

【整番 SE-08-TM-007】	高圧ガス配管のレベル 2 耐震性能評価手順その 1 -地震慣性力/変位	
分類：構造(耐震強度)/種別：技術メモ	作成年月：H28.8/改訂：Ver.0.0 (H28.9)	作成者：N. Miyamoto

全 36 枚

1. はじめに

高圧ガス関連の耐震設計については、KHK の「高圧ガス設備等耐震設計指針」を通して、技術的知見を規準化し手順化した効率の良い設計システムが構築されている。この設計システムによって設計施工者は誰も一定レベルの耐震性能を持った設備を顧客に提供できるため、この設計システムのもたらす恩恵は大きい(何よりも安定感と信頼感がある)。

しかし指針に含まれる情報にはもともと立体的な拡がりがあり、これに解析に関連する情報などが加わってある種の混乱が存在する。この場合、指針の性能評価手順を細分化したチャートを画面上でスライドさせながら、設計アイテムを確認するとともに設計ポイントを把握できるようにしておけば客先説明も含めているような技術的局面で役に立つのではないかと思う。本 TS はこの観点から以下の指針に含まれる配管関係規定を端的な形でフローチャートにしてみたものである。

高圧ガス保安協会「高圧ガス設備等耐震設計指針(2012)」 レベル 2 耐震性能評価 解説編

レベル 2 評価には [地震慣性力に係る評価] と [地震に伴う地盤変状に係る評価] があるが、ここでは冗長さを避けて前者の評価手順までをチャート化している。後者は別途 TS によるものとする。

[内容的には本 TS はまだオリジナル段階で不十分である。追々情報を集約して充実してゆきたい。]



2. レベル 2 耐震性能評価－全体フロー

(1) 周知のように高圧ガス設備の耐震設計にはレベル 1 とレベル 2 がありそれぞれの想定地震動に対し耐震性能を定義し性能評価を行うことが要求されている。レベル 1 では

設備寿命内で発生する確率の高い地震動即ちレベル 1 地震動に対し有害な変形等が残留せず高圧ガスの気密性が保持されるように、地震時発生する応力が変形残留排除/気密性保持の観点から定められた許容応力内にあるかをチェックする。

端的に云えば、地震が起きても継続して設備を運転できるかどうか、設備保全の観点から評価が決まる。一方、レベル 2 では

発生確率の低い直下型/海溝型の巨大地震による高いレベルの地震動即ちレベル 2 地震動及び地盤の液状化に対し重要度の高い構造物内の高圧ガスの気密性が保持されるように、構造物に生じる塑性変形量が気密性保持の観点から定められた許容変形量内にあることをチェックする。

端的に云えばレベル 2 では高圧ガス漏洩に伴う 2 次的災害を防止できるかどうか、人命保護の観点から評価がきまる。レベル 2 では塑性変形量が評価対象になっておりレベル 1 の発生応力とは違っているが、これは、レベル 1 ではまだ変形量が少ないので通常の許容応力ベースの設計で対処できるのに対し、レベル 2 では変形が塑性域にいって変形量 \propto 応力の関係を大きく逸脱するからである。確かに気密性の保持(→肉厚の保持)は変形量の抑制によって得られる。しかし変形量を割り出して許容変形量以下にコントロールするのは難しく高度な非線形解析によらざるを得なくなる。

実際には近似的な線形解析(～弾性解析)を用いて部材に生じる見掛け上のモーメント・フォースや応力を求めこれを virtual な許容荷重(降伏荷重/限界荷重)や許容応力(降伏応力/限界応力)で制限することが多い。特に配管系の評価で然り。

(2) レベル 2 耐震性能の全体的な評価手順をチャート 1 に示す。その手順は次の 2 つのパートからなる。

パート 1 → 地震慣性力に係る配管系のレベル 2 耐震瀬能評価手順

パート 2 → 地震に伴う地盤変状に係る配管系のレベル 2 耐震性能評価手順

パート 1 は、地震慣性力に係る…と定義されているが、実際は配管に生じる地震慣性力のみならず配管支持点に加わる相対変位も含んでいる(誤解しないように)。パート 1 の流れは次のようになる。

①プレビュー → ②震度/変位設定 → ③配管解析 → ④部材評価

①で事前チェックを行い②で配管解析の入力データを用意し③で配管系を解析して④で評価する。

地表面に入力した地震動は、配管支持構造物(塔槽類/架構/ラック/支持装置等)を経由して配管支持点から配管躯体に伝播する。その過程では地震波動が支持構造物や配管躯体の固有振動と同調し地表面からの入力震度(\propto 加速度)が増幅される傾向がみられる。ステップ②はこの過程をフォローするもので、まず地表面からの入力震度を求め、次いで支持構造物の固有周期から得られた応答倍率をこれに乘じ、さらに配管躯体の応答倍率を乗じて修正震度を求める。またこれにあわせて支持構造物の応答変位(相対変位)を求め、更に塑性変形分を加味する。

ステップ③の配管解析は、前述の修正震度に配管重量を乗じた地震慣性力と相対変位を等価線形モデルに入力して実施される(解析はレベル 1 とほぼ同じ線形解析である)。その場合、重要なのは曲がり管の塑性変形である。塑性変形は例外なく曲がり管で先行して起きるので曲がり管の変形度(撓み性係数)を仮定して配管解析を行い、変形度がマッチするまで解析を繰り返す。

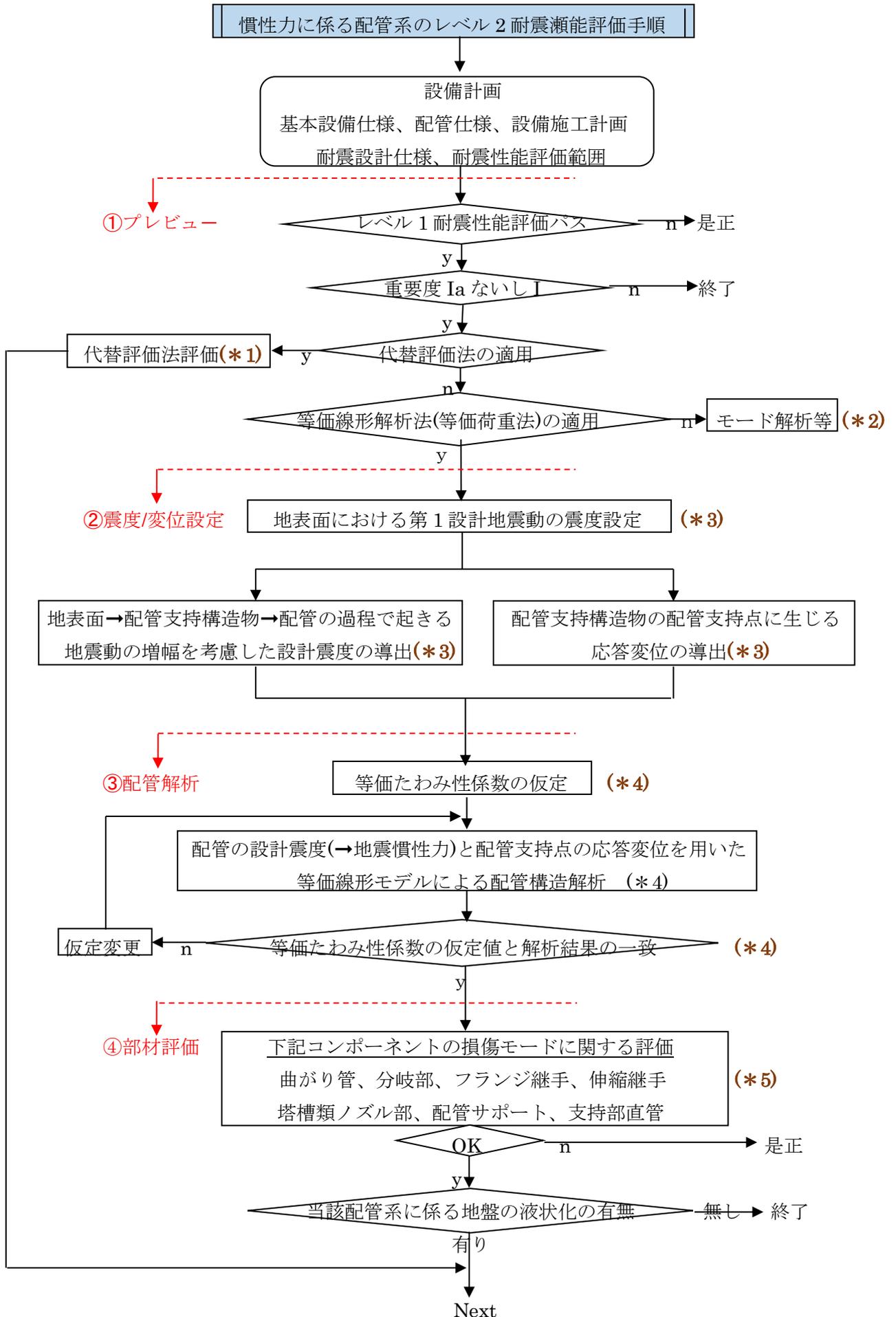
ステップ④では配管解析の結果を用いて配管構成部材およびサポート材毎に予め定められた損傷モードに対して各部材の評価が行われる。この辺りは機械的な扱いになるが、配管系の構造的なバラエティや物量の多さを考えれば然り。

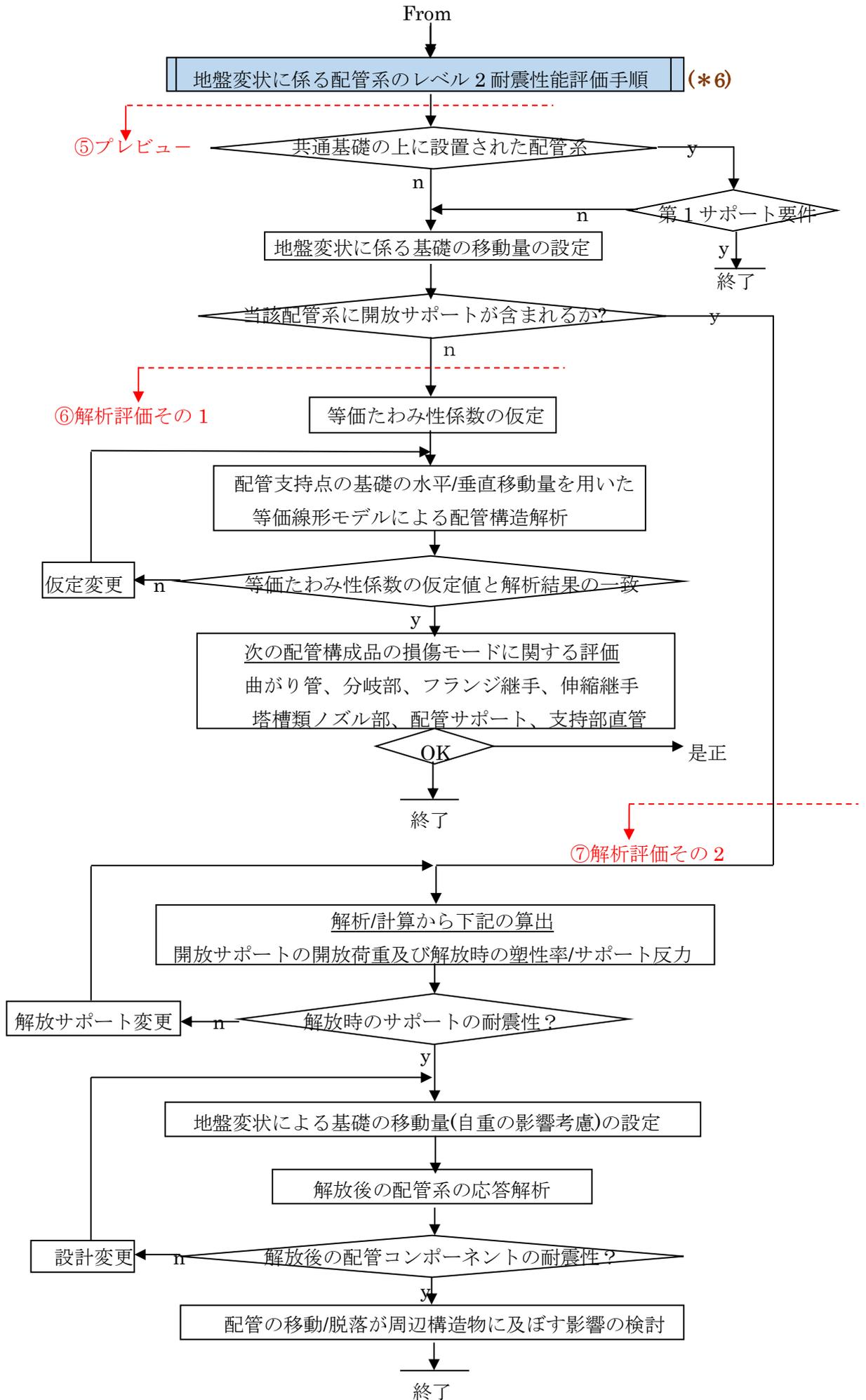
(3) 地盤変状は耐震設計指針で使用される用語で「地盤の液状化によって起きる基礎の移動/沈下および土質の低下」を云う。パート 2 はこの地盤変状に係る配管系の評価であって、基本的にはパート 1 の評価とは切り離して実施される。その流れは次の通り。

⑤プレビュー → ⑥解析評価その 1 → ⑦解析評価その 2

⑥は開放サポートがない通常のケースで、手順的には③④に同じ。⑦は開放サポート有りのケースで解放時のサポート強度をチェックした後、解放後の状態を⑥と同じ手順で評価する。

【 チャート1：レベル2耐震性能評価の全体的な流れ 】





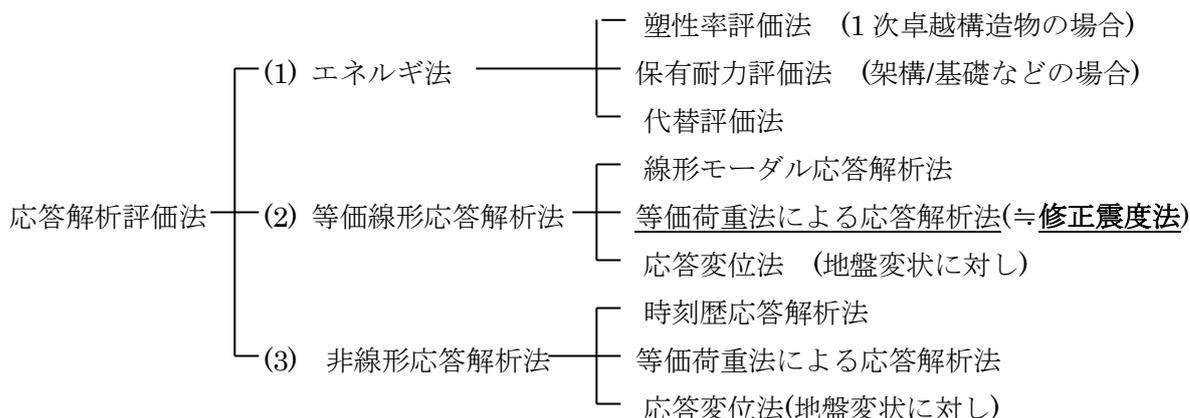
【 チャート1の補足説明 】

(*1) 代替評価法は耐震告示(高圧ガス設備等耐震設計基準)の第2項第2号ハによれば、「レベル2耐震性能評価はレベル2地震動に0.5を乗じた値を用いてレベル1耐震性能評価を行うことで代替できる」となっている。この運用については次のようになる⁽⁴⁾。

- ① 地震慣性力に係る評価に対して適用できる。地盤変状についてはレベル1にないので代替評価はできない。レベル2の地盤変状に係る評価は代替できない。
- ② 基準応答倍率は短周期側で補正されたレベル2指針の図7.3-1による。また基準応答曲線としては特A及びA地区の曲線を採る。
- ③ B,C地区の地域係数 β_2 はいずれも0.7を採る。

レベル1耐震性能は降伏荷重(応力)を最大限としているので仮にその2倍の地震動が負荷されても、設備を構成する鉄鋼材料の持つ靱性(あるいはひずみ硬化能)によって降伏値の2倍付近にある引張強さを越えることはない。多分これが代替評価法の根拠になっていると思う。

(*2) 高圧ガス設備で使われる耐震性能評価法には次のようなものがある。



エネルギー法は塔槽/架構のような1次固有振動モードが卓越する構造物を対象としたものでエネルギーの釣合いから構造物の応答量を求めエネルギー一定則から照査する簡便法であり評価方法として塑性率評価法、保有耐力法および代替評価法がある。塑性率評価法は塔槽類(法でいう耐震設計設備)で用いられ、保有耐力法は旧来から架構/建屋で用いられている。代替評価法はエネルギー一定則によるもので、レベル2配管系で用いられるものもその一つになる。

また**等価線形応答解析法**/非線形応答解析法は構造を構成する各要素の力-変位釣合方程式を連立させて応答量を求めるもので、配管も含めた梁構造物の解析に適している。線形と非線形があるがその簡便性から、線形応答解析とりわけ等価荷重法による応答解析がレベル2配管系の解析に最もよく採用されている。一般にはこの解析手法は**修正震度法**と呼ばれることが多いようだ。なお配管支持構造物ではエネルギー法が関係してくるので【**末尾注記A**】にその概要を紹介しておく。

(*3) 配管は地表面に直置きにされることは殆どなくサポート/ラック/機器ノズルなど配管支持構造物で支持されているため地表面の地震動が支持構造物を經由して配管に伝達する過程で地震加速度が増幅されることが多い(共振現象であるから支持構造物の固有周期に影響される)。手順としては、

- ① まず地表面における震度(=地震加速度/重力加速度)を規定に従って設定し、
- ② 次に支持構造物の固有周期に対応する応答倍率から配管支持点の震度を求め、
- ③ 更に配管躯体への入力以降の応答倍率を乗じて配管上に賦存する修正震度を求める。

またこれと同期して地表面の地震動によって支持構造物(→支持点)に生じる相対変位を求める。解析は賦存震度から得られる地震慣性力(=配管重量 x 震度 x 重力加速度)と相対変位を配管モデル

を入力して行われる。因みに等価荷重とはこの地震慣性力を指すものと思われる。

- (※4) レベル2の場合、地震慣性力はレベル1の2倍以上になるので、配管には大きな変形が発生して常にシビアな変形を起こす曲がり管部分では塑性変形が先行して発生すると思われる。地震の際にあちこちの曲管で塑性変形が起きると配管系の剛性は低下して、配管が弾性挙動するという前提が崩れる(非線形解析が必要になる)。そこで各曲管に塑性化による角変位の増加分をプラスした**等価たわみ性係数 k_p** を用いて解析を行うようにする。そうすれば配管の剛性を変えることなく非線形非線形解析に近い結果が得られるはずである。ただ k_p は曲管の変形量(角変位)に依存しているので k_p 値の仮定 → 配管解析 → 角変位 → k_p 値の算定 → k_p の算定値と仮定値の比較を反復して繰り返し撓み係数をファイナル化する必要がある。



- (※5) 配管は標準的な構造パターンを持ったコンポーネントから構成されているので地震による破損メカや破損形態はほぼ固定している。そこでコンポーネントのタイプ別に損傷モードをセットしてその許容基準を決めておけば評価は非常に簡単になる。ここで挙げられた7つのコンポーネントの損傷モード(下記)以外に「ラチェティング」があるが、設計指針では特に規制は見当たらない。そこで念のため **[末尾注記 B]** に若干の補足を付しておいた。

曲がり管(→塑性変形)、分岐部(→亀裂)、フランジ継手(→漏洩)、伸縮継手(→疲労)
塔槽類ノズル部(→損傷)、配管サポート(→損傷)、支持部直管(→亀裂)

- (※6) 地盤変状に係る性能評価はあくまで地盤の液状化に対応するもので、地震慣性力に係る性能評価とは基本的に別評価になる。ただ液状化で配管自重のシフトなどが変わるので全く無縁というわけにはいかないようだ(適宜影響を考える必要がある)。全体流れとしては通常の支持構造を持った配管のほかに、開放サポート(→伝達力が限界を越えると自ら拘束を放棄するサポート)を使用する配管についても評価法が与えられている。

3. レベル2耐震性能評価手順－詳細フロー

- (1) チャート1は概念的なもので実際設計に役立つものではない。これをブレイクしてチャート2に詳細の流れを示す(なおチャート1のプレビュー部分は重複するため割愛)。このチャートでは設計指針の情報をできるだけ細かく手順化しているが、それでもすべての情報を網羅するのは難しいので[*マーク]個所について補足説明を付けるようにしている。なお、チャート2およびその補足説明には次のような引用上の略記が含まれてある。

耐震告示 → 告示第515号「高圧ガス設備等耐震設計基準」

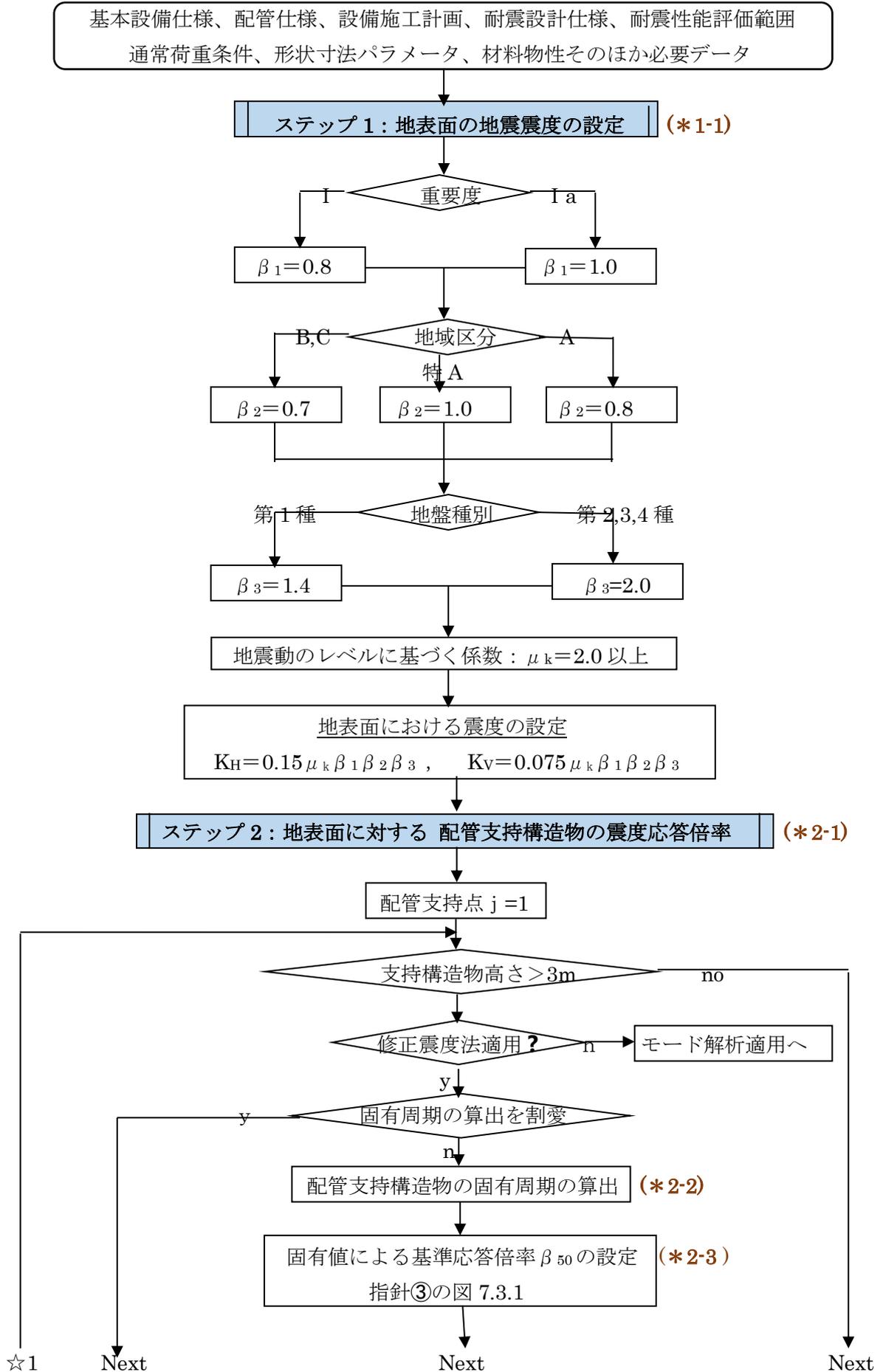
指針① → 高圧ガス設備等耐震設計指針(2012) レベル1耐震性能評価(配管系偏)

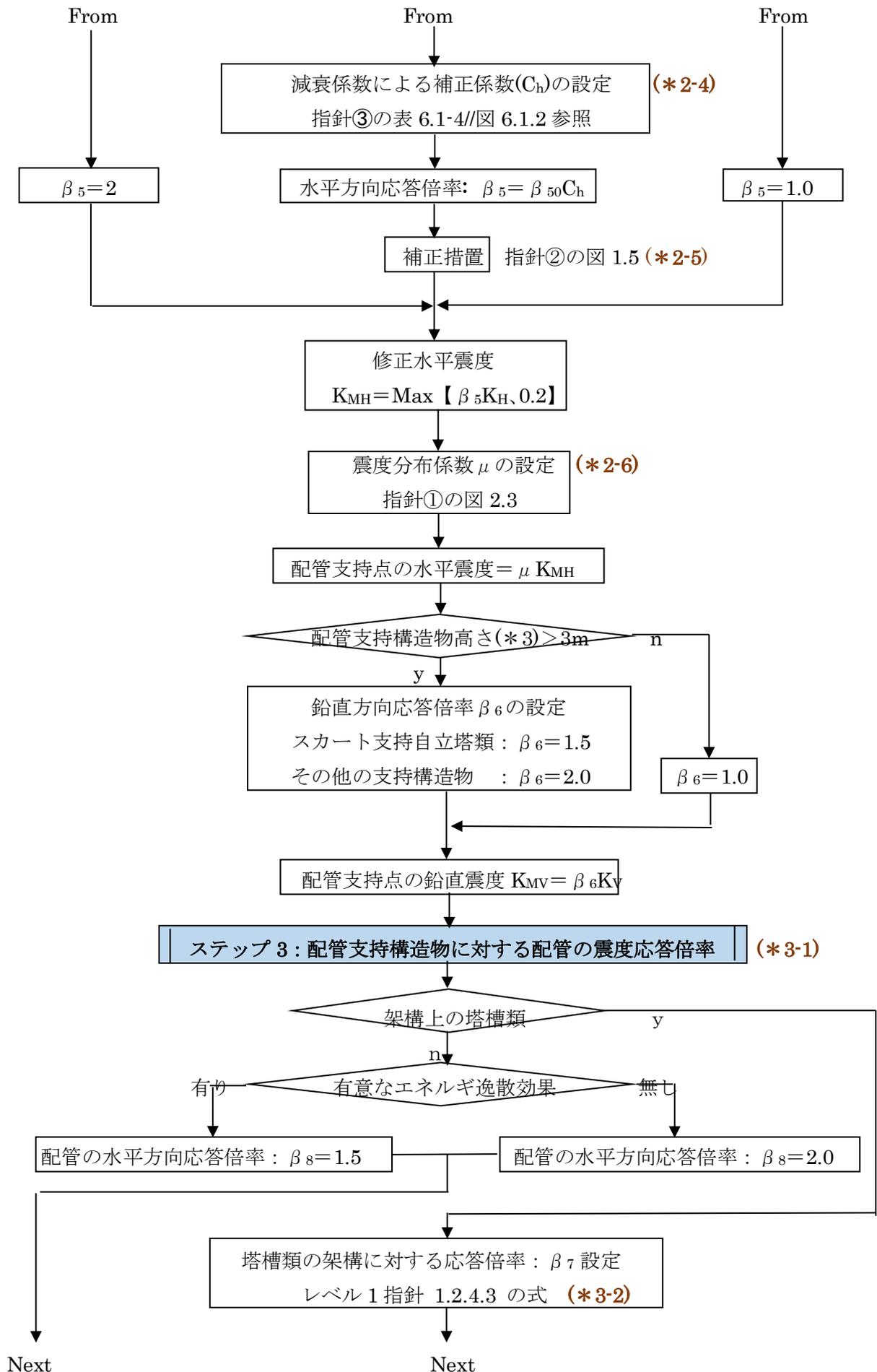
指針② → 同上指針(2012) レベル1耐震性能評価(耐震設計設備・基礎偏)

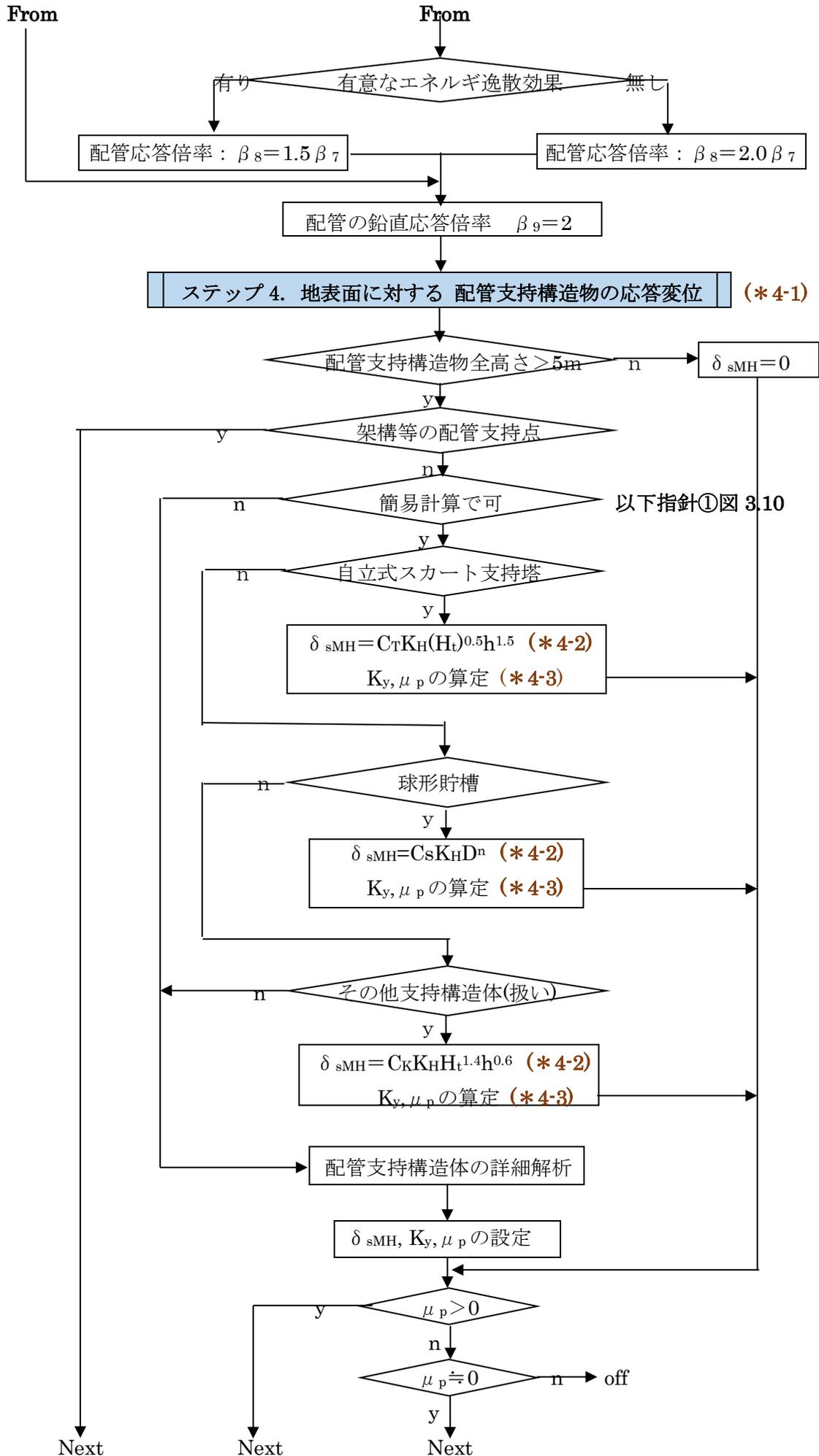
指針③ → 同上指針(2012) レベル2耐震性能評価(解説偏)

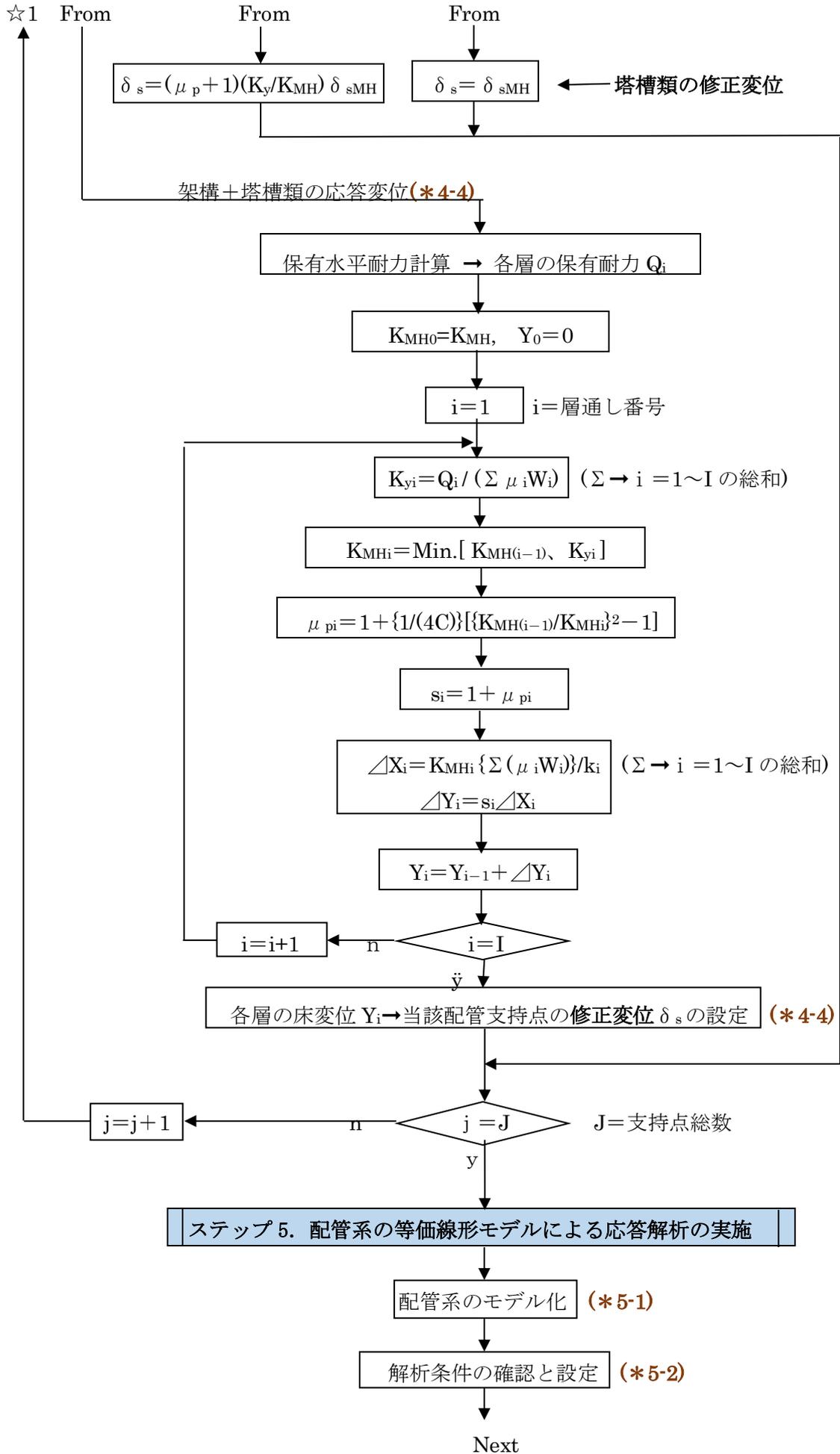
- (2) 配管系の耐震解析では修正震度法(等価荷重法応答解析)が使用されることが多い。チャート2でも配管支持構造も含め修正震度法の適用を前提において記述している。

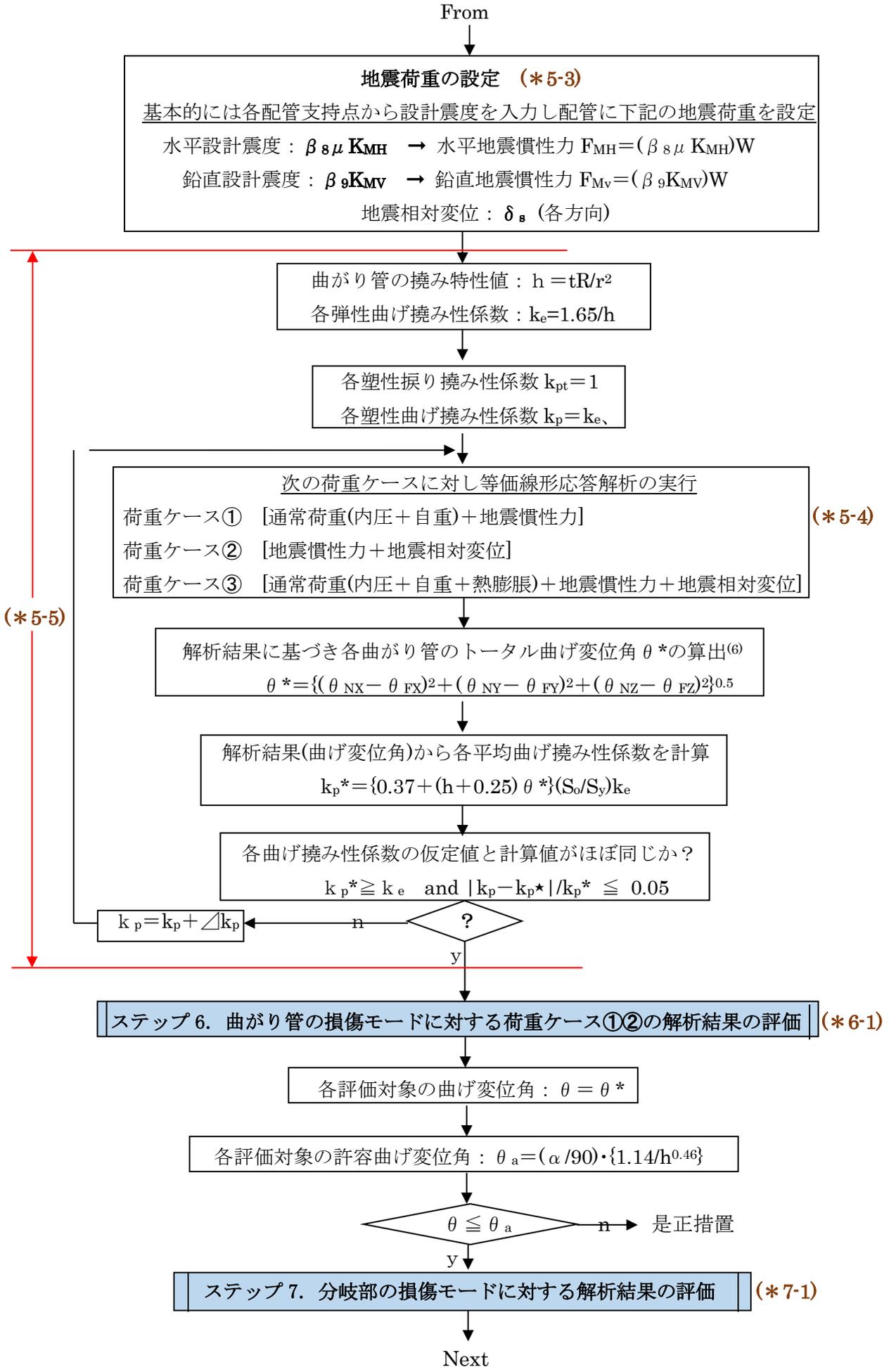
【 チャート2 : レベル2耐震性能評価の詳細な流れ 】

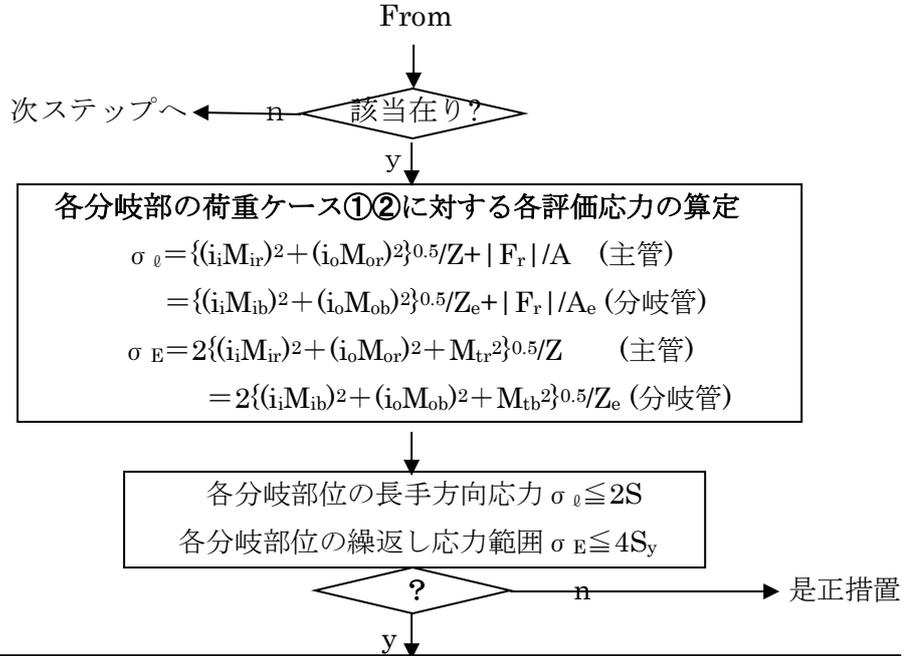




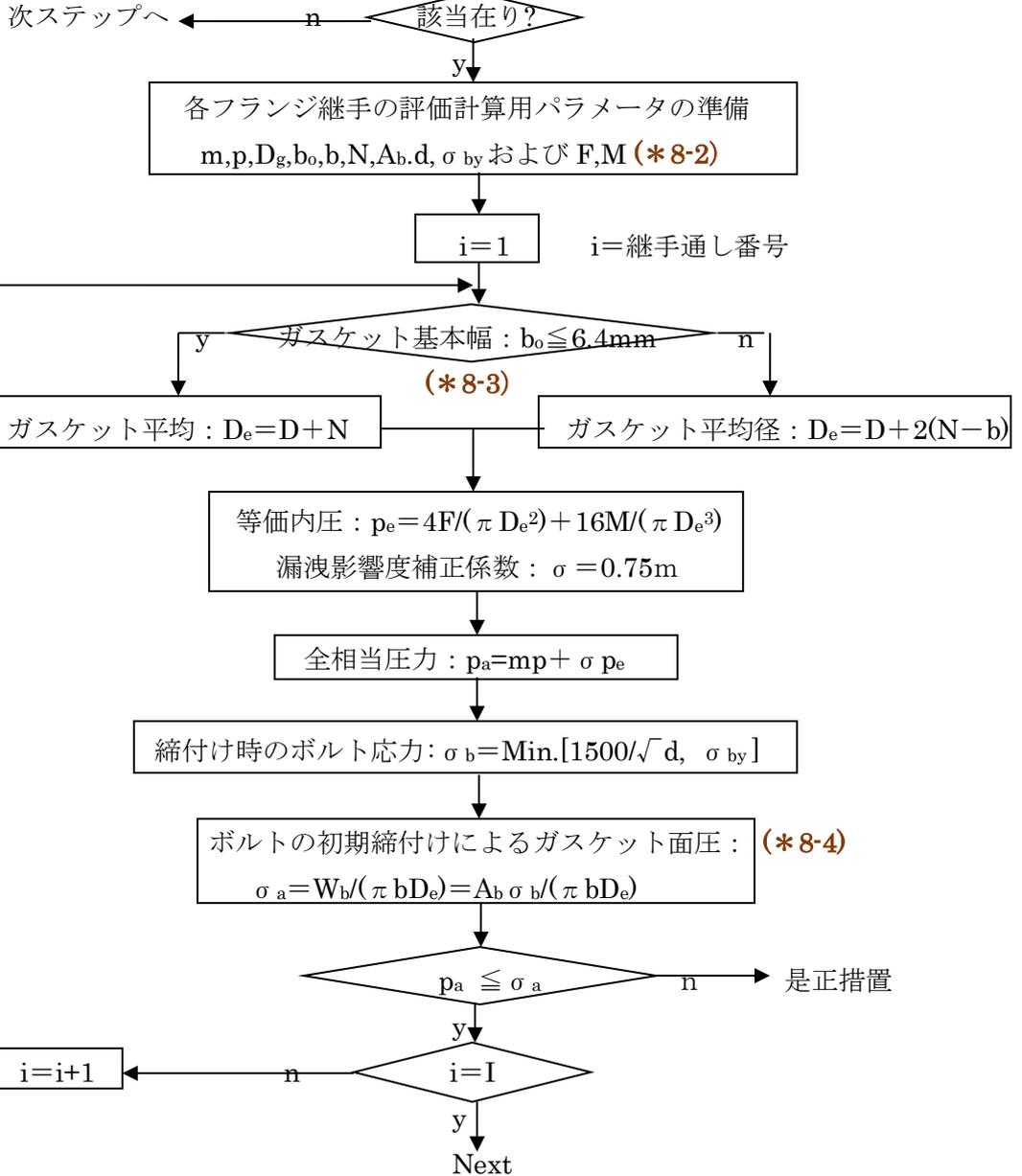


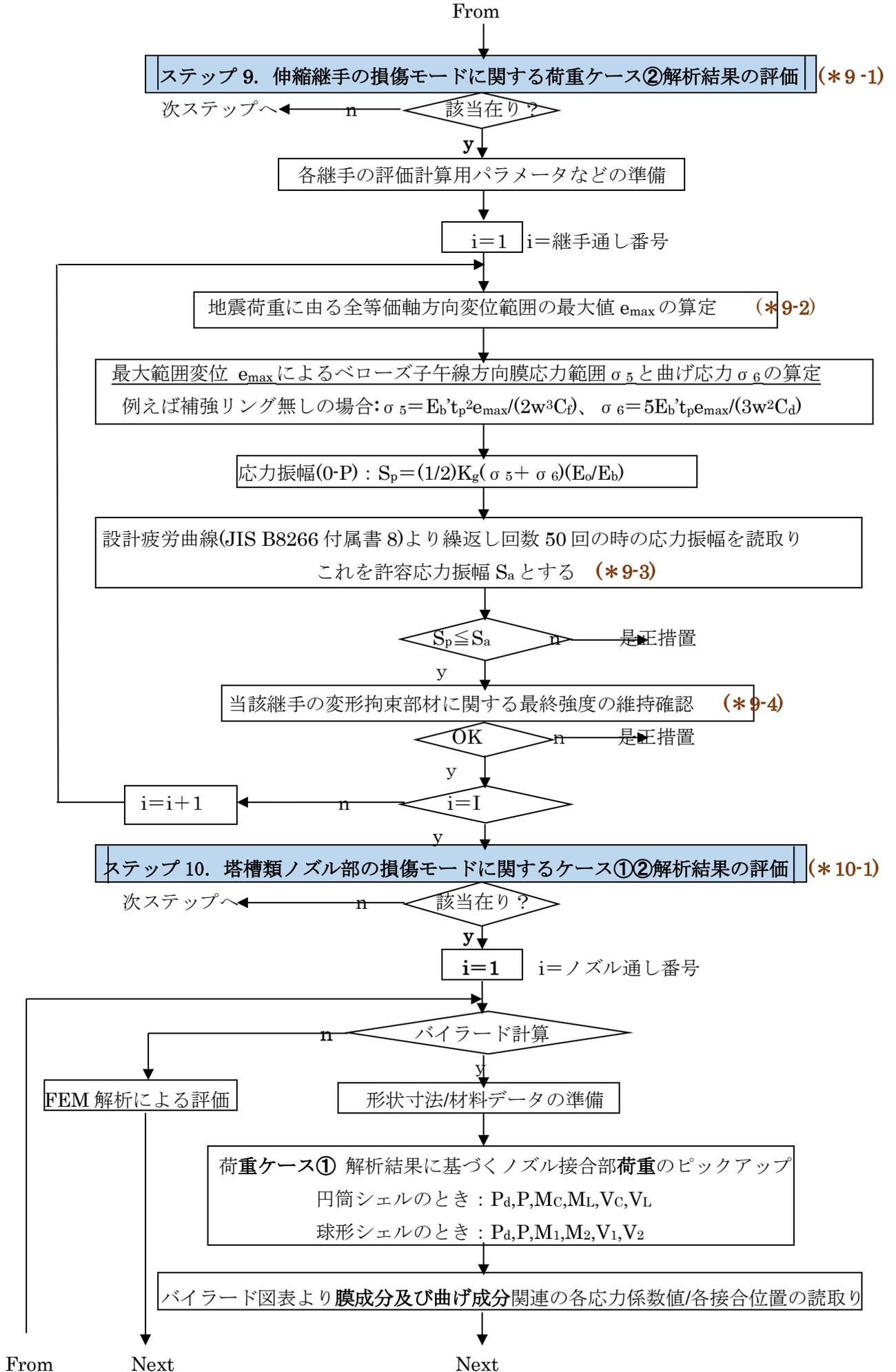


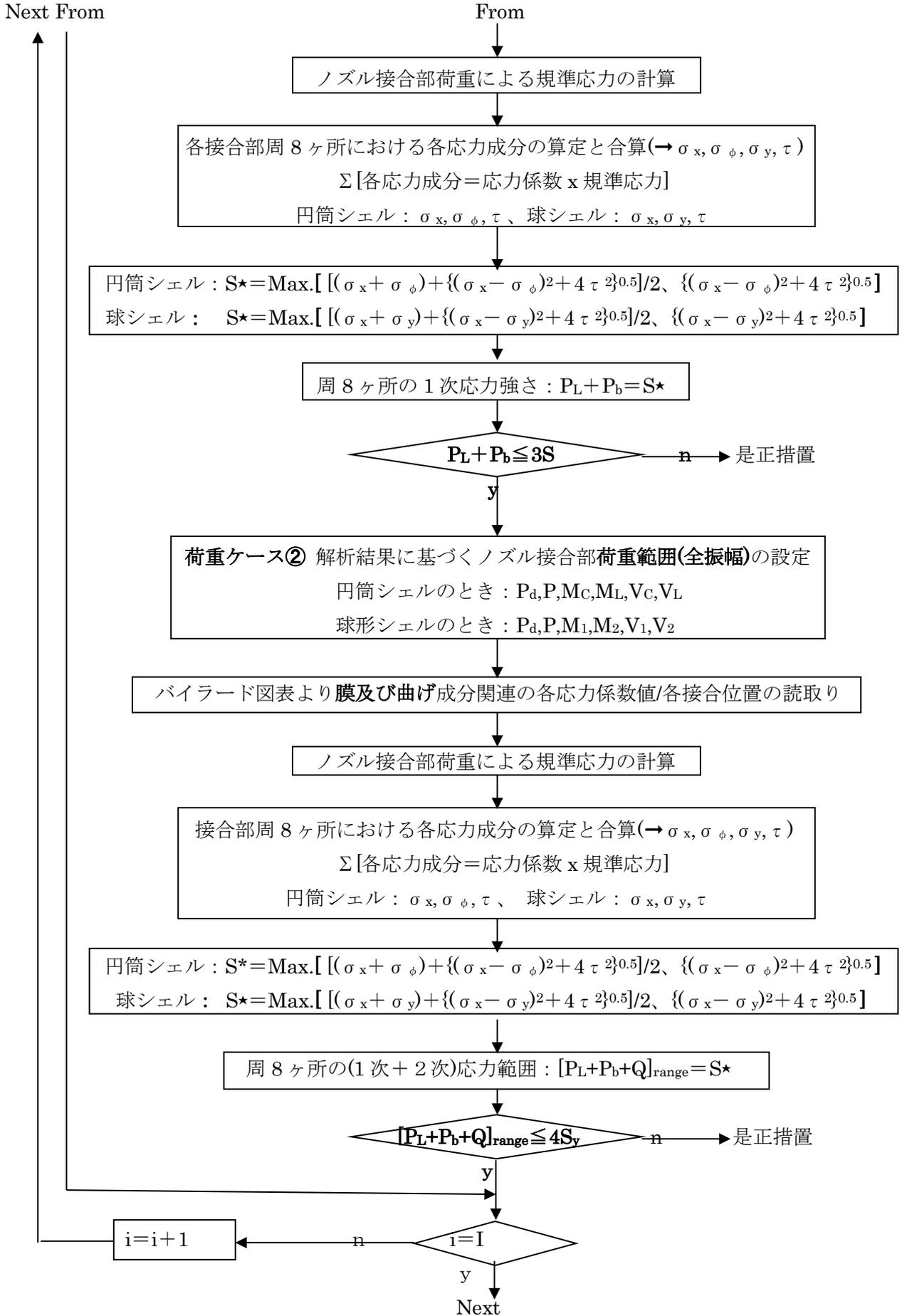


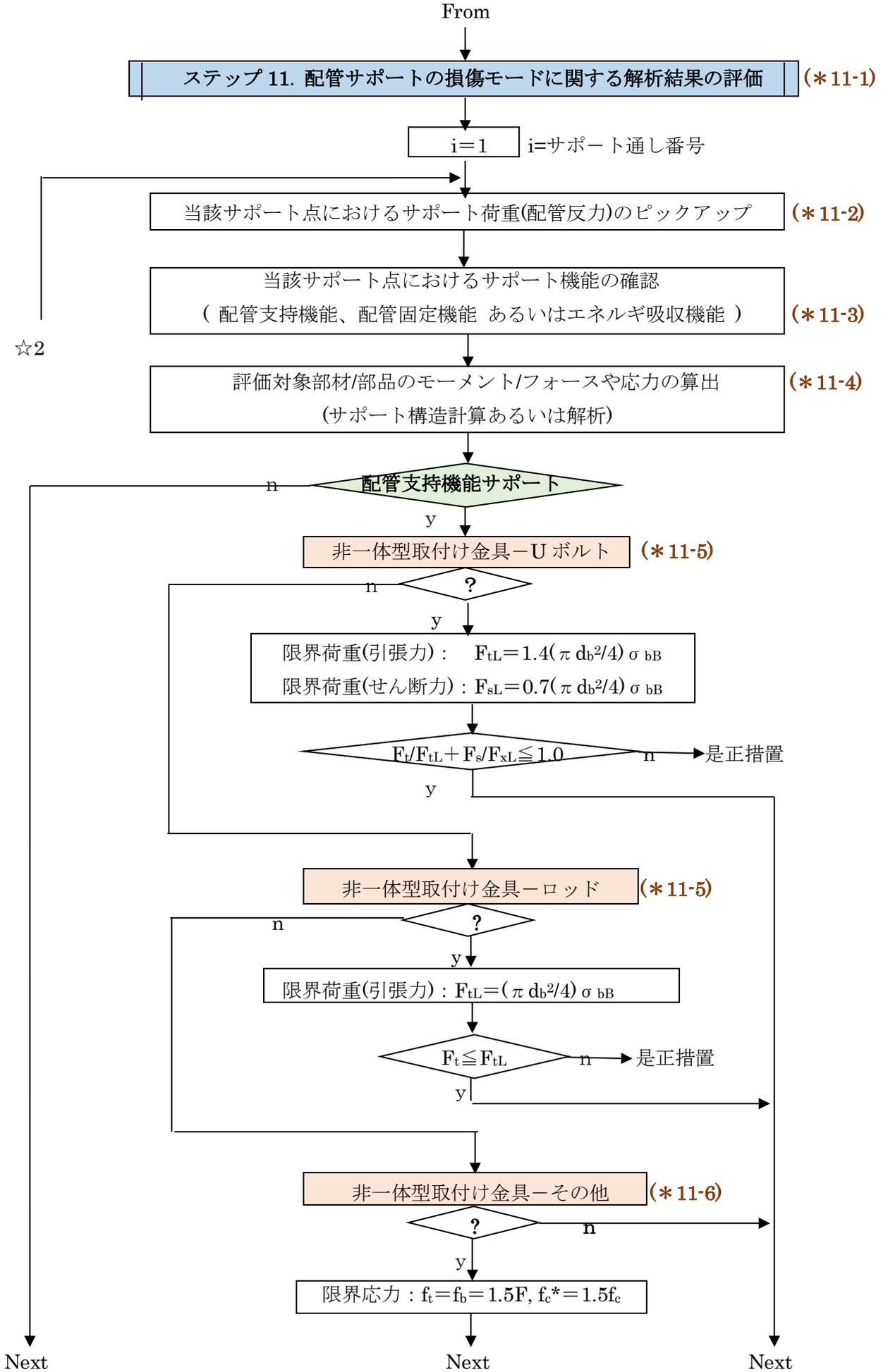


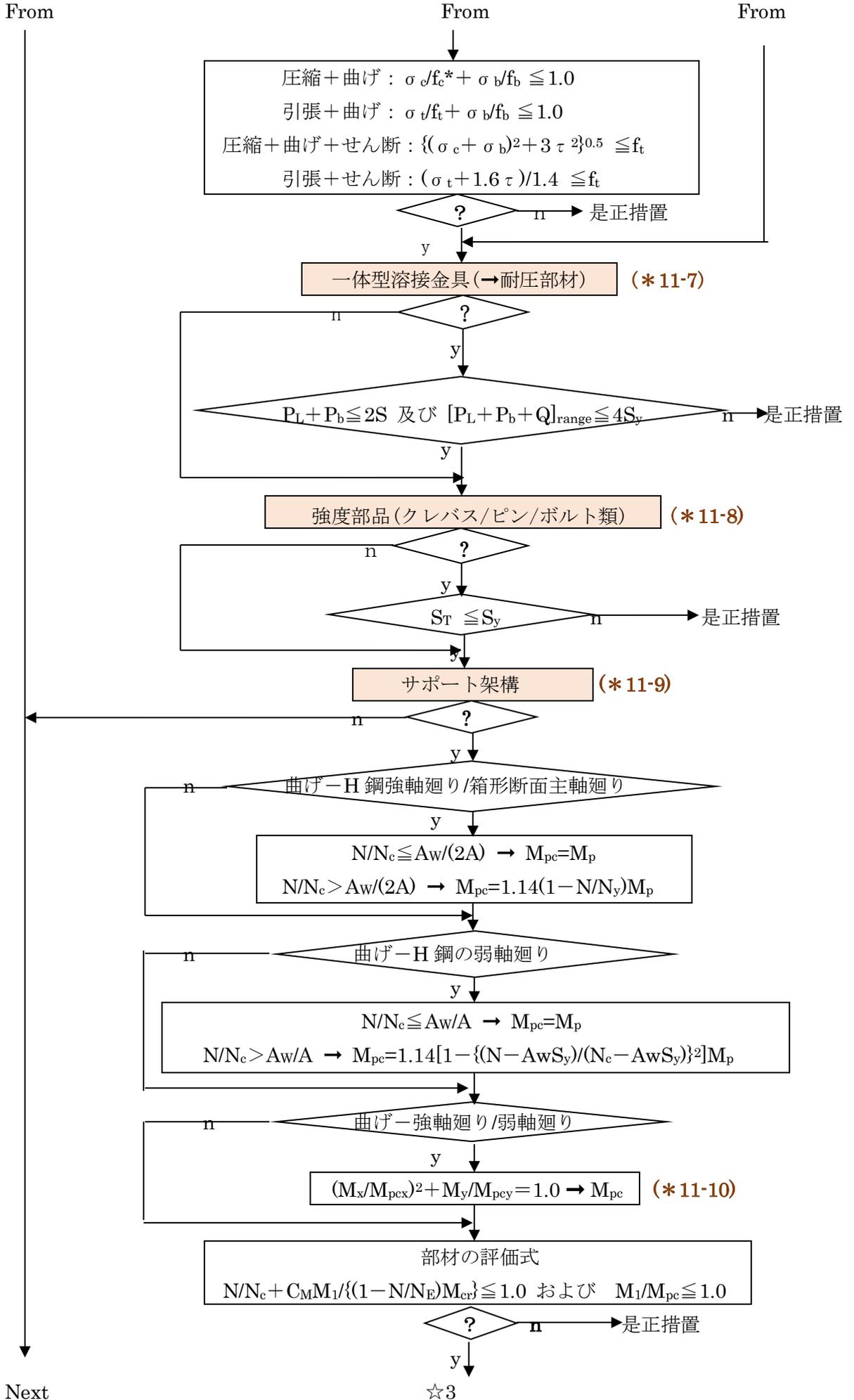
ステップ 8. フランジ継手(平面座)の損傷モードに対する解析結果の評価 (*8-1)



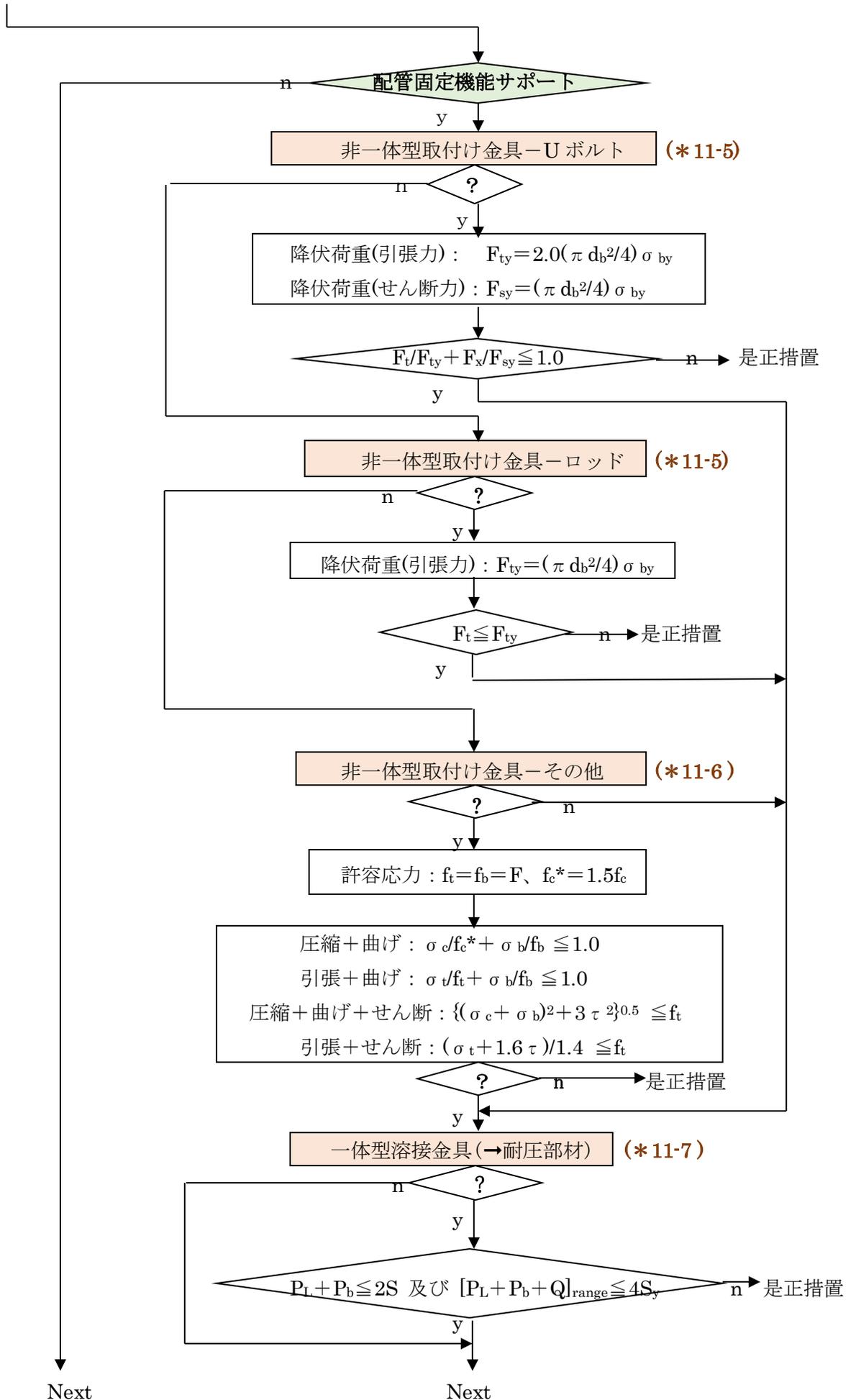


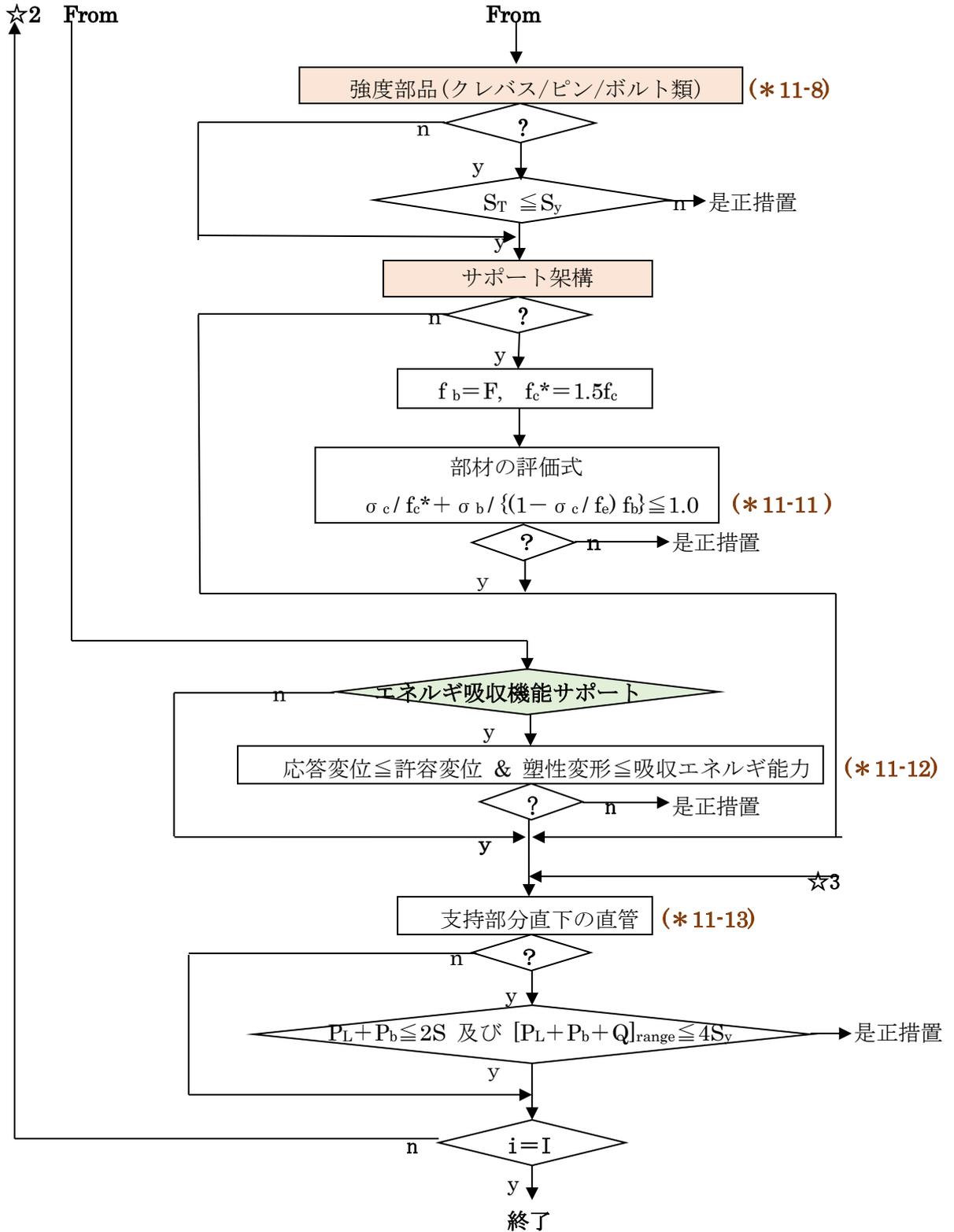






From





[ステップ 1 の記号説明]

β_1 = 重要度係数、 β_2 = 地域係数、 β_3 = 表層地盤増幅係数、 μ_k = 地震動のレベルに基づく係数、 K_H = 地表面での第 1 設計地震動の水平震度(-)、 K_V = 地表面での第 1 設計地震動の鉛直震度(-)

[ステップ 2 および 3 の記号説明]

β_{50} = 基準応答倍率(-)(→指針③図 7.3-1)、 β_5 = 水平方向応答倍率(-)、 β_6 = 鉛直方向応答倍率(-)
 β_7 = 架構に対する塔槽類の応答倍率(-)、 β_8 = 支持構造体に対する配管の水平応答倍率(-)、

β_9 = 支持構造体に対する配管の鉛直応答倍率(-)、 C_h = 補正係数(-)(指針③表 6.1-4→同図 6.1-2)、
 μ = 震度分布係数(-)(→指針①図 2.3)、 K_{MH} = 水平方向設計修正震度(-)、
 K_{MV} = 鉛直方向設計修正震度(-)、

[ステップ 4 の記号説明]

δ_{sMH} = 設計修正震度に対する塔槽類の配管支持点の水平応答変位(mm)、 K_H = 地表面の水平震度(-)
 δ_s = レベル 2 地震動に係る配管支持点の応答水平変位量(mm)、 h = 当該配管支持点高さ(m)、
 H_t = 当該配管支持構造体の全高(m)、 D = 球形タンクの外径(m)、 C_T = 係数(=1.0)、 C_K = 係数(=0.75)
 C_s = 係数(→鋼管ブレース 0.9、ロッドブレース 32.4)、
 n = 乗数(→鋼管ブレース 1.60、ロッドブレース 0.68)、
 K_y = 当該損傷モードに係る塔槽類の降伏震度(-)、
 μ_p = 塔槽類の応答塑性率(-)(→最大の μ_p となる損傷モードに関する値)、
 Q_i = i 層目の保有耐力(kN)、 Y_i = i 層の応答変位(mm)、 ΔY_i = i 層の層間変位(mm)、
 s_i = i 層の変形率(-)、 K_{MH_i} = i 層の最小震度(-)、 K_{y_i} = i 層の降伏震度(-)、
 ΔX_i = K_{MH_i} に対する架構の i 層の層間変位(mm)、 W_i = i 層の床重量(kN)、
 k_i = i 層の層間バネ(kN/mm)、 μ_i = i 層の震度分布係数(-)、 μ_{pi} = i 層の応答塑性率(-)

[ステップ 5 および 6 の記号説明]

F_{MH} = 水平地震慣性力(kN)、 F_{MV} = 鉛直地震慣性力(kN)、 W = 配管荷重(kN)、
 k_{pt} = 振りたわみ性係数(-)、 k_p = 曲げたわみ性係数(-)(仮定値)、 k_p^* = 曲げたわみ性係数(-)(解析結果)
 k_e = 弾性変形時のたわみ性係数(-)、 h = たわみ特性値(-)、 t = 曲管の肉厚(mm)、
 R = 曲管の曲げ半径(mm)、 r = 曲管の平均半径(mm)、 θ = 曲がり管の変位角($^\circ$)(仮定値)、
 θ^* = 曲がり管の変位角($^\circ$)(解析結果)、 θ_a = 曲管の許容変位角($^\circ$)、 α = 曲管の曲がり角($^\circ$)、
 θ_{Nx} , θ_{Ny} , θ_{Nz} = 曲管始端での X,Y,Z 軸廻りの変位角($^\circ$)、 S_o = 基準降伏点(=215N/mm²)、
 θ_{Fx} , θ_{Fy} , θ_{Fz} = 曲管終端での X,Y,Z 軸廻りの変位角($^\circ$)、 S_y = 設計温度における降伏応力(N/mm²)

[ステップ 7 の記号説明]

M_{ir} = 主管の面内曲げモーメント(N·mm)、 M_{or} = 主管の面外曲げモーメント(N·mm)、
 M_{ib} = 分岐管の面内曲げモーメント(N·mm)、 M_{ob} = 分岐管の面外曲げモーメント(N·mm)、
 M_{tr} = 主管の振りモーメント(N·mm)、 M_{tb} = 分岐管の振りモーメント(N·mm)、
 i_i = 面内応力増幅係数(-)、 i_o = 面外応力増幅係数(-)、 A = 主管断面積(mm²)、
 A_e = 分岐管断面積(mm²)、 Z = 主管の断面係数(mm³)、 Z_e = 分岐管の断面係数(mm²)、
 S = 耐震設計用許容応力(N/mm²)(→レベル 1 配管指針 表 16.2)、
 S_y = 設計温度での降伏応力/0.2%耐力(N/mm²)

[ステップ 8 の記号説明]

p = 内圧(MPa)、 p_e = F,M に相当する等価内圧(MPa)、 p_a = 全相当圧力(MPa)
 F = 地震荷重による軸方向引張力(N)、 M = 地震荷重による曲げモーメント(N·mm)
 D = ガスケット内径(mm)、 D_e = ガスケット接触面の平均径(mm)、 d = ボルトの呼び径(mm)、
 b_o = ガスケット座基本幅(mm)、 b = ガスケット座有効幅(mm)、 N = ガスケット接触面幅(mm)
 A_b = ボルトの総有効断面積(mm²)(= $n \pi d_b^2 / 4$)、 n = ボルト本数、 d_b = ボルト谷底径(mm)
 m = ガスケット係数(-)、 σ = 漏洩影響度補正係数(-)、 σ_a = 初期締付力によるガスケット面圧(MPa)

σ_{by} = ボルト降伏応力(常温)(MPa),

[ステップ 9 の記号説明]

e_{max} = ベローズ 1 山当りの等価軸方向変位の最大値 (mm) (→例えば EJMA Std. C-1)、
 σ_5 = ベローズ変位による子午線方向膜応力範囲(N/mm²)、 K_g = ベローズ応力集中係数(-)
 σ_6 = ベローズ変位による子午線方向曲げ応力範囲(N/mm²)、
 E_0 = 設計疲労曲線の基準縦弾性係数(N/mm²)、 S_p = ピーク応力振幅(O-P) (N/mm²)、
 E_b = ベローズ材の設計温度における縦弾性係数(N/mm²)、 S_a = 許容応力振幅(O-P) (N/mm²)、
 E_b' = 常温におけるベローズ材の縦弾性係数(N/mm²)、 t_p = ベローズ加工修正厚さ(mm)、
 w = ベローズ山高さ(mm)、 C_f, C_d = 撓み・荷重・モーメント関係を表わす係数

[ステップ 10 の記号説明]

M_C, M_L = 円筒シェルのノズル接合部の周方向/長手方向モーメント(範囲)(N·mm)
 M_1, M_2 = 球シェルのノズル接合部の直交 2 方向モーメント(範囲)(N·mm)、
 V_C, V_L = 円筒シェルのノズル接合部の周方向/長手方向せん断力(範囲)(N)
 V_1, V_2 = 球シェルのノズル接合部の直交 2 方向せん断力(範囲)(N)、 P_d = 設計圧力(N/mm²)
 $\sigma_x, \sigma_\phi, \sigma_y, \tau$ = 各接合位置での各応力成分の合計(N/mm²)、 S^* = 計算応力強さ(N/mm²)、
 P_L = 一次局部膜応力強さ(範囲)(N/mm²)、 P_b = 一次曲げ応力強さ(範囲)(N/mm²)、
 Q = 2 次応力強さ範囲(N/mm²)、 S = 耐震設計用許容応力(N/mm²) (指針①表 16.2 参照)
 S_y = 設計温度での降伏応力/0.2%耐力(N/mm²)

【 ステップ 11 の記号説明 】

F_{tL} = U ボルト/ロッド軸方向の限界荷重(N)、 F_{sL} = U ボルト軸直角方向の限界荷重(N)
 F_{ty} = U ボルト/ロッド軸方向の降伏荷重(N)、 F_{sy} = U ボルト軸直角方向の降伏荷重(N)
 F_t = U ボルト軸/ロッド軸方向の引張力(N)、 F_s = U ボルト軸直角方向のせん断力(N)、
 σ_{bB} = U ボルト/ロッド材の引張強さ(N/mm²)、 σ_{by} = U ボルト/ロッド材の降伏応力(N/mm²)、
 d_b = U ボルト径ないしロッド最小部径(mm)、 f_t = 許容引張応力(N/mm²) (鋼構造設計規準の値)、
 f_b = 許容曲げ応力(N/mm²) (鋼構造設計規準値)、 f_c = 許容圧縮応力(N/mm²) (鋼構造設計規準値)、
 f_c^* = 割増し許容圧縮応力(N/mm²)、 F = 許容値 = Min. [$S_y, 0.7S_B$]、
 S_y = 当該材料の降伏点/0.2%耐力(N/mm²)、 S_B = 当該材料の引張強さ(N/mm²)、
 σ_c = 部材圧縮応力(N/mm²)、 σ_b = 部材曲げ応力(N/mm²)、 σ_t = 部材引張応力(N/mm²)、
 τ = 部材せん断応力(N/mm²)、 P_L = 1 次局部膜応力強さ(N/mm²)、 P_b = 1 次曲げ応力強さ、
 Q = 2 次応力強さ(N/mm²)、 S = 耐震設計用許容応力(N/mm²) (→レベル 1 配管指針 表 16.2)、
 S_T = トータル応力強さ(N/mm²)、
 N = 当該部材の軸圧縮力(N)、 N_c = 柱座屈強度の最小値(N)、 N_y = 柱降伏強度の最小値(N)、
 N_r = 最小柱強度(N) (= Min. [N_c, N_y])、 σ_y = 材料の降伏点/0.2%耐力(N/mm²)
 N_E = 柱のオイラ座屈強度(N) (= $\pi^2 EI / \ell_k^2$ 、ここで EI = 曲げ剛性、 ℓ_k = 座屈長さ)
 M_x = 強軸廻りの曲げモーメント(N·mm)、 M_y = 弱軸廻りの曲げモーメント(N·mm)
 M_p = 曲げモーメント単独作用における全塑性モーメント(N·mm)、
 M_{pc} = (軸力 + 曲げモーメント)作用における全塑性モーメント(N·mm)、
 M_{pcx} = 強軸廻り曲げモーメント単独作用における全塑性モーメント(N·mm)、
 M_{pcy} = 弱軸廻り曲げモーメント単独作用における全塑性モーメント(N·mm)、

M_1 ＝柱両端に作用するモーメントのうち絶対値が大きい方の値(N・mm)、

M_2 ＝柱両端に作用するモーメントのうち絶対値が小さい方の値(N・mm)、

M_{cr} ＝軸圧縮力がない場合の横座屈強度(N・mm) (→箱形断面/鋼管の場合あるいは弱軸廻りに曲げを受ける H 鋼の場合は $M_{cr}=M_p$ とする。詳しくは塑性設計指針参照)

C_M ＝曲げモーメント分布により定まる係数(→強軸廻りに曲げモーメントを受ける時は下記)

$$C_M = 0.6 + 0.4M_2/M_1 \geq 0.4 \quad (\text{曲げ捩れ支配})$$

$$C_M = 1 - 0.5(1 - M_2/M_1)(N/N_E)^{0.5} \geq 0.25 \quad (\text{弾性理論ベース})$$

A_w ＝ウェブ断面積(mm²)、 A ＝部材全断面積(mm²)、

【 チャート 2 の補足説明 】

- (※1-1) ステップ 1 では、指針③の[6.1 第 1 設計地震動の強さ]に従って配管系の解析に必要な地震慣性力/相対変位のベースとなる地表面における地震動を**震度**の形で与える。水平 150gal 垂直 75gal に相当する表層地盤下の震度 0.15, 0.75 に係数 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ および μ_k を乗じて地表面の震度とする。

重要度係数 β_1 は内容物の重量/ガスの種類/敷地境界距離/接続機器の重要度分類から決まる。詳しくは指針①の 3. の[図 3.1 重要度の分類決定手順、表 3.1～3.4] 及び指針③の[表 6.1-1]を参照のこと。

地域係数 β_2 は地域区分によるもので指針③の[表 6.1.2]を参照のこと。B,C 地区ではレベル 1 よりも高くなる。

表層地盤増幅係数 β_3 は地盤下の地震動が表層を通過する時の応答倍率を示すもので指針①の[表 3.6 および 表 4.4, 図 4.4, 図 4.5]及び指針③の表[表 6.1.3]を参照のこと。

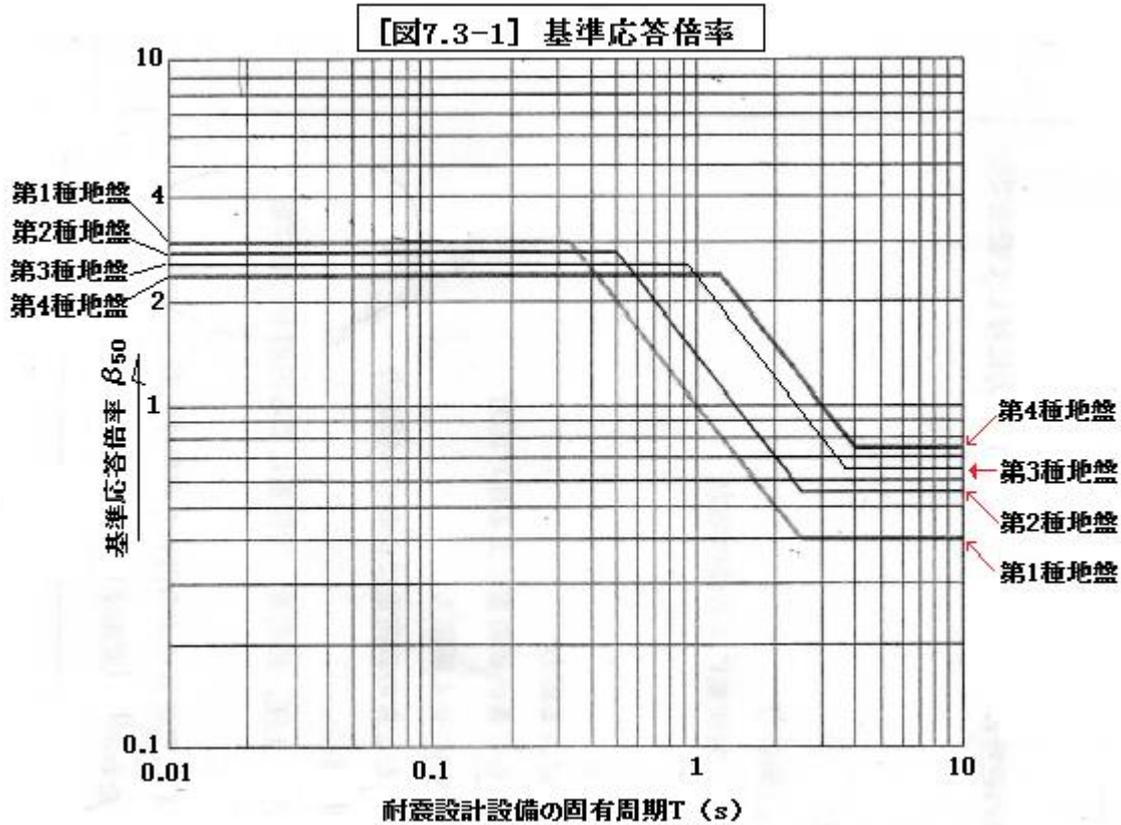
地震動のレベルに基づく係数 μ_k はレベル 1 の 2 倍以上即ち 2.0 以上とされるが、**耐震関連通達では当面 2.0 で運用**となっている。

[蛇足ながら、第 2 設計地震動は平底円筒形貯槽に適用されるので、配管とは直接関係しない。]

- (※2-1) 地表面から入力した地震動は配管支持構造物(サポート/塔槽類/架構類)を経て配管に伝播する。この場合、配管支持構造物の固有振動数と地震周波数が漸近すると地表面から入力された地震動が増幅されることがある。そこでステップ 2 では支持構造物の固有周期(固有振動数の逆数)を算定し、応答スペクトル図(固有周期－応答倍率関係)から**基準応答倍率**を求める。そして更に構造物の減衰効果を見込み、(地表面の震度)x(支持構造物の応答倍率)x(減衰による補正係数)から支持構造物における震度を設定する。なお固有周期計算を割愛する場合や配管支持点が高い場合についてもそれなりの措置を行なう。
- (※2-2) 塔槽類の固有周期については指針②第 II 章の[1.2.3 耐震設計設備の固有周期]によるものとする。規定に該当しない時は固有値解析による。
- (※2-3) 基準応答倍率は指針③の図 7.3-1 で与えられる。横軸に支持構造物の固有値解析や公式計算で得られた固有周期を用いて縦軸の基準応答倍率 β_{50} を読み取る。このグラフの左側の短周期部分は本来左側に下がっているが、ここでは地震時に構造物が塑性化して長周期に転じるのを警戒してフラットに伸ばしている(→安全措置)。添付図参照のこと。
- (※2-4) 表 6.1-4 の各種構造物の減衰係数から図 6.1-2 の補正係数 C_h を読み取る(添付図表参照)。

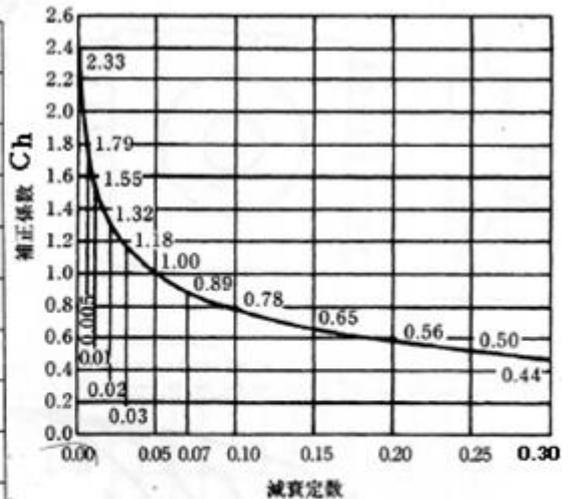
(*2-5) 塔槽類の場合、応答倍率 $\beta_5 (= C_h \beta_{50})$ は、その時の固有周期 T と β_5 値に応じて補正する必要がある。補正の方法は指針②第II章の図1.5の下部分に示されている(添付図参照)。ただ指針にはこの補正の意味が記載されていない。一応、架構類にもこの補正措置を適用する。

(*2-6) 以上で得られた応答倍率は機支持構造物の重心(?)で想定されたものとするば配管支持高さによっては β_5 は変化する。そこで指針①第II章の図2.3のチャートから分布係数 μ を求め β_5 に乗じて補正を加える(添付図参照)。



[表6.1-4] 塔類、球形貯槽、横置円筒形貯槽及び架構の減衰定数

耐震設計設備の種類		減衰定数	
塔類	Tが1.0未満のもの	0.03	
	Tが1.0以上1.5未満のもの	$0.07 - 0.04T$	
	Tが1.5以上のもの	0.01	
球形貯槽	ブレースが溶接接合のもの	0.03	
	ブレースがピン接合のもの	0.05	
横置円筒形貯槽		0.07	
架構	鋼構造のもの	ブレースを有する構造のもの	0.05
		ブレースを有しない構造のもの	0.03
	鉄筋又は鉄骨コンクリート構造のもの	ラーメン構造のもの又はこれに準ずるもの	0.05
		壁量の多いもの又はこれに準ずるブレースを有するもの	0.10



[図6.1-2] 補正係数と減衰定数の関係

(注) $T =$ 固有周期(s)

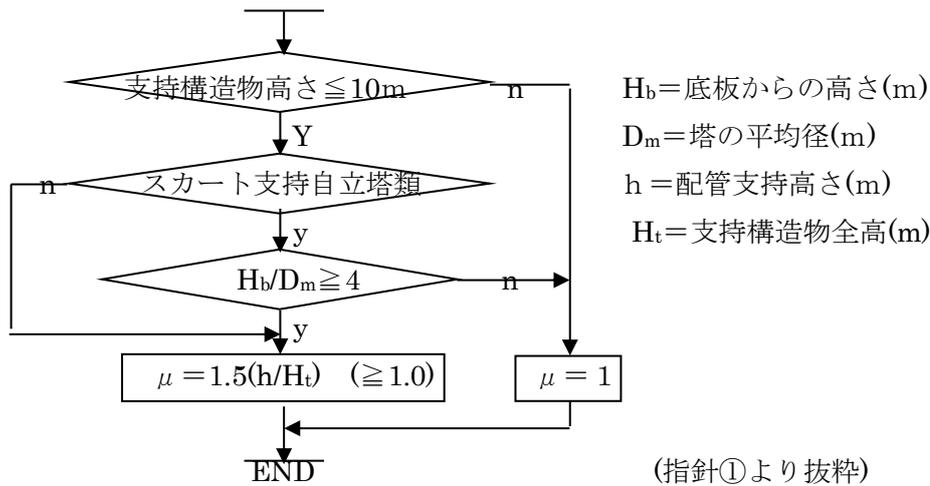
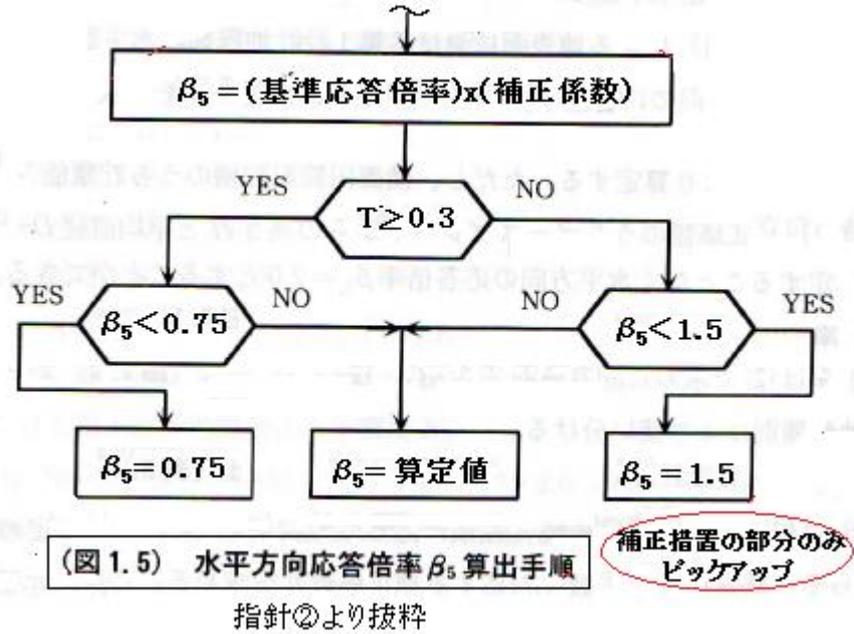


図 2.3 配管支持構造物を修正震度法で解析する場合の震度分布の求め方

(*3-1) 各配管支持構造物で増幅された震度(修正震度)は配管支持点から配管に伝達されるが、配管自身も固有振動を持つので配管支持構造物と同じように震度は更に増幅される。この場合も支持構造体と同じように固有値解析を行って固有周期を推算して応答倍率を求めるか、モーダル応答解析を行って直接応答倍率を求めてよいが、配管の動的解析は煩雑なので、一率 2 倍の応答倍率を支持点から入力された支持構造物の修正震度に乗じて配管の修正震度とする。この場合、支持部分等でエネルギーの逸散効果が期待できる場合は水平震度につき 1.5 倍の応答倍率をとることができる。

しかし支持構造物としての塔槽類が架構の上に乗っているときは架構+塔槽類の連成応答を考える必要がある(厄介である)。その場合、配管の応答倍率を乗じる前に架構に対する塔槽類の応答倍率を求める必要がある。

(*3-2) 架構に対する塔槽類の応答倍率 β_7 は、指針②第 II 章の[1.2.4.3 架構に支持される塔槽類]の式 6.32 で与えられる。即ち

$$\text{応答倍率 } \beta_7 \text{ 式: } \beta_7 = 0.71[(1 + \lambda^2) \{ \lambda^2 + (1 - \lambda^2) h_c^2 \}]^{0.5}$$

ここで、 λ = 固有周期 T_a/T_s 及び重量比 γ に拠るパラメータ(表 6.5)

T_a = 塔槽類の固有周期(sec)----指針②の 1.2.3 項による

T_s = 架構の固有周期(sec)----指針② 式 6.22、式 6.23 による

γ = 架構重量比----- 指針② 図 1.17 の⑤の例による

h_e = 架構類の減衰定数による値-----指針② 図 6.4 による

λ の算定手順は下記の例による。

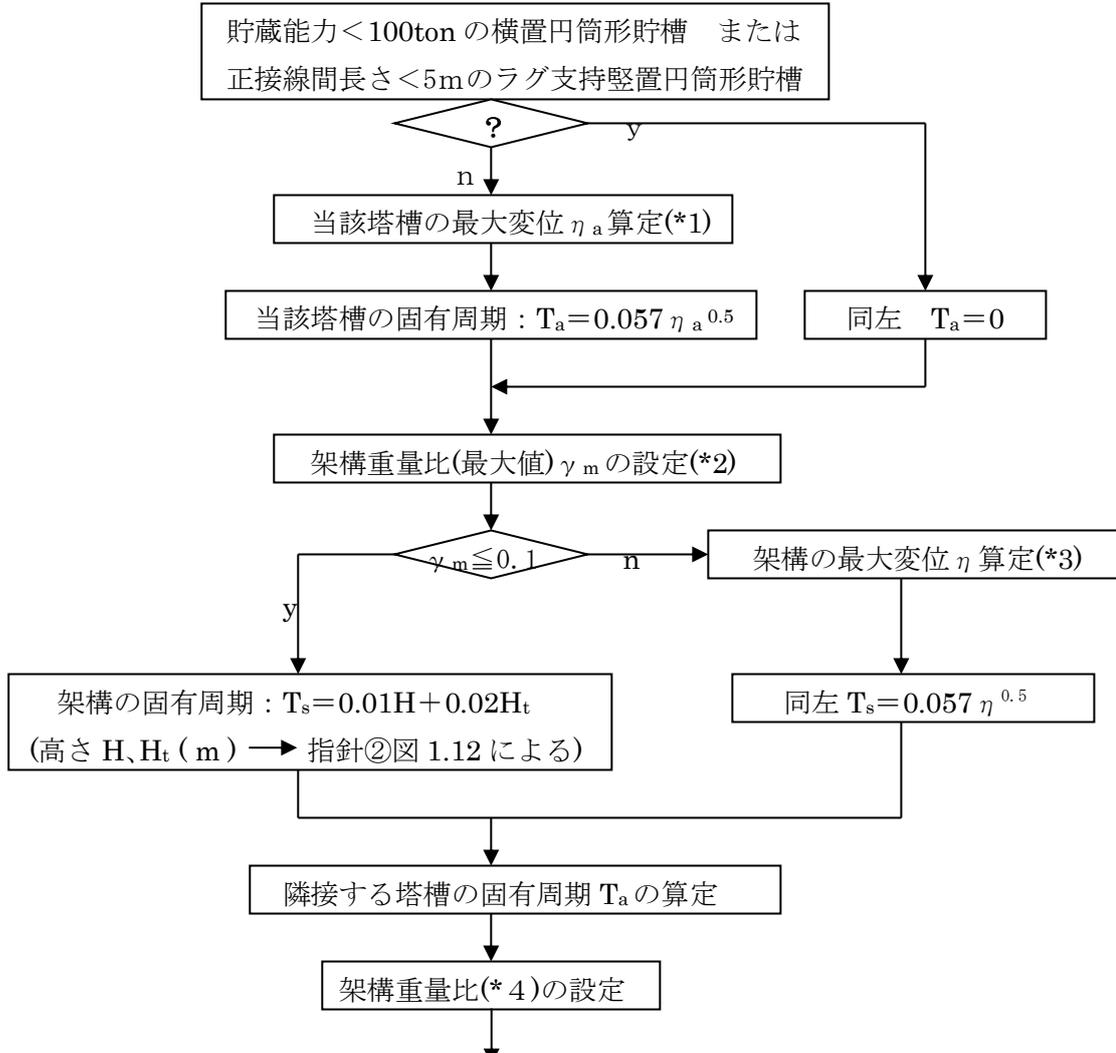


表 6.5 λ の値

T_a の範囲	λ 値
$T_a \leq 0.36T_s$	$\lambda = (0.52 + 0.48\gamma)^{0.5}$
$0.36T_s < T_a \leq 0.9T_s$	$\lambda = [1 - (1 - \gamma)\{(1.8T_aT_s)/(T_a^2 + 0.81T_s^2)\}^2]^{0.5}$
$0.9T_s < T_a \leq 1.1T_s$	$\lambda = \gamma^{0.5}$
$T_a > 1.1T_s$	$\lambda = [1 - (1 - \gamma)\{(2.2T_aT_s)/(T_a^2 + 1.21T_s^2)\}^2]^{0.5}$

(*1) 架構を剛とみなし、当該塔槽類にその運転重量を水平方向に作用させた時の最大変位

(*2) $\gamma_m = \text{Max.}[W_1/W, W_2/W, W_3/W, \dots, W_i/W]$

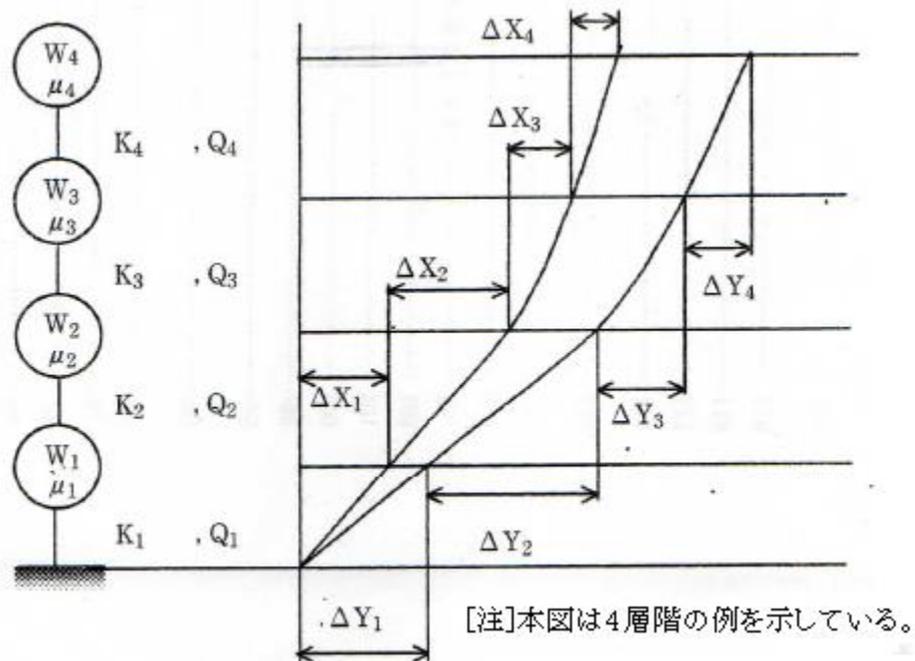
ここで $W_1, W_2, W_3, \dots, W_i$ = 当該架構上の各塔槽類の運転重量

$W = \text{全重量} = (W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_i) + W_s$ (但し W_s = 架構重量)

(*3) 架構の重量を水平方向に作用させた時のその架構の変位を云う。

(*4) 指針②図 1.17 の⑤に拠る。隣接する塔槽の固有周期が共振域にいる場合はこれも当該塔槽の重量に合算して求める。即ち、 $\gamma = (\text{当該塔槽重量} + \text{隣接塔槽重量}) / \text{全重量}$ 。

(*4-1) 配管支持構造物では地震加速度(震度)の増幅とともにそれ自身の揺れによって配管支持点に相対変位(→配管側静止として)が強制的に加わる。基本的にはこの相対変位は解析から得られるものであるが、指針①の[3.6 配管支持構造体の地震時変位]に一連の簡易式が与えられているのでこれを積極的に利用した方がいい。ただしいずれにしても支持構造物の弾性挙動を前提としているので、構造物(塔槽類/架構)の塑性変形を見込んで算定された変位量を修正する必要がある。なお



(*4-2) 簡易式ではいずれも地表面の水平震度 K_H を用いているが、修正震度 K_{MH} を用いるべきでは? という疑問が残る。一応、原式の通り K_H としておくが、更に調査して確認する必要がある。

(*4-3) 簡易式で得られた配管支持構造体(塔槽等)の変位量 δ_{sMH} は弾性計算によるものなので、更に塑性化に対処して修正を行う必要がある。その場合、構造体の各損傷モードに係る降伏震度(部材の降伏時の設計水平震度) K_y と最大の応答塑性率(=塑性変位÷降伏変位) μ_p が必要になるが、これらに関しては指針③の第I章 [8. 耐震設計設備のレベル2 耐震性能評価]に算式が与えられている。

(*4-4) 架構の場合は手順に従いまず各層の床変位を求める(かなり手順は複雑)。次いで階床から配管支持点までの支持構造物に生じる上乗せの相対変位を求める。支持構造物の高さが低ければ上乗せは必要ないが、高ければ 前述の簡易式などを使用して上乗せ分をカウントして床変位に加算する。なお架構とこれに搭載された支持構造物は同時に地震方向に動くものとする。

(*5-1) 配管系の解析ではまず当該配管のモデル化が先行する。原則的にはモデル化の範囲は アンカ to アンカ である。ただ力学的に妥当性があるならこの限りでないとされる。たとえば6成分拘束のアンカ機能に近い機能をもった拘束サポートの組合せなどが考えられる(但し固定機能を実証する必要がある)。一般にモデル化を行う場合、認識しておくべきは、

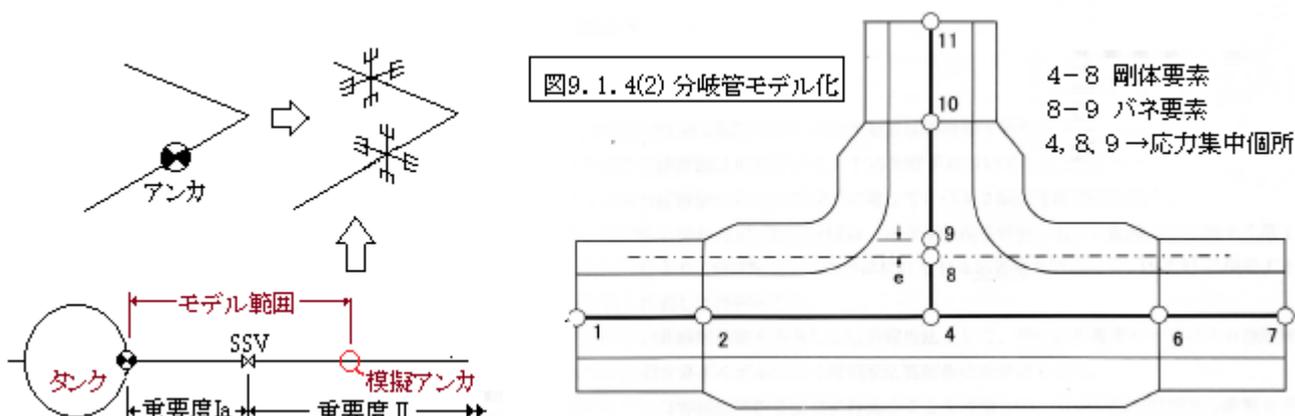
- ① 地震防災弁で区切られた耐震性能評価の範囲とアンカ区間が必ずしもマッチしないこと
- ② 同じく地盤の液状化の範囲とアンカ区間がマッチしないこと
- ③ 配管中途に設けたアンカには両サイドの配管から反力がかかること

配管は多様なので一概には云えないが、このために余分なあるいは付帯的なモデル解析が必要になることも多い。ただ①のケースでは、一つのアンカ区間に重要度の高い Ia や I の短い区間とそれより低い II や III の冗長な区間が繋がっている場合、“力学的な妥当性”が認められる範囲で重要度 II, III 区間の不必要部分を割愛してモデルを短縮することも可能である。

各配管要素のモデル化については通常行われている要素のモデル化と殆ど同じとおなじであるがレベル 2 地震動に対し塑性化の影響をリアルにとらえる意味で、分岐部と曲がり部のモデル化を再考する必要がある。この場合、分岐部については

指針③ 9.1 の(4) ①分岐管のたわみ性の算定 ②配管系の応力解析における分岐管のモデル化に詳しい情報がある。なお①で与えられる分岐管のたわみ係数式は ASME Sect. III の NB3686 の式を引用したもので小径分岐の場合効果がある。②は分岐部モデルを細かくして応力評価の確度をアップしたと思う。

曲がり部については、指針③の 9.1 の(3)に曲がり管の可撓性に詳しい説明がある。ただたわみ性係数の計算で配管仕様上の公称肉厚 t を用いるのは疑問で、実際肉厚を用いるべきではないかと思う。たわみ性係数を実際より大きく見積る恐れがある。



(*5-2) 配管系のレベル 2 耐震性能評価に際して認識しておくべき解析条件は以下の通り。+

- ① 解析では、通常荷重(内圧,自重,場合によって熱膨脹拘束など)と地震による地震慣性力および相対変位を組み合わせて入力する。基本的に他の短期荷重と組み合わせることはない。
- ② 荷重の組み合わせは配管構成要素に対し設定された損傷モードによって決まる。基本的には荷重の組み合わせには 3 通りある。これについては(*5-4)で説明する。
- ③ 荷重の組み合わせに従って解析の段階でモーメント・フォース等を合算し評価対象としての応力/変形量を求める。これは、レベル 1 性能評価のときのように個別荷重について応力を求めその絶対値を合算するとかなり現実から逸脱する傾向があるからである。
- ④ [通常荷重(内圧+自重)+地震慣性力]及び[地震慣性力+相対変位]については応力的に厳しくなる組み合わせ方向で扱う。なお[地震慣性力+相対変位]については両振幅(P-P)をとる。
- ⑤ 計算に使用する地震慣性力は基本的に、配管の応答倍率 \times 支持構造物の修正震度 \times 配管重量である。詳しくは後述(*5-3)で説明する。
- ⑥ 基本的に支持部分に常在する非線形要素(摩擦/摺動/ガタ)は解析に含めない。解析ソフトによってはこれを入力できるようになっているものがあるので注意。
- ⑦ 塔槽類のノズル部についてはアンカで扱い相対変位はアンカ変位として入力する。容器側のシェル挙動をバネ定数で表わし弾性境界として扱うことがあるが、レベル 2 では塑性流動

化がおきて曲がり管のような反復処理が必要になり処理が難しい(弾性境界は設定しない)。

(*5-3) 地震慣性力は前述のように [配管の応答倍率 x 支持構造物の修正震度 x 配管重量] すなわち

$$\text{水平地震慣性力} : F_{MH} = \beta_8 \cdot \mu \cdot K_{MH} \cdot W、 \quad \text{鉛直地震慣性力} : F_{MV} = \beta_9 \cdot K_{MV} \cdot W$$

実際には配管支持点毎に[配管の応答倍率 x 支持構造物の修正震度]が異なるので、2区間の配管重量に次のように単純に平均化された[配管の応答倍率 x 支持構造物の修正震度]を乗じる。

$$\text{水平方向} \quad \beta_8 \mu K_{MH}(\text{Av.値}) = \{(\beta_8 \mu K_{MH})_j + (\beta_8 \mu K_{MH})_{j+1}\} / 2$$

$$\text{鉛直方向} \quad \beta_9 K_{MV}(\text{Av.値}) = \{(\beta_9 K_{MV})_j + (\beta_9 K_{MV})_{j+1}\} / 2$$

(但し j, j+1 は連続の支持点番号を示す。)

解析ソフトでは各配管支持点に[配管応答倍率 x 支持構造物の修正震度] $\beta_8 \cdot \mu \cdot K_{MH}$ 及び $\beta_9 \cdot K_{MV}$ を入力し、上記の地震慣性力は内部で自動計算される。

(*5-4) 解析は次の3つの荷重ケースについて実施される(実質上、荷重ケース=解析ケース)。

荷重ケース① [通常荷重(内圧+自重)+地震慣性力]

荷重ケース② [地震慣性力+地震変位]

荷重ケース③ [通常荷重(内圧+自重+熱膨脹)+地震慣性力+地震変位]

荷重の組み合わせは損傷モードの評価アイテムからきたもので、次のような関係がある。

部材 (損傷形態)	評価アイテム	荷重ケース
曲がり管 (塑性変形)	変形角度	①, ②
分岐部 (亀裂)	応力/応力範囲	①, ②
フランジ継手 (ガス漏洩)	ガスケット面圧	②
伸縮継手 (損傷)	応力範囲(疲労)	②
塔槽類ノズル部 (損傷)	応力/応力範囲	①, ②
サポート耐圧部 (損傷)	応力/応力評価	①, ②
サポート非耐圧部 (損傷)	部材荷重/応力	③
支持部直管 (亀裂)	応力/応力範囲	①, ②

荷重ケース①では1次応力を、荷重ケース②では(1次+②次)応力範囲を、荷重ケース③では全荷重あるいは全応力を求めて各損傷モードを評価する。

実際の荷重ケースは地震方向を考慮すると複雑になる。下記に荷重ケース①②の例を示す⁶⁾。

表 5.4 AutoPIPE における慣性力および応答変位の組合せ

応力の種類	地震方向	組合せ	
長手方向応力 σ_1	X 方向	PW+X+Y	PW+X-Y
		PW-X+Y	PW-X-Y
	Z 方向	PW+Z+Y	PW+Z-Y
		PW-Z+Y	PW-Z-Y
繰り返し応力範囲 σ_E	X 方向	+X+Y+DX	+X+Y-DX
		+X-Y+DX	+X-Y-DX
		-X+Y+DX	-X+Y-DX
		-X-Y+DX	-X-Y-DX
	Z 方向	+Z+Y+DZ	+Z+Y-DZ
		+Z-Y+DZ	+Z-Y-DZ
		-Z+Y+DZ	-Z+Y-DZ
		-Z-Y+DZ	-Z-Y-DZ

表5.4の記号説明

W	:GR、自重(管重量、保温材重量、内部流体重量) ✓
P	:Px、内圧
±X	:E1、X方向の慣性力
±Z	:E2、Z方向の慣性力
±Y	:E3、Y方向の慣性力
±DX	:S1、X方向の慣性力による配管支持点の応答変位
±DZ	:S2、Z方向の慣性力による配管支持点の応答変位

(解析ソフト AutoPIPEの説明書より)

表 5.4 の繰返し応力範囲では、個々の荷重組み合わせから得られる部材のモーメント・フォースは片振幅分なのでその 2 倍のモーメントフォース(両振幅)が繰返し応力範囲 σ_E のソースになる。一方長手方向応力では個々の荷重組み合わせから得られるモーメント・フォースがそのまま応力のソースになる。

(*5-5) チャート 1 の全体流れの補説(*4)で述べたように、配管系の非線形挙動を模擬するために各曲管について次のような反復操作を行い等価たわみ性係数 k_p を収束させる(固定する)。

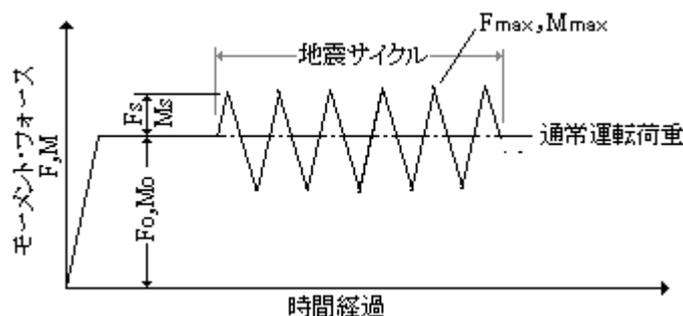
k_p 値の仮定 → 配管解析 → 角変位 → k_p 値の算定 → k_p の算定値と仮定値の比較

各荷重ケースにつき係数 k_p の仮定値と解析結果が一致するまで、配管解析を繰り返すことになるのでコンピュータ処理にしる、かなり仕事量になると思われる。なお既存の解析ソフトのロジックと照合していない。実際はもっと複雑になると思う(この部分はあくまで参考として見てほしい)。

(*6-1) 実際にはこの評価作業は(*5-5)の中に含まれると思う。許容曲げ変位角 θ_a はレベル 2 耐震性能評価で共通する許容相当塑性ひずみ 2% から導かれている。この許容値は荷重ケース①,②とも同じと思われる。指針③の表 9.2.4(1)によく使われる 90° ロングエルボ(Sch40)の許容値が記載されているが、管サイズがアップするにつれ 1.7 度から 2.5 度に変化している。指針③の[9]に曲がり管のたわみ性係数や曲げ変形角について詳しい説明があるので確認されたし。

(*7-1) 分岐管では荷重ケース①に対し長手 1 次応力 σ_l 、荷重ケース②に対し(1 次+2 次)応力範囲 σ_E が評価対象になる。 σ_l は 1 次(膜+曲げ)応力であり本来 3x 耐震設計用許容応力(3S)で制限できるが膜成分が大きくなる傾向があるので 2S で制限している。この辺りは(*10-1)を参照のこと。

(*8-1) フランジ継手は直管/曲管/分岐管のようなパイプ要素に較べ強度があり荷重ケース①による延性破断や荷重ケース②による疲労損傷が問題になることは少ない。唯一評価対象になるのは地震時のガスケット面圧低下に由るガス漏洩発生の可否である。



(*8-2) 上図に示すように地震時に配管に生じるモーメント・フォースのピーク M_{max}, F_{max} は運転時のモーメント・フォース M_o, F_o に地震サイクルで生じる片振幅のモーメント・フォース M_s, F_s が加算されたもので、この M_{max}, F_{max} から得られる等価圧力 p_e によって地震時の漏洩の可否が決まってくると思われる。然るに、指針③の 9.2.4.2 の記述によれば等価圧力 p_e は地震サイクルの M_s, F_s (→チャートでは M, F で表示) が取られている。これは地震時に多少の漏れが起きても漏洩期間は短いので、地震サイクル中の M, F を用いて等価圧力 p_e を計算して十分という判断があるようだ。

(*8-3) 指針③の解説では、基本幅 $b_o > 6.4$ の時のガスケット平均径 $D_e (= D + 2(N - b))$ のみが記されているが、JISB8265 付属書 G などのフランジ設計規格では $b_o \leq 6.4$ の規定も含まれているので、ここではフランジ設計規格通りにしている(実質的な違いは少ないと思うが念為)。

(*8-4) フランジ設定規格ではガスケット締付け時に必要なボルト荷重を規定している。ここでは

$$W_{m2} = \pi b G y \rightarrow y = W_{m2} / (\pi b G) \rightarrow \sigma_a = W_b / (\pi b D_e) = A_b \sigma_b / (\pi b D_e)$$

としてこの規定を運用している。

(*9-1) 地震時に伸縮継手(実質上ベローズ継手)に発生する一次応力は軽少なので荷重ケース①が問題になることはなく、地震サイクル中に大きな変位応力が繰返される荷重ケース②が評価対象になる。即ちレベル 2 地震動の想定サイクル 50 回で疲労破壊が起きないことが耐震上の要件になる。その場合、通常の疲労評価では部材に生じる応力振幅 S_{alt} を算出し設計疲労曲線(SN 曲線)から S_{alt} における疲労寿命サイクル N_f を求めこれと実際の繰返しサイクル N を比較して疲労の可否を判断するが、ここでは疲労寿命サイクル 50 回に対応する許容応力振幅 S_a をセットして算出された S_{alt} と比較して疲労の可否を判断している。実質的にはこれは通常の疲労評価と同じである。

(*9-2) ベローズの軸方向、軸直角方向の変位 x, y あるいは回転変位 θ によって例えば次のような等価な軸方向変位/1 山が派生する。

$$e_x = x/N, e_y = 3D_m y / N(Nq + x), e_\theta = \theta D_m / (2N)$$

(ここで N =山数、 D_m =ベローズ平均径、 q =山ピッチ)

解析モデルに対する地震動の向きによっていろいろ組み合わせはあるが、これら成分を合算することで等価な軸方向変位範囲 e_{max} が得られる。詳しくは米国伸縮継手協会規準 (EJMA C-1 節) や ASME Sect. VIII Div. 1 Appendix 26 など参照のこと。なお蛇足ながら地震相対変位が軸方向または軸直角方向に取られるときは、 e_x と e_y の組み合わせは生じない(念為)。

(*9-3) JISB8266 付属書 8 の設計疲労曲線によれば疲労寿命 50 サイクルにおける許容応力振幅 (0-P) S_a は以下のようなになる。

・炭素鋼/低合金鋼/フェライト系ステンレス鋼など→

$$1896 N/mm^2 \quad (S_u \leq 551.6 N/mm^2), \quad 1586 N/mm^2 \quad (896.3 > S_u > 792.9 N/mm^2)$$

・オーステナイト系ステンレス鋼、ニッケル基合金など→ 2379 N/mm²

(*9-4) ベローズは撓性部材であるが、ハードウェア (ロックボルト、タイロッド、補強リング、調整リング、ヒンジ、ピンなど) は、変位拘束等によって大きな局部モーメント・フォースが

加わって変形し機能喪失が起きる恐れがあるので、ベローズとは別個にチェックする必要がある。なお当該ベローズ継手が通常品で機能喪失の防止能力がないときは、配管形状や配管サポートを工夫してベローズ変位を許容限界以下に調整する必要がある。

(*10-1) 直管部や分岐部と同じようにノズル部の応力を制限することで、ノズル廻り(シェル側)の高ひずみによる座屈などの不安定現象を回避する。即ち、

荷重ケース① → 1次局部膜応力強さ(P_L+P_b) $\leq 3S$

荷重ケース② → (1次応力強さ+2次応力強さ範囲(P_L+P_b+Q)) $\leq 4S_y$

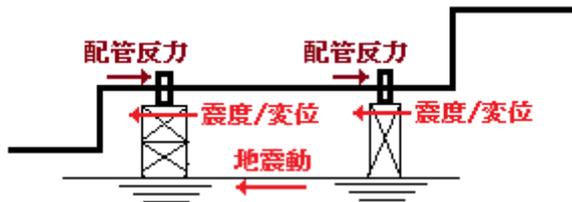
応力の算定はパイラード法ないしFEMによるものとする(ここではパイラード法ベースで記述している)。荷重ケース①の制限値3Sは高めの印象があるが、これは本来1次曲げ応力 P_b が2次応力的であるためである。レベル1耐震性能評価でも(P_L+P_b)に対しSではなく1.5Sがとられている。因みにレベル2の許容値はレベル1の2倍にとられるが、この場合も1.5S→3Sになっている。なおSは指針①の表16.2で定義される耐震設計用許容応力である。

例えばステンレス鋼では $S = \text{Max.}[S_y, 0.6S_u]$ (ここで S_u は引張強さ)

である。2Sの場合2 S_y あるいは1.2 S_u であるから材料強度限界に近いと云える。

荷重ケース②の $|P_L+P_b+Q|$ は地震サイクルにおける最大-最小の応力強さの差引(範囲)でいわゆるP-Pの全応力振幅である。レベル1ではシェークダウン限界の2 S_y が制限値になっているのでその2倍の4 S_y がレベル2の制限値になっている。

(*11-1) 配管サポート点(配管支持点)は配管支持構造物と配管の接点であって地表面から入力した地震動(加速度&相対変位)はすべてこのサポート点を経由して配管に伝播する。そしてこれに対するリアクションとして配管反力(モーメント・フォース)がサポート点に戻ってくる。指針で云うサポートの慣性力に係る荷重条件はこの配管反力を云うが、ここでは単にサポート荷重と呼ぶ。本ステップではこのように設定されたサポート荷重を用いてサポートの構造計算を行い、その結果得られたサポートの部材力(モーメント・フォース)や応力を評価対象においてレベル2耐震性能評価を実施する。なおサポートは、溶着部品/取付け金具/支持具/架構など多くの部材から構成されているので、実際は個々の部材をタイプに応じて評価してゆくことになる。



(*11-2) サポートの構造計算/解析のため、当該サポートの各サポート荷重を配管解析時の入力荷重(配管荷重ソース)の組み合わせに対応して集計する。

[表 9.2.4 (4)] サポート配管の荷重条件 レベル2指針より抜粋

荷重の種類 (配管荷重ソース)	耐圧部	非耐圧部
配管自重	○	○
配管熱応力荷重		○
地震時配管慣性力	○	○
地震時支持構造物の相対変位に基づく荷重	○	○

溶着部品(シュー/サドル/ラグ/トラニオン等)は耐圧部に分類されるので

[配管自重+配管地震慣性力]及び[配管地震慣性力+支持点地震相対変位]範囲に準じてサポート荷重を集計することになり、前者は地震時の1次応力を、後者は地震サイクル中の(1次+2次)応力範囲をカウントすることになる。このやり方は配管側とほぼ同じで、配管と同様に限界強度の保持と過度な塑性変形を防止することになる。

溶着部品を除けばサポートの大半は非耐圧部になり、配管荷重ソースの組み合わせとしては、

- ① [配管自重+配管熱荷重+配管地震慣性力+支持点地震相対変位] (長期+短期→全荷重)
- ② [配管自重+配管地震慣性力]及び[その他の荷重]

などが考えられるが、指針に具体例が見当たらず確定できない。ここでは①をとってサポート荷重を集計するものとする[末尾注記 C 参照]。

(*11-3) 各サポート部材の評価(荷重制限)は、当該サポートのサポート機能によって違ってくる。

サポート機能には次の4つがある。

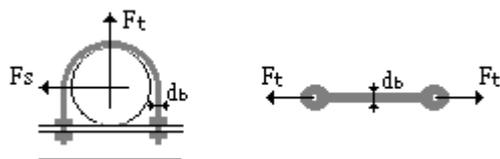
- ① 配管支持機能 →配管の重量を支持し大きな撓みや移動を拘束(→通常の支持装置)
 - ② 配管固定機能 →配管を分割し互いに孤絶する(→6成分拘束アンカ/機器ノズル部)
 - ③ エネルギー吸収機能 →動的吸振/摺動抵抗などにより衝撃を緩和する(→粘性ダンパ等)
 - ④ 支持力解放機能 →衝撃回避/免震のため支持拘束を放棄する(→ギロチンダンパ等)
- ④は[地盤変状]に係るのでここでは割愛。これらサポート機能に応じ配管反力、部材力ないし部材応力は制限される。即ち

- ① 配管支持機能→限界荷重(限界応力)以下、クレビス等の部品は降伏応力以下。
- ② 配管固定機能→降伏荷重(降伏応力)以下。
- ③ エネルギー吸収機能→応答変位を許容変位以下、塑性変形に対し吸収エネルギー能力以下。

エネルギー吸収機能については製品試験の結果を用いることになる。なお、配管固定機能については降伏荷重(部材の降伏時の荷重)以下と低めにサポート部材力を抑えているが、これはアンカ等に過度な変形がでて前後配管が乱れてしまうのを防止する意味があると思われる。

(*11-4) Uボルトやロッドのように直接、配管反力から評価できるケースもあるが、殆どの場合、解析や材力計算からサポート構成材の応力レザルトant(モーメントフォース)や応力を求める必要がある。サポート架構の構造計算は配管支持構造物の例による(動的効果を考慮する)。

(*11-5) Uボルトの場合、下図のように配管反力(F_t, F_s)を直接用いて限界荷重や降伏荷重と比較する。ロッドの場合はロッドの軸力(F_t)を用いて限界荷重や降伏荷重と比較する。



なおUボルトやロッドなどの非一体型取付け金具は配管固定機能サポートに使用されることはほとんどないが、例外もあり得るのでここでは固定機能サポートでも扱う。

(*11-6) その他非一体型取付け金具(クランプなど)については耐震告示[高圧ガス設備等耐震設計基準]の第16条3号イの表16.9/表16.10の規定を準用する。鋼構造設計規準の式を用いているが、限界荷重相当の許容応力としては $f_t = f_b = 1.5F$ (降伏応力の1.5倍)、降伏荷重相当の

許容応力としては $f_t = f_b = F$ を用いて評価する。 f_c^* についてもこれと同じように $f_c^* = 1.5 \times 1.5f_c$ 及び $f_c^* = 1.5f_c$ を用いればよいが、ここでは安全側に何れも $f_c^* = 1.5f_c$ とする。なお f_c は鋼構造設計規準(建築学会)で用いる許容圧縮応力(座屈応力)である。

(***11-7**) 基本的には耐圧部なので直管相当と同じ制限になる。即ち1次応力強さ($P_L + P_b$)に対して圧力容器構造規格値 S_y の2倍相当($\rightarrow 2x$ 耐震設計用許容応力 S)、(1次+2次)応力強さ範囲 $|P_L + P_b + Q|_{\text{range}}$ に対して圧力容器規格値 $2S_y$ の2倍相当($\rightarrow 4S_y$)を制限値とする。なお($P_L + P_b$)は[配管自重+配管慣性力]、 $|P_L + P_b + Q|_{\text{range}}$ は[配管慣性力+支持構造物相対変位]範囲による配管反力から得られる。この場合の部材の応力計算方法としては例えば、
 シュー/イア \rightarrow ASME C.C. N-318、トラニオン \rightarrow ASME C.C. N-392

(***11-8**) クレビス/ピン類については、殆ど変形吸収能がないので支持機能サポートでも固定機能サポートでも降伏荷重(応力)以下に制限している(塑性流動 \rightarrow 即時破断と考えている)。

(***11-9**) 配管のサポート架構は多種多様で、その評価も複雑になるが、もっともクリティカルになるのは圧縮-曲げと考えられる(引張に比べ圧縮による座屈が深刻になる)。そこで柱モードの圧縮-曲げを代表例として限界荷重(限界モーメント)による評価(制限)を例示している。この場合、鋼構造塑性設計指針(日本建築学会)の評価法が用いられる。即ち3つの曲げパターンについて、圧縮力 N の影響を取り込んだ全塑性モーメント M_{pc} を求めてこれを実際の曲げモーメントと対比させることで柱モードの部材の評価を行う(詳しくは原典を参照されたし)。

(***11-10**) 強軸と弱軸に同時に曲げモーメント M_x, M_y が作用するときの M_{pc} の算定は次の通り。

ステップ1) 強軸/弱軸それぞれ単独に全塑性モーメント M_{pcx}, M_{pcy} を求める。

ステップ2) 基本式 $(M_x/M_{pcx})^2 + M_y/M_{pcy} = 1.0$ を変形して

$$M_x = (1.0 - M_y/M_{pcy})^{0.5} M_{pcx}, \quad M_y = [1.0 - (M_x/M_{pcx})^2] M_{pcy}$$

ステップ3) 上式に M_{pcy} あるいは既知の曲げモーメント M_y を代入して M_x を、また

M_{pcx} あるいは既知の曲げモーメント M_x を代入して M_y を得る。

ステップ4) 上記で得られた M_x あるいは M_y の小さい方を M_{pc} とする。

(***11-11**) 配管支持機能については(***10-9**)で述べたように限定荷重で制限したが、配管固定機能についてはサポート架構の部材応力を降伏応力レベルで制限する。なお部材の設計式には鋼構造設計規準の解説に記載される式を適用する。

(***11-12**) エネルギー吸収機能材は商品化されたものが多くメーカーサイドの工場試験で性能が確認されているとする。なお吸収機能材以外のサポート部材には配管固定機能サポートと同じ制限が適用されるものとする。ここでは煩雑になるので手順は割愛する。

(***11-13**) 指針③の[8.2.2 損傷モード]には[(3)配管支持部における配管の亀裂]が記載されている。指針に説明はないが、例えば非一体型の金具を取り付けた場合、地震による荷重が集中して金具直下の管表面に作用する状態を指していると思われる。ここでは線形応力解析(FEM)やバイラード計算で得られた応力を溶着部品と同じように評価するものとする。

[末尾注記 A : エネルギー法の概要]

(1) レベル 1 地震動が 50～年 100 年に 1 回といった通常の地震の揺れであればレベル 2 地震動は数百年/千年に 1 度といった巨大地震で発生する揺れである。この揺れに対し通常の安全設計を適用すると耐えがたい設備コストになってしまう。そこで通常設計では考えられない塑性設計のコンセプトを取り込み高圧ガスの微少漏洩辺りまで制限を後退させたのがレベル 2 耐震性能評価ということになる。塑性設計即ち非線形の耐震解析評価法としては

- エネルギー法(→塑性率評価法,保有耐力評価法)、
- 等価線形応答解析法(→修正震度法,モーダル応答解析法)
- 非線形応答解析法(→時刻歴応答解析法など)

などがあるが、配管に限れば等価線形応答解析が一般的で、エネルギー法とは疎遠に見えるが、配管支持構造物が含まれるので、エネルギー法と無縁という訳ではない。文献(7)に大変わかりやすくエネルギー法の骨子が紹介されているので、更にこれを要約する形でエネルギー法の概要を以下に示してみたい。

(2) 等価線形/非線形応答解析は構造要素の力-変位の釣り合い方程式を解いて積み上げ的に応答量を求めるのにくらべ、エネルギー法はエネルギー保存則によるエネルギーの釣合から包括的に応答量を求めるもので、1 次の固有周期が卓越する塔槽類に向いている。ここでは 1 質点系で模擬して記述する。

振動エネルギーは $E=(1/2)MV^2$ で与えられるが、調和波では加速度 α と速度 V の関係は $A=\omega V$ であるから $V=\alpha/\omega$ となる。ここで角振動数は $\omega=2\pi f=2\pi/T$ (但し f =振動数, T =周期)なので、更に $V=\alpha(T/2\pi)$ が得られる。これを上記の E 式に代入すると、

$$E=(1/2)M\{\alpha(T/2\pi)\}^2 \quad (\text{但し } M=\text{質量})$$

地震の場合、加速度は $\alpha=gK$ で表される。 K は震度、 g は重力加速度である。故に地震では

$$\text{修正震度 } K_{MH} \text{ による総エネルギー: } E_t=(1/2)M\{gK_{MH}(T/2\pi)\}^2$$

$$\text{弾性,塑性の和としての総エネルギー: } E_t=W_y+W_p=(1/2)M\{gK_y(T/2\pi)\}^2+W_p$$

これらの式から次の降伏開始後の塑性域で吸収されるエネルギー W_p が得られる。

$$W_p=W_y\{(K_{MH}/K_y)^2-1\} \quad \text{-----}(a)$$

ここで W_y =降伏までに吸収される弾性エネルギーである。完全弾塑性体を仮定し、フォース F_y の作用によって最大変位 δ_{max} に至るまでに吸収される塑性エネルギーは、

$$W_{ps}=(\delta_{max}/\delta_y)\delta_y F_y-\delta_y F_y=\{(\delta_{max}/\delta_y)-1\}\delta_y F_y=\mu_p\delta_y F_y \quad \text{-----}(b)$$

ここで δ_y =降伏時の変位、 F_y =降伏荷重、 μ_p =塑性率である。塑性域の吸収エネルギー W_p は W_{ps} の繰り返しを積分して

$$W_p=2CW_{ps}=4nW_{ps} \text{ または } 2nW_{ps} \quad \text{-----}(c)$$

ここで C =復元特性係数、また等価繰返し数 n は構造物全体に期待できる塑性エネルギーの吸収効果に係る係数である。 W_p に限度があるので n が多いほど W_{ps} ($\rightarrow \delta_{max}$)は小さくなる(多少わかりにくいが n が大きいと減衰が大きくなって応答変位が減少すると考えればよいと思う)。一般には塔槽類で $n=1$ 、基礎構造物で $n=0.5$ とされる。

さて $W_p=2CW_{ps}=2C\mu_p\delta_y F_y$ において $W_y=\delta_y F_y$ なのでこれらを(a)式に代入し整理すれば

$$\mu_p=\{1/(4C)\}\{(K_{MH}/K_y)^2-1\} \quad \text{-----}(d)$$

また $\mu_p = \delta_p / \delta_y$ なので、塑性変形量 δ_p は次のようになる。

$$\delta_p = \{ \delta_y / (4C) \} \{ (K_{MH} / K_y)^2 - 1 \} \text{ -----(e)}$$

(d)(e)式は、C の値を損傷モードに応じて適切に設定すれば、荷重-変形が弾塑性でなくても 1 質点でなくともまた塑性変形が集中しても使用できる(式として融通性がある)。

塑性率評価法は (a)式から得られる塑性率 μ_p を実験/解析から得られる許容塑性率 μ_{pa} で制限するものである。即ち

$$\mu_p \leq \mu_{pa} \text{ -----(f)}$$

さて(c)式の左辺を(b)式に置き替え $\{1/(4C)\}\{(K_{MH}/K_y)^2 - 1\} \leq \mu_{pa}$ としこれを変形すると $K_y \leq \{1/(1+4C\mu_{pa})\}^{0.5} K_{MH}$ になる。これに構造物重量 W を乗じると

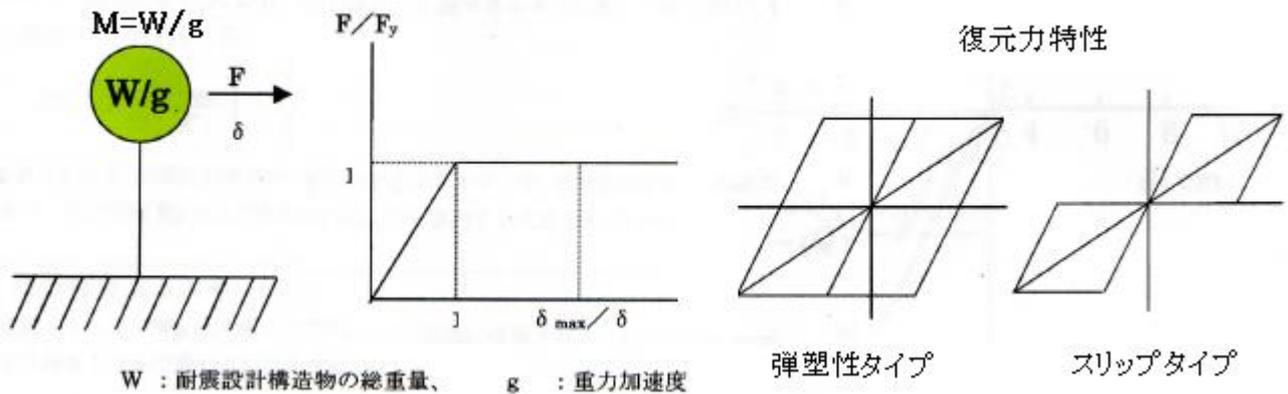
$$K_y W \leq \{1/(1+4C\mu_{pa})\}^{0.5} K_{MH} W \text{ -----(g)}$$

$Q_u = K_y W$ および $Q_{un} = \{1/(1+4C\mu_{pa})\}^{0.5} K_{MH} W = D_s K_{MH} W$ とおけば

$$Q_u \leq Q_{un} \text{ -----(h)}$$

Q_u は保有耐力、 Q_{un} は必要保有耐力と呼ぶと、架構および基礎などの耐震構造物に旧来から用いられてきた**保有耐力評価法**が得られる。

以上からわかるように、塑性率評価法と保有耐力評価法は同根であり、使い勝手によって前者は主に塔槽類に、後者は主に土建構造物に運用されている。もちろん K_y, C, μ_{pa} は構造物によって異なるので実際にはもっと煩雑になる。



[末尾注記 B : ラチェティングについて]

通常荷重による一定応力のもとで地震応力が繰り返し加わると追歯車(ラチェット)機構のように塑性変形が進行して不安定破壊に至ることがある。これについて配管部材で評価されることは無いようであるが損傷モードの一つに挙げられているのは事実である。もしラチェティングの検討が要求されるなら通産省の旧告示(MITI501 号)第 13 条第 1 が運用されるのではないと思われる。

第 13 条の規定内容は以下の通り⁵⁾。

(イ) 厚さ方向の温度変化が放物線状に単調増加または単調減少の場合

$$\sigma_p / S_y \leq 0.615 \text{ ----- } \sigma_s / S_y \leq [\text{表に与えられる値}]$$

$$0.615 < \sigma_p / S_y \leq 1.0 \text{ ----- } \sigma_s \leq 5.2(S_y - \sigma_p)$$

(ロ) 上記以外の場合

$$\sigma_p / S_y \leq 0.5 \text{ ----- } \sigma_s \leq (S_y^2 / \sigma_p)$$

$$0.5 < \sigma_p / S_y \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots \sigma_s \leq 4.0(S_y - \sigma_p)$$

ここで、 σ_s =熱応力変動値、 σ_p =最大1次一般膜応力、 S_y =降伏応力

この規定で評価対象になる繰返し応力は胴板や管壁に生じる温度勾配による応力である。地震の場合は地震応力の変動値(応力範囲)が対象になる。(イ)は、厚さ方向に曲げ応力成分が分布する場合である。塔槽類のノズル付根近傍には厚さ方向にかなりの曲げ成分があるので上記の(イ)がマッチする。パイプの場合もエルボなどで然り。

[末尾注記 C : サポートの荷重条件について]

サポートの荷重条件表には以下のような1次荷重ソース(配管荷重源)がノミネートされている。

配管の自重、配管の熱荷重、配管の地震慣性力、配管支持点の地震相対変位

他の短期荷重の併発は考慮されないので、全ての1次荷重ソースがピックアップされていることになる。一方、非一体型金具やサポート架構の荷重制限量は次のように単一の制限量になっている。

通常機能サポート→限界荷重、固定機能サポート→降伏荷重

従ってストレートに受け取れば、全ての1次荷重ソースから生じる部材力(モーメント・フォース)の総和を限界荷重か降伏荷重で評価するようになっており、評価式は1種類ということになる。

しかしノミネートされる荷重には2つの荷重タイプ(機械荷重,変位荷重)があるのでこれによって発生する応力(1次応力,2次応力)は違った観点で制限すべきと思われる。例えば旧通産省令の MITI501 号ではサポート構造物に生じる応力を下表のように制限している⁽⁵⁾。

表88.1

	一 次 応 力					一次応力と二次応力を加えて求めた応力				
	引張	せん断	圧縮	曲げ	支圧	引張	せん断	曲げ	支圧	座屈
運転状態Ⅰ	ft	fs	fc	fb	fp	3ft	3fs	3fb	1.5fp	1.5fc
運転状態Ⅱ	ft	fs	fc	fb	fp	3ft	3fs	3fb	1.5fp	1.5fc
運転状態Ⅲ	1.5ft	1.5fs	1.5fc	1.5fb	1.5fp	/	/	/	/	/
運転状態Ⅳ	1.5ft	1.5fs	1.5fc	1.5fb	1.5fp	/	/	/	/	/

この表では運転状態Ⅲ,Ⅳが地震状態に該当しており1次応力については降伏応力(1.5ft)相当で制限されているが、1次+2次応力は制限されていない。あくまで延性破断のみが制限されている。レベル2地震動評価では1次応力ではなく全応力に対して延性破断防止なのか？

全くの憶測になるが、前述の1次荷重ソースによって配管支持点に派生する配管反力即ちサポート荷重はサポートにとっては全て外荷重であって、機械荷重として扱って安全側にサポート部材力を評価しているのではないかと思われる。サポートは長短/大小様々な部材から構成され、そのため、部材の塑性変形能がいつも有効という訳にはいかないという判断があるような気がする。現状では全応力を評価対象とみるほかないと思われる。ただ全応力

を評価するとなると通常のサポート部材では間尺が合わなくなる可能性がある。

4. あとがき

耐震設計指針は耐震告示を具体化するとともにその趣旨を周知徹底させる意図があつて、非常によく書かれたインストラクションになっている。そのため本 TS のような手順・手引きを大汗かいて書く必要があつたのか？という自問は今もある。ただレベル 2 設計指針を読んでみれば判るようにレベル 1 との関連があいまいで設計の流れが淀んでいるうえ、せっかく懇切に書かれた各論が干渉し合つかえってわかりにくいところが多々含まれる。従つて本 TS のような繋ぎの中間資料もそれなりに意味があるのではないかと思っている。

なお、補足説明でも書いているようにレベル 2 指針には多々不明部分がある。筆者にはレベル 2 設計指針の運用歴がないのでどうしても文献頼みになるが、ヒントになる文献は今の所、見当たらない。本 TS では特に下記の事項について？なので注意して欲しい。

- ① 塔槽類支持点の相対変位を求める簡易式で地表面震度 K_H を用いること
- ② 非耐圧部サポートのサポート荷重について荷重ケース③を適用すること

地盤変状については情報量が多くガイドラインのようなものもでている。少し時間をとってまとめてみたい。

引用文献・テキスト類)

- (1) 高圧ガス設備等耐震設計指針(2012) 別冊 耐震設計関係省令・告示・通達等
- (2) 高圧ガス設備等耐震設計指針(2012) レベル 1 耐震性能評価 (配管系)編
- (3) 高圧ガス設備等耐震設計指針(2012) レベル 1 耐震性能評価 (耐震設計設備・基礎)編
- (4) 高圧ガス設備等耐震設計指針(2012) レベル 2 耐震性能評価 解説編
- (5) 解説 原子力設備の技術基準 (通産省資源エネルギー庁編) 電力新報社
- (6) AutoPIPE 説明書 5.KHK レベル 2 コード (CTC 資料)
- (7) 「大地震に対して設備の耐震設計はどのようにするのか」(IT 資料)
(株)プラント耐震設計システムズ 池田雅俊
- (8) 日本建築学会「鋼構造塑性設計規準」5.柱
- (9) 日本建築学会「鋼構造設計規準」