

本資料のうち、枠囲みの内容は、  
営業秘密又は防護上の観点から  
公開できません。

|                  |            |
|------------------|------------|
| 東海第二発電所 工事計画審査資料 |            |
| 資料番号             | 補足-70-1 改2 |
| 提出年月日            | 平成30年4月16日 |

## 工事計画に係る補足説明資料

### 補足-70-1 【竜巻への配慮に関する説明書】

平成30年4月

日本原子力発電株式会社

## 補足説明資料目次

### I. はじめに

#### 1. 竜巻の影響を考慮する施設について

##### 1.1 防護対象施設の抽出について

##### 1.2 防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設の選定について

##### 1.3 建屋開口部の調査結果について

##### 1.4 飛来物の選定について

##### 1.5 砂利等の極小飛来物による防護対象施設への影響について

##### 1.6 屋外重大事故等対処設備の竜巻防護設計について

##### 1.7 固縛装置の設計における保守性について

#### 2. 工事計画変更認可後の変更手続きについて

##### 2.1 竜巻に関する工事計画変更認可後の変更申請対象項目の抽出について

: 今回ご説明分

## I. はじめに

### 1. 概要

本補足説明資料は、以下の説明書についての内容を捕捉するものである。

本補足説明資料と添付書類との関連を表-1に示す。

- ・ V-1-1-2「発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書」のうち、  
V-1-1-2-3「竜巻への配慮に関する説明書」

表一I 補足説明資料と添付資料との関連

| 工事計画添付書類に係わる補足説明資料（竜巻） |                                 | 該当添付資料                                |
|------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| 1.                     | 竜巻の影響を考慮する施設について                |                                       |
| 1.1                    | 防護対象施設の抽出について                   | V-1-1-2-3-2<br>竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定 |
| 1.2                    | 防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設の選定について | V-1-1-2-3-2<br>竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定 |
| 1.3                    | 建屋開口部の調査結果について                  | V-1-1-2-3-2<br>竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定 |
| 1.4                    | 飛来物の選定について                      | V-1-1-2-3-2<br>竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定 |
| 1.5                    | 砂利等の極小飛来物による防護対象施設への影響について      | V-1-1-2-3-2<br>竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定 |
| 1.6                    | 屋外重大事故等対処設備の竜巻防護設計について          | V-1-1-2-3-3<br>竜巻防護に関する施設的设计方針        |
| 1.7                    | 固縛装置の設計における保守性について              | V-1-1-2-3-3<br>竜巻防護に関する施設的设计方針        |
| 2.                     | 工事計画変更認可後の変更手続きについて             |                                       |
| 2.1                    | 竜巻に関する工事計画変更認可後の変更申請対象項目の抽出について | V-1-1-2-3-1<br>竜巻への配慮に関する基本方針         |

## 1.7 固縛装置の設計における保守性について

## 1. 概要

本資料は、東海第二発電所の屋外の重大事故等対処設備（以下「SA設備」という。）の悪影響防止対策として、V-1-1-2-3-3「竜巻防護に関する施設の設計方針」に示している固縛装置の設計における保守性について補足する資料である。

固縛装置は、竜巻の襲来時において、屋外のSA設備の固縛状態を維持するために必要な構造強度を有するよう設計しているが、設計においては保守性を見込むことで、固縛装置への信頼性を高めるように配慮しており、その詳細について説明する。

## 2. 固縛装置設計での保守性

固縛装置の設計において見込んでいる保守性は、保守性を見込む設計段階に応じ、次に示す3つに整理することができる。次項において具体的な内容を示す。

- (1) 荷重算出における保守性
- (2) 設計竜巻の風速の評価における保守性
- (3) 許容限界における保守性

## 3. 具体的な保守性について

### 3.1 荷重の算出における保守性

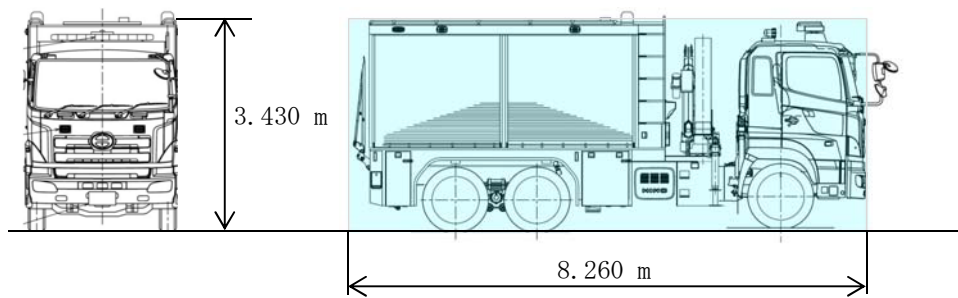
- (1) 固縛対象設備の受圧面積の設定における保守性

固縛対象設備に作用する横滑り荷重は、次の①式に示すように、設計竜巻の風圧力による荷重の受圧面積を用いて算出する。

$$P_H = W_W = q \cdot G \cdot C \cdot A \quad \dots \textcircled{1}$$

- q : 設計用速度圧  
G : ガスト係数 (=1.0)  
C : 風力係数  
A : 受圧面積

この受圧面積は、実際の固縛対象設備の外形面積より大きくなるように外接する直方体の面積で近似した最大値を用いており、荷重の算出に保守性を見込んでいる。固縛装置の強度計算において最も裕度の小さい評価対象部位を有する「可搬型代替注水中型ポンプ」における受圧面積の保守性を図3-1に示す。



- ・荷重算出に用いている受圧面積（ 部）：28.332 m<sup>2</sup>
- ・風荷重を受ける部分（実外形）の面積：23.189 m<sup>2</sup>

図 3-1 可搬型代替注水中型ポンプの外形図

前述のとおり、荷重算出に用いている受圧面積は風荷重を受けない（風が通り抜ける）部分も含めた面積で算出しており、可搬型代替注水中型ポンプの裕度が最小となる荷重ケースである側面においては、荷重算出用の面積と実際の風荷重を受ける面積との比より、1.22（=28.332 / 23.189）倍の保守性を有している。

他の屋外の S A 設備の受圧面積においても、同様に実外形よりも大きな面積として荷重を算出しており、保守性を有している。

(2) 固縛対象設備に作用する揚力算出における保守性

固縛対象設備に作用する揚力は、次の②式にて示すことができる。

$$F_{L} = \frac{1}{2} \rho \cdot V_{SA}^2 \cdot C_{L} a \quad \dots \textcircled{2}$$

$\rho$ ：空気の密度

$V_{SA}$ ：固縛対象設備に作用する設計竜巻の最大水平風速

$C_{L} a$ ：揚力係数と見付面積の積

このとき、 $C_{L} a$  は、風洞実験により得られる値であり、固縛対象設備の風洞実験を各対象に対して行うことは現実的ではなく、揚力算出式としての実用性に欠けることもあり、物体の外形により算出できる、抗力係数と見付面積の積の平均値  $C_{D} A$  が、 $C_{L} a$  より大きな値を取ることが、既往の風洞実験等の結果により確認されていることから、固縛対象設備に作用する揚力は、②式の  $C_{L} a$  を  $C_{D} A$  に置換した③式で算出される揚力  $F_{L, m}$  を用いる。

$$F_{L, m} = \frac{1}{2} \rho \cdot V_{SA}^2 \cdot C_{D} A \quad \dots \textcircled{3}$$

$C_{D} A$ ：抗力係数と見付面積の積の平均値

固縛対象設備に作用する揚力  $F_{L, m}$  において、前述のとおり、 $C_{D} A > C_{L} a$  であることから、固縛対象設備は、実際の揚力よりも大きな揚力を受け、より飛散しやすい条件にて評

価されており、揚力の算出において保守性を有している。

(3) 動的荷重算出のための摩擦係数に対する保守性

連結材に余長を設けた固縛装置（以下「余長付き固縛装置」という。）においては、連結材が展張することによる急制動に伴って作用する動的荷重に対する設計を行い、動的荷重は摩擦力を考慮して各検討段階での風速等の算出が必要となる。

具体的には、横滑り開始風速、連結材の展張時の固縛対象設備が有する終端速度及び固縛対象設備が停止するまでの静荷重の算出であり、このときに摩擦力を算出するための摩擦係数は以下の値を用いる。

- ・ 静摩擦係数  $\mu_s = 0.44$  (20km/h での走行車両のタイヤと路面の縦すべり摩擦係数)
- ・ 動摩擦係数  $\mu_d = 0.29$  (120km/h での走行車両のタイヤと路面の縦すべり摩擦係数)

摩擦係数は、「道路構造令の解説と運用」に記載される湿潤状態での路面の縦すべり摩擦係数を参考としており、静摩擦係数は、停止している車両を横滑りさせるという事象に対して走行状態での進行方向の摩擦係数を用いること、動摩擦係数は、高速で走行中の摩擦が少ない走行状態での進行方向の摩擦係数を用いることから、いずれの摩擦係数の設定においても、十分な保守性を有している。

(4) 動的荷重算出モデルに摩擦を考慮しないことにおける保守性

動的荷重は、連結材に弾性的な荷重が作用し、固縛対象設備が停止したとして算出する。動的荷重の算出式は、連結材がバネ定数  $k$  を有している弾性体として、連結材が展張する時点を  $t = 0$  として時間  $t$  の関数として、④式にて表される。

$$\begin{aligned} F_i(t) &= k \cdot x_{RP} = k \cdot B \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t\right) \\ &= \sqrt{k \cdot m} \cdot v_{SA, OT} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t\right) \dots \textcircled{4} \end{aligned}$$

ここで、

- $F_i$  : 連結材に発生する動的荷重
- $k$  : 連結材のバネ定数（連結材の等価剛性）
- $x_{RP}$  : 連結材の変位
- $B$  : 振幅
- $m$  : 固縛対象設備の質量
- $v_{SA, OT}$  : 連結材が展張した時に固縛対象設備が有する速度（終端速度）

連結材の展張する際には、図 3-2 に示すように、固縛対象設備と路面との間に摩擦力は生じるが、保守的に摩擦を考慮せずに、動的荷重を算出する設計としている。摩擦力を  $F_f$  として考慮して、④式に反映すると、摩擦による項目が加わり、⑤式にて表される。



$$F_i(t) = k \left( x_{RP} - \frac{F_f}{k} \right) = k \left( x_{RP} - \frac{\mu_d (m \cdot g - F_{L, m})}{k} \right) \dots \textcircled{5}$$

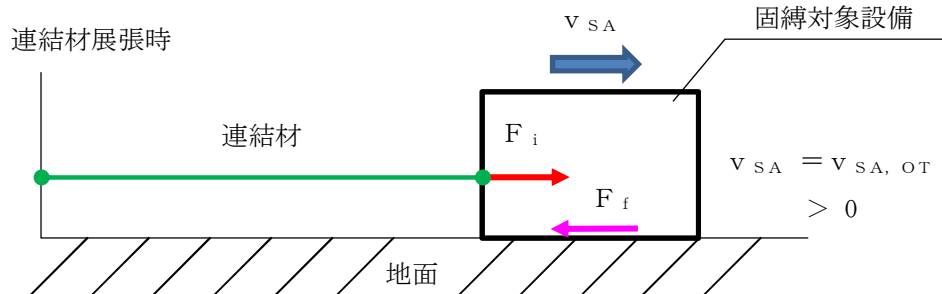


図 3-2 摩擦力を考慮した動的荷重の算出時の荷重状態

動的荷重の算出式は、連結材を弾性体とした荷重と変位の関係であり、④式及び⑤式を比較すると、動的荷重と摩擦力は作用方向が逆向きであることから、連結材の変位が、摩擦力  $F_f$  の作用により変位が小さくなった分、動的荷重も小さくなることがわかる。

連結材の展張時には、自重が揚力よりも大きく、摩擦力は発生するため、摩擦力を考慮していない動的荷重には保守性を有している。

(5) 動的荷重算出のための連結材のバネ定数における保守性

動的荷重については、(4)にて示した④式にて算出する。

なお、連結材のバネ定数は、荷重により変化するが、動的荷重算出時に用いる連結材のバネ定数は、図 3-3 に示すように、固縛装置に使用する連結材の引張試験によって得られた結果に対し、使用範囲（許容限界とした規格引張強度までの範囲）において、試験結果よりも大きなバネ定数（ kN/%）となる値を設定している。また、④式のとおり、動的荷重  $F_i$  は、バネ定数  $k$  と比例関係にあるため、試験により得られる実際のバネ定数より大きいバネ定数（硬い材料）を用いることにより、動的荷重も保守的な値となるため、バネ定数の設定において保守性を有している。

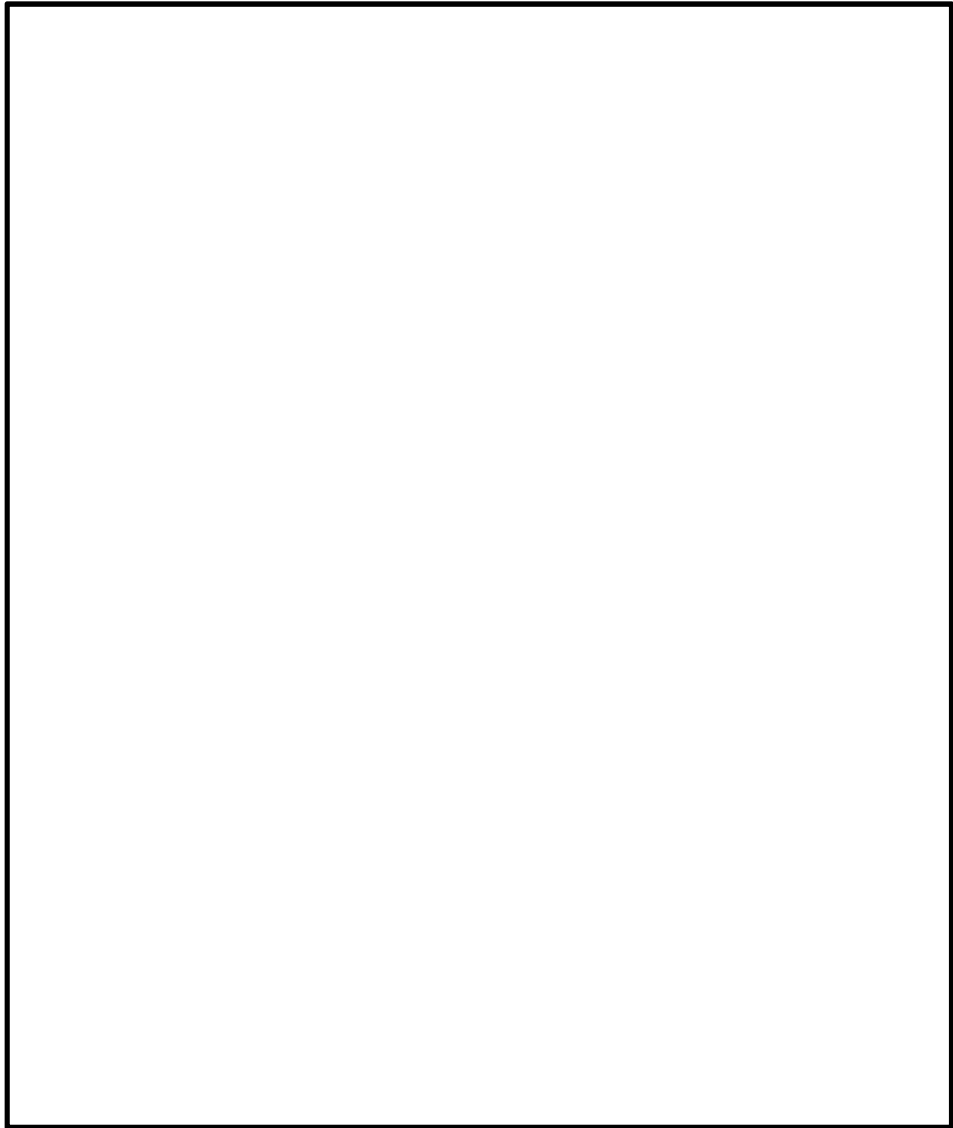


図 3-3 連結材のバネ定数の設定について

### 3.2 設計竜巻の風速の評価における保守性

固縛装置の設計において、竜巻風速場モデルとフジタモデルとしており、図 3-4 に示すフジタモデルでの関係式を基に、各固縛対象設備に作用する風速分布を設定する。

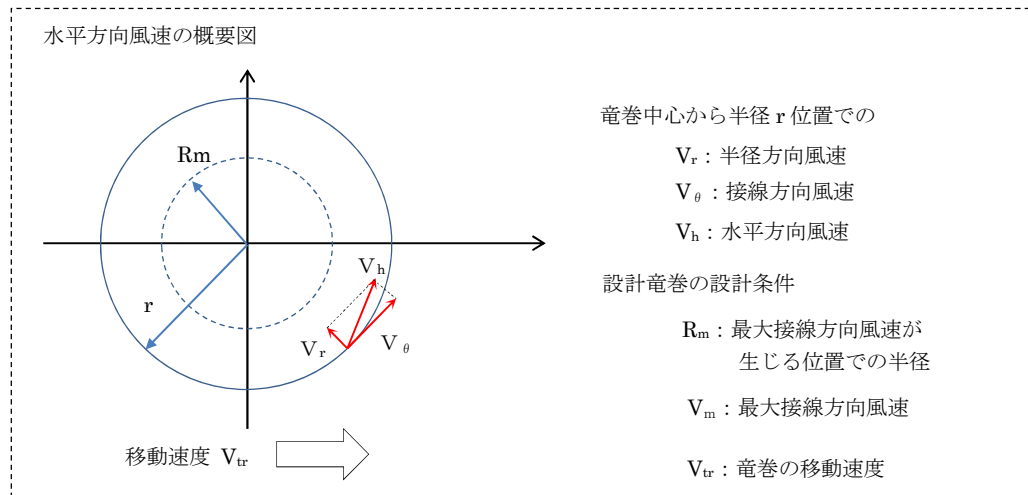
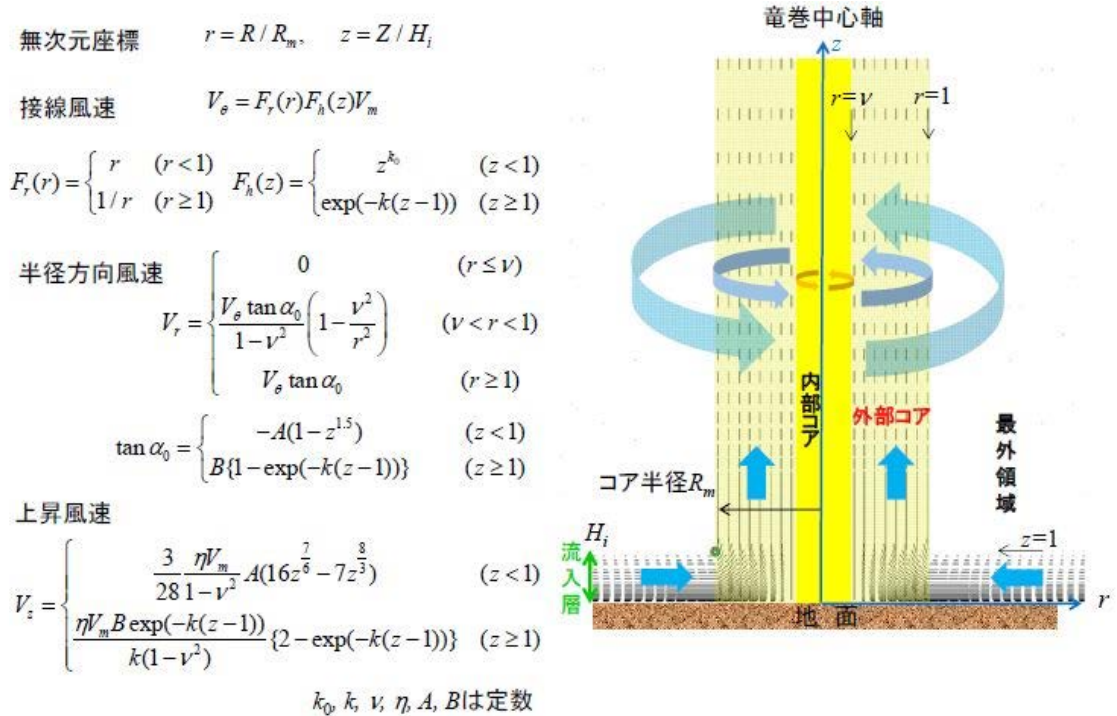


図 3-4 フジタモデルでの竜巻の風速の関係式

また、フジタモデルでは、固縛対象設備の高さが風速に影響するため、風速の分布は固縛対象設備ごとに異なるため、風荷重の算出用の風速は、固縛対象設備ごとに設定する。

この風速分布は、固縛対象設備に最も大きな風速が作用する条件としており、図 3-5 に示すような任意の位置から設計竜巻が近づき、 $t$  秒後の固縛対象設備の位置に最大接線方向風速が生じる条件により求めている。図 3-6 に可搬型代替注水中型ポンプに対する設計竜巻の風速分布を示す。

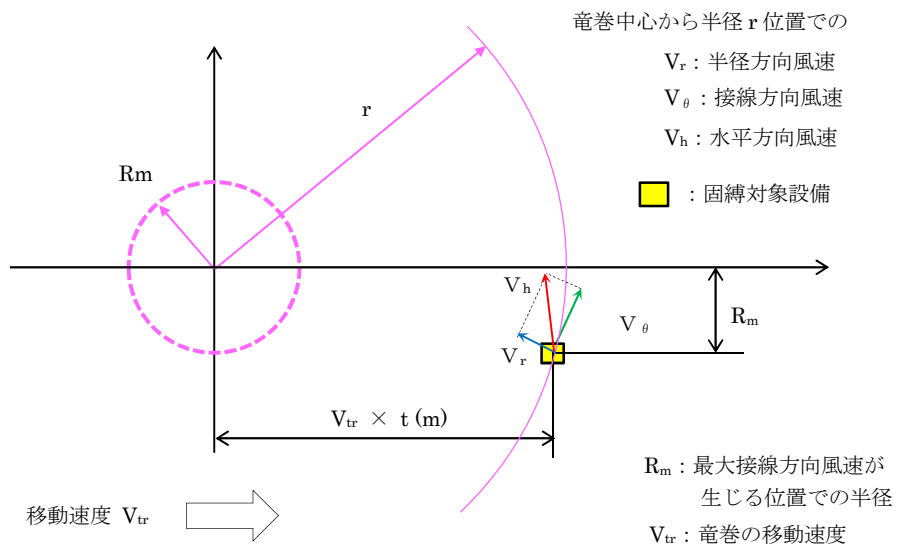


図 3-5 固縛対象設備に作用する風速分布の検討モデル

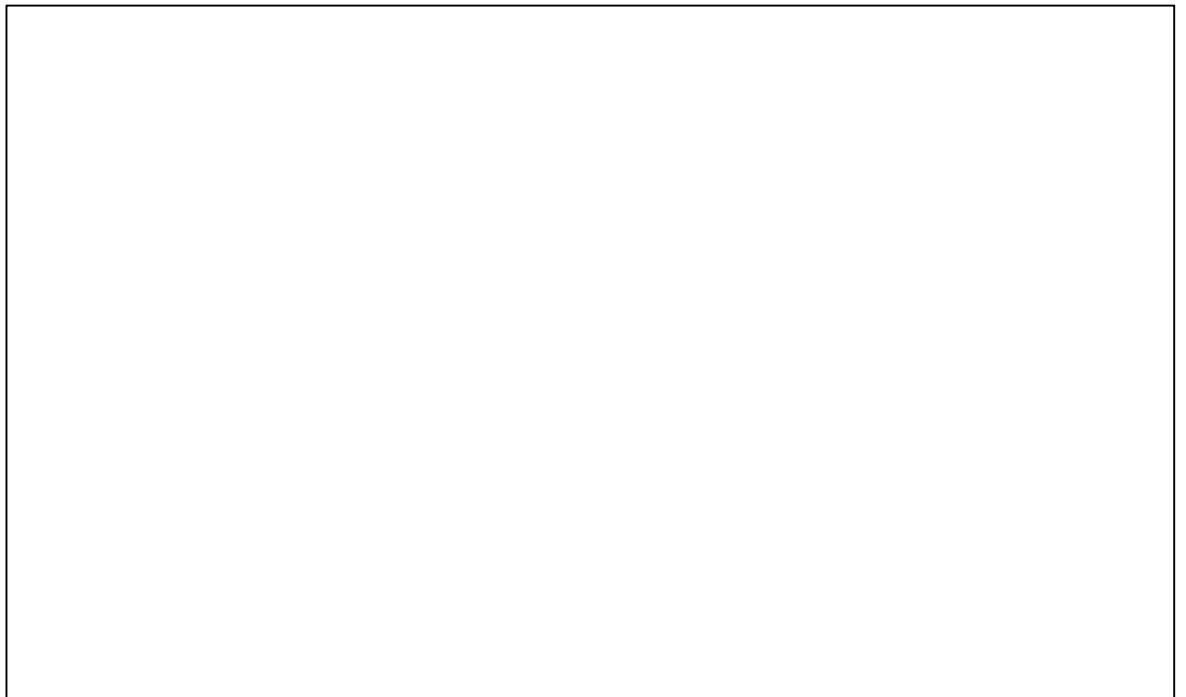


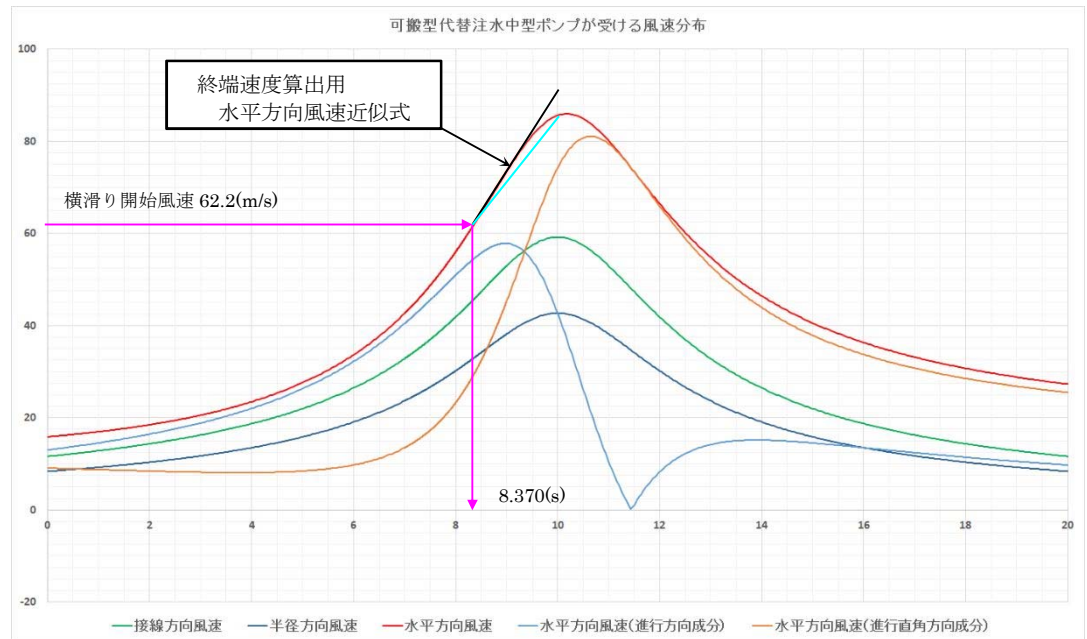
図 3-6 可搬型代替注水中型ポンプに作用する設計竜巻の風速の時刻歴分布

(1) 竜巻の水平風速の向きについて

設計竜巻の水平方向風速の分布は、図 3-6 に示した形状を示すが、水平方向風速の向きは、図 3-5 の検討モデルで分かるように接線方向風速の向きにより、竜巻の進行に応じて変化するため、固縛対象設備の最大受圧面に対して、常に作用し続けることはないが、本評価においては、設計竜巻による水平風速は、常に固縛対象設備の最大受圧面に対して、直角方向に作用するとして風荷重を算出しており、保守性を見込んでいる。

(2) 動的荷重算出時の水平方向風速の近似式の設定について

動的荷重の算出に必要な項目である固縛対象設備の終端速度の算出には、図 3-7 に示すように横滑り開始風速から最大風速となるまでを一次式で近似して設定しているが、この近似式による風速が実風速を下回らないように、実際の風速よりも高くなるように設定しており、保守性を有している。



滑り出し風速と、風速分布の最大値の二点を用いた近似（—）とすると、風速分布よりも下回る位置が発生する。  
⇒ 風速分布の接線を近似（—）に用いることで、保守性を有した風速近似式となる。

図 3-7 固縛対象設備の終端速度の算出時の風速近似の設定

3.3 許容限界における保守性

固縛装置の設計は、固縛対象設備に設計竜巻の風圧力による荷重が持続的に作用する状態に対して実施し、連結材の余長を設けた固縛装置（以下「余長付き固縛」という。）の場合は、余長が展張して停止させることによる動的荷重が作用する状態についても、実施している。固縛装置の強度評価に用いる許容限界は、静的に作用する場合に比べ、動的な荷重では強度が上昇する傾向にある。その材料強度の保守性について以下に示す。

(1) 鋼材及びコンクリートの強度

鋼材及びコンクリートの強度は、ひずみ速度の影響を大きく受け、高ひずみ速度下では静的な荷重が作用する場合に比べ、降伏点、引張強さともに上昇することが一般的に知られており、「建築物の耐衝撃設計の考え方（日本建築学会）」などの多くの文献において記載されている。

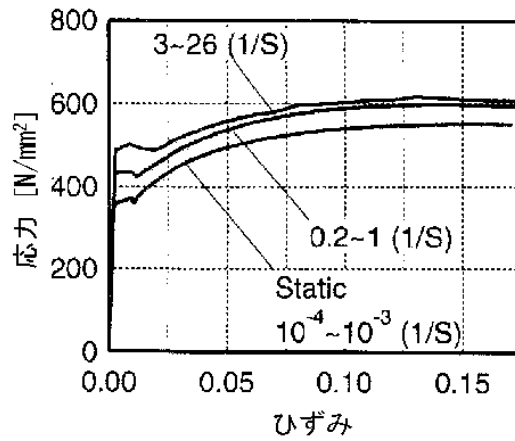


図 3-8 鋼材の応力—ひずみ関係に及ぼすひずみ速度の影響  
 (「建築物の耐衝撃設計の考え方 (日本建築学会)」より抜粋)

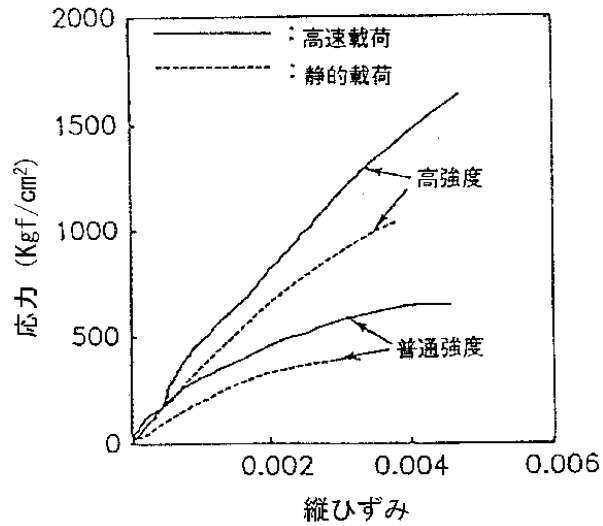


図 3-9 コンクリートの応力—ひずみ関係に及ぼすひずみ速度の影響  
 (「建築物の耐衝撃設計の考え方 (日本建築学会)」より抜粋)

例えば、可搬型代替注水中型ポンプの場合、荷重速度を連結材の展張時の終端速度である約 2 m/s に対して、「建築物の耐衝撃設計の考え方」を参考に、接着系アンカーボルト (SS400, 埋込長 300 mm, ひずみ速度 6.6/s) を例とすると、静的荷重の試験から規定されている強度に対する強度上昇率は、1.35 倍程度と推測され、固縛装置の許容限界は、静的荷重による値を用いており、強度上昇率分の保守性を有している。

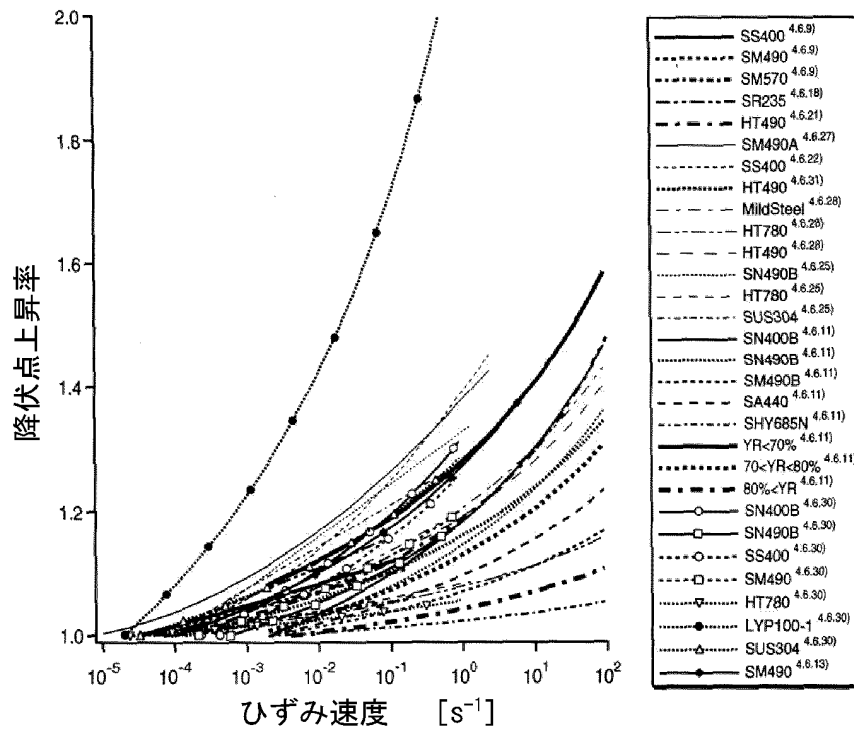


図 3-10 各種構造用鋼の降伏点のひずみ速度依存性  
 (「建築物の耐衝撃設計の考え方 (日本建築学会)」より抜粋)

(2) 連結材 (高強度繊維ロープ) の強度

連結材は高強度繊維にて構成されており、許容限界とした規格引張強度は、 mm/min (=  cm/sec) の引張速度にて引張試験を行った結果に、安全率を考慮して設定した強度である。引張試験での引張速度は、動的荷重の算出モデルでの連結材の展張する時の固縛対象設備が有する速度  $v_{SA}$  (約 2m/s (=  $2 \times 10^2$  cm/sec)) に比べて小さな速度だが、図 3-11 に示すように引張速度が上がると引張強度が増大することがメーカーにて確認されている。

動的荷重の作用による連結材の強度上昇率は、約  倍程度と推測される。

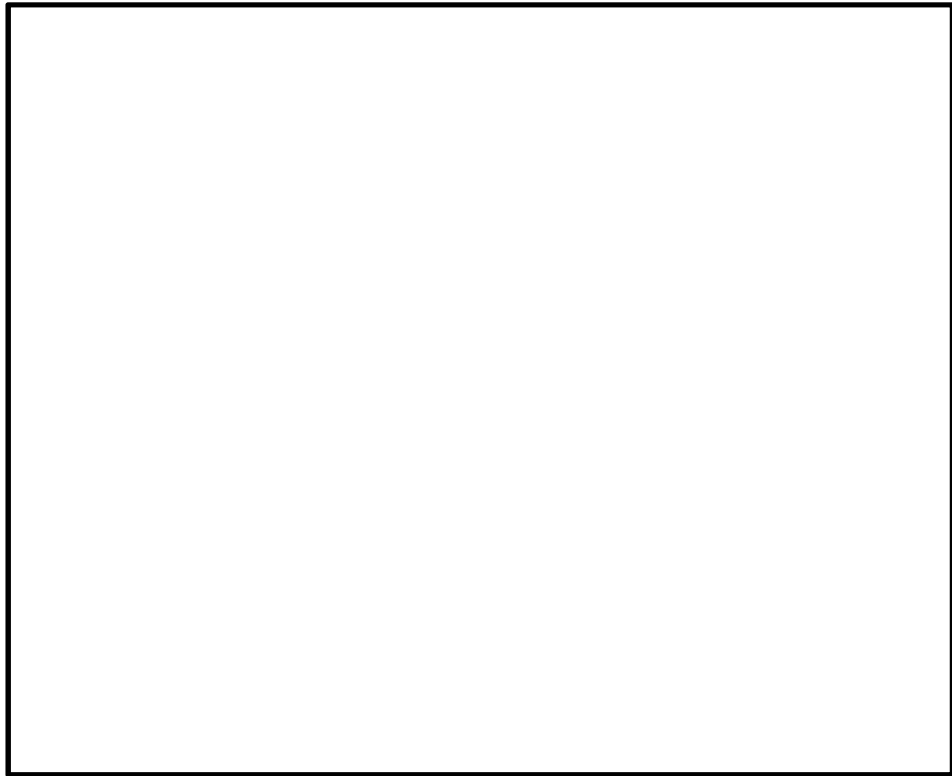


図 3-11 高強度繊維の荷重速度と引張強度の関係

以上より、固縛装置に対して動的荷重が加わった場合であっても、固縛装置を構成する各部位とも、静的な試験により得られる強度よりも増大する特性を有しており、固縛装置の設計において規格等より設定した許容限界に対し、保守性を有している。