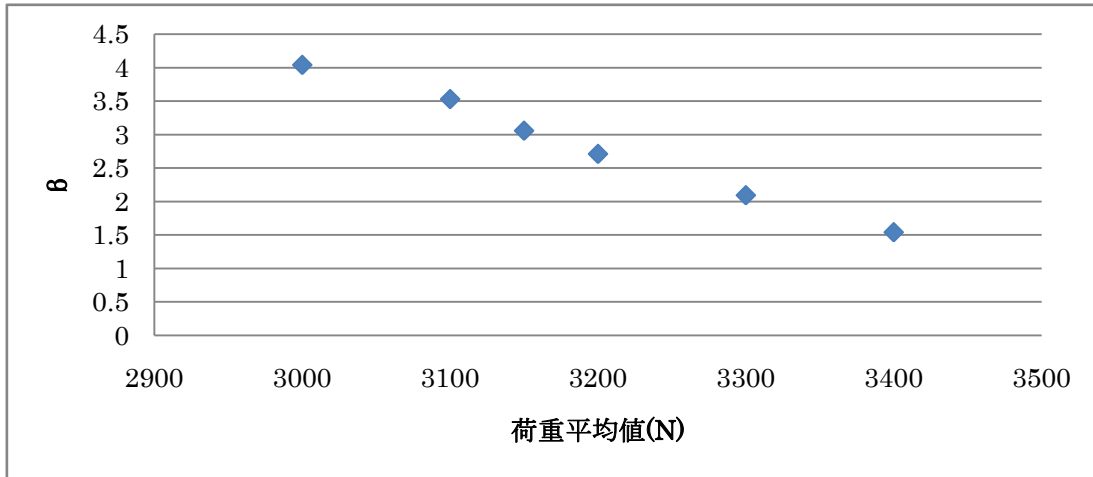
sch80-125 における荷重平均値と破壊確率の関係

sch80-125 破壊点一覧

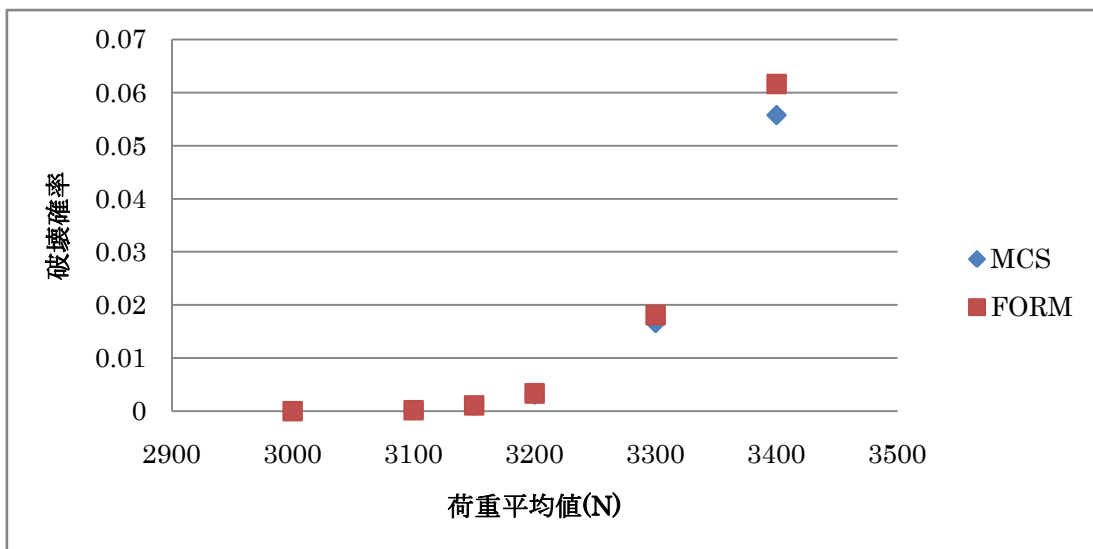
荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
18500	22125.8166	0.139087	0.009428	200998033.3
19000	22242.3726	0.139421	0.009458	211228883.3
19500	22269.1657	0.139489	0.00948	224344458.3
20000	22227.9195	0.139544	0.009483	237488107.2
20500	22051.8236	0.1398	0.0095	249045278.8

$COV_L = 0.15, COV_{\sigma_f} = 0.05$ の場合

図 A.1 3 sch40,呼び径 65 の結果一覧



sch40-65 における荷重平均値と信頼性指標の関係

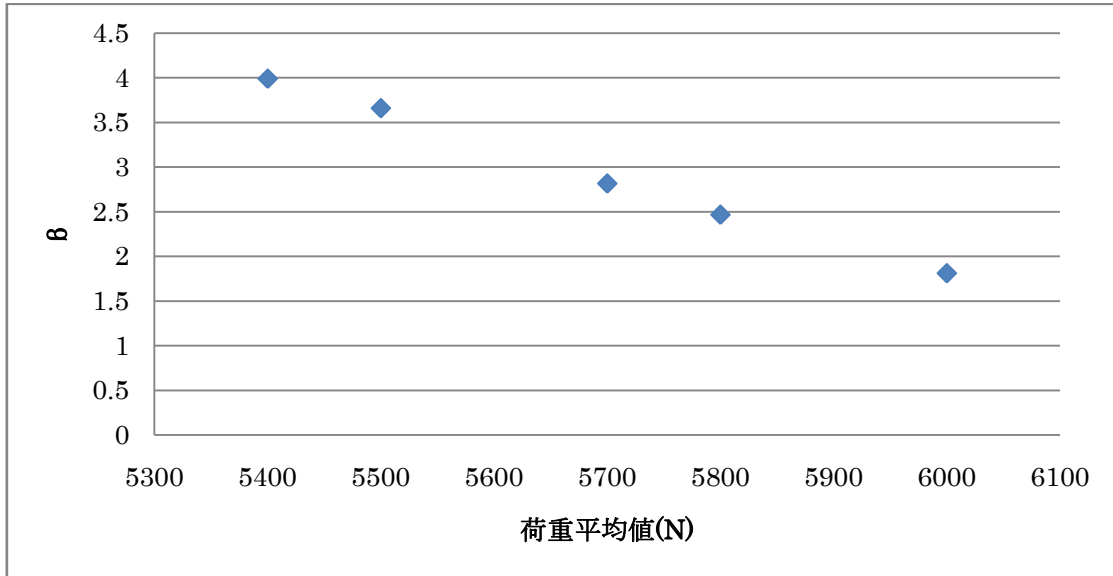


sch40-65 における荷重平均値と破壊確率の関係

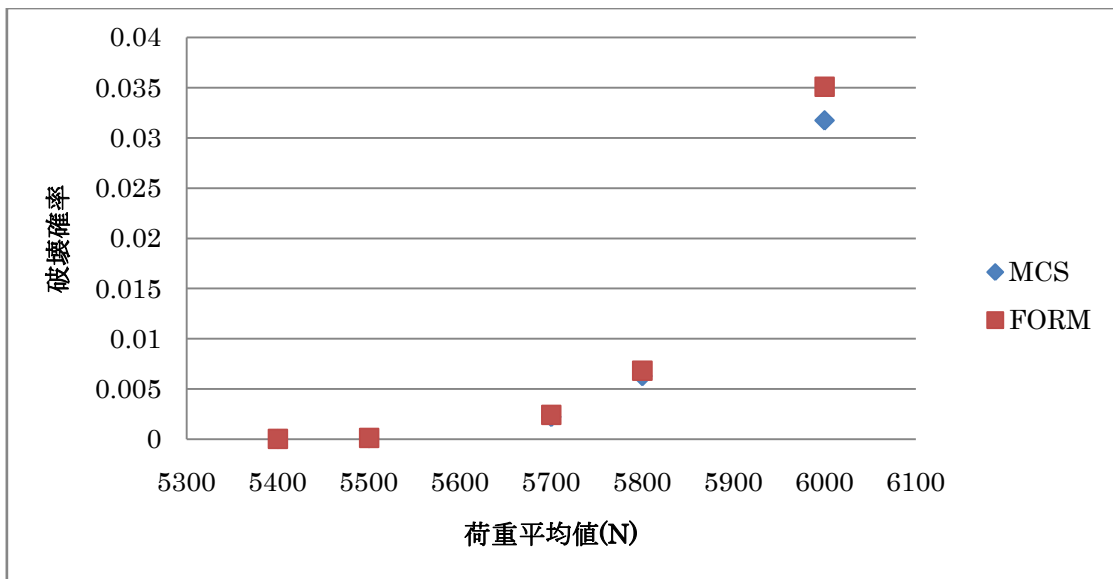
sch40-65 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
3000	4693.77	0.076032	0.005184	272167661.7
3100	4628.947	0.076074	0.005186	274673246.6
3150	4505.938	0.076111	0.005188	277881328.1
3200	4428.492	0.076139	0.00519	280118577.3
3300	4295.066	0.0763	0.0052	283933488.3
3400	4186.119	0.0763	0.0052	292500000

図 A.1 4 sch40,呼び径 90 の結果一覧



sch40-90 における荷重平均値と信頼性指標の関係

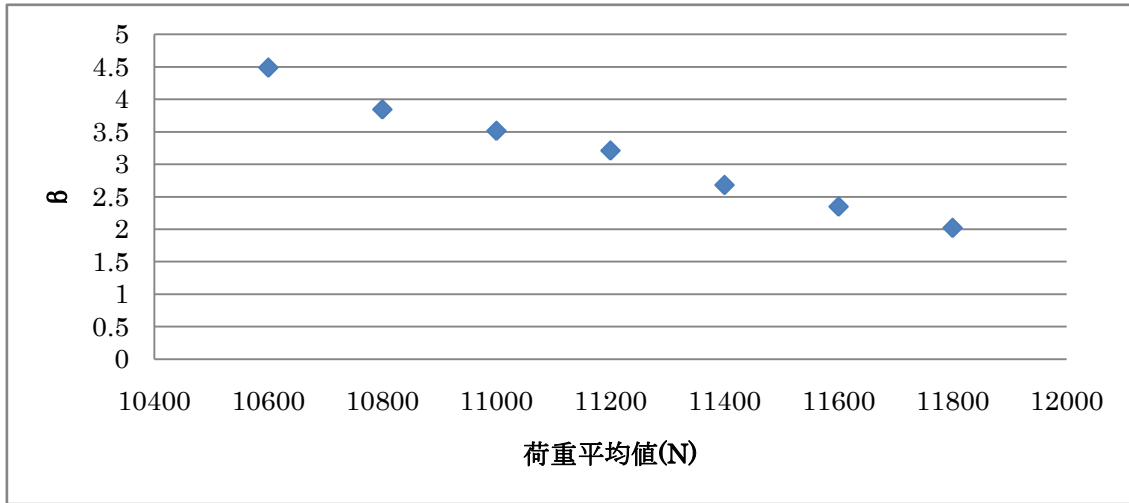


sch40-90 における荷重平均値と破壊確率の関係

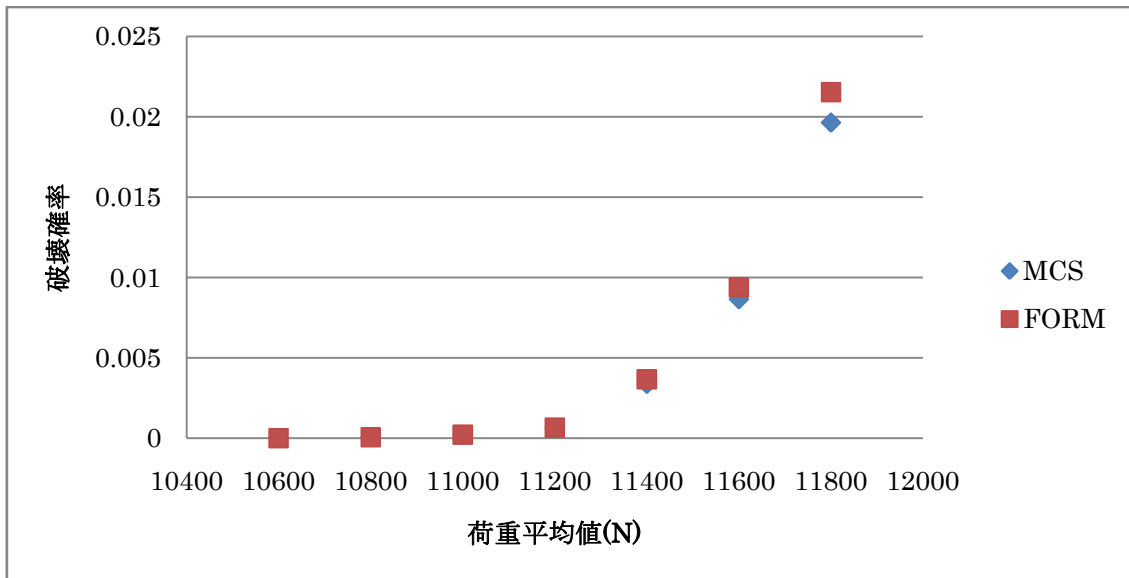
sch40-90 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
5400	8429.587	0.101281	0.005683	273161022.8
5500	8324.618	0.101313	0.005685	274456808.4
5700	7967.103	0.101395	0.005689	279246222.4
5800	7837.391	0.1016	0.0057	281161405
6000	7563.517	0.1016	0.0057	285017267.4

図 A.1 5 sch40,呼び径 125 の結果一覧



sch40-125 における荷重平均値と信頼性指標の関係

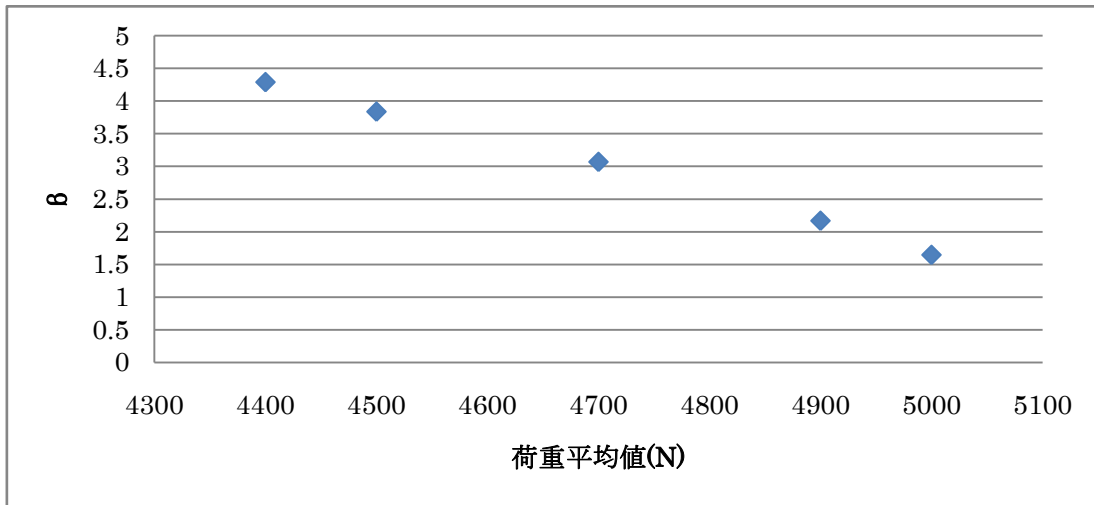


sch40-125 における荷重平均値と破壊確率の関係

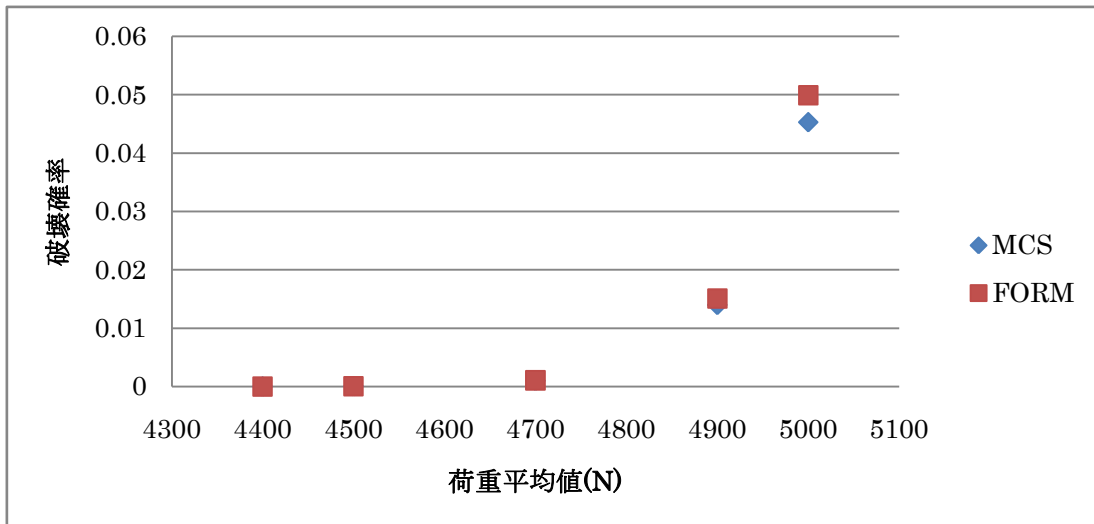
sch40-125 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
10600	17241.02	0.139347	0.006578	269588101.2
10800	16629.77	0.139424	0.006581	273613706.2
11000	16424.75	0.139464	0.006583	275069085.7
11200	16240	0.1395	0.006585	276407251.9
11400	15712.96	0.139555	0.006587	279731438.7
11600	15473.9	0.1398	0.0066	281496031.1
11800	15207	0.1398	0.0066	283385232.4

図 A.1 6 sch80,呼び径 65 の結果一覧



sch80-65 における荷重平均値と信頼性指標の関係

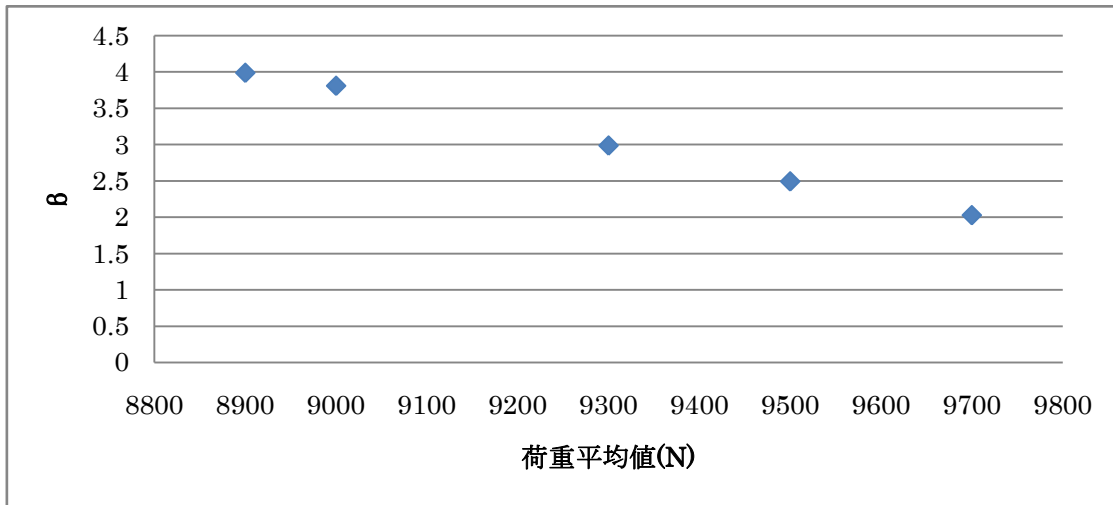


sch80-65 における荷重平均値と破壊確率の関係

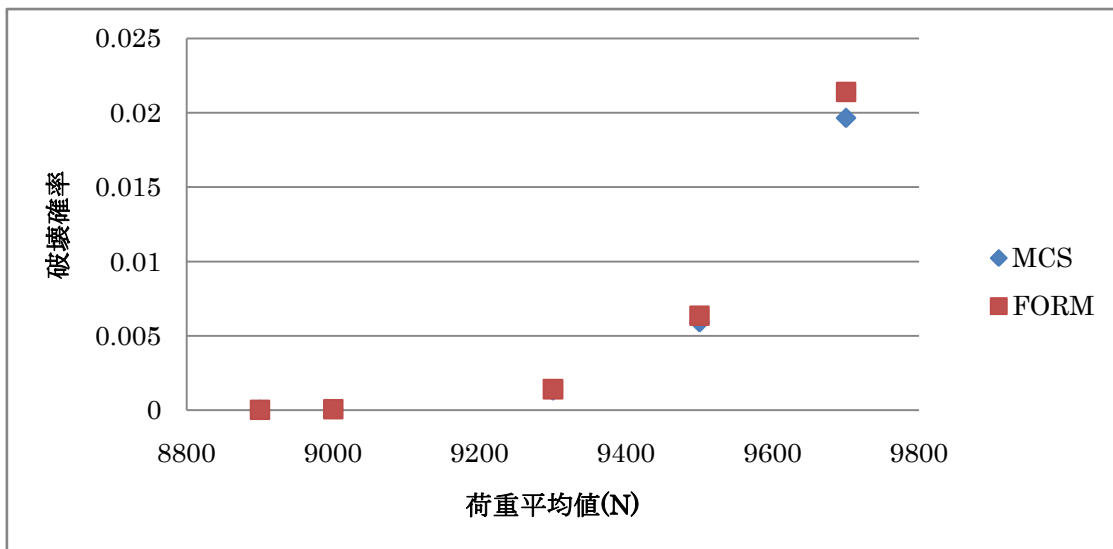
sch80-65 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
4400	6918.674	0.075475	0.006945	271597642.6
4500	6830.377	0.075606	0.006953	274445971
4700	6743.366	0.076062	0.006985	278818068.3
4900	6480.187	0.076154	0.007	289541019.1
5000	6234.346	0.0763	0.007	292500000

図 A.1 7 sch80,呼び径 90 の結果一覧



sch80-90 における荷重平均値と信頼性指標の関係

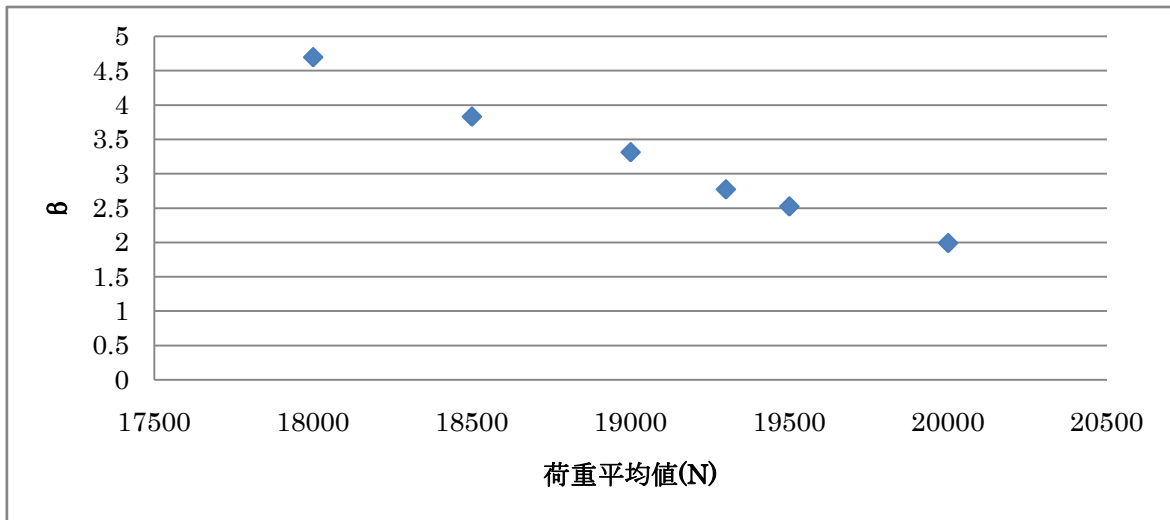


sch80-90 における荷重平均値と破壊確率の関係

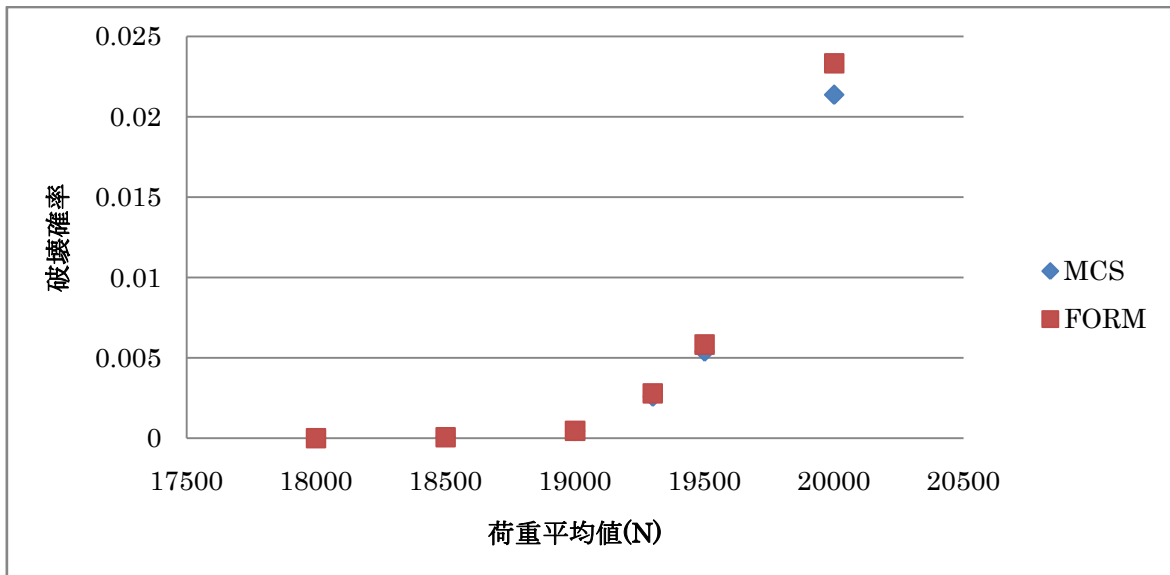
sch80-90 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
8900	13863.28	0.101244	0.008077	272423338.9
9000	13803.65	0.101266	0.008079	273592371.4
9300	13253.31	0.101359	0.008084	279522558.8
9500	12905.45	0.10141	0.0081	282569503.5
9700	12647.33	0.1016	0.0081	292500000

図 A.1 8 sch80,呼び径 125 の結果一覧



sch80-125 における荷重平均値と信頼性指標の関係



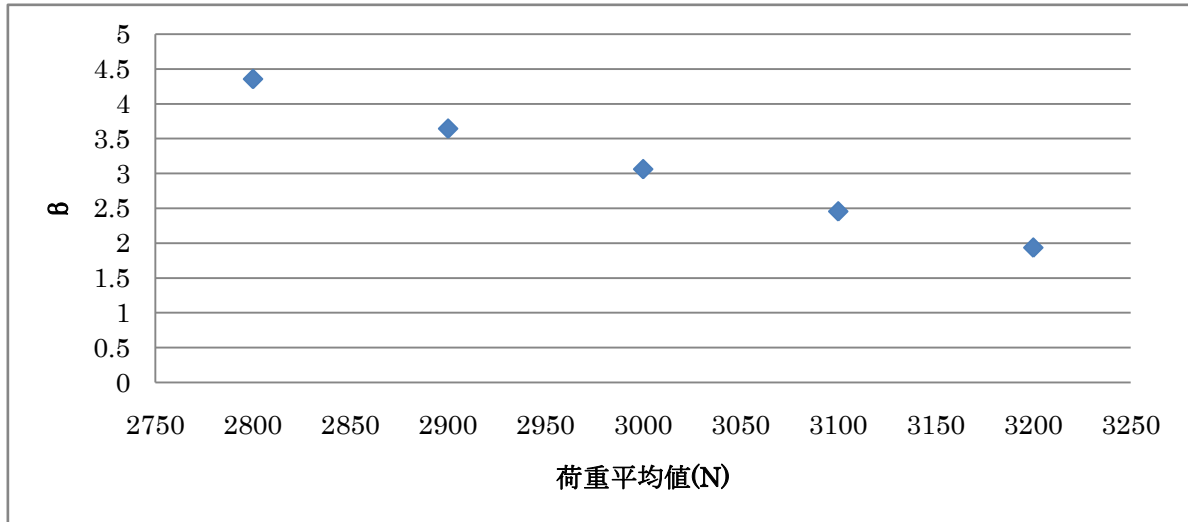
sch80-125 における荷重平均値と破壊確率の関係

sch80-125 破壊点一覧

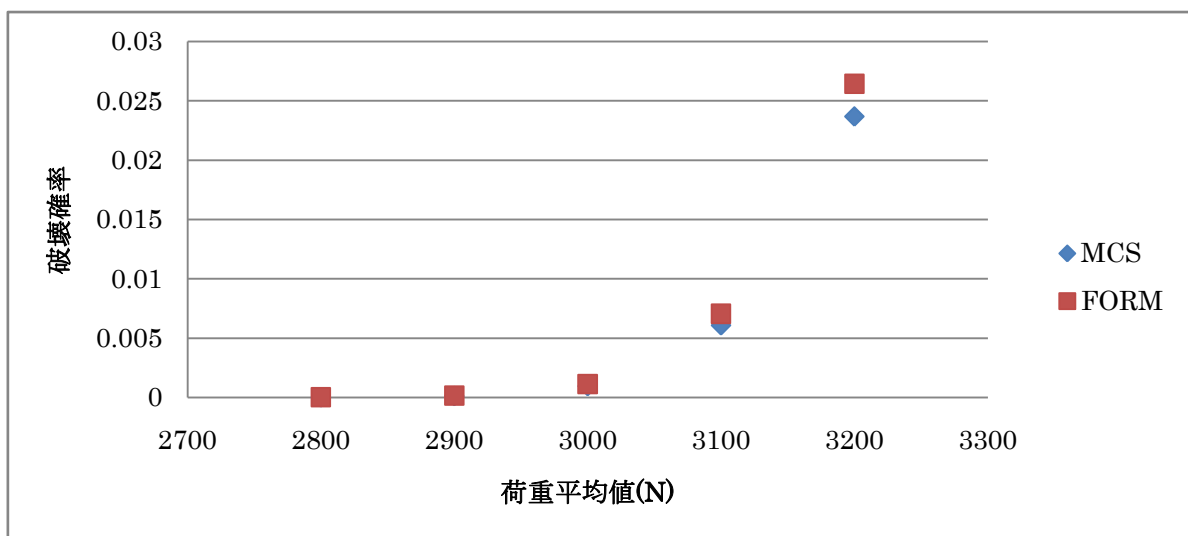
荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
18000	29720.11	0.139274	0.009469	267356882.2
18500	28443.44	0.139392	0.009475	273570810.5
19000	27889.81	0.139471	0.009479	276883977.5
19300	26932.93	0.139538	0.009483	280593273.8
19500	26582.74	0.1398	0.0095	282152593.2
20000	25969.08	0.1398	0.0095	292500000

$COV_L = 0.15, COV_{\sigma_f} = 0.1$ の場合

図 A.1 9 sch40, 呼び径 65 の結果一覧



sch40-65 における荷重平均値と信頼性指標の関係

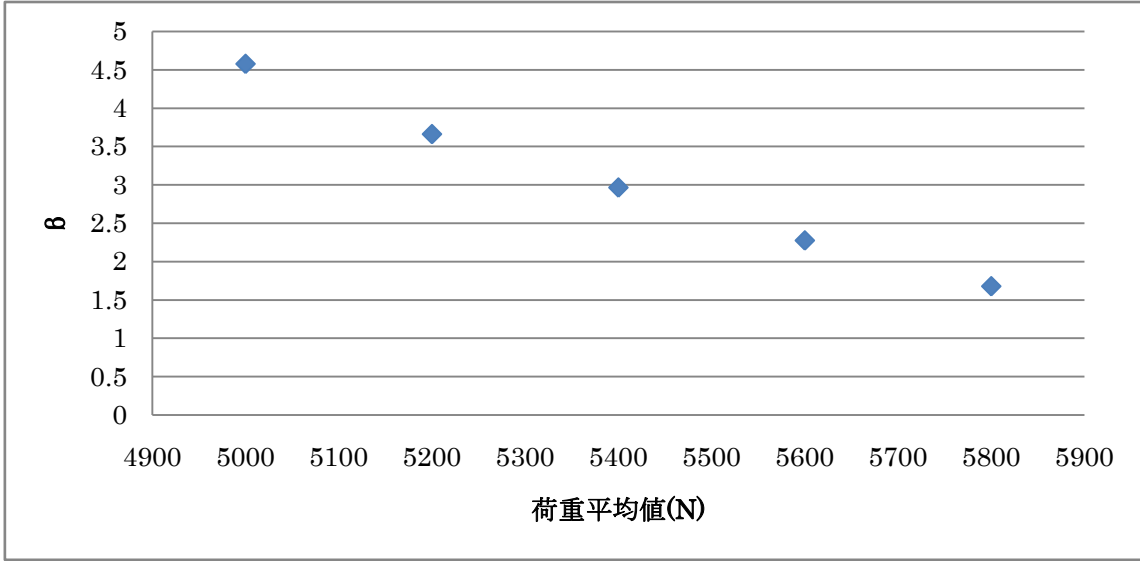


sch40-65 における荷重平均値と破壊確率の関係

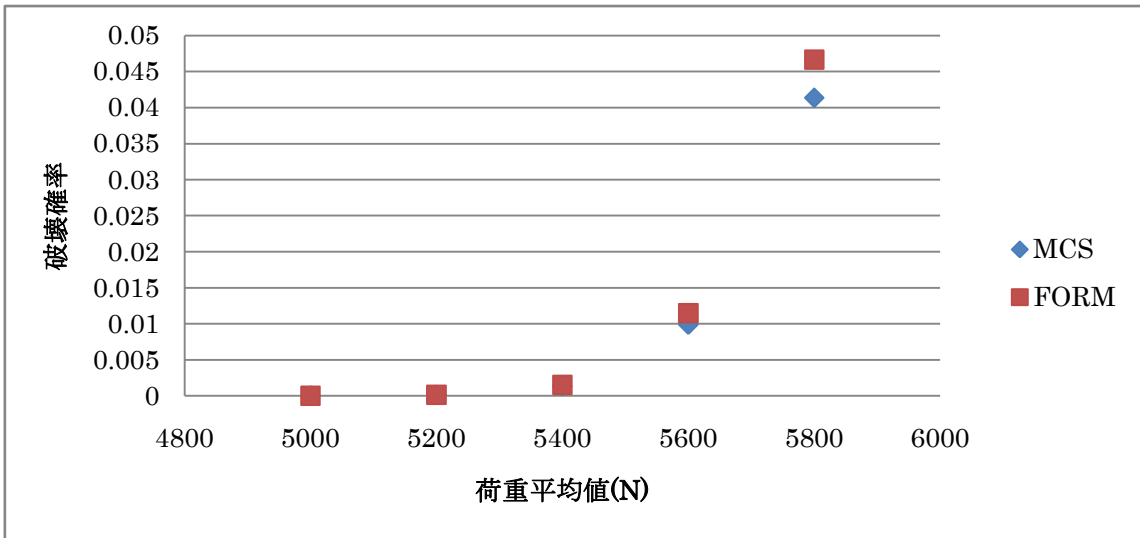
sch40-65 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
2800	4086.943	0.075723	0.005163	207274029.2
2900	4041.462	0.075851	0.00517	222688302.5
3000	3994.691	0.075948	0.005176	233552962.4
3100	3945.918	0.076024	0.005181	246667427.7
3200	3902.455	0.076177	0.005192	256001814.7

図 A.2 0 sch40,呼び径 90 の結果一覧



sch40-90 における荷重平均値と信頼性指標の関係

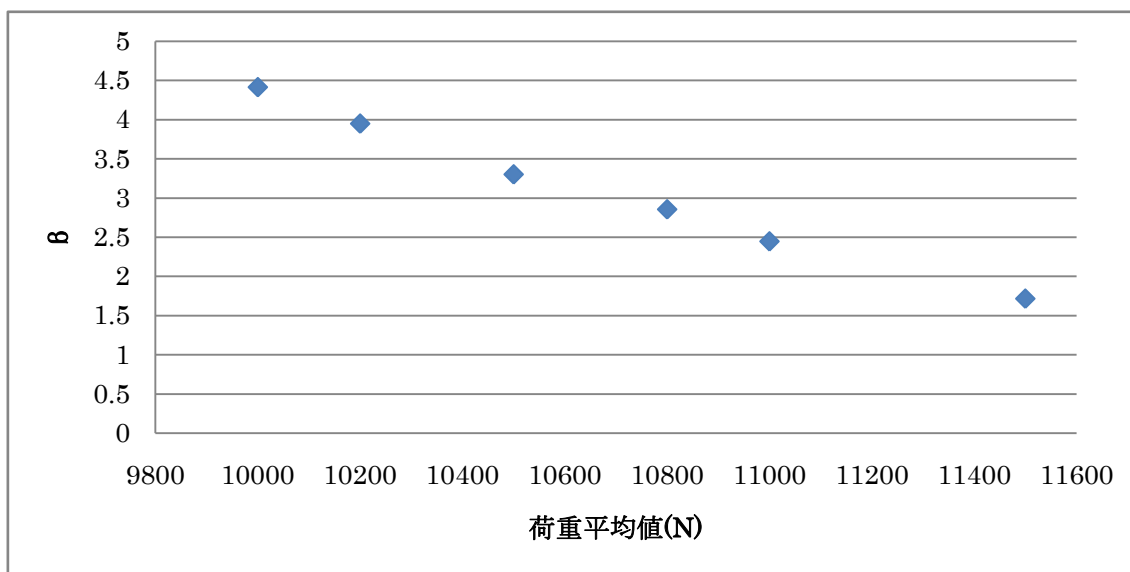


sch40-90 における荷重平均値と破壊確率の関係

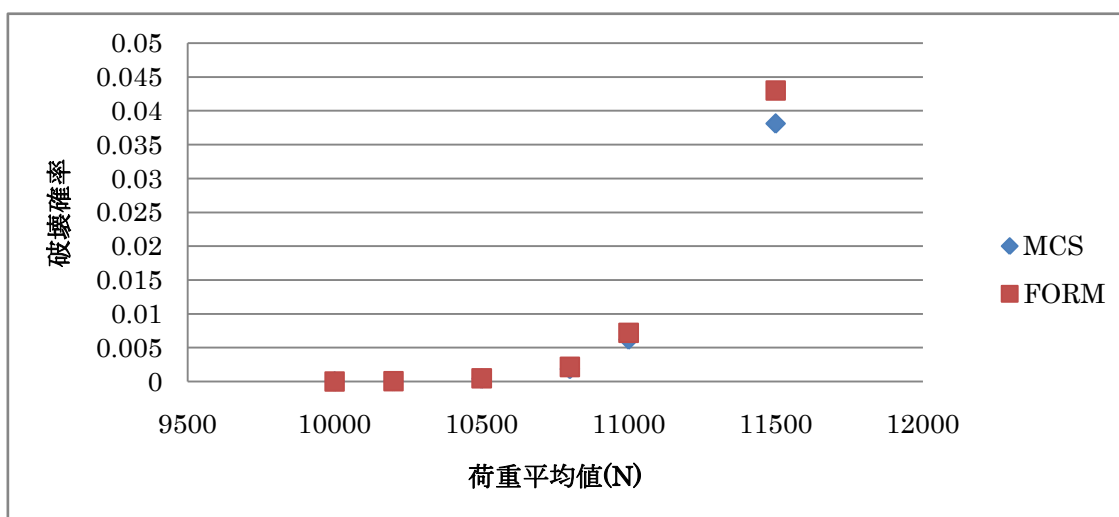
sch40-90 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
5000	7324.291	0.100802	0.005641	201685725.4
5200	7191.478	0.101016	0.005654	221448811.2
5400	7120.945	0.101148	0.005673	235090131.2
5600	7012.213	0.101427	0.00568	249189937.3
5800	6970.289	0.1016	0.0057	263155953.7

図 A.2 1 sch40,呼び径 125 の結果一覧



sch40-125 における荷重平均値と信頼性指標の関係

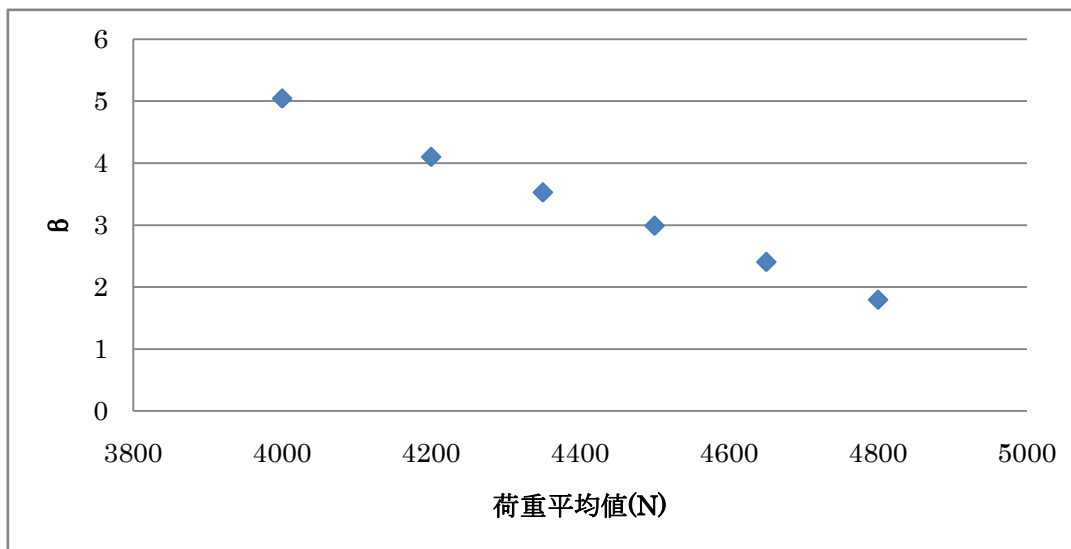


sch40-125 における荷重平均値と破壊確率の関係

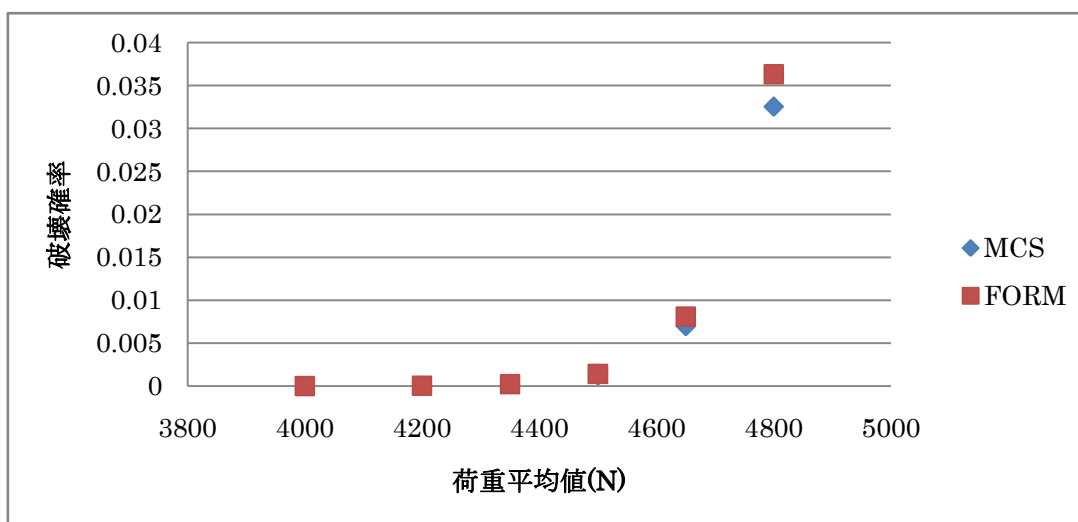
sch40-125 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
10000	14446.48	0.138858	0.006532	203766493.7
10200	14321.58	0.138985	0.006541	213974498.9
10500	14268.91	0.139478	0.006564	228224988.4
10800	14098.7	0.139523	0.006569	235816295.7
11000	13957.54	0.139565	0.006574	245343786.3
11500	13859.95	0.1398	0.0066	262146612.6

図 A.2 2 sch80,呼び径 65 の結果一覧



sch80-65 における荷重平均値と信頼性指標の関係

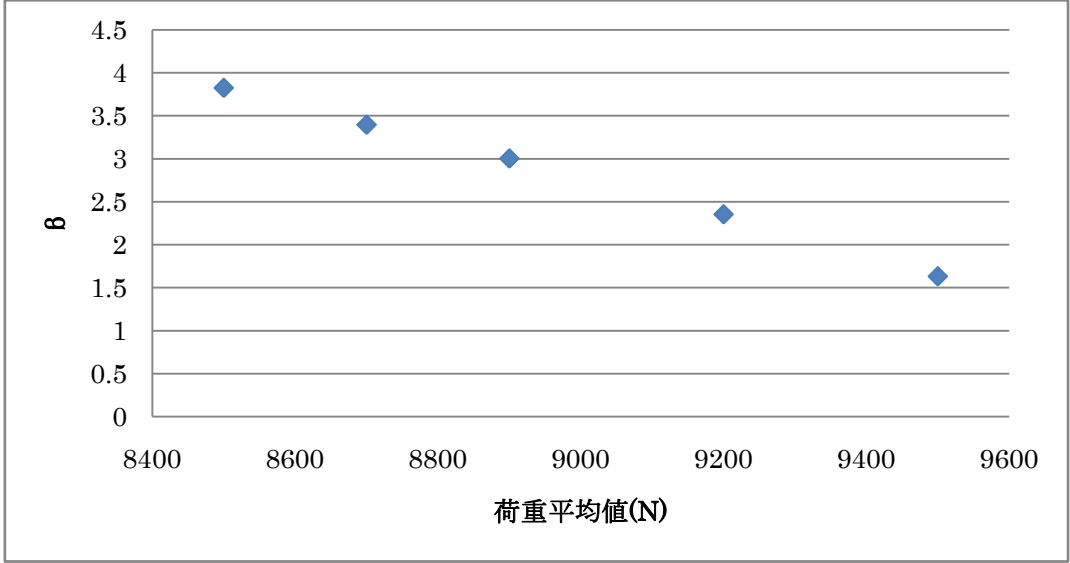


sch80-65 における荷重平均値と破壊確率の関係

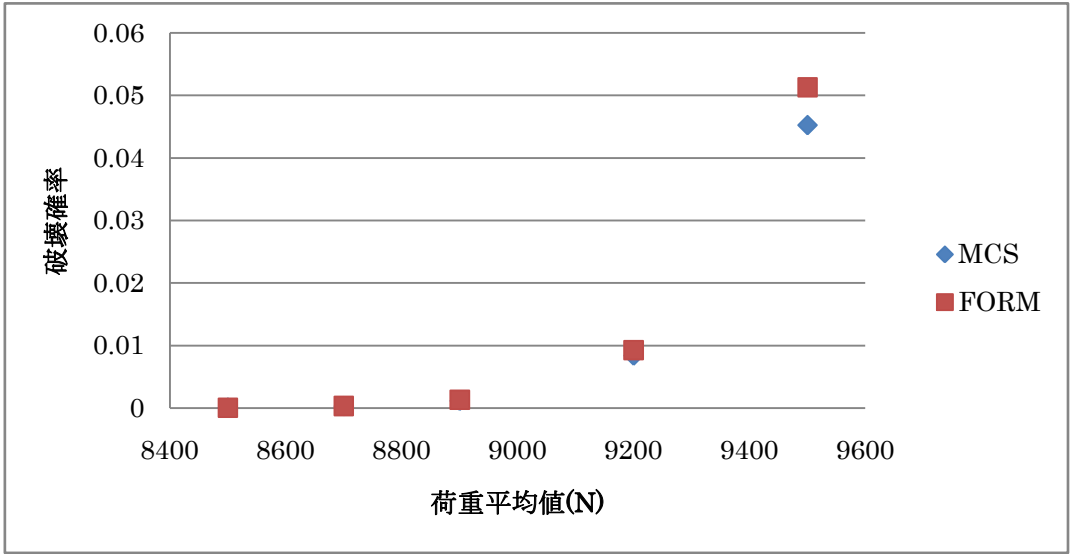
sch80-65 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
4000	6120.766	0.075444	0.006946	195199339.5
4200	6038.288	0.075688	0.00696	213386199.4
4350	6008.766	0.075802	0.006967	225030318
4500	5981.24	0.075881	0.006971	236677991.5
4650	5905.471	0.075949	0.006974	249168464.8
4800	5850.679	0.07613	0.007	262610106.1

図 A.2 3 sch80,呼び径 90 の結果一覧



sch80-90 における荷重平均値と信頼性指標の関係

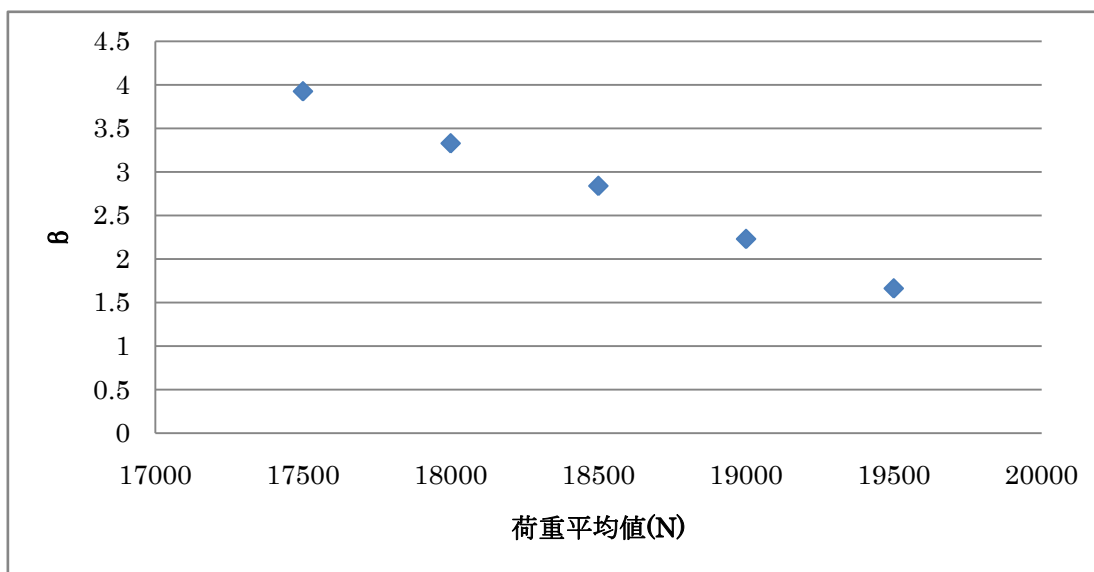


sch80-90 における荷重平均値と破壊確率の関係

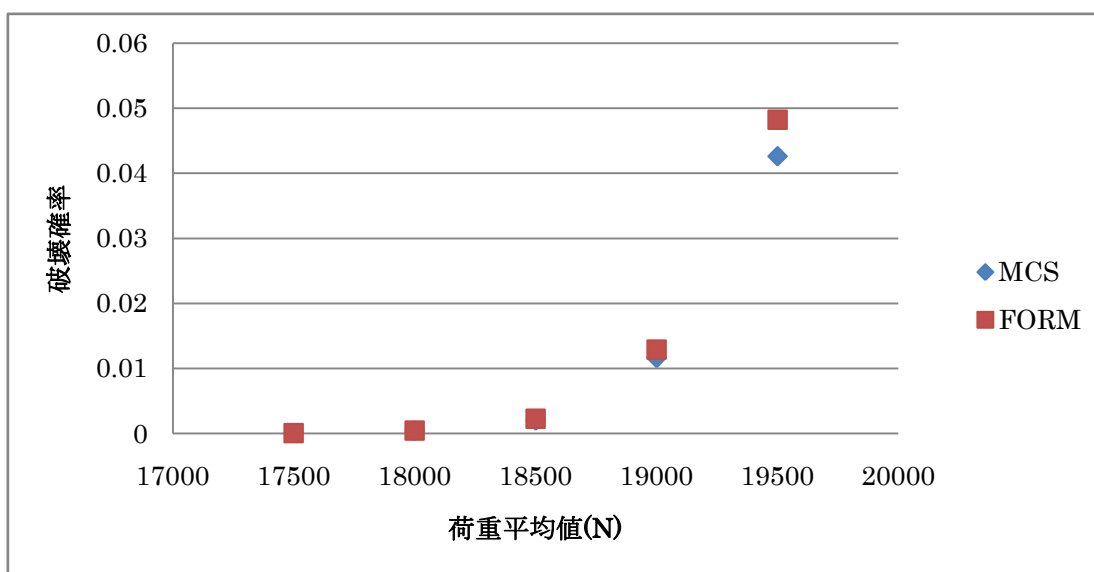
sch80-90 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
8500	11918.88	0.100969	0.008056	216404116
8700	11857.26	0.10105	0.00806	226107183
8900	11783.4	0.101111	0.008064	234501116.2
9200	11618.44	0.10139	0.008085	247209732.9
9500	11374.78	0.1016	0.0081	264216153.5

図 A.2 4 sch80,呼び径 125 の結果一覧



sch80-125 における荷重平均値と信頼性指標の関係



sch80-125 における荷重平均値と破壊確率の関係

sch80-125 破壊点一覧

荷重平均値(N)	荷重(N)	外径(m)	肉厚(m)	流動応力(Pa)
17500	24691.02	0.138948	0.009443	214239902.3
18000	24370.67	0.139097	0.009452	227140891
18500	24112.25	0.139502	0.009457	236093017.1
19000	23712.21	0.139552	0.009484	249336927.1
19500	23411.07	0.1398	0.0095	263606369.7

参考文献

- [1]星谷勝，石井清 共著：“構造物の信頼性設計法”，鹿島出版会，(1986)，50-95
- [2]酒井信介：“機械構造物の設計維持における安全裕度”，検査技術，第 13 巻第 12 号，2008
- [3]中村いずみ，大谷章仁，白鳥正樹：“機器・配管系の経年劣化に伴う耐震安全裕度評価手法の研究”，防災科学技術研究所研究資料，第 220 号，2001
- [4]構造健全性評価ハンドブック編集委員会編：“構造健全性評価ハンドブック”，共立出版，(2005)，30

謝辞

指導教員である酒井教授には信頼性工学の基礎から研究の方針まで様々な面でご指導をいただき、研究を進めていく上での助けとなりました。ありがとうございました。また、(株)東芝の平山様には原子力に関係する設計に実際に携わる立場から貴重なお話を伺うことができました。厚くお礼を申し上げます。

研究室の先輩方からも研究を進める上でのアドバイスをいただき、特に修士2年の長谷川さんには研究内容が近いこともあり、色々相談に乗っていただくなど研究を進めていく上での参考とすることができました。また、研究でのかかわりはなくとも、他の研究室メンバーのおかげで一年間楽しく過ごすことができました。

簡単ではありますが、以上を持って私の謝辞とさせていただきます。ありがとうございました。

以上

p.1～p.67 完

平成 2 2 年 2 月 5 日提出

80203 前田 惇貴