

地震対策技術（上）

労働安全コンサルタント 鴨 省次郎

1. 地震対策技術とコンサルタントの係り

企業の安全衛生診断を実施すると労働安全衛生問題のかたわらに、必ず地震対策問題が重なって出てくる。例えば製造ラインが常に変り機械設備がアンカーボルトで固定していないこと、部品棚の上段側に重量物が積まれていること、土間の沈下（軟弱地盤の沈下）により排水が流れず電気設備を濡らしていること、既存建屋の中間壁を外して素通しにし補強がされていないと、既存多階建屋の1階をピロティー構造に開放し補強がされていないこと。……書き出せば限りがない。

こうした場合に、自然災害リスクは安全衛生診断の範囲外として除外してよいのだろうか。企業の立場に立てば企業の存続に係わる重要な安全上のリスクを放置されたことになる。一方、労災の認定でも、明らかに地震災害リスクが認められ、そうした状況で震災に合った場合は労災として検討される。このように考えると、こうした境界領域の重大リスクはどんどん顕在化して、企業の立場に立って理解を促す「顧客満足」に徹する必要がある。

2. 地震対策技術と地震防災マニュアルとの係り

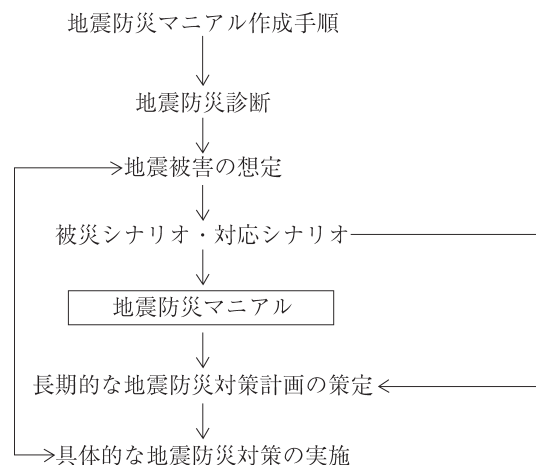
地震対策技術は企業においては地震防災活動の中に位置付けられ、地震災害リスクを排除するための中心的な役割を果たしている。そこで、それ等の概要と企業で活用される地震対策技術の質や方

向性を把握するために、地震防災活動のソフト面を担っている地震防災マニュアルの作成手順を眺めてみる。

図－1に地震防災マニュアル作成手順を示す。

(1) 地震防災診断とは自社の地震防災対策レベルを把握するためのもので、簡単な診断表により現状の対策レベルを客観的に把握するものである。

(2) 地震被害の想定は地震防災マニュアル作成の基礎となるものである。被害は地震入力により変わるので、想定される各レベルの地震入力を設定して、そのレベルの地震でどのような被害が出るかを把握するものである。具体的には、地盤の状況（液状化、滑り等）、建屋の耐震性、プラント設備、機械設備の耐震性や挙動等から物的被害想定を行う。次にこれ等にもとづき、作業員等の人的被害想定を行う。更に、物流等を考慮した企業活動の機能被害想定も行う。そして、被害額も概算



図－1 地震防災マニュアル作成手順

する。

(3) 被害シナリオ・対応シナリオの作成は地震被害の想定の結果にもとづき、地震の発生から時間の経過に従って被害がどのように推移するかを明らかにするものである。そして、その刻々の対応策となるのが対応シナリオである。

(4) 地震防災マニュアルは端的に言えば、これ迄の手順を経て明確にされた問題点を補強するためのマニュアルである。例えば、ソフト面では災害対策組織、情報収集と通報システム、地震発生時の行動マニュアル、火災発生時の行動マニュアル、避難経路、救出、援護や復旧活動等としてまとめられる。

(5) 長期的な地震防災対策計画の策定は建物や設備等ハード面の弱点についての長期的地震対策が主体となる。

(6) 具体的な地震防災対策の実施は長期的な地震防災対策計画に沿ってたてられた年度の地震対策の実施である。

さて、以上の地震防災マニュアル作成手順の中に見られる地震対策技術の質や方向性は、概略次のようにまとめられるであろう。

イ 地震入力が対象地域で想定されるレベルのものを上下数種類準備する。そして軟弱表層地盤の増幅特性を加味する。

ロ 地震被害を全般的に左右する地盤の液状化

等の弱点を簡易手法で全体的に把握する。

ハ 建屋、プラント設備および機械設備等の想定地震による挙動は全体的に把握する。この場合、使用する耐震性診断手法はなるべく簡易な判別手法や簡易な解析手法を用い、作業時間の短縮を経費に十分配慮する。

ニ精密診断が必要な対象については“延性”をベースとした許容レベルにまで判断基準を拡張して極力、終局耐力をとらえるようにする。

3. 地震対策技術

3-1 耐震性診断技術の基本

上記で述べた地震被害想定で主役を占めるものは地震対策技術の前半を担う耐震性診断技術である。この耐震性診断技術は広範囲な内容があり、全体的に取り上げると誌面の関係で無理であるため、その概要を理解するために必要な基本的なものに留め、次に示す。

(1) 震源、震央及び震源距離・震央距離これ等を図-2に示す。震源は1点ではなく、ある程度の広がりをもっており、一般に震源域といわれている。震央は震源地ともいう。

(2) 地震波の種類

図-3に一般的地震波を示す。

イ P波 (Primary 波): 地震が発生し最初に到着する振幅の小さい波で、岩石の体積の変化の反発に伴い生ずる縦波である。平均6km/秒の

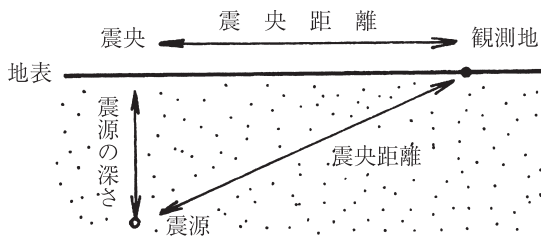


図-2 震央距離

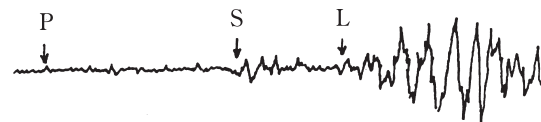


図-3 一般的地震波

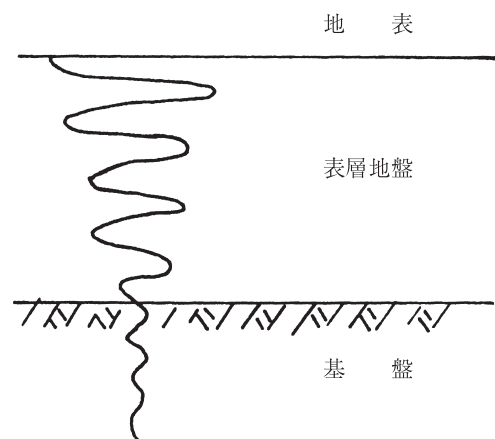


図-4 地盤の振動

速度である。

ロ S 波 (Secondary 波) : P 波に続いて到着する振幅の大きな波で、岩石の変形の反発に伴い生ずる横波である。継続時間は 1 分前後である。

ハ L 波 (表面波) : 水の波のように表面近くの部分が運動する波で、S 波の 9 割の速度である。

(3) 地表における地震動の大きさ

金井の式がよく用いられる。

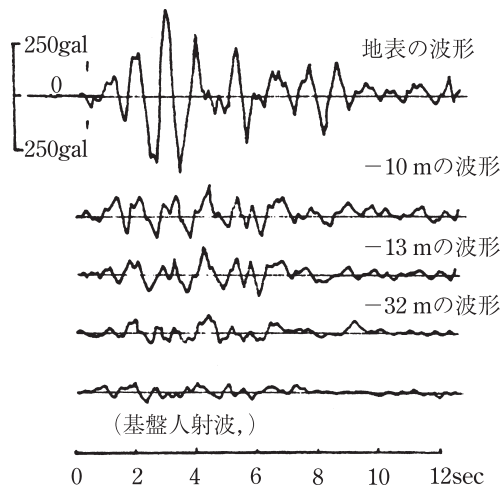
$$a_{\max} = \frac{5}{\sqrt{T_G}} \cdot 10^{0.61M - (1.66 + \frac{3.60}{X})} \log_{10} X^{(0.167 - \frac{1.83}{X})}$$

$a_{\max}$: 地表における最大加速度 (gal)

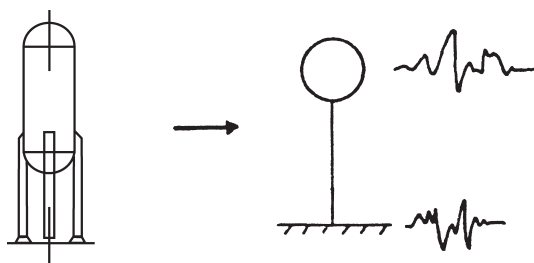
(4) 地盤の振動

図一 4 に地盤の振動を示す。

基盤は十分な厚さを持った比較的一様な堅い地層をいい、表層とは基盤の上に堆積した比較的柔らかい地層をいう。基盤からほぼ垂直に入った横波は、各地層間の境界面を地表面において反射透



図一 5 地盤による地震波の増幅



図一 6 一質点系モデルと地震応答

過を繰返す。一般に堅い地層から柔らかい上部の地層に波動が入射すると、振幅は大きくなる。

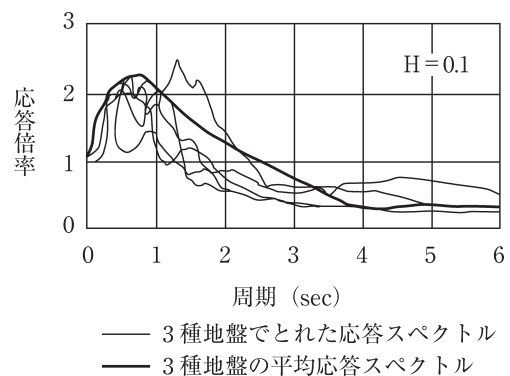
図一 5 に地盤による地震波の増幅を示す。

(5) 地盤の卓越周期

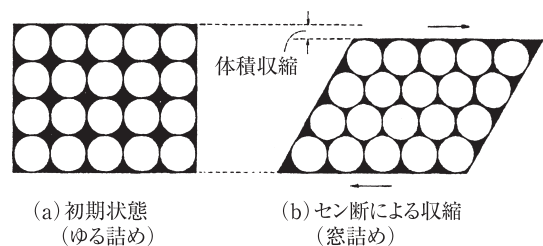
地盤は一般に成層をなしており、波の反射透過における位相関係によって、波の振動周期に応じて増幅率が変わる。そして最も高い増幅率を与える周期を地盤の卓越周期と呼ぶ。

(6) 地震動による構造物の応答と応答スペクトル

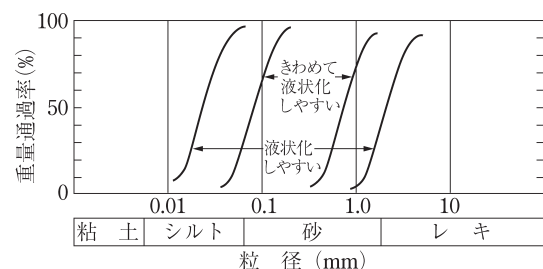
図一 6 に一質点系モデルと地震応答について示す。



図一 7 平均応答スペクトル



図一 8 セン断に伴う体積収縮



図一 9 液状化しやすい土の粒度分布

地震波が構造物の基礎に入力したとき、その構造物は地震波の特性に応じて振動する。この振動を“地震に対する構造物の応答”という。

図一七に平均応答スペクトル（応答倍率）について示す。

応答スペクトルは、構造物として図一六のような一質点系を考えて、これに、対象とする地盤でとれた各種地震波を入力し、構造物が応答した最大値を結んで作成した応答値である。

(7) 地盤の液状化

水で飽和した砂地盤が地震時にあたかも液体のように振舞い、強度が著しく低下することを液状化と呼んでいる。

つまり、図一八に示すように、セン断に伴い体積収縮が起こり、間隙をうめている水は外部に排水されねばならないが、水が移動するためには、少し時間がかかり、その間排水が阻止されるため、間隙水圧が上昇する。さらに、この間隙水圧が解消しないうちに、セン断力はその方向を変えて、繰り返し加わるため間隙水圧はどんどん上昇していく。最後には間隙水圧が砂粒子間の拘束圧と等しい状態になり液状化が発生する。

図一九に液状化しやすい土の粒度分布を示す。

(8) 構造物の地震応答計算一簡易解析法一

構造物に地震が作用したとき、どのような力が働き、それがどのように変形するのかを解析するものである。次に主要な簡易解析手法を示す。

イ 静的震度法

構造物の自重に診断水平震度 K を乗じた値を地震力として、この力が静的に水平方向に加わるものとして解析する方法である。

例えば

$$K = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot K_0$$

β_1 ：表層地盤増幅係数で、例えば
1.4～2.0の値

β_2 ：構造物の静的応答倍率で、例えば

2.0の値

K_0 ：基準診断震度で例えば0.15

ロ 修正震度法

動的解析法のもつ計算の複雑を避けるために工夫された手法で、構造物の一次固有周期のみを考慮した近似動的解析法である。

診断水平震度 K は例えば

$$K' = \beta_1 \cdot \beta_3 \cdot K_0$$

β_3 ：構造物の一次固有周期と減衰常数

により応答率曲線から定まる定数

ハ 応答スペクトル法（モーダルアナリシス）

地震時の構造物の挙動は、構造物の一次から数次のモードが重畳したものとみなすことができる。そこで、この方法はそれぞれのモードが単独に地震波に対して応答した場合の解析を行い、それ等の結果を合算することにより構造物の地震応答を求めるものである。

各モードの診断水平応答スペクトル $S_A(T)$ は、

$$S_A(T) = \beta_1 \cdot \beta_3 \cdot \alpha_0$$

α_0 ：基準耐震加速度で例えば150ガル

ニ 時刻歴応答解析法

構造物を多質点の多自由度等にモデル化して、地盤の運動 $X_g(t)$ を受けた場合の構造物の挙動をとらえるものである。運動方程式は次のようになる。

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = -[M]\{I\}X_g(t)$$

ここで $[M]$ $[C]$ $[K]$ は各々質量、減衰剛性を示すマトリックス

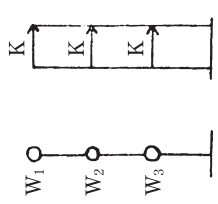
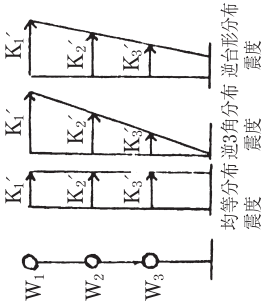
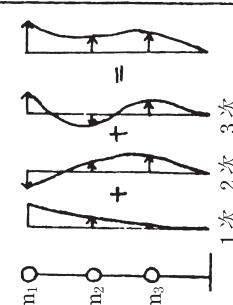
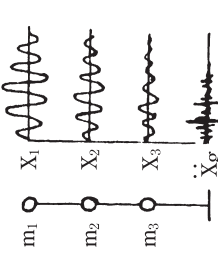
$\{X\}$, $\{\dot{X}\}$, $\{\ddot{X}\}$ は各々加速度、速度、変位を示すベクトル

$\{I\}$ は単位ベクトルで、地盤の運動と同方向成分で1、その他は0

表一1に各種解析法の比較を示す。

(以下次号につづく)

表一 1 各種解析法の比較

地震入力	静的震度(地震係数) $K=0.2$ 又は 0.3 等	修正震度法 応答スペクトル曲線 応答倍率曲線 固有周期	振動型最大値法 応答スペクトル曲線 応答倍率曲線 固有周期	時刻歴応答解析法 地震波形 加速度 時間
解析手法				
計算手段	手計算で平易に可能	手計算可能	電算機使用(演算時間は短い)	電算機使用(演算時間が長い)
特徴	計算は簡単で実用的。 概念設計にも利用可能。 剛構造物(固有振動数が約 30Hz 以上)に適用可能。 柔構造物には適用不可。	計算は簡単で実用的。 構造物の振動性状を考慮した設計可能。 1次モードのみを考慮した解析、2次以上のモードが無視できない構造物には適用不可。	最大値のみに注目したモード解析法。固有振動数・振動モードの算出により比較的容易に応答量の計算可能。比較的信頼性の高い設計方法。応答スペクトル曲線の作成、選定が重要。	計算は複雑であるが、現象のは握は容易。非線形の応答解析可能。モード解析。直接積分の2種類。床応答曲線の作成には不可欠。地震波の選定。作成が重要。