

# 真空中に曝露したセメント系材料の物性に及ぼす セメントおよび混和材料の影響

金森 洋史<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 清水建設(株) 宇宙開発室 (〒105-07 東京都港区芝浦 1-2-3 シーバンスS館)

月面の真空環境に曝されるコンクリートの製造に適した材料を探るために、種々のセメントおよび混和材料を用いたモルタルならびにコンクリートを所定の期間真空環境に曝露し、質量、長さおよび強度の変化を調べた。また、拡散方程式による真空曝露モルタルの終局収縮ひずみの推定を行った。その結果、アルミナセメントが月での使用に比較的適していることなどが明らかとなった。

**Key Words :** Mortar, concrete, vacuum, shrinkage, strength, diffusion

## 1. はじめに

これからの宇宙開発の目標の1つとして、人間が月や火星に居住し、そこでさまざまな調査研究活動を行うことが考えられている。これを実現するためには大量の物資が必要となり、それらを支援するためには地球以外に存在する資源の利用が不可欠であると考えられている。月基地の建設においても、その建設材料には多くの月資源が利用されることになり、現在までにいくつかの建設材料が提案されている<sup>1)</sup>。コンクリートもこれらの材料の有力な候補と考えられており、既にさまざまな研究が実施されている<sup>2-5)</sup>。

筆者は、従来より月の環境下におけるコンクリートの物性に関する研究を行っている。特に、月環境の中でコンクリートに対してもっとも厳しいと考えられる真空環境に着目し、多くの曝露実験を実施した。前報では、真空ならびに種々の乾燥環境に曝露したモルタル供試体の物性変化について報告し、十分な湿潤養生を行ったモルタル供試体は、その後乾燥することによって強度が増加するものの、乾燥に伴う収縮がひび割れを発生させる可能性のあることを指摘した<sup>6)</sup>。

乾燥収縮を低減させるためには、コーティングによって水分を逸散させない、使用材料を調整して逸散水量を減らす、物理的に拘束するなどのさまざまな方法が考えられる。いずれの方法に関しても、その効果や問題点などを把握するための検討が必要と考えられるが、本研究では、上記の方法のうち材料的な要因に着目し、実験ならびに解析を実施した。

実験では、種々のセメントおよび混和材料を使用して

Table 1 Mortar Mix Proportions

Mix. No.	Water	Cement			Admixture			Sand
		Ordinary Portland	Blast Furnace Slag	Alumina	Super Plasticizer	Shrinkage Reducer	Expansive Admixture	
1	344	529	-	-	C x 0.8%	-	-	1268
2	374	576	-	-	-	C x 2%	-	1152
3	374	518	-	-	-	-	58	1150
4	374	576	-	-	-	-	-	1152
5	372	-	572	-	-	-	-	1145
6	346	-	-	533	-	-	-	1234

(Unit: kg/m<sup>3</sup>)

作製したモルタルおよびコンクリート供試体を真空環境に曝露して物性の変化を調べた。また長期的な真空曝露による収縮量の推定を行うために、3次元の線形拡散方程式を使用して、モルタル供試体の終局収縮ひずみを算定した。

## 2. モルタルの物性に及ぼすセメントおよび混和材料の種類の影響

### (1) 実験計画

本実験は、真空環境に曝露されたモルタルの質量、長さ、ならびに圧縮および曲げ強度に及ぼすセメントおよび混和材料の種類の影響に着目した実験である。

セメントには、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種、およびアルミナセメントの3種類、混和材料には、一般に乾燥収縮の低減に有効と考えられている高

性能減水剤、収縮低減剤、および膨張材の3種類を使用し、Table 1に示す6種類の配合について実験を行った。曝露条件としては、真空曝露開始材齢を14日とし、試験材齢（水中養生あるいは真空曝露を終了して強度等の試験を行う材齢）を、14、21、42、および70日の4水準設定した。比較のために、水中養生のみを施した供試体についても同様の試験を行った。なお本実験では、水中養生および真空曝露はいずれも50℃の温度環境において行った。これは実験計画上の制約から、20℃・28日の水中養生に相当する積算温度を14日間で得ることを目安に設定したもので、実験期間中の供試体の温度条件を一定とするために、真空曝露中の温度も同一の50℃とした。

## (2) 実験方法

### a) 材料

セメント：前報で述べたように、月コンクリートに使用されるセメントは、月の玄武岩あるいは灰長石から作られる。灰長石に石灰分を加えることによって普通ポルトランドセメントや高炉セメントに近いものが、また玄武岩や灰長石を溶融して不要な物質を取り除くことによって、アルミナセメントに近いものが作られると考えられている<sup>7)</sup>。従って、本実験では普通ポルトランドセメント（以下普通セメント：比重 3.15, 比表面積 3280 cm<sup>2</sup>/g）、高炉セメントB種（以下高炉セメント：比重 3.05, 比表面積 3770 cm<sup>2</sup>/g）、ならびにアルミナセメント（比重 2.97, 比表面積 5100 cm<sup>2</sup>/g）を使用した。

混和材料：混和材料には、高性能減水剤（ナフタリンスルホン酸塩系、比重 1.20, 添加量 C x 0.8 質量%）、収縮低減剤（低分子量エチレンオキサイドおよびプロピレンオキサライドの共重合体、比重 1.065, 添加量 C x 2.0 質量%）、および膨張材（CSA系、比重 2.93, 比表面積 2280 cm<sup>2</sup>/g, 添加量 結合材量 x 10 質量%）の3種類を使用した。

水：水は月の鉱物を水素で還元することによって得られる<sup>8)</sup>。本実験では、一般に使用される水道水を練混ぜ水として使用した。

骨材：既往の研究結果から、月の砂は骨材として利用できそうなことが明らかとなっている<sup>9)</sup>。本実験では、物性の安定性を考慮して、豊浦標準砂（気乾比重 2.60, 単位体積質量 1538 kg/m<sup>3</sup>）を使用した。

### b) 供試体の作製

供試体には 4 x 4 x 16 cm の直方体供試体を使用した。モルタルの配合は、いずれの材料を使用した場合においても水結合材比 = 65% を一定とし、目標フロー値 = 240 ± 10 mm が得られるようにモルタルの単位水量を調整して定めた。なお目標フロー値は、普通ポルトランドセメントを使用して JIS R 5201 に準じて練り混ぜたモルタル（配合 4 : S/C = 2, W/C = 65%）のフロー値とした。

供試体数は各実験条件につき3本とした。

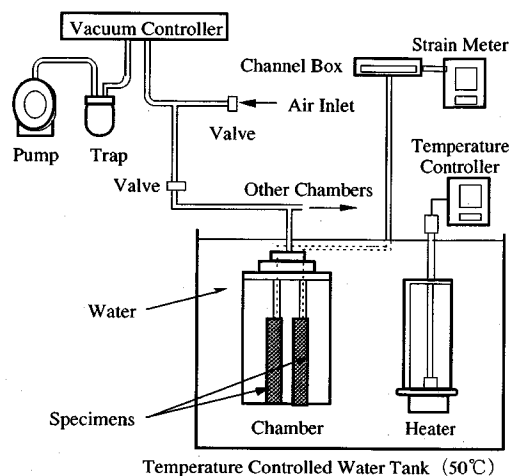


Fig. 1 Vacuum Exposure Apparatus - I

### c) 測定項目

以下に示すモルタルの特性について、真空曝露前および曝露後、あるいは曝露中における測定を行った。

- ・質量
- ・長さ
- ・圧縮強度
- ・曲げ強度

### d) 装置

実験に使用した主な装置および器具は以下のとおりである。なお、モルタルミキサ、型わく、および強度試験装置には JIS R 5201 に準じたものを使用した。

- ・コンタクトゲージ I 式（水中養生供試体および材齢 14 日までのひずみ測定用）
- ・箔ひずみゲージおよびひずみ計（真空曝露供試体の長さ変化測定用）
- ・真空曝露装置 - I
- ・真空デシケータ（曝露後の供試体保存用）

真空曝露装置 - I は Fig. 1 に示すようなシステム構成となっている。真空容器は内径 150 mm, 内高 250 mm のアクリル製で、その上部に蓋を取付けることによって密閉される。アクリル製の蓋には、真空ポンプへ繋がるパイプのほかに、供試体の長さ変化を測定するための計測線コネクターが取付けられている。パイプは、バルブ、真空一定装置、およびトラップを介して真空ポンプに接続されている。容器内部の供試体から延びたひずみの計測線は、コネクターを介して外部の計測器に接続されている。真空容器内部の供試体温度を一定とするために、容器は恒温水槽内に投入された。なお、計測線コネクターは防水・気密構造となっている。

真空一定装置は、容器内部の真空度を表示すると共に、電磁バルブによって真空度を一定に保つ機能を有している。また真空ポンプは、排気速度 200 l/min. の油回転

型ポンプで、到達圧力は  $5 \times 10^4$  torr ( $6.7 \times 10^2$  Pa) である。

### e) 実験手順

供試体の成形は、 $20^\circ\text{C}$ ・相対湿度 80% の恒温恒湿室で行い、材齢 1 日まで同環境に供試体を静置した。材齢 1 日で脱型したモルタル供試体にコンタクトゲージの標点（標点距離：100 mm）を貼付し、質量を測定した後、 $50^\circ\text{C}$  の水中で養生を行った。

真空曝露用供試体については、材齢 14 日において水中から取り出し、質量および長さ（標点間距離）の測定を行った後、供試体の表面に箔ひずみゲージを貼付した。ひずみの計測線を計測器に接続し、供試体を真空容器に入れた後、直ちに長さ変化の測定を開始した。次にバルブを開け、真空曝露を開始した。長さ変化の測定は、曝露期間中連続して実施した。なお真空度は 0.1 torr (13 Pa) とし、環境温度を  $50^\circ\text{C}$  とした。0.1 torr は、水が液体として存在できない真空度である。従って、月面の真空度（約  $1 \times 10^{-10}$  torr =  $1 \times 10^{-8}$  Pa）には及ばないものの、この程度の真空度においても、月面における水の逸散機構やセメントの水和反応機構などは、ある程度模擬できると思われる。

材齢 21, 42, および 70 日において供試体を真空容器から取り出し、供試体温度が  $20^\circ\text{C}$  となってからその質量、長さ（水中養生供試体についてのみ）を測定した。その後、曲げおよび圧縮強度を通常の空气中で測定した。この一連の作業における供試体の吸湿を極力少なくするために、測定時以外の真空曝露供試体は真空デシケータに入れて保存した。

水中養生供試体についても同様に、各試験材齢において質量および長さの測定を行った後、強度試験を実施した。なお、強度試験は JIS R 5201 に準じた。

### (3) 実験結果および考察

#### a) 質量の変化性状

使用したセメントあるいは混和材料ごとのモルタル質量の変化を Fig. 2 および Fig. 3 に示す。質量変化は、脱型時（材齢 1 日）における供試体質量からの変化率として示した。水中養生供試体の質量が材齢とともに僅かに増加する傾向を示したことに對し、真空曝露供試体の質量は大きく減少した。前報で述べたように、この質量の減少は供試体からの水の逸散によるものと考えられる。

セメントの種類の影響に関しては、普通セメントならびに高炉セメントを使用した供試体がほぼ同じ変化傾向を示した。これらの結果と比べて、アルミナセメントを使用した場合には、水中養生による質量の増加率が大きく、また真空曝露による質量の減少率が小さくなる傾向を示した。成形時の供試体の含水率（= 単位水量 / モルタルの単位質量  $\times 100$  %）を配合（Table 1）から求めると、アルミナセメントを使用した場合が 16.4 %（=  $346 /$

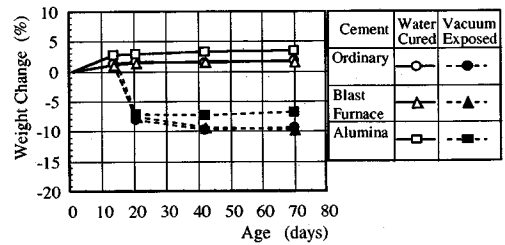


Fig. 2 Weight Changes of Mortar Specimens Made with Various Cements

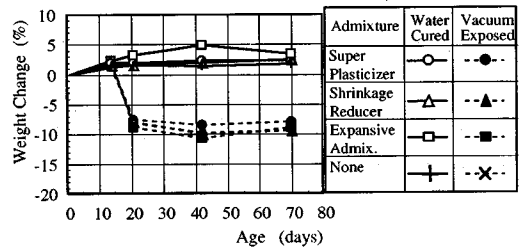


Fig. 3 Weight Changes of Mortar Specimens Made with Various Admixtures

( $346 + 533 + 1234$ )  $\times 100 = 346 / 2113 \times 100$ ), その他のセメントを使用した場合が 17.8 % (=  $374 / 2102 \times 100$ ) となる。一方、材齢 70 日における真空曝露供試体の質量減少率は、Fig. 2 よりそれぞれ約 7% および 10% であり、この結果から供試体に残存した水と結合材との質量比率（: 含水量結合材比 = (練混ぜ時水量 - 逸散水量) / 結合材量  $\times 100$  %）を求めるとそれぞれ 37 % (=  $(346 - 2113 \times 0.07) / 533 \times 100$ ) および 29% となった。充分水和したセメントと結合水の比率が通常 20% 程度であることを考えると、材齢 70 日の真空曝露供試体には、結合水以外の水も残存していたことが推測される<sup>10)</sup>。

混和材料の種類の影響に関しては、特に明確な傾向が見られなかった。膨張材を使用した配合の水中養生供試体の質量が、他の配合と比較して僅かに大きくなる傾向を示したが、これはエトリンガイトの生成に伴う結合水の増加が影響したものと考えられる。上記と同様の方法で材齢 70 日における真空曝露供試体の含水量結合材比を求めると、いずれの混和材料を使用した配合も 30% 程度となった。

#### b) 長さの変化性状

使用したセメントあるいは混和材料ごとのモルタルの長さ変化を Fig. 4 および Fig. 5 に示す。長さ変化は、材齢 1 日の供試体の長さを基準とする変化率として表した。なお、水中養生供試体および真空曝露開始前の長さ変化はコンタクトゲージで測定し、曝露中の長さ変化は箔ひずみゲージで測定したため、真空曝露供試体の長さ変化は、コンタクトゲージで測定した曝露開始時の長さで補正した。

水中養生供試体の長さ変化に及ぼすセメントの種類

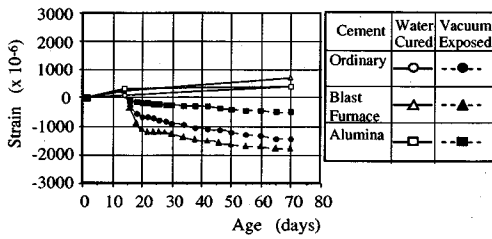


Fig. 4 Strain Changes of Mortar Specimens Made with Various Cements

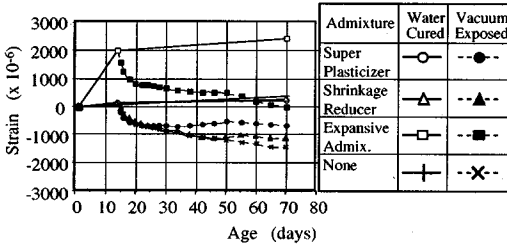


Fig. 5 Strain Changes of Mortar Specimens Made with Various Admixtures

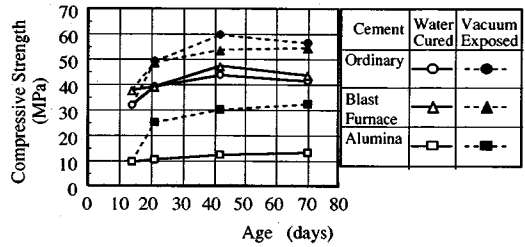


Fig. 6 Compressive Strength Changes of Mortar Specimens Made with Various Cements

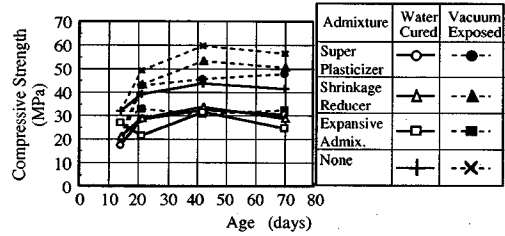


Fig. 7 Compressive Strength Changes of Mortar Specimens Made with Various Admixtures

影響は見られず、いずれも材齢の増加に伴う緩やかな膨張を示した。一方、真空曝露供試体の場合には、いずれも曝露開始と同時に急激な収縮を示し、その収縮量はアルミナセメントを使用した場合に最も小さくなり、次いで普通セメント、高炉セメントの順となった。この傾向は、一般の乾燥収縮に関して得られた結果と一致している<sup>11,12)</sup>。ただし、本実験では材齢1日の供試体長さを基準としたため、アルミナセメントについて通常言われているような硬化初期における自己収縮の影響は含んでいない。また、真空曝露であったことから、炭酸化による収縮はなかったと考えられる。

水中養生供試体の長さ変化に及ぼす混和材料の種類の影響では、膨張材を使用した配合が顕著な膨張を示し、その他の配合はいずれも同様に僅かな膨張を示した。一方、材齢70日における真空曝露供試体の収縮量は、膨張材を使用した配合が最も小さくなり、次いで高性能減水剤、収縮低減剤、混和材料なしの順となった。

膨張材を使用した供試体の長さ変化には、曝露開始までに供試体が大きく膨張したことが影響している。従って、真空曝露開始時の長さを基準にすると、材齢70日における収縮量は約  $2000 \times 10^{-6}$  と最も大きな収縮を示したことになる。

高性能減水剤を使用した供試体は、真空曝露に伴う収縮が比較的小さく抑さえられる結果が得られた。

収縮低減剤は、本来、細孔中の水の表面張力を減ずることによって収縮を抑さえる効果がある。しかしながら、本実験ではその効果は明確には得られなかった。この原因は明らかではないが、1 収縮低減剤は一般に揮発

性が高いため、供試体の成形過程において剤の一部が蒸発したことが、2 実験で使用した収縮低減剤の量 ( $Cx2\%$ ) が、メーカー推奨値 ( $Cx2 \sim 4\%$ ) の下限であり、十分な効果を発揮できなかったことなどが考えられる。

### c) 強度の変化性状

使用したセメントあるいは混和材料ごとのモルタルの圧縮強度の変化を Fig. 6 および Fig. 7 に示す。

モルタル供試体の圧縮強度は、いずれの配合においても真空中に曝露することによって増大する傾向を示した。材齢70日における真空曝露供試体の圧縮強度は、膨張材を使用した配合を除くと、同材齢の水中養生供試体の強度に比べて  $15 \sim 20 \text{ MPa}$  程度大きくなった。このような圧縮強度の増大は、基本的には前報で述べたように、曝露初期の供試体内部における水和反応ならびに乾燥効果が起因していると考えられる。乾燥効果では、セメントゲルなどの粒子の表面を覆っている薄い水の層が乾燥によって失われ、粒子の界面エネルギーが高くなる(粒子間の結合力が強くなる)ことによって強度が増大すると考えられている。本実験における圧縮強度の増大がこの現象によって説明されるならば、真空曝露によって、供試体中の吸着水ならびに層間水は、ある程度逸散したと推測される。

セメントの種類の影響に関しては、普通セメントと高炉セメントには顕著な差は見られなかったものの、アルミナセメントを使用した配合では、曝露開始時の圧縮強度が極端に低くなった。これは、アルミナセメント特有の水和物の転化によるものと考えられる。本実験では、材齢1日までモルタルを  $20^\circ\text{C}$  の環境に置いたことから、

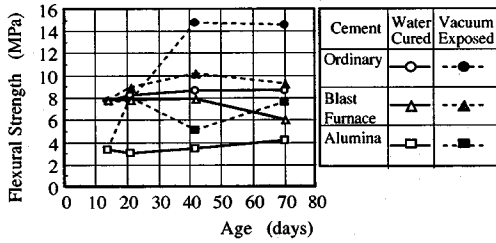


Fig. 8 Flexural Strength Changes of Mortar Specimens Made with Various Cements

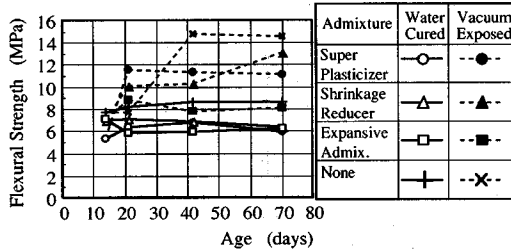


Fig. 9 Flexural Strength Changes of Mortar Specimens Made with Various Admixtures

この時点までの生成水和物の多くは準安定な結晶構造を持つ CAH<sub>10</sub> や C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub> であったと推測される。その後 50℃ の環境で養生したことによって、安定な C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> が生成され、それに伴って強度が低くなったと考えられる。このように水和物が転化した硬化体においても、水中養生を継続することによって強度が材齢と共に再び緩やかな増加を示す結果が既往の研究から得られており、本実験における水中養生供試体もこれと同様の傾向を示したものと考えられる<sup>13)</sup>。一方、いずれのセメントを使用した場合においても、真空曝露によって圧縮強度は増加する傾向を示した。水中養生供試体と比較した場合の強度の増加量は、アルミナセメントを使用した場合に最も大きくなった。

混和材料の種類の影響に関しては、圧縮強度の絶対値に違いがあるものの、その変化性状は膨張材を使用した配合を除き、いずれもほぼ同様の傾向を示した。

膨張材を使用した配合では、水中養生および真空曝露いずれの供試体も材齢の増加に伴う強度の増大を示さなかった。この原因として、本実験で使用した膨張材量が結合材量 × 10% (単位膨張材量 = 58 kg/m<sup>3</sup>) と、通常の使用量 (20 ~ 30 kg/m<sup>3</sup>) に比べて過大であったことが考えられる。目視で確認されるようなひびわれは認められなかったが、このような多量の膨張材を使用したことによって供試体は大きく膨張し、供試体内部のセメントマトリックスが破壊されたことも考えられる。

Fig. 8 および Fig. 9 は、同様に曲げ強度の変化を示したものである。一般に、強度試験の直前にモルタルやコンクリートを炉などで乾燥させると、乾燥させないものに

Table 2 Concrete Mix Proportions

Mix. No.	Water	Cement			Admixture			Sand	Gravel
		Ordinary Portland	Blast Furnace Slag	Alumina	Super Plasticizer	Silicafume	Expansive Admixture		
1	208	520					645	982	
2	210		525				638	972	
3	180			450			686	1045	
4	160	400			4.40		702	1069	
5	163		408		4.48		702	1070	
6	160			400	4.40		723	1101	
7	191	430			5.26	47.8	661	1007	
8	193		434		5.30	48.3	657	1001	
9	178			401	4.90	44.5	689	1049	
10	209	493					30	637	970
11	212		500				30	632	964
12	197			463			30	652	993

(Unit: kg/m<sup>3</sup>)

比べて圧縮強度は大きくなり曲げ強度は小さくなると言われている<sup>14)</sup>。圧縮強度に関しては前述の乾燥効果によって説明されるが、曲げ強度に関しては、急激な乾燥によって発生した微細なひびわれや不均一な収縮に起因した内部応力などが、強度の低下を引き起こすと考えられている。本実験では、このような影響を捉えることを目的として曲げ強度の測定を行った。実験の結果、ばらつきは多いものの曲げ強度においても真空曝露によって強度は増大し、その変化性状は圧縮強度の場合とほぼ同様の傾向を示すことが明らかとなった。これは、前述の乾燥効果に加え、炉乾燥の場合よりも長い期間に亘って真空中に曝露されたことにより、供試体内部にまで乾燥が進行し、応力分布が比較的均一になったことが影響したものと考えられる。

### 3. コンクリートの物性に及ぼすセメントおよび混和材料の種類の影響

#### (1) 実験計画

本実験は、真空環境に曝露されたコンクリートの質量、長さならびに圧縮強度に及ぼすセメントおよび混和材料の影響に着目した実験である。実際の構造物に適用されるコンクリートは、モルタルに比べて粒径の大きい骨材を有し、それが真空曝露による収縮性状に大きな影響を与えることが予測される。それゆえ、モルタルに関して得られた結果と比較することを目的として、本実験を実施した。セメントには、モルタルの場合と同様に普通セメント、高炉セメント、およびアルミナセメントの3種類、混和材料には、高性能減水剤、シリカフューム、および膨張材の3種類を使用した。実験は、Table 2 に示す 12 種類の配合について行った。曝露条件としては、真空曝露開始材齢を 28 日とし、試験材齢 (水中養生

あるいは真空曝露を終了して強度等の試験を行う材齢)を、28, 91, および 182 日の 3 水準設定した。比較のために、水中養生のみを施した供試体についても同様の試験を行った。なお、水中養生および真空曝露はいずれも 20℃の温度環境において行った。

## (2) 実験方法

### a) 材料

セメント：本実験では普通セメント（比重 3.15, 比表面積 3280 cm<sup>2</sup>/g），高炉セメント（比重 3.08, 比表面積 3770 cm<sup>2</sup>/g），ならびにアルミナセメント（比重 2.96, 比表面積 4800 cm<sup>2</sup>/g）を使用した。

混和材料：高性能減水剤（ポリカルボン酸エーテル系, 比重 1.05, 添加量 C x 1.1 質量%），シリカフューム（比重 2.2, 比表面積 200000 cm<sup>2</sup>/g, 添加量 SF/(C+SF) = 10.0 質量%），ならびに膨張材（CSA系, 比重 3.00, 比表面積 3200 cm<sup>2</sup>/g, 添加量 30 kg/m<sup>3</sup>）の 3 種類を使用した。

水：本実験では、水道水を使用した。

骨材：細骨材には、青梅産硬質砂岩砕砂（表乾比重 2.60, 粗粒率 2.88, 吸水率 1.13%, 単位容積質量 1620 kg/m<sup>3</sup>）を、また粗骨材には、青梅産硬質砂岩碎石（最大寸法 20mm, 表乾比重 2.64, 粗粒率 6.85, 吸水率 0.71%, 単位容積質量 1535 kg/m<sup>3</sup>）を使用した。

### b) 供試体の作製

供試体は φ 10 x 20 cm の円柱供試体とし、JIS A 1132 に準じて作製した。コンクリートの配合は、いずれの材料を使用した場合においても水結合材比 = 40% を一定とし、目標スランプ = 12 ± 1 cm が得られるように単位水量を調整して定めた。なお目標スランプは、コンクリートが材料分離を起こさず、かつ成形し易い状態となるように設定した。また、供試体数は各実験条件につき 3 本とした。

### c) 測定項目

以下に示すモルタルの特性について、真空曝露前および曝露後における測定を行った。

- ・質量
- ・長さ
- ・圧縮強度

### d) 装置

実験に使用した主な装置および器具は以下のとおりである。なお、ミキサにはパン型強制練りミキサ（100リットル）を使用した。

- ・コンタクトゲージ I 式（長さ変化測定用）
- ・真空曝露装置 - II
- ・真空デシケータ（曝露後の供試体保存用）

真空曝露装置 - II は Fig.10 に示すようなシステム構成となっている。真空容器は内径 400 mm, 内長 700 mm の鋼製で、その両端には鋼製の円形板が取り付けられている。一

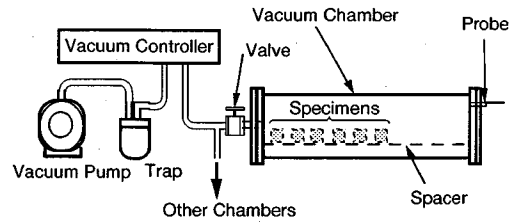


Fig. 10 Vacuum Exposure Apparatus - II

方の鋼板は供試体を出し入れするための蓋となっており、パイプならびにバルブが取り付けられている。もう一方の鋼板にはピラニ型真空計のセンサーが取り付けられている。パイプは、バルブ、真空一定装置、およびトラップを介して真空ポンプに接続されている。真空ポンプは、モルタルの場合と同じものを使用した。

### e) 実験手順

供試体の成形は、20℃・相対湿度 80% の恒温恒湿室で行った。材齢 1 日で脱型した供試体にコンタクトゲージの標点（標点距離：100 mm）を貼付し、質量を測定した後、20℃の水中で養生を行った。

真空曝露用供試体については、材齢 28 日において水中から取り出し、質量および長さ（標点間距離）の測定を行った後、真空曝露を開始した。真空度は、モルタルの場合と同様に 0.1 torr (13 Pa) とし、環境温度は 20℃とした。

材齢 91 および 182 日において供試体を真空容器から取り出し、質量および長さを測定した。その後、圧縮強度を通常の空气中で測定した。この一連の作業における供試体の吸湿を極力少なくするために、測定時以外の真空曝露供試体を真空デシケータに入れて保存した。

水中養生供試体についても同様に、各試験材齢において質量および長さの測定を行った後、強度試験を実施した。

## (3) 実験結果および考察

### a) 質量の変化性状

コンクリートの質量の変化性状を Fig. 11 に示す。質量変化は、脱型時（材齢 1 日）における供試体質量からの変化率として示した。ただし、配合によって成形時の供試体に含まれていた水の量が異なったことから、ここでは質量変化を単位ペースト（セメント+混和材料+水）量当りの変化として示した。

モルタルの場合と同様に、水中養生供試体の質量は材齢とともに僅かに増加し、真空曝露供試体の質量は大きく減少する傾向を示した。

セメントの種類の影響に関しては、いずれの混和材料を混入した場合においても、普通セメントならびに高炉セメントを使用した供試体がほぼ同じ変化傾向を示し

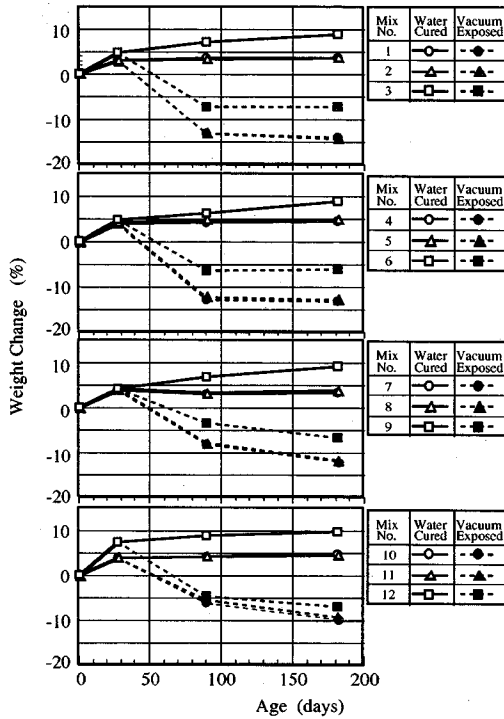


Fig. 11 Weight Changes of Concrete Specimens

た。また、アルミナセメントを使用した場合（配合 3, 6, 9, 12）は、他のセメントを使用した場合よりも水中養生による質量の増加率が大きく、真空曝露による質量の減少率が小さくなる傾向を示した。これらの傾向は、モルタルを使用した場合とまったく同じである。成形時における供試体の単位ペースト量当りの水量は、いずれも 28.6%（水 / (水 + 結合材) × 100）となる。混和材料を混入しない真空曝露供試体（配合 1 ~ 3）の材齢 182 日における単位ペースト量当りの質量変化は、アルミナセメントを使用した場合で 7%，その他の場合で 14% 程度の減少となった。モルタルの場合と同様の方法で、これらの値から材齢 182 日における真空曝露供試体の含水量結合材比を求めると、それぞれ 28% および 17% となった。この結果から推測すると、材齢 182 日の真空曝露供試体では、結合水以外の水は大部分が逸散していたと考えられる。

混和材料の種類の影響に関しては、シリカフェウム（配合 7 ~ 9）あるいは膨張材（配合 10 ~ 12）を使用した配合の真空曝露供試体の質量減少が、これらを混入しない配合と比較して僅かに小さくなる傾向を示した。これらの混和材料は、真空曝露による供試体内部からの水の逸散を、ある程度抑制するようである。

#### b) 長さの変化性状

コンクリートの長さの変化性状を Fig. 12 に示す。長さ変化は材齢 1 日の供試体長さを基準とする変化率で表し

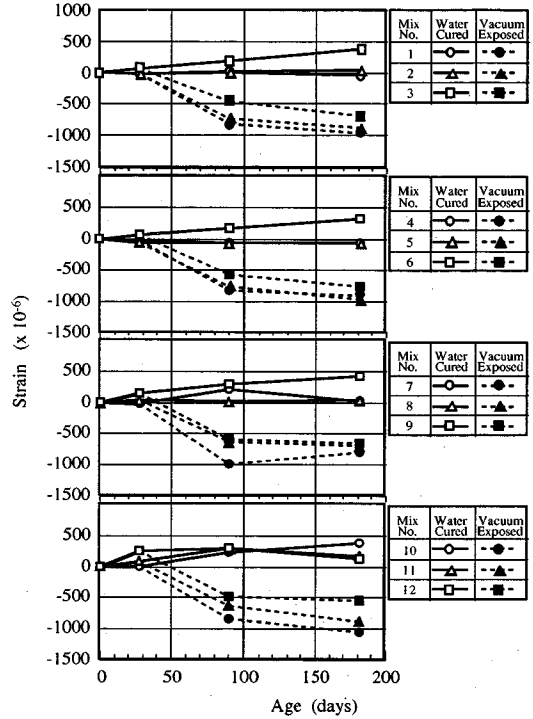


Fig. 12 Strain Changes of Concrete Specimens

た。

水中養生供試体の長さ変化は、膨張材あるいはアルミナセメントを使用した場合に僅かに膨張する傾向を示し、その他の配合ではほとんど変化を示さなかった。特に膨張材を使用した場合、コンクリート供試体はモルタルの場合ほど大きな膨張を示さなかった。これは、膨張材ならびにセメントマトリックスの膨張を拘束する骨材などの単位量が、モルタルとコンクリートで相違したためと考えられる。

真空曝露供試体の場合には、アルミナセメントを使用した配合が最も小さな収縮を示し、普通セメントと高炉セメントの違いは明確とはならなかった。

混和材料の種類の影響に関しては、高性能減水剤、シリカフェウム、ならびに膨張材のいずれにおいても収縮を低減する明確な効果は得られなかった。

#### c) 圧縮強度の変化性状

コンクリートの圧縮強度の変化性状を Fig. 13 に示す。

全体的には、真空中に曝露した供試体の圧縮強度は、水中養生供試体の強度と比較して同等あるいは増大する傾向を示した。特に、アルミナセメントを使用した配合（配合 3, 6, 9, 12）では、いずれの混和材料を使用した場合においても真空曝露によって強度が増大する傾向が見られたが、その他のセメントを用いた場合では、モルタルの場合ほど明確な違いは見られなかった。これは、コンクリートの場合には、セメントマトリックスの収縮

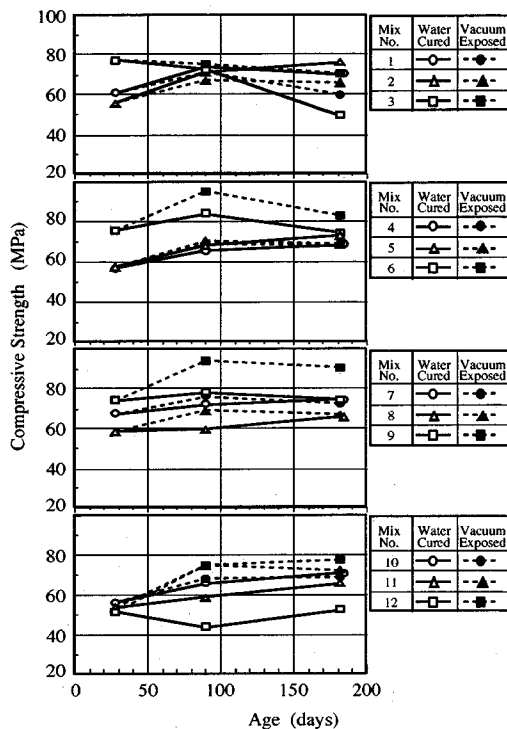


Fig.13 Compressive Strength Changes of Concrete Specimens

を拘束する骨材の単位量がモルタルに比べて大きく、供試体内部に微細な欠陥が発生し易かったためと考えられる。

混和材料の種類の影響に関しては、材齢 182日における真空曝露供試体と水中養生供試体の圧縮強度を比較すると、アルミナセメントを使用した配合以外においては、いずれの混和材料を使用した場合にも大きな相違は見られなかった。この結果は、高性能減水剤の使用による乾燥収縮の低減効果、シリカフュームの混入による収縮応力への抵抗性の増大効果、ならびに膨張材による収縮の低減効果などが、当初の期待どおりには得られなかったことを示していると考えられる。

#### 4. 終局収縮ひずみの推定

2章および3章では、真空曝露による供試体の物性変化を調べ、その変化傾向に及ぼすセメントおよび混和材料の影響を定性的に論じた。本章では、実験結果の中で特に重要な因子である長さ変化（収縮ひずみ）に着目し、その変化傾向をより解析的なアプローチから評価することを試みた。特に、実際の月構造物は長期にわたって真空環境に曝露されることから、材料の最終的な収縮ひずみを予測することは重要と考えられる。ここでは、真空環境を極端な乾燥環境として扱うこととする。

一般に、乾燥によるコンクリートの収縮は拡散方程式で表され、その形状は拡散係数  $k$ 、表面係数  $f$  および終局収縮ひずみ  $S_{\infty}$  によって決定される<sup>15)</sup>。乾燥初期においては、拡散係数自身の変化が大きいことから、一般には非線形の方程式を扱う必要がある。一方、十分な乾燥期間を経た後の拡散係数はほぼ一定となり、線形の方程式で収縮過程を近似することができる<sup>16)</sup>。

3次元直方体の線形拡散方程式は次式で表される<sup>17)</sup>。

$$\frac{S_{av}}{S_{\infty}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} e^{-T_a \alpha n^2} \cdot \frac{G \alpha n}{\alpha n} \cdot \sin \alpha n$$

$$\cdot \sum_{n=1}^{\infty} e^{-T_b \beta n^2} \cdot \frac{G \beta n}{\beta n} \cdot \sin \beta n$$

$$\cdot \sum_{n=1}^{\infty} e^{-T_c \gamma n^2} \cdot \frac{G \gamma n}{\gamma n} \cdot \sin \gamma n \quad (1)$$

$$T_a = \frac{k t}{a^2}, T_b = \frac{k t}{b^2}, T_c = \frac{k t}{c^2}$$

$$G \alpha n = \frac{\sin \alpha n}{\sin \alpha n \cos \alpha n + \alpha n}$$

$$G \beta n = \frac{\sin \beta n}{\sin \beta n \cos \beta n + \beta n}$$

$$G \gamma n = \frac{\sin \gamma n}{\sin \gamma n \cos \gamma n + \gamma n}$$

ここに、  
 $S_{av}$  : 供試体平均の収縮ひずみ  
 $S_{\infty}$  : 終局収縮ひずみ  
 $k$  : 拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{day}$ )  
 $f$  : 表面係数 ( $\text{cm}/\text{day}$ )  
 $t$  : 時間 (day)  
 $\alpha n$  :  $\alpha \tan \alpha = f \cdot a/k$  の  $n$  番目の根  
 $\beta n$  :  $\beta \tan \beta = f \cdot b/k$  の  $n$  番目の根  
 $\gamma n$  :  $\gamma \tan \gamma = f \cdot c/k$  の  $n$  番目の根  
 $a, b, c$  : 供試体中心から各辺までの距離 (cm)

(1)式に基づき、モルタル供試体について収縮ひずみの実測値と一致するような  $k$  と  $f$  を算定した結果を、Fig. 14 および Fig. 15 に示す。図の横軸は、終局収縮ひずみ  $S_{\infty}$  と曝露開始後 50 日経過した時点における供試体の実測ひずみ  $S_{50}$  との比を表している。また、計算値と実測値の一致は、式の線形性を考慮して、真空曝露開始後 20 日間以上経過した段階で行った。

本実験では  $S_{\infty}$  の測定を行っていないため、 $k$  と  $f$  の値は一義的には決定できず、 $S_{\infty}$  の与え方によって変化した。いずれの配合においても、 $S_{\infty}$  を大きく採ることによって  $k$  の値は零に漸近し、 $f$  は発散する傾向を示した。一方、 $S_{\infty}$  を小さく採ることによって、 $k$  は発散し、 $f$  はある値に収束する傾向を示した。これらの  $k$  および  $f$  が発散しない  $S_{\infty} / S_{50}$  および  $S_{\infty}$  の採り得る範囲を求めると、Table 3 のようになる。

セメントの種類に関して  $S_{\infty}$  を比較すると、その採り得る範囲は普通セメントを使用した場合（配合 4）が最も



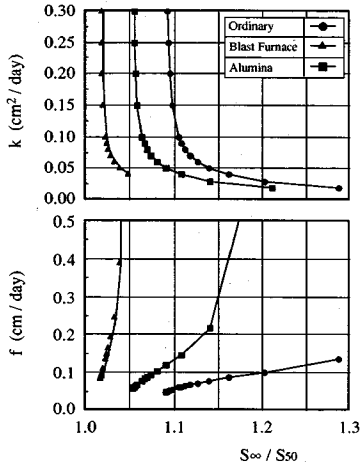


Fig.14 Variations of k and f with Cement Types

大きく、最大で  $2992 \times 10^6$  の収縮ひずみを発生する可能性のあることが明らかとなった。高炉セメントを使用した場合（配合 5）は、曝露期間 50 日の時点では最も大きな収縮を示したが、 $S_{\infty}$  の最大値は  $2144 \times 10^6$  と、普通セメントよりも小さな値となった。また、アルミナセメントを使用した場合には、最大でも  $S_{\infty}$  は  $983 \times 10^6$  となり、より長期的に真空曝露を継続しても、その終局収縮ひずみは最も小さくなると予測された。

混和材料の種類に関して同様に比較すると、 $S_{\infty}$  の最大値は、混和材料を使用しない場合（配合 4）が最も大きく、次いで膨張材（配合 3）、収縮低減剤（配合 2）、高性能減水剤（配合 1）の順となった。

以上の比較は、 $S_{\infty}$  の採り得る範囲について行ったものであるため、実際には、普通セメントと高炉セメント、あるいは混和材料なしと膨張材使用の場合には、k および f の値によって終局収縮ひずみの大きさ関係が逆転することも考えられる。しかしながら、アルミナセメントを使用した場合や高性能減水剤を使用した場合の終局収縮ひずみは、他の材料を使用した場合に比べて明らかに小さくなると考えられる。

今回は、直方体のモルタル供試体についてのみ終局収縮ひずみの推定を行ったが、今後は円柱のコンクリート供試体についても、同様の検討を行う予定である。

## 5. 結論

本研究で実施した実験および解析の結果から、今回使用した材料の範囲において、以下の事項が明らかになったと思われる。

1) アルミナセメントを使用したモルタルおよびコンクリートは、他のセメントを使用したものよりも真空曝露による質量の減少量が少ない。

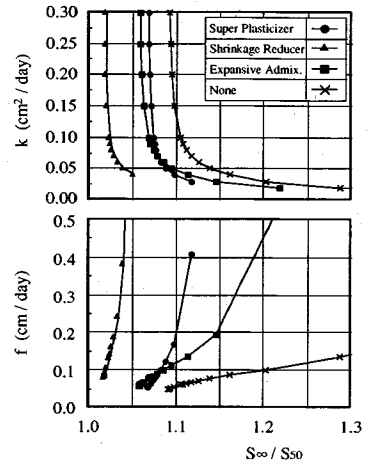


Fig.15 Variations of k and f with Admixture Types

Table 3 Possible Ranges of Ultimate Shrinkage Strain

Mix No.	Cement	Admixture	$S_{\infty} / S_{50}$	$S_{\infty} (x 10^6)$
1	Ordinary	Super Plasticizer	1.07 ~ 1.15	820 ~ 881
2	Ordinary	Shrinkage Reducer	1.02 ~ 1.05	1257 ~ 1294
3	Ordinary	Expansive Admix.	1.06 ~ 1.30	2073 ~ 2543
4	Ordinary	None	1.09 ~ 2.00	1631 ~ 2992
5	Blast Furnace	None	1.02 ~ 1.05	2083 ~ 2144
6	Alumina	None	1.05 ~ 1.20	860 ~ 983

2) シリカフェームあるいは膨張材を使用したコンクリートを真空中に曝露した時の質量の減少量は、これらを使用しない場合に比べて僅かに小さい。また、モルタルの場合には、質量の変化に及ぼす混和材料の影響は小さい。

3) アルミナセメントを使用したモルタルおよびコンクリートは、他のセメントを使用したものよりも真空曝露による収縮量が小さい。

4) 高性能減水剤あるいは収縮低減剤を使用したモルタルを真空中に曝露した時の収縮量は、混和材料を使用しない場合に比べて小さい。また膨張材を使用したモルタルは、水和初期に大きく膨張するものの、真空曝露による収縮量も増大する。一方、コンクリートの場合には、収縮量に及ぼす混和材料の影響は小さい。

5) 真空中に曝露したモルタルの圧縮および曲げ強度は、いずれのセメントならびに混和材料を使用した場合においても、同材齢の水中養生供試体の強度より大きい。この強度の増大量は、特にアルミナセメントを使用した場合に大きく、膨張材を使用した場合には小さい。

6) コンクリートの場合、真空曝露による強度の増大効果はアルミナセメントを使用した場合に大きく、他のセメントや混和材料を使用した場合には小さい。

7) 材齢 70 日までの収縮ひずみの実測値および線形拡散方程式から推定されたモルタルの終局収縮ひずみは、真空曝露による収縮ひずみの低減において、アルミナセ

メントならびに高性能減水剤が有効であることを示すものである。

以上の結果をまとめると、アルミナセメントは月の真空環境下における使用に比較的適していると言えそうである。特に、アルミナセメントは月での製造が可能であることに加え、コンクリートの養生に必要な時間やエネルギーを低減できることなどから、期待できるセメントの一つであると思われる。一方、混和材料に関しては本研究の範囲においては明確な効果が見られず、他の混和材料をも含めたさらなる検討が必要と考えられる。

また、本報では拡散方程式による解析的なアプローチに関しても若干触れた。これは本文中にも述べたように、長期的な真空曝露の影響を把握する手段の一つとして有効と考えられる。本研究では、解析に必要なデータが十分に与えられたとは言いが、既往の研究で得られたデータなどを使用して、さらなる検討を進めたい。

謝辞：本研究を進めるに当たり、清水建設技術研究所の方々に多大なる援助ならびに御指導をいただきました。また、本論文をまとめるに当たっては、早稲田大学理工学部土木工学科・関博教授に多くのご指導を賜りました。ここに謹んで感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Mackenzie, J. D. and Claridge, R. C. : Glass and Ceramics from Lunar Materials, *Space Manufacturing 3/ Facilities, Proceedings of the fourth Princeton/ AIAA/ SSI Conference*, p. 135, 1979.
- 2) Lin, T. D. : Concrete for Lunar Base Construction, *Concrete International*, Vol. 9, No. 7, pp. 48-53, 1987.
- 3) Agosto, W. N., Wickman, J. H., and James, E. : Lunar Cements / Concretes for Orbital Structures, *Space 88 / Engineering, Construction and Operations in Space*, ASCE, pp. 157-168, 1988.
- 4) Young, J. F. : Cement-Based Materials for Planetary Facilities, *Space 88 / Engineering, Construction and Operations in Space*, ASCE, pp. 134-145, 1988.
- 5) Kanamori, H., Matsumoto, S., and Ishikawa, N. : Long-term Properties of Mortar Exposed to a Vacuum, *Lunar Concrete*, ACI SP-125, pp. 57-69, 1991.
- 6) 金森洋史, 松本信二 : 真空曝露および種々の乾燥作用を受けたモルタルの物性変化, *土木学会論文集* No. 478 / V-21, pp. 81-90, 1993.
- 7) Mishulovich, A., Lin, T. D., and Tresouthick, S. W. : Lunar Cement Formulation, *Lunar Concrete*, ACI SP-125, pp. 255-264, 1991.
- 8) Knudsen, C. W., et al. : Recent Developments of the Carbotek Process for Lunar Oxygen Production, *AIAA Space Programs and Technologies Conference*, Huntsville, 1992.
- 9) Lin, T. D., Love, H., and Stark, D. : Physical Properties of Concrete Made with Apollo 16 Lunar Soil Sample, *The Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century NASA*, pp. 483-487, 1987.
- 10) Neville, A. M. : *Properties of Concrete*, Pitman Publishing Ltd., London, 1973.
- 11) 中条金兵衛 : 各種セメントの硬化乾燥収縮ときれつ対策, *セメント技術年報*, No. 13, pp. 119-123, 1959.
- 12) 塚山隆一 : アルミナセメントの転移とその影響, *コンクリート・ジャーナル*, Vol. 6, No. 12, pp. 35-38, 1968.
- 13) 長瀧重義 : アルミナセメントコンクリートの強度について, *コンクリート・ジャーナル*, Vol. 6, No. 11, pp. 16-24, 1968.
- 14) 大岸佐吉 : コンクリートの組織構造と力学的性質, *コンクリート工学*, Vol. 19, No. 11, pp. 58-67, 1981.
- 15) 阪田憲次, 蔵本 修 : 乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究, *土木学会論文報告集*, No. 316, pp. 145-152, pp. 145-152, 1981.
- 16) 秋田 宏, 藤原忠司, 尾坂芳夫 : モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動, *土木学会論文集*, No. 420/ V-13, pp. 61-69, 1990.
- 17) 中西正俊 : コンクリートおよびモルタルの乾燥収縮過程を拡散方程式で表示したときの諸係数について, *日本建築学会論文報告集*, No. 190, pp. 11-17, 1971.

(1994. 7. 25 受付)

## EFFECTS OF CEMENT AND ADMIXTURE ON THE PROPERTIES OF VACUUM-EXPOSED MORTAR AND CONCRETE

Hiroshi KANAMORI

Mortar and concrete specimens made with various cements and admixtures were exposed to vacuum conditions. Changes in weight, strain, and strengths of these specimens were measured in order to see how these properties were affected by the vacuum and to find out suitable cements and admixtures to be used for lunar concrete. Ultimate shrinkage strains of the vacuum-exposed mortar were also estimated using linear diffusion equation. A result of these experiments and analyses indicated that alumina cement could be the best cement to be used on the moon from the view point of shrinkage control. It was also suggested that the diffusion analyses would be useful to predict long-term effects of vacuum.

# 地震を科学するCRC専門技術

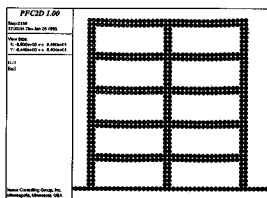
耐震  
免震

倒壊、瓦解  
崩壊

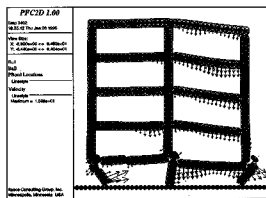
CRCでは、地盤、岩盤、橋梁構造物、地中構造物、ビル等の耐震、崩壊、安定性、液状化等、地震に関する種々の解析・評価を支援する専門技術を備えております。

断裂  
亀裂

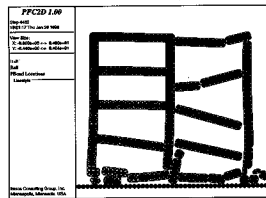
液状化



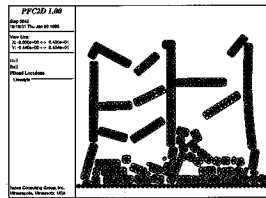
初期形状



崩壊モード①

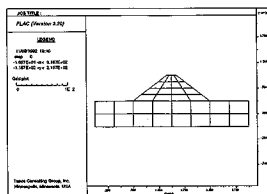


崩壊モード②

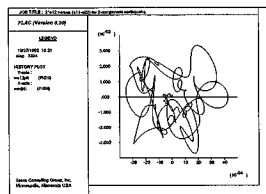


崩壊モード③

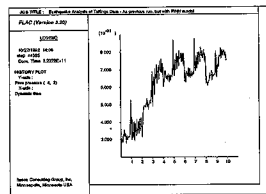
## 地震による建物の崩壊過程 (PFC使用)



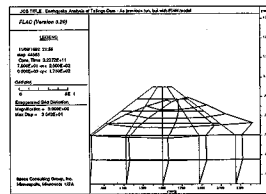
初期形状



変みの時間軌跡



間隙水圧の時刻歴

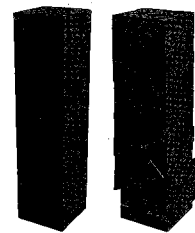


破壊状態

## 地震によるフィルダムの液状化による破壊 (FLAC使用)

### 解析コード

- SHAKE : 地盤地震応答解析プログラム
- DYNA2E : 骨組構造物の耐震解析プログラム
- DINAS : 構造物-地盤連成地震応答解析プログラム
- UDEC, 3DEC : 2次元, 3次元個別要素法プログラム
- FLAC, FLAC-3D : 2次元, 3次元有限差分法プログラム
- PFC, 3DPFC : 2次元, 3次元粒状体挙動解析プログラム
- SLOPE, Mr. SOIL : 地盤安定解析プログラム
- KASSETU-5X : 矢板連続壁の仮設計プログラム



柱の崩壊 (3DEC使用)

株式会社 **CRC総合研究所**

日本技術開発研究所

ニアリング部  
東区南砂2-7-5 <TEL>(03)5634-5789  
学システム営業部  
区久太郎町4-1-3 <TEL>(06)241-4121



\* 8 0 1 0 3 2 3 \*

# 土と水の連成逆解析プログラム

未来設計企業

CRC

# UNICOUP

応力解析と浸透解析がドッキングした!

軟弱地盤の解析に!

海洋開発・埋立

盛土・掘削

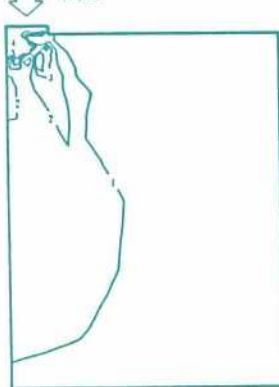
## 出力項目

- 各節点での変位、各要素での応力
- 各節点での全水頭・圧力水頭 他
- 豊富な図化処理  
変位図、変位ベクトル図、応力ベクトル図、応力コンター図、安全率コンター図、水頭コンター図、圧力水頭コンター図

## プログラムの特長

- 応力と地下水の流れをカップルさせた問題が解析可能です。(圧密含む)
- 地下水の流れは飽和・不飽和域を対象としています。
- 多段掘削・盛土や降雨等が扱えます。
- 梁や連結要素も扱え実用的です。
- 経時観測記録(変位・水位)があれば、非線形最小二乗法に基づき変形係数や透水係数が逆解析できます。(順解析、逆解析がスイッチにて選択可能です。)
- 弾性・非線形弾性・弾塑性・弾粘塑性を示す地盤が扱えます。  
非線形弾性(電中研式、ダンカン・チャンの双曲線モデル)  
弾塑性(ドラッカー・ブラガー、モール・クーロン、カムクレイモデル、ハードニング、ソフトニング)  
弾粘塑性(関口・太田モデル)

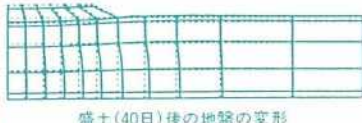
(荷重)



応力増分コンター(Δσ V)  
(10日後)



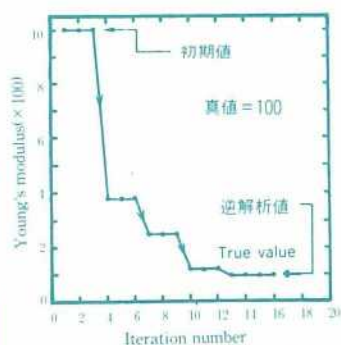
変位ベクトル図(40日後)



盛土(40日)後の地盤の変形



盛土(40日)後の地下水の流れと水頭  
コンターおよび自由水面



ヤング率と繰り返し回数関係  
逆解析によるパラメータの推定

この製品は、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。  
通商産業省 特別認可法人

IPA 情報処理振興事業協会

株式会社CRC総合研究所

西日本事業部

〒105 東京都港区芝公園三丁目1番38号  
TEL.(03) 3437-2301

問合せ先

〒541 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3  
(06) 241-4121 営業担当:岩崎  
(03) 3665-9741 本社窓口:菅原