

地盤振動と耐震調査

柴藤喜平*・武富正憲**

まえがき

日本のように狭隘で山地が多い所では すべての産業構造物が軟弱地帯の平野部に集中發展します。東京 大阪 名古屋等の日本における大都市のほとんどが 軟弱地盤上に發展したものであることは周知の通りです。また 過去の大地震による被害状況を見ると 軟弱層とくに沖積層が厚く堆積した地盤上に構築された構造物の被害が きわめて多いのです。この事は 日本が再び大地震にみまわれた場合に 大きな被害を生じる可能性がある事を予想させます。では なぜ軟弱層上の構造物に 震害が集中するのかという問題と 震害の発生しやすい地盤の調査について 説明いたします。

1. 地震による被害の特長について

まず 沖積層の厚さと 地震による被害についての一例を1図に示します。これは 関東地震の時の旧東京市内での木造家屋被害率と沖積層の関係です。図で明らかのように沖積層が20mぐらいよりも厚くなると全潰率が急に増しております。次に東海地震の時の名古屋市港区 熱田区内の家屋被害率と沖積層の厚さとの関係を2図に示します。これを見ても沖積層が厚くなるに従って被害率が大きくなっているのがわかると思います。南海地震においても 震央に近い四国や紀州の古生層の地帯には被害が少ないのに対し 震央から150kmも隔たる岡山県下の沖積地の被害がひどかったという例もありこのような例は 多くの地震でしばしば見られることです。被害家屋を構造別に見た場合 必ずしもこの例のようにならないこともありますが大まかに見た場合には 沖積層が厚い地盤上の家屋は 地震時に被害が大きいという傾向が見られます。このような傾向を理論的

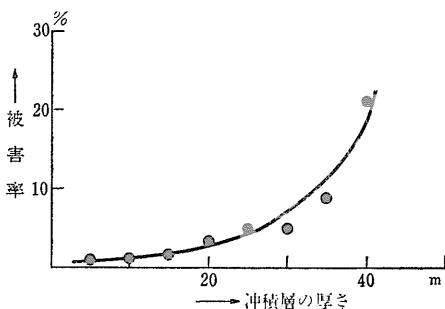
に考えようとした場合には まず 地震が発生した時どのような波によって家屋が振動するのかを 考える必要があります。

2. 地震によって発生する波について

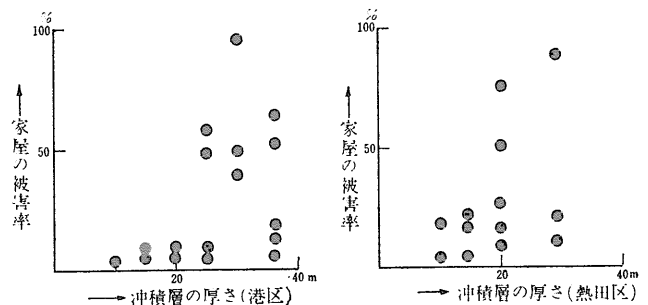
地震の際に発生する波の中で まず最初に私たちが身を感じるものをP波といいます。この波は伝播速度がすべての波の中で一番速いので 私たちには最初に感ずるわけで この意味から Primary wave と呼ばれ P波と略されています。この波の振動方向は その進行方向と同一なので 一名縦波または疎密波とも呼ばれます。地震の時は下部から波が来ますので この波による振動は上下方向になります。しかしこの波による振動の幅は非常に小さく 建物をこわすことはありません。地震の際にP波につづいて私たちが感ずるものをS波といいます。これは Secondary wave の略でありまして P波の次に速く到達します。この波の振動方向はその進行方向と直角で一名横波 または剪断波とも呼ばれます。地震の際は下部から波が来ますので この波の振動の方向は水平方向になります。しかも この波の振動の幅は非常に大きいので 水平方向にゆすられる事になり 私たちの家屋を破壊することになります。私たちが地震時に注意しておれば 2番目に来た振動が大きく 横にゆれていることに気がつきます。この波がS波です。このように地震の際に問題となるのは 発生する波のうちS波なのです。ではS波とは どのような性質の波であるかについて説明します。

3. S波伝播について

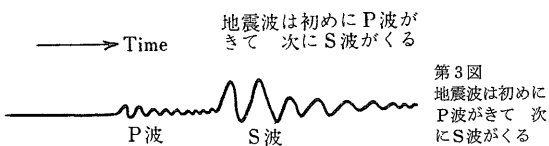
S波とは先に述べたように 進行方向に直角に振動す



第1図 関東地震における旧東京市内での 木造家屋被害率



第2図 東海地震における 家屋被害率と沖積層の厚さとの関係

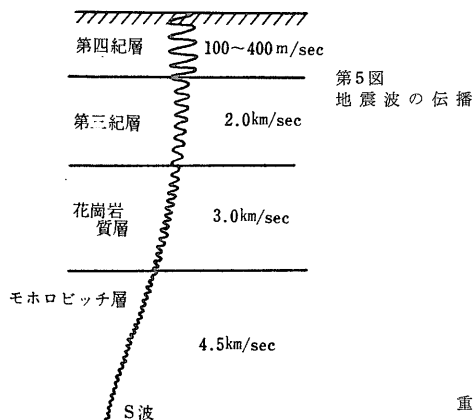


る波です。この波の正体は剪断ねじりエネルギーの伝播なのです。ですから剪断力に対して抵抗のない液体中では伝播することができません。

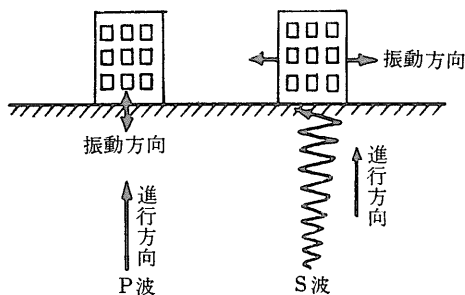
地震の際 地殻の深部で発生したS波は モホロビッチ層で 4.5km/sec, Granitic layerと呼ばれている地殻の最上層で 3.0km/sec, 第三紀層の砂岩で 2km/sec位の速度をもって屈折をしながら伝播してきます。したがって第三紀層以前の硬い岩石中を伝播する途中の波の速度変化はそれほど大きいものではないことがわかります。しかしながらそのS波が地表付近の洪積層や沖積層に入りますと 100m/sec~400m/sec 程度の速度に急速におちて来ます。このように S波は いわゆる軟弱層に入射すると著しくその速度を減じることになります。次に波の振幅はどのように変化するかといいますと 固い物質から軟らかい物質に入る場合 第2の物質が軟らかければ軟らかいほど この物質に入った波の振幅は大きくなります。これは 速度のエネルギーが 振幅に変化するため 軟弱層に入ると急に速度が小さくなる ということは 逆にその振幅は著しく大きくなるということなのです。

4. 軟弱地盤におけるS波の性質

以上のように S波が軟弱層に入ると 速度が減少しこれとは逆に振幅が増すことがわかりました。しかし実際の地震波を地表とボーリング孔中の硬い基盤層で測定すると 上記の考え方では説明できないほど振幅に差



第6図 重複反射



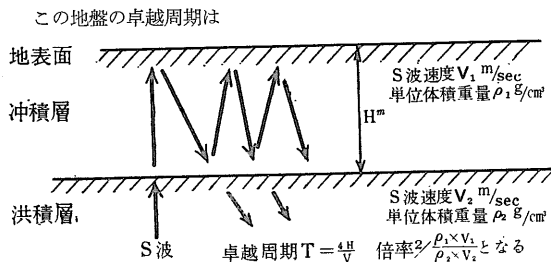
第4図 P波 S波による建物のゆれ方

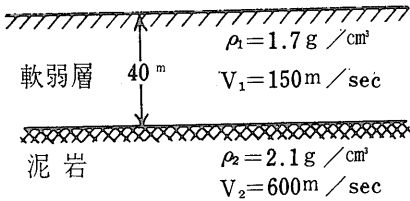
が生じます。これは 軟弱層内でS波が重複反射というものを行なっているためにおこります。ここで重複反射の説明をします。地震の際 地下から上昇してきたS波は 硬い層から軟弱層に入射し さらに上昇して地表面に到達します。地表面に到達したS波は 反射して方向を下方に変え降下します。下方に向かう波は硬い層にぶつかり 一部は硬い層の内部をさらに下降しますが 大部分の波は硬い層で反射して再び上昇します。このように何回も反射をくりかえします。何度も反射をくりかえすうちに特定の周期の波だけが非常に大きく増幅されます。この周期は 軟弱層でのS波速度V 軟弱層の厚さH によって以下のように決まります。

$$T = \frac{4H}{V}$$

$\frac{4H}{V}$ の周期を持った波の振幅が きわめて大きくなるわけです。この周期を地盤の卓越周期と呼びます。卓越周期の波は 地表では 下部の硬い層から入射して来た時の振幅にくらべて $2/\alpha$ 倍の振幅を持つようになります。ここで α は インピーダンス比と呼ばれ $\alpha = \frac{\rho_1 V_1}{\rho_2 V_2}$ で表わされます。以上が波の重複反射理論といわれるものの概略です。ここで1例を示します。

7図のように 単位体積重量 $\rho_2=2.1\text{g/cm}^3$, S波速度 $V_2=600\text{m/sec}$ の硬い泥岩の上に $\rho_1=1.7\text{g/cm}^3$ S波速度 $V_1=150\text{m/sec}$ の軟弱層が厚さ $H=40\text{m}$ で 堆積している場合を考えます。





階数	固有周期 _(秒)
2	0.14 ~ 0.18
4	0.28 ~ 0.36
6	0.42 ~ 0.54
8	0.56 ~ 0.72
10	0.70 ~ 0.90

↑ 第7図
増幅率と卓越周期の
計算例

第8図
 $T = N \times (0.07 \sim 0.09)$
N: 階数を使用して計算した建物の階数
とその固有周期の関係

$$T = 4H/V = 4 \times 40/150 \approx 1.07 \text{sec}$$

によって 1.07秒と 決まります。
また この周期を持った波が 地表において 泥岩を上昇して
来た時の何倍の振幅を持つかを計算すると

$$2/\alpha = 2 / \frac{1.7 \times 150}{2.1 \times 600} \approx 10$$

という結果になります。
地震が発生した場合 この地盤(沖積層)の表面では 周期1.07
秒の波が 下部の硬い泥岩層にくらべて 約10倍の振幅で ゆ
れることになります。 当然ながら 1.07秒以外の周期の波は
これほど大きな振幅にはなりません。

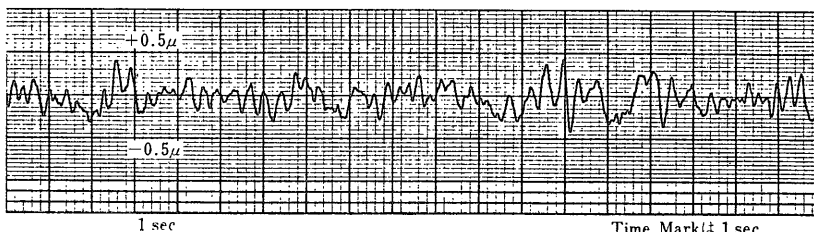
このように地盤は その地盤特有の卓越周期と増幅度
を持っているのです。 ですから 地震がおこると 地
盤によって 揺れかたがちがうわけです。 つまり 硬
い層と 軟弱層でのS波速度の比が大きければ大きいほど
揺れの振幅が大きくなり また 軟弱層が厚ければ
厚いほど その卓越周期は長くなります。 卓越周期が
長くなるということは 建築物の固有の周期に近くなる
ということです。 このことは 軟弱層が厚いと 建物
と共振する可能性が大きくなることを意味しています。
これが 軟弱層が厚くなるにしたがって震害を大きくし
ている原因と考えられます。

5. 常時微動について

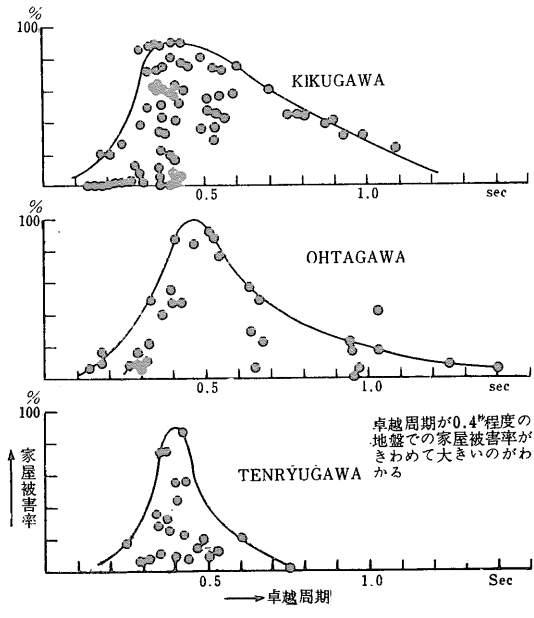
地盤には さまざまな振動現象がみられます。 すな
わち 地球の自由振動によるもの 脈動によるもの 地
震によるもの 火山性の微動 常時微動によるものなど
ですが これらのうち常時微動のみは他の振動現象と異
なり 人工的なものが主たる振動源なのです。 ですから
工場 電車 自動車 等々の振動が重なりあって
地盤を常時微動をさせているわけです。 この常時微動
は 上記の種々の振源から発生したS波が 地盤で重複
反射を行なっていることが原因であるといわれています。
ですから常時微動を測定することによって その地盤の
卓越周期を推定することが出来るわけです。 高感度の
地震計によって常時微動を測定すると9図のような 記
録が得られます。 この記録を周波数分析することによ
って その地盤の卓越周期がわかります。 このように
して測定した常時微動による卓越周期と 家屋被害率の
関係を10図に示します。 これらによると 卓越周期が
0.4secのところでは 家屋被害率が極大となっています。
これはこの当時の家屋の固有振動周期が約0.4secである
ことから被害が 地盤と 建物の共振によるものである
ことがわかります。 このように 地震の際の建物の被
害は 地盤との共振によるものが かなり多いわけです。
この意味で 構造物を設計する場合 地盤の振動の特性
を調べることが大切な要素になります。 近年では 重
要構造物を作る場合には 常時微動や次にのべる各種の
測定法によって 地盤の振動の特性を調査することが常
識となっています。 また 常時微動測定結果から出て
くる平均周期と最大周期 または卓越周期と最大振幅と
から 11図に示すように 動的な地盤種別を行ない それ
によって 地盤の施行の参考にされるようになってい
ます。

6. 地盤の振動調査

では どのようにして地盤の振動特性を調査し 解析
するのかについて 簡単に説明します。 地盤の振動特
性の調査方法には 大別して 次の4つの方法があります。



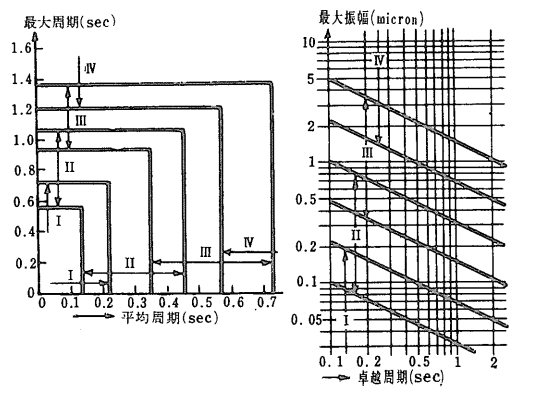
第9図
常時微動の記録



第10図 常時微動測定より求めた卓越周期と家屋被害率の関係

- a) 自然地震を観測し 得られた地震波動を解析する方法
- b) 起振機などで 地盤を強制的に振動させて 地盤の振動状態を測定する方法
- c) 地盤のS波伝播速度 単位体積重量を直接測定し 計算によって 振動特性を算出する方法
- d) 常時微動を測定し 得られた波動を解析する方法

これらの方法のうち a) は 自然地震が起こるまで待つ必要が有る点 また b) は 起振機が非常に大きく 回転数を一定することが困難で 測定に手間がかかる点 が大きな欠点となっております。 実際の構造物の耐震性の検討には 主として c) d) の方法が用いられております。 ですから ここでは c) d) の方法について説明します。 c) の方法は 前記のS波の重複反射理論における 式 $T=4H/V$ $\alpha=\rho_1 \cdot V_1 /$



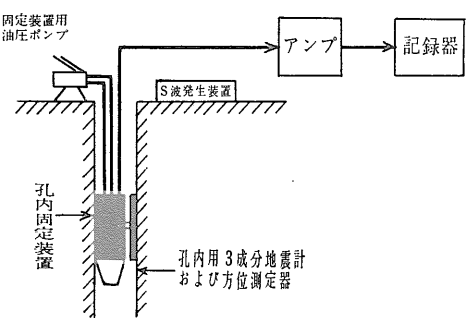
第11図A 常時微動の観測結果を使って 地盤種別を判定するA案
 第11図B 常時微動の観測結果を使って 地盤種別を判定するB案

表1 地盤の種類

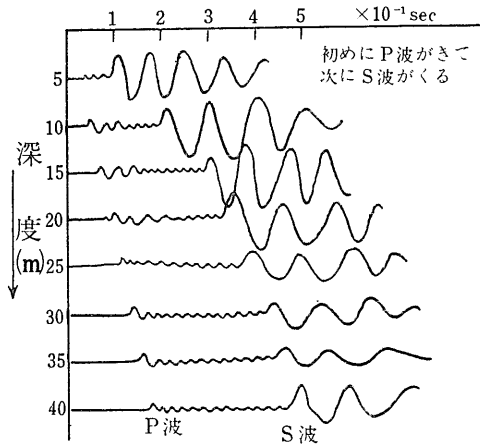
第1種地盤	岩盤 硬質砂礫層など主として第三紀以前の地層に属する地盤
第2種地盤	砂礫層 砂交り硬質粘土層 ローム層など主として洪積層に属する地盤 または広範囲に比較的厚い砂利層もしくは砂礫層のある沖積層に属する地盤
第3種地盤	砂層 砂交り粘土層 粘土層 泥土など主として沖積層に属する地盤
第4種地盤	著しく軟弱な地盤で 沼沢地 泥海などを新しく埋立てた地盤または特に深い軟弱な沖積層に属する地盤

$\rho_2 \cdot V_2$ における $V H$ および ρ を 直接現場において測定する方法です。 この測定は S波検層法と呼ばれるもので ボーリング孔内に 1mないしは 2m間隔で順次地震計を固定し 地表面において板タタキ法 S大砲 等の方法によって発生させたS波を 記録するものです。 得られた記録は13図のようになります。 これを読みとり S波が 各深度に到達する時間差により 深度毎のS波の伝播速度および 速度層厚を算出します。 またこれらの測定結果と 単位体積重量より 前記のべた重複反射理論により周期と増幅率の関係が算出できます。 これを伝達関数と呼んでいます。 これによって どの周期の波が何倍に増幅されるのかが わかります。 15図中 最高のピークが 周期 $4H/V$ 倍率 $2/\alpha$ 倍に 相当しているわけです。

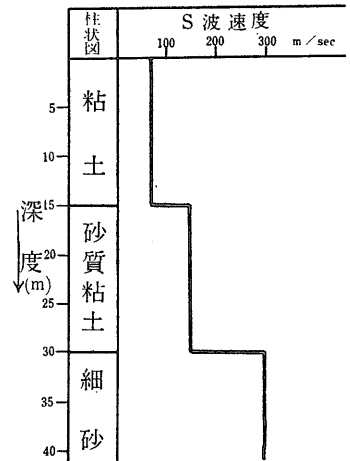
d) の方法は 常時微動を測定する方法です。 この測定は 地表 および 孔中で行ないますが 地表面だけの場合もあります。 高感度の地震計で測定した記録は データレコーダーに記録し コンピューターによってパワースペクトル フーリエスペクトル 等々を算出します。 地表と孔中での測定を両方とも行なっている場合には 伝達関数も算出されます。 これは S波検層によって得られたものと同じ意味のものです。



第12図 S波検層測定図

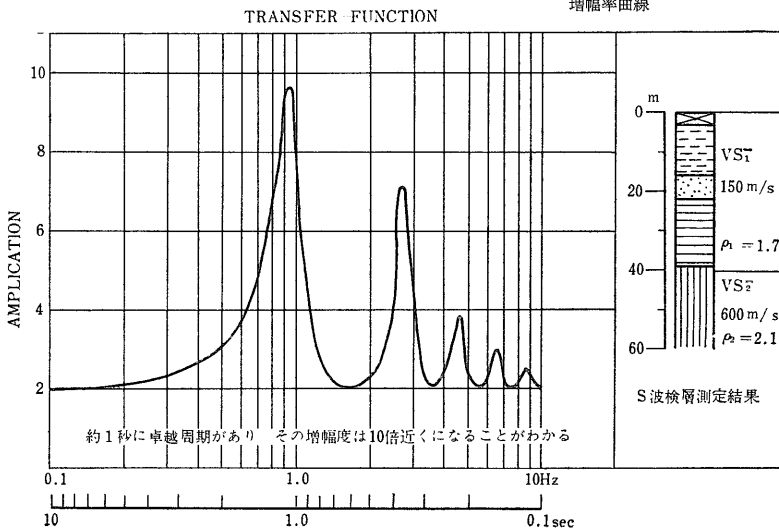


第13図 S波検層測定結果の一例



第14図 S波検層によって求められた S波速度と地質柱状図の一例

第15図 左のS波検層結果から計算によって求められた周期-増幅率曲線

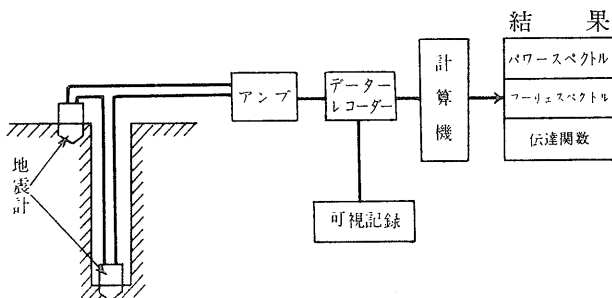


地盤の上に建っている場合は A 点で示される地震力を受けますが それによって損傷を生じたとする 構造物の剛性が低下し周期がのびるため 図でわかるように地震の入力は減少するので大被害には 到らないであろうということがわかります。これに対して 同じ構造物が 軟弱層上に建っている場合には もし B点で示される地震力で 構造物が剛性低下を生じて も 長周期の地震入力が大きいため かえって大きな力を ひきつづき受けることになり 崩壊に至る結果と なるわけです。

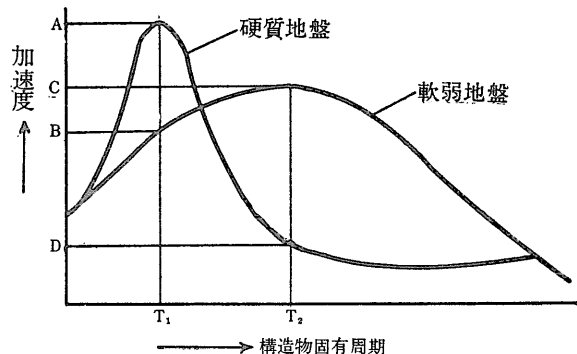
7. 構造物の地盤

構造物は 先にのべたように 各々固有の振動周期を持っています。しかし構造物の剛性が低下すると その固有周期は長くなります。ですから きわめてまれに 来襲するような大地震において 構造物が損傷を受け その剛性が低下すると 固有周期は長くなるわけです。17図で示すように 固有周期 T_1 をなす構造物が 硬質

このように 軟弱層 いかえれば 固有周期の長い地盤では 特に地震の被害が大きくなるわけです。また 構造物が長大化するにしたがって その固有周期は大きくなるので ますます 軟弱地盤との共振が心配になります。もちろん 構造物の固有周期が 地盤の固有周



第16図 常時微動の測定および解析のフローチャート



第17図 構造物の固有周期が T_1 から T_2 にのびた場合 硬質地盤では A から D へ地震力は低下するが 軟弱地盤では B から C へ地震力は増加する。

期よりはるかに大きくなる場合には それほど問題とはなりません。地震時には さらに砂の流動化現象 等々の問題も有り 軟弱層上の構造物は その設計に当たって十分な耐震性が要求されるわけです。

構造物の耐震力を検討する場合 最も建築家が知りたいのは地震の際にどの位の地震力が構造物に作用するかという事です。これは 地震の際の基盤層に到達する地震波と今までのべてきた現場で測定した軟弱層の 振動特性により決定するわけです。したがって 地震の際の基盤層に到達する地震波の記録を持っている事も大切になります。

以上のべてきたような理由で 地震時の構造物の安定性の検討には 軟弱層での振動調査は 欠かすことが出来ないことがわかったと思います。

8. む す び

以上のように地盤の持つ振動の特性は 地震時の被害と密接な関係にあります。現在では上述したように地盤振動の調査方法も種々開発され 地震に対する安全性をかみした設計方法も開発されてきました。しかしながら 地震の振動 建物の振動共に 解明されていない点も 依然として数多く残っています。

(筆者 *は元所員 現在川崎地質(株)物理探査部長 **印は川崎地質(株))

参 考 文 献

- 金井 清：大学講座土木工学18 地震工学
岡本舜三：地震を考えた構造物設計法
小泉安則：最近の静的地盤調査法

新 刊 紹 介

日本化石集 第1集～第18集(第1期) (ATLAS OF JAPANESE FOSSILS)

化石の鑑定には いうまでもなく 従来しられている種類を記載した個々の学術論文あるいはさらに便利なものとして化石図鑑が必要である。また理想的には確実に名前がつけられている標本が必要である。しかし これらはよほど完備された大学や研究所でないかぎりそろっていないのが現実であり また従来の化石図鑑では とすると化石の写真が小さく 鑑定に必要な各種の特徴が付されていないなど 不便な点がある。

日本化石集は このような点についての解決をはかる目的で企画・発行されたものであり 1968年8月に第1集を刊行して以来 原則として隔月に1集づつ刊行され このほど第18集の刊行によって 最初の3年間(第1期)の計画が終了した。幸い刊行がすすむにつれて諸方面から好評を得つつあり しばしば既刊の内容に関する問い合わせをいただくことがあるので本誌面をかりて あらためてご紹介する。

これまでに刊行されたものは18集 計108シートである。地域別 種類別 時代別に さざまな重要な化石が網羅されており また とくに第13集以降では 各集ごとに地域別の特集あるいは種類別の特集がなされ 利用者の便をはかっている

各集はセパレートタイプの6シートからなり それぞれのシートは見開き4ページである。それぞれのシートの目立つところに時代名・種類名(大分類単位)がかかれていますので 利用者はその目的に応じて自由に 産地別にも分類別にも時代別にも再編集することができるという長所があり このような形式の出版は世界的にも数少ない。それぞれ専門の現役の研究者によってかかれたものを編集したもので 内容的にもすぐれている。

各シートの第1ページには 産地図と各化石の主要部分の名称が図示されており とくに後者はコピーをしてファイルすれば化石の部分名称に関する便覧ともなって有用である。第2—3ページは化石集の主部であり 第3ページに化石の写真(図版) 第2ページにそれぞれの解説がなされている。化石集の特徴の一つとするところは 一流デザイナーの手をかりて 多数の化石写真を一見して見やすくするために化石を整然と無駄なく配列し ちょうど標本陳列ケースを写真で表現したような感じを出していることであろう。第2ページには上欄に各化石の種類説明(種名・倍率・分類上の位置など)があり 中下欄には 各種類ごとの産地・時代 形態上の特徴 鑑定上の注意事項 主要文献が解説されている。

「解説づきの標本」として役に立っている と評価された方が何人かおり 編集委員の一人としてまことに嬉しく思っている次第である。当初の企画方針どおり 学生層・教師層・一般の化石愛好家はもちろん 他分野ならびに専門の研究者層に大いに活用していただけるものと自信をもっている。

なお 最初約10年にわたる長期刊行計画であった。第1期の108シートだけでももちろん重要な化石を全部とり入れることは不可能で ひきつづき第2期の3カ年刊行計画にとりかかり 1972年9月にその第1集 通し番号で第19集の刊行を目標として準備中である。第2期の編集委員会*では東北大学浅野清教授が湊正雄教授と交代し またさらに編集委員会の陣容を強化し とくに地域別特集のほか 分類単位別特集も大いにとり入れて 内容を充実して行くことになっている。

* (第2期編集委員 浅野清・大森昌衛・栗原謙二・神谷英利・小島郁生・水野篤行・森啓)

個人的購入以外に とくに小・中・高校の理科教材用に有用であり 各校の図書館に備えておかれると非常に便利と思われる。(地質部 水野篤行)

責任編集：湊 正雄・大森昌衛・水野篤行・小島郁生
A4変形判(285×190mm)
発行所：築地書館
定 価：各集 750円 全18集 13,500円