

建筑百科大事典

7

003372

建築百科大事典 7

Encyclopedia of Architectural Science

しは～しよ

全17巻

昭和58年 初版発行

発行人 平野 陽三

発行所 株式会社 産業調査会

〒107 東京都港区赤坂1-1大成ビル

電話 (03) 585-4541 (代表)

総発売元 丸善ブックメイツ株式会社

〒102 東京都千代田区麹町1-3-23

電話 (03) 263-6351 (代表)

印刷所 凸版印刷株式会社

落丁・乱丁はお取りかえいたします。

内部交流

F181/67 (日3-3/220-7)

建築百科全书 第7巻

B000280

地盤沈下防止規制の現状

工業用水法（昭和31年制定）

制定の経緯

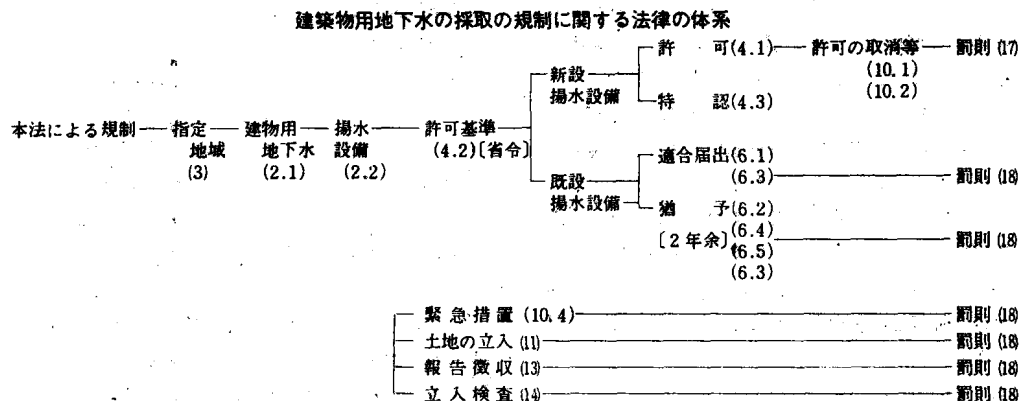
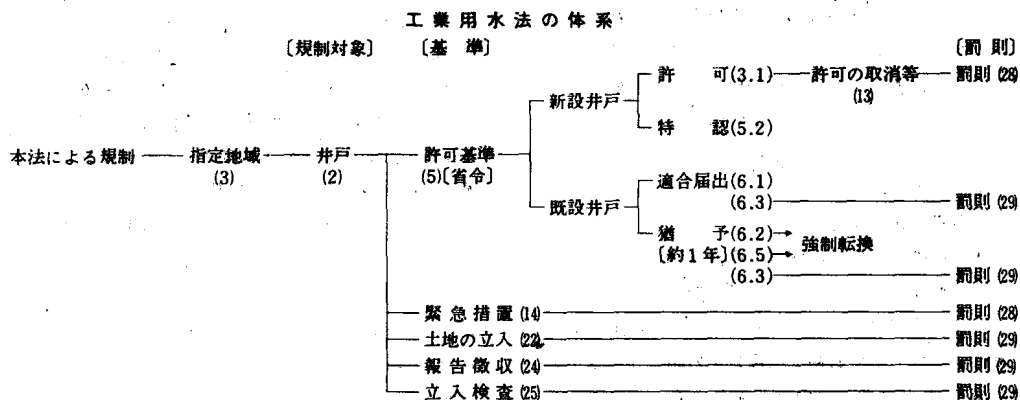
戦後、東京、大阪、名古屋等の工業地帯では、激しい地盤沈下が発生し、再度にわたる高潮により大災害を受けた。この災害を契機として地盤沈下防止対策の緊急性が叫ばれ、国・県等が地盤沈下の状況・原因調査を行なった結果、過度の地下水汲み上げが地盤沈下の原因であることが明らかになった。

このため、昭和31年に、①地盤沈下地域における地下水採取への規制②地下水の代替水源としての工業用水道の建設促進を柱とした旧工業用水法が制定された。

旧工業用水法が、地下水の汲み上げに対して法律的規制の道を開いたことは、わが国の地盤沈下対策の画期的な前進であった。事実、尼崎市等の指定地

域においては大きな効果がみられた。しかしながら、①規制対象となる井戸が新設のものでかつ吐出口の断面積が21cm²以上のものに限定されていた、②代替水源としての工業用水道の整備が必ずしも十分でなかった、③工業用の地下水以外の地下水については規制措置が何ら講じられなかった等の事情によって、東京・大阪等は地盤沈下が引き続き進行した。そして昭和36年大阪の地盤沈下地帯は、第2室戸台風によって莫大な被害を受けたのである。

これを契機として、地下水汲み上げを強力に規制することを望む声が強くなってきた。その1は、地盤沈下対策として必ずしも十分な内容となっていない旧工業用水法を改正強化すべしとの主張であり、その2は、従来法律上何らの制限もなかった建築物用地下水の採取を規制すべしとの主張であった。昭和37年、工業用水法の一部を改正する法律が制定・公布され、また、新たに建築物用地下水の採取の規制に関する法律（通称「ビル用水法」）が制



〔注〕表中のカッコ書きは条文を示す。例 (2.2.1) は法第2条第2項第1号を意味する。

定されるに至った。

本法の目的

本法の目的は、地下水の過度の汲み上げの結果、地下水位の異常低下、地下水の塩水化、汚水の混入または地盤沈下のいずれかが生じており、かつ、工業用水道が布設され、または、1年以内に布設工事が開始される見込みのある政令で指定する地域（指定地域）について、工業用水の合理的な供給を確保するとともに、地下水の水源の保全を図り、もって、工業の健全な発展と地盤沈下の防止を図ることにある。

規制対象

本法において、規制の対象となるものは、次の要件をすべて備えた指定地域内に存する工業の用に供する井戸である。

- ① 地下水（温泉法による温泉を除く）を採取するための施設であること。
- ② 動力を用いるもの（地下水の水源に悪影響を与えるのは、連続的かつ大量の地下水汲み上げが可能な動力ポンプであると考えられるため）。
- ③ 揚水機の吐出口の断面積が6㎡以上のもの。
- ④ 河川法が適用され、または準用される河川の河川区域内のものでないこと。

本法の主要内容

(1) 井戸に関する許可

本法に基づく指定地域は、現在14地域であり、1都1府6県にわたっている。指定地域内については、井戸の新設は一般的に禁止される。都道府県知事は、省令で定める基準に適合する場合（第5条第1項）、または地下水の水源保全に著しい支障を及ぼすおそれがなく、その工業の遂行面における緊要度等から判断して必要と認める場合（第5条第2項）に、井戸に関して許可を与えることになっている。既設の井戸については、一つの地域が指定地域になった際、その地域の許可基準に適合する既設井戸については、許可を受けたものとみなすこととし（第6条第1項）、適合しないものについては一定期間（約1年間）に限り許可を受けたものとみなして使用しうることとするが、その期間経過後は工業用水道へ強制転換を行うことになっている（第6条第2項）。

(2) その他

本法第14条において、都道府県知事は、予想する

ことができなかった特別の事情が発生し、緊急の必要がある場合には、期間を定めて許可井戸による地下水の採取を停止すべきことを命ずることができる」と規定されている。

建築物用地下水の採取の規制に関する法律（昭和37年制度）

本法の目的

本法の目的は、建築物用地下水の採取により、地盤沈下が発生しており、かつ、高潮、出水等により災害が生ずるおそれのある政令で指定する地域（指定地域）において、地盤沈下防止のため、建築物用地下水の採取の規制を行ない、公共の福祉に寄与することにある（第1条）。

規制対象

本法において、規制の対象となるのは、指定地域内における揚水設備による建築物用地下水の汲み上げである。ここで揚水設備とは、動力を用いて地下水を採取するための設備であって、揚水機の吐出口の断面積が6cm²を超えるもの（河川法による河川の区域内のものを除く）である。また、建築物用地下水とは冷房設備、水洗便所、その他政令で定める設備の用に供する地下水（温泉法による温泉および工業用水法に規定する工業の用に供するものを除く）である。政令では現在次の三つの設備が定められている。

- ① 暖房設備
- ② 自動車車庫に設けられた洗車設備
- ③ 公衆浴場法による公衆浴場のうち床面積の合計が150m²以上のもの

本法の主要内容

(1) 建築物用地下水の採取の規制

本法に基づく指定地域は、現在4都府県の4地域にのぼっている。指定地域内では、建築物用地下水の採取は一般的に禁止される。都道府県知事は、省令で定める基準に適合する場合（第4条第2項）、または、水洗便所用に限り、他に替わるべき水源のない場合（第4条第3項）に建築物用地下水の採取の許可を与えることになっている。

一つの地域が指定地域になった際、または、規制対象設備が改正されもしくは許可基準が改正された際、その許可基準に適合する既設の揚水設備については許可を受けたものとみなし（第6条第1項、第

4項、第5項)、適合しないものについては、2年余は許可を受けたものとみなして採取しうが、その期間経過後は技術的基準に適合するよう改造して許可を受けなければならない(第6条第2項、第4項、第5項)。

(2) その他

予想することができなかった急激な地盤沈下が生じたため、または生ずるおそれがあるため、地盤沈下に伴う高潮、出水等による災害のおそれが著しい場合においては、当然に省令で定める技術的基準が強化改正されるわけであるが、その際揚水設備は、上述のように通常2年余の猶予が認められることになる。この場合において、その猶予期間中の採取を放置できないような緊急事態があると認める時には、都道府県知事は、当該揚水設備の所有者等に対して、改正後の基準に適合させるため必要な措置をとるよう命ずることができる(第10条第4項)。

また、環境庁長官および都道府県知事は、必要がある時は職員に他人の土地に立ち入らせることができる(第11条)。さらに都道府県知事は、報告徴収(第13条)および立入検査(第14条)を行なうことができるようになっていく。

地盤の改良工法

地盤の改良とは、地盤の強度の増大、沈下の抑制ならびに止水など必要な土の性質の改善を行うことをいい、建築物を対象とする場合の利用目的には次のようなものがある。

- 基礎の地業
- 根切り工事の安全性の確保
- くいの横抵抗力の増加
- 建物の不同沈下の防止
- 造成宅地の安定の確保
- 既設構造物への影響の防止

地盤改良工法には種々なものがあり、地盤の条件、利用目的などにより適当な工法を採用することになるが、これ等を原理的に分類すると次のようになる。

- (1) 締固め工法：ゆるい砂質土に物理的または機械的な力を加え締った地盤を作る工法
- (2) 強制圧密脱水工法：軟弱な粘性土を強制的に圧密し、事前に沈下を生じさせるとともに強度を増加させる工法

(3) 脱水工法：軟弱な粘性土の間げき水を脱水剤

または熱を用いて脱水し強度増加をはかる工法

(4) 固結工法：セメント・薬液の注入または凍結によって地盤の不透水性または強度の増加をはかる工法

(5) 置換工法：悪質の土を良質の土に置き換える工法

地盤改良工法の主なものを施工原理別に分類すると、1表のようになる。

なお、ここで示した工法以外にも種々な工法名を用いた施工法があるが、表の工法と類似工法が多い。

以下にここで示した工法のうち、建築物を対象にした利用度の高い工法について説明する。

バイプロフローテーション工法

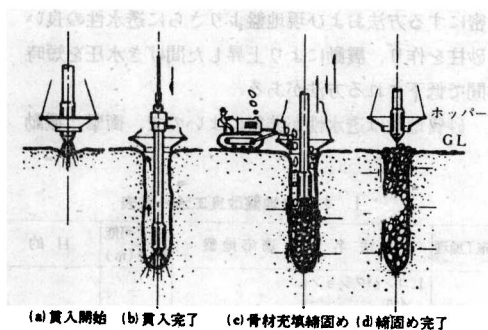
a 原理 ある種のゆるい砂地盤は地震時に液状化するが、これを防止する方法に、締め固めて密にする方法および現地盤よりさらに透水性の良い砂柱を作り、震動により上昇した間げき水圧を短時間で低下される方法がある。

砂質地盤は透水性が非常によいので、衝撃、振動

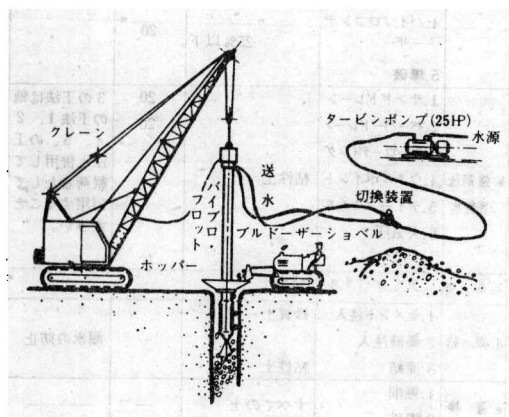
1. おもな地盤改良工法一覧表

施工原理	工 法 名	適応地盤	施工可能 深さ(m)	目 的
a. 締固め	1.コンパクション イル	シルト粘土含有量 15%以下	—	液 状 化 防 止
	2.バイプロフロー テーション		8	
	3.サンドコンパク ション		20	
	4.バイプロコンポ ーザー		20	
	5.爆破		20	
b. 強制圧 密脱水	1.サンドドレーン	粘性土	20	3の工法は他の 工法1、2 4、5の工 法と併用して 載荷重とし 何用すること が多い。
	2.ベーパードレーン		20	
	3.フレージング		—	
	4.ウェルポイント		—	
	5.ディープウェル		—	
	6.大気圧		—	
c. 脱 水	ケミコパイル	粘性土	—	—
d. 固 結	1.セメント注入	砂質土	—	漏水の防止
	2.薬液注入	粘性土	—	
	3.凍結	粘性土	—	
e. 置 換	1.掘削	すべての土	—	—
	2.爆破			

などにより比較的短時間に間引き水を追い出して土粒子に置き換え、密な地盤にすることができる。これのいちばん簡単なものは、地表面でローラーまたはバイブレーターを作動させる方法である。しかしこの方法はあまり深くまで改良出来ないで、盛土を転圧しながら仕上げていく場合などは有効であるが、自然地盤ではほとんど使えない。そこで一般にはパイプなどを地盤内に貫入させ、それを通して下部の地盤に振動・衝撃を与える方法をとっている。これにも種々な施工方法があるが、最も広く使われているのがパイプフロート工法とパイプコンポーザー工法である。なおこれらの工法では、パイプの貫入位置に補給材による砂柱が作られるが、補給材として現地盤とは異なる粒径の砂利・粗砂など粗粒の材料を用いると現地盤よりさらに透水性のよい砂柱となるので、そのような材料を選び、現地盤の砂を用いないほうがよい。



2. 締固めの作業順序



3. 施工要領

b 施工順序 締固めの作業順序および施工要領を2, 3図に示す。締固めの作業順序は、

- (1) フロット先端からの射水とフロットの水平振動によって貫入を開始する(2図(a))。
- (2) 貫入完了(横噴き射水もある)(2図(b))。
- (3) 骨材の充填, フロットの上下運動を繰り返しながら締め固める(2図(c))。
- (4) 締め固め完了(射水と振動の停止)(2図(d))。

c 主要施工機材(1) バイプロ・フロット(4表)

4. バイプロ・フロットの機種

有効長(M)	7	8	10	12	15以上
フロット型式					
7.5 HP	○	○			
15 HP	○	●	○		
20 HP		○	○	○	
30 HP	○	○	○	○	○

○主な機種

- (2) クレーン 揚力10~30t
- (3) ブルドーザ・ショベル (容量0.3M³程度)
- (4) 給排水設備
 - 給水量: 300~450ℓ/min
 - 給水圧力: 3~8kg/cm²
 - タービンポンプ (15~30HP)
 - 水中ポンプ (10~15HP)
 - サンドポンプ (15HP)
 - 給排水用貯水槽 (3 M³程度)
- (5) 電力設備

パイプロ・フロット用電力
給排水および送水ポンプ用電力
照明その他予備電力

d その他 施工間隔: 1.2m~1.5m (15HPの機種の場合)

施工管理: 改良後にN値, q_u (オランダ式貫入試験により測定した先端抵抗力) を測定し, 改良効果を判断する他, 施工中の電力消費量を自記記録する。

施工業者: 東京ゾイルリサーチk.k. 03-410-7221
三信建設工業k.k. 03-813-3521

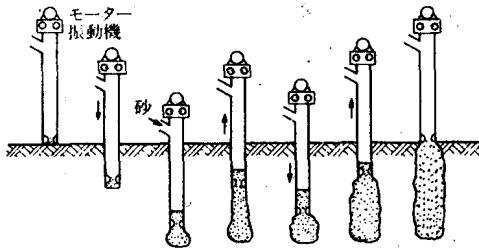
パイプロ・コンポーザー工法

a 原 理 パイプロ・フローテーション工法とはほぼ同じである。

b 施工順序 締固めの作業順序を, 5図および以

ドに示す。

- (1) パイプを地上所定位置に据える。
- (2) 振動機を起振してパイプを地中に貫入させる。貫入困難な堅い層があるときは、エアジェットまたはウォータージェットを併用して貫入させる。
- (3) 所定深さに達すると、
- (4) 上部ホッパーよりパイプ内に一定量の砂を投入し、パイプを規定高さまで引上げつつ、パイプ内の砂をコンプレッドエアにより孔部に押し出す。
- (5) パイプを打ち戻し、投入した砂を振動により締め固める。砂は周囲地盤に圧入される。
- (6) ふたたび砂をパイプ内に投入し、パイプを規定高さだけ引き上げる。
- (7) 以上の操作を繰り返して、パイプロンコンポーザールを地上まで仕上げる。



5. パイプロ・コンポーザー工法の施工順序

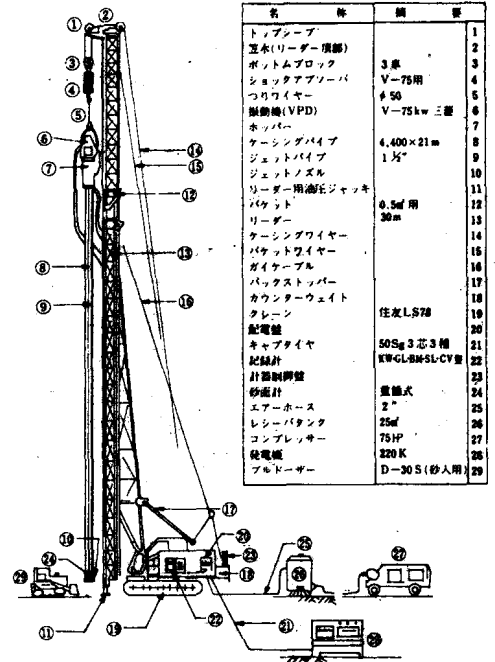
c 主要施工機材 コンポーザー工法に使用する機械の1例を6図に示す。なお振動機には出力50kw等小型のものも使われている。

d その他(1) 施工間隔……2.0m前後 (75kwの振動機の場合)

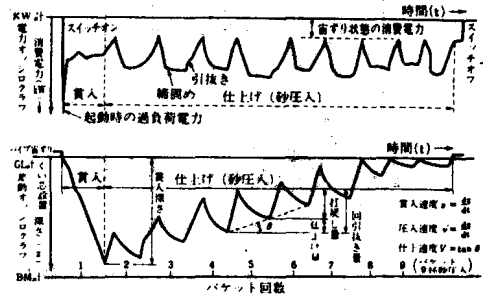
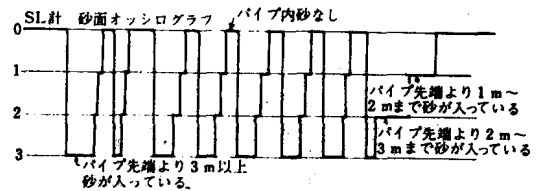
(2) 施工管理……改良後にN値、qu値を測定する他、施工中、下記の項目の自動測定を行なっている。多くの地盤工法中もっとも優れた施工管理法を採用している。

- i) GLオシロ……ケーシング先端の動きを時間との関係で記録する。
- ii) KWオシロ……施工中の電気消費量を時間との関係で記録する。
- iii) BMマーク……バケット (容量0.5m³) からケーシングへの砂の投入回数を記録する。

コンポーザー施工機材図



6. パイプロ・コンポーザー施工機



7. パイプロ・コンポーザーによる施工管理記録

- iv) SLオシロ……ケーシング内の砂面の高さを記録する。
- v) VメーターオシロおよびCメーターオシロ……

この2つのメーターにより計画通り締固めを行う。

i)~v)による記録の1例を7図に示す。

(3) 施工業者……不動産建設㈱ (大阪) 06-201-1121

(東京) 03-831-9111

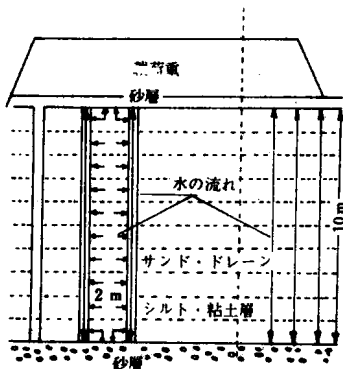
サンド・ドレーン工法

a 《原理》 軟弱な粘性土地盤は、計画的に荷重を加えていくと、圧密されることによって安定した地盤となる。しかし粘性土層の透水性は非常に悪いので、短時間に改良することができない。そこで一般には8図のように地盤中にドレーン(水路)を設置し、これを通して排水し、短期間(普通2カ月~3カ月)で目的を達するという方法が取られる。

したがってドレーンは、

- (1) はば所定の径を保ち、完全に連続していること
- (2) 周辺地盤をあまり乱さないこと
- (3) 透水性のよいこと

などが必要条件である。なおドレーンを作る材料として砂を用いるのがサンド・ドレーン工法であり、紙等を用いるのがペーパー・ドレーン工法である。

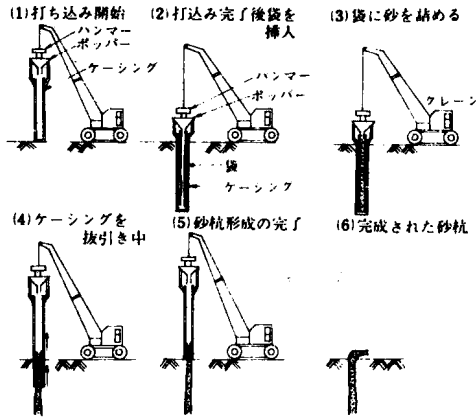


8. サンドドレーン説明図

b 《施工方法》 サンド・ドレーンの設備方法には種々なものがあるが、ファブリ・バックドレーン工法およびフライト・オーガー式サンド・ドレーン工法についての施工方法を示すと次のようになる。

(1) ファブリ・バックドレーン工法

施工の順序は9図に示すが、パイプロハンマーによりケーシングを地中に打ち込み、打ち込み完了後、ケーシング内部に袋をつり下げ、その中に砂をつめて後、ケーシングだけを引き抜く。この方法ではドレーンが切断されることがない。なおこの工法に使用されている機械では4本のケーシングを用い、4本のドレーンが同時に打設できる。



9. ファブリ・バック・ドレーン工法の施工順序

問合せ先：千代田化工建設㈱ 045-521-1231

ファブリドレーン協会 03-533-4621

(2) フライト・オーガー・サンドドレーン工法

施工機の概要および施工順序はそれぞれ10図および11図に示すが、この工法では掘削にオーガーを使って排土しているので、周辺の地盤を乱すことが少ない。

施工業者：大成建設㈱ 03-567-1511

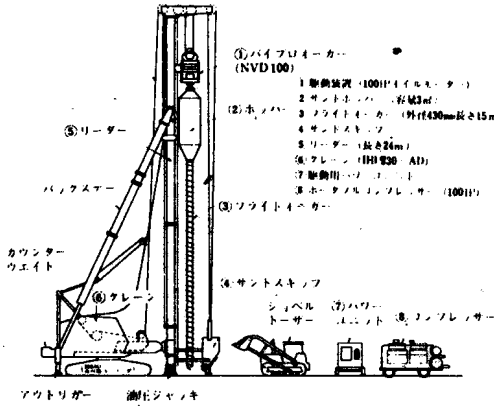
この2種の施工法の他にジェット式サンド・ドレーン工法、打込み式サンド・ドレーン等がある。

c その他 (1) 施工間隔……地盤条件、施工方法により異なるが、一般に1.0m~2.0mが多い。

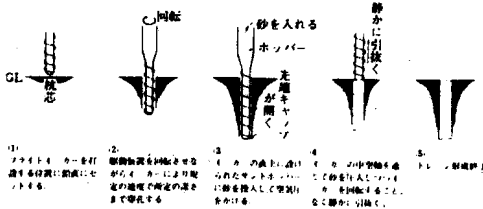
(2) ドレーン材……清浄な砂を用いるが、砂柱の周囲の地盤の土粒子を通過させることなく自由に水が流れることが条件となるので、地盤の粒径との関係でドレーン材の粒径の範囲がきまる。

(3) 施工管理……改良中および改良後の一軸圧縮強さ等の測定および改良中の間ゲキ水圧、沈下量の測定による。

(4) 載荷重として盛土(1m当たり約1.5t/m²)、ウ



10. フライト式サンド・ドレーンの施工機



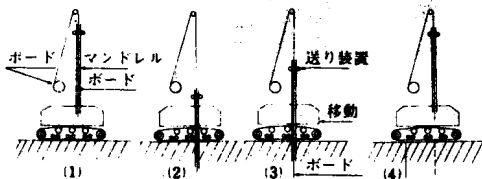
11. フライト式サンド・ドレーンの施工順序

エルポイント工法（水位低下1m当たり約1t/㎡）、大気圧工法（地中の気圧の低下0.1気圧当たり1t/㎡）などが用いられる。

ペーパー・ドレーン工法

- a 原理 サンド・ドレーンと同じ。
- b 施工方法 ペーパー・ドレーンの設置方法にマンドレルを使った方法とマンドレルを使わない簡易打設法がある。

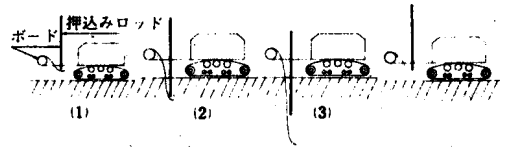
マンドレル式打設法（12図）



12. ペーパー・ドレーン工法の施工順序（マンドレル打設法）

- (1) カードボード（またはケミカルボード）は後方のドラムから滑車を通してマンドレルの内へ導かれる。
- (2) カードボードはマンドレルの送りローラーで挟まれて同時に地中に圧入される。
- (3) 所定の深さにマンドレルが到達すると、送り装置によって、カードボードを地中に残してマンドレルだけ引き上げられ、カッターでカードボードは切断される。
- (4) 設計されたピッチで次の打設点へ移動する。

簡易打設法（13図）



13. ペーパー・ドレーン工法の施工順序（簡易打設法）

- (1) カードボードは後方のドラムより押込みロッドの下へ導かれる。
- (2) カードボードは押込みロッドに押えられマンドレルと同時に地中に圧入される。
- (3) 所定の深さに押込みロッドが到達すると、カードボードを残して押込みロッドが引き上げられ、カッターでカードボードが切断される。
- (4) 設計されたピッチで次の打設点へ移動する。

c その他 (1) 施工間隔……1.0m前後が多い。

- (2) ドレーン材……当初は内部に約10本の溝を有する幅10cm、厚さ3mm程度の帯状紙製品を用いていたが、効果の永続性、並びに沈下量の大きい場合に切断するなどの問題点が出てきたので、最近ではほぼ同形状の高分子化学材料等を使ったものが多くなり、ケミカル・ドレーンと称していることがある。

- (3) 施工管理および載荷重はサンド・ドレーンの場合と同様である。

- (4) 施工業者：五洋建設k.k.
青木建設k.k.

ウエルポイント工法

地下水位以下の土は水位を下げるにより、浮力分だけ有効応力が増加するので、水位低下量1m

しは

当たり 1 t/m^2 の荷重が増加すると考えてよい。ウエルポイントによる水位低下量は理論的には最大 10 m 、したがって 10 t/m^2 の荷重が期待できるが、実際には 6 t/m^2 程度で設計するのが良い。この工法は単独でも使われるが一般にはサンド・ドレーン工法またはペーパー・ドレーン工法と併用する。なおこの工法が有効に使えるのは下記の条件にあてはまる場合である。

- (1) 表部または中間に砂層がある。
- (2) 下部に砂層があり、ドレーン砂層まで達している。
- (3) すべてのドレーンにウエルポイントを設置する。

大気圧工法

改良を要する地盤上にフィルター層をつくり、ビニルシート等で遮蔽し、真空ポンプを使ってフィルター内を減圧することにより、減圧相当分を荷重として働かせる工法で、ウエルポイント同様、最大 10 t/m^2 通常 6 t/m^2 程度の荷重が期待できる。14図に 2 m の盛土とこの工法を併用した場合の設計図を示す。図でも明らかなように、この工法では集水口（ピックアップ）をできるだけ多数設置し、均等に減圧するようにしている。また遮蔽用のビニルシートの端部は地中に埋め、泥土で埋め戻して空気の流入を防いでいる。

ケミコパイル工法

a 原理 生石灰を土中に打設すると

- (1) 化学反応により周囲の間隙水を吸水する。
- (2) 発熱反応により含水比を低下させる。
- (3) 膨張作用により圧密脱水を。

などの効果がある。そこで地盤改良用に加工したケミコライム（小野田セメント㈱の登録商標）と称する生石灰を軟弱粘性土地盤に打設し地盤改良を行う。

b 施工方法 (1) ケミコパイル打設機によりケーシングを打設する。ケーシングの貫入は振動くい打ち方式または回転方式による。

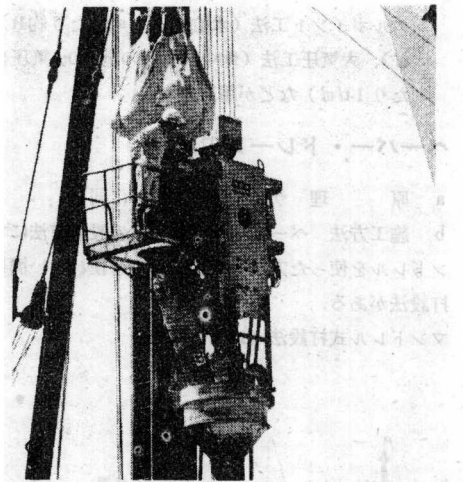
(2) ケーシング内部に改良充てん材（ケミコライム）を打入する。

(3) ケーシング内に圧縮空気を送入し、先端の開閉弁を開放して充てん材を圧送する。

(4) 振動機を起動（駆動装置を回転）し、エアールをかけ、ケーシングを上下運動させながら引き抜く。

(5) 打設完了後、上部に砂を投入する。

この工法による材料投入の状況および先端シュートの型状を写真15、16に示す。



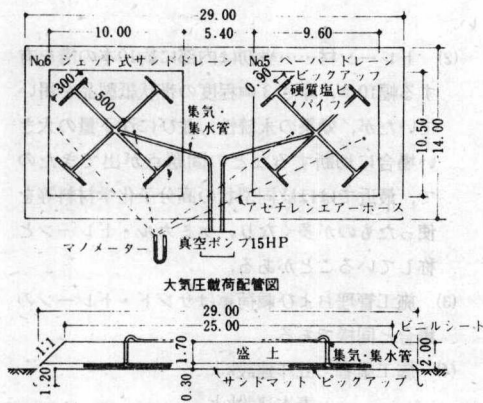
15. 材料の投入(ケミコパイル工法)

〔問合せ先〕

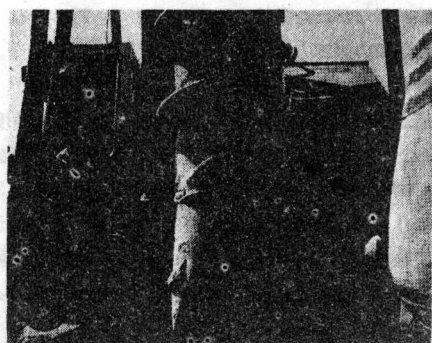
小野田セメント㈱03-531-4111

【参考文献】

(1) 日本建築学会「建築基礎構造設計標準同解説19



14. 大気圧工法による載荷方法



16. 打設機の先端部(ケミコパイル工法)

- 74改 p349～358
- (2) 藤森謙一 内田編 「新しい軟弱地盤処理工法」 近代図書 1967
- (3) 「地盤改良工法の現状」 基礎工 1973.9 総合土木研究所
- (4) 伊東範雄編 「生石灰による地盤改良」 1969 日刊工業新聞
- (5) 施工業者連絡先より提供のカタログおよび資料

遮音材料

遮音材料とは

吸音材料の項で示した図1.1のように材料へ音波が入射すると、その一部は反射され一部は材料中で吸収され、残った音波が材料の背後に透過する。材料の遮音性はこの透過音波のエネルギーの大小で評価され、それが小さいほど遮音性が優れているということになる。

特に遮音材料と銘打って市販されている材料はないが、遮音材料と呼ばれるための要件は、

- ① 空气中を伝搬する音波の遮断に関して特質を備えている(建物の構造体を振動の形態で伝わるような固体音の遮断は、一般には対象としない)。
- ② 実用的に使いやすい材料であり、遮音の目的に則して天井・壁・床・窓・扉などの部位の構成材料となりうる。

であり、材料的には

- ③ 空気の流通がなく比較的密実な材質をもっている、である。
- ③の要件は吸音材料の代表であるグラスウール、ロックウールなどの多孔質と異なるものであり、この

点からも遮音と吸音とが区別される。

騒音対策における役割

遮音による騒音低減手段は10～30ホン程度の低減効果ならば容易に実現しうるので、数ある騒音防止手段の中で最も有力な手段である。したがって騒音防止計画においては、遮音手段：うまく採り入れられるかどうか、その遮音構造の設計が的確に行なわれたどうかによって対策の成果が左右されるといってもよい。

なお、後に示すように吸音による手段を併用することによって遮音効果をいっそう高めることができる点に留意しておく必要がある。

遮音効果の表現方法

音響透過率 τ

材料の遮音性能を表すとして物理学的には(1)式に示すように入射音(I_1)と透過音(I_2)のエネルギー比で定義される音響透過率 τ が用いられる(吸音材料参照)。

$$\tau = \frac{I_2}{I_1} \dots\dots\dots (1)$$

この τ は1以下の値をもち、小さいほど遮音性能が優れていることを意味する。もし $\tau=1$ であれば入射音がそのまま透過してしまうことになる。

音響透過損失TL

音響問題を実用的に取り扱う場合には、

- ① τ の値が一般には小数点以下の小さい数値である

- ② 遮る量で示した方が直観的にもわかりやすい

- ③ 音響問題の量的扱いではdB(デシベル)単位を用いているので、これに合わせておいた方が便利である

などの理由から、(2)式のように τ の逆数を対数表示した音響透過損失(TL: Transmission Lossの略)が用いられる。

$$TL = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} \quad (\text{dB}) \dots\dots\dots (2)$$

周波数特性

騒音対策で対象とする騒音源はいろいろな周波数の音が混じり合った騒音を出しているのが普通である。一方、材料の透過損失も後に詳しく述べるように入射音の周波数によって異なった値を示す。したが

って、材料の遮音性というとき、周波数別の透過損失が示されていないと騒音防止を進めるうえで有力な資料にならない。

通常は1/3オクターブバンド、または1/3オクターブバンドの中心周波数を横軸に示し、透過損失を縦軸にとった図で表現されることが多く、この形式で示されたデータを透過損失の周波数特性または簡単に遮音特性といっている。周波数の実用範囲は125~4,000Hzである。

音響の参考書や材料カタログなどではこの形式で遮音特性を示しているが、なかには平均透過損失とか500Hzでの透過損失だけが示されている資料もあるが、これは別な目的をもった便宜的な表示方法（たとえばJISでは材料の遮音性能区分を表す呼び名として用いている）であって、有効なデータとするためには周波数特性で示されている必要がある。

試験条件の明示

透過損失は材料もしくはこれで組み立てられたパネル（遮音構造）自身の性質のほか、音の入射条件や試験体の大きさ、組立て方、支持の仕方といった試験条件によって同じ材料、遮音構造でも異なる値となる。

音の入射条件には吸音材料の項で述べたように①垂直入射、②斜入射、③ランダム入射が考えられるが、一般には①、②の条件下の試験法そのものに多くの困難があり、また騒音対策の現場では③の条件に該当するケースが多いので、JISで規格される測定方法では③の条件を満たすことを指示している。

試験体にかかわる条件には複雑な問題が多く、また条件を数量的に規定しえない面が多い。次項で述べる実験室を用いた測定では試験体の面積は10㎡としているが、その面積が小さくなるにつれて、低い周波数領域での透過損失が変化していくことがあるので注意を要する。

試験体の組立て方、支持の仕方における条件で重要な問題は隙間の有無である。実験室で行なう遮音試験では試験体自身の性能を知る目的から、試験体の施工上避けられない隙間を油粘土やコーキング材で閉鎖した後に行なうことが多いが、現場での施工条件とあまりにかけ離れた試験条件のもとでえられたデータでは実際の意味が薄れてしまう。

騒音対策において遮音材料が正しく使われるためには、上記に述べたことなどからもわかるように、

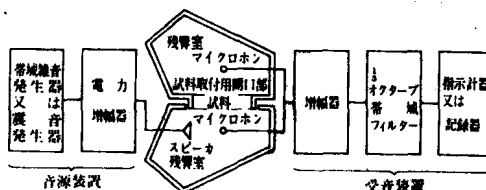
試験が行なわれた条件も明示しておく必要がある。

遮音効果の測定方法

実験室における測定方法

透過損失の測定は試験体に対していろいろな角度からランダムに音が入射しているようなとき値がえられるように、音の拡散状態の良好な残響室が2つ隣り合った実験施設で行なわれている。このように実験施設における測定方法はJIS A 1416（実験室における音響透過損失測定方法）で規定されている。

この規格によれば、1図に示すように2つの残響室の間に設けられている開口部分に約10㎡の面積Sをもった試験体を施工し、一方の音源用残響室内でスピーカーから試験音（1/3オクターブバンドノイズを用いることが多い）を出し、他方の受音用残響室を試験体透過音の測定室としてそれぞれの部屋での平均的な音圧レベル L_1 、 L_2 を測定するとともに受音用残響室の残響時間も測定する。この残響時間は吸音力Aの算出データとして使われ、その測定方法はJIS A 1409（残響室法吸音率の測定方法）に示されている。



1. 透過損失の測定施設

以上、4つの測定データ L_1 、 L_2 、A、Sを用いて透過損失TLは次式で算出される。

$$TL = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \frac{S}{A} \quad (3)$$

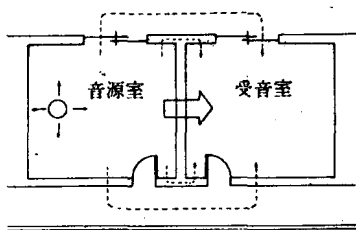
なお、2つの残響室は試験体そのものの透過損失を正しく測るため、音源用残響室から受音用残響室への音の伝搬は試験体のみを通じて行なわれ、これ以外の経路から音の浸入がないようにするため構造的に独立した形で建てられている。

現場における測定方法

実際にでき上がった建物の壁や床などの遮音効果を測ることもしばしば要求されているが、これにはJIS A 1417（建築物の現物における音圧レベル差の測定方法）が定められる。

現場における測定では遮音効果を透過損失で示す

ことが一般には難しく、規格の表題にもみられるように壁、床などの遮音構造体によって区切られた2空間の間の音圧レベル差で表現することになっている。この理由には



2. 現場における音の伝搬経路

- ① 2図のように実際の建物では、測定対象とする試験体だけでなく、破線矢印で示した他の建築部材をたどって受音室へ浸入してくる音（こうした形式の音の伝搬を側路伝搬音という）もあること。

- ② 音源側や受音側の音場が十分な拡散状態になっていない。

など試験体の透過損失を算出できるだけの測定条件が整っていないことがあげられる。

したがって、音圧レベル差による遮音効果の表現にはさまざまな伝搬経路をたどる音の寄与を含むとともに、受音側の吸音効果や受音側が屋外空間であれば距離にともなう減衰量も含まれている。

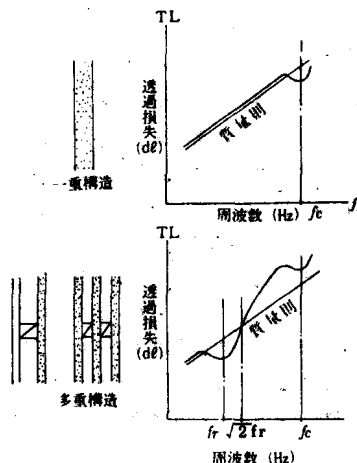
JIS による測定方法では音源としてオクターブバンドノイズを放射するスピーカーを用いることが原則であるが、測定現場に日常的にある騒音、たとえば窓の測定では道路交通に伴う騒音、工物の外壁の測定では機械から発生している騒音、を音源として用いることもあるが、測定要領はJISに準じればよい。この場合に注意を要することは騒音の大きさ、周波数特性が安定していることと音圧レベルの測定点の配置状況を明確にしておくことである。

各種の材料および遮音構造の遮音特性

遮音特性

実用面できくみられる遮音材料の使い方は3図に示すような一重構造と多重構造の構成部材としての使い方である。多重の遮音構造では二重構造が最もポピュラーである。

これらの遮音構造が示す遮音特性を定性的に描く



3. 一重構造と多重構造の遮音特性

と図の右側のようになり、それぞれは次のような特徴をもっている。同一原料で比較的均質な材質の材料で構成されている一重構造の遮音特性は、

- ① 大部分の周波数範囲において、入射音波の周波数が高くなるとともに1オクターブあたり約5 dBの勾配をもった直線に沿って透過損失が上昇する。この性質は遮音効果が構造体の重さによって決まるという理論で説明され、これを遮音における質量則と呼んでいる。
- ② ある周波数 f_c の前後にわたって上昇直線からはずれ、透過損失は谷形に低下する。この現象は材料の物理的性質、厚さ、形状から定まる振動特性と入射音波との共鳴によって生ずるもので、これをコインシデンス効果の名で呼んでいる。

一方、多重構造では、

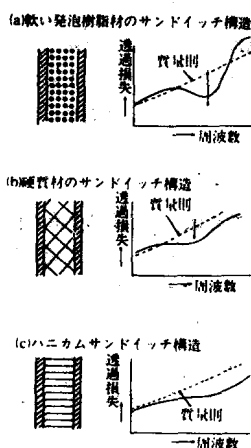
- ③ 低い周波数領域のある周波数 f_r の前後で透過損失は谷形に低下する。この現象は板と板の間の空気がバネとしての作用を示し、板同士共振するために起る音の共鳴透過である。俗に太鼓現象とも呼ばれている。谷の数は二重構造ならば1つ、三重構造では2つというふうに現われる。
- ④ この谷底に相当する周波数を越えると質量則で示される直線勾配よりも急な勾配で透過損失は上昇し、 $\sqrt{2}f_r$ より高い周波数領域では質量則による値を上回るようになる。

- ⑤ 上昇していく過程のある周波数 f_c の附近で一重構造にみられたと同様なコインシデンス効果による透過損失の低下が生ずる。

以上にかかげた一重の遮音構造における質量則とコインシデンス効果、多重遮音構造における質量則を上回る遮音特性と低音領域における共鳴透過現象の4つは遮音の最も基本的な性質である。そして、これらの基本的性質によって現われる遮音特性は遮音構造を構成する材料によっても、また構成の仕方によっても変化するので遮音設計にあたってはこれらの性質の長所を生かし、短所をできるだけ軽減するように材料の選択や使い方を考えていかなければならない。

最近、遮音材料として異種材料を積層した、いわゆるサンドイッチボードと呼ばれる製品が多数市販されている。このような材料を用いるとき、外見は一重の遮音構造に該当しても二重の遮音構造と類似の遮音特性を示すこともあるので注意を要する。

4図は芯材に、(a)比較的に軟かい樹脂など、(b)硬質の材料、(c)ペーパーハニカム、を用いた3タイプのサンドイッチボードの遮音特性を定性的に示したものであるが、(a)のタイプのサンドイッチボードは二重の遮音構造とそっくりな遮音特性を示している。したがって遮音を目的としてこの種の材料の開発を行なう場合には素材の組合せを検討しなければならない。

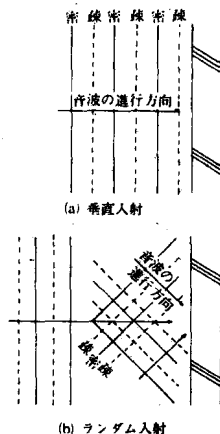


4. サンドイッチボードの遮音特性

一重遮音構造の基本的遮音特性

質量則

音波は空気中における圧力変動を生ずる波動である。この音波が板状の材料へ入射するとその疎密圧力の繰返しによって材料は振動しはじめ、背面へ新たに音波を作り出す。つまり音が透過する。質量則は入射音波の強制振動に抵抗する要素として材料の質量を考えて導き出された遮音上の法則である。この考えにもとづいた解析結果によれば、5図(a)のように平面波が材料へ垂直に入射したときの透過損失 TL_0 は



5. 音波の入射状況

$$TL_0 = 10 \log_{10} \left[1 + \left(\frac{2\pi f m}{2\rho c} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots(4)$$

となり、5図(b)のようにいろいろな角度で入射するときの透過損失 TL は

$$TL \approx TL_0 - 10 \log_{10} (0.23 TL_0) \quad \dots\dots\dots(5)$$

となる。上記の2つの式における各記号は、

f : 入射音波の周波数 (Hz)

m : 材料の単位面積あたりの質量 (kg/m^2)

ρ : 空気の密度 (kg/m^3)

c : 空気中における音波の伝播速度 (m/s)

である。

式(4)において実用的な周波数範囲では $1 < (2\pi f m / 2\rho c)^2$ であるので、

$$TL_0 \approx 20 \log_{10} \frac{2\pi f m}{2\rho c}$$

ともかけ、1気圧で気温が20℃のとき、

$$\rho = 1.205 \times 343.7 = 414 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

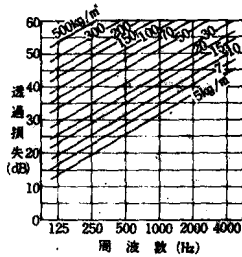
であるから、

$$TL_0 = 20 \log_{10} (f \times m) - 42.5 \dots \dots \dots (6)$$

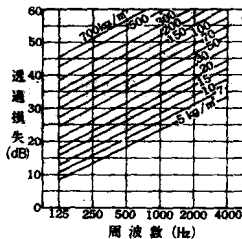
となり、材料の単位面積あたりの質量（面密度という）を与えると周波数ごとの透過損失を求めることができる。

6図は面密度 m をパラメーターにして、それぞれ TL_0 、 TL を周波数とに求める図である。

これらの図にみられるように、周波数が2倍になるごとに、あるいは面密度が2倍になるごとに、①垂直入射音波に対しては6 dBづつ、②ランダム入射音波に対しては5 dBづつ透過損失が上昇していく。



6. 質量則による透過損失算出図（垂直入射）



7. 質量則による透過損失算出図（ランダム入射）

後に事例としてかけがえるが、比較的均一な材質をもった板状の材料であるストレート板、石こうボード

8. 建築材料の密度とヤング率の概数表¹⁾

材料の名称	密度 g/cm ³	ヤング率 N/mm ²	材料の名称	密度 g/cm ³	ヤング率 N/mm ²
鋼鉄	7.8	2.1×10^{11}	軟質テックス	0.5	7.0×10^8
銅	8.9	1.23×10^{11}	スレート等板	0.9	2.0×10^8
アルミニウム	2.7	7.1×10^{10}	フレキシブル板	1.8	1.75×10^8
鉛	11.0	1.62×10^{11}	スレート軟質板	1.9	1.5×10^8
ガラス	2.5	7.0×10^{10}	スレート硬質板	1.5	1.25×10^8
普通コンクリート	2.3	2.1×10^{10}	珪藻カルシウム板	0.7	5.4×10^8
軽量コンクリート	1.3	4.5×10^9	木毛セメント板	0.6	2×10^8
発泡コンクリート	0.7	1.5×10^9	FRP板	1.5	1×10^8
砂岩	2.3	1.7×10^{10}	電化ビニール板	1.4	3×10^8
花崗岩	2.7	5.2×10^{10}	ゴム	0.92	1×10^8
大理石	2.6	7.7×10^{10}	ビニテックス	0.043	1.7×10^8
木材	0.8	1.0×10^{10}	塩ビフォーム	0.077	1.7×10^8
合板	0.6	6.3×10^9	ウレタンフォーム	0.045	4.0×10^8
ハードボード	1.2	2.0×10^{10}	スチロフォーム	0.015	2.5×10^8
パーティクルボード	1.2	3.0×10^{10}	エアフォーム	0.015	7×10^8

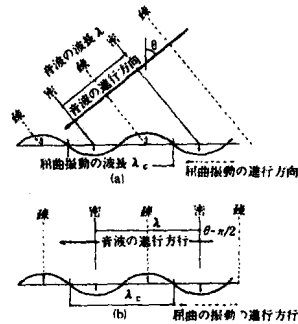
ド、金属板、ガラス板、コンクリート壁などの透過損失は、コインシデンス周波数附近を除けばこの質量則から算出される値とよく合致する。

8表には参考までに各種材料の密度とヤング率を示しておく、このデータはこれから述べる諸性質の検討にも利用される。

コインシデンス効果

遮音材料のうち比較的均一な材質の単板材料は、広い周波数で質量則にあてはまる遮音特性を示すが、材質、形状から定まる特定の周波数で質量則からはずれ現象がしばしば現われる。

この原因として材料への入射音波と材料の面内に二次元的な広がりをもって生ずる曲げ振動との共鳴が考えられている。



9. コインシデンス効果の条生機構

9図は平面音波が材料へ太線矢印の方向から入射してきている時、ある瞬間における音波による圧力の疎密状態と材料中を進行する曲げ振動の様子を示したものであるが、板は入射音波の疎に相当する部分では上方に引き上げられ、密な部分では下方に押し下げられるような強制振動を受けている。一方、音波のような周期的に変化する外力を受けると、材料はいろいろな波長（あるいは周波数）をもつような曲げ振動をはじめが、その中には起りやすい振動と起り難い振動とがある。もし起りやすい曲げ振動の波形と9図にみられるように入射音波の疎密状態が一致すると、板は激しく振動するであろう。

つまり一種の共鳴状態になり、材料の背面へ入射音波に対してほとんど抵抗せずに音を伝えることになる。

この状態が生ずるのは9図から容易に理解できるように音波が θ 方向から入射している時、音波の波

長 λ と板の曲げ振動の波長 λc とが $\lambda c = \lambda / \sin \theta$ の関係をもちながら音波と曲げ振動を進行していく場合である。

板材料に生じやすい曲げ振動は、板の曲げ剛性に関係し、この共鳴現象が起こる周波数 f は、

$$f = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}} \cdot \frac{1}{\sin^2 \theta} \quad \dots\dots\dots (7)$$

で与えられる。ここで、

c : 空気中の音波の伝搬速度 m/s

m : 板材料の面密度 kg/m^2

B : 板材料の曲げ剛性 $N \cdot m$

であり、曲げ剛性 B は材料の厚さを h 、ヤング率を E 、ポアソン比を σ とすれば

$$B = \frac{Eh^3}{12(1-\sigma^2)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

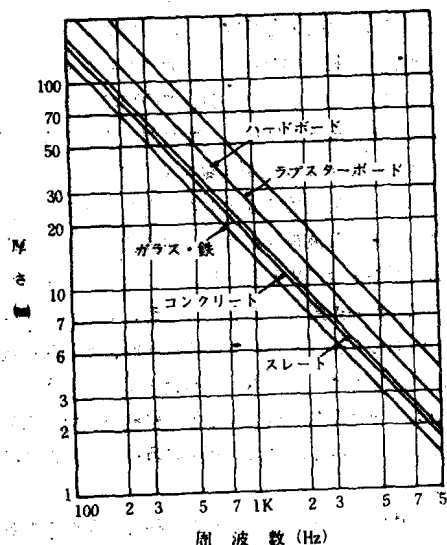
で表される。

この現象による遮音効果の低下をコインシデンス効果と呼んでおり、式(7)にみられるように $\sin^2 \theta$ は 0 から 1 までの値をもつので多数の周波数でこの現象が生ずる。 $\sin^2 \theta = 1$ のとき、つまり $\theta = \pi/2$ (9 図(b)の状態) のとき周波数 f_c は最小値をとるが、これを限界周波数 f_c といっており、

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

で表される。

10図は各種材料の厚さとコインシデンス効果が生



10. 材料の厚さとコインシデンス周波数

ずる限界周波数 f_c との関係を示したものである。式(8)、(9)と併せて考えてみると f_c は曲げ剛性が大きくなると低い方へ移動する。一方、曲げ剛性では材料の厚さが大きな影響をもたらすので、厚みが増すにつれて f_c は低い周波数の方へ移動することになる。したがって、曲げ剛性の値によって騒音対策面で重要な周波数領域で遮音効果を低下させてしまうことになるので、材料の選定には単に重さだけでなくこの点について配慮する必要がある。

なお、このコインシデンス効果による遮音効果の低下量がどの程度にはるかは、材料内部に生ずる摩擦などによる損失量に関係しているが、現在のところ損失に関するデータが不足しているのでまだ十分な定量的予測ができるまでにはいたっていない。

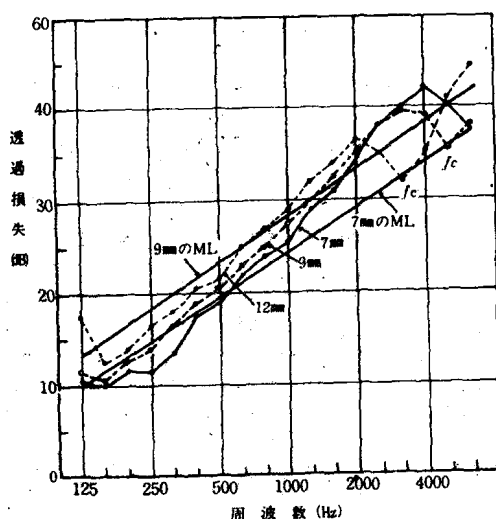
一重遮音構造の遮音特性事例

前項までに述べた一重遮音構造の基本的な遮音特性に注目しながら、実際の材料の特性を以下にみてみよう。

1) 均質平板材料

合板、硬質繊維板、樹脂板など有機系の素材から作られた材料、セメント、コンクリート、石こう、ガラスなど無機系の素材を用いた材料、鉄、アルミ、鉛など金属を素材とした材料で、材質が比較的均一な製品がこれに属する。

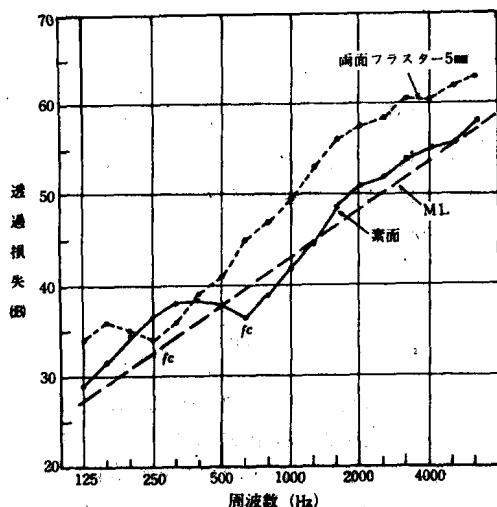
11図は石膏ボードの遮音特性で質量則(図中では ML と記している) から求まる透過損失とよく合致



11. 石こうボードの遮音特性

していることとボードの厚さによってコインシデンス効果にともなう透過損失低下の周波数位置が変化している様子もみることができる。

12図は発泡コンクリート板100mm厚の遮音特性で、素面のままでは中音域にコインシデンス効果による低下が生じている、この両面にプラスターを塗ると板の曲げ剛性が増加するので遮音低下が起る周波数が低い方に移動する。



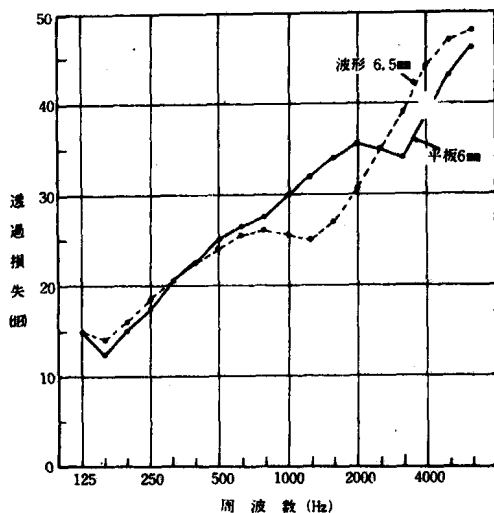
12. 発泡コンクリート (100mm 厚) の遮音特性²⁾

2) 均質折曲げ加工材料

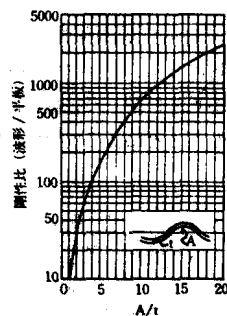
材質的には1)と同じでも波形、三角波形あるいは角波形に成形加工を施された材料がある。代表的な製品としては波形スレート、角波鉄板がある。このような加工を行なうと一方向の曲げ剛性が平板とは異なるため、コインシデンス周波数も変化する。

13図は平スレートと波形スレートの遮音特性を比較したものである。波形スレートではコインシデンス効果が平スレートよりも低い周波数に生じていることがみられる。両材料の厚みに0.5mmの相異はあるが、この差によるコインシデンス周波数のずれは10図からも極めて小さいので波形加工にともなう曲げ剛性の変化によるものと考えた方がよい。

コインシデンス効果の起る周波数がこのような折曲げ加工により平板と比べてどの程度ずれるかを算出するには14図が利用できる。13図の遮音特性に適用してみると、この波形スレートは $t=6.5\text{mm}$ 、 $A=8.25\text{mm}$ であるので、 $A/t=1.27$ になり平板との剛性



13. スレート板の遮音特性¹⁾



14. 波形板の剛性算出図¹⁾

比は約10倍である。

一方、10図より6mm厚の平スレートのコインシデンス周波数は約3200Hzになるので波形スレートの f_c は

$$f_c = 3200 \times \frac{1}{10} \approx 1000\text{Hz}$$

となる。実測データの周波数よりもやや低めに算出されたが、実用的な予測としては十分であろう。

3) 積層材料

異質材料を2層あるいはサンドイッチ状に積層した材料は強度や断熱性など新たな特質をもっているが、すでに述べたように遮音性能の面からみると注意を要する材料が多い。

2層の積層材料の例として、15図にフレキシブルボードと毛セメント板を積層した材料の遮音特性を示したが、フレキシブルボードのみの遮音特性に