

NGP

耐震設計のための 地盤調査



日本物理探鑛株式会社

URL <http://www.n-buturi.co.jp>

耐震設計のための地盤調査

耐震設計のための地盤調査は、表層地盤（地表～工学的基盤）の調査と、深部地盤（工学的基盤～地震基盤）の調査に分けられ、それぞれ、いろいろな調査・試験手法が用いられます。

適用する調査・試験

表層地盤(地表～工学的基盤)

- ・ボーリング調査（地盤・地層の構成）
- ・室内動的土質試験
（砂質土・粘性土の動的変形特性，液状化強度特性）
- ・PS 検層
（弾性波速度および速度分布，地盤の動的変形特性）
- ・密度検層（地盤の密度分布）
- ・常時微動測定（地盤の卓越周期，増幅率）

深部地盤(工学的基盤～地震基盤)

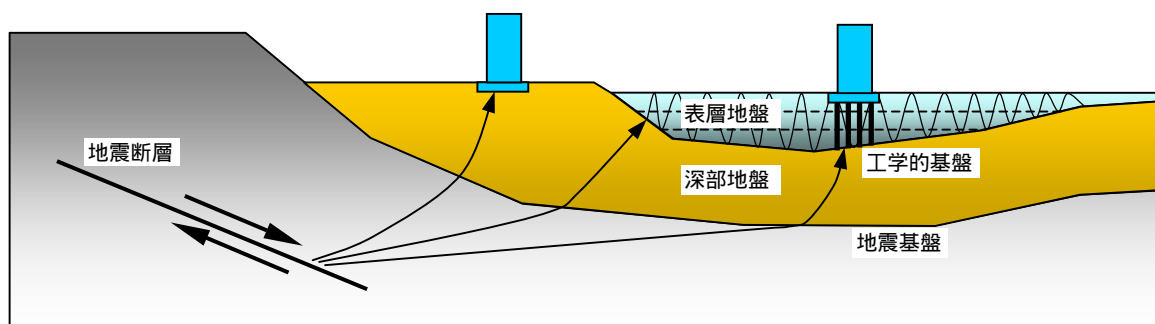
- ・地下構造調査資料
- ・深層ボーリング調査（地盤・地層の構成）
- ・PS 検層（弾性波速度および速度分布，減衰率分布）
- ・VSP（弾性波速度および速度分布）
- ・常時微動測定（深部地盤の卓越周期，5 秒計測定）
- ・微動アレイ探査（S 波速度および速度分布）
- ・重力探査（密度分布）

この他、想定地震の検討において、地震活動度資料・既往被害地震調査資料・活断層調査資料などを利用します。

表層地盤の調査結果からは、表層地盤モデルを作成し地震応答解析に利用します。工学的基盤で模擬地震波が与えられれば、地震応答解析により表層地盤内の入力地震波が得られます。

深部地盤の調査結果からは、模擬地震波作成（経験的方法や理論的方法）に必要な深部地盤モデルを作成します。サイト波（そのサイトにおける諸条件を考慮して作成する模擬地震波）の検討を行う時には必要な調査となります。

地震動の伝播は地震断層から構造物へ、模式的には下図のように示されます。



地震動の伝播

海洋プレートの境界で発生する海溝型地震（例えば東南海地震）と内陸性の直下型地震（例えば兵庫県南部地震）では、一般的に海溝型地震の方が長周期成分の卓越した地震動となります。表層地盤、深部地盤では表面波が励起されます。

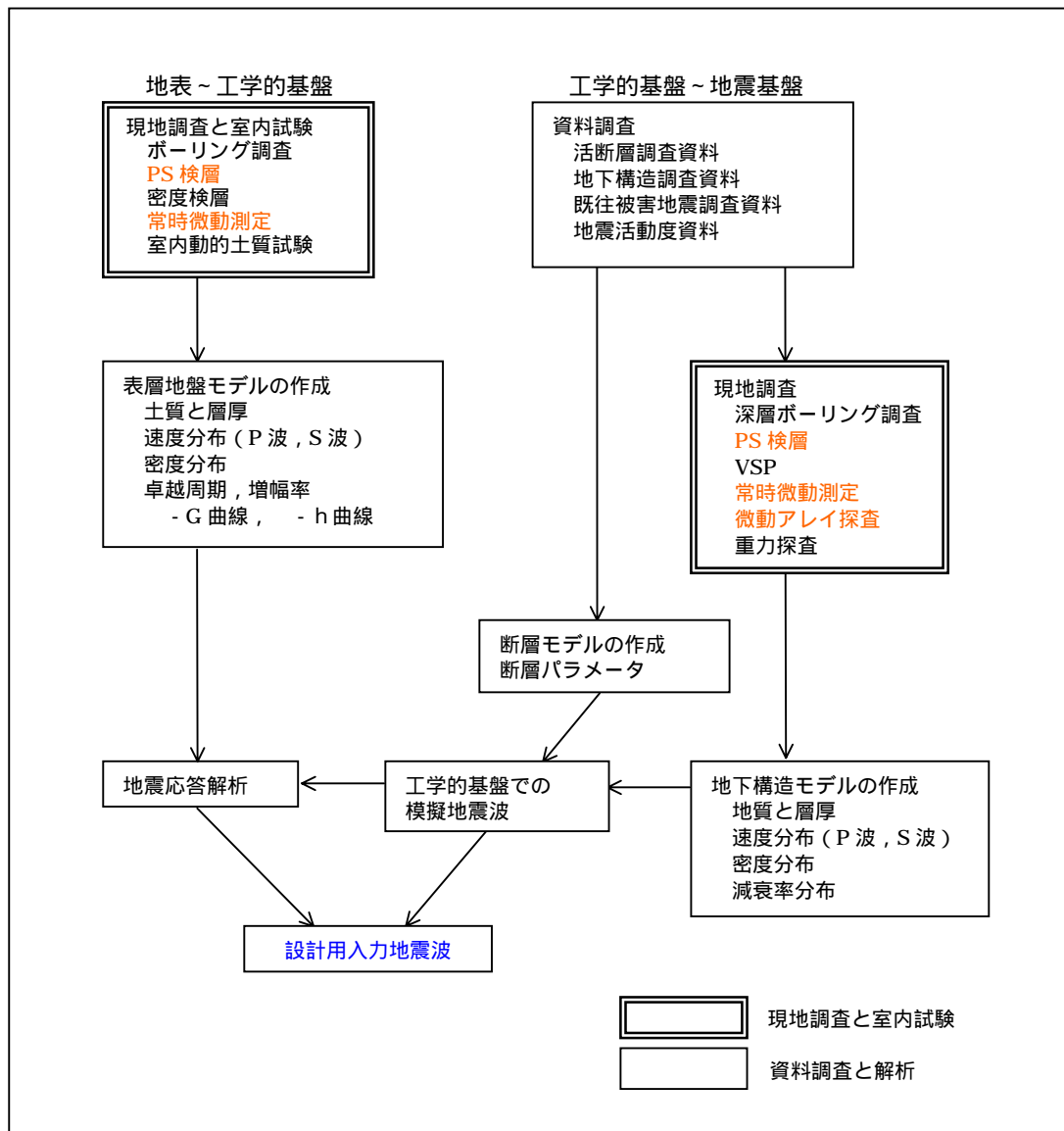
コラム

室内動的試験には、動的変形特性を求める「繰返し三軸試験（JGS 0542-2000）」と「繰返しねじりせん断試験（JGS 0543-2000）」および液状化強度特性を求める「繰返し非排水三軸試験（JGS 0541-2000）」があります。

室内試験による動的変形特性は、PS 検層から得られる原地盤での動的変形特性により補正され、利用されています。

「繰返し非排水三軸試験（JGS 0541-2000）」は砂質土のみでなく、飽和した粘性土や礫質土にも用いられます。

設計用入力地震波の作成



設計用入力地震波作成の流れ

地震応答解析

表層地盤モデルを作成し、工学的基盤より上部の表層地盤特性を考慮して、基礎底面や地表面での地震動を計算します。1次元計算では、SHAKE や FDEL などが利用されています。また、液状化が懸念される場合は間隙水圧を考慮した有効応力計算 (DERSA, YUSAYUSA など) が利用されています。基盤形状の二次元的な影響を考慮するためには、二次元計算が利用されます。

地下構造モデルの作成 (主に深部地盤)

全国の主要な堆積平野では平成 10 年度より地下構造調査が実施されており (文部科学省, 地震関係基礎調査交付金による) 地下構造調査成果報告書が公表されています。この資料は、地下構造モデルを作成する上で重要な資料となります。

調査手法

PS 検層

速度検層はボーリング孔を利用して、地盤の弾性波速度を求める物理探査法です。通常はボーリング孔に沿った1次元的な弾性波速度分布を求めます。

速度検層のうち、P波速度とS波速度の両方を求める探査法をPS検層と呼んでおり、土質地盤の調査では標準的に実施されています。P波速度とS波速度の分布を求め、それに密度分布の情報を与えることにより、地盤強度の推定や耐震設計に必要な地盤の動的弾性定数（ポアソン比、ヤング率、剛性率）を得ることができます。

この他に土木・建築、地震工学の分野において、速度検層の結果は

トンネル、地下鉄、共同溝、埋設管等の地下線状構造物の施工や維持に必要な地盤状況

橋梁基礎や高層建築物等の支持層の地盤状況

地盤改良効果

基礎杭の根入れ深度

掘削深度よりも先の未掘削区間における地層境界（VSPと呼ばれる物理探査法です）

等の把握に利用されています。

代表的な測定方法として、以下の3種類があります。

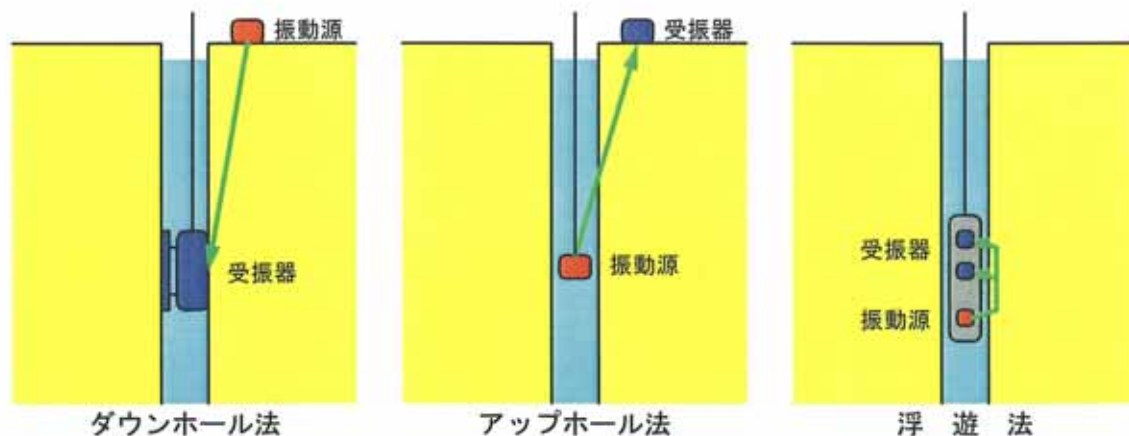
ダウンホール法：地表付近に振動源をおき、ボーリング孔内に受振器を入れる測定方法です。

通常孔内の受振器は孔壁に圧着させて測定を行います。受振器の深度を変えながら、繰り返し起振を行って測定します。

アップホール法：ボーリング孔内に振動源を入れ、地表付近に受振器を設置する測定方法です。

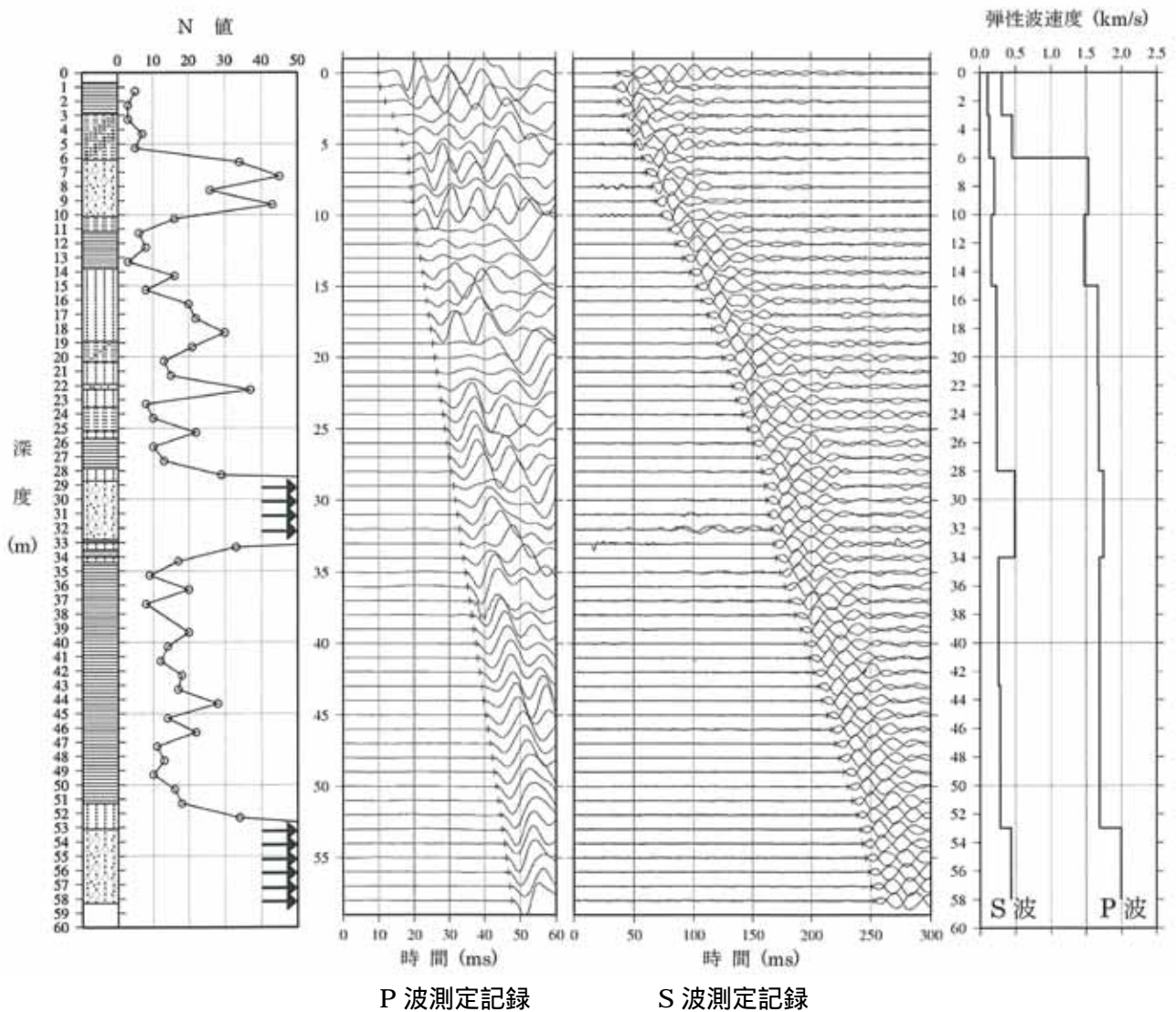
振動源の深度を変えながら繰り返し起振を行って測定します。

浮遊法：振動源と複数の受振器が一体となった装置をボーリング孔内に入れ、孔壁に圧着させずに装置の深度を変えながら連続的に測定する方法です。孔内起振・孔内受振方式あるいはサスペンション方式ともいいます。



弾性波動としてのP波は水中を音波として伝播できますが、S波は伝播できません。P波速度が水中音波速度（約1.5km/s）以下の土質地盤では、地下水位以深において水中音波の影響を受けて、土質地盤そのもののP波速度を示さなくなります。そのため、地盤の硬軟をP波速度から判断することが難しくなります。一方、S波は水中音波の影響を受けないことから、地下水位以深でもS波速度は地盤の硬軟との相関性が高く、良い指標となります。

土質地盤において、PS検層が標準的に実施されているのは、以上の理由によります。また、自然地震による地震動の振幅は、一般にP波よりもS波の方が大きいことから、耐震設計を行う上でS波が重要視されています。



常時微動測定

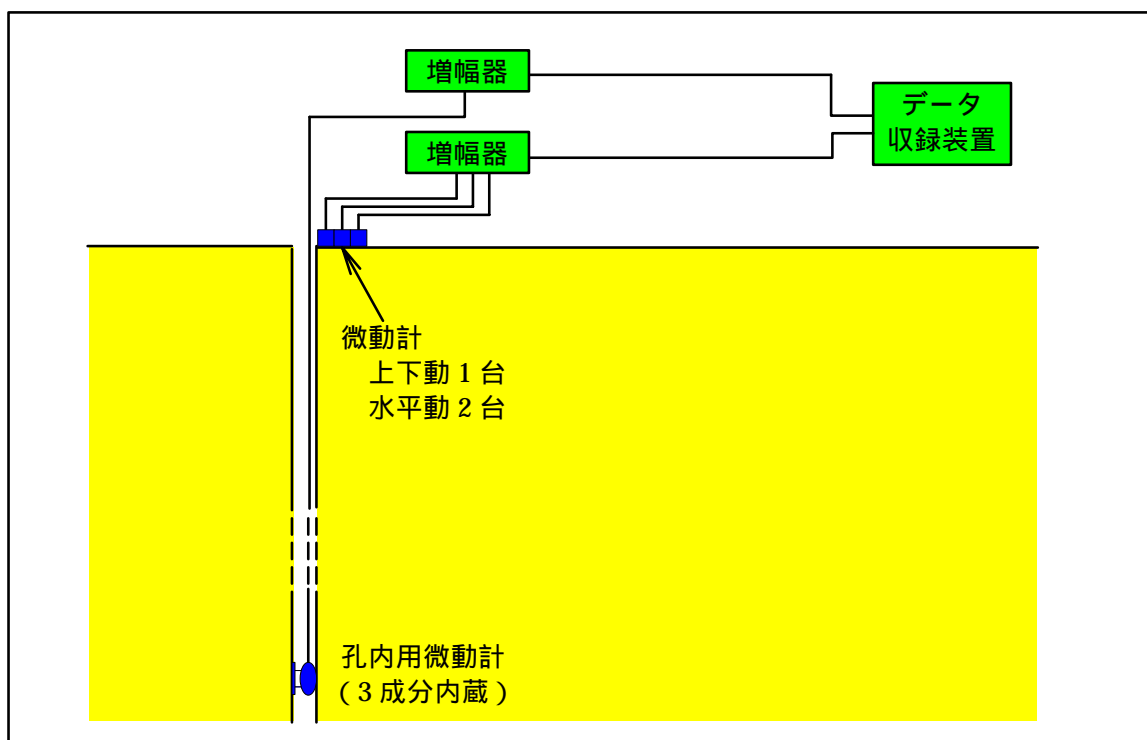
交通機関や工場等の人為的な活動、および風、海洋の波浪や火山活動等によって、地盤は絶えず微小な振幅で振動しており、これを微動と呼んでいます。微動は周期によって分類されており、周期 1 秒以下の微動を常時微動（あるいは短周期微動）と呼んでいます。周期 1 秒以上の微動は長周期微動（あるいは脈動）と呼ばれており、このうち周期 1~5 秒程度の微動は「やや長周期微動」と呼ばれ、土木・建築分野において超高層建築物・免震建築物や長大構造物等の耐震性評価を行う上で重要視されています。

常時微動は固有周期 1 秒程度の微動計によって比較的簡便に観測することができ、地盤の震動特性の把握や地下構造の推定に利用されています。

観測では、地表やボーリング孔内に 3 成分の微動計を設置して常時微動を記録します。記録した振動データに対してスペクトル解析を行い、地盤に関する情報を抽出します。

地表の多地点で同時観測を行うことにより、観測地点間の地盤震動特性の違いや表層地盤の厚さ（あるいは基盤深度）の変化を把握することができます。また、ボーリング孔口付近の地表とボーリング孔内で常時微動を同時観測することにより、深度方向の地盤の震動増幅特性を把握することができます。

建築物の耐震設計にあたって地盤の卓越周期を常時微動観測結果から求める場合、孔内観測は基礎底面もしくは剛強な支持杭先端部分の深度で行います。



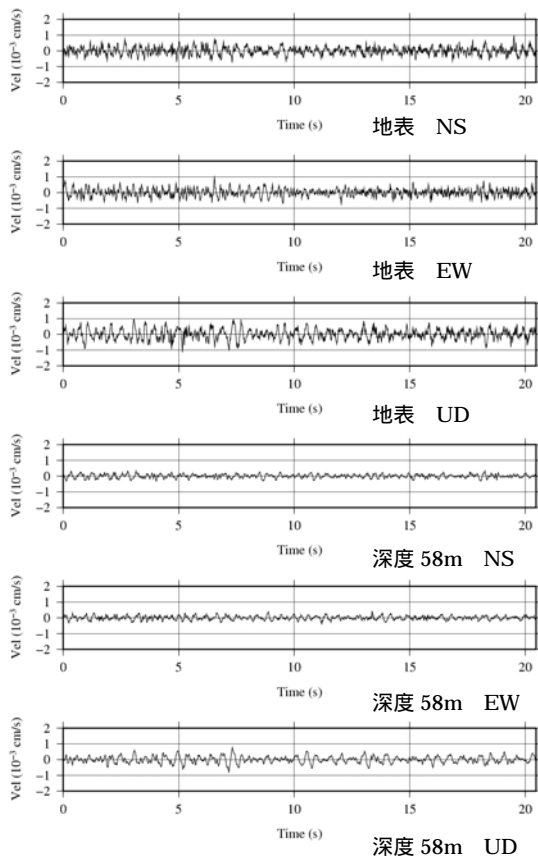
地表とボーリング孔内における常時微動観測



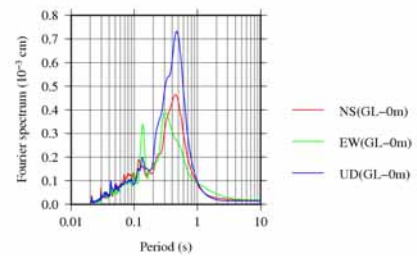
地表用微動計



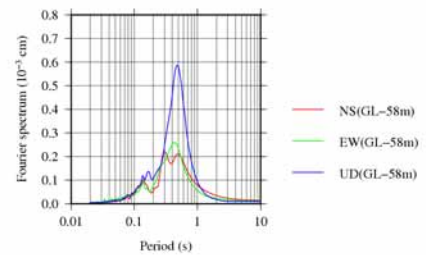
孔内用微動計設置作業



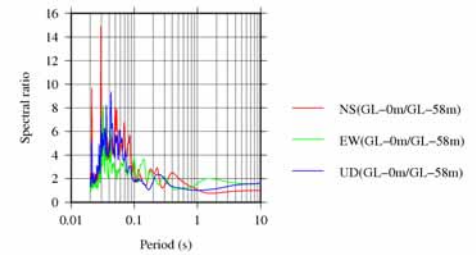
観測速度波形



フーリエ・スペクトル(地表)



フーリエ・スペクトル(深度 58m)



[地表] / [深度 58m]のスペクトル比

フーリエ・スペクトル
およびスペクトル比



測定機器

(増幅器、収録用ノートパソコン)

微動アレイ探査

微動アレイ探査とは

地盤はわずかながら常に動いています。微小な地盤振動のうち、振動源が特定できないものを微動と呼んでいます。微動の性質は多様であって、必ずしも全容が解明されているわけではありませんが、微動は表面波という地盤を伝わる波動のひとつと考えることもできます。

いずれにしても微動は観測地点付近の地盤特性、すなわち弾性波の伝播速度や卓越する周波数、増幅特性などを反映しているものであり、微動を観測することによって大局的な地盤構造を把握できます。

微動アレイ探査は地下構造推定法として近年急速に発展してきている探査法であり、複数の微動計で微動を同時測定し、このデータを処理することによって観測地点の地下構造（S波速度構造）を求める簡便かつ画期的な深部地盤探査法です。

測定方法と解析方法

地表に数台から10数台の上下動微動計を設置して、概ね1時間から2時間地盤振動を同時に観測します。このデータをもとに、それぞれの周波数に対する表面波の伝播速度（分散曲線）を求めます。

ところで地盤構造（P波、S波速度と層の厚さ等）がわかっていると、そこを伝播する表面波の速度は一意的に決定されます。したがって測定データから求めた分散曲線と、地盤構造を仮定して計算上求めた分散曲線（理論分散曲線）が一致すれば、観測地点の地盤構造がわかります。そこで実測したデータから求めた分散曲線と理論分散曲線が一致するように地盤構造のモデルを変化させながら最適な地盤構造を求めます。この解析はすべてコンピュータ処理で行われます。

探査機材とアレイ配置

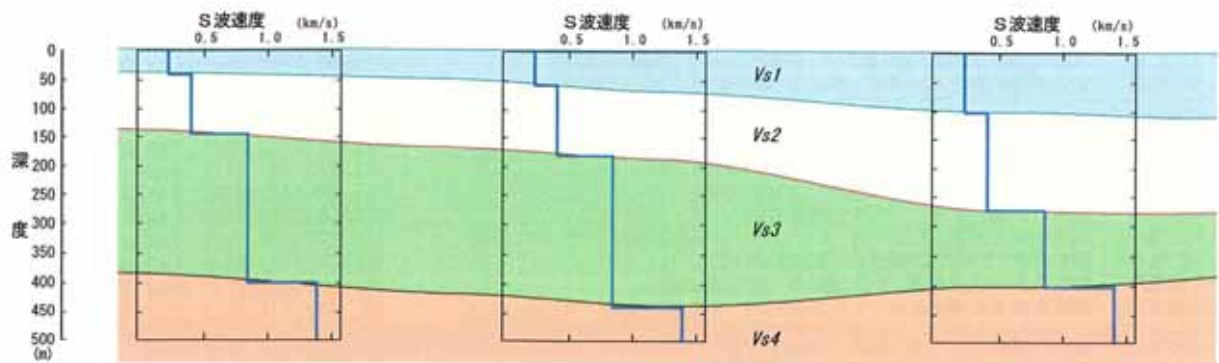
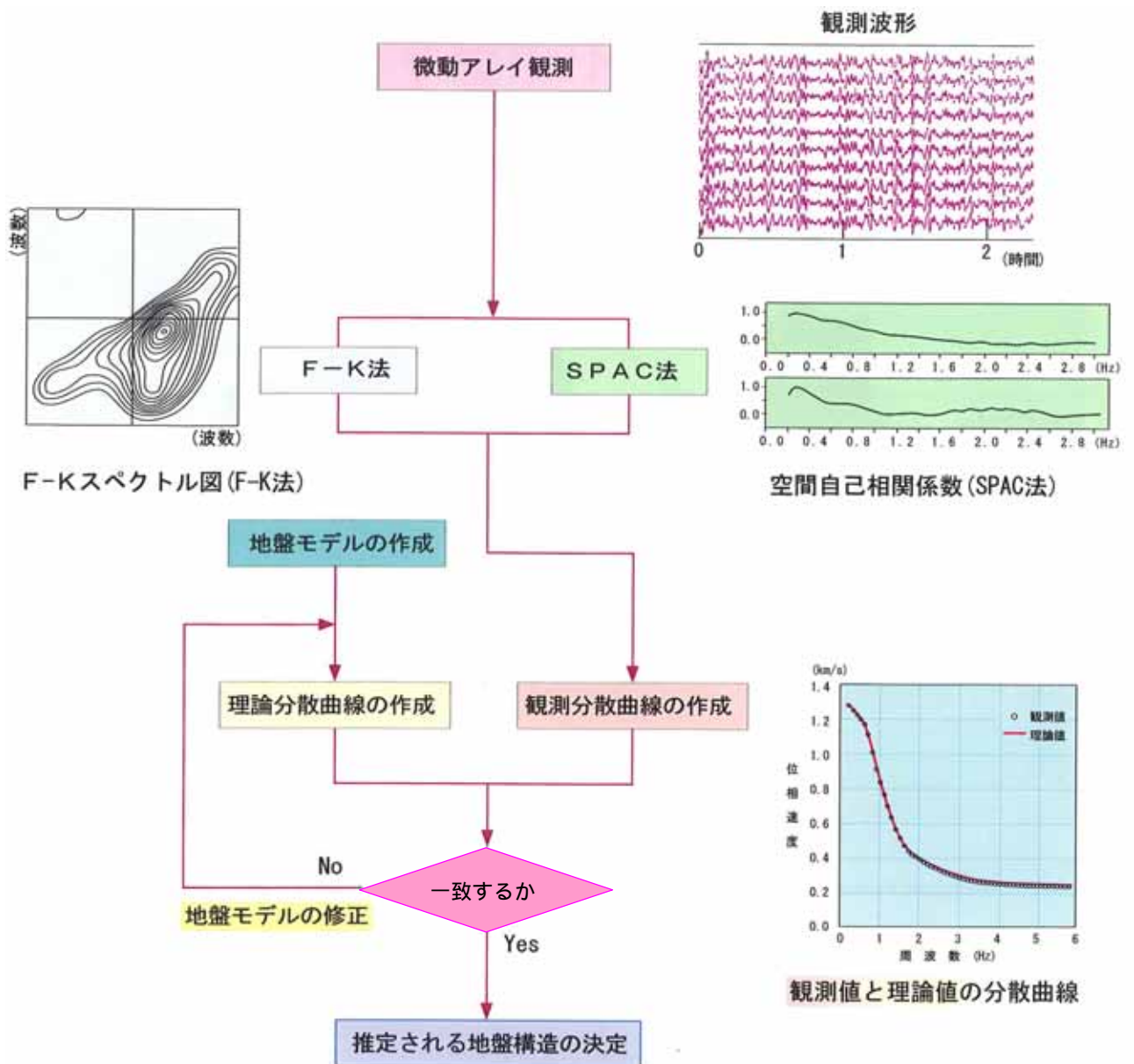


微動計と記録器



三角形の頂点と中心に配置された微動計

解析フローチャートと解析成果



推定地盤構造

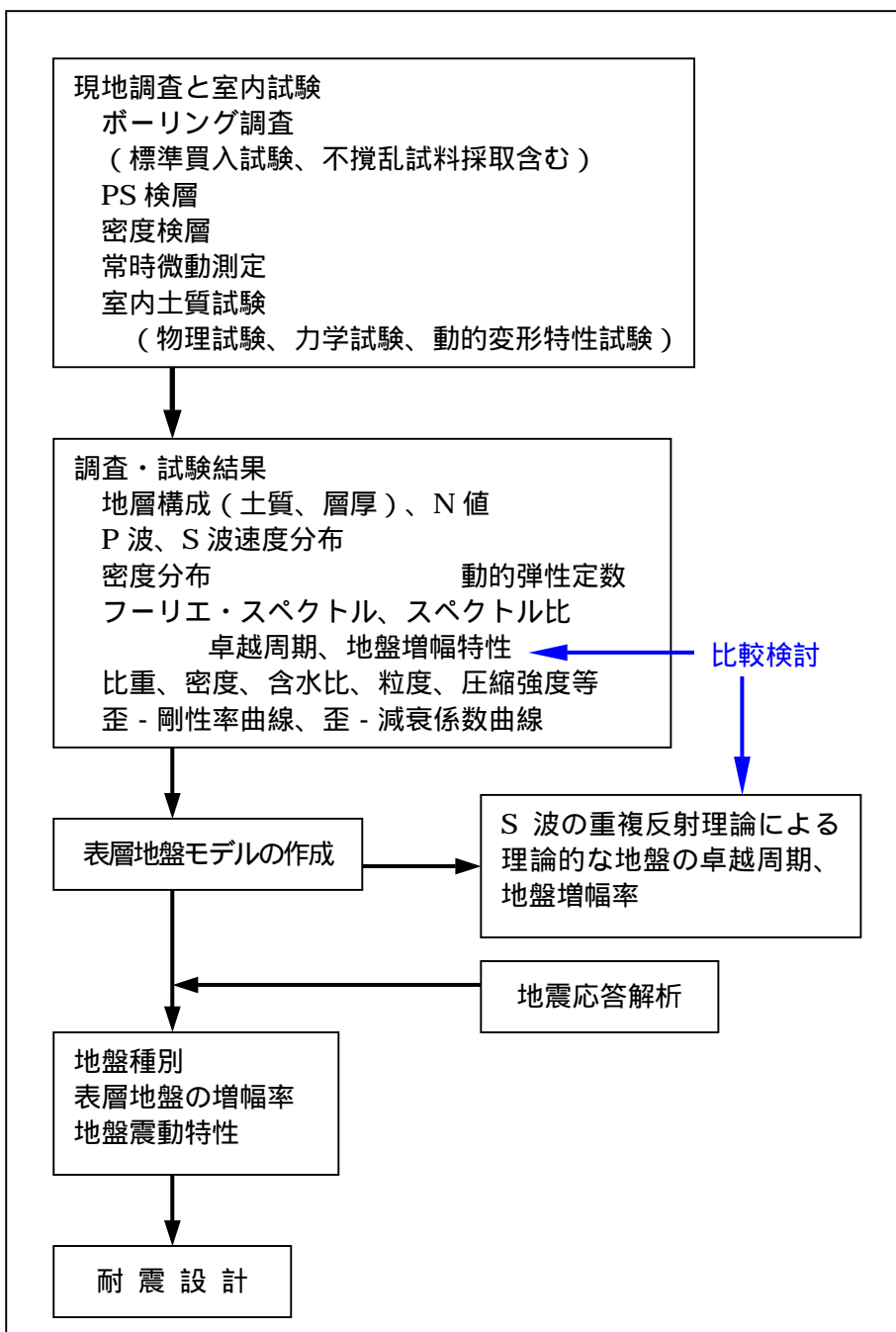
地盤種別と卓越周期

標準貫入試験を伴う土質ボーリング調査により、地層構成やN値が求められます。掘削されたボーリング孔を利用してPS検層を実施することにより、P波速度とS波速度の深度分布がわかり、S波速度から**工学的基盤**の深度を定めることができます。これに密度やS波のQ値の分布を与えることにより、S波の重複反射理論に基づいて理論的な地盤の卓越周期や地盤増幅率を求めることができます。

密度分布については、密度検層を実施することにより求めることができます。また、採取した不攪乱試料の室内土質試

コラム

平成12年建設省告示第1461号「超高層建築物の構造耐力上の安全性を確かめるための構造計算の基準を定める件」において、**工学的基盤**とは「地下深所において十分な層厚と剛性を有し、せん断波速度が約400m/s以上の地盤をいう」と定められています。



験の結果に基づいて、推定した密度値を採用することもあります。室内土質試験では動的変形特性試験も実施し、剛性率や減衰定数の歪依存性（いわゆる非線形特性）も求めます。

常時微動の測定記録のスペクトル解析からは、卓越周期や地盤増幅特性といった地盤特性の実測データが得られます。

地盤特性の理論値と実測値を比較することにより、表層地盤モデルの妥当性を検討することができ、以上の調査結果より地盤種別（昭和55年建設省告示第1793号第2）の判定、地盤震動特性の把握等を行うことができます。

さらに、建築物の耐震設計において、現行の建築基準法に基づいて限界耐力計算を行う際に必要となる表層地盤の増幅率（平成12年建設省告示第1457号第7）が求められます。

建築構造物の模擬地震波作成基準の概略

土木構造物および建築構造物の耐震設計における入力地震波は、目標応答スペクトルの形状はやや異なりますが、ほぼ同じ手法で作成されます。

建築構造物の模擬地震波作成について

1. 超高層建築物（高さ 60m 以上）の場合

「平成 12 年建設省告示第 1461 号四」による模擬地震波の作成の概要を以下に示します。

告示波の作成

解放工学的基盤面における減衰定数 5%に対する基盤波形の加速度応答スペクトルは、下図のように規定されています。また、位相特性、波形の長さ、作成個数などの目安は以下のようになっています。

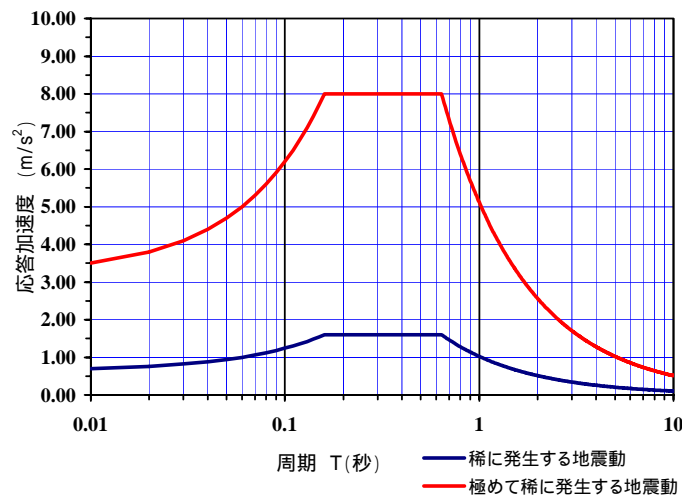
(1) 位相特性

観測波形の位相特性を用いる方法

乱数により位相特性をランダムに設定する方法

(2) 波形の長さ 60 秒以上

(3) 複数個の模擬波の作成



告示波の加速度応答スペクトル

サイト波の作成

告示では「敷地の周辺における断層、震源からの距離、その他地震動に対する影響及び建築物への効果を適切に考慮して定める」とされています。地震波の作成方法には以下の方法があります。

(1) 経験的方法（翠川・小林の方法など）

(2) 半経験的方法（経験的グリーン関数法など）

(3) 理論的方法（差分法、有限要素法など）

2. 免震構造物の場合

免震建物は、その固有周期がやや長周期に属するため、入力地震波の設定にあたっては、やや長周期帯域でのスペクトル特性や、総入力エネルギー、位相特性などに、特に配慮する必要があります。

長周期側のスペクトル特性を考慮した模擬地震波の作成に当たっては、上記の超高層建築物の場合と同じ手法が適用できます。

3. 評定・評価を踏まえた高層建築物（概ね高さ 45m 以上）の場合

その他中高層・高層の建築物や重要構造物においても、動的耐震設計を行う場合には、上記 1 と同様の手法による模擬地震波の作成が望まれています。

NGP 日本物理探鑛株式会社

本 社 〒143-0027 東京都大田区中馬込二丁目2 番 12 号 TEL 03(3774)3211 FAX 03(3774)3180

URL <http://www.n-buturi.co.jp>

東北支店	〒983-0842 仙台市宮城野区五輪一丁目6 番 16 号	TEL 022(292)1165	FAX 022(297)2520
北陸支店	〒950-0983 新潟市中央区神道寺三丁目10 番 37 号	TEL 025(241)2960	FAX 025(241)2959
東関東支店	〒310-0804 水戸市白梅三丁目10 番 5 号 コーラルトップ 106 号	TEL 029(231)7315	FAX 029(231)7316
関東支店	〒143-0027 東京都大田区中馬込二丁目2 番 12 号	TEL 03(3774)3161	FAX 03(3774)9353
中部支店	〒453-0856 名古屋市中村区並木二丁目245 番地	TEL 052(414)2260	FAX 052(414)2265
関西支店	〒550-0024 大阪市西区境川二丁目5 番 27 号 谷野ビル5 F	TEL 06(6582)8541	FAX 06(6582)8543
九州支店	〒803-0814 北九州市小倉北区大手町7 番 38 号 大手町ビル3F	TEL 093(581)8281	FAX 093(581)8267
札幌営業所	〒060-0001 札幌市中央区北一条西二丁目9 番地 オーク札幌ビル7F	TEL 011(251)3761	FAX 011(221)2452
富山営業所	〒930-2242 富山市四方北窪 1716 番地 1 号	TEL 076(435)6010	FAX 076(435)6020
横浜営業所	〒224-0014 横浜市都筑区牛久保東二丁目4 番 7 号 107	TEL 045(591)4351	FAX 045(591)4378
静岡営業所	〒424-0009 静岡市清水区柏尾 772-4	TEL 054(349)1250	FAX 054(349)1251
三重営業所	〒511-0902 桑名市松ノ木四丁目7 番 78 号	TEL 0594(32)7725	FAX 0594(32)7726
滋賀営業所	〒520-0246 大津市仰木の里四丁目13 番 グランドメゾン 2-204 号	TEL 077(574)2261	FAX 06(6582)8543
兵庫営業所	〒660-0865 尼崎市西桜木町 10 番 9 号	TEL 06(6413)5128	FAX 06(6582)8543
福岡営業所	〒812-0016 福岡市博多区博多駅南三丁目13 番 17 号	TEL 092(474)3087	FAX 092(474)3107
山口営業所	〒750-0093 下関市彦島西山町三丁目18 番 22 号	TEL 0832(61)6436	FAX 0832(61)6437
沖縄営業所	〒900-0023 那覇市字楚辺 257 番地 7 号	TEL 098(835)4860	FAX 098(835)4866