

# コンクリートの長期変質挙動に関する 調査研究(Ⅲ)

(成果概要)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)



1991年3月

清水建設株式会社

鹿島建設株式会社

株式会社 大林組

大成建設株式会社

# コンクリートの長期変質挙動に関する 調査研究(Ⅲ)

## (成果概要)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1991年3月

清水建設株式会社

鹿島建設株式会社

株式会社 大林組

大成建設株式会社

コンクリートの長期変質挙動に関する調査研究(Ⅲ)\*

中西正俊\*\* 万木正弘\*\*\*  
斎藤裕司\*\*\*\* 藤原 靖\*\*\*\*\*

要 旨

コンクリートは放射線廃棄物の処理において、固化体、緩衝材、グラウト材、シール材及びプラグ材などとしての利用が検討されている。

本研究は、自然条件下で長期間にわたって変質の進行したコンクリートの変質挙動に関する文献調査を行い、コンクリート構造物から変質したコンクリート試料を採取して、その試料の変質状態の調査研究を行ってきた。

本年度は、さらにコンクリートの長期変質挙動に関するデータを蓄積することを目的として、コンクリート構造物から採取した試料についてその変質状況について試験検討を行った。

試料採取を行ったコンクリート構造物は、昭和13年に建設(52年経過)された東京都心のビル及び昭和4年に建設(61年経過)された横浜新港の埠頭である。

得られた試料について、その変質に関する各種の試験を行うと同時に、長期の変質挙動の予測手法に関する文献調査を行い、以下が明らかになった。

(1) コンクリートの変質過程について

試験したコンクリートは、それ程変質していないようである。

これは、ビルのコンクリートコアは地下3階外壁から、埠頭のコンクリートブロックは海水面下から採取され、両試料とも比較的安定した環境にあったためであると考えられた。

(2) 変質挙動の予測手法に関連する文献について

コンクリートの長期の変質挙動の予測手法や実際の変質程度を検討した結果と比較検討が可能な研究は少なかった。

---

\*本報告は、清水建設株式会社、鹿島建設株式会社、株式会社大林組、大成建設株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：020D0121

事業団担当部署及び担当者：東海事業所環境技術開発部地層処分開発室 佐々木憲明

\*\* 清水建設株式会社技術研究所      \*\*\* 鹿島建設株式会社技術研究所

\*\*\*\*株式会社大林組技術研究所      \*\*\*\*\*大成建設株式会社技術研究所

STUDY OF LONG-TERM ALTERATION BEHAVIOR OF CONCRETE (3) \*  
M. NAKANISHI \*\*, M. YURUGI \*\*\*, Y. SAITOH \*\*\*\*, AND Y. FUJIWARA \*\*\*\*\*

ABSTRACT

For disposal of radioactive wastes, concrete is examined to be applied as seal materials etc.

These studies have been started with the aim to study about long-term behavior of concrete under natural condition. Since 1987, we investigated the literature of long-term behavior of concrete and examined the degree of alteration with some concrete samples collected from structure.

This year, based on previous research, further investigations are conducted to examine the alteration status of concrete sample collected from another structures.

The concrete structures were the building at central location in Tokyo metropolis constructed in 1938 (in service for 52 years) and wharf in Yokohama new port constructed in 1929 (in service for 61 years).

The results are as follows :

(1) The alteration degree of concrete sample

The examined concrete samples were considered to be likely not so altered because sample from building was collected at outer wall of basement 3rd floor and from wharf was collected under sea level, therefore both samples have been cured in relatively stable environmental conditions.

(2) The literature related to evaluation method of concrete alteration

A few literature related to alteration of cement hydrates is able to compared to results from investigation of alteration of concrete sample collected from structure.

\*Work performed by Shimizu Corporation, Kajima Corporation, Ohbayashi Corporation and Taisei Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

PNC Liaison : Geological Isolation Technology Section,

Noriaki Sasaki

\*\* Shimizu Corporation, Institute of Technology

\*\*\* Kajima Institute of Construction Technology

\*\*\*\* Ohbayashi Corporation, Technical Institute

\*\*\*\*\* Taisei Corporation, Technical Research Center

## コンクリートの長期変質挙動に関する調査研究（Ⅲ） 担当者一覧

	清水建設（株）	鹿島建設（株）	（株）大林組	大成建設（株）
実施責任者	飯田 康弘	岩城 良	村井 喜一	北村 黎夫
実施担当者	石井 卓	万木 正弘	斎藤 裕司	藤原 靖
研究業務担当者	中西 正俊	古市 光昭	三上 哲司	大脇 英司
	堀江 芳弘		入矢桂史郎	
	桜井 英行			



## 1. はじめに

コンクリート（本調査研究では、すべてのセメント硬化体を代表するものとして、以下この名称を使用する）は放射性廃棄物の処分において、固化体、緩衝材、シール材及びプラグ材などとしての利用が検討されている。

本研究は、自然条件下で長期にわたって変質の進行したコンクリートの変質条件や変質状態について調査し、長期の変質挙動のモデル化に資することを目的とするものである。

コンクリートの長期変質挙動に関する調査研究として、平成元年度までに、コンクリートの変質挙動に関する文献調査を行い、コンクリート構造物から変質したコンクリート試料を採取して、その試料の変質状態の調査研究を行ってきた。

平成2年度は、さらにコンクリートの長期変質挙動に関するデータを蓄積することを目標として、新たな研究対象のコンクリート構造物を選定し、変質状態及び環境条件に関するデータを取得することとした。

## 2. コンクリート試料の採取

### 2. 1 試料採取構造物の選定

表2.1-1に示す16箇所の試料採取候補地から、コンクリートの経過年数、環境条件、採取可能か否かなどを総合的に勘案して、No.1のDビルの地階及びNo.7の横浜新港10号、11号埠頭（以下、横浜新港埠頭と呼ぶ）を選定した。

Dビルは竣工後52年、横浜新港埠頭は61年を経過したコンクリート構造物である。

表 2.1-1 試料採取候補地点一覧  
Table 2.1-1 Selected Sampling Sites

No.	対象物	名称	所在地	竣工年度 (経年)	採水可能時期	土または空気に 接している	接している水 (海水, 真水)	水面(地下水位) と採水場所との 関係
1	ビル(建物) 地上7階 地下4階	Dビル	東京都千代田区	昭和13年 (経年52年)	平成2年10月頃	土, 空	真水	下部で可
2	トンネル	営団, 銀座線	東京都港区 (千代田区 との境)	昭和12年 (経年53年)	平成2年8月 ~11月	土, 空	真水	下部で可
3	トンネル (下水カバト)	宝町付近 拡幅工事	東京都中央区	昭和39年 (経年26年)	平成2年9月頃	土, 空 (下水)	真水	上部で可
4	護岸		神奈川県川崎市	昭和38年 (経年27年)	平成3年3月 (干潮時)		海水	上部で可 下部で可?
5	護岸	横浜港棧橋	神奈川県横浜市	明治22年 (経年101年)	?		海水	
6	護岸	横浜港 山ノ内埠頭	神奈川県横浜市	昭和7年 (経年57年)	?		海水	
7	護岸	横浜新港 10号, 11号 埠頭	神奈川県横浜市	昭和4年 (経年61年)	平成2年9月 ~10月		海水	
8	護岸	高島埠頭	神奈川県横浜市	大正時代 ? (未調査)			海水	

No.	対象物	名称	所在地	竣工年度 (経年)	採水可能時期	土に接している	接している水 (海水, 真水)	水面(地下水位) と採水場所との 関係
9	護岸	高島埠頭対岸 のJR岸壁	神奈川県横浜市	?			海水	
10	ダム	黒部 第2発電所	関電, 小屋平ダム	昭和11年	平成2年 9月10日 ~11月20日可		真水	

## 2. 2 試料採取コンクリート構造物の環境条件

## 2. 2. 1 Dビル

都心にある地上7階，地下4階のビルである。後掲の図2.3-1の土質柱状図の土壤に接して潜函工法で施工された地下鉄筋コンクリート外壁である。後記の表4.1-6のようにほぼ真水と言える地下水と接していた。接触していた砂質土の土質性状については表4.1-5参照。

コンクリートの環境条件としては、二酸化炭素による炭酸化をほとんど受けず、常時適度な湿潤状態が維持されていた良好な環境と云える。

東京の過去30年間の平均気象条件を表2.2-1に示す。また、試料採取時（平成2年10月17, 18日）の地下室内温度は17.9℃，湧出した地下水の温度は16.2℃であった。

表2.2-1 東京の過去30年間の気象条件（1951～1980）

Table 2.2-1 Monthly Climate in Tokyo (1951～1980)

月	気 温 (°C)			相対湿度 (%)	降水量 (mm)	日照時間 (h)	最多風向
	平均	日最高平均	日最低平均				
1	4.7	9.5	0.5	53	54	184	NNW
2	5.4	10.0	1.2	55	63	163	
3	8.4	13.0	4.2	58	102	179	
4	13.9	18.4	9.8	65	128	186	N
5	18.8	22.7	14.5	68	148	194	
6	21.5	25.3	18.4	75	181	134	
7	25.5	28.9	22.2	77	125	154	S
8	26.7	30.8	23.6	75	137	187	
9	22.9	26.7	19.9	75	193	127	
10	17.3	21.2	13.9	70	181	154	N
11	12.3	16.6	8.4	64	93	148	
12	7.4	12.1	3.3	57	56	173	
年	15.3	19.6	11.7	66	1,460	1,972	N

注) 国立天文台編，“理科年表”，No. 64，p. 199  
- 214 (1991) より引用

## 2. 2. 2 横浜新港埠頭

すでに解体されていたがケーソン基礎のコンクリートで海面下に61年間没していたことが確実なコンクリートである。

表2.2-2に過去30年間の横浜平均気象条件を、また過去3年間の本牧測定所の月間年平均海水温度を抜粋・調査して記載した。

表2.2-2 横浜の過去30年間の気象条件及び横浜港内海水温度  
Table 2.2-2 Monthly Climate in these 30 years and Temperature of Sea Water in Yokohama

月	気 温 (°C)			相対湿度 (%)	降水量 (mm)	日照時間 (h)	最多風向	海水*温度 (°C)
	平均	日最高平均	日最低平均					
1	4.9	9.7	0.6	57	61	182	NNW	10.8
2	5.3	9.9	1.2	60	72	159		9.7
3	8.2	12.8	4.1	63	119	176		10.5
4	13.6	18.0	9.6	71	143	167	N	12.7
5	17.9	22.3	14.1	74	163	197		17.5
6	21.0	24.8	18.0	81	216	140		21.0
7	24.6	28.3	21.8	83	141	172	S	22.8
8	26.2	30.3	23.3	80	132	206		25.5
9	22.6	26.3	19.6	80	199	139		23.8
10	17.6	20.8	13.7	76	187	138	N	19.9
11	12.7	16.4	8.3	69	104	148		16.3
12	8.0	12.2	3.2	62	59	175		12.6
年	15.1	19.3	11.5	71	1,596	2,000	N	16.5

注) 1 \* : 1986-1988年の平均値

計測地点は本牧ふ頭の海水面下1.5m〔干潮時〕  
(3.0m〔満潮時〕)

2 国立天文台編, “理科年表”, No. 64, p. 199-214 (1991) より引用

## 2. 3 試料採取状況

### 2. 3. 1 Dビル

#### (1) 採取位置

図2.3-1の土質柱状図と建物断面の概念図及び、図2.3-2と図2.3-3に示した地下3階（以下、B3Fと呼ぶ）と地下4階（以下、B4Fと呼ぶ）の平面図位置の外壁から採取した。

#### (2) 採取方法

コンクリート試料は、内径Φ150mmのコアボーリング方法によって、各地階2本ずつ計4本のコンクリートコアを採取した。

土壌試料は、コアボーリングを行った位置で且つ長柄スコップで採取した。この時合わせて地下水を採取した。

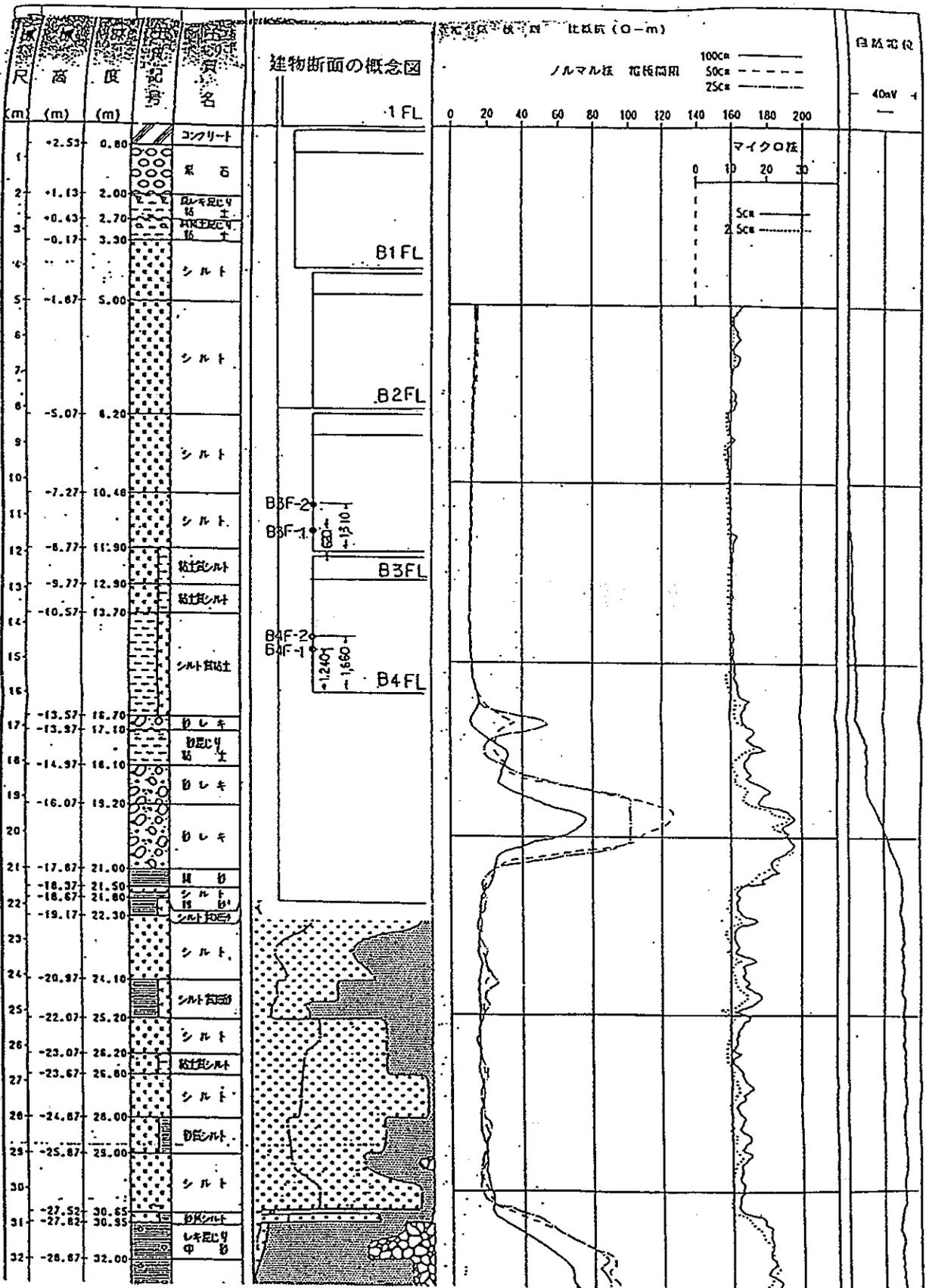


図2.3-1 Dビルの土質柱状図と建物断面の概念図  
 Fig 2.3-1 Geologic Column of Site and Outline Cross Section of D Building

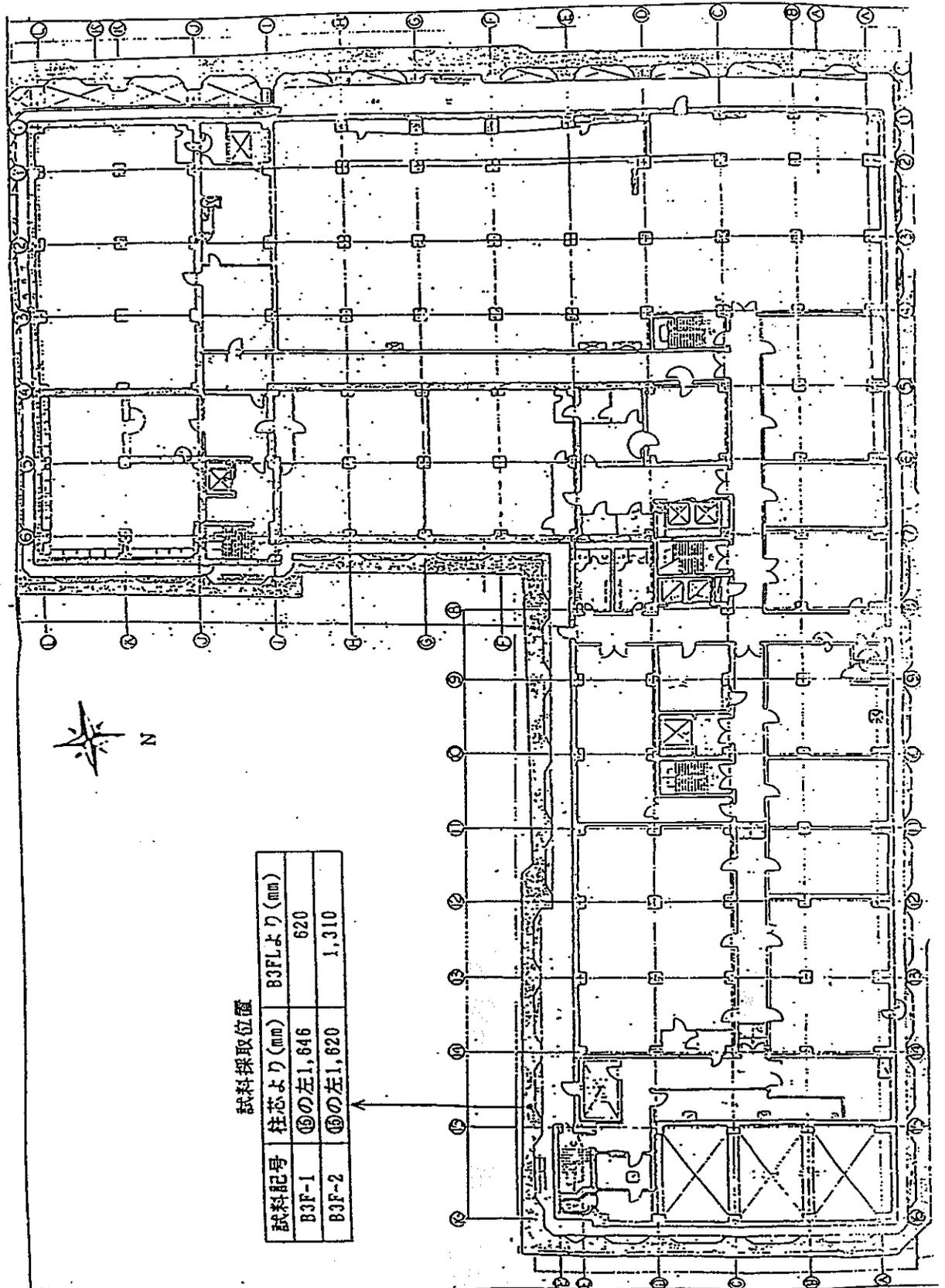


図2.3-2 Dビルの試料採取位置平面図 (B3F)  
 Fig 2.3-2 Sampling Points of Basement 3rd Floor in D Building

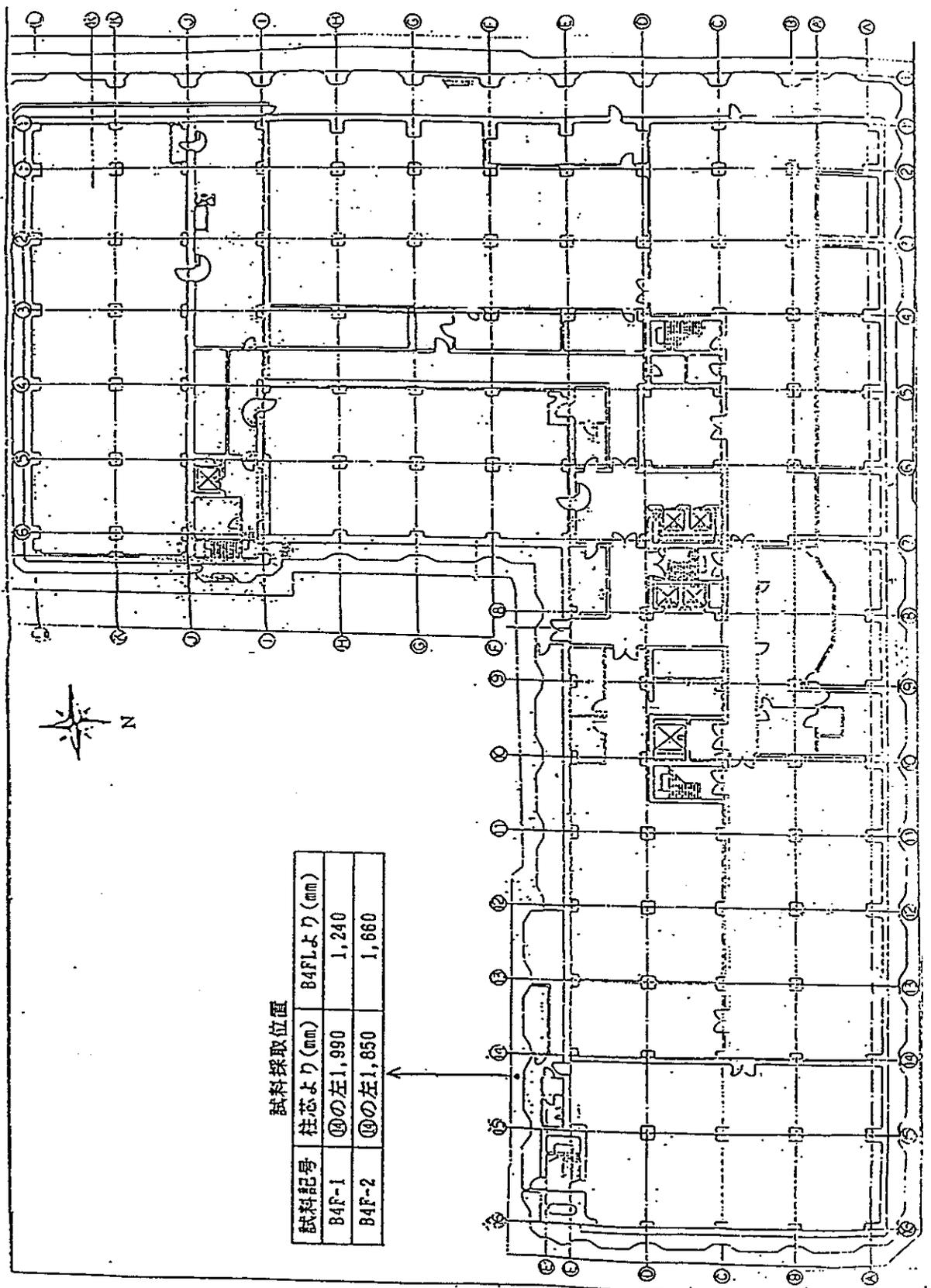


図2.3-3 Dビルの試料採取位置平面図 (B4F)  
 Fig 2.3-3 Sampling Points of Basement 4th Floor in D Building

2. 3. 2 横浜新港埠頭

すでに、ジャイアントブレイカーによって解体が終了していたケーソン部の確実に海水面下に没していたと判断される位置の20cm級の解体ブロック片を潜水夫が探索し、未解体岸壁から降したバックホウショベルのバケット内に移して陸上に揚げて採取した。

潮の満ち引き、飛沫及び波浪などの影響を直接に受けない冠水下の状態にあったので、海岸構造物としては比較的良好な環境にあったと言える。

図2.3-4と図2.3-5に試料採取地点と採取位置を示す。

試料採取位置付近で且つ海水を採取した。

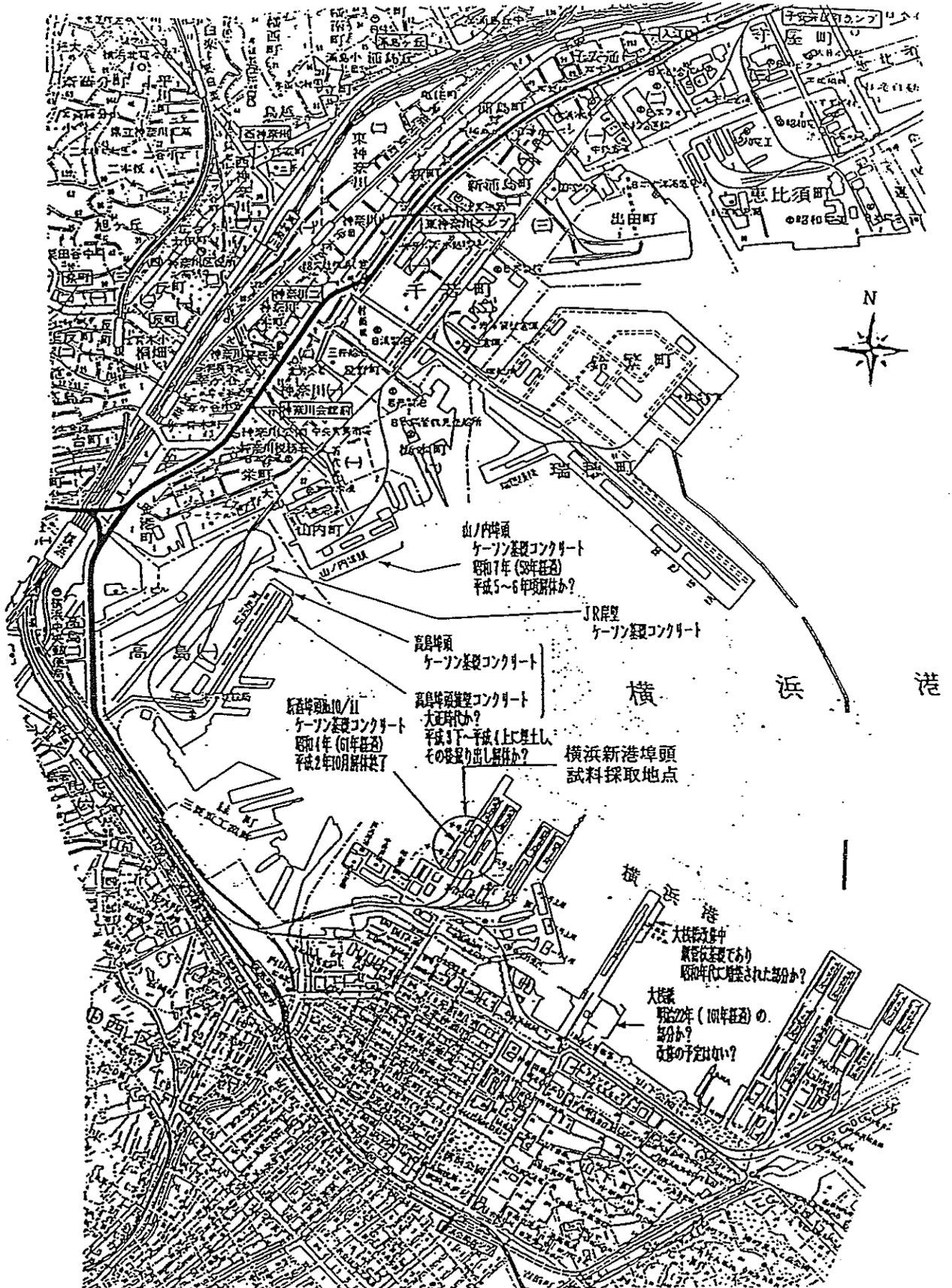


図2.3-4 横浜新港埠頭の試料採取地点  
Fig 2.3-4 Location of Yokohama New Port's Wharf

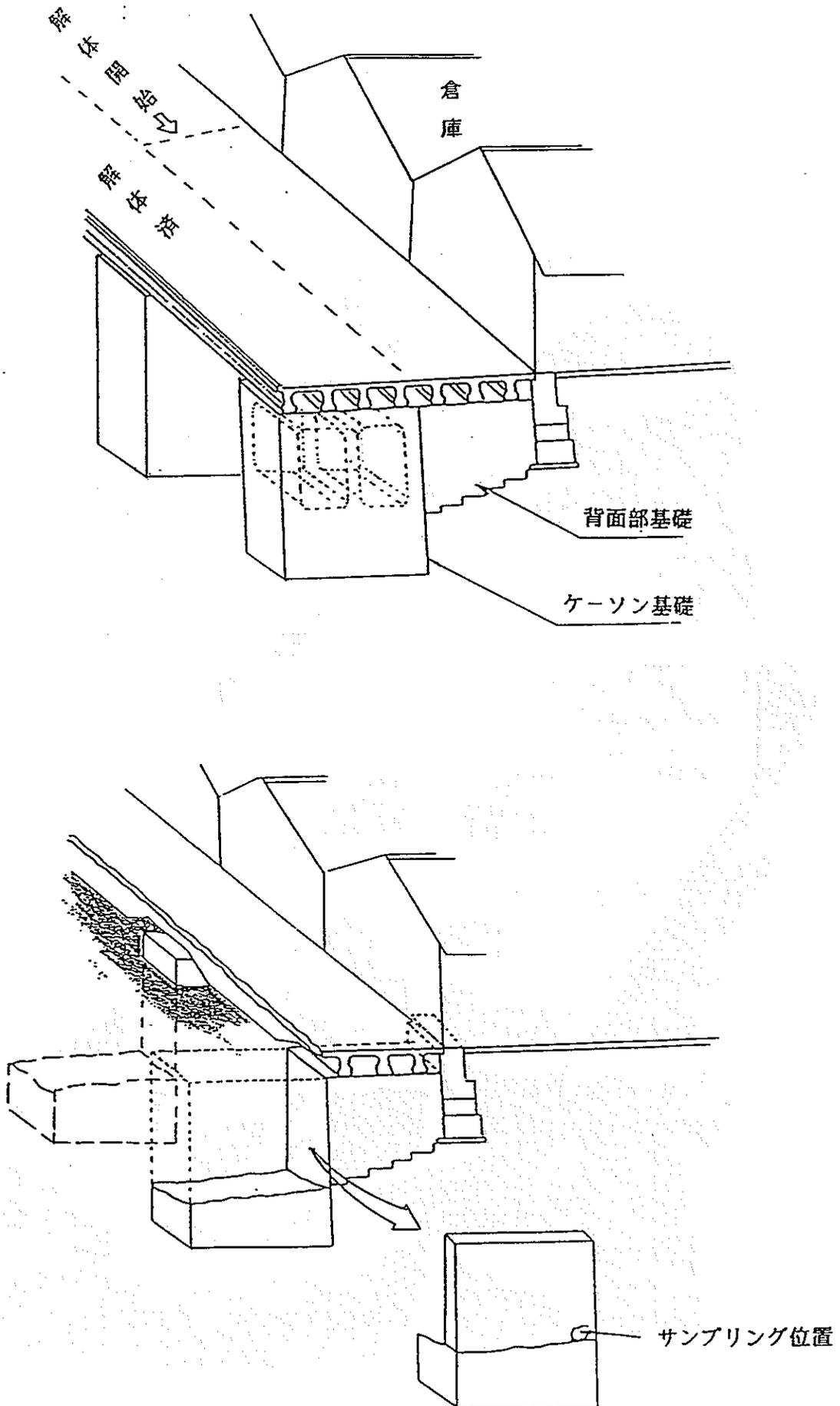


図2.3-5 横浜新港埠頭の試料採取位置概念図  
Fig 2.3-5 Outline of Sampling Point at Yokohama New Port's Wharf

## 2. 3. 3 採取したコア及びブロックの状態

### (1) Dビル

採取した4本のコア（B3F-1, B3F-2, B4F-1及びB4F-2）は、川砂利及び川砂を使用したコンクリートであり、粗骨材の最大寸法は約20mmである。

コアの粗骨材間のモルタルの充填程度などの外部観察からは、よく締め固められた一般的なコンクリートのように見受けられる。

採取したコアからB3F-1を選んで試験した。

### (2) 横浜新港埠頭

採取した8個のコンクリートブロック（A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, B-1, C-1及びC-2）のうち、海水に直接接触していた面は茶色に変色していた。

川砂利及び川砂を使用したコンクリートであり、粗骨材の最大寸法は約40mmである。

コアと粗骨材間のモルタルの充填程度などの外観観察から、よく締め固められたコンクリートであり、細かい粗骨材がやや多い傾向はあるが、一般的なコンクリートのように見受けられる。

### 3. 試験方法及び試料調整

#### 3. 1 土壌及び地下水, 海水の試験

##### 3. 1. 1 土壌の試験

採取したコンクリートコアに直接接触していた土壌について、次の試験を行った。

比 重 : J I S A 1202 (土粒子の密度試験方法) による。

含 水 量 : J I S A 1203 (土の含水比試験方法) による。

粒 度 試 験 : J I S A 1204 (土の粒度試験方法) による。

空 隙 率 : C B R ランマーで1層当り25回, 3層に分けて突いた試料について、  
ノギスによる方法で含水比, 湿潤密度及び間隙比を測定して求めた。

##### 3. 1. 2 地下水及び海水の水質分析

採取したコンクリートコアに接触していた地下水及びコンクリートブロックに接触していた海水の水質を、地質調査所, “地質調査所化学分析法, 地球化学的試料の化学分析法2” により、次の項目について分析した。

pH, Eh, 電気伝導度, 酸消費量,

イオン濃度など ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  
 $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{SiO}_2$ )

### 3. 2 構造物内部のコンクリートの試験

外部環境と直接接しない構造物内部について、次の試験を行った。採取したサンプルの中から、サンプル状況の良好なものを選んで、供試体を使用することとしDビルのコンクリートコアはB3F-1を、横浜新港埠頭のコンクリートブロックはB-1, C-1, C-2を用いた。

#### 3. 2. 1 モルタル部分と粗骨材部分の構成比

コンクリート供試体断面の写真撮影とその実寸法における断面の5mm以上の粗骨材の面積を累加して算出した。

#### 3. 2. 2 コンクリートの含水比

JIS A 1110 (粗骨材の比重及び吸水率試験方法) に準拠して、100～110℃で定質量となるまで乾燥して求めた。

#### 3. 2. 3 コンクリートの物性試験

##### (1) 圧縮強度、静弾性係数試験

圧縮強度試験及び静弾性係数試験用の供試体は、JIS A 1107 (コンクリートからのコア及びはりの切取り方法及び強度試験方法) に準拠して作製した。

圧縮強度試験は、JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) に準拠した。

静弾性係数は抵抗線ひずみゲージを用い、ASTM C 469-87a (Standard Test Methods for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression) によって試験した。

Dビルの圧縮強度試験用供試体の寸法は $\phi 75 \times 150$ mmで、この寸法は鉄筋を避けて切り出したためである。

なお、鉄筋には全く発錆は認められなかった。

横浜新港埠頭の圧縮強度試験用供試体の寸法は $\phi 100 \times 100$ mmで、この寸法は鉄筋の制約によるものである。

図3.2-1にDビルのコンクリートコアから各試験用供試体を切り出した位置の概念図を示す。

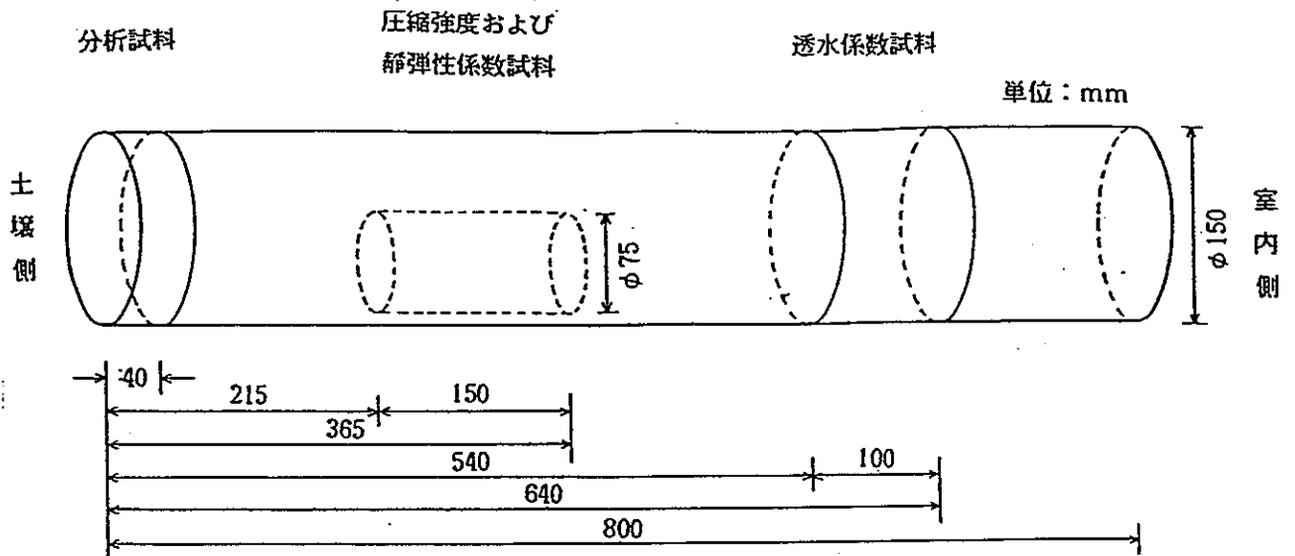


図3.2-1 Dビル試験用供試体の切出し位置の概念図  
 Fig 3.2-1 Outline Each Specimen Cutting from D building Core

## (2) 透水試験

水圧は  $5 \text{ kg/cm}^2$  としてアウトプット方法によって、透水係数を測定した。  
 透水係数は、ダルシーの法則を用い、一定の圧力下で単位時間に単位面積から流出する水量を求めるもので、次の式から求める。

$$K = \rho \frac{h}{p} \times \frac{Q}{A}$$

- ここに、K : 透水係数 (cm/sec)  
 $\rho$  : 水の単位容積重量 (kg/cm<sup>3</sup>)  
 h : 供試体の厚さ (cm)  
 Q : 透水量 (cm<sup>3</sup>/sec)  
 p : 載荷圧力 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 A : 透過面積 (cm<sup>2</sup>)

Dビルの透水試験用供試体の寸法は  $\Phi 150 \times 100 \text{ mm}$  で、この厚みはコア内部の鉄筋を避けて切出したためである。

横浜新港埠頭の透水試験用供試体の寸法は  $\Phi 100 \times 100 \text{ mm}$  で、この寸法は原ブロックの寸法及びひび割れの制約による。ジャイアントブレイカー破碎時の微小ひび割れの可能性を考え、念のため2本とした。

3. 3 構造物表面のコンクリートの試験

3. 3. 1 試料調整

(1) Dビル

土壌に接触していた面から10mmの間隔でコンクリート用ダイヤモンドカッター（切り代、約5mm）を用いて3層に切断し、さらに、この10mmの試料を鉋物用ダイヤモンドカッター（切り代、約1mm）で5mm、4mm厚さに分割スライスした。細分割したのは、土壌に接触していた面から余り隔っている位置では変質の可能性が小さいと判断したことによる。

(2) 横浜新港埠頭

海水に接触していた面から15mmの間隔でコンクリート用ダイヤモンドカッター（切り代、約5mm）を用いて7層に切断した。

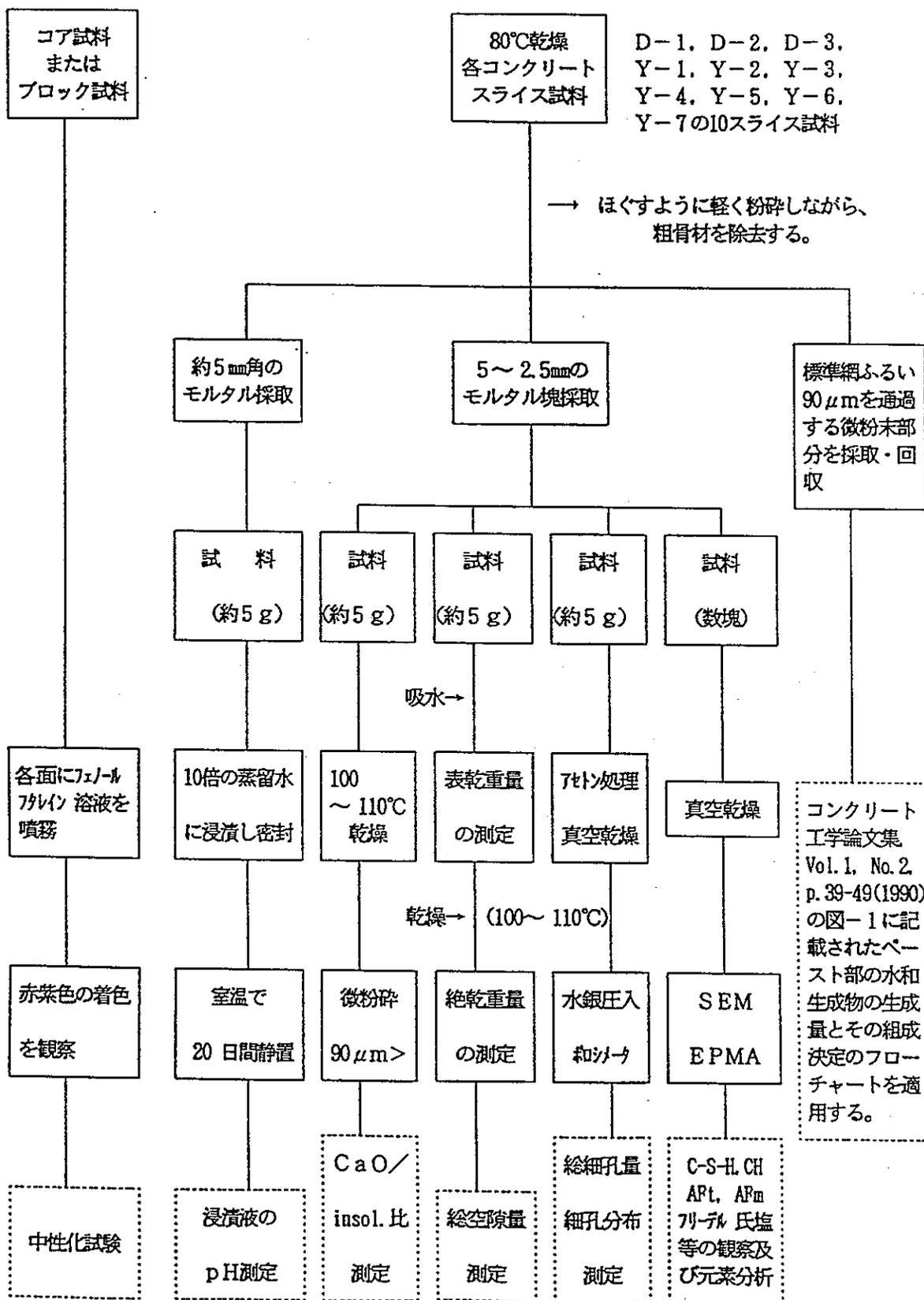
A-1～A-5のブロックは、いずれも切断したが、鉄筋やひび割れなどの制約がなく、最も多くのスライス試料の得られたA-5ブロックを試験に用いることとし、以下Y-1、Y-2…Y-7と呼ぶ。

表3.3-1は、試験に用いたスライス試料の一覧である。

表3.3-1 構造物表面のコンクリート試験に用いたスライス試料の一覧  
Table 3.3-1 Sliced Sample for Tests

採取位置	サンプル名	構造物表面のコンクリート試験用スライス試料							
		No.	D-1	D-2	D-3				
Dビル	コアNo. B3F-1	接触面からの距離 (mm)	0～5	6～10	15～20				
		No.	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Y-5	Y-6	Y-7
横浜新港埠頭	ブロック サンプルNo. A-5	接触面からの距離 (mm)	0～15	20～35	40～55	60～75	80～95	100～115	120～135
		No.	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Y-5	Y-6	Y-7

図3.3-3に、各試験項目ごとの試料調整フローシートの要旨を示す。



注) SEM : 走査型電子顕微鏡  
EPMA : X線マイクロアナライザー

図3.3-3 各試験項目ごとの試料調整のフローシート  
Fig 3.3-3 Flow Sheet of Sample Preparation for Several Test Items

3. 3. 2 試験項目及びその試験方法

(1) 化学分析

i) CaO/insol.比

供試体からのカルシウムイオンの溶出の程度を調べるため、(社)セメント協会コンクリート専門委員会報告F-18, “硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告”(1967)に準拠して、CaO/insol.比を定量した。

ii) 水和物の変質

水和物の変質を調べるため、鈴木一孝, 西川直宏, 山田善章, 谷口幾哉, “コンクリートの耐久性評価を目的とした水和組織の分析手法に関する研究”, コンクリート工学論文集, Vol 1, No.2, p. 39-49 (1990)によって分析を行った。

(2) 鉱物分析

i) 粉末X線回折

水和生成物を同定するため、粉末X線回折方法により、理学電機株式会社製 Rotaflex RAD-RB 型X線回折装置を用いた。

ii) 熱分析

水和生成物を定量するため、熱分析方法により、セイコー電子工業株式会社製 SSC 5020熱分析システムを用いた。

(3) 硬化体組織の観察 (SEM)

株式会社日立製作所製 S-405形走査電子顕微鏡を用い、微細組織の観察を行った。

(4) 元素分析 (X線マイクロアナライザー: EPMA)

株式会社日立製作所製 X-560形微小部走査X線分析装置を用い、元素分析を行った。

## (5) 空隙量及び細孔分布測定

## i) 空隙量

2.5～5 mmのモルタル塊約5 gを採取して、24時間吸水させてから、その表乾重量を測定した後、100～110℃で24時間乾燥して絶乾重量を測定して、空隙量を算出した。

## ii) 細孔分布

株式会社島津製作所製 ポアサイザー 9310 を用い、水銀を圧入して細孔直径の分布と総細孔量を測定した。

## (6) 中性化試験

## i) Dビル

地下3階及び4階採取のコアの1本ずつ(B3F-2, B4F-2)について、フェノールフタレイン溶液を噴霧して、その呈色を観察し、写真記録した。

## ii) 横浜新港埠頭

ブロックから試験用サンプルを切出した直後に、水洗して手早く乾燥し、上記と同じ方法で中性化試験した。

なお、フェノールフタレイン溶液は、90%エタノール溶液に濃度が1%になるよう調整して用いた。

## (7) モルタル浸漬液のpH測定

約5 mm角のモルタル塊を約5 g採取して、10倍の質量の蒸留水に浸漬して密封し、20日間室温で静置した後、ガラス電極方法でpHを測定した。

#### 4. 試験結果と考察

##### 4. 1 土壌及び地下水、海水の試験結果

###### 4. 1. 1 土壌

Dビルで採取したコンクリートコアに直接接触していた土壌の試験結果を表4.1-1～4.1-5に示した。

図2.3-1の土質柱状図からはシルトが予想されたが、粒度分布が比較的粗く、砂質であった。サンプリング現場でこの砂分の多い土壌を採取・流出した後のコア抜きした孔の先は粘土質であったから、施工時に上部の砂層から流入した砂の可能性はある。

###### 4. 1. 2 地下水及び海水

Dビルで採取した地下水及び横浜新港埠頭で採取した海水の分析結果を表4.1-6に示した。

地下水のうち、コンクリートの炭酸化の原因となるヒドロ炭酸イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ) は  $14.0 \text{ mg/l}$  程度である。その他のイオン濃度も日本の河川・湖沼水に比較すると高いが、地下水に直接接触していたコアの断面の観察などを総合すると、この程度のイオン濃度ではコンクリートは侵食されないようである。なお、湧水量は  $1.685 \text{ ml/min}$  であった。

海水のヒドロ炭酸イオンも文献値に比較すると高いが、 $1.2 \text{ mg/l}$  とその濃度の絶対値は低く、他のイオン濃度からみて一般的な海水と考えられる。

表4.1-1 接触土壌の試験結果  
Table 4.1-1 Test Results of Properties of Soil

JIS A 1202	土 粒 子 の 比 重 試 験
------------	-----------------

測 定 番 号		1	2	3
比 重 び ん の 番 号		322	323	324
〔炉乾燥土(又は湿潤土)+蒸留水+比重びん)の質量 $m_b$ g		169.572	182.914	162.581
$m_b$ をはかったときの内容物の温度 $T$ °C		20.0	20.0	20.0
比重びんに入れた 炉乾燥土質量 $m_s$ g	容 器 番 号	322	323	324
	(乾燥土+容器)の質量 g	55.050	61.517	49.136
	容 器 質 量 g	37.547	43.279	31.443
$m_s$ g		17.503	18.238	17.693
$T$ °Cにおける(蒸留水+比重びん)の 換算質量 <sup>(注1)</sup> $m_w$ g		158.423	171.295	151.337
$m_w + (m_s - m_b)$ g		6.354	6.619	6.449
$T$ °Cにおける 土粒子の比重 $G_s(T°C/T°C) = \frac{m_s}{m_w + (m_s - m_b)}$		2.755	2.755	2.744
補 正 係 数 <sup>(注2)</sup> $K$		0.9991	0.9991	0.9991
15°Cにおける土粒子の比重 $G_s(T°C/15°C) = K \cdot G_s(T°C/T°C)$		2.753	2.753	2.742
平 均 値		比 重 ( $T°C/15°C$ ) = 2.749		
$T$ °Cにおける水の比重 <sup>(注2)</sup> $G_T$		0.998234	0.998234	0.998234
4°Cにおける土粒子の比重 $G_s(T°C/4°C) = G_T \cdot G_s(T°C/T°C)$		2.750	2.750	2.739
平 均 値		比 重 ( $T°C/4°C$ ) = 2.746		

表 4.1-2 接触土壌の試験結果  
Table 4.1-2 Test Results of Properties of Soil

JIS A 1203	土の含水量試験
------------	---------

含 水 比 測 定			平均含水比
No. 259	No. 261	No. 270	w = 28.4 %
$m_s$ 193.96 $m_s$ 153.22	$m_s$ 188.40 $m_s$ 149.16	$m_s$ 177.20 $m_s$ 141.77	
$m_c$ 153.22 $m_c$ 12.52	$m_s$ 149.16 $m_c$ 12.15	$m_s$ 141.77 $m_c$ 12.84	
$m_w$ 40.74 $m_s$ 140.70	$m_w$ 39.24 $m_s$ 137.01	$m_w$ 35.43 $m_s$ 128.93	
w = 28.96 %	w = 28.64 %	w = 27.48 %	

$$\text{含水比 } w = \frac{m_s - m_b}{m_s - m_c} \times 100$$

$$= \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad \%$$

$m_s$  : (湿润土+容器)質量 g

$m_b$  : (炉乾燥土+容器)質量 g

$m_c$  : 容器の質量 g

$m_w$  : 湿润土中の水の質量 g

$m_s$  : 炉乾燥土質量 g

表4.1-3 接触土壌の試験結果  
Table 4.1-3 Test Results of Properties of Soil

	粒 径 mm	質量百分率 %
ふるい分け	50.8	
	38.1	
	25.4	
	19.1	
	9.52	100.0
	4.76	96.7
	2.00	95.2
	0.84	91.2
	0.42	65.1
	0.25	33.0
0.105	12.7	
0.074	11.0	
比重浮ひ	0.057	9.1
	0.040	8.2
	0.0255	7.2
	0.0148	6.3
	0.0105	5.3
	0.0074	4.4
	0.0037	3.4
	0.00153	2.5

4.76mm以上の粒子 %	3	5
細礫分 (4.76-2mm)%	2	
粗砂分 (2-0.42mm)%	30	84
細砂分 (0.42-0.074mm)%	54	
シルト分 (0.074-0.005mm)%	7	
粘土分 <sup>FE</sup> (0.005mm以下)%	4	
コロイド分(0.001mm以下)%	2	
2000μmふるい通過質量百分率 %	95	
420μmふるい通過質量百分率 %	65	
74μmふるい通過質量百分率 %	11	
最大粒径 mm	9.52	
60% 粒径 mm	0.39	
30% 粒径 mm	0.229	
10% 粒径 mm	0.065	
均等係数 $U_c$	6.00	
曲率係数 $U_c'$	2.07	
土粒子の比重 $G_s$	2.749	
使用した分散剤		

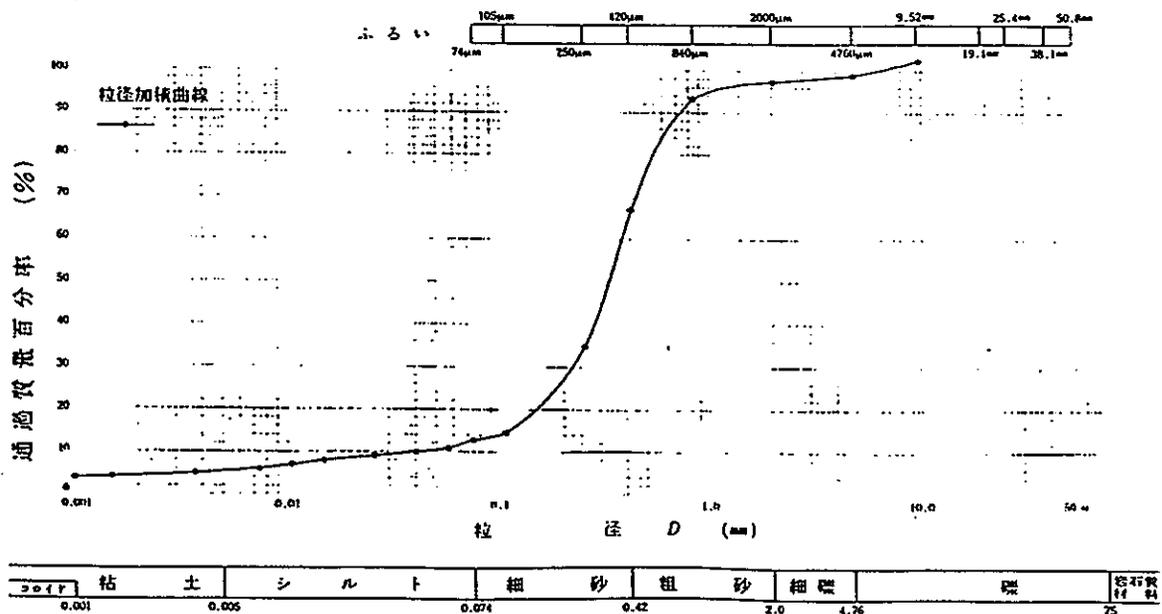


表4.1-4 接触土壌の試験結果  
Table 4.1-4 Test Results of Properties of Soil

土の密度試験(ノギス法)						
供 試 体	質 量	$m$	g	1774.00		
	高 さ	$H$	cm	12.73		
	平均高さ	$\bar{H}$	cm	12.730		
	上部直径	$D_t$	cm	10.00		
	上部平均直径	$\bar{D}_t$	cm	10.000		
	中央部直径	$D_c$	cm	10.00		
	中央部平均直径	$\bar{D}_c$	cm	10.000		
	下部直径	$D_b$	cm	10.00		
	下部平均直径	$\bar{D}_b$	cm	10.000		
	全平均直径 $\bar{D} = (\bar{D}_t + \bar{D}_c + \bar{D}_b) / 3$		cm	10.000		
	断 面 積 $A = \pi \bar{D}^2 / 4$		cm <sup>2</sup>	78.540		
	体 積 $V = A \cdot \bar{H}$		cm <sup>3</sup>	999.812		
	湿 潤 密 度 $\rho_t = m / V$		g/cm <sup>3</sup>	1.774		
	平均含水比	$w$	%	28.4		
乾 燥 密 度 $\rho_d = \rho_t / (1 + \frac{w}{100})$		g/cm <sup>3</sup>	1.382			
土粒子の比重	$G_s$		2.749			
間 隙 比 $e = (G_s \cdot \rho_w / \rho_d) - 1$			0.989			
飽 和 度 $S_r = G_s \cdot w / e$		%	78.8			
平 均 値	$\rho_t = 1.774$	g/cm <sup>3</sup>	注) 容 器 Na 含 水 比 測 定	$m_a$	g	1774.0
	$w = 28.4$	%		$m_b$	g	1382.1
	$\rho_d = 1.382$	g/cm <sup>3</sup>		$m_c$	g	
				$w$	%	28.36

注)  $w = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c} \times 100 \%$

$m_a$ : (湿潤土+容器)質量  
 $m_b$ : (乾燥土+容器)質量  
 $m_c$ : 容器質量

表4.1-5 接触土壌の試験結果  
Table 4.1-5 Test Results of Properties of Soil

土質試験結果一覧表 (基礎地盤用)

粒 度 特 性	礫分 (2000 $\mu\text{m}$ 以上) %	5
	砂分 (74~2000 $\mu\text{m}$ ) %	84
	シルト分 (5~74 $\mu\text{m}$ ) %	7
	粘土分 (5 $\mu\text{m}$ 以下) %	4
	最大粒径 mm	9.52
	均等係数 $U_c$	6.0
	曲率係数 $U_c'$	2.1
分 類	日本統一土質分類	(S-N)
土粒子の比重 $G_s$		2.749
自 然 状 態	含水比 $w_n$ %	28.4
	湿潤密度 $\rho_i$ g/cm <sup>3</sup>	1.774
	間隙比 $e$	0.989
	飽和度 $S_r$ %	78.8
孔隙率 $n$ %		49.7

表4.1-6 地下水および海水の分析結果  
Table 4.1-6 Results of Chemical Analysis of Underground Water and Sea Water

採取地点		Dビル (B3F-1)	横浜新港埠頭	海水のイオン濃度(mg)
種類		地下水	海水	-
状態		濁水	透明	
pH		7.4	7.5	
Eh(mV)		51	82	
電気伝導度(mS/cm)		0.97	44.6	
酸消費量(meq/l)		5.8	2.0	
イオン等の濃度 (mg/l)	Cl <sup>-</sup>	33.5	16,512	
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	14.0	1.2	0.14
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	175	2,275	2,650
	Ca <sup>2+</sup>	130	332	400
	Mg <sup>2+</sup>	19.3	1,007	1,270
	Na <sup>+</sup>	47.2	8,744	10,560
	K <sup>+</sup>	28.8	344	380
	Al <sup>3+</sup>	0.3	0.3	(2)
	SiO <sub>2</sub>	29.9	7.1	(0.5-10)

注) 1 海水のイオン濃度は、福岡正巳，“地下水ハンドブック”，(株)建設産業調査会，p. 131 (1979)より引用した。  
( ) 付のAl<sup>3+</sup>およびSiO<sub>2</sub>は、The Geochemistry of Natural Water 2nd Edition より引用した数値である。  
2 国立天文台編，“理科年表”，No. 64，p. 672 (1991) による日本の河川・湖沼水の水質は、次のとおりである。

日本の河川・湖沼水の化学成分 (mg/l)  
(主として小林純氏の測定値により換算)

河川・湖沼名	観測点	pH	蒸発残留物	浮遊物	アルカリ度 CaCO <sub>3</sub>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SiO <sub>2</sub>	Fe	P	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>-</sup> -N	蛋白-N
利根川	茨城・取手町 <sup>1)</sup>	7.1	97.9	18.5	29.6	5.6	1.5	13.3	3.3	5.3	20.2	23.0	0.14	0.04	0.28	0.03	0.07
石狩川	北海道・美瑛市	6.5	96.0	167.4	22.6	7.6	1.5	9.4	2.5	5.0	15.5	20.6	0.70	0.01	0.48	0.12	0.02
信濃川	新潟・長岡市	6.4	111	24	18.9	1.4	0.7	10.2	2.1	4.4	18.7	9.3	0.09	0.002	0.25	0.12	-
米代川	秋田・鷹巣町	6.5	103.2	11.6	11.4	8.4	0.9	8.3	2.8	9.1	26.0	23.0	0.18	0.004	0.16	0.03	0.07
那珂川	栃木・黒磯町 <sup>2)</sup>	7.0	128.7	4.0	16.9	6.7	1.3	15.8	4.3	8.2	44.9	35.4	0.04	0.004	0.07	0.08	0.04
筑後川	福岡・三井郡大塚村 <sup>3)</sup>	7.3	90.4	15.5	21.4	7.8	2.5	9.2	2.3	4.4	7.9	43.4	0.14	0.02	0.17	0.04	-
由良川	京都・福知山市	7.1	48.0	25.5	20.3	4.9	0.7	6.4	1.8	5.7	4.8	12.6	0.02	0.004	0.25	0.04	0.05
紀ノ川	和歌山・小田井	7.1	65.0	10.4	37.3	5.2	0.9	12.9	1.3	4.4	6.6	14.4	0.03	0	0.09	0.05	0.06
吉井川	岡山・西大寺市 <sup>4)</sup>	6.9	53.0	10.4	23.4	5.7	1.0	7.4	1.9	6.2	11.9	15.1	0.13	0	0.11	0.03	0.13
須川	群馬・長野原町	2.5	591.8	51.5	0	13.4	6.3	33.6	2.5	134.8	280.0	61.5	4.71	0.60	0.33	0.18	0.04
琵琶湖	滋賀・湖心	7.4	47.6	22.0	25.2	5.1	0.8	8.5	2.7	3.8	3.3	1.6	0.01	0.01	0.20	0.02	-
霞ヶ浦	茨城・水戸市上水郷 <sup>5)</sup>	7.1	143.7	16.6	43.4	16.7	3.7	16.6	5.9	20.1	36.7	13.8	0.37	0.05	0.48	0.13	0.11
山中湖	山梨	7.3	51.2	6.9	38.6	3.3	1.2	8.3	3.4	0.8	1.6	9.3	0.05	0.001	0.02	0.02	-

\* 酸性河川。1) 現・取手市 2) 現・黒磯市 3) 現・三井郡大冢町 4) 現・岡山市 5) 現・土浦市

## 4. 2 構造物内部のコンクリートの試験

### 4. 2. 1 モルタル部分と粗骨材の構成比

実際の断面について5 mm以上の粗骨材の面積から算出したモルタル部分と粗骨材の構成比は、面積比でDビルは62.6 : 27.4%、横浜新港埠頭は74.8 : 25.2%であって予想された立体的な体積比約40%に比較して小さい。

### 4. 2. 2 コンクリートの含水量

Dビルは8.7%、横浜新港埠頭は6.3%であった。横浜新港埠頭は海水中にあったので、本来は含水量はもっと多いはずであるが、海中より引上げられたブロックから切出される前に、ほとんど乾燥したようである。今後は海中より引上げられた直後に含水量を測定する必要がある。

### 4. 2. 3 コンクリートの物性試験

#### (1) 圧縮強度試験、静弾性係数

圧縮強度試験結果を表4.2-1に、静弾性係数測定結果を図4.2-1と図4.2-2に示す。

Dビルは168kg f / cm<sup>2</sup>と強度が低い。

表4.2-1 圧縮強度試験結果  
Table 4.2-1 Compressive Strength of Specimen

試料	平均直径 (cm)	平均高さ (cm)	断面積 (cm <sup>2</sup> )	体積 (cm <sup>3</sup> )	質量 (g)	比重	最大荷重 (ton f)	補正係数	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
Dビル	7.41	14.89	43.12	642.1	1,497	2.33	7.25	1.00	168
横浜新港埠頭	10.01	9.76	78.70	768.1	1,813	2.36	24.75	0.888	279

注) Dビル外壁コンクリートの設計基準強度は150kg f / cm<sup>2</sup>であった。

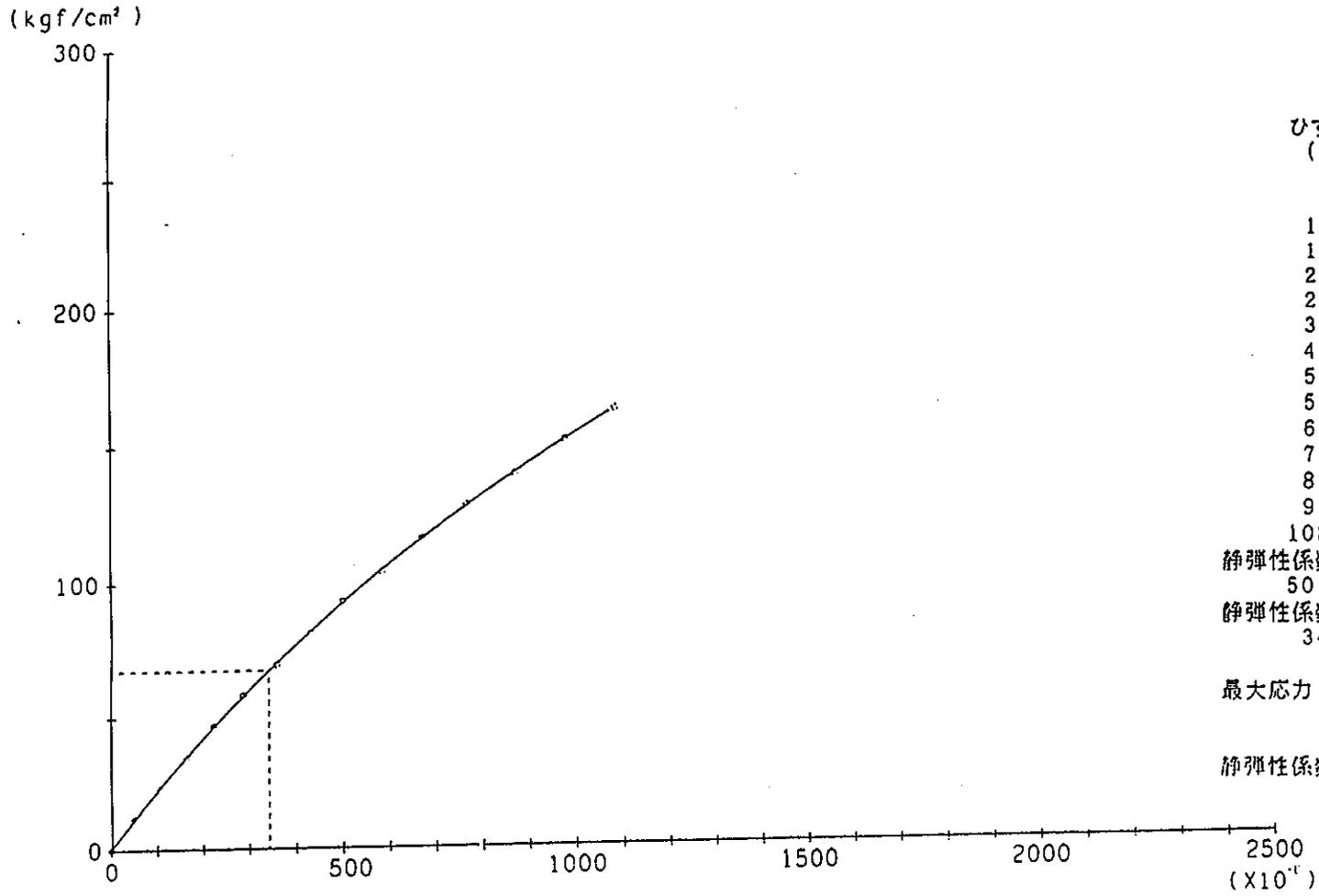


図4.2-1 Dビル供試体の応力ひずみ曲線  
 Fig 4.2-1 Stress-Strain Curve of D Building Specimen

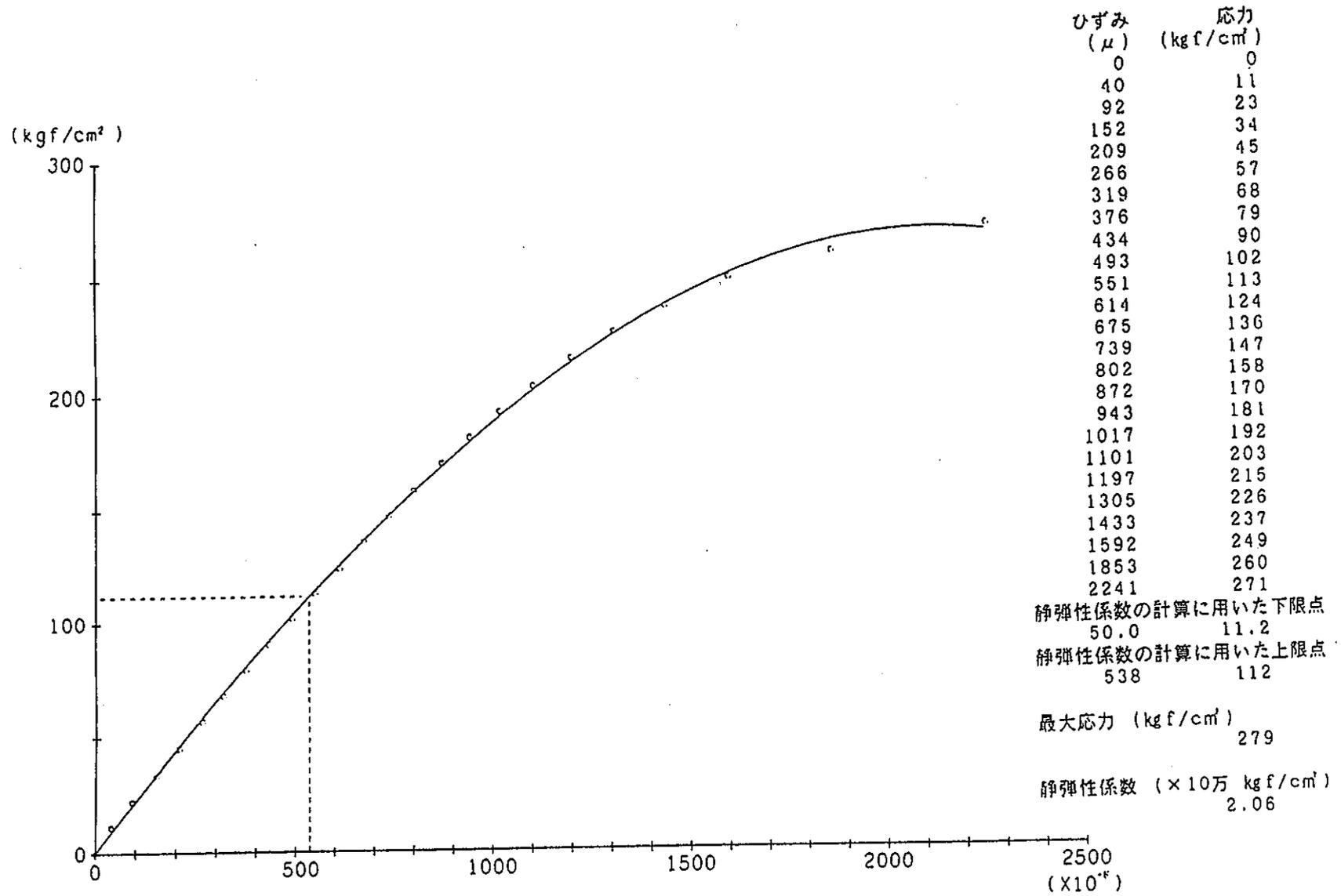


図4.2-2 横浜新港埠頭供試体の応力ひずみ曲線  
 Fig 4.2-2 Stress-Strain Curve of Yokohama New Port's Wharf Specimen

静弾性係数と圧縮強度及び比重の関係は、日本建築学会RC基準によると次の式で表すことができる。

$$E_c = 21 \times 10^5 \left( \gamma / 2.3 \right)^{1.5} \times \left( F_c / 200 \right)^{0.5}$$

ここに、 $E_c$  : 静弾性係数 (kg f / cm<sup>2</sup>)

$\gamma$  : 比重

$F_c$  : 圧縮強度 (kg f / cm<sup>2</sup>)

本式と表4.2-1に示す圧縮強度及び比重から静弾性係数を求めると、Dビルの $1.96 \times 10^5$  kg f / cm<sup>2</sup>とほぼ一致し、横浜新港埠頭は $2.58 \times 10^5$  kg f / cm<sup>2</sup>と実測値と比較してやや大きい。

## (2) 透水試験結果

透水試験結果を表4.2-2と表4.2-3に示す。

Dビル及び横浜新港埠頭供試体ともにその透水係数は、通常のコンクリートの透水係数 $10^{-9} \sim 10^{-10}$  cm/sec に比較して大きい。また、横浜新港埠頭のコンクリートブロックは供試体(C-1, C-2)によって3倍程度も透水係数が異なっている。

表4.2-2 Dビルから採取した供試体の透水試験結果  
Table 4.2-2 Result of Permiability Test (D Building)

経過時間 (h)	Dビル (B3F-1)		
	累積 水量 (cm <sup>3</sup> )	経過 流量 (cm <sup>3</sup> /h)	透水量 (cm <sup>3</sup> /sec)
1	41	41	0.0114
2	64	23	0.0064
3	98	34	0.0094
4	131	33	0.0092
5	165	34	0.0094
6	200	35	0.0097
透水量(cm <sup>3</sup> /sec)			0.0092
供試体の厚さ(cm)			11.4
載荷圧力(kg/cm <sup>2</sup> )			5
透過面積(cm <sup>2</sup> )			176.71
透水係数(cm/sec)			$1.19 \times 10^{-7}$
最初に透水を認めた時間 (h)			約 1

表 4.2-3 横浜新港埠頭から採取した供試体の透水試験結果  
 Table 4.2-3 Results of Permiability Test (Yokohama New Port's Wharf)

経過時間 (h)	横 浜 新 港 埠 頭					
	(C-1)			(C-2)		
	累積 水量 ( $\text{cm}^3$ )	経過 流量 ( $\text{cm}^3/\text{h}$ )	透水量 ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )	累積 水量 ( $\text{cm}^3$ )	経過 流量 ( $\text{cm}^3/\text{h}$ )	透水量 ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )
1	20	20	0.0056	0	0	0
2	36	16	0.0044	8	8	0.0022
3	56	20	0.0056	16	8	0.0022
4	86	30	0.0083	24	8	0.0022
5	100	14	0.0039	30	6	0.0017
6	115	15	0.0042	37	7	0.0009
透水量( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )			0.0053	同左		0.0020
供試体の厚さ(cm)			9.9			9.4
載荷圧力( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )			5			5
透過面積( $\text{cm}^2$ )			78.54			78.54
透水係数( $\text{cm}/\text{sec}$ )			$1.34 \times 10^{-7}$			$4.80 \times 10^{-8}$
最初に透水を認めた時間 (h)			約 1			約 48

## 4. 3 構造物表面部の試験

## 4. 3. 1 CaO/insol.比

供試体からのカルシウムイオン流出の程度を調べるために定量したCaO/insol.比を表4.3-1に示す。

Dビル及び横浜新港埠頭とも、地下水、または海水に直接接触していた面のD-1及びY-1のCaO/insol.比が低く若干のカルシウム成分の溶出があったと考えられる。接触面からの深さ方向の内部のCaO/insol.比には採取位置による特定の傾向がない。

表4.3-1 CaO/insol.測定結果  
Table 4.3-1 Results of Ratio CaO vs insol.

試料名	成分	CaO (%)	insol. (%)	CaO/insol. 比
Dビル	D-1	13.4	63.4	0.211
	D-2	14.8	60.5	0.245
	D-3	14.6	62.2	0.235
横浜新港埠頭	Y-1	14.8	60.3	0.245
	Y-2	17.9	54.9	0.326
	Y-3	17.1	56.8	0.301
	Y-4	17.3	56.3	0.307
	Y-5	17.8	56.4	0.316
	Y-6	16.8	58.0	0.290
	Y-7	16.4	59.3	0.277

## 4. 3. 2 水和生成物の変質

重液 ( $d=2.36$ ) 分離による浮遊物と沈降物の質量割合、熱分析 (DTA-TG, DSC)、化学分析結果を表4.3-2と表4.3-3に粉末X線回折方法による水和生成物の同定結果を表4.3-4に、これらの結果から算出した水和物の生成割合を表4.3-5に示す。

図4.3-1は、各生成鉱物の割合を接触面からの平均距離に対応して示したものである。

重液分離による浮遊物と沈降物の合計収量は79.3~88.3%であって、プロモホルム-エタノール混液に約12~20%の水和生成物、あるいは骨材などが溶出するようである。Dビル及び横浜新港埠頭とも、接触面から内部に至るまで一旦生成した水酸化カルシウム ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) が消失している。

Dビルでは地下水に直接接触していた表面のD-1試料、横浜新港埠頭では海水に直接接触していた表面Y-1試料と次のY-2試料が炭酸化して若干の炭酸化カルシウム ( $\text{CaCO}_3$ ) が生成している。

表4.3-2 Dビルから採取した試料の重液分離及び熱分析、化学分析の結果  
 Table 4.3-2 Results of Heavy Solution Fraction, Thermal and Chemical Analysis  
 (D Building)

試料名	分離割合 (%)	DTA-TG・DSC による熱分析 (%)					化学分析 (%)			
		Ca(OH) <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	F-Salt	H <sub>2</sub> O	AH	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
D-1 <sub>f</sub>	66.3	0	3.6	0	14.6	6.7	34.1	31.83	6.54	2.24
D-1 <sub>s</sub>	18.0	0	18.3	0	2.7	-	-			
-	(84.3)	-								
D-2 <sub>f</sub>	75.9	0	0.9	0	14.6	1.4	37.4	30.63	6.46	2.07
D-2 <sub>s</sub>	9.1	0	0	0	4.1	-	-			
-	(85.0)	-								
D-3 <sub>f</sub>	75.9	0	0.4	0	14.9	5.1	37.5	30.48	6.37	2.13
D-3 <sub>s</sub>	11.0	0	0	0	2.8	-	-			
-	(86.9)	-								

- 注) 1 f:浮遊物、s:沈降物  
 2 重液の比重:2.36  
 3 浮遊物(f)と沈降物(s)との分離割合(%)で表し、( )内にその合計質量を示した。  
 4 フリーデル氏塩(F-Salt): $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10-12H_2O$ で代表される固溶体相  
 5 アルミナゲル(AH): $Al_2O_3 \cdot nH_2O$   
 6 参考までに、浮遊物(f)を硝酸で溶解し、塩化物イオン電極を用いた電位差測定装置により、滴定した塩素(Cl)の定量値(単位:%)は、次のとおりである。

D-1	D-2	D-3
0.219	0.202	0.123

表 4.3-3 横浜新港埠頭から採取した試料の重液分離及び熱分析, 化学分析の結果  
 Table 4.3-3 Results of Heavy Solution Fraction, Thermal and Chemical Analysis  
 (Yokohama New Port's Wharf)

試料名	分離割合 (%)	DTA-TG・DSC による熱分析 (%)					化学分析 (%)			
		Ca(OH) <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	F-Salt	H <sub>2</sub> O	AH	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Y-1 <sub>r</sub>	70.2	0	2.4	20.9	13.5	0	36.4	24.35	6.33	1.76
Y-1 <sub>s</sub>	15.0	0	5.1	0	3.8	-	-			
-	(85.2)	-								
Y-2 <sub>r</sub>	79.3	0	2.0	22.0	14.5	0	38.7	24.24	6.35	1.59
Y-2 <sub>s</sub>	7.1	0	0	0	3.3	-	-			
-	(86.3)	-								
Y-3 <sub>r</sub>	75.9	0	0.4	17.7	13.6	0.3	39.6	25.07	6.73	1.63
Y-3 <sub>s</sub>	12.4	0	0	0	2.8	-	-			
-	(88.3)	-								
Y-4 <sub>r</sub>	71.9	0	0.4	21.2	16.5	1.1	39.9	25.23	6.67	1.63
Y-4 <sub>s</sub>	10.8	0	0	0	3.6	-	-			
-	(82.7)	-								
Y-5 <sub>r</sub>	72.0	0	0.3	23.2	16.7	1.0	39.9	25.71	6.51	1.78
Y-5 <sub>s</sub>	6.2	0	0	0	3.2	-	-			
-	(78.2)	-								
Y-6 <sub>r</sub>	77.3	0	0.8	24.0	14.8	0.9	39.2	24.66	6.46	1.61
Y-6 <sub>s</sub>	9.0	0	0	0	3.3	-	-			
-	(86.3)	-								
Y-7 <sub>r</sub>	69.3	0	0.3	18.3	15.1	0.4	38.8	24.99	6.56	1.65
Y-7 <sub>s</sub>	10.3	0	0	0	3.1	-	-			
-	(79.3)	-								

注) 参考までに、浮遊物 (f) を硝酸で溶解し、塩化物イオン電極を用いた電位差測定装置により、滴定した塩素 (Cl) の定量値 (単位: %) は、次のとおりである。

Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Y-5	Y-6	Y-7
3.423	3.202	2.518	2.153	1.942	1.718	1.382

表4.3-4 重液分離した試料の粉末X線回析方法による同定結果  
 Table 4.3-4 Identical Results of X-ray Diffraction of Samples

試料名	Ca(OH) <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Aft	AFm	フリーデル氏塩	C-S-H	SiO <sub>2</sub>	その他の骨材
D-1 <sub>r</sub>		○				○	○	
D-1 <sub>s</sub>		○					○	○
D-2 <sub>r</sub>		○				○	○	
D-2 <sub>s</sub>							○	○
D-3 <sub>r</sub>		○				○	○	
D-3 <sub>s</sub>							○	○
Y-1 <sub>r</sub>		○			○	○	○	
Y-1 <sub>s</sub>		○					○	○
Y-2 <sub>r</sub>		○			○	○	○	
Y-2 <sub>s</sub>							○	○
Y-3 <sub>r</sub>					○	○	○	
Y-3 <sub>s</sub>							○	○
Y-4 <sub>r</sub>					○	○	○	
Y-4 <sub>s</sub>							○	○
Y-5 <sub>r</sub>					○	○	○	
Y-5 <sub>s</sub>							○	○
Y-6 <sub>r</sub>					○	○	○	
Y-6 <sub>s</sub>							○	○
Y-7 <sub>r</sub>					○	○	○	
Y-7 <sub>s</sub>							○	○

- 注) 1 Ca(OH)<sub>2</sub>: ボルトラングナイト  
 2 CaCO<sub>3</sub>: カルサイト  
 3 C-S-H:  $m\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$   
 4 Aft:  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ で代表される固溶体相  
 5 AFm:  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ で代表される固溶体相  
 6 フリーデル氏塩 (F-Salt):  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10-12\text{H}_2\text{O}$ で代表される固溶体相  
 7 SiO<sub>2</sub>: 石英  
 8 その他の骨材長石、角閃石、白雲母及び緑泥石など

表 4.3-5 水和生成物の測定結果  
Table 4.3-5 Results of Measurement of Cement Hydrates  
Dビル (D Building)

試料名	生成物 (%) : 質量合計を 100%とした場合								C-S-H中の CaO/SiO <sub>2</sub> モル比
	Ca(OH) <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	AFt	AFm	F-Salt	AH	C-S-H	H <sub>2</sub> O	
D-1	0	8.7	0.1	5.4	0	6.9	73.9	5.1	1.0
D-2	0	0.9	0.1	25.8	0	1.5	61.8	9.9	0.9
D-3	0	0.4	0.2	10.4	0	5.4	77.6	6.0	1.2

横浜新港埠頭 (Yokohama New Port's Wharf)

試料名	生成物 (%) : 質量合計を 100%とした場合								C-S-H中の CaO/SiO <sub>2</sub> モル比
	Ca(OH) <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	AFt	AFm	F-Salt	AH	C-S-H	H <sub>2</sub> O	
Y-1	0	3.9	0	0.4	23.1	0	64.1	8.5	1.2
Y-2	0	2.1	0	0.7	23.8	0	65.3	8.1	1.3
Y-3	0	0.4	0	3.9	19.0	0.4	67.7	8.6	1.4
Y-4	0	0.4	0	0	21.9	1.2	68.5	8.0	1.3
Y-5	0	0.3	0	0	23.7	1.0	66.7	8.2	1.3
Y-6	0	0.8	0	0	25.4	0.9	64.0	8.8	1.3
Y-7	0	0.4	0	19.5	19.5	0.4	65.7	8.7	1.2

注) 化学式は、次のように略記した。

C : CaO , S : SiO<sub>2</sub> , A : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> , H : H<sub>2</sub>O  
 C-S-H : mCaO · SiO<sub>2</sub> · nH<sub>2</sub>O , AH (アルミナゲル) : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · nH<sub>2</sub>O  
 また、カルシウムアルミネート複塩は、次のように示した。  
 AFt : 3CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 3CaSO<sub>4</sub> · 32H<sub>2</sub>Oで代表される固溶体相  
 AFm : 3CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · CaSO<sub>4</sub> · 12H<sub>2</sub>Oで代表される固溶体相  
 フリーデル氏塩 (F-Salt) : 3CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 10-12H<sub>2</sub>Oで代表される固溶体相

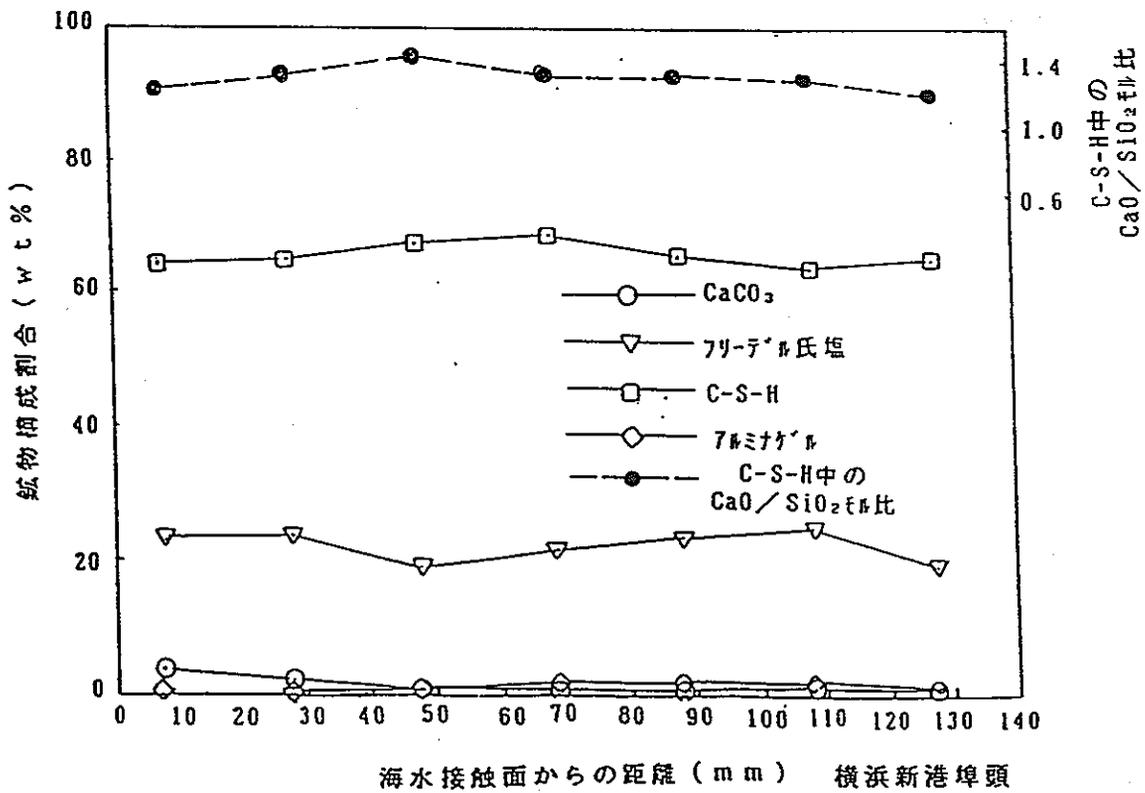
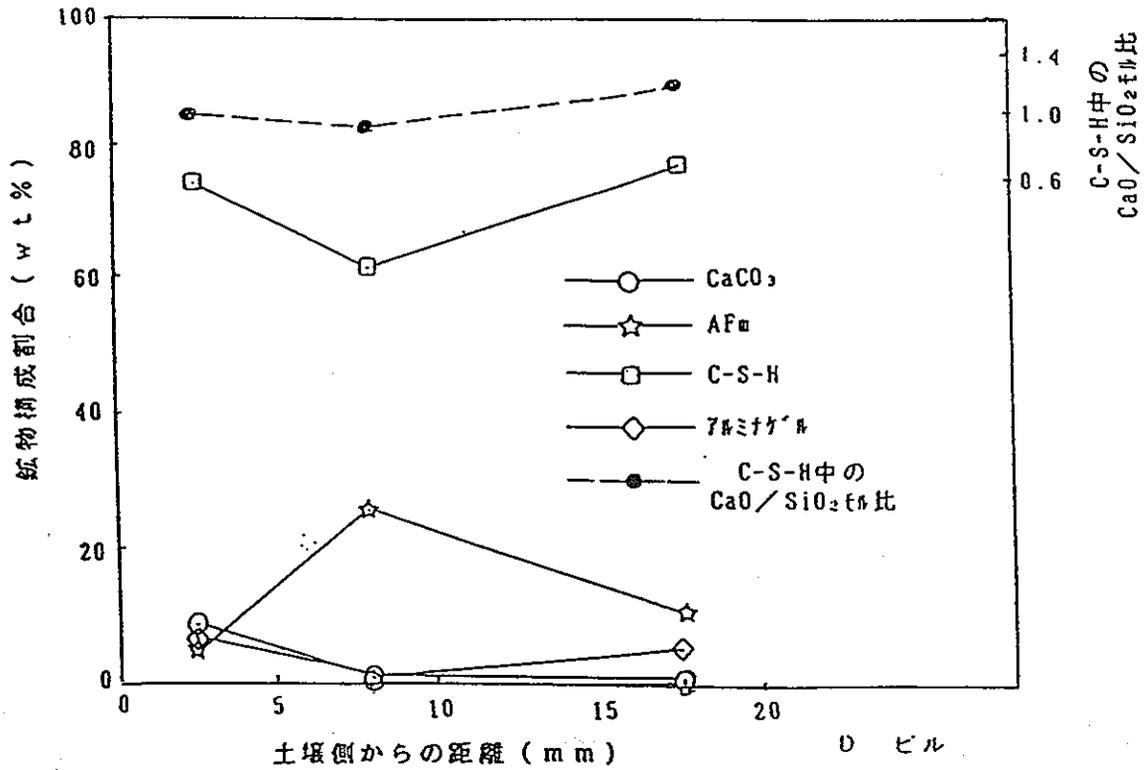


図4.3-1 水和生成物の分布  
Fig 4.3-1 Distribution of Hydrate in Samples

Dビルの試料ではモノサルフェート (AFm) が5.4 ~25.8%生成しているように計算されたが、粉末X線回折ではモノサルフェートもトリサルフェート (AFt) とも同定されなかった。

横浜新港埠頭試料ではフリーデル氏塩 (F-Salt) が同定・定量された。Y-1~Y-7 試料全体が海中にあったためか、直接海水に接触していた面のY-1から内部のY-2~Y-7に向けて同様にフリーデル氏塩が生成しており、その生成量には採取位置による特定の傾向はない。

表4.3-3の注) のとおり参考までに定量したC1は直接海水に接触していた面から内部に向かって漸減している傾向にあるが、フリーデル氏塩の定量値との対応はなく、Y-4~Y-7のC1定量値はフリーデル氏塩のC1量に対して不足である。

アルミナゲル (AH) は、モノサルフェートやフリーデル氏塩などのアルミネート複塩が炭酸化して炭酸カルシウムとアルミナゲルとに分解して生成したものと考えられるが、炭酸カルシウム-カルシウムアルミネート複塩-アルミナゲルの三者間には定常的な関係は認められない。

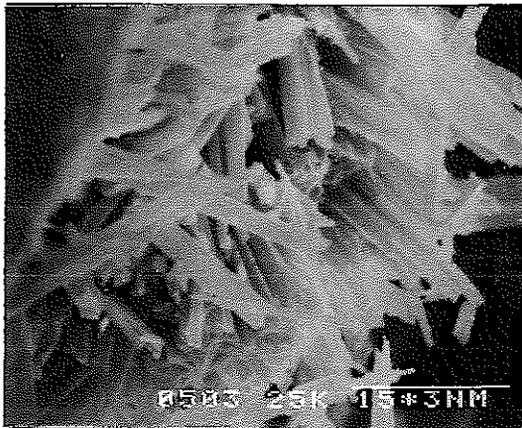
C-S-Hゲル及びそのCaO/SiO<sub>2</sub>モル比は、Dビル試料では61.8~77.6%及び0.9 ~ 1.2, 横浜新港埠頭試料では64.0~68.5%及び1.2~1.4 であってC-S-Hゲルの残存量やそのCaO/SiO<sub>2</sub>モル比からは両試料ともほとんど劣化していない良質のコンクリートと言える。また、土壌、または海水との直接接触面から内部へ向けてのC-S-Hゲル及びそのCaO/SiO<sub>2</sub>モル比には特定の傾向はない。

## 4. 3. 3 硬化体の組織の観察及び元素分析の結果

硬化体の走査型電子顕微鏡による微細組織の観察の結果、すべての硬化体にC-S-Hゲルを、Y-2及びY-5にフリーデル氏塩を認めた。また、僅かであるがD-1及びY-7にエトリンガイトを、Y-4及びY-7に水酸化カルシウムを認めた。

フリーデル氏塩の代表的なSEM像とそのEPMAの1例を示す。

## フリーデル氏塩



← 15 μm →

写真4.3-1 Y-5試料のSEM像 (80~95mm)  
Photo 4.3-1 SEM Picture of Y-1 Sample (80~95mm)

表4.3-6 棒状生成物のEPMA (Y-5試料)  
Table 4.3-6 Electron Probe Micro Analysis of Bar-Like Hydrate (Y-5 Sample)

元 素	Na	Mg	Al	Si	Cl
分 析 値 (%)	4.04	1.20	11.68	2.67	23.95
フリーデル氏塩 (%)	—	—	18.92	—	24.86
元 素	K	Ca	Ti	Fe	Total
分 析 値 (%)	0.90	53.70	0.07	1.79	100.00
フリーデル氏塩 (%)	—	56.22	—	—	100.00

## 4. 3. 4 空隙率及び細孔分布の測定結果

吸水による総空隙量及び株式会社島津製作所製ポアサイザー（水銀圧入ポロシメータ）を用いた総細孔量の測定結果を、表4.3-7に示す。

表4.3-7 各試料の総空隙量と総細孔量  
Table 4.3-7 Total Air Void Volume and Total Pore Volume

項目 試料名		総空隙量 (ml/g)	総細孔量 (ml/g)
D ビ ル	D-1	0.172	0.103
	D-2	0.200	0.098
	D-3	0.169	0.071
横 浜 新 港 埠 頭	Y-1	0.153	0.063
	Y-2	0.154	0.072
	Y-3	0.154	0.075
	Y-4	0.161	0.065
	Y-5	0.158	0.070
	Y-6	0.157	0.072
	Y-7	0.143	0.072

図4.3-2は、細孔直径の累加細孔量曲線および図4.3-3～4.3-12は、細孔直径の分布をそれぞれの供試体について図示したものである。

Dビルの総細孔量は土壌との直接接触面から内部に向かって減少しているデータであるが、総空隙量も勘案すると一概にその傾向があるとは言いきれない。

横浜新港埠頭については海水との直接接触面から内部に向けての総空隙量及び細孔量とも特定の傾向はない。

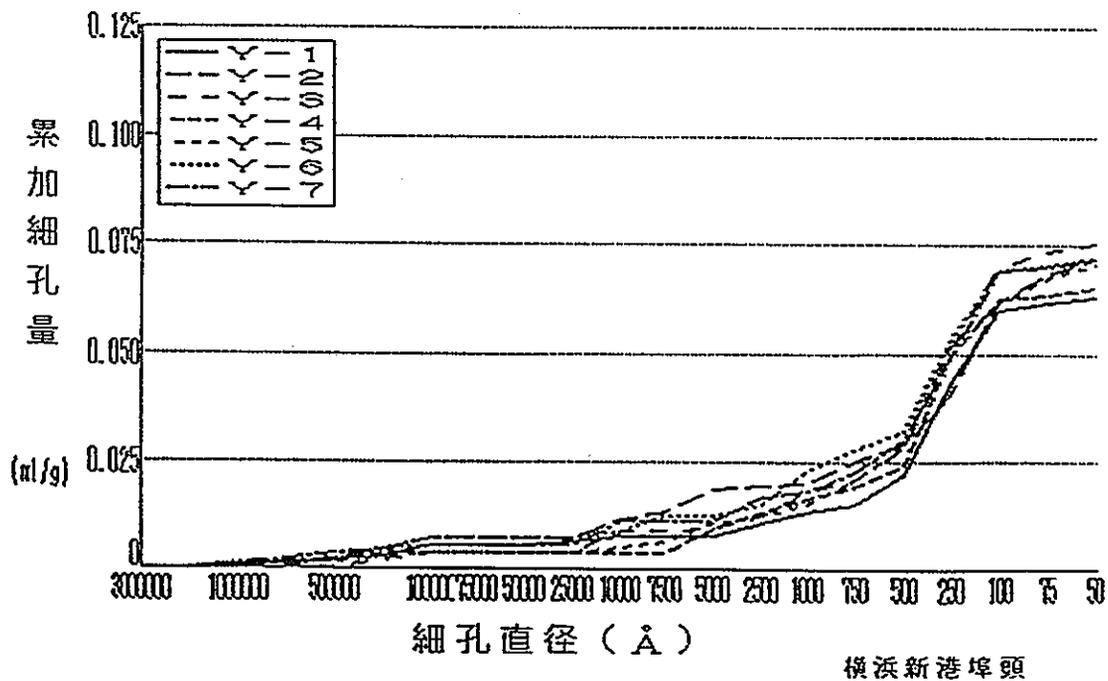
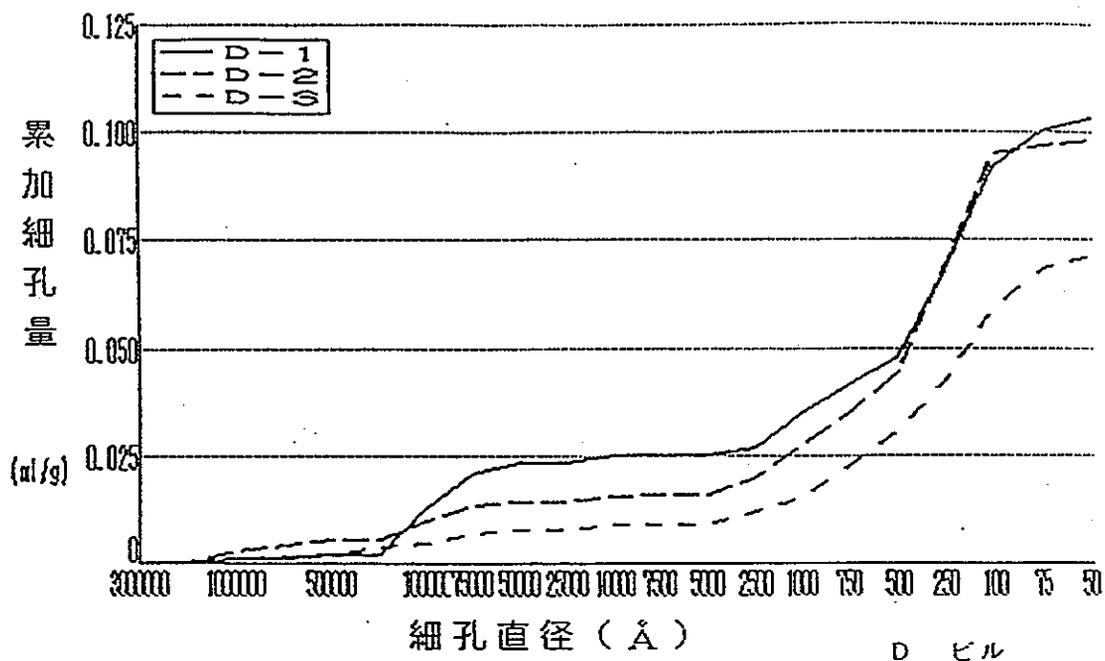


図4.3-2 細孔直径累加曲線  
 Fig 4.3-2 Accumulated Pore Size Distribution Curves

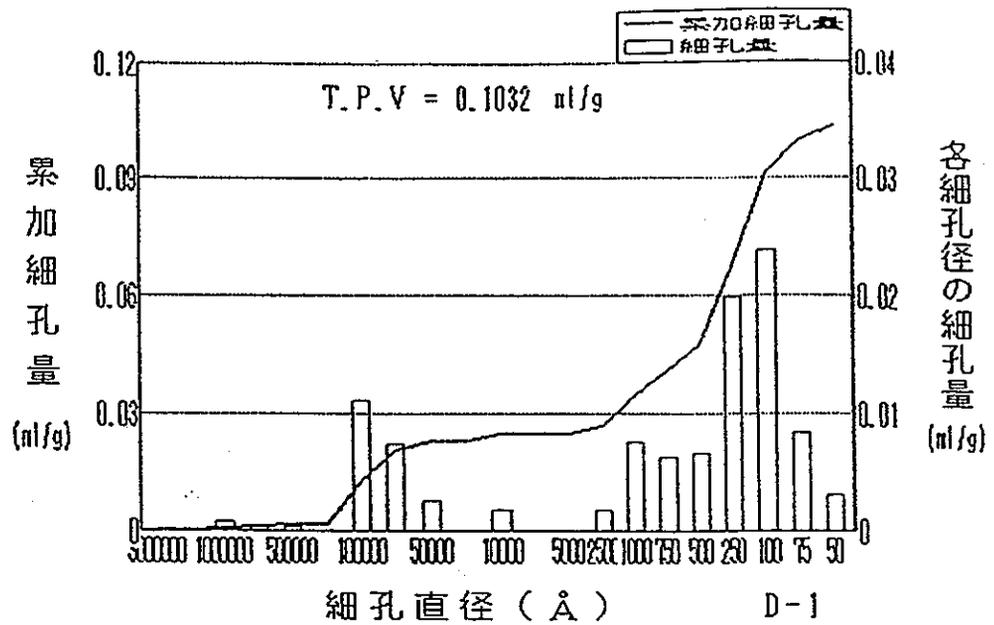


図4.3-3 D-1試料の細孔径分布図  
Fig 4.3-3 Pore Size Distribution of D-1 Sample

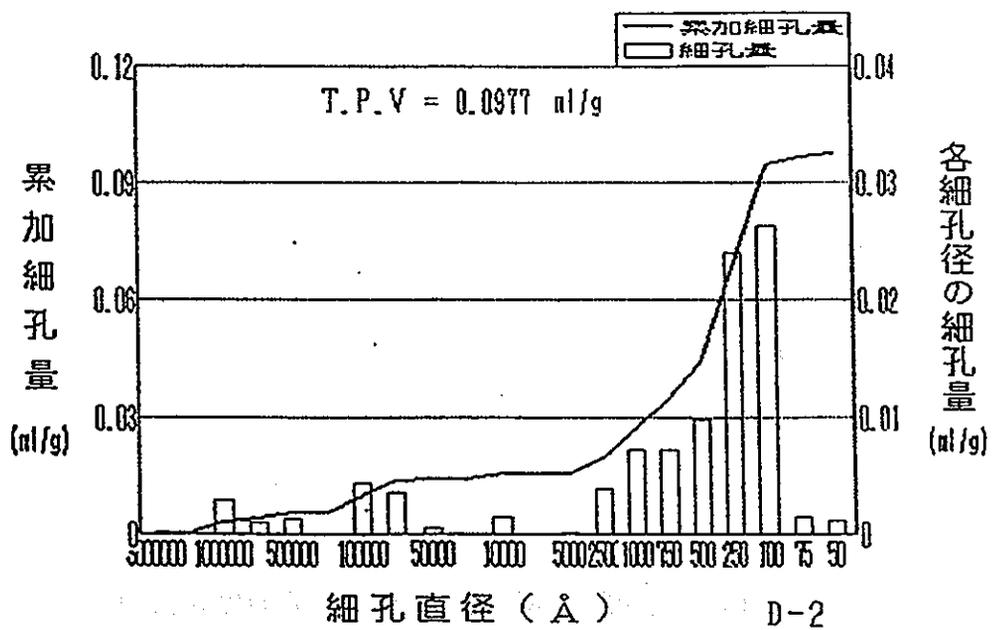


図4.3-4 D-2試料の細孔径分布図  
Fig 4.3-4 Pore Size Distribution of D-2 Sample

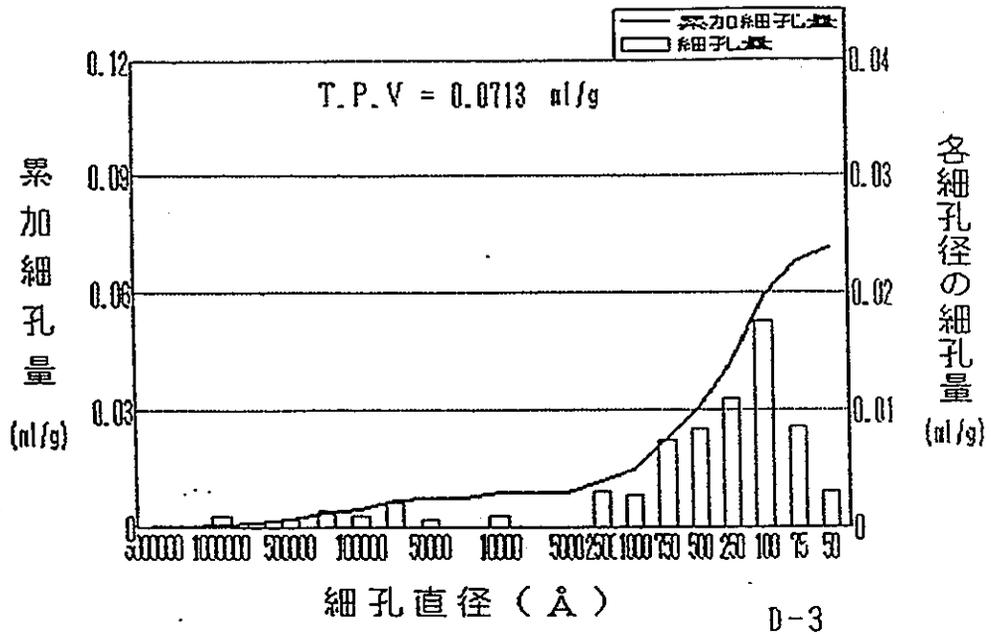


図4.3-5 D-3試料の細孔径分布図  
Fig 4.3-5 Pore Size Distribution of D-3 Sample

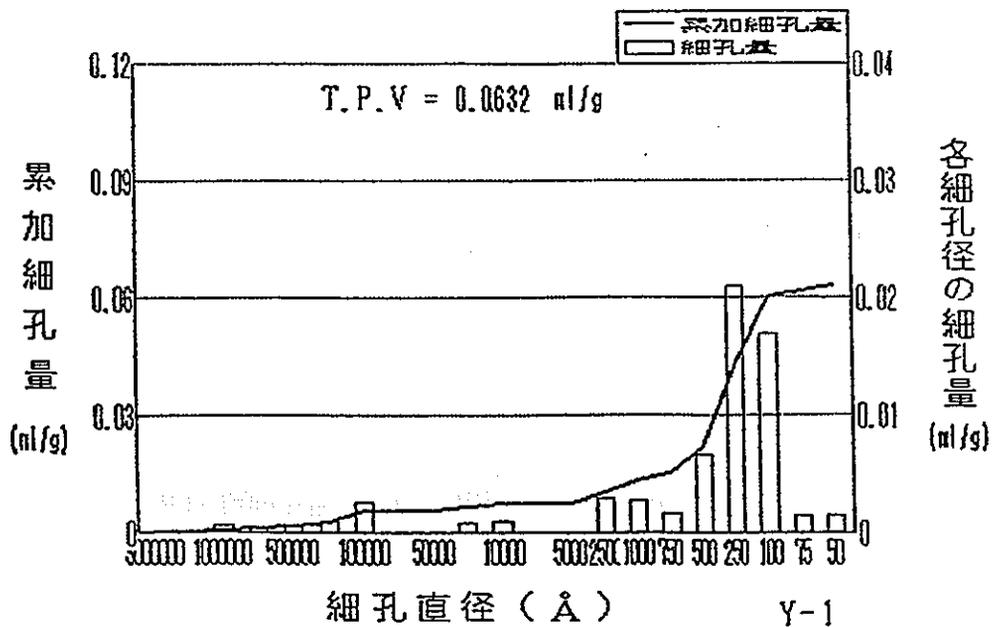


図4.3-6 Y-1試料の細孔径分布図  
Fig 4.3-6 Pore Size Distribution of Y-1 Sample

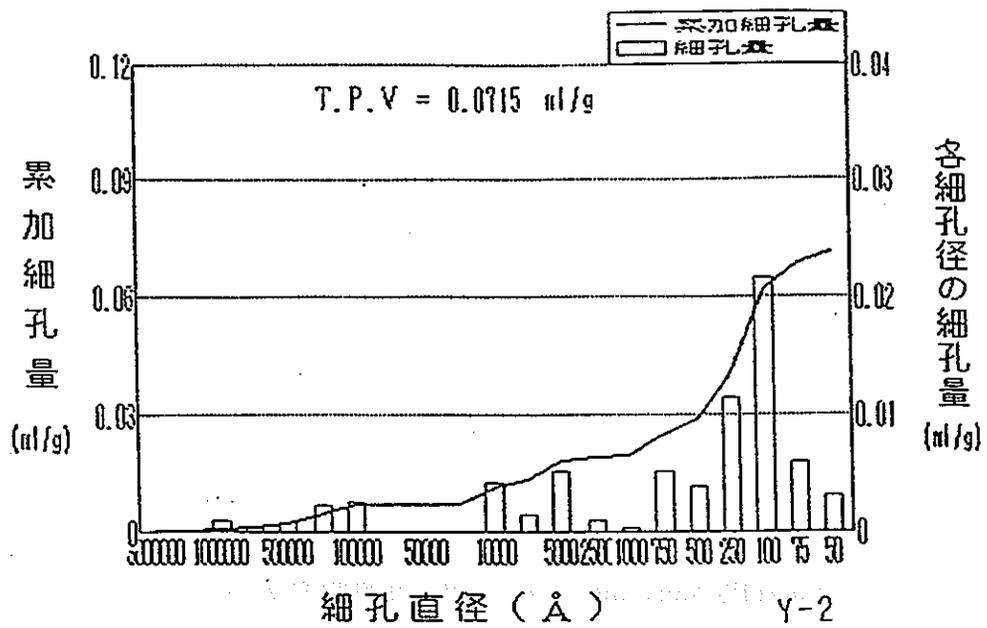


図4.3-7 Y-2試料の細孔径分布図  
Fig 4.3-7 Pore Size Distribution of Y-2 Sample

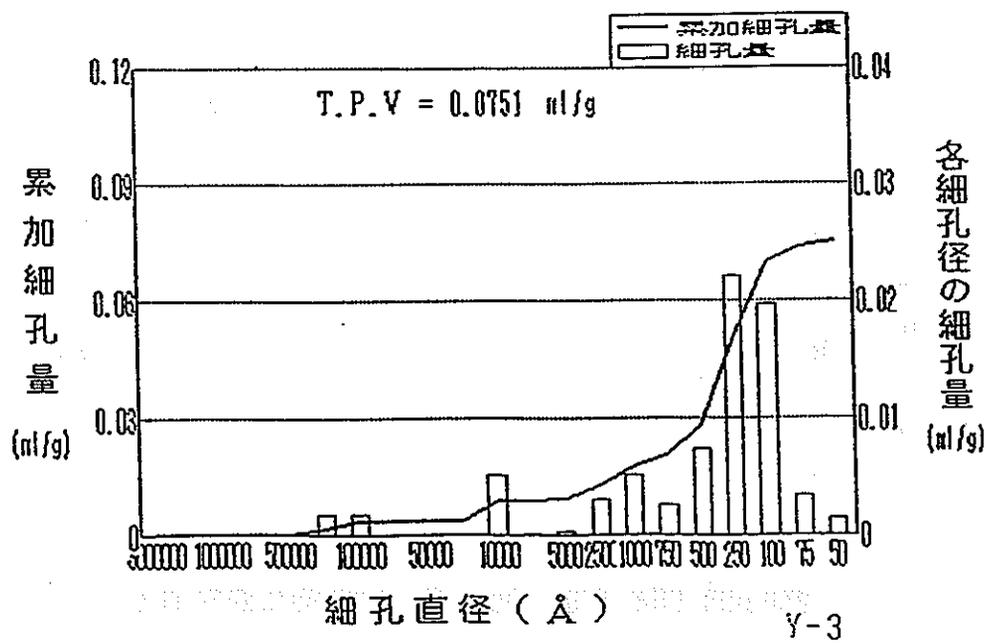


図4.3-8 Y-3試料の細孔径分布図  
Fig 4.3-8 Pore Size Distribution of Y-3 Sample

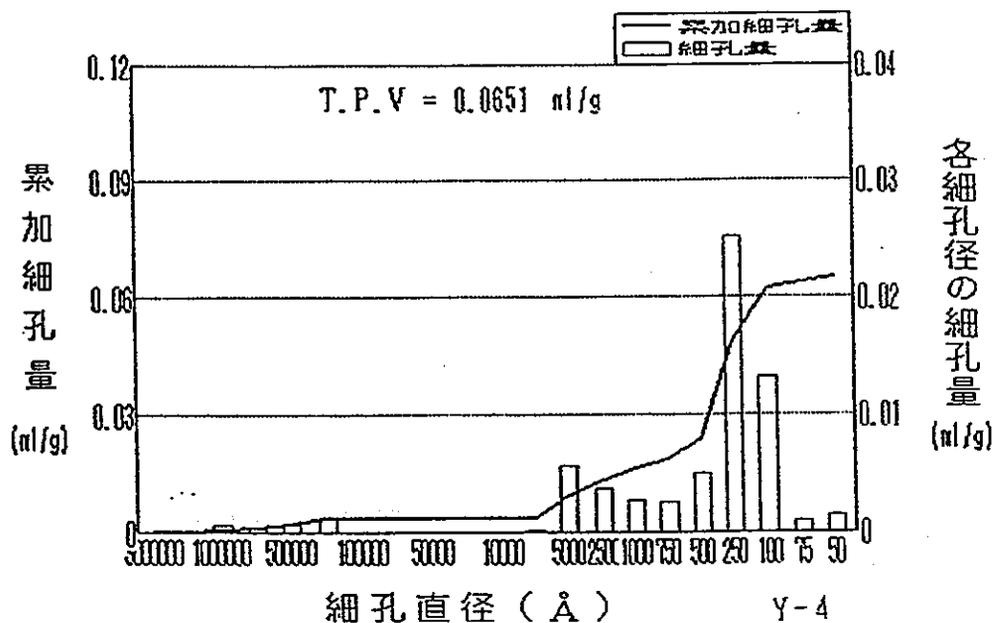


図4.3-9 Y-4 試料の細孔径分布図  
Fig 4.3-9 Pore Size Distribution of Y-4 Sample

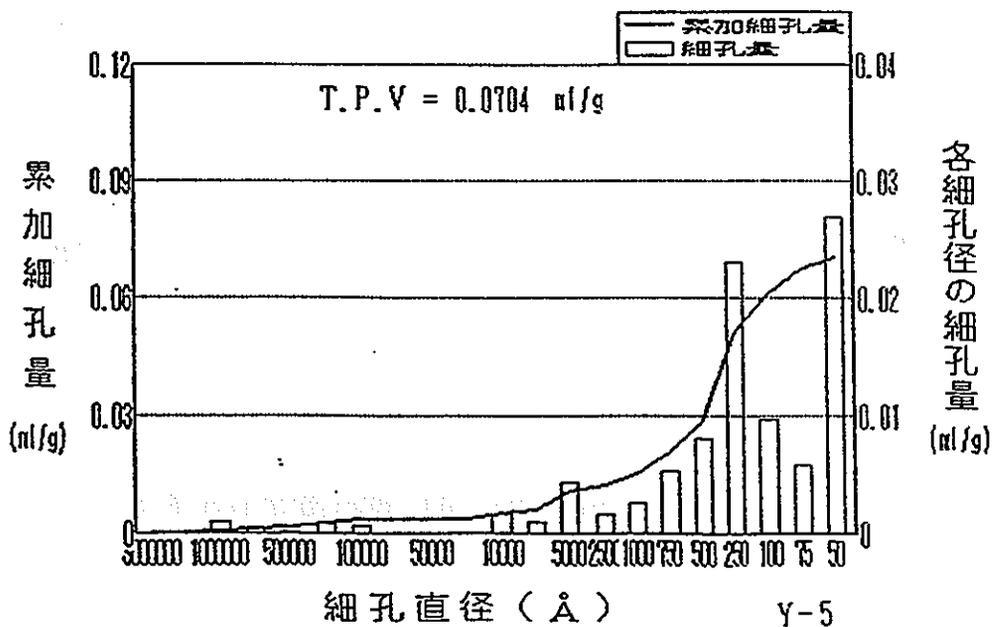


図4.3-10 Y-5 試料の細孔径分布図  
Fig 4.3-10 Pore Size Distribution of Y-5 Sample

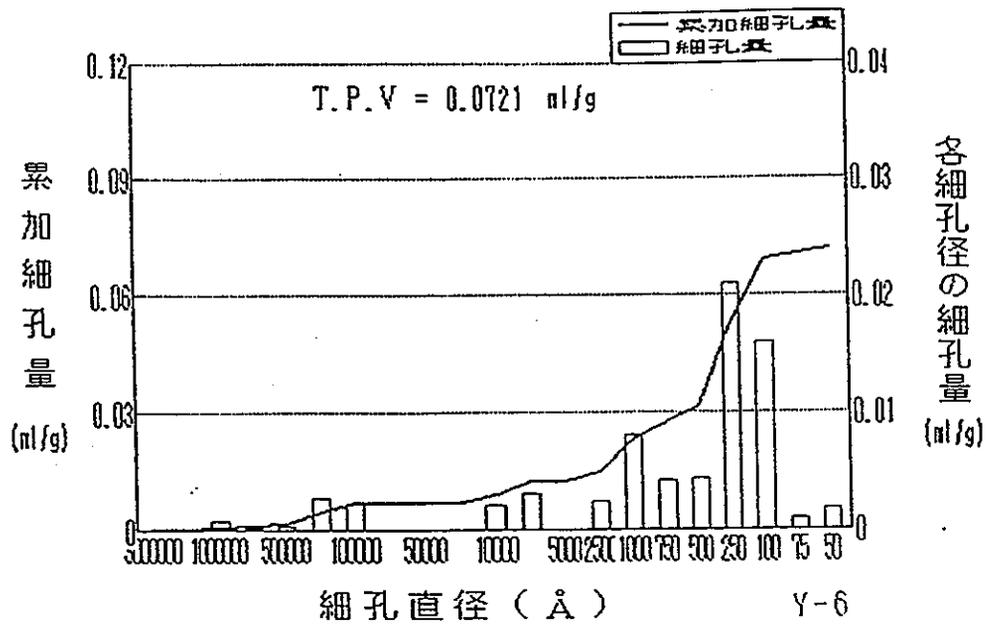


図4.3-11 Y-6試料の細孔径分布図  
Fig 4.3-11 Pore Size Distribution of Y-6 Sample

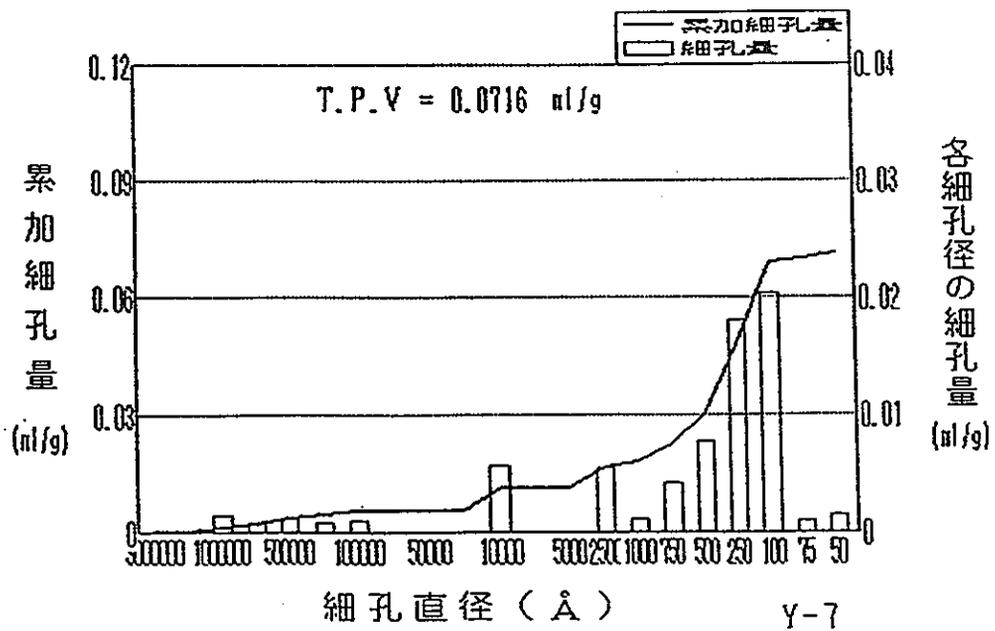


図4.3-12 Y-7試料の細孔径分布図  
Fig 4.3-12 Pore Size Distribution of Y-7 Sample

## 4. 3. 5 中性化試験

Dビルのコアについては、写真4.3-2及び写真4.3-3のとおりフェノールフタレイン溶液を噴霧した場合に土壌、または地下水に直接接触していた面も着色し中性化はpH指示薬を用いた試験では観察されなかった。

横浜新港埠頭のブロックについては、海中から採取されて暫時放置されたためかフェノールフタレイン溶液を噴霧しても着色しなかったが、ブロックから試験用供試体を切り出した直後に水洗し手早く乾燥したものは写真4.3-4のように全面にわたって着色し、中性化はpH指示薬を用いた試験では観察されなかった。なお、ニトラミン指示薬はJISで危険物に指定され、試薬メーカーが製造を中止したので試験には用いていない。

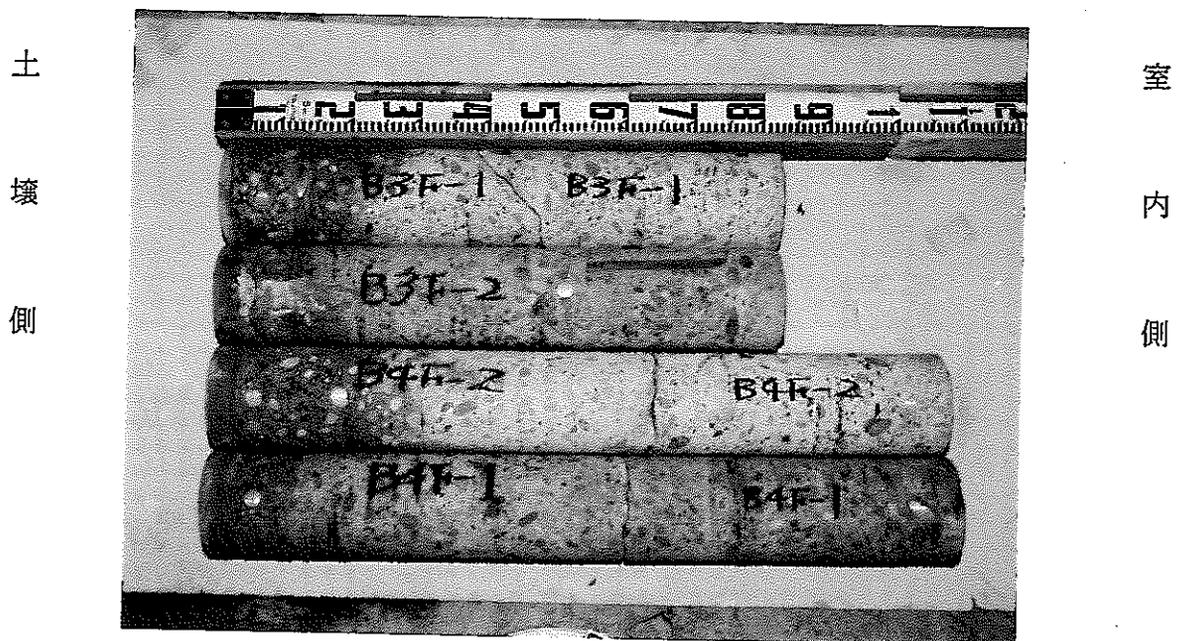


写真4.3-2 コア側面状態  
Photo 4.3-2 Side State of Cores

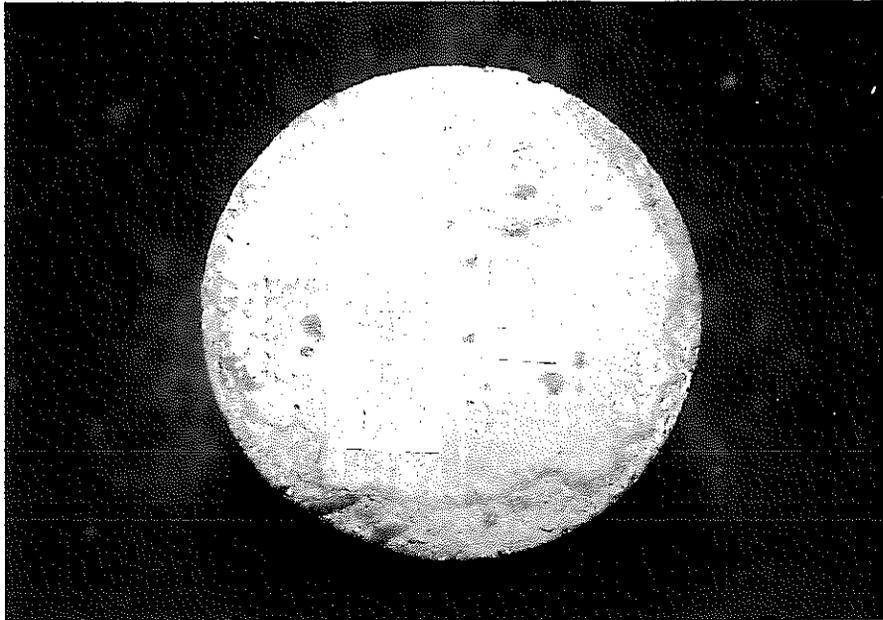


写真4.3-3 土壌との直接接触面 (B3F-2)  
Photo 4.3-3 Surface State Contacted With Soil (B3F-2)

海  
水  
接  
触  
面  
側

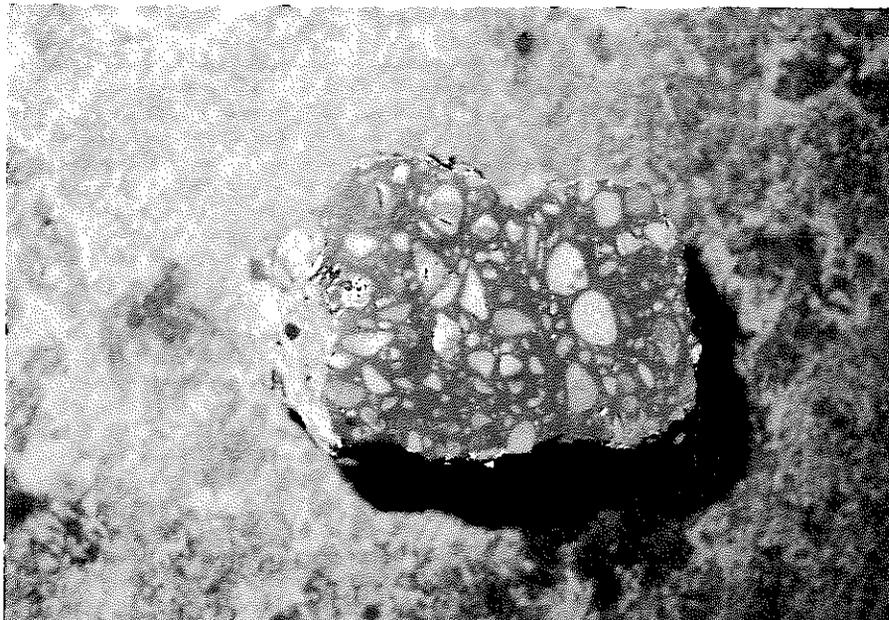


写真4.3-4 横浜新港埠頭試料のフェノールフタレイン溶液を噴霧した時の着色状態  
Photo 4.3-4 State of Spraying Phenolphthalein to Yokohama New Port's Wharf

## 4. 3. 6 供試体浸漬液の水素イオン濃度

各供試体を20日間室温で浸漬した後の浸漬液のpH値を表4.3-8と図4.3-13とに示す。

Dビル及び横浜新港埠頭とも採取位置によらずpHは約12で一定しており、アルカリ性が保たれている。

表4.3-8 浸漬液の水素イオン濃度  
Table 4.3-8 Hydrogen Ion Concentration of Solution

試料名		pH	水素イオン濃度
Dビル	D-1		11.9
	D-2		12.0
	D-3		12.2
横浜新港埠頭	Y-1		11.9
	Y-2		12.0
	Y-3		12.0
	Y-4		12.0
	Y-5		12.0
	Y-6		12.1
	Y-7		12.1

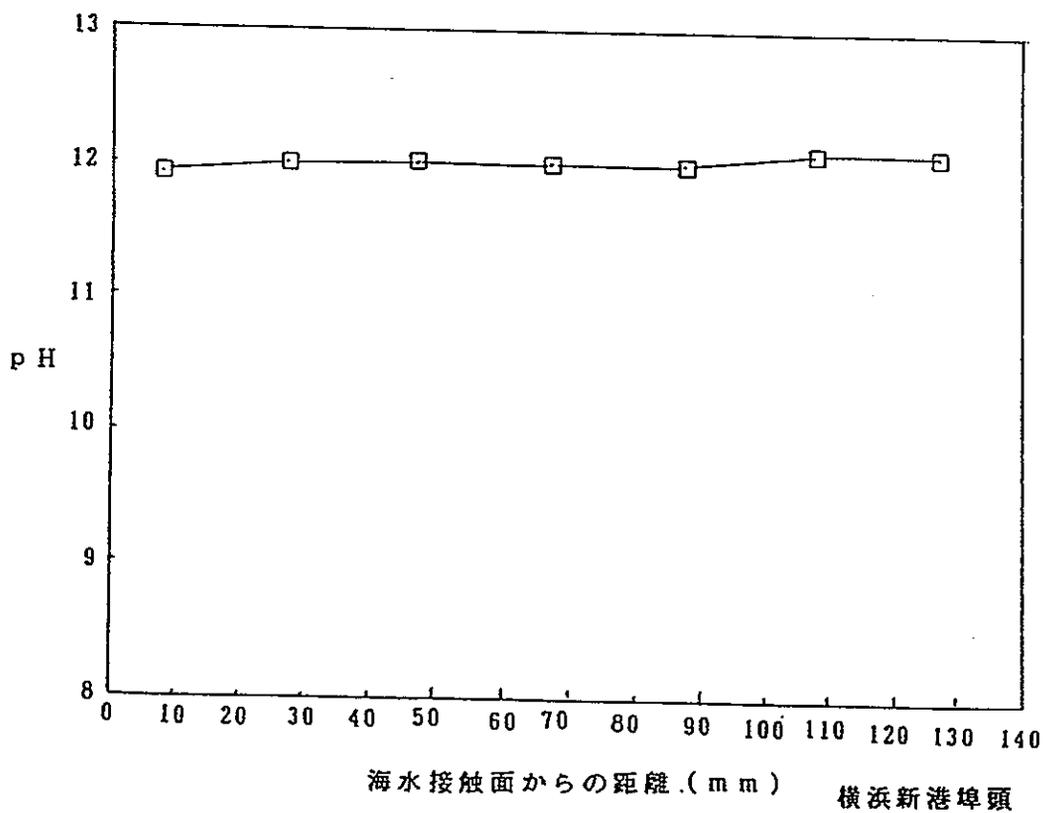
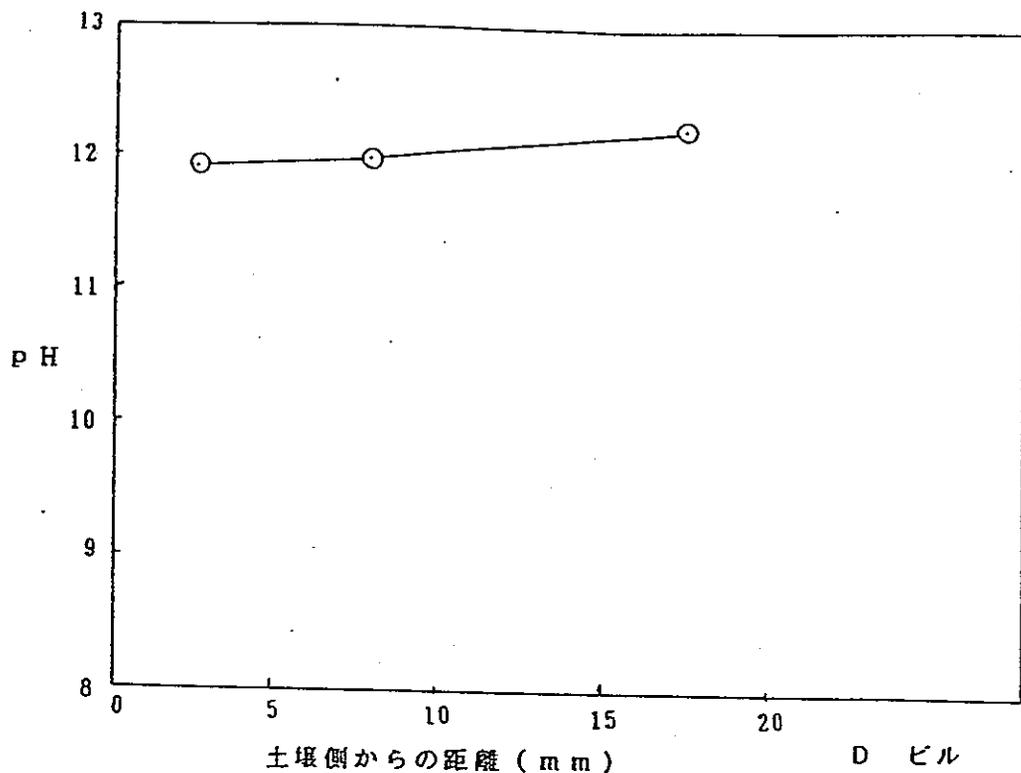


図4.3-13 浸漬液の水素イオン濃度  
Fig 4.3-13 Hydrogen Ion Concentration of Solution

## 4. 3. 7 構造物表面のコンクリート試験のまとめ

水和生成物、CaO/insol.比及び浸漬液のpHなどの試験結果を総合すると本試験に供試したDビルのコンクリート及び横浜新港埠頭のコンクリートは、ほとんど劣化していないようである。

## 5. 長期変質挙動予測手法の調査検討

## 5. 1 長期変質挙動予測手法に関する文献調査

放射性廃棄物処分技術の観点からのコンクリートの長期変質挙動の予測に関する最近の文献を検索した結果、米国材料学会のシンポジウムの中に3編検出した。長期変質挙動とは直接関係しないが、放射性廃棄物の処分に関連して混合セメントについてのモデル化〔文献1〕、硫酸塩を含む地下水に接するコンクリートの劣化についてのモデル化〔文献2〕及び間隙水についてのモデル化〔文献3〕である。なお、放射性廃棄物の処分には直接関係しないが永年経過したセメント・コンクリートの物性変化〔文献4, 5, 7及び8〕、RC構造物の耐用年数の予想評価システム〔文献6〕及びコンクリートの中性化進行を数学的にモデル化して予想する方法〔文献9〕など9文献を検索した。

[1] Assessment of the Performance of Cement-based Composite Material for  
Radioactive Waste Immobilization

M. Atkins, J. Cowie, F. P. Glasser, T. Jappy, A. Kindness and C. Pointer

Scientific Basis for Nuclear Waste Management. X III

[2] Mechanistic Model for the Durability of Concrete Barriers Exposed to  
Sulphate-Bearing Groundwater

A. Atkinson and J. A. Hearene

Scientific Basis for Nuclear Waste Management. X III

[3] Modelling of the Evolution of Porewater Chemistry in a Cementitious  
Repository

A. Haworth, S. M. Sharland and C. J. Tweed

Scientific Basis for Nuclear Waste Management. X III

- 〔4〕 80年材令コンクリート中のシリケートアニオンの形態  
岡田能彦, 真田満雄, 藤井 悟  
セメント・コンクリート論文集, No.44, P. 58~61. 1990
- 〔5〕 腐食による鉄筋コンクリート構造物の寿命予測  
森永 繁, 入野一男, 太田達晃, 土木凱士  
コンクリート工学論文集, Vol. 1, No.1, P.177~189. 1990
- 〔6〕 RC構造物の耐用年数予測評価システム構築のための基礎的研究  
桜井 宏, 鮎田耕一, 佐伯 昇, 鈴木明久  
コンクリート工学年次報告集, Vol.12, No.1. P.627 ~ 632. 1990
- 〔7〕 35年間暴露したスラグ高含有セメントコンクリートの性状  
長尾之彦, 近田孝夫, 高沢年道  
コンクリート工学年次論文集, Vol.12, No.1. P.633 ~ 638. 1990
- 〔8〕 80年間経過したコンクリート製港湾構造物の耐久性について  
市川公一, 浅野泰史, 守分敦郎, 飯田 勲  
コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1. P.639 ~ 644. 1990
- 〔9〕 コンクリートの中性化進行モデル  
栢田佳憲, 棚野博之  
コンクリート工学論文集, Vol. 2, No.1. P.125 ~ 133. 1991

## 5. 2 過去3年間の取得データに基づく検討

表5.1-1～表5.1-3は、主要な試験結果を昭和63年度～平成2年度との試料間で比較したものである。

切出したスライス片の位置や幅などによって、当然そのデータの評価は異なってくるが、マクロ的に試料間の単純平均を算出してみた。

これらの試料の配合や施工条件は不明である。環境条件も区々ではあるが、多少類似性がある土を通して海水や塩分を多量に含む地下水が間接的に影響していたB、E、Aと潮位下にあつて直接的に海水の影響を受けていたYとを比較してみたが、果してこの因子がどの程度寄与しているのかは分からない。

表5.1-2と表5.1-3とを総合して、たとえばC-S-Hゲル生成量とコンクリートの諸物性値との関係を検討してみたが、データ不足もあつて明確にこれらに関連付けて考察することはできなかった。また、物性値の中でも通常は相関性があるとされている総細孔量と圧縮強度との間にもデータ不足でまだ定常的な関係は認められなかった。

図5.1-1～3にC-S-H中のCaO/SiO<sub>2</sub>モル比と総空隙量、総細孔量、CaO/insol.比との関係を示す。

これらによると、C-S-H中のCaO/SiO<sub>2</sub>モル比と総空隙量との関係はあまり明確でないが、総細孔量との間には負の相関が、またCaO/insol.比との間には正の相関がみられる。

とくに、C-S-H中のCaO/SiO<sub>2</sub>モル比と総空隙量との間にみられる高い負の相関( $\gamma = -0.8624$ )はC-S-Hの変質を総細孔量との間の強い関連を示すものと考えられるが、データ数が少ないため、今後さらにデータの蓄積が望まれる。

表5.1-1 主要試験結果の各年度との比較  
 Table 5.1-1 Comparison Concerning with Main Results Obtained in 1988, 1989 vs 1990

報告書 年 度	対 象	採 取 場 所	採 取 位 置	経年 (年)	環 境 条 件	略 記 号 (試料名)
昭和63年	廃線跡	真 鶴	表面乾燥部	約67	背面は、岩盤と地下水に接触、表面は大気乾燥、場所により湿潤状態	B-1
						B-2
平成元年	河口護岸	帷子川	前 面 部	約61	土を通して、海水や塩分を多量に含む地下水が間接的に影響する。	B
			背面上部			E
			背面下部			A
平成2年	建築物	都心ビル	地下3階	52	土壌、地下水(真水)中	D
	海岸 構造物	横浜新港	10, 11 号埠頭	61	海水面下 (波浪、満干潮の影響を受けず)	Y

表5.1-2 主要試験結果の各年度との比較  
Table 5.1-2 Comparison Concerning with Main Results Obtained in 1988, 1989 vs 1990

年度	試料名	生成物 (%) : 質量合計を100%とした場合								C-S-H中の CaO/SiO <sub>2</sub> モル比
		Ca(OH) <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	AFt	AFm	F-Salt	AH	C-S-H	H <sub>2</sub> O	
昭和63年	B-2表面	0	8.7	0	0	0	9.6	77.0	4.8	1.2
	中央	4.0	5.4	0	0	0	9.4	73.4	7.8	0.9
	岩着	2.0	3.3	0	0	0	8.9	76.9	8.0	1.1
平成元年	B	0	11.9	0	0	9.2	4.4	67.5	8.0	0.6
	E	0	23.8	5.9	0	4.2	4.8	53.9	7.5	0.6
	A	0	17.0	1.3	15.7	8.6	2.4	51.2	7.6	0.5
平成2年	D	0	3.3	0.1	13.9	0	4.6	71.1	7.0	1.0
	Y	0	1.2	0	3.5	22.3	0.6	66.0	8.4	1.3

注) 切出したスライス片の位置や幅によっても、当然そのデータの評価は異なってくるが、マクロ的に試料間の比較を試みるために、該当試料の平均値の意味で試料名ごとにすべてスライス片のデータの単純平均を算出している。

表5.1-3 主要試験結果の各年度との比較  
Table 5.1-3 Comparison Concerning with Main Results Obtained in 1988, 1989 vs 1990

年度	試料名	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	透水係数 (cm/sec)	総空隙量 (ml/g)	総細孔量 (ml/g)	CaO/insol. 比	浸漬液 のpH
昭和63年	B-1	542	3.79×10 <sup>5</sup>	6.1×10 <sup>-10</sup>	—	—	—	—
	B-2表面	412	3.54×10 <sup>5</sup>	3.3×10 <sup>-8</sup>	0.121	0.057	0.24	11.6
	中央				0.101	0.041	0.22	11.6
	岩着				0.118	0.049	0.24	11.8
平成元年	B	236	3.48×10 <sup>5</sup>	4.17×10 <sup>-8</sup>	0.178	0.165	0.13	11.2
	E				0.163	0.166	0.09	11.3
	A				0.160	0.169	0.14	10.5
平成2年	D	168	1.91×10 <sup>5</sup>	1.19×10 <sup>-7</sup>	0.180	0.091	0.23	12.0
	Y	279	2.06×10 <sup>5</sup>	0.91×10 <sup>-7</sup>	0.154	0.070	0.30	12.0

注) 切出したスライス片の位置や幅によっても、当然そのデータの評価は異なってくるが、マクロ的に試料間の比較を試みるために、該当試料の平均値の意味で試料名ごとにすべてスライス片のデータの単純平均を算出している。

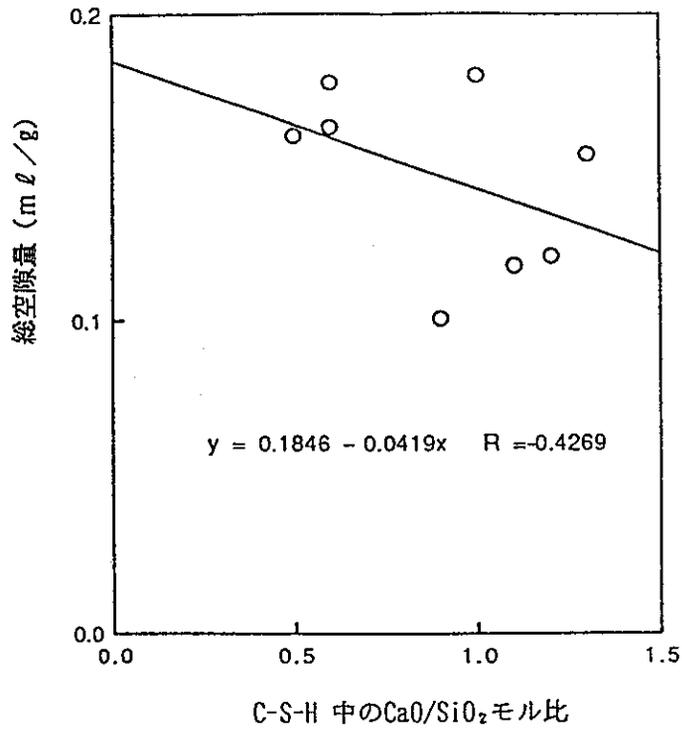


図5.1-1 C-S-H 中のCaO/SiO<sub>2</sub>モル比と総空隙量との関係

Fig 5.1-1 CaO/SiO<sub>2</sub> Mol Ratio in C-S-H vs Total Air Void Volume

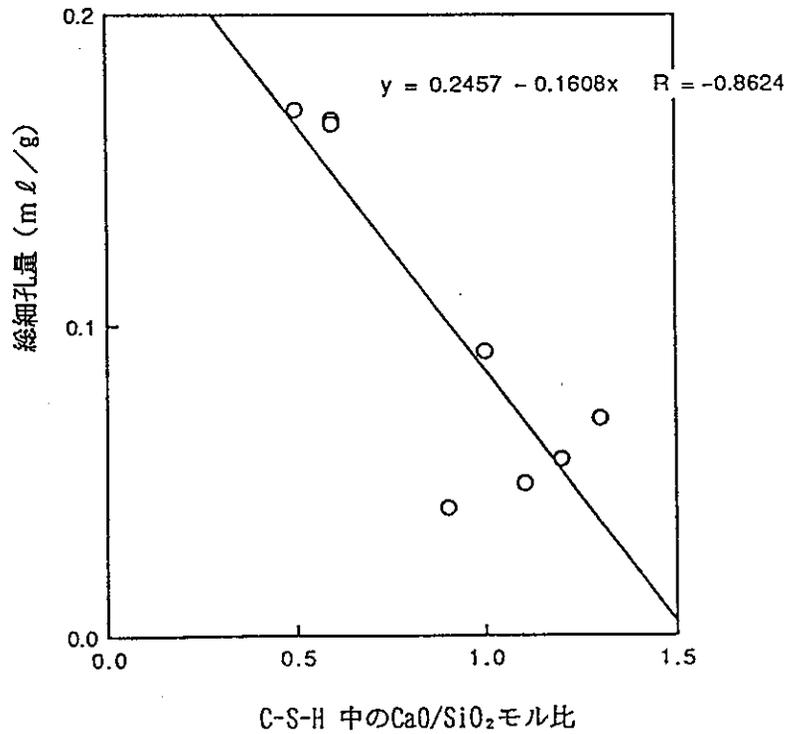


図5.1-2 C-S-H 中のCaO/SiO<sub>2</sub>モル比と総細孔量との関係

Fig 5.1-2 CaO/SiO<sub>2</sub> Mol Ratio in C-S-H vs Total Pore Volume

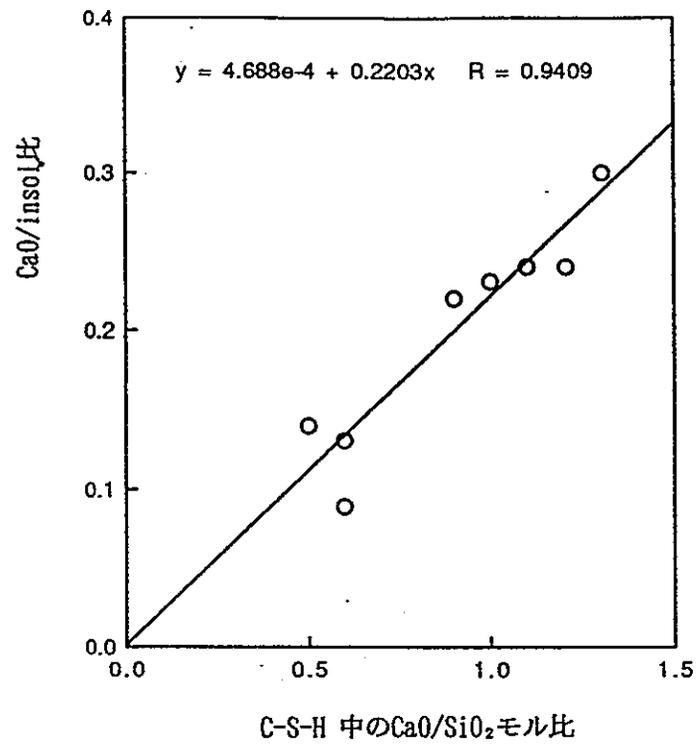


図5.1-3 C-S-H 中のCaO/SiO<sub>2</sub>モル比と  
CaO/insol.比との関係

Fig 5.1-3 CaO/SiO<sub>2</sub> Mol Ratio in C-S-H  
vs CaO/insol. Ratio

## 6. まとめと今後の検討課題

本年度の調査研究では採取したDビルのコンクリートは地階の外壁であって、二酸化炭素による炭酸化をほとんど受けず、常時適度な湿潤状態が維持されていた良好な環境で経年しているため、52年経過した現在もほとんど劣化していなかった。

また、横浜新港埠頭から採取したコンクリートは、潮の満ち引き、飛沫及び波浪の影響を直接受けない冠水下の状態にあったから、海洋構造物としては比較的良好な環境で経年しているため、61年を経過した現在でも同じくほとんど劣化していなかった。

すなわち、コンクリートはその環境条件が良好であれば、50～60年程度の経年では劣化しないと言える。ただし、打設されたコンクリートの配合や施工条件によって以後の劣化の程度が大きく左右されることは、言うまでもない。

本年度の調査研究における水和物の変質は、3-3-2のii)で前記した鈴木らの方法によって実施したが、いくつかの問題点があり今後も土壌、河川水あるいは海水などと接触し永年経過した実際構造物のコンクリートの物性を調査して実績を蓄積する必要がある。しかし、前年度の調査研究(Ⅱ)が指摘している通り、大部分の永年経過した構造物はコンクリートの配合や施工などの記録が紛失していることが多く、変質状態の検討に必要な初期のセメント水和生成物についてのデータが欠落しているため、古いコンクリートの採取と分析という方法は水和物の変質の程度を把握する上では確かに限界がある。

したがって、配合、施工、養生などの条件が明確なコンクリートテストピースを作って、自然曝露あるいはそれでは年月が掛かり過ぎるならば促進養生などの実験室的な条件によって正確にそのセメント水和物の変質を調査するのも一方法である。もちろん、適用した促進養生条件が自然条件の何年に相当するののかの問題はある。

放射性廃棄物の処理関連技術の調査研究の観点からみると、永年経過した実際構造物を廃棄場所として考えた場合、劣化して使用に耐えないか、健全で使用できるかどうかを、セメント水和物の変質を判定指標とするのも一つの方法であるが、中性化、鉄筋の発錆、ひび割れ、透水(透気)係数及び圧縮強度などのコンクリートの物性、あるいは耐久性をより考慮した調査研究が必要である。また、将来の劣化を予想しての定期点検方法及び補修方法などの検討も考慮すべきであろう。