

04-大間設C-80改

電源開発株式会社  
大間原子力発電所

弾性設計用地震動Sd設定の考え方

平成19年2月  
原子力発電安全審査課

## 目次

1. はじめに	.....	1
2. 係数 $\alpha$ について	.....	2
3. 大間における係数 $\alpha$ の検討	.....	6
4. 弾性設計用地震動Sdの役割と超過確率の参照	.....	7
5. まとめ	.....	7
6. 参考文献	.....	7

## 1. はじめに

弾性設計用地震動 $S_d$ の設定については、平成18年9月19日に改訂された「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（以下「新指針」という。）の本文および解説に以下のように記載されており、申請者は、大間地点の弾性設計用地震動 $S_d$ について、これらの規定に則り設定するとしている。

（本文）

弾性設計用地震動 $S_d$ は、基準地震動 $S_s$ に基づき、工学的判断により設定する。また、弾性設計用地震動 $S_d$ による地震力は、水平方向及び鉛直方向について適切に組み合わせたものとして算定されなければならない。

（解説）

弾性設計用地震動 $S_d$ は、施設、もしくはその構成単位ごとに安全機能限界と弾性限界に対する入力荷重の比率を考慮して、工学的判断から求められる係数を基準地震動 $S_s$ に乗じて設定することとする。ここで、当該係数の設定に当たっては、基準地震動 $S_s$ の策定の際に参照した超過確率を参考とすることができる。

この弾性設計用地震動 $S_d$ の具体的な設定値及び設定根拠について、個別申請ごとに、十分に明らかにすることが必要である。

なお、弾性設計用地震動 $S_d$ と基準地震動 $S_s$ の応答スペクトルの比率（ $S_d/S_s$ ）の値は、弾性設計用地震動 $S_d$ に求められる性格上、ある程度以上の大きさであるべきであり、めやすとして、0.5 を下回らないような値で求められることが望ましい。

また、弾性設計用地震動 $S_d$ は、施設を構成する要素ごとに、それらの耐震設計上考慮すべき特性の差異を踏まえて個別に設定することができる。

## 2. 係数 $\alpha$ について

前述に示した新指針の解説にあるように、弾性設計用地震動 $S_d$ （以下「 $S_d$ 」という。）は、施設、もしくはその構成単位ごとに安全機能限界と弾性限界に対する入力荷重の比率を考慮して、工学的判断から求められる係数（以下「 $\alpha$ 」という。）を基準地震動 $S_s$ （以下「 $S_s$ 」という。）に乗じて設定することとされている。このことから、申請者は、 $\alpha$  は、安全機能限界に対応する入力荷重と弾性限界に対応する入力荷重の比率で定義するとしている。

以下に建物・構築物及び機器・配管系における $\alpha$ について示す。

### (1) 建物・構築物

$S_d$ の設定の必要性について、新指針の解説では、「基準地震動 $S_s$ による地震力に対する施設の安全機能の保持をより高い精度で確認する」ためとされており、 $\alpha$ を設定して建物・構築物の弾性設計を行うことが求められている。

申請者は、主要な建物が鉄筋コンクリート耐震壁を主要な構造とすることから、安全機能限界に対応する入力荷重と弾性限界に対応する入力荷重の比率としての $\alpha$ を、日本電気協会<sup>(1)</sup>の検討結果を参照して評価するとしている。日本電気協会<sup>(1)</sup>には、鉄筋コンクリート造壁式構造の建屋を2質点系の簡易なSRモデルに置換し、入力地震動を

100gal ずつ順次増加して非線形地震応答解析を行って求められたせん断ひずみと層せん断力係数の関係を示した図があり、この図に許容限界①および許容限界②を加筆したものを図-1 に示す。ここで、許容限界②は建屋はある程度の損傷を受けるがその程度は小さく、終局に対して余裕のある状態(せん断ひずみで  $2.0 \times 10^{-3}$ rad)を示しており、許容限界①は許容限界②の入力加速度を 1/2 倍とした場合の応答値を示している。

申請者は、許容限界①の応答値は短期許容応力度相当と考えられ、新指針でいうSdに求められる「概ね弾性範囲の設計」と考えられるとしている。

以上より、許容限界①を弾性限界、許容限界②を安全機能限界と捉えた場合、安全機能限界に対応する入力荷重と弾性限界に対応する入力荷重の比率としての  $\alpha$  は 0.5 程度の値となるとしている。

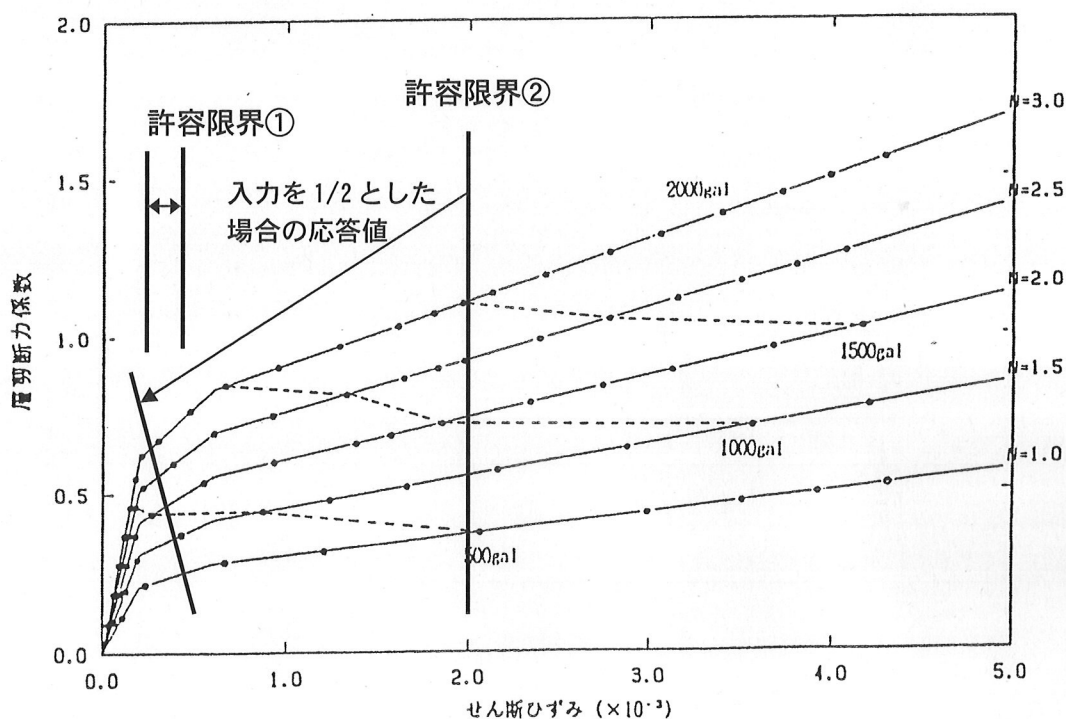


図-1 最大入力加速度とスケルトン上の最大応答値

## (2) 機器・配管系

新指針において、 $S_s$ との組合せと許容限界及び $S_d$  等との組合せと許容限界を以下のとおりとしている。

### i) 基準地震動 $S_s$ との組合せと許容限界

通常運転時、運転時の異常な過渡変化時、及び事故時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動  $S_s$  による地震力とを組み合わせ、その結果発生する応力に対して、構造物の相当部分が降伏し、塑性変形する場合でも、過大な変形、亀裂、破損等が生じ、その施設の機能に影響を及ぼすことがないこと。

### ii) 弾性設計用地震動 $S_d$ 等との組合せと許容限界

通常運転時、運転時の異常な過渡変化時、及び事故時に生じるそれぞれの荷重と、弾性設計用地震動 $S_d$ による地震力又は静的地震力とを組み合わせ、その結果発生する応力に対して、降伏応力又はこれと同等な安全性を有する応力を許容限界とする。

JEAG-4601 では、地震により発生する応力と内圧、自重、熱等により発生する応力を組み合わせることにより、旧指針下の基準地震動 $S_1$ の場合は、弾性域(降伏点以下)になるよう許容応力が設定される。また、基準地震動 $S_2$ に対しては、材料によって許容応力が弾性域に設定されるもの、または塑性域に設定されるものがあるとされている(別紙1)。

申請者は、指針の改訂によって施設の許容限界の考え方に変更がないことから、 $S_s$  及び $S_d$  に対して、先述の JEAG-4601 の許容応力体系を適用するとしている。その際に、 $S_s$  に対する許容応力の設定値が

弾性域を超えるようなことがあっても、その許容応力に対して十分余裕のある設計とするとしている(別紙2)。

また、申請者は、機器・配管系の耐震設計では、たとえ $S_s$ による地震力に対する応答が塑性領域に入るような場合においても、応力評価においては非線形解析によらず、線形解析によることで保守的な評価を行うとしている。また、 $S_s$  に対する設計は、線形解析を行うことで信頼性と再現性が非常に高く、解析評価のトレーサビリティも優れているとされている。

以上のように、 $S_s$ に対して設計を行うことで耐力上十分な裕度を確保すること、応力評価においても保守的な解析手法を用いていることから、 $S_s$ に対する施設の安全機能保持が高い精度で確認されとしている。

軽水炉代表プラントの設計実績によると、 $S_1$  に対する応答は安全機能限界に対し少なくとも 4.5 倍の顕在的な裕度を有しており<sup>(2)</sup>、また、原子力発電技術機構の実施した耐震信頼性実証試験<sup>(3)</sup>によっても、現状の耐震設計が十分な裕度を有していることが確認されている。

上記の試験は、旧指針下における地震動に対するものであるが、仮に $S_d$ が $S_1$  の2倍の大きさに設定されたとしても、 $S_d$ に対する応答は安全機能維持限界に対し少なくとも2倍以上( $S_1$  による 4.5 倍の  $1/2$ ) の裕度を有することになる。従って、申請者は、既往の試験・研究から  $\alpha$  は、0.5 で十分であるとしている。

申請者は、前述(1), (2)のとおり、 $\alpha$  は建物・構築物、機器・配管系共に 0.5 とすることができるとしている。

### 3. 大間における係数 $\alpha$ の検討

申請者は、前述より、 $\alpha$  は 0.5 以上であれば、新指針で要求されている役割を果たすことができると考えられるものの、事業者として財産保護上の観点から、工学的判断により 2/3 程度の地震動レベルで弾性設計を行うこととし、建物・構築物、機器・配管系ともに  $\alpha$  として 0.67 を採用することにより、 $S_d$  に対する設計計算に一貫性をとっている。なお、このようにして設定された  $S_d$  は、旧指針下の基準地震動  $S_1$  を上回ることであり、としている(別紙3)。

なお、申請者は、 $S_d$  は  $S_s$  と同数個設定するとしており、敷地ごとに震源を特定して策定する地震動  $S_{s-1}$  と、震源を特定せず策定する地震動  $S_{s-2}$  のそれぞれに対して、水平方向及び鉛直方向の  $S_d$  を設定している。

図-2 及び図-3 に  $\alpha = 0.67$  とした場合の  $S_d$  の応答スペクトルを示す。

### 4. 弾性設計用地震動 $S_d$ の役割と超過確率の参照

新指針の解説Ⅲ(2)において、「当該係数の設定に当たっては、 $S_s$  の策定の際に参照した超過確率を参考とすることができる」とされている。

一方、改良型沸騰水型原子炉 (ABWR) の想定すべき事故事象は冷却材喪失事故であり、申請者は、その発生確率が極めて小さいことから、

供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性のあるSsとの組合せを考慮する必要はないが、Sdとの組合せについては考慮している。このように、Sd は、地震力とその他の荷重との組合せ、特に、事故時の荷重との組合せにおいて、設計上重要な役割を担うことになるとしている。

このことから、申請者は、大間地点の敷地における一様ハザードスペクトルとSdのスペクトルとの比較を行っている。

図-4 より、 $\alpha = 0.67$  とした場合のSdの超過確率は、 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ /年程度となり、日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力度編 JEAG4601・補-1984」の「運転状態と地震動の組合せの確率論的評価」における基準地震動 $S_1$ の発生確率 $10^{-2} \sim 5 \times 10^{-4}$ と比べて同等以下であるとしており、旧指針下における地震力と事故事象による荷重との組合せの考え方を踏襲できるとしている。

## 5. まとめ

以上の検討結果から、申請者が $\alpha$ を一律 0.67 としており、0.5 以上であることから、 $\alpha$ は妥当であると考えられる。

## 6. 参考文献

- (1)(社)日本電気協会 電気技術調査委員会原子力発電耐震設計特別調査委員会建築部会「静的地震力の見直し(建築編)に関する調査報告書(概要)」平成6年3月 P.21～P.25 簡易モデルによる壁

式構造に対する検討

- (2)(社)日本電気協会 電気技術調査委員会原子力発電耐震設計特別調査委員会「原子力プラントシステムの総合的耐震安全性評価法に関する調査報告書」平成6年3月
- (3)原子力発電技術機構「原子力発電施設耐震信頼性実証試験」平成15年3月

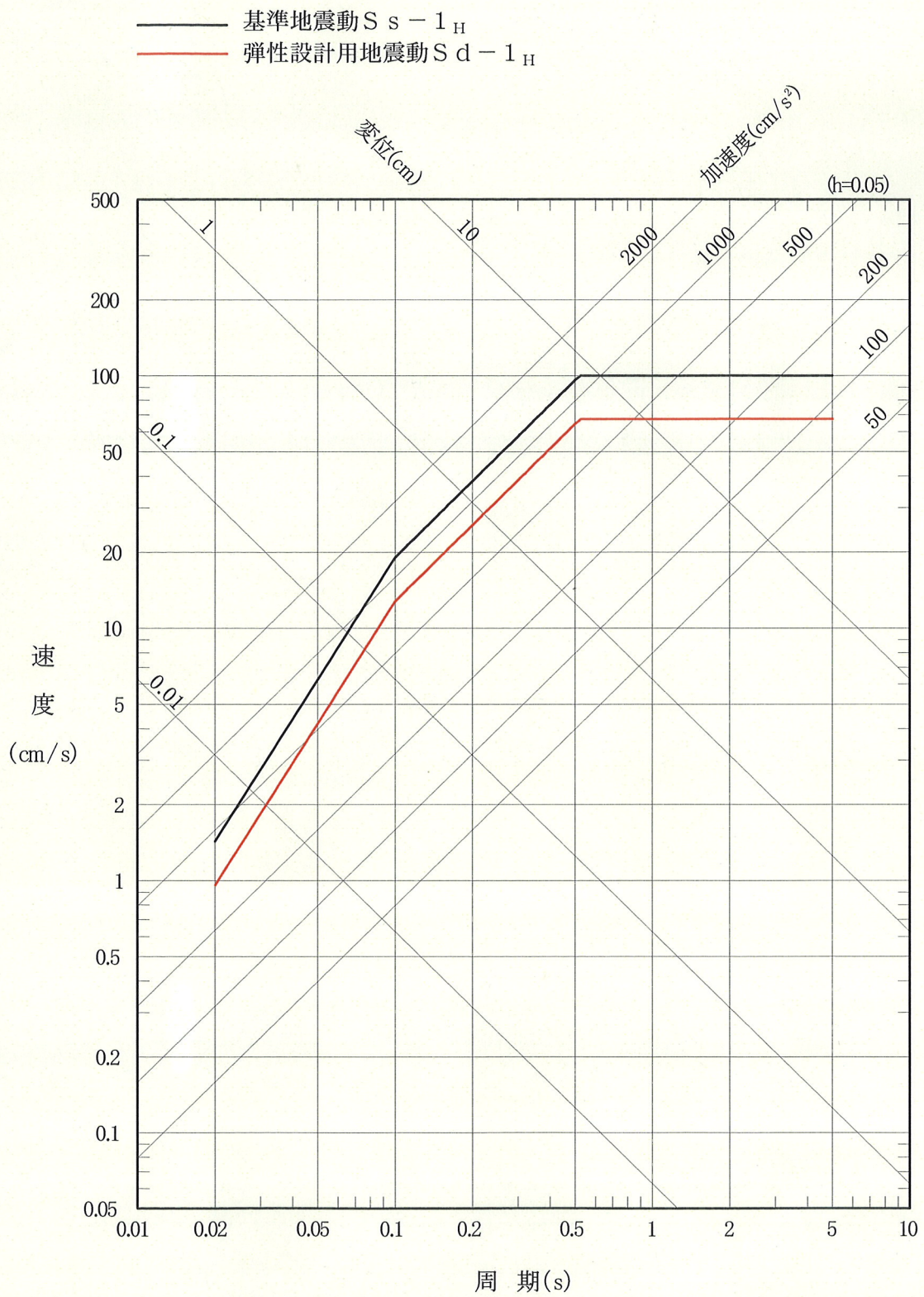


図-2(1) 基準地震動  $S_s - 1$  と弾性設計用地震動  $S_d - 1$  の応答スペクトルの比較  
 (水平動)

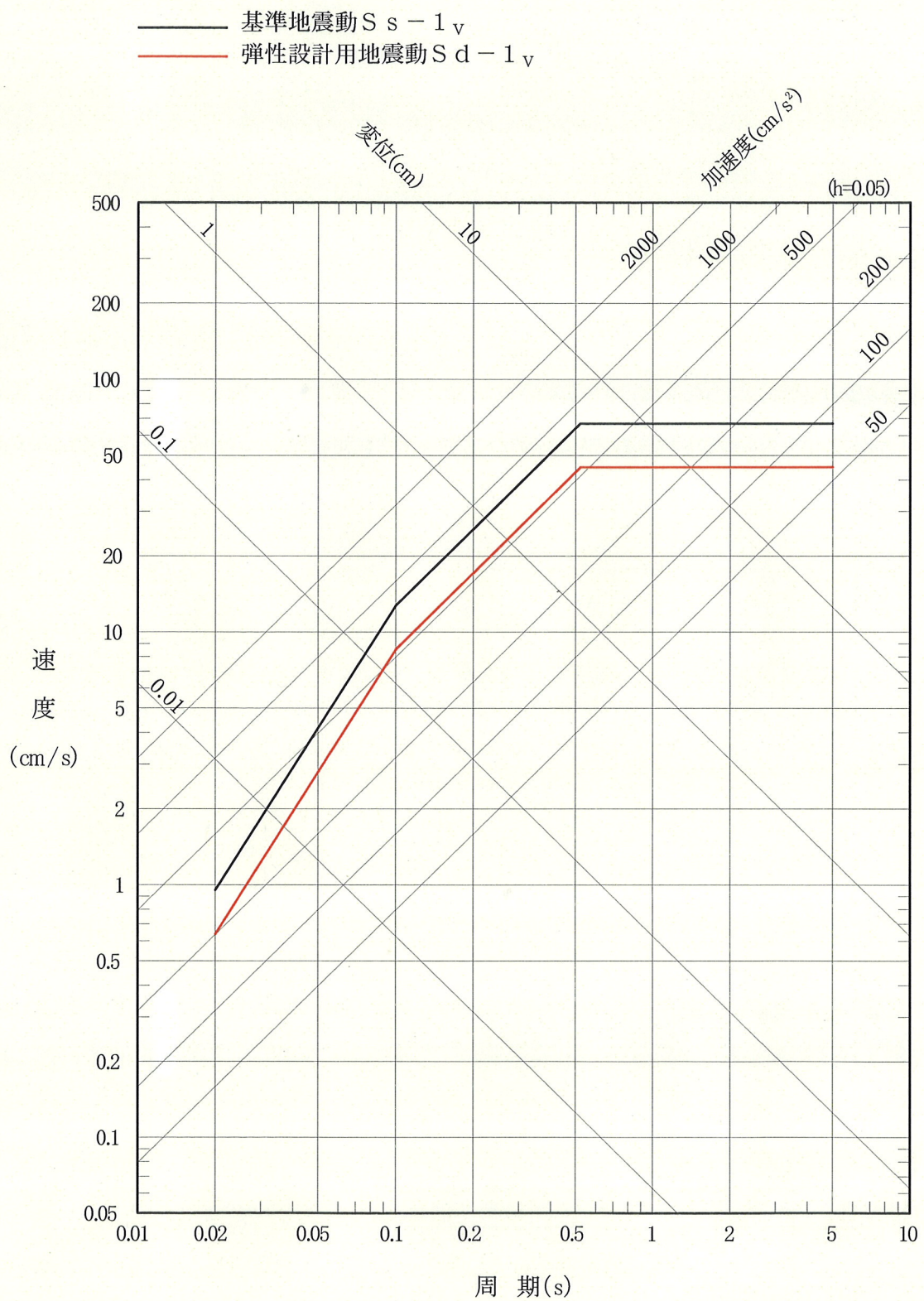


図-2(2) 基準地震動  $S_s - 1$  と弾性設計用地震動  $S_d - 1$  の応答スペクトルの比較  
 (鉛直動)

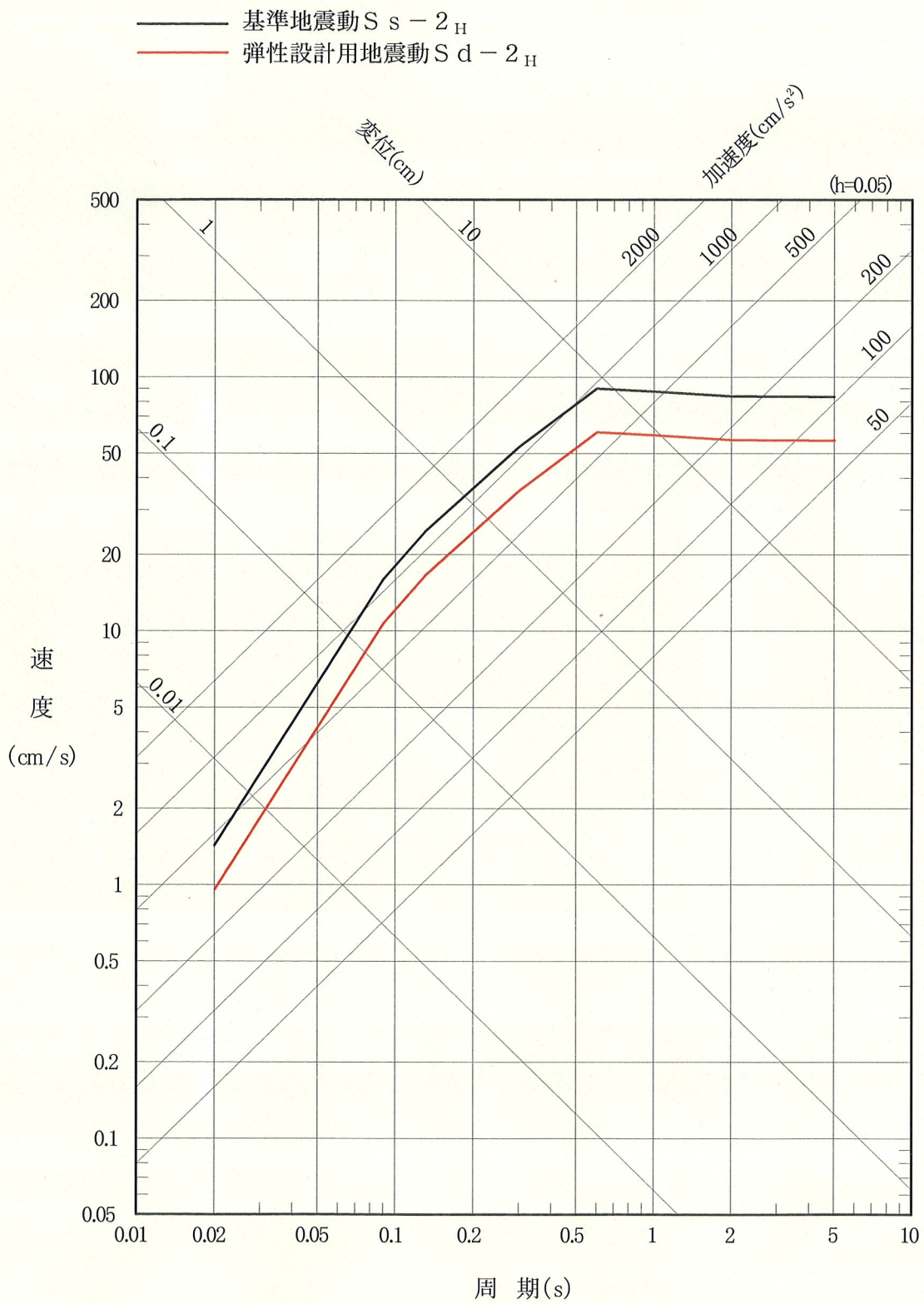


図-3(1) 基準地震動  $S_s - 2$  と弾性設計用地震動  $S_d - 2$  の応答スペクトルの比較(水平動)

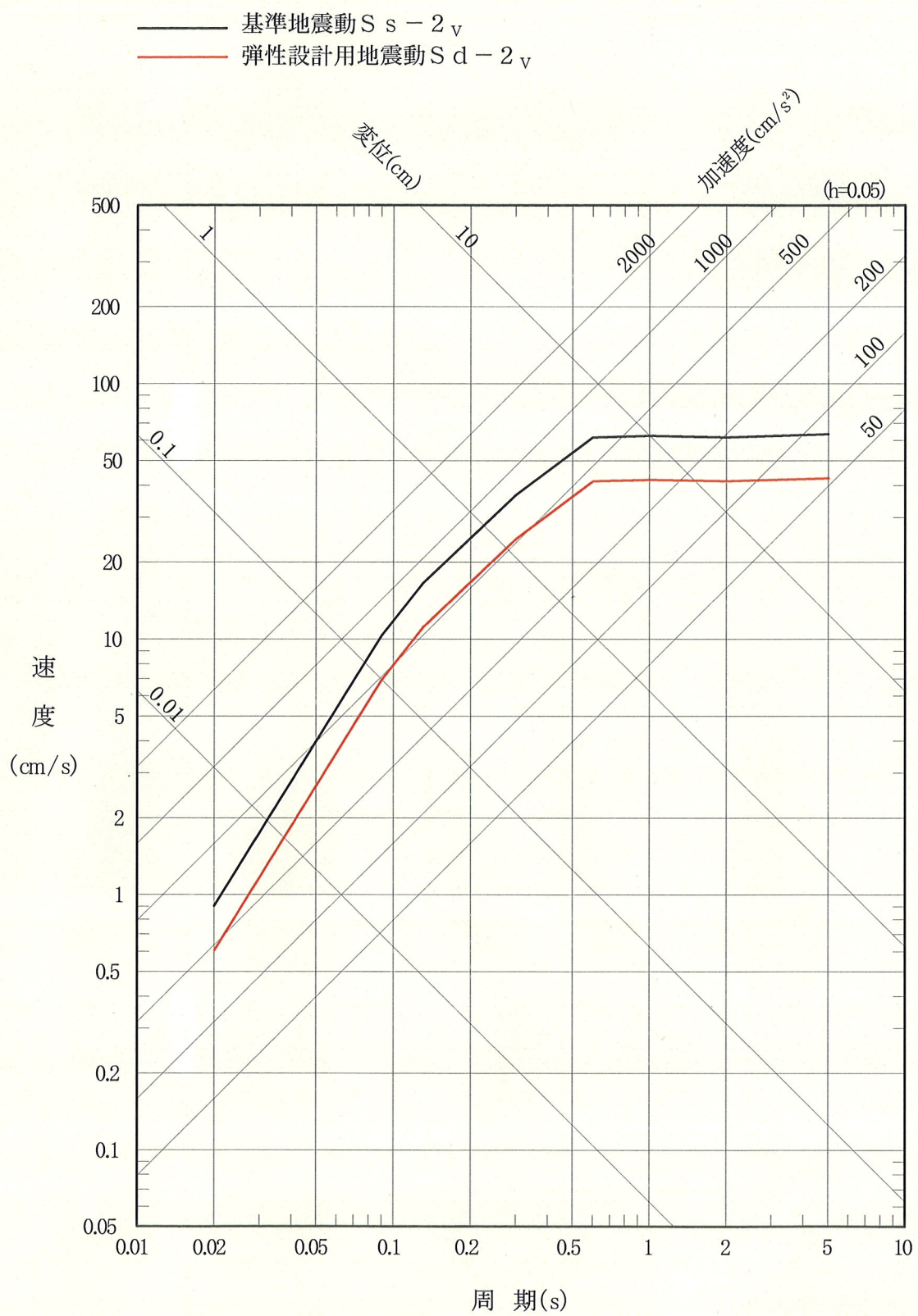


図-3(2) 基準地震動  $S_s - 2$  と弾性設計用地震動  $S_d - 2$  の応答スペクトルの比較(鉛直動)

- 弾性設計用地震動  $S_d - 1_H$
- 弾性設計用地震動  $S_d - 2_H$
- - - 年超過確率  $10^{-5}$
- - - 年超過確率  $10^{-4}$
- 年超過確率  $10^{-3}$

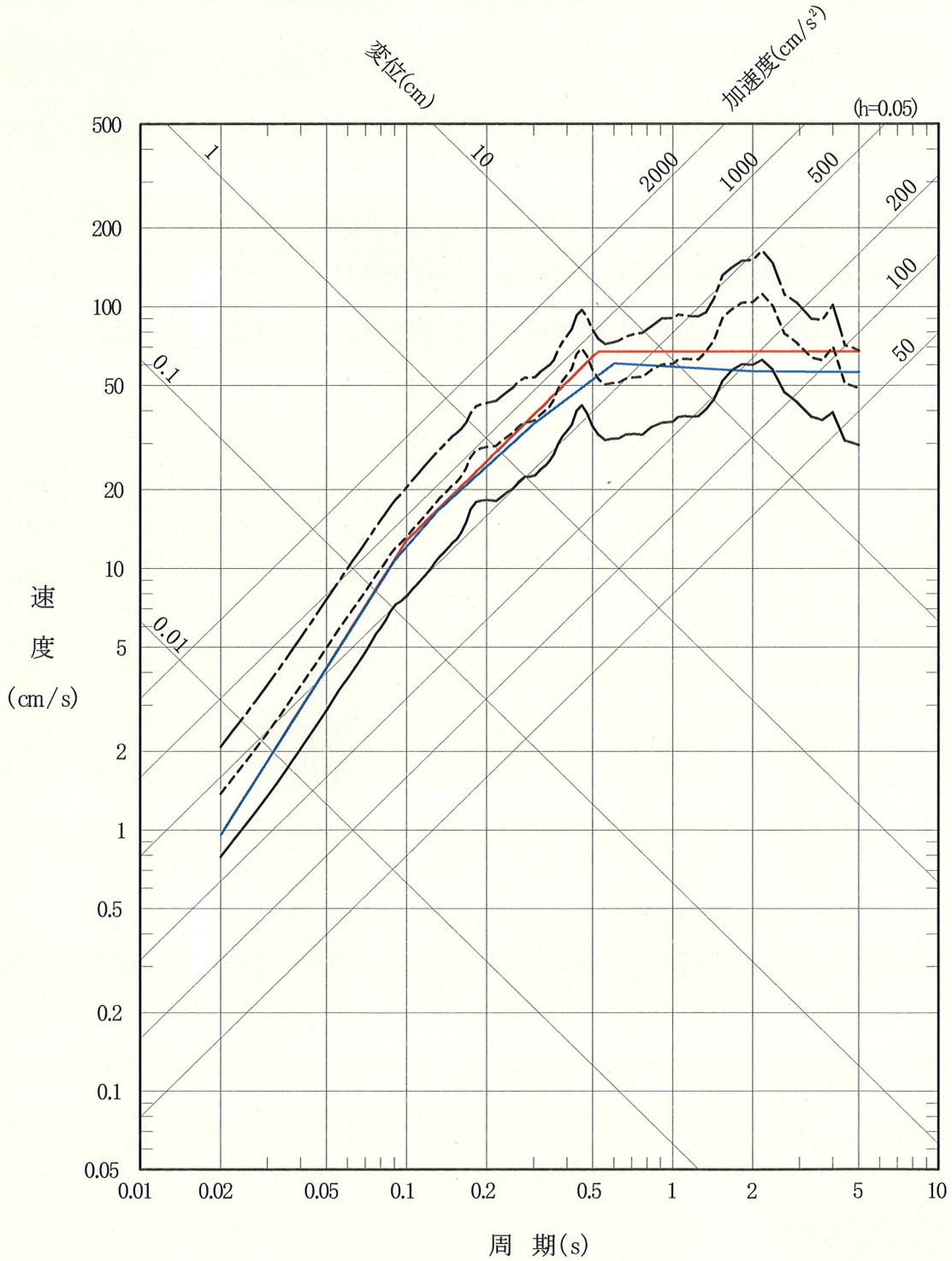


図-4(1) 弾性設計用地震動 $S_d$  の応答スペクトルと敷地における地震動の  
一様ハザードスペクトルの比較(水平動)

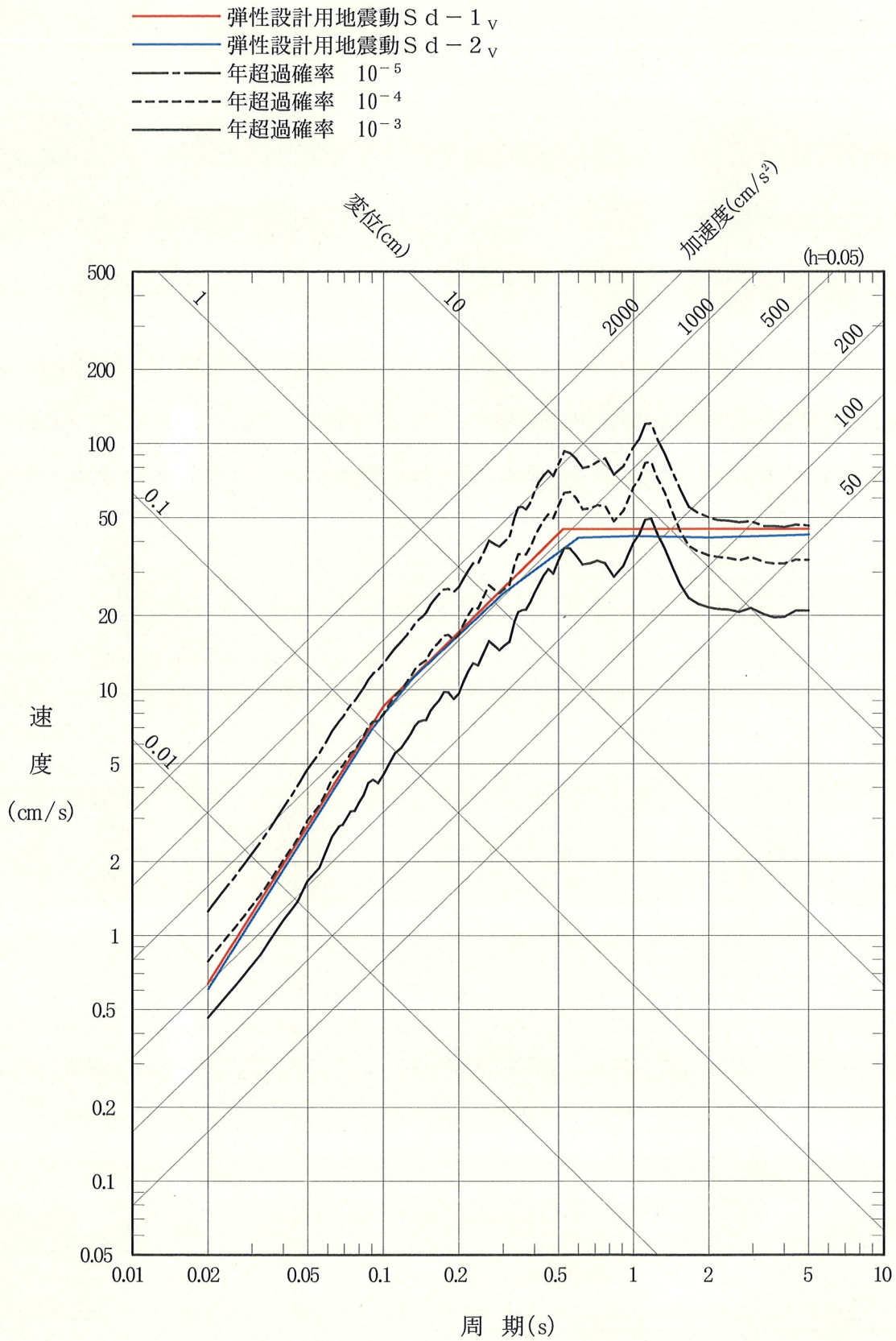


図-4(2) 弹性設計用地震動  $S_d$  の応答スペクトルと敷地における地震動の  
 一様ハザードスペクトルの比較(鉛直動)



JEAG4601 における許容応力状態について

JEAG4601 では、 $S_1$  及び  $S_2$  発生時に対して、ⅢAS、ⅣAS という許容応力状態を定めている。ⅢAS、ⅣAS とは、地震により発生する応力と内圧、自重、熱等により発生する応力を組み合わせた状態に対する許容応力状態である。

例として、第 1 種容器と第 1 種管の許容応力を表 1 及び表 2 に示す。

表 1 第 1 種容器

応力分類 許容 応力分類	1 次一般膜応力	1 次膜応力+ 1 次曲げ応力	1 次+2 次応力	1 次+2 次+ ピーク応力	特別な応力限界	
					純せん断 応力	支圧応力
設計条件	Sm	1.5 Sm	—	—	—	—
Ⅲ <sub>A</sub> S	Sy と 2/3 Su の 小さい方。ただし オーステナイト系 ステンレス鋼及び 高ニッケル合金 については 1.2Sm とする。	左欄の 1.5 倍の値	$3 Sm$ $\left[ \begin{array}{l} S_1 \text{ 又は } S_2 \\ \text{地震動のみ} \\ \text{による応力} \\ \text{振幅につい} \\ \text{て評価する。} \end{array} \right]$	$S_1$ 又は $S_2$ 地 震動のみによる 疲れ解析を行 い疲れ累積係 数を求め、運転 状態 I、II に おける疲れ累 積係数との和 が 1.0 以下であ ること。	0.6Sm	Sy (1.5Sy)
Ⅳ <sub>A</sub> S	2/3 Su。ただし オーステナイト系 ステンレス鋼及び 高ニッケル合金 については 2/3Su と 2.4Sm の 小さい方。	左欄の 1.5 倍の値			0.4Su	Su (1.5Su)

Sy : 設計降伏点

Su : 設計引張強さ

Sm : 設計応力強さ

$$S_m(T) = \text{Min} \left\{ \frac{2}{3} S_{yRT}^*, \frac{2}{3} S_y^*(T), \frac{1}{3} S_{uRT}^*, \frac{1}{3} S_u^*(T) \right\}$$

ここに

$S_{yRT}^*$  : 常温における規格降伏応力

$S_y^*(T)$  : 温度 T における設計降伏応力

$S_{uRT}^*$  : 常温における規格引張強さ

$S_u^*(T)$  : 温度 T における最小引張強さ

表2 第1種管

許容 応力分類	応力分類	1次一般膜応力	1次応力 (曲げ応力を含む)	1次+2次応力	1次+2次+ ピーク応力
設計条件		$S_m$	$1.5 S_m$	—	—
$III_A S$		$1.5 S_m$	$2.25 S_m$ ただし、ねじりによる 応力が $0.55 S_m$ を超 える場合は、曲げと ねじりによる応力に ついて $1.8 S_m$ とす る。	$3 S_m$  〔 $S_1$ 又は $S_2$ 地震 動のみによる応 力振幅について 評価する。〕	$S_1$ 又は $S_2$ 地震動 のみによる疲れ解析 を行い疲れ累積係 数を求め、運転状態 I, IIにおける疲 れ累積係数との和 が $1.0$ 以下であるこ と。
$IV_A S$		$2 S_m$	$3 S_m$ ただし、ねじりによる 応力が $0.73 S_m$ を超 える場合は、曲げと ねじりによる応力に ついて $2.4 S_m$ とす る。		

$S_m$  : 設計応力強さ

$$S_m(T) = \text{Min} \left\{ \frac{2}{3} S_{yRT}^*, \frac{2}{3} S_y^*(T), \frac{1}{3} S_{uRT}^*, \frac{1}{3} S_u^*(T) \right\}$$

ここに

$S_{yRT}^*$  : 常温における規格降伏応力

$S_y^*(T)$  : 温度  $T$  における設計降伏応力

$S_{uRT}^*$  : 常温における規格引張強さ

$S_u^*(T)$  : 温度  $T$  における最小引張強さ

## 詳細設計について

S<sub>s</sub>に対する設計は、IVASで定める許容応力に対して十分余裕のある設計とするため、S<sub>s</sub>による部材に発生する応答値は、S<sub>s</sub>と組み合わせる他の荷重による応答値も含めて、概ね弾性範囲内に入るように設計されることになり、S<sub>s</sub>に対する安全機能保持は十分に確保されることになる。

また、ⅢAS、IVASにおける具体的な許容応力は、設備種別、材料、設計温度から設定されるため、耐震設計上考慮すべき設備毎の特性の差異を踏まえた設計がなされることになる。

なお、機器・配管系の設計においては、地震力と地震以外の荷重によって発生する応力と組み合わせて耐震性評価を行うことから、地震力の大小が設計に影響を及ぼすような場合は少ないとしており、S<sub>s</sub>に対する各機器・配管系の許容応力に対する裕度は、工事認可申請の段階で確認するとしている。

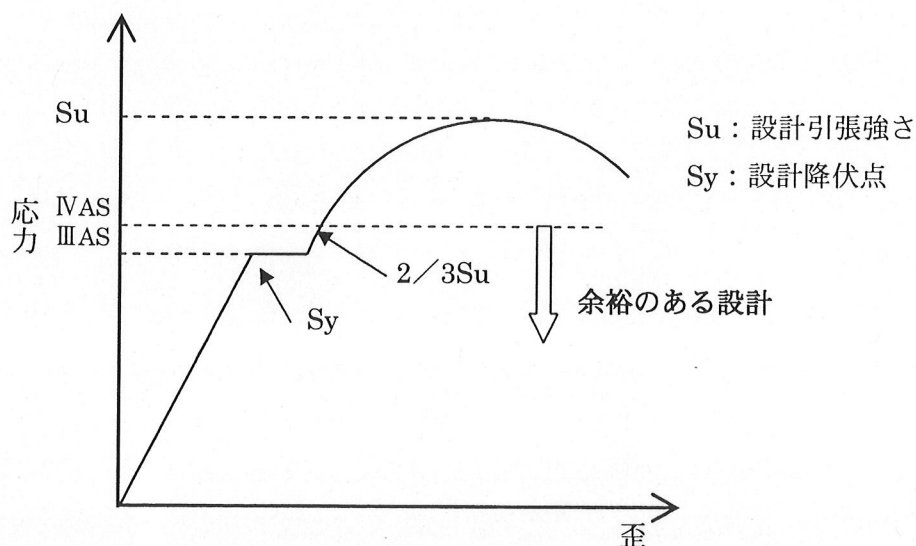
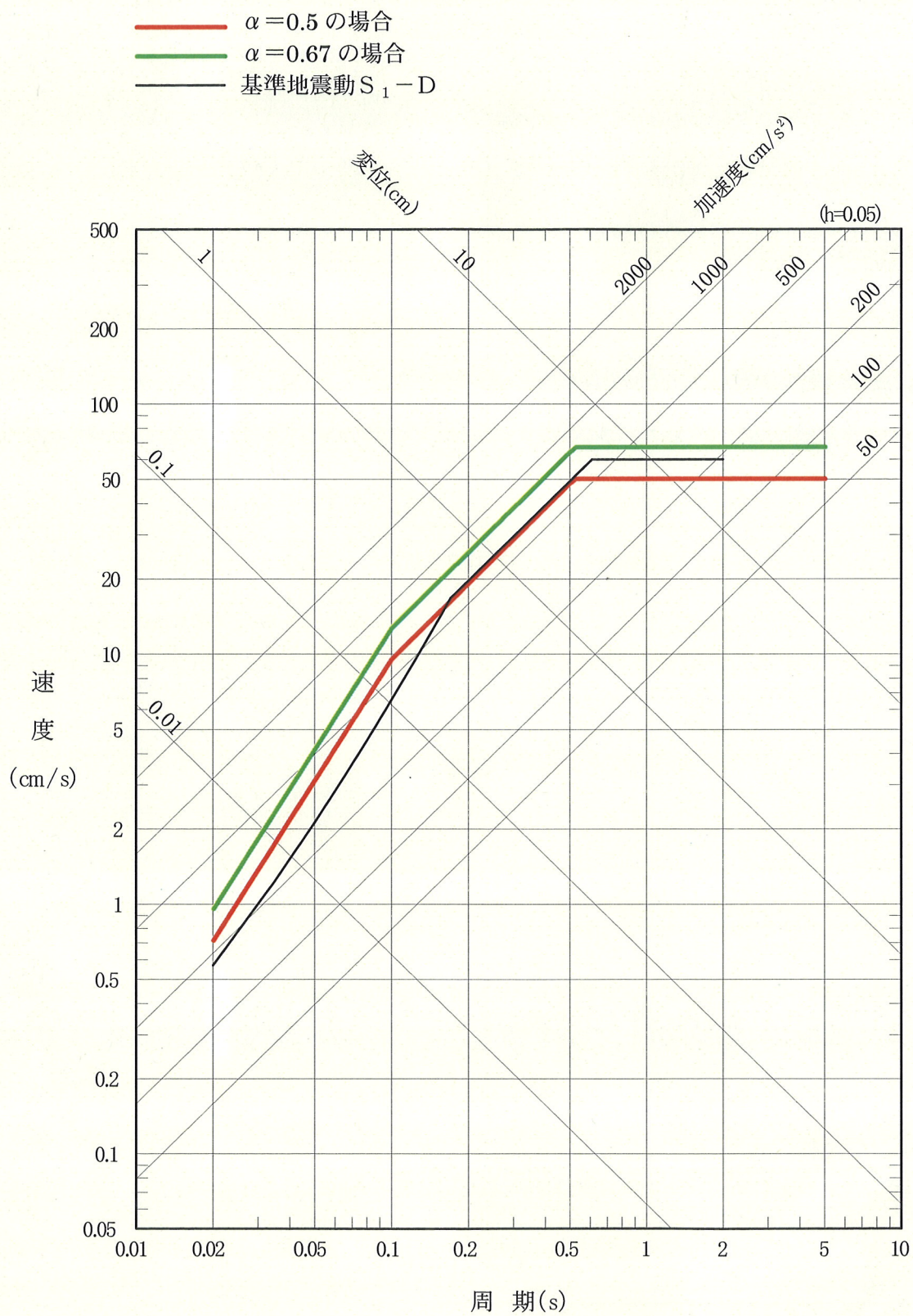


図1. クラス1容器の応力-歪線図(概念図)



弾性設計用地震動  $S_d$  と基準地震動  $S_1$  の応答スペクトルの比較