

1.3.3 マグニチュード

【追補修正】

マグニチュードは、単一の地震によって放出されたエネルギー量を対数的に表したもので、通常、地震計で測定された地震動の振幅を用いて算出する。最初は1935年リヒターによって定義され、1945年にはグーテンベルグが表面波の振幅から定める提案をした。一般には、P波の最大振幅を用いるグーテンベルグリヒターの定義がよく使用される。

マグニチュードにはいくつかの種類があり、それぞれ計算法が異なる。即ち、一つの地震にマグニチュードは計算法により複数存在する。

多くの場合、どのマグニチュードも概ね同じような値をとることが多いが、それでは異なる特徴を持っているので値が少し異なる場合もある。どれが正しいのか、という問題ではなく、「地震の大きさ」という漠とした概念を数値化するために、いろいろなものしが提案され、存在している。

日本では、独自の研究の流れもあり、最も観測実績のあるマグニチュード(M)が使われてきた。

現在のものは2003年9月25日に改訂されたもので、これは以下の式を用いて、可能な限り多数の観測点につき M を求めて平均をとる。

(1) 変位振幅による場合

$$M_D = 0.5 \times \log(A_N^2 + A_E^2) + \beta_D(\Delta, H) + C_D \text{ 注1}$$

(2) 速度振幅による場合

$$M_V = 1/0.85 \times \log A_Z + \beta_V(\Delta, H) + C_V$$

ここで、各パラメータは以下のものである。

A_N ：南北方向の水平振動の変位振幅(10^{-6}m)

A_E ：東西方向の水平振動の変位振幅(10^{-6}m)

A_z ：上下動の最大地動速度の振幅(10^{-5}m/s)

なお、 β_D 、 β_V は震央距離 Δ (10^3m)と深さ H (10^3m)の関数(距離減衰項)であり、 C_D 、

C_V は補正係数である。

注1 変位振幅によるマグニチュードの式の第1項は、以前は水平二方向の波形を合成したものの大振幅を用いて表されていた。

データの一貫性を保つように、この方式により1994年以降のデータをすべて見直すことになったが、主要な地震について記すと表1.1のようになる。

気象庁マグニチュード(M)は地震計で観測される波の振幅から計算されるが、地震は地下の岩盤がずれて起こり、規模の大きな地震になると岩盤のずれの規模を正確に表せすのは難しい。この岩盤のずれの規模(ずれ動いた部分の面積×ずれた量×岩石の硬さ)をもとに計算したマグニチュードを、モーメントマグニチュード(M_w)という。 M_w は物理的な意味が明確で、大きな地震に対しても有効である。

ただし、その値を求めるには高性能の地震計のデータを使ったCMT解析（セントロイド・モーメント・テンソル：Centroid Moment Tensorの略で、観測された地震波形を説明する地震の位置（セントロイド）、規模（モーメント・マグニチュード）、及び発震機構（メカニズム）を同時に求める解析法）などの複雑な計算が必要であり、地震発生直後迅速に計算することや、規模の小さい地震で精度よく計算するには向かない。

CMT解析法は地震波形のうち、主に周期の長い成分を利用する。気象庁では、全国各地に設置されている広帯域地震計（通常の地震計よりも長周期の波形を観測することができる地震計）で観測した波形を解析に使用しているが、一般に地震の規模が小さくなればなるほど長周期の成分が少なくなることから、長周期の波が観測されないような小さな地震にはこの解析法は使えない。

そこで、気象庁では日本とその周辺で発生した気象庁マグニチュード5.0以上の地震を目安にCMT解析を行っている。

M_w は、気象庁マグニチュードMと概ね同じような値をとるが、両者は異なる手法で求められている。

気象庁マグニチュードは周期数秒程度の地震波の振幅を使って計算されるマグニチュードで、建物の被害などと良い相関がある。

一方、 M_w は周期が数十秒以上の長周期の地震波とその波の形を使って計算されるマグニチュードで、断層運動の規模に関係付けられている。

表1.1 近年発生した主な地震のマグニチュード

発生年	地震名	マグニチュード	発生年	地震名	マグニチュード
1994年	北海道東方沖	8.2	2001年	芸予	6.7
	三陸はるか沖	7.6		十勝沖	8.0
1995年	岩手県沖	7.2	2004年	新潟県中越	6.8
	兵庫県南部	7.3		福岡県西方沖	7.0
1996年	福島県東方沖	6.8	2007年	宮城県南部	7.2
	日向灘(10月19日)	6.9		能登半島	6.9
	日向灘(12月3日)	6.7		新潟県中越沖	6.8
1997年	山口県北部	6.6	2008年	岩手・宮城内陸	7.2
1999年	種子島付近	6.6		岩手県沿岸北部	6.8
2000年	根室半島南東沖	7.0	2011年	東北地方太平洋沖	9.0 (M_w)
2000年	鳥取県西部	7.3	2016年	熊本	7.3

1.3.4 気象庁震度階級

気象庁の震度階級は、1948年の福井地震以降、0(無感)から7(激震)に至る8段階の震度階級が使われていた。これらの階級は体感や家屋の倒壊の度合など周囲の状況から、気象庁が定めていた。

1996年2月に改定された現在の震度階級は、気象庁が定めた規格による震度計で測定された「計測震度」^{注2}を基に定められたものであり、表1.2のように0から4まで5弱、5強、6弱、6強および7の10段階で表されることになった。気象庁は、新しい震度階級について示していた関連解説表を、2008年の岩手・宮城内陸地震などその後の地震被害をもとに、2009年3月、表1.3のようなより実態に近いものに改正した。

注2 小数点以下1桁の数字で表される。

(注) 計測震度は、震度計内部で以下のようないくつかの処理によって計算される。

1. デジタル加速度記録3成分（水平動2成分、上下動1成分）のそれぞれに、フーリエ変換・フィルター処理・逆フーリエ変換の手順で、図1.1示す特性のフィルターを掛ける。
2. 得られたフィルター処理済みの記録3成分から、ベクトル波形を合成する。
3. ベクトル波形の絶対値がある値 a 以上となる時間の合計を計算したとき、これがちょうど0.3秒となるような a を求める。
4. この a から $I = 2 \log a + 0.94$ により計測震度 I を計算する。

表1.2 震度階級と計測震度

震度階級	計測震度
0	0.5未満
1	0.5以上1.5未満
2	1.5以上2.5未満
3	2.5以上3.5未満
4	3.5以上4.5未満
5弱	4.5以上5.0未満
5強	5.0以上5.5未満
6弱	5.5以上6.0未満
6強	6.0以上6.5未満
7	6.5以上

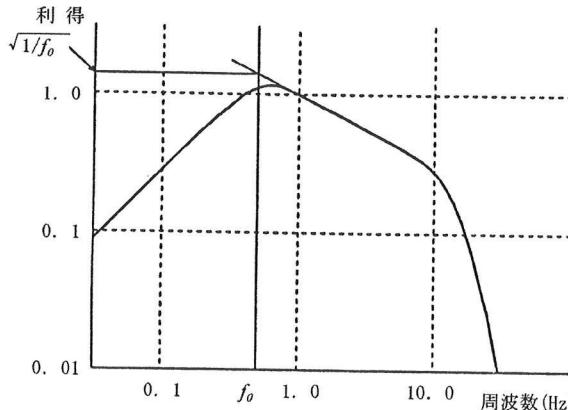


表1.3 気象庁震度階級関連解説表（平成21年3月31日改正）

人の体感・行動、屋内の状況、屋外の状況

震度階級	人の体感・行動	屋内の状況	屋外の状況
0	人は揺れを感じないが、地震計には記録される。	—	—
1	屋内で静かにしている人の中には、揺れをわずかに感じる人がいる。	—	—
2	屋内で静かにしている人の大半が、揺れを感じる。眠っている人の中には、目を覚ます人もいる。	電灯などのつり下げ物が、わずかに揺れる。	—
3	屋内にいる人のほとんどが、揺れを感じる。歩いている人の中には、揺れを感じる人もいる。眠っている人の大半が、目を覚ます。	棚にある食器類が音を立てることがある。	電線が少し揺れる。
4	ほとんどの人が驚く。歩いている人のほとんどが、揺れを感じる。眠っている人のほとんどが、目を覚ます。	電灯などのつり下げ物は大きく揺れ、棚にある食器類は音を立てる。座りの悪い置物が、倒れることがある。	電線が大きく揺れる。自動車を運転していて、揺れに気付く人がいる。
5弱	大半の人が、恐怖を覚え、物につかまらないと歩くことが難しいなど、行動に支障を感じる。	電灯などのつり下げ物は激しく揺れ、棚にある食器類、書棚の本が落ちることがある。座りの悪い置物の大半が倒れる。固定していない家具が移動することがあり、不安定なものは倒れることがある。	まれに窓ガラスが割れて落ちることがある。電柱が揺れるのがわかる。道路に被害が生じることがある。
5強	立っていることが困難になる。	棚にある食器類や書棚の本で、落ちるものが多くなる。テレビが台から落ちることがある。固定していない家具が倒れることがある。	窓ガラスが割れて落ちることがある。補強されていないブロック塀が崩れることがある。据付けが不十分な自動販売機が倒れることがある。自動車の運転が困難となり、停止する車もある。
6弱	立っていることができず、はわからないと動くことができない。揺れにはんろうされ、動くこともできず、飛ばされることもある。	固定していない家具の大半が移動し、倒れるものもある。ドアが開かなくなることがある。	壁のタイルや窓ガラスが破損、落下することがある。
6強		固定していない家具のほとんどが移動し、倒れるものが多くなる。	壁のタイルや窓ガラスが破損、落下する建物が多くなる。補強されていないブロック塀のほとんどが崩れる。
7		固定していない家具のほとんどが移動したり倒れたりし、飛ぶこともある。	壁のタイルや窓ガラスが破損、落下する建物がさらに多くなる。補強されているブロック塀も破損するものがある。

木造建物(住宅)の状況

震度階級	木造建物(住宅)	
	耐震性が高い	耐震性が低い
5弱	—	壁などに軽微なひび割れ・亀裂がみられることがある。
5強	—	壁などにひび割れ・亀裂がみられることがある。
6弱	壁などに軽微なひび割れ・亀裂がみられることがある。	壁などのひび割れ・亀裂が多くなる。 壁などに大きなひび割れ・亀裂が入ることがある。 瓦が落下したり、建物が傾いたりすることがある。倒れるものもある。
6強	壁などにひび割れ・亀裂がみられることがある。	壁などに大きなひび割れ・亀裂が入るものが多くなる。 傾くものや、倒れるものが多くなる。
7	壁などのひび割れ・亀裂が多くなる。 まれに傾くことがある。	傾くものや、倒れるものがさらに多くなる

鉄筋コンクリート建造物の状況

震度階級	鉄筋コンクリート建造物	
	耐震性が高い	耐震性が低い
5強	—	壁、梁(はり)、柱などの部材に、ひび割れ・亀裂が入ることがある。
6弱	壁、梁(はり)、柱などの部材に、ひび割れ・亀裂が入ることがある。	壁、梁(はり)、柱などの部材に、ひび割れ・亀裂が多くなる。
6強	壁、梁(はり)、柱などの部材に、ひび割れ・亀裂が多くなる。	壁、梁(はり)、柱などの部材に、斜めや X 状のひび割れ・亀裂がみられることがある。 1階あるいは中間階の柱が崩れ、倒れるものがある。
7	壁、梁(はり)、柱などの部材に、ひび割れ・亀裂がさらに多くなる。 1階あるいは中間階が変形し、まれに傾くものがある。	壁、梁(はり)、柱などの部材に、斜めや X 状のひび割れ・亀裂が多くなる。 1階あるいは中間階の柱が崩れ、倒れるものが多くなる。

地盤・斜面等の状況

震度階級	地盤の状況	斜面等の状況
5弱	亀裂や液状化が生じることがある。	落石やがけ崩れが発生することがある。
5強		
6弱	地割れが生じることがある。	がけ崩れや地すべりが発生することがある。
6強	大きな地割れが生じることがある。	がけ崩れが多発し、大規模な地すべりや山体の崩壊が発生することがある。
7		

ライフライン・インフラ等への影響

ガス供給の停止	安全装置のあるガスマーター(マイコンメーター)では震度5弱程度以上の揺れで遮断装置が作動し、ガスの供給を停止する。 さらに揺れが強い場合には、安全のため地域ブロック単位でガス供給が止まることがある。
断水、停電の発生	震度5弱程度以上の揺れがあった地域では、断水、停電が発生することがある。
鉄道の停止、高速道路の規制等	震度4程度以上の揺れがあった場合には、鉄道、高速道路などで、安全確認のため、運転見合わせ、速度規制、通行規制が、各事業者の判断によって行われる。(安全確認のための基準は、事業者や地域によって異なる。)
電話等通信の障害	地震災害の発生時、揺れの強い地域やその周辺の地域において、電話・インターネット等による安否確認、見舞い、問合せが増加し、電話等がつながりにくい状況(ふくそう)が起こることがある。そのための対策として、震度6弱程度以上の揺れがあった地震などの災害の発生時に、通信事業者により災害用伝言ダイヤルや災害用伝言板などの提供が行われる。
エレベーターの停止	地震管装置付きのエレベーターは、震度5弱程度以上の揺れがあった場合、安全のため自動停止する。運転再開には、安全確認などのため、時間がかかることがある。

大規模構造物への影響

長周期地震動 ※による超高層ビルの揺れ	超高層ビルは固有周期が長いため、固有周期が短い一般の鉄筋コンクリート造建物に比べて地震時に作用する力が相対的に小さくなる性質を持っている。しかし、長周期地震動に対しては、ゆっくりとした揺れが長く続き、揺れが大きい場合には、固定の弱いOA機器などが大きく移動し、人も固定しているものにつかまらないと、同じ場所にいられない状況となる可能性がある。
石油タンクのスロッシング	長周期地震動により石油タンクのスロッシング（タンク内溶液の液面が大きく揺れる現象）が発生し、石油がタンクから溢れ出たり、火災などが発生したりすることがある。
大規模空間を有する施設の天井等の破損、脱落	体育館、屋内プールなど大規模空間を有する施設では、建物の柱、壁など構造自体に大きな被害を生じない程度の地震動でも、天井等が大きく揺れたりして、破損、脱落することがある。

2.1.1 耐震強度の検討 【追補修正】

ボイラー・圧力容器の据付及び指示部を主対象として、動的解析が行われていない通常の構造物の場合は、局部震度法による地震力により耐震強度計算を実施する。

【解説】 【追補修正】

(1) 耐震強度の検討のための計算方法は、静的解析、動的解析、応答解析局部震度法による地震力とする。

(a) 局部震度法による地震力（動的解析が行われていない通常の構造物の場合）

(b) 修正震度法による地震力（最も簡単な動的解析手法であり、構造物の構造物の応答に最も大きな影響を与える 1 次固有振動モードのみを考慮して、応答スペクトルを用いて応力を求める方法で従来「ボイラー・圧力容器地震対策の手引」で採用されていた。）

(c) 建築物の動的解析が行われているが時刻歴応答解析が行われていない場合の地震力

(d) 建築物の動的解析と時刻歴応答解析の両方が行われている場合の地震力

『建築設備耐震設計・施工指針1997年版』以降においては、(b) 修正震度法以外に上記 3 つの地震力の算出方法も掲載されている。

本手引きでは耐震強度の検討のための計算方法を、(a) 局部震度法による地震力とする。動的解析、応答解析がなされた場合はその地震力を地震力として差し支えない。検討部位は、アンカーボルト、台座、架台、耐震ストッパ、レグ及びラグとする。

以下 (b) ~ (d) を紹介する。

(b) 修正震度法の地震力は以下の式によって求める。

$$K_h=0.3 \cdot I \cdot Z \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (b \cdot 1)$$

ここで、

I : 重要度係数(0.5, 0.65, 0.8, 1.0 の 4 区分)

Z : 地域係数 (0.4~1.0)

K_1 : 建物応答倍率 (1~3.33)

K_2 : 機器の応答倍率 (1~2)

上記の数値範囲から、 $K_h=0.2 \sim 2.0$ になる。

このように、修正震度法では、地震力は、震度 0.3 を基に重要度係数、地域係数、建物応答倍率、機器の応答倍率を考慮に入れて算出されている。

(c) 建築物の動的解析が行われているが時刻歴応答解析が行われていない場合、建物については、予備計算による設計用基準震度 K_s を耐震クラスと建築物内部の床位置に応じて、地震力は下式によって求める。

$$K_s = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot Z \cdot D_{ss} \cdot I_s \cdot I_k \quad (c-1)$$

ここで、

K_0 ：応答解析が行われていない際の基準震度=0.4

K_1 ：応答解析が行われていない際の基準震度に対する建築物の想定各階床振動応答倍率 (1.0～2.5)

K_2 ：設備機器の応答倍率 (防振支持=2.0, 頑固に据付=1.5)

Z ：地域係数 (0.7～1.0)

D_{ss} ：振動応答解析が行われていない場合, $D_{ss}=2/3$

I_s ：設備機器の用途係数 (1.0～1.5)

I_k ：建築物の用途係数 (1.0～1.5)

耐震クラスをS・A・Bのいずれかに設定して、設置階により、 K_s の値を丸めると表cのようになる。

表c 設計用標準震度の策定（一般の設備機器用, $Z=1.0$ の場合）

	床位置	K_0	K_1	K_2	D_{ss}	$I_s \cdot I_k$	K_s
耐震クラス S	上層部	0.4	2.5	1.5	2/3	2.0	2.0
	中間部		1.5				(1.2)→1.5
	1階		1.0				(0.8)→1.0
耐震クラス A	上層部	0.4	2.5	1.5	2/3	1.5	1.5
	中間部		1.5				(0.9)→1.0
	1階		1.0				0.6
耐震クラス B	上層部	0.4	2.5	1.5	2/3	1.0	1.0
	中間部		1.5				0.6
	1階		1.0				0.4

(d)建築物の動的解析と応答解析の両方が行われている場合の地震力は以下の式によって求める。

時刻歴応答解析が行われている建築物については、各階の応答加速度 $G_f(\text{cm}/\text{s}^2)$ が与えられることとなる。時刻歴応答解析結果がある場合の予備計算による震度 K_h' を下式によって求め、耐震クラスをS・A・Bのいずれかに設定して、表d-1を適用して K_h の値を定める。

$$K_h = (G_f/G) K_2 \cdot D_{ss} \cdot I_s \quad \cdots \text{設備機器の場合} \quad (\text{d-1})$$

$$= (G_f/G) \cdot \beta \cdot I \quad \cdots \text{水槽(受水槽, 高置水槽など)の場合} \quad (\text{d-2})$$

ここに、

G_f :床の応答加速度値(cm/s^2)で、地震入力、建物内の揺れ増幅特性、地域係数、重要度係数等は含んでいる。

G :重力加速度値980(cm/s^2)

K_2 :機器の応答倍率で、設備機器自体の変形特性や防振支持された設備機器支持部の増幅特性を考慮して、指針によるものとしている(表d-2)。

D_{ss} :設備機器据付け用構造特性係数で、振動応答解析が行われていない設備機器の据付・取付の場合、ある程度の変形特性を見込んで $D_{ss}=2/3$ と設定している。

I_s :設備機器の用途係数で、 $I_s=1.0 \sim 1.5$ としている。

β :水槽の設置場所に応じた応答倍率で、指針による(表d-3)。

I :水槽の用途係数で指針による(表d-1)。

この場合あるいは他の方法の設計用水平震度 K_h により、設計用鉛直震度 K_v は次のようになる。

$$K_v = 1/2 \cdot K_h \quad (\text{d-3})$$

ここに、 K_h は表5で求めた設計用水平震度である。

ただし、免震構造の建物において、設計用鉛直震度が、特に解析されていない場合には、修正震度法に従って設計用鉛直震度を定める。従って、上記(c), (d)についてには、 K_h を求めるために予備計算値 K_s , K_h を算出する指針が与えられている。この K_h' の値により、 K_h は表d-4のように0.4, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0に分類されている。従って、これらの指針は、修正震度法や局部震度法による地震力に比べ、設計用水平震度の下限値が大きくなっている。

表 d·1 水槽の用途係数 I

用途	応答倍率 : I
耐震性を特に重視する用途	1.5
耐震性を重視する用途等	1.0
その他	0.7

表 d·2 設備機器の応答倍率 K_2

設備機器の取り付け状態	応答倍率 : K_2
防振支持された設備機器	2.0
耐震支持された設備機器	1.5

表 d·3 設備機器の応答倍率 β

場所	応答倍率 : β
1 階, 地階, 地上	2.0
中間層, 上層階, 屋上等	1.5

表 d·4 建物の時刻歴応答解析が行われている際の設計用水平震度 K_h

K_h の値	設計用水平震度 K_h		
	耐震クラス S	耐震クラス A	耐震クラス B
1.65 超	2.0	2.0	2.0
1.10 超～1.65 以下	1.5	1.5	1.5
0.63 超～1.10 以下		1.0	1.0
0.42 超～0.63 以下	1.0		0.6
0.42 以下		0.6	0.4

2.2.1 設計用震度

(1) 設計用水平震度 (K_h) 【追補修正】

設計用水平震度は局部震度法による地震力で次式によって与えられている。

$$K_h = Z \cdot K_s \quad (2.1)$$

ここに, K_s : 設計用標準震度(耐震クラスと設置階で区分, 0.4, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0)

Z : 地域係数 (0.7~1.0)

【解説】

【追補修正】

上記の数値範囲から, $K_h = 0.28 \sim 2.0$ となる。

設備機器の設計用標準震度を表2.1に示す。

(2) 設計用鉛直震度 (K_v) 【追補修正】

設計用水平震度は局部震度法による地震力では次式によって与えられている。

$$K_v = 1/2 \cdot K_h \quad (2.2)$$

(3) 重要度係数 (I) 参考：修正振動法を採用する場合に用いる。 【追補修正】

表 2.1 設備機器の設計用標準震度

	設備機器の耐震クラス			適用階の区分
	耐震クラス <i>S</i>	耐震クラス <i>A</i>	耐震クラス <i>B</i>	
上層階、屋上および塔屋	2.0	1.5	1.0	
中間層	1.5	1.0	0.6	
地階および1階	1.0 (1.5)	0.6 (1.0)	0.4 (0.6)	

() 内の数値は地階及び1階の（あるいは地表）に設置する水槽の場合に適用する。

上層階の定義

- ・2～6階建ての建築物では、最上階を上層階とする。
- ・7～9階建ての建築物では、上層の2層を上層階とする。
- ・10～12階建ての建築物では、上層の3層を上層階とする。
- ・13階建て以上の建築物では、上層の4層を上層階とする。

中間層の定義

- ・地階、1階を除く各階で上層階に該当しない階を中層階とする。

指針表 2.2-1 における「水槽」とは、受水槽、高置水槽などをいう。

(4) 地域係数 (Z)

【追補修正】

地域係数は、建築基準法のでは過去の地震記録等により得られた各地域における地震動の期待値（これまでどの程度の地震動をどのくらいの回数経験しているか）を統計的に処理し、工学的な判断を加え行政区域ごとに振り分けて定められた（図2.1）。なお、静岡県などでは、地域係数として1.2以上も採用している地域もある。

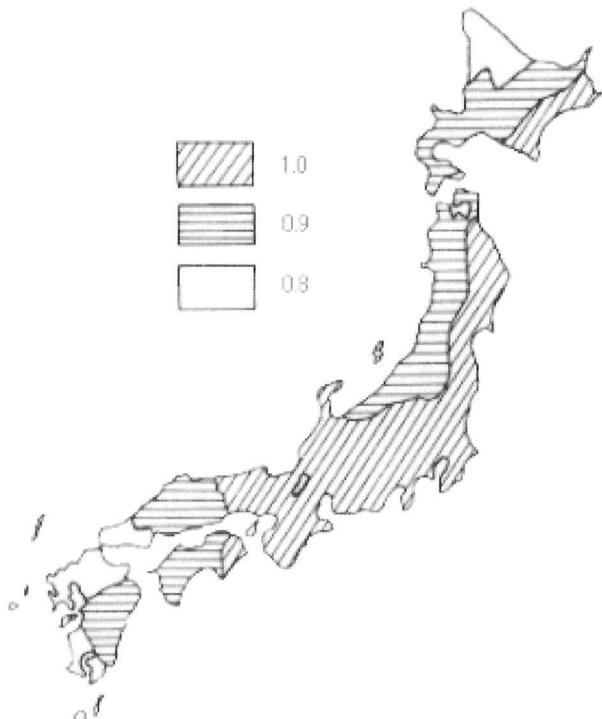


図2.1 建築基準法の地域係数(沖縄県は0.7)

表2.1 削除

(5) 建物の床応答倍率 (K_1) 参考：修正振動法を採用する場合に用いる。

【追補修正】

(6) ボイラー・圧力容器の応答倍率 (K_2) 参考：修正振動法を採用する場合に用いる。

【追補修正】