

第 2 章

2

海底地質・地盤調査技術

我孫子研究所地質部 主任研究員 阿部信太郎
 我孫子研究所地盤耐震部 上席研究員 岡本 敏郎
 我孫子研究所地盤耐震部 主任研究員 工藤 康二
 前我孫子研究所地盤耐震部 主任研究員 谷 和夫

我孫子研究所地盤耐震部 主任研究員 岡田 哲実
 我孫子研究所地盤耐震部 上席研究員 田中 幸久
 我孫子研究所地盤耐震部 主任研究員 池見 元宣
 前我孫子研究所地質地盤部 地下科学グループ(囑託) 本莊 静光

2 - 1 海底地質調査技術の高度化17
 2 - 2 海底地盤調査技術の高度化23



阿部信太郎(1992年入所)

これまで活断層調査の高精度化に関する研究に物理探査の立場から携わってきた。最近では、湖における3次元反射法地震探査や地下レーダーを用いた高精度3次元反射法探査に取り組んでいる。今後は、マグマや地震発生層の把握を目的として自然地震を用いた深部地殻構造探査にも取り組んでいく。



岡田 哲実(1994年入所)

これまで、軟岩地盤を対象とした地盤調査に関する研究を行ってきた。現在は、不均質岩である礫岩の物性評価に関する研究を進めている。今後は、高レベル放射性廃棄物処分を対象とした高温下の岩盤物性に関する研究を行っていききたい。



岡本 敏郎(1977年入所)

揚水式発電所ロックフィルダムの調査/設計/施工/管理、原子力発電所の第四紀地盤立地および人工島式立地、火力発電所の軟弱地盤対策や石炭灰処分/灰捨て地調査に従事。現在表面遮水式ロックフィルダムの設計の研究を担当。



田中 幸久(1980年入所)

飽和砂地盤の液状化対策、原子力発電所の新立地技術(第四紀地盤立地、人工島式海上立地)などを通じて砂や碎石、砂礫材料などの動的物性の評価やその応用を中心として研究を実施してきた。今後は、高レベル放射性廃棄物処分や地盤環境問題の解決へ向けての研究も実施していききたい。



工藤 康二(1982年入所)

入所以来、原子力発電所の新立地(第四紀立地、海上立地)プロジェクトにおいて、砂礫地盤や捨て石マウンド材料といった粗粒材料や軟質岩等の力学特性について、室内試験や現場PS検層を中心に研究を進めてきた。今後は、高レベル放射性廃棄物処分や環境問題の解決へ向けての研究を展開していききたい。



池見 元宣(1970年入所)

入所以来、フィルダムの築堤材料物性試験や軟弱地盤や砂礫地盤の原位置試験に関わってきた。近年は、軟岩を中心とした物性試験およびボーリング技術の高度化に関する研究を行ってきた。今後も原位置試験を中心とした研究に従事していききたい。1999年6月より(株)シー・アール・エスに出向。



谷 和夫(1990年入所、1999年3月退職)

主に原子力発電所の新立地技術開発や、電力土木の地盤調査と基礎設計に関わる依頼研究に従事した。専門は岩盤工学、応用地質学などで、1999年4月より横浜国立大学工学部建設学科の助教授。今後は地盤情報を活用した国土計画論などにも手を広げる予定。



本莊 静光(1963年入所、1994年6月退職)

出身は物理探査であり、当所では岩石・岩盤物性、防災・構造地質等の調査研究に多く携わる。原子力では既往諸地点の広域・敷地内調査の経験に基づいて在来立地地質調査法の標準化に従事し、また各新立地方式における調査システム案の策定に努めた。現在総合地質調査(株)勤務。

2 - 1 海底地質調査技術の高度化

2-1-1 はじめに

人工島式海上立地のための海底地質調査では、建屋基礎底面位置付近における試掘坑調査の困難な場合が予想される。したがって、図2-1-1に示すように各種物理探査とボーリング調査を有効に組み合わせて、詳細地質構造と概略物性分布を把握し、特に必要な場合に限り海底原位置地質調査を実施するというのが、最も現実的な調査システムと考えられる¹⁾。

通常、陸域の地質構造については、地表踏査やボーリング調査などの直視的な調査方法と、地表からの反射法地震探査およびボーリング孔を用いたPS検層、弾性波トモグラフィー等の物理探査を組み合わせることによって把握する。

海域の地質構造把握については、反射法地震探査が特に有効とされ、在来立地における広域調査段階でも広く用いられている。当然、人工島式海上立地のための海底

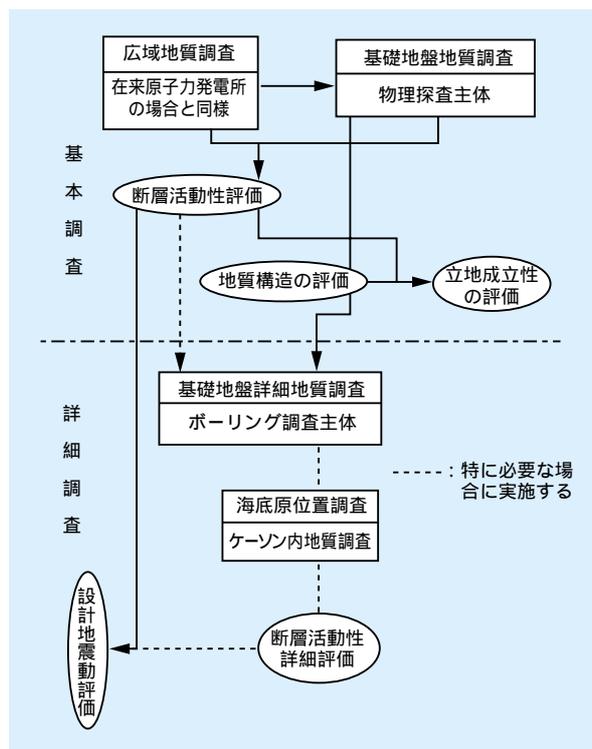


図2-1-1 人工島式海上立地における海底地質調査の流れ

地質調査においても、この反射法地震探査が主流的手法となる。

2-1-2 反射法地震探査の基本原則

弾性波は、伝搬速度の異なる物質が接する境界面において反射する性質を有しており、この性質を地球内部に適用した場合、地表面において発震された弾性波は地下の地層境界面において反射し、再び地表に反射波として戻ってくる。反射法地震探査は、この反射波を観測することにより、地下の地質構造を把握する手法である。

図2-1-2(上)に示すように、地震計を設置して震源から弾性波を発生させると、発生した弾性波は各地層境界で反射して、地表に戻ってきて地震計に記録される。震源および受震点の位置を移動しながらこの観測を繰り返すと図2-1-2(下)に示すような反射記録が得られる。反射波は、地層境界の深さと各地層の弾性波伝搬速度で決

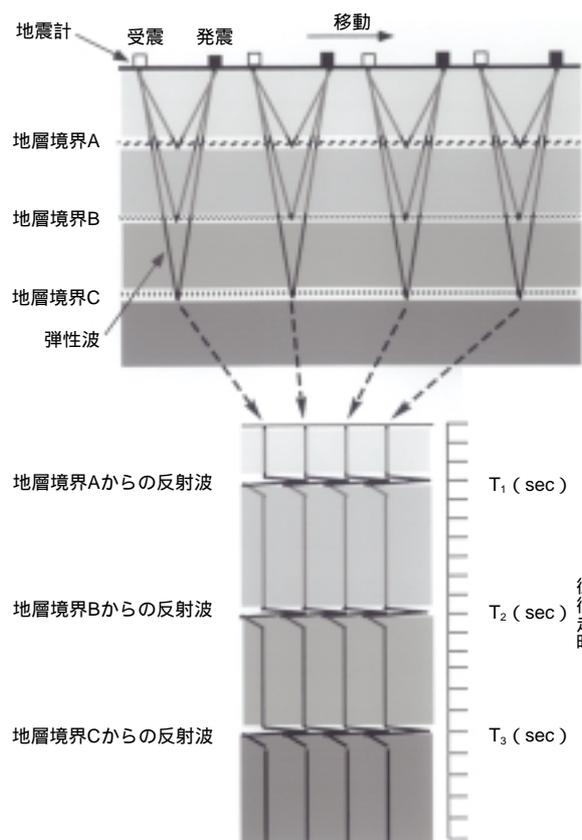


図2-1-2 反射法地震探査の原理

まる時間で地表に置いた地震計に戻ってくるため、記録を並べると地層形状を再現することができる。図2-1-2(下)の反射記録は、往復走時と呼ばれる弾性波が地表から各地層境界まで到達し再び地表に戻ってくるまでの時間を縦軸にして示しているが、各地層の弾性波速度が把握されれば、縦軸を深度に変換した断面図も作ることができる。

海域における反射法地震探査では、図2-1-3に示すように調査船を一定の速度で航行させながら弾性波を一定距離間隔で発震させ、海底下の反射記録を連続的に取得する。

2-1-3 反射法地震探査の地質構造解明精度に関する検討

反射法地震探査記録は、地下の地質構造を断面図として表現している。一枚一枚の反射面は、反射面をはさむ上下地層の物性の相対的違いを反映しており、この記録断面図に示される地質現象は、大きいものは地質の構造形態、不整合面といった広域の地質構造から、小さいものは堆積の微細構造までを表わしている。

反射法地震探査記録による地質構造の解明精度を左右する要因は、計画段階における測線間隔および測線方向の設定、探査段階における船位測定のエラー、機器精度とそのパラメータ設定条件、解析段階における弾性波の物理的性質の解釈、地質学的解釈など、調査過程の各段階において様々な形で含まれ、それぞれが相互に関連し、最終的に地質構造の解明精度として現われる。特に探査段階において、どのような仕様の震源を選択するかが、得られる記録の分解能、把握深度、S/N比に大きな影響を与える。

現在、反射法地震探査において用いられている各種の震源は、周波数特性、発震出力がそれぞれ異なっている。浅海域においては、主にエアガン、ウォーターガン、スパーカーが震源として用いられている。一般的にはエアガンは、発震出力が大きく低周波数、ウォーターガンは中程度の発震出力でやや高周波数、スパーカーは、発震出力が小さく最も高周波数の震源として使用されている。これらの震源を用いて同一測線上で反射法地震探査を実施し、各震源の地質構造解明精度について比較検討を実施した⁽²⁾。記録システムおよびデータ処理条件は全て共通である。図2-1-4に示す通り、深部の地質構造については、発震出力の大きさに応じてエアガン、ウォーターガン、スパーカーの順に明瞭であり、地質構造の分解能については、発震周波数の高さに応じてスパーカー、ウォーターガン、エアガンの順に高分解能である。

以上のように各震源の周波数特性と発震出力の違いによって、地質構造の解明精度、把握深度に顕著な差異が生じている。海域の反射法地震探査において、種類の震源で分解能と探査深度の双方を満足することは原理的に困難である。したがって、地形および地質条件を十分に考慮し、把握対象に応じた震源を選択する事が、反射法地震探査による地質構造解明精度を確保する上で、極めて重要である。

2-1-4 音響学的層序の岩質および地層形成年代との対比

海域においては、陸域における地表地質調査に相当する情報がきわめて少ない。従って、反射法地震探査から得られる音響的な層区分を、実際の岩質や地層形成年代に対応付けるためには、既往のピストンコアリングや海

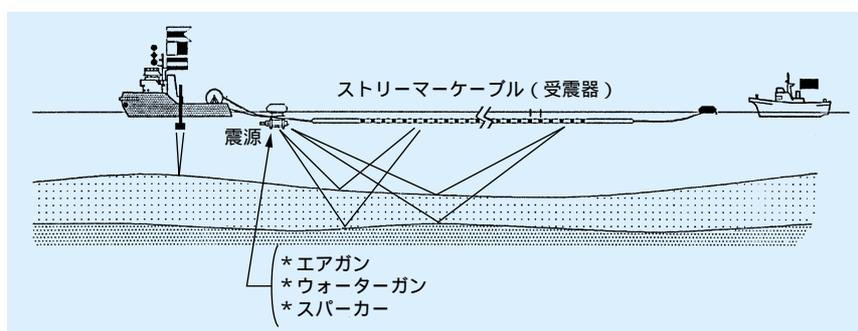


図2-1-3 海域における反射法地震探査の概念図

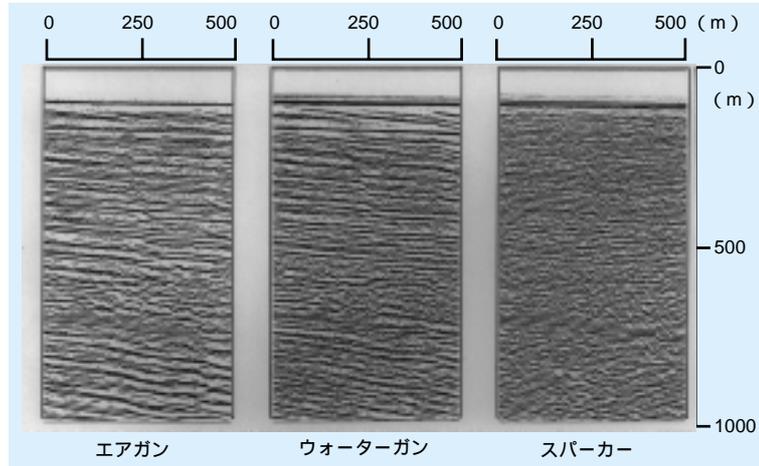


図2-1-4 各種震源による反射法地震探査記録断面の比較

底ボーリング調査により把握された地層区分、隣接陸域における地質調査結果を参照し、総合的に検討する必要がある。反射法地震探査記録と既往文献に記載されている海底ボーリング調査結果³⁾を対比した例を図2-1-5に示す。ただし、現実的にはこのような対比が可能な場合は少数で、対象とする海域に関して適当な文献が存在しない場合も多い。また、海域と陸域では過去の堆積環境の違い、例えば海進、海退などの影響により、陸域と海域の地層区分を対応付けられるとも限らない。

このような場合には、音響学的層序と地質層序の対応付けが既になされている海域から対象海域まで反射法地

震探査により層序を追跡するか、ピストンコアリング、もしくは海底ボーリングを反射法地震探査の測線において実施し、直接的に対象海域の岩質および地層形成年代を把握する以外に方法はない。

2-1-5 反射法地震探査記録断面による断層の判定

断層の種類は、正断層、逆断層、横ずれ断層に大別される。反射法地震探査記録では、断層は図2-1-6に示すようにある場所を境に反射面が切れて、その両側で反射

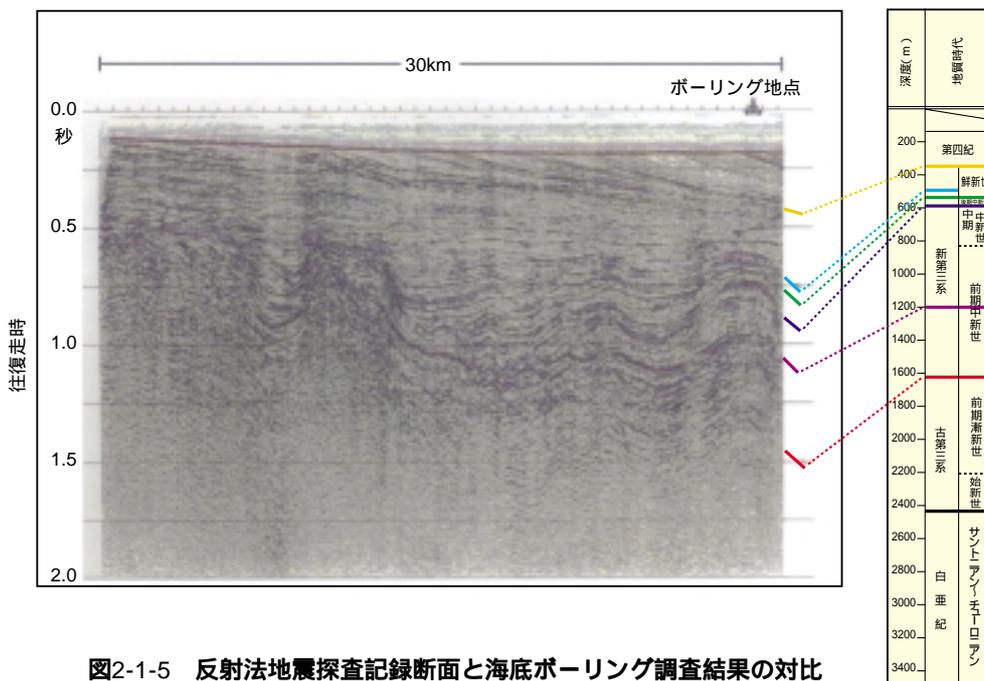


図2-1-5 反射法地震探査記録断面と海底ボーリング調査結果の対比

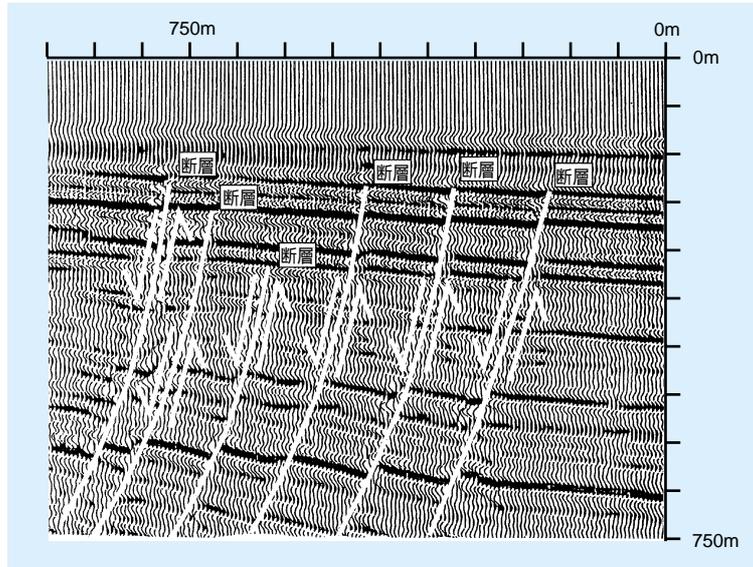


図2-1-6 反射法地震探査でとらえられた断面

面がずれている場合に認定される。しかし、断層の存在が確認された場合においても、断層の傾斜角が低角度で、すべり量が小さい場合は、断層を挟んだ反射面の上下方向での変位量は見掛け上、さらに小さくなってしまいうため、ずれの判定は困難になる。このような場合は、反射法地震探査記録断面の縦軸と横軸の比率を変えて、深度方向を強調した断面を作成することにより、判定が可能となる場合もある。また、幾何学上、一本の反射法地震探査記録上で判定出来る断層の変位は上下方向のみである。すなわち、完璧な横ずれ断層が存在した場合には、一本の反射法地震探査記録断面からだけでは、その存在の有無、横ずれ変位量を推定することはできない。ただし、現実的には完全な横ずれ変位のみで形成されている断層はなく、若干なりとも必ず上下変位を伴っており、断層の存在を見落とす可能性は極めて低い。

いずれにしても、ある測線において断層の可能性を示す反射パターンが確認された場合には、隣り合う測線において同一の反射パターンが存在するか否か、反射パターンから推定される断層の種類が同一か否かについて検討する必要がある。

我々が実施する反射法地震探査記録断面上における断層の判定には、データの質や地質構造の多様性などを考慮する必要があり、データ解析者の経験に基づく主観性も少なからず含まれている。どのような状況に対しても適用可能な、データ解析者の主観性を完璧に排除した判定基準というものを設定することは現時点においては困

難である。ただし、最近では、人工知能的な概念を用いて、反射法地震探査記録断面から自動的に断層を抽出して変位量等を見積もる地質構造解釈システムに関する研究が資源探査分野ではなされている。このような解析システムが実用化されれば現在よりも遥かに客観性の高い断層の判定が可能となる。

2-1-6 海底に存在する断層の活動性評価

断層は、規模と性状、活動履歴、最終活動年代を検討することによって、発生する地震規模、活動間隔が活動性として評価される。海底に存在する断層の活動性を評価する際に最も重要なポイントは、「対象とする断層が、どの時代の地層まで変形を与えているか」にある。具体的には、地層形成年代と反射法地震探査によって得られる音響学的層序の対比、および反射法地震探査記録断面より認識される断層の存在と変位の範囲を考慮し、活動性が評価される。反射法地震探査記録から読み取れる地層の連続性を検討することにより、最終的に断層の活動性を評価するまでの手順をフローチャート化したものを図2-1-7に示す。ただし、全ての事例がこのフローに沿って評価が可能なのではない。たとえば、海底地形にあらわれている海底面の段差は、断層の最近の活動を示す可能性もあるが、断層変位以外の形成要因についても検討する必要がある。また、断層自体は直接的には確認されていない場合でも、断層の存在が地下深部に示唆さ

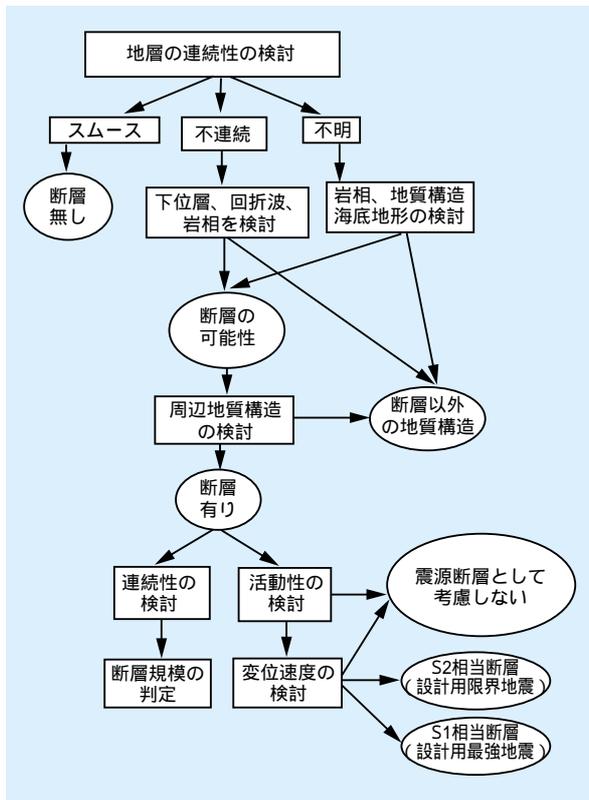


図2-1-7 反射法地震探査記録に基づく断層活動評価の流れ

れるような地層変形が確認される場合は、陸域も含めた周辺地域の地質構造発達史を検討し、深部断層の活動性を評価する。さらに、断層を被覆する地層が存在しない場合、もしくは被覆する地層の形成年代が把握できない場合については、周辺地域の地質構造および周辺に存在する断層の雁行性、断続性等の分布形態、性状から断層帯としての地質構造発達史を検討し、対象とする断層の成因と活動性について、総合的に評価する。

2-1-7 海底から陸上まで連続する地質構造の把握

人工島式海上立地の広域地質調査段階において、海底から陸上に至る連続した地質構造を反射法地震探査により把握できるとすれば、立地成立性確認のために極めて有効な判断材料となる⁽⁴⁾。ただし、人工島式海上立地においては、水深十数メートル以浅が建設対象となり、ストリーマケーブルと呼ばれる受震用ケーブルを船尾から100m以上曳航する通常仕様の反射法地震探査では、調査船の航行にも水深5m以上は必要であり、陸域と

の間に測定出来ない範囲が生じてしまう。また、この範囲においては、陸上反射法地震探査の受震器を海底に設置することも、耐水性の観点から困難である。このような浅海域においては、センサーを海底に設置するベイクケーブルと呼ばれる受震ケーブルを用いる探査方式が有効である。

沿岸域に空白域をつくることなく反射法地震探査を実施するために、ベイクケーブルを用いた反射法地震探査と通常仕様の海域、陸域における反射法地震探査を併用する図2-1-8に示すような探査システムを実フィールドに適用した⁽⁵⁾。この探査システムの特徴は、海域反射法地震探査、ベイクケーブル反射法地震探査、陸上反射法地震探査の各探査手法を独立したレイアウトの探査として実施するのではなく、一体化した一つのレイアウトの探査として実施するところにある。すなわち、陸域から発震された弾性波は海底でも受震され、その反対に海域から発震された弾性波は陸上でも受震される。データ処理は、通常の反射法地震探査のデータ処理とほぼ同様であるが、各探査手法間におけるデータ特性の違いを補正するためのデジタルフィルター処理を施した。得られた反射法記録断面は図2-1-9に示すように極めて良好であり、海底から陸上に連続する地層の堆積状況が深度2000m程度まで明らかになった。

2-1-8 まとめ

人工島式海上立地の海底地質調査においては、試掘坑調査が困難であることが想定される。したがって、陸域における調査比重が必然的に高くなるを得ない。このため、陸域における調査結果を海域のボーリング調査や物理探査結果と結び付ける必要があり、陸上から海底までの連続した地質構造断面、物性構造断面を得ることが重要となる。本節に示した海底から陸上に至る連続した地質構造断面を取得するための反射法地震探査システムは、在来立地における広域調査段階で、既に海底地質調査法として用いられているものの組み合わせにより構成されている。すなわち、探査装置などは従来までのものをそのまま適用することが可能である。

海域における物理探査のさらなる高精度化に向けた研究は日々進歩しているが、現状よりも高精度なデータを得るためには、より厳密なデータ計測、より微弱な信号

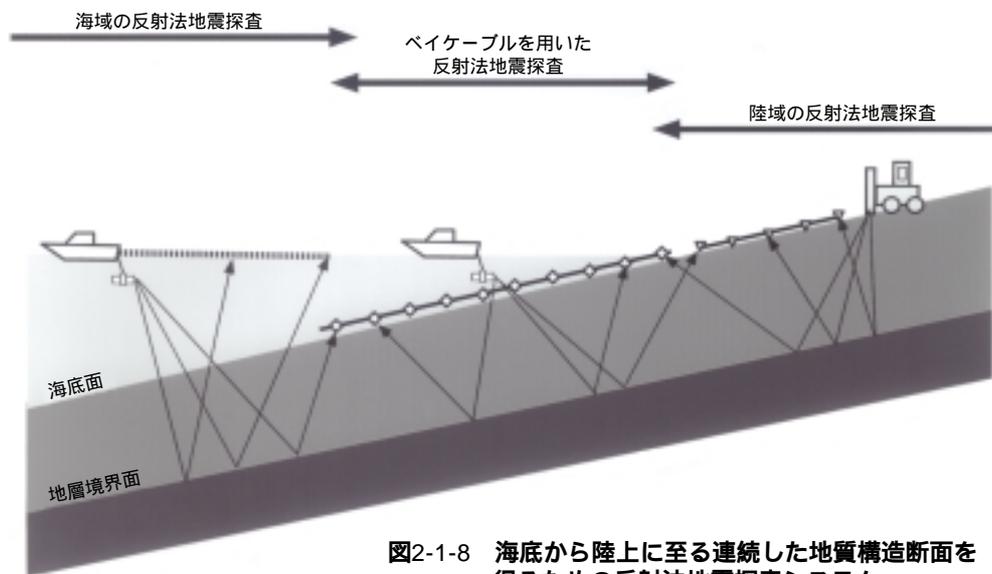


図2-1-8 海底から陸上に至る連続した地質構造断面を得るための反射法地震探査システム

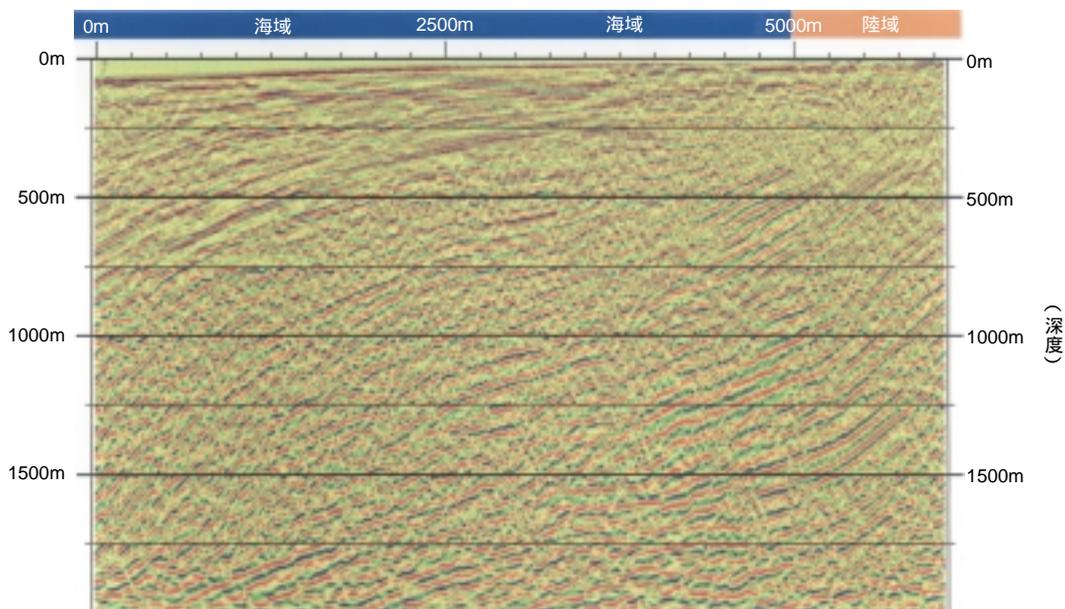


図2-1-9 海底から陸上に至る連続した反射法地震探査記録断面

をとらえる観測を実施する必要があり、そのための観測機器、観測技術開発も必要である。最近の電子工学分野における技術動向からすると、この分野が必要とする仕様を満たす観測機器については、既存技術の組み合わせにより、理論的には製作可能な状態になっている。また、観測技術についても、土木から資源開発、地球科学に至

る広い研究分野において、海城における物理探査が用いられている現状からすると、ノウハウの蓄積は十分になされている。したがって、人工島式海上立地のための海底地質調査技術は、本節で示した事例も含めて必要とされる要素技術に関する検討段階は終了し、実用化へ向けた実践段階に到達していると言える。

2 - 2 海底地盤調査技術の高度化

1-5-1で述べたように人工島式海上立地における海底基礎岩盤の調査では在来立地と異なり試掘坑を設けることが困難な場合も考えられるので、岩盤せん断試験結果と平板載荷試験結果など従来、試掘坑内で実施されてきた試験の実施が困難である場合も想定される。従って、人工島式海上立地においては、試掘坑によらずに、従来得られた情報に近いレベルの情報を得ることのできる地盤調査・試験方法ならびにそれらによる地盤特性の評価方法の確立が望まれる。

具体的な方法としては、岩盤の特性に応じて

- ① 現地より採取した不攪乱試料を用いた室内試験
- ② ボーリング孔や地盤調査用ケーソン内など試掘坑以外で行う原位置速度検層や各種原位置試験

を適切に組合せた調査を実施して、その結果を総合的に判断して地盤物性を評価することが考えられる。また、上記①、②の他に、場合によっては陸域に存在する類似岩盤に対する地盤調査を行うことも考えられる。

ここでは、不攪乱試料を用いた室内試験による地盤物性評価方法とボーリング孔を利用した地盤調査による岩盤物性評価方法のうちの一つであり、当研究所が開発した岩盤用プレッシャーメータ試験について述べる。

プレッシャーメータ試験は、後述するようにボーリング孔壁をゴム膜を介して載・除荷する試験方法である。ボーリング孔やゴム膜の寸法には限りがあるので、一回の試験から得られる地盤情報は岩盤全体からみれば点に近い局所的なものにならざるを得ない。このことは、不攪乱試料を用いた室内試験でも同様である。このような試験方法による結果から岩盤全体の特性を評価する場合に問題となるのは、岩盤中の亀裂の存在である。

一般に、岩盤は、その内部に亀裂が存在し、岩盤全体の挙動に影響を及ぼす。従って、局所的な地盤情報から岩盤全体の特性を評価する場合には亀裂の影響を考慮しなければならない。岩盤には、亀裂が多いものと少ないものがある。一般に、地質年代が古く硬質な岩盤は亀裂

を多く含むが、地質年代の新しい堆積軟岩は比較的亀裂が少ない。従って、地質年代の新しい堆積軟岩を対象とした場合には、不攪乱試料を用いた室内試験やプレッシャーメータ試験から岩盤全体の特性を評価できる可能性が高い。そこでここでは、比較的均質で亀裂の少ない堆積軟岩からなる岩盤を対象として、不攪乱試料を用いた室内試験やプレッシャーメータ試験による地盤物性評価法について述べる。

2-2-1 室内試験による堆積軟岩の地盤物性評価

ここでは、室内試験結果と原位置岩盤試験結果の対応を明確にすることを目指して、比較的均質な堆積軟岩を対象として以下の検討を行った。

- ① 一般に、岩盤の内部には亀裂が存在するため、岩盤から採取した室内試験供試体の寸法が大きいくほど、供試体に含まれる亀裂が増加する(図2-2-1)。その結果、大きな供試体に対する室内試験から得られた強度ならびに剛性は小さな供試体に比べて小さい。これを寸法効果と呼ぶ。そこで、代表的な室内力学試験である三軸圧縮試験によって寸法効果の影響を検討する。
- ② 三軸圧縮試験結果と比較することにより代表的な原位置岩盤試験である岩盤せん断試験と平板載荷試験の位置づけを検討する。さらに三軸圧縮試験結果を用いて岩盤せん断試験結果と平板載荷試験結果の数値シミュレーションを行う。

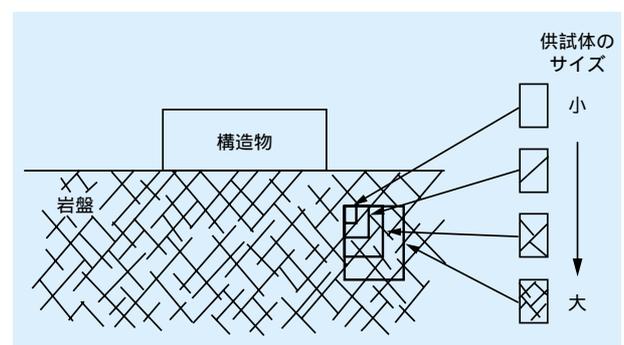


図2-2-1 岩石の寸法効果

(1) 力学特性に及ぼす寸法効果の影響の検討

三軸圧縮試験では、供試体の端部の乱れ(ベディングエラー)¹⁾の影響を受けないように、正確な変位計測を実施し、強度特性だけでなく変形特性の寸法効果についても検討を行った。

試料は、1種類の自然の堆積軟岩と人工軟岩(堆積軟岩を模擬した2種類の人工の岩石)を使用した。自然の堆積軟岩は、外見上は割れ目を含まない新第三紀鮮新統に属するシルト岩を用いた。人工軟岩は、砂岩を模擬した砂質系の岩石(配合S3)と泥岩を模擬した泥質系の岩石(配合M2)である²⁾。ただし、砂質系の人工軟岩では、供試体の表面に亀裂が見られない均質な試料を作製することができたが、泥質系の人工軟岩の大きな供試体には、供試体作製中に発生した亀裂が数本観察された。

以上3種類の試料に対して、供試体の直径が10、20、35、50、100、300、500mmの寸法で三軸圧縮試験を行った。

試験結果から得られた軸差応力(供試体の軸方向の応力から軸直角方向の応力を差し引いたもの)と軸ひずみ(供試体の軸方向の直ひずみ)の関係の代表例を図2-2-2に示す。強度特性としては、ピーク時の応力 q_f と残留時の応力 q_{res} を求め、それらに対する寸法効果を検討した。また、変形特性としては、初期(微小なひずみレベル)のヤング率 $E_{sec,i}$ 、ピークの半分の応力時($q/q_f=0.5$)のヤング率 E_{50} 、およびピーク時の軸ひずみ ϵ_f を求め、それらに対する寸法効果を検討した。

表2-2-1に寸法効果の影響をまとめた。人工軟岩(配

表2-2-1 寸法効果のまとめ³⁾

		人工軟岩		堆積軟岩
		配合S3	配合M2	シルト岩
強度特性	ピーク時の軸差応力 q_f	×		×
	残留時の軸差応力 q_{res}	×	×	×
変形特性	ヤング率の初期値 $E_{sec,i}$	×	×	
	$q/q_f=0.5$ の時のヤング率 E_{50}	×	×	×
	ピーク時の軸ひずみ ϵ_f	×	×	

○ : 寸法効果が認められる。
 △ : 寸法効果がやや認められる。
 × : 寸法効果は認められない。

合M2)におけるピーク時の応力 q_f に若干の寸法効果が認められる。その低下割合は、直径が10倍大きくなると約10%低下する程度である。これは、人工軟岩(配合M2)の作製中に発生した割れ目の影響と考えられるため、実際には問題とならない。また、自然の堆積軟岩における初期のヤング率 $E_{sec,i}$ とピーク時の軸ひずみ ϵ_f に僅かに寸法効果が認められるが、工学的には無視できる程度だった。

以上により、比較的均質で亀裂の少ない堆積軟岩では、強度・変形特性に明瞭な寸法効果は認められず、通常行う直径が50mm程度の供試体を用いた三軸圧縮試験により、堆積軟岩から成る地盤の強度・変形特性が求められることがわかった。

(2) 岩盤せん断試験結果との比較

ここでは、サンプリングしたコアに対する三軸圧縮試験結果と岩盤せん断試験結果との相互関係を明らかにすることを旨として、両試験から得られた強度特性を比較するとともに、三軸圧縮試験結果に基づく応力ひずみモデルを用いた岩盤せん断試験の数値シミュレーションを行った。

1) 破壊時の応力の比較

岩盤せん断試験は、図2-2-3に示すように室内模型実験により行った。せん断面の大きさは30cm x 30cmで、原位置試験で一般的な60cm x 60cmと比較して1/2のスケールである。実験に用いた試料は、2-2-1の寸法効果に関する検討と同様に、砂質系および泥質系の人工軟岩と自然の堆積軟岩(シルト岩)である。本試験では、破壊のメカニズムを詳細に検討するため、せん断する岩盤ブロックのせん断面に作用する直応力とせん断応力の分

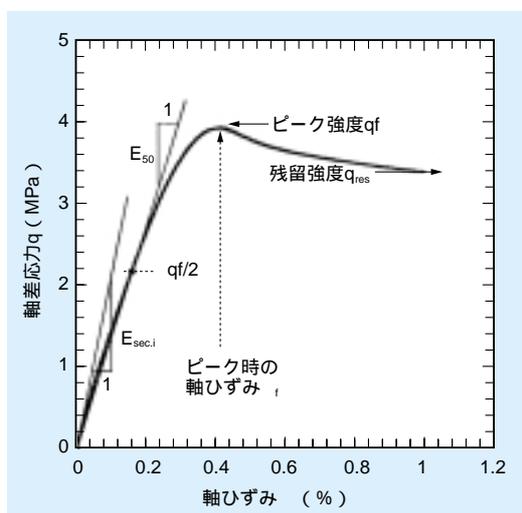


図2-2-2 三軸試験結果の一例³⁾

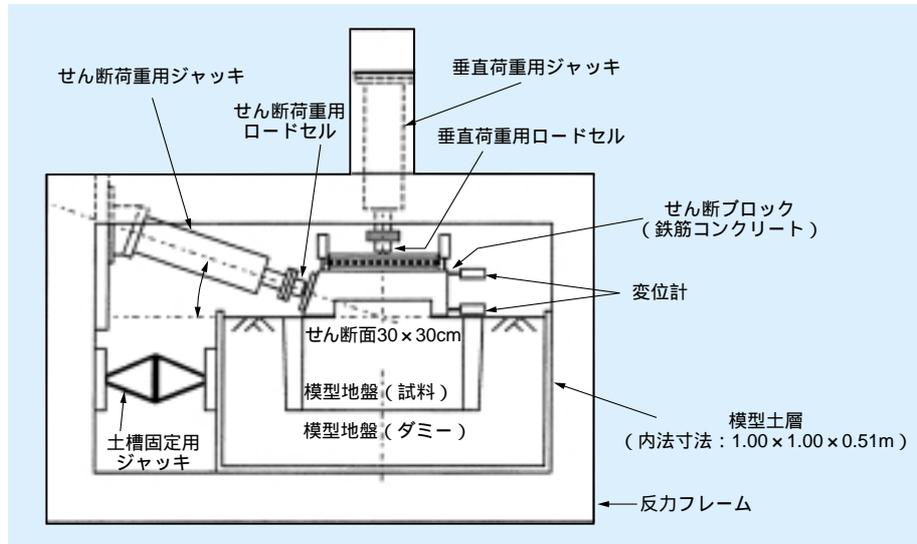


図2-2-3 岩盤せん断の模型実験装置³⁾

布やひずみ分布の計測も行った⁴⁾。

図2-2-4に岩盤せん断試験と三軸圧縮試験から得られた強度特性を比較した。これより、粒度が粗い砂質系の人工軟岩(配合S2とS3)では、直応力が2.5MPa以下の範囲でせん断強度に全般的な差がなく、粒度が細かい泥質系の人工軟岩(配合M2)と自然の堆積軟岩では、それぞれ0.5MPa、1.0MPa以下の領域で岩盤せん断試験による強度が三軸圧縮試験による強度よりかなり低く評価されることがわかる。

この原因を調べるために、岩盤せん断試験における破壊面上の応力分布やひずみ分布が計測された。その結果、破壊面上ではせん断破壊だけでなく引張り破壊も生じていることが主たる原因であることが明らかになった³⁾。

2) 数値解析による検討

岩盤せん断試験から評価される強度特性の位置づけを検討することを目的として、岩盤せん断試験の有限要素法(FEM)による数値解析を実施した。岩盤の応力ひずみ関係は、破壊前は線形弾性、破壊後は完全塑性になるバイリニア型とした。地盤物性値は、三軸圧縮試験の結果を用いて定めた。

図2-2-5は岩盤せん断試験結果、岩盤せん断試験の数値解析結果、および三軸圧縮試験結果を比較したものである。図2-2-5によれば、岩盤せん断試験のシミュレーション結果は岩盤せん断試験結果とほぼ一致しているかまたはやや小さく、数値シミュレーションによりほぼ妥当

またはやや安全側の評価ができていることがわかる。また、岩盤せん断試験のシミュレーション結果は岩盤せん断試験結果と同様に三軸試験の結果と高い応力レベルで調和的だが、低い応力レベルでは小さくなる傾向がある。

数値シミュレーション結果を詳細に検討したところ、この原因は、1)と同様に引張り破壊の影響であることが明らかとなった。

(3) 平板載荷試験結果との比較

ここでは、自然の堆積軟岩(シルト岩)地盤においてサンプリングした試料の三軸圧縮試験結果と平板載荷試験結果の相互関係を明らかにすることを目指して、三軸圧縮試験結果および原位置弾性波速度試験結果から地盤物性値を定め、原位置平板載荷試験結果のシミュレーション計算を行った。

1) 原位置平板載荷試験の概要

試験地点は、新第三紀鮮新統のシルト岩からなり、試験面近傍に割れ目は認められず、おおむね均質である。試験位置は、地表から約30m下の試掘坑内である。地下水面は地表面とほぼ一致している。平板載荷試験とともに、弾性波速度計測とブロックサンプリングした試料を用いて、三軸圧縮試験を実施した。

試掘坑内では、計4回の平板載荷試験を行った(表2-2-2)。Case1とCase2については変形試験のみを行い、Case3とCase4については変形試験の後に支持力試験を

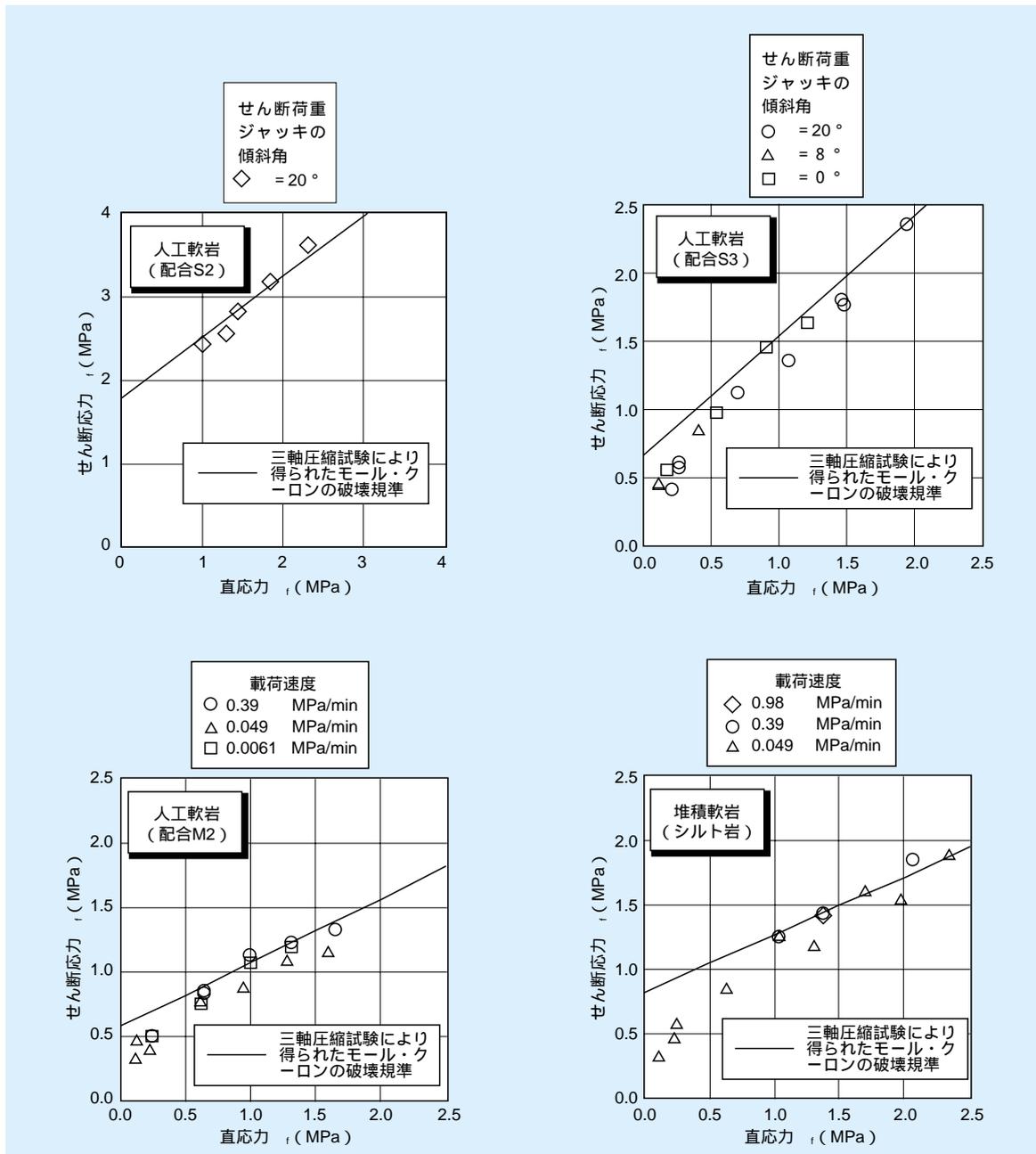


図2-2-4 岩盤せん断試験と三軸圧縮試験による強度の比較³⁾

行った。Case2のダイアフラムとは、地盤を等応力分布で載荷することを目的とした載荷板である。剛な載荷板を用いた場合、載荷板端部の応力集中による局所破壊から、弾性理論と整合しない可能性があるが、等応力の載荷ではこの問題を排除できる利点がある。Case4では、地盤中に水圧計を埋め込み、載荷中の間隙水圧の変化を測定した。

2) 変形特性の評価

原位置弾性波速度試験結果と三軸圧縮試験結果から岩

盤の応力ひずみ関係をモデル化し、有限要素法(FEM)により平板載荷試験のシミュレーション解析を行った。

Case4における載荷板直下の間隙水圧の計測結果などから、載荷時に載荷板直下の地盤内で発生した過剰間隙水圧は速やかに消散することが明らかとなったため⁵⁾、シミュレーション解析に用いる三軸圧縮試験結果は、圧密排水(CD)条件で得られた結果を用いた。また、原位置弾性波速度試験結果によれば、地盤表面付近のせん断波速度の低下が認められたが⁵⁾、このこともシミュレーション解析モデルに反映させた。

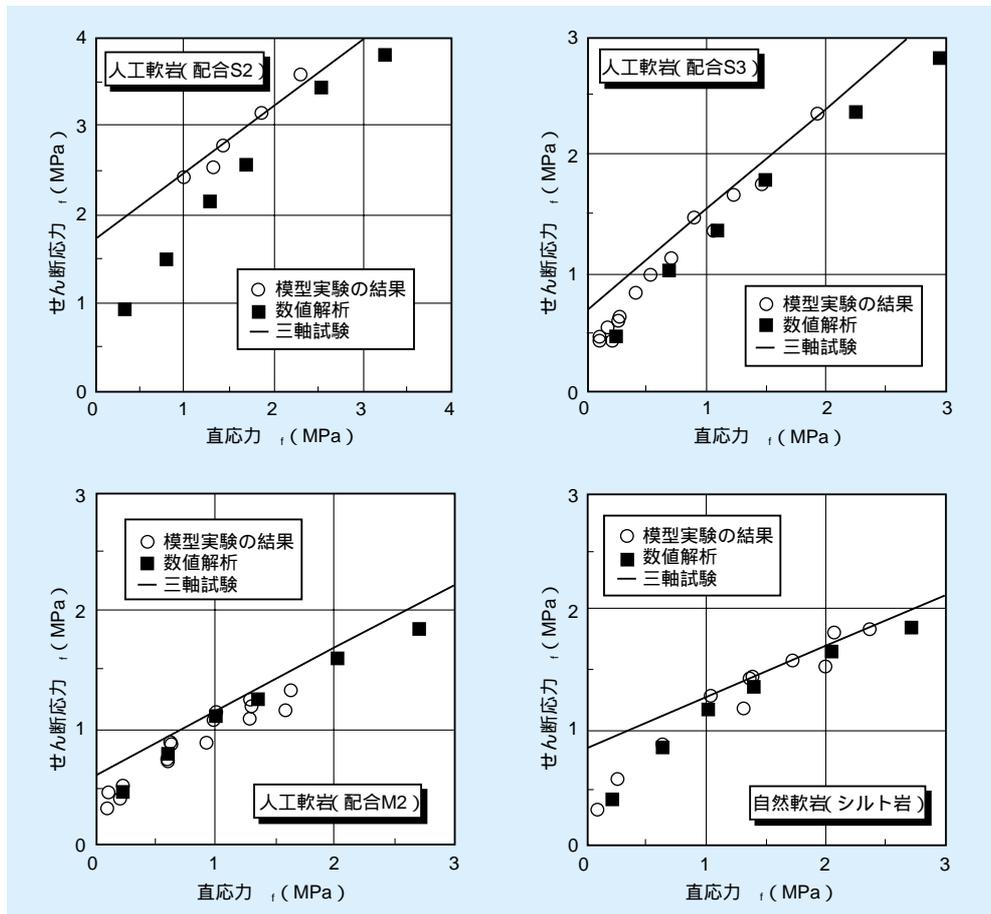


図2-2-5 数値解析の結果³⁾

表2-2-2 平板載荷試験一覧³⁾

Case	載荷板	寸法(cm)	試験内容	その他
1	円形剛板	直径60	変形試験のみ	地盤内ひずみ計測
2	円形ダイヤフラム	直径60	変形試験のみ	地盤内ひずみ計測
3	円形剛板	直径30	変形+支持力試験	
4	長方形剛板	30×90	変形+支持力試験	間隙水圧計測

図2-2-6にCase1、2、3の平板載荷試験の試験結果と数値解析の結果を示す。図より、Case1、2、3のいずれの場合も試験結果と解析結果の一致度が高いことがわかる。

3) 支持力特性の評価

Case3とCase4で行った平板載荷試験から得られる降伏支持力(平板載荷試験から得られる単位面積あたりの載荷重と沈下量の関係を両対数グラフ上にプロットし、グラフ上に現れる折れ曲がり点の単位面積あたりの載荷重)と計算により評価した降伏支持力を比較した。ただ

し、計算による降伏支持力は、2次元弾性地盤表面に帯基礎を載荷した場合に地盤の一部がせん断破壊するときの単位面積あたりの載荷重と定義した。

降伏支持力の実測値は、Case3とCase4でそれぞれ5.6MPa、6.2MPaである。一方、降伏支持力の計算値は5.9MPaであり、実測値とほぼ一致していた。

以上により、排水条件や地表面付近のせん断波速度の低下を考慮すれば、三軸試験結果により平板載荷試験結果から得られる変形特性を推定できること、支持力特性についても排水条件を考慮すれば推定できることがわかった。

2-2-2 岩盤用プレッシャーメータ試験による地盤物性評価

図2-2-7は、当所の開発した自己掘進式岩盤用プレッシャーメータ試験装置による試験方法を模式的に表した

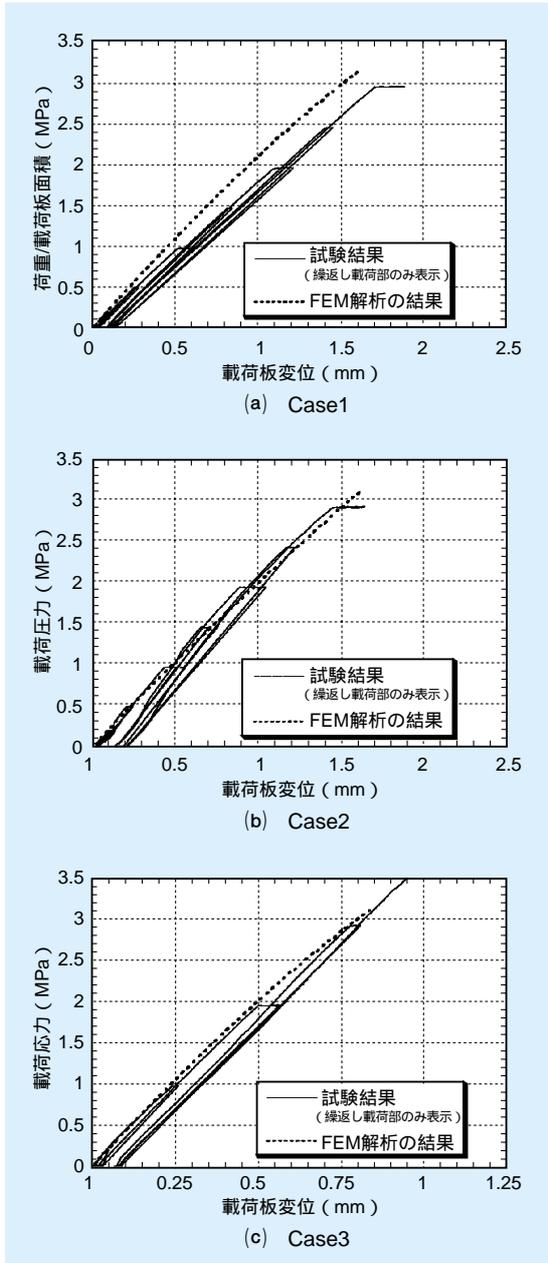


図2-2-6 試験の結果と解析結果の比較³⁾

ものである。装置本体は、下端に取り付けられた自己掘進用掘削装置によりボーリング孔底より地盤内に掘進し、加圧部分は地盤内に挿入される。加圧部分は、ゴム膜がゴム膜保護用のメタルシース(短冊状の薄い金属片)で覆われたものであり、地表面から供給している圧力によりゴム膜を膨らませることにより孔壁を加圧する。ゴム膜内の圧力と孔径の変化を測定することにより地盤の強度・変形特性を把握する。

図2-2-8は、当所で開発した軟質岩盤のためのプレッシャーメータ試験装置である。図中で、ボーリング機械

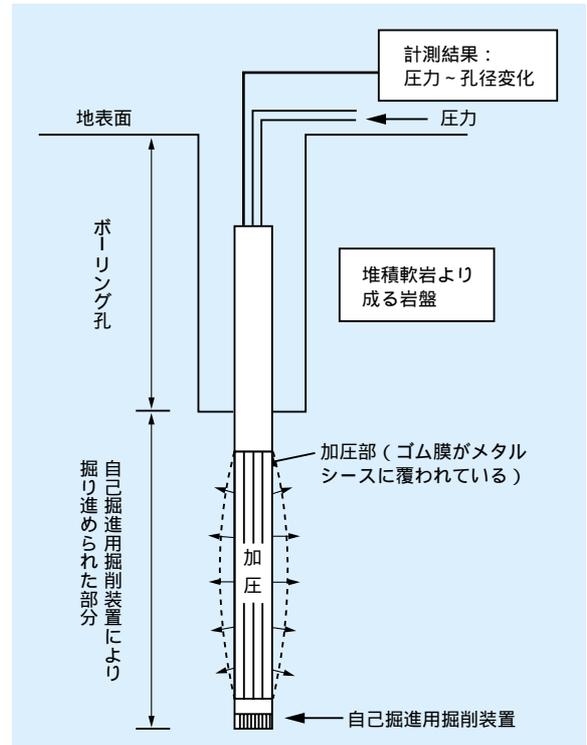


図2-2-7 当所で開発した自己掘進式岩盤用プレッシャーメータ試験装置による試験概要

のマストに支えられた棒状のものが装置本体であり、装置本体の下半分に見える黒い部分はメタルシースである。

本装置では、測定値の信頼性を向上させるため、以下のような工夫がなされている。

- ① 孔壁の乱れの影響が小さくするため、メタルシースで覆われた加圧部分の地盤への挿入は、装置本体の先端に取り付けられた掘削装置による自己掘進により行われる(図2-2-7)。
- ② ボーリング孔径の変化の測定はメタルシースの変位を直接測定するなどの工夫をしており、変位の測定誤差が生じにくい。

図2-2-9(a)、(b)は、それぞれ、新鮮で均質なシルト岩に対するプレッシャーメータ試験より得られたせん断強度ならびに剛性のひずみ依存性を現地より採取した不攪乱試料に対する三軸試験結果から得られた結果と比較したものである。プレッシャーメータ試験から得られたせん断強度と剛性は、いずれも三軸試験結果から得られた結果よりやや小さいが、概略的な評価は可能であることがわかる。ただし、せん断強度評価を目的としたプレッ



図2-2-8 当所で開発した岩盤用プレッシャーメータの全景⁽¹⁾

シャーメータ試験では加圧中に地盤内で引張り破壊が生じる場合があるので、実験結果を解釈する上で、このことに留意する必要がある⁽¹⁾。

2-2-3 ま と め

比較的均質で亀裂の少ない堆積軟岩からなる岩盤を対象として、不攪乱試料に対する室内試験ならびに岩盤用プレッシャーメータ試験による地盤物性評価法を検討した。その結果次のような結論が得られた。

- ① 外見上均質で亀裂が目立たない堆積軟岩試料であれば三軸圧縮試験の結果に及ぼす寸法効果の影響は小さい。
- ② 岩盤せん断試験による岩盤のせん断強度は、直応力が小さい場合を除いて、三軸圧縮試験による供試体のせん断強度にほぼ一致していた。また、岩盤せん断試験と平板載荷試験の結果は、原位置弾性波速度や室内

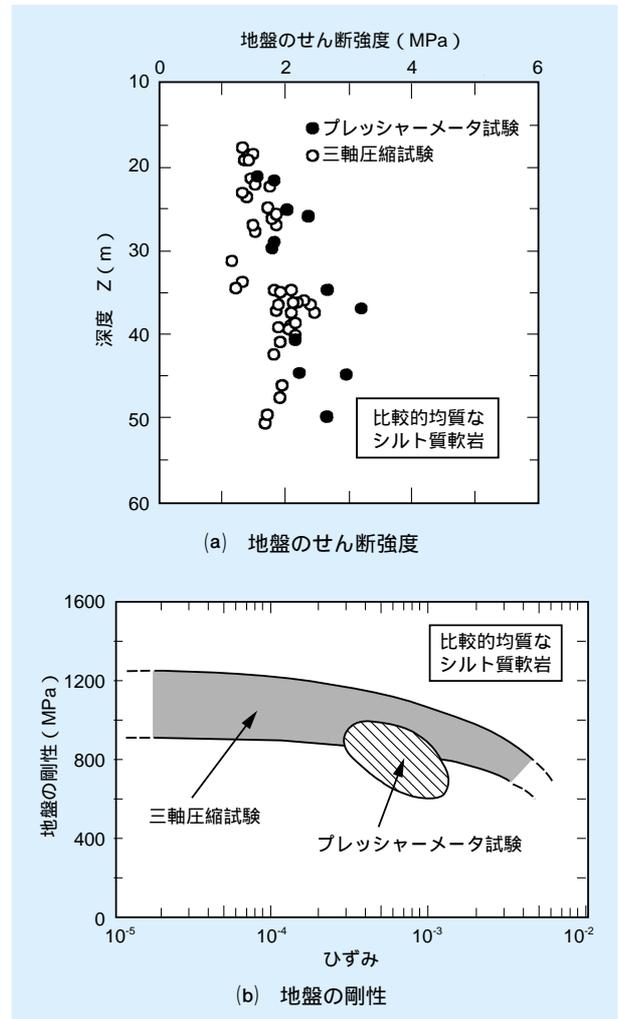


図2-2-9 岩盤用プレッシャーメータ試験と三軸圧縮試験による結果の比較⁽³⁾

要素試験によって評価される要素特性によって境界値問題として説明できることがわかった。

このことにより、今後更に精度向上に関する検討の余地は残されているものの、比較的均質な堆積軟岩においては、原位置から採取した不攪乱試料による室内試験結果から、従来試掘坑内で行われていた岩盤せん断試験結果と平板載荷試験結果を推定することが可能となった。

- ③ 岩盤用プレッシャーメータ試験においては、精度向上の余地や実験結果解釈上の留意点はあるものの、概略的な地盤のせん断強度や剛性の評価が可能であることがわかった。