

## コンクリート工学 第2回

### コンクリート材料(1)

- ・セメント&骨材



# セメント

### 【セメントの歴史】

- ・エジプトのピラミッドで焼き石膏と石灰が用いられている。
- ・イギリスのレンガ職人J. Aspdinが石灰石と粘土を混ぜたスラリーを石灰窯で高温焼成したものを粉砕してセメントを作る。

セメントの硬化後の状態 = Portland島産の天然石

Portland Cement(ポルトランドセメント)と命名

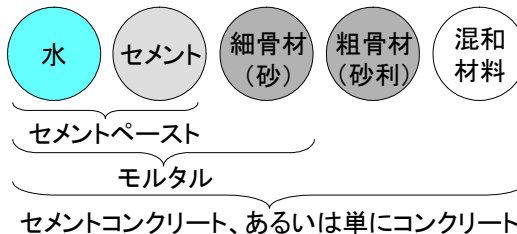
- ・1875年(明治8年) 宇都宮三郎(工部省技術官)がセメントの国産化に成功

### 【コンクリートとは?】

骨材(Aggregate)を結合材(Binder)で固めた材料の総称

Concrete:

- a. 具体的な、凝結した
- n. コンクリート、凝結物
- vt. コンクリートで固める、凝結させる



### 【コンクリートの特徴】

#### 長所

- ・型枠によって任意の形状で構造物を作ることができる。
- ・材料の調達が容易で、現在では「生コン」をほとんどの地域で入手できる。
- ・材料と配合を変えることにより、所要の強度の部材を容易に作ることができる。
- ・耐久性、耐火性などが他の材料より優れている。
- ・構造物の維持、管理費が他の材料より少なくて済む。
- ・製造、施工が比較的容易で、特別な熟練工を必要としない。
- ・価格が安く、経済的である。

#### 短所

- ・重量が重く、基礎工事費が大となる。
- ・圧縮強度に比べ、引張強度が極めて小さく、もろい。
- ・収縮による体積変化が大きく、ひび割れを発生しやすい。
- ・所要の強度を発揮するのに養生日数を要する。
- ・構造物の解体に時間と費用がかかる。
- ・品質に対する影響要因が多く、ばらつきが比較的大である。

### 【JISに規定されているセメント】

JISに規定有り	JISに規定なし
普通ポルトランドセメント	超速硬セメント
早強ポルトランドセメント	アルミナセメント
超早強ポルトランドセメント	油井セメント
中庸熱ポルトランドセメント	地熱セメント
低熱ポルトランドセメント	白色ポルトランドセメント
耐硫酸塩ポルトランドセメント	カラーセメント
高炉セメント	超微粉末セメント
シリカセメント	低発熱型3成分セメント
フライアッシュセメント	膨張セメント

### 【ポルトランドセメントの原料】

表 3-6 ポルトランドセメントの主原料(セメント1tをつくるのに必要な原料)

	原料	主成分	セメント1tをつくるのに必要な量	換算
石灰質原料 (80%)	石灰石	CaO (60~66%)	約 1 080 kg	一般に CaCO <sub>3</sub> として95%以上の良質のものが使用される。
粘土質原料 (20%)	粘土	SiO <sub>2</sub> (20~26%) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (4~9)	約 220 kg	粘土、頁岩、泥岩、粘板岩、ローム等。
	珪石	SiO <sub>2</sub> (補充)	約 60 kg	粘土中の SiO <sub>2</sub> が不足するときこれを補充するために加えるもので、軟質珪石、可溶性白土等。
	鉄滓	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (2~3.5)	約 30 kg	粘土中の Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> を補充するために加えるもので、鋼かみ、パーライトシンダー等。
	石膏	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O (3.0)	約 35 kg	凝結時間を調節する目的で加えるもので、化学石膏・天然石膏。

(石灰等の燃料108 kg, 電力94 kwh)



写真68 セメントの主原料「石灰石」

## 【ポルトランドセメントの製造方法】

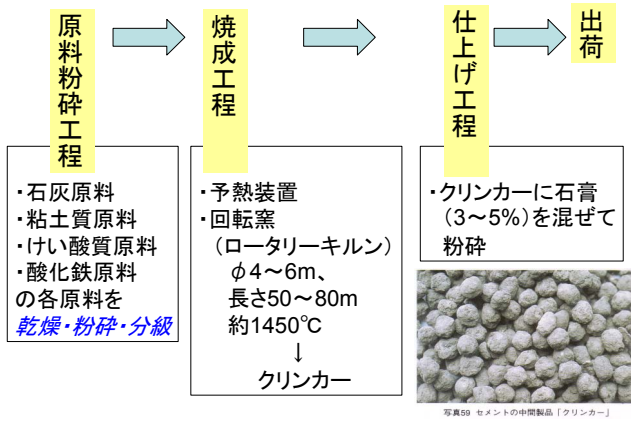


写真64 NSP方式の焼成装置 (手前の太い円筒が回転窯)



写真62 回転窯の内部

## 【ポルトランドセメントの組成化合物】

主な化合物 → CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>

表 2.1 セメントの組成化合物とその特性

名称	エーライト (Alite)	ビーライト (Belite)	間隙物質	
			アルミネート相	フェライト相
主成分	けい酸三カルシウム	けい酸二カルシウム	アルミン酸三カルシウム	鉄アルミン酸四カルシウム
記号*	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
密度 (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>2)</sup>	3.13	3.28	3.00	3.77
強度発現 <sup>3)</sup> (相対的比較)	初期 (材齢 1 日程度)	中	小	大
	早期 (材齢 3~28 日)	大	中	小
	長期 (材齢 28 日以降)	中	大	小
水和熱 <sup>4)</sup> (cal/g)	120	62	207~320	100
化学抵抗性 <sup>5)</sup> (相対的比較)	中	大	小	大
乾燥収縮 <sup>6)</sup> (×10 <sup>-4</sup> ) (収縮分担係数)	46~79	77~106	233~322	167~169

\* : C=CaO, S=SiO<sub>2</sub>, A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, F=Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

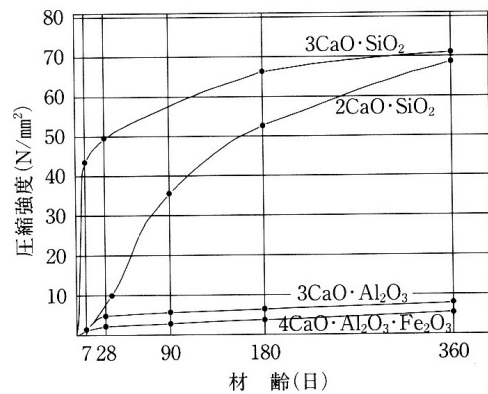
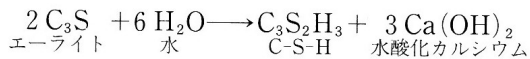


図 2.2 各クリンカー鉱物の圧縮強度発現 (Bogue と Lerch)<sup>4)</sup>

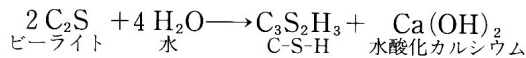
## 【ポルトランドセメントの水和反応】

### ① エーライト (C<sub>3</sub>S)



けい酸カルシウム水和物 C-S-H : 強度発現に影響大  
水酸化カルシウム : C-S-Hの硬化を促進  
コンクリートをアルカリに保つ

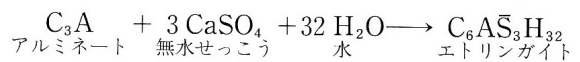
### ② ビーライト (C<sub>2</sub>S)



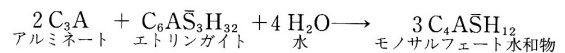
エーライトに比べ、水酸化カルシウムの生成量が少ないので、C-S-Hの硬化が遅れる。

### ③ アルミネート相 (C<sub>3</sub>A)

単独で水和すると、高い反応熱を発生し、急結する。  
そこに、石膏が入ると、急結が緩和される。



石膏が消費されると

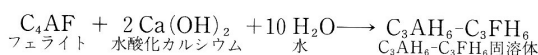


この反応は初期に起こるので、凝結・強度に影響あり

注 エトリンガイト: 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·32H<sub>2</sub>O

### ④ フェライト相 (C<sub>4</sub>AF)

単独では、急結する。石膏との共存により、急結が抑制される。



凝結・強度にほとんど影響なし

## 【ポルトランドセメントの品質】

### セメントの化学的性質

#### ① 強熱減量 (ig. loss)

セメントを900~1000°Cで強熱したときの質量減少量  
風化: 貯蔵中のセメントが空気中の水分や二酸化炭素を吸収し、軽微な水和反応を起こすこと。風化したセメントは強熱減量が多い。

#### ② 酸化マグネシウム (MgO):

MgOは石灰岩の不純物としてセメント中に混入する。含有量が多いと、膨張ひび割れを起こす。

MgOが多いほど → 比重が大、長期強度が低、水和熱が大、セメントの緑色が強(少ないと黄色が強)

③三酸化硫黄強熱減量(SO<sub>3</sub>)

石膏の成分として存在する  
SO<sub>3</sub>が多いほど、早期強度が高く、収縮が小さい。

④アルカリ(R<sub>2</sub>O)

セメント中の酸化ナトリウム(Na<sub>2</sub>O)と酸化カリウム(K<sub>2</sub>O)  
→ Na<sub>2</sub>O + 0.658 K<sub>2</sub>O  
→ R<sub>2</sub>O  
アルカリ骨材反応との関連  
低アルカリ型ポルトランドセメント 0.6%以下

セメントの物理的性質

①密度

ポルトランドセメントの密度は、3.14~3.17g/cm<sup>3</sup>  
普通ポルトランドセメントの密度: **3.15g/cm<sup>3</sup>**

②比表面積

セメント1gあたりの粒子の全表面積を表す  
粉末度と同じ  
比表面積が大 → セメントの凝結が早く、  
水和熱が高く、  
初期の強度発現が大きい

表3-7 ポルトランドセメントの粉末度

	比表面積(ブレン値)(cm <sup>2</sup> /g)				
	普通セメント	早強セメント	中庸熱セメント	低熱セメント	耐硫酸塩セメント
規格値	2 500 以上	3 000 以上	2 500 以上	2 500 以上	2 500 以上
測定値	3 100~3 600	3 900~4 700	2 900~3 300	3 120~3 300	3 140~

③凝結

セメントが水和反応によって流動性を失い、固化する現象  
始発:加水後、流動性を失い始める時点  
終結:流動性が失われてしまった時点

表3-8 ポルトランドセメントの凝結時間

		凝 結 時 間				
		普通セメント	早強セメント	中庸熱セメント	低熱セメント	耐硫酸塩セメント
規格値	始発 (min) 結結 (h)	60 以後 10 以内	45 以後 10 以内	60 以後 10 以内	60 以後 10 以内	60 以後 10 以内
測定値 (平均)	始発 (h-min) 終結 (h-min)	2-21 3-11	2-05 2-52	4-07 5-22	2-58 4-43	2-42 4-32

- ・水量が多いほど凝結は遅れる
- ・湿度が低いほど凝結は早くなる
- ・C<sub>3</sub>Aが多いと凝結は早い
- ・風化するとも異常凝結を起こすことがある
- ・温度が高いほど凝結は早まる
- ・粉末度が高いほど凝結は早い

④安定性

セメントの凝結硬化過程において、異常な形状変化が生じないこと。セメント中に遊離したCaO、SO<sub>3</sub>、やMgOが過剰に存在すると、膨張ひび割れや異常な形状変化を生じる

⑤強さ

化合物組成、石膏含有量、比表面積により変化する。モルタル(セメント:標準砂=1:3、W/C=0.5)の強さにより表す。

表3-9 ポルトランドセメントの圧縮強さの規格と実際強さ

種類	材 齢	強 さ				
		圧 縮 強 さ N/mm <sup>2</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )				
		1日	3日	7日	28日	91日
普通セメント	規格	—	28.7(281)	43.5(426)	60.8(596)	68.6(673)
	実際	—	12.5以上	22.5以上	42.5以上	—
早強セメント	規格	26.8(263)	45.1(442)	54.3(533)	64.3(631)	—
	実際	10.0以上	20.0以上	32.5以上	47.5以上	—
超早強セメント	規格	—	30.0以上	40.0以上	50.0以上	—
	実際	—	20.0以上	30.0以上	40.0以上	—
中庸熱セメント	規格	—	20.0(196)	28.0(283)	50.0(496)	65.8(645)
	実際	—	7.5以上	15.0以上	32.5以上	—
低熱セメント	規格	—	11.6(114)	17.0(167)	40.5(397)	71.8(704)
	実際	—	—	7.5以上	22.5以上	42.5以上
耐硫酸塩セメント	規格	—	28.8(282)	41.4(406)	55.0(539)	—
	実際	—	10.0以上	20.0以上	40.0以上	—

⑥水和熱

セメントに加水した時点から所定の材齢までの間に発生した熱量の総和  
・セメントの水和反応は、発熱反応である  
・熱量は、化合物組成と比表面積により求まる

【セメントの種類と用途】

①普通ポルトランドセメント

全国どこでも入手できる最も汎用性の高いセメント  
シェア:約73%

②早強ポルトランドセメント

普通セメントよりC<sub>3</sub>Sの含有量を多くし、C<sub>2</sub>Sを少なくするとともに粉末度を高めたもの。初期強度の発現性に優れる。  
普通セメントの材齢3日、7日における強度を1日、3日で発現  
緊急工事、寒冷期の工事、コンクリート製品

③中庸熱ポルトランドセメント

水和熱を低くしたセメント。C<sub>3</sub>SとC<sub>3</sub>Aの含有量を制限し、C<sub>2</sub>Sをかなり多くしたもの。乾燥収縮が小さい。  
ダム、大規模橋脚工事

④低熱ポルトランドセメント

中庸熱ポルトランドセメントより水和熱の低いセメント  
C<sub>2</sub>Sを増やして、C<sub>3</sub>Aを減らしたもの  
大型構造物に適用

⑤耐硫酸塩ポルトランドセメント

土壌中の硫酸塩や海水や工場廃水などに対する耐硫酸塩の工場を目的としたもの。C<sub>3</sub>A含有量を4%以下に制限し、C<sub>4</sub>AFを多くしてある。また、強度発現速度を補うため、C<sub>3</sub>Sを多くしてある。

⑥低アルカリ形ポルトランドセメント

全アルカリ量R<sub>2</sub>Oを0.6%以下としたセメント。アルカリ量が0.6%以下であれば、たとえ反応性骨材を用いてもアルカリ骨材反応は起こらない。

⑦混合セメント

ポルトランドセメントに混合材を加えたセメント  
混合材 → 高炉スラグ、フライアッシュ、シリカヒューム

混合セメントの特徴

- ・混合材は、それ自体では水硬性がなく、セメントと共存することによって反応する。
- ・早期の強度は低いが、長期強度はポルトランドセメントと同程度かそれ以上となる。
- ・水和熱が低い
- ・化学抵抗性が高い(Ca(OH)<sub>2</sub>が少ないため)

# 骨材

## 【骨材の種類】

### ・粒径による分類

細骨材: 10mmふるいを全部通り、5mmふるいを質量で85%以上通過する骨材

粗骨材: 5mmふるいに質量で85%とどまる骨材



### ・採取場所、製造方法の違いによる分類

天然骨材 : 川砂、川砂利

海砂、海砂利

山砂、山砂利

半人工骨材: 砕砂、砕石

軽量骨材 : 人工骨材

高炉スラグ骨材



川砂



人工軽量骨材



砕石

## 【骨材の物理的性質】

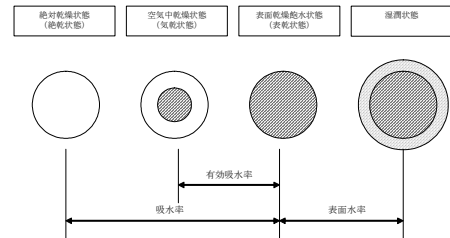
### ・含水状態

絶対乾燥状態 (絶乾状態)

空気中乾燥状態 (気乾状態)

表面乾燥飽水状態 (表乾状態)

湿潤状態



### ・吸水率

表乾状態の骨材に含まれる全水量(吸水量)の、絶乾状態の骨材質量に対する百分率

$$\text{吸水率}(\%) = \frac{W_s - W_D}{W_D} \times 100$$

ここで、 $W_s$ : 表乾状態の質量、 $W_D$ : 絶乾状態の質量

天然骨材は、3%以下のものが多い。

一般に、吸水率が大きいほど、強度・耐久性は低い。

土木学会コンクリート標準示方書

細骨材: 3.5%以下を標準

粗骨材: 3.0%以下を標準

### ・表面水率

表面水量の、表乾状態の骨材質量に対する百分率

$$\text{表面水率}(\%) = \frac{W - W_s}{W_s - W} \times 100$$

$$W_s = \frac{W_\ell}{D_s}$$

ここで、 $W_\ell$ : 試料の質量(g)

$W$ : 試料で置換された水の質量(g)

$D_s$ : 表乾状態

表 4.6 表面水率による骨材の状態

骨材の状態	表面水率(%)
ぬれた砂利または砕石	0.5~1
非常にぬれている砂 (にぎると手のひらがぬれる)	5~8
普通にぬれた砂 (にぎると形を保ち手のひらにわずかに水分がつく)	2~4
湿った砂 (にぎっても形はくずれ手のひらにわずかに湿りを感じる)	0.5~2

### ・密度

表乾密度

絶乾密度

土木学会コンクリート標準示方書

細骨材: 絶乾密度が2.5g/cm<sup>3</sup>以上を標準

粗骨材: 絶乾密度が2.5g/cm<sup>3</sup>以上を標準

種類	密度の範囲	備考
川砂、川砂利	2.5~2.65	表乾密度
山砂、山砂利	2.3~2.5	川砂よりやや軽い
スラグ骨材	2.2~2.7	工場、製法により異なる
人工軽量骨材	粗骨材 1.25~1.3 細骨材 1.6~1.75	市販5銘柄 市販5銘柄
大島火山れき	粗骨材 1.6~1.9	—
浅間火山れき	粗骨材 0.9~1.0	—

**・粒度**

骨材の大小粒が混合している程度

大小粒が適度に混合している骨材は、骨材間の空隙が小さいので、セメントペースト量が少なくて済み、経済的なコンクリートができる。

表 2.5 細骨材の粒度の標準

ふるいの呼び寸法 (mm)	ふるいを通るものの質量百分率 (%)
10	100
5	90~100
2.5	80~100
1.2	50~90
0.6	25~65
0.3	10~35
0.15	2~10

注：砕砂あるいは高炉スラグ細骨材を単独に用いる場合には、2~15%にしてよい。

表 2.6 粗骨材の粒度の標準

粗骨材の最大寸法 (mm)	ふるいを通るものの質量百分率 (%)									
	60	50	40	30	25	20	15	10	5	2.5
50~5	100	95~100	-	-	35~70	10~35	-	0~5	-	-
40~5	-	100	95~100	-	35~70	10~30	-	0~5	-	-
30~5	-	-	100	95~100	-	40~75	-	10~35	0~10	0~5
25~5	-	-	-	100	95~100	30~70	-	0~10	0~5	-
20~5	-	-	-	-	100	90~100	-	20~35	0~10	0~5
15~5	-	-	-	-	-	100	90~100	40~70	0~15	0~5
10~5	-	-	-	-	-	-	100	90~100	0~40	0~10
50~25*	100	90~100	35~70	-	0~15	-	-	0~5	-	-
40~20*	-	100	90~100	-	20~55	0~15	-	0~5	-	-
30~15*	-	-	100	90~100	-	20~55	0~15	0~10	-	-

\*：骨材の分離を防ぐため、粒群別に計量する場合に用いるもの、単独には用いない。

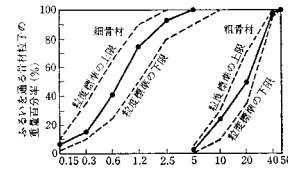


図 2.9 骨材の粒度曲線

**・粒形**

球に近いほど流動抵抗が小さいので、ワーカビリティがよい。

粒形の良否の判定 → 実積率

実積率 大 → 球に近い

$$\text{実積率}(\%) = \frac{T(100+q)}{\rho}$$

ここで、T：絶乾状態の単位質量 (kg/l)

q：吸水率 (%)

ρ：表乾密度

**・単位容積質量**

単位容積あたりの骨材の質量

配合設計や実積率、コンクリートの質量の算出に利用

骨材の種類		単位容積質量 (kg/リットル)	実積率 (%)
砂の最大寸法	25mm	1.65	65.4
	20mm		63.4
碎石の最大寸法	20mm	1.45~1.55	55~60
砂の粗粒率	3.3(5mm)	1.75	67.3
	2.8(2.5mm)	1.70	65.3
	2.2(1.2mm)	1.60	61.5
人工軽量骨材	20mm(粗骨材)	0.7~0.8	60~65
	細骨材(2.5mm)	0.9~1.2	50~59
大島火山れき	20mm粗骨材	0.85~0.9	45~50
	浅間火山れき	20mm粗骨材	0.5~0.55

**【骨材の化学的性質】**

**・アルカリ骨材反応**

骨材がコンクリート中でセメントや混和剤などに含まれるアルカリと化学反応を起こす現象

アルカリシリカ反応

アルカリ炭酸塩岩反応

早いもので、3~4年後にひび割れが生じる。

反応性骨材

アルカリ骨材反応を引き起こす骨材



**【骨材中の有害物質】**

**・塩化物**

海砂が問題

コンクリート中に塩化物が混入すると、鉄筋が錆びる。通常は、鉄筋はアルカリ雰囲気中のコンクリートにより保護されている。鉄筋表面に保護膜が生成されている。塩化物イオンは、この保護膜を破壊する。



他には、泥土、有機不純物

**【各種骨材】**

**・軽量骨材**

膨張頁岩、膨張粘土、フライアッシュ(火力発電所から生じる燃焼後の微粒炭分)などを主原料として人工的に製造した構造物用人工骨材。



・リサイクル資源骨材

再生骨材:コンクリート塊を粉砕したもの  
吸水率による区分(I、II、III種)



・溶融スラグ骨材

一般可燃ごみの焼却灰をさらに1500°C程度で溶融固  
化したもの

