

平成16年度 前期

## コンクリート工学

～ 講義を始める前に ～

### 配布資料について

スクリーンに映し出される資料中、赤字の部分が配布資料中では空白になっています。講義中に自分で書き込むこと！

## コンクリート工学 第2回

### コンクリート材料(1) ・セメント



途中と最後に、小テスト有り！！

### 【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る。
- ・イギリスのれんが職人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



セメントコンクリート、あるいは単に

### 【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つくることできる。
- ・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つくることができる。
- ・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、引張強度がきわめて小さく、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。
- ・品質に対する影響因子が多く、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
ポルトランドセメント	超速硬セメント、アルミナセメント
ポルトランドセメント	油井セメント、地熱セメント
超早強ポルトランドセメント	白色ポルトランドセメント、カラーセメント
中庸熱ポルトランドセメント	超微粉末セメント
低熱ポルトランドセメント	低発熱型3成分セメント
耐硫酸塩ポルトランドセメント	膨張セメント
高炉セメント	
シリカセメント	
フライアッシュセメント	

### 【ポルトランドセメントの原料】

ポルトランドセメントの正原料(セメント1tを作るのに必要な原料)

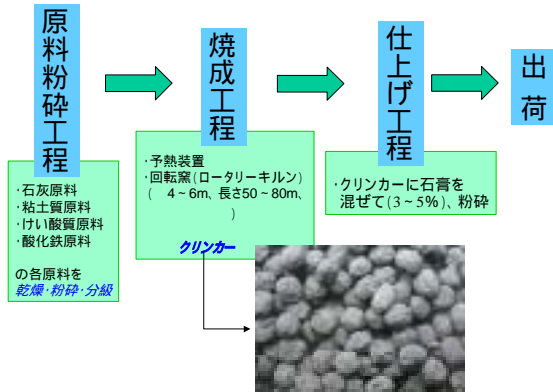
原料	主成分	セメント1tを作るのに必要な量	備 考
石灰質原料 (80%)	CaO (60~66%)	約1130kg	一般にCaCO <sub>3</sub> として95%以上の良質のものを使用される。
粘土質原料 (20%)	SiO <sub>2</sub> (20~26%) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (4~9%)	約 240kg	粘土、頁岩、泥岩、粘板岩、ローム等。
	けい石 (補充)	約 50kg	粘土中のSiO <sub>2</sub> が不足するときにこれを補充するために加えるもので、軟質けい石、可溶軽石等。
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (2~3%)	約 35kg	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、斜角らみ、ペーライシトシダー等。
	CaSO <sub>4</sub> ・2H <sub>2</sub> O (3.0)	約 33kg	硬化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115kg 電熱4.1 電力110kwh

石灰石



【ポルトランドセメントの製造方法】



【ポルトランドセメントの組成化合物】

主な化学成分 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 (AEm)	ビーライト (BEm)	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	アルミニウム酸三カルシウム	鉄アルミニウム酸四カルシウム
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> )	3.15	3.28	3.80	3.17
強度発現** (MPa)	初期 (1日程度)	中	大	小
	中期 (10日程度)	大	中	小
	長期 (28日程度)	中	大	小
水和熱 (cal/g)	120	80	280~320	180
化学親水性** (相対的比較)	中	大	小	大
乾燥収縮** (100mm×100mm)	40~70	70~100	230~320	300~400

\*: 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>

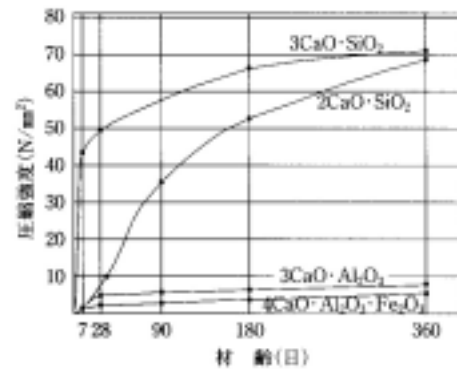


図 2.2 各クリンカー鉱物の圧縮強度発現 (Bogue と Lerch)<sup>4)</sup>

【ポルトランドセメントの水和反応】

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      に保つ

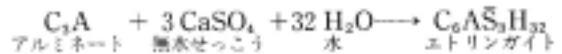
ビーライト(C<sub>2</sub>S)



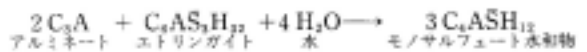
エーライトに比べ、水酸化カルシウムの生成量が少ないので、C-S-Hの硬化が遅れる。

アルミネート相(C<sub>3</sub>A)

単独で水すると、高い反応熱を発生し、急結する。そこで、石こうが入ると、急結が緩和される。



石こうが消費されると、

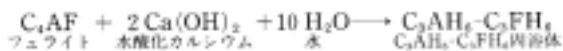


この反応は、初期に起こるので、凝結・強度に影響あり

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

フェライト相(C<sub>4</sub>AF)

単独では、急結する。石こう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

強熱減量 (ig. loss): セメントを900~1000 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大きい。

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)

<p>三酸化硫黄 (SO<sub>3</sub>) 石こう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。</p> <p>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 低アルカリ形ポルトランドセメント 0.6%以下</p>	<p><b>セメントの物理的性質</b></p> <p>密度 ポルトランドセメントの密度は、 g/cm<sup>3</sup>程度</p> <p>普通ポルトランドセメントの比重: 3.15g/cm<sup>3</sup></p> <p>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 セメントの凝結は早く、 水和熱が高く、 初期の強度発現が大きい。</p> <p>ポルトランドセメントの製法</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">規格種</th> <th colspan="5">比表面積 (ブレンド値) [m<sup>2</sup>/g]</th> </tr> <tr> <th>普通セメント</th> <th>早強セメント</th> <th>超早強セメント</th> <th>中庸熱セメント</th> <th>耐硫酸塩セメント</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>規格値</td> <td>2500以上</td> <td>3300以上</td> <td>4000以上</td> <td>2500以上</td> <td>2500以上</td> </tr> <tr> <td>規定値</td> <td>2500~2600</td> <td>3300~4000</td> <td>3900~4200</td> <td>2500~3300</td> <td>2340~</td> </tr> </tbody> </table>	規格種	比表面積 (ブレンド値) [m <sup>2</sup> /g]					普通セメント	早強セメント	超早強セメント	中庸熱セメント	耐硫酸塩セメント	規格値	2500以上	3300以上	4000以上	2500以上	2500以上	規定値	2500~2600	3300~4000	3900~4200	2500~3300	2340~																																																																																																																				
規格種	比表面積 (ブレンド値) [m <sup>2</sup> /g]																																																																																																																																											
	普通セメント	早強セメント	超早強セメント	中庸熱セメント	耐硫酸塩セメント																																																																																																																																							
規格値	2500以上	3300以上	4000以上	2500以上	2500以上																																																																																																																																							
規定値	2500~2600	3300~4000	3900~4200	2500~3300	2340~																																																																																																																																							
<p>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</p> <p>ポルトランドセメントの凝結時間</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">規格種</th> <th rowspan="2">規格値</th> <th colspan="5">凝結時間</th> </tr> <tr> <th>普通セメント</th> <th>早強セメント</th> <th>超早強セメント</th> <th>中庸熱セメント</th> <th>耐硫酸塩セメント</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>規格値</td> <td>60分以内</td> <td>45分以内</td> <td>15分以内</td> <td>60分以内</td> <td>60分以内</td> </tr> <tr> <td>規定値</td> <td>30分以内</td> <td>30分以内</td> <td>3分以内</td> <td>3分以内</td> <td>3分以内</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> <li>水量が多いと凝結は遅れる。</li> <li>温度が高いほど凝結は早まる。</li> <li>湿度が低いほど早くなる。</li> <li>粉末度が高いと凝結は</li> <li>C<sub>3</sub>Aが多いと凝結は早い。</li> <li>風化すると異常凝結を起こすことがある。</li> </ul>	規格種	規格値	凝結時間					普通セメント	早強セメント	超早強セメント	中庸熱セメント	耐硫酸塩セメント	規格値	60分以内	45分以内	15分以内	60分以内	60分以内	規定値	30分以内	30分以内	3分以内	3分以内	3分以内	<p>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。</p> <p>強さ: 化合物組成、石こう含有量、比表面積により変化する。 (セメント: 標準砂 = 1:3、W/C = 0.5)の強さにより表す。</p> <p>ポルトランドセメントの強さ規格と実際強さ</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">種別</th> <th rowspan="2">材料</th> <th colspan="5">引張強さ (kgf/cm<sup>2</sup>)</th> <th colspan="5">圧縮強さ (kgf/cm<sup>2</sup>)</th> </tr> <tr> <th>1日</th> <th>3日</th> <th>7日</th> <th>28日</th> <th>1日</th> <th>3日</th> <th>7日</th> <th>28日</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">普通セメント</td> <td>実際</td> <td>32.7</td> <td>50.6</td> <td>73.3</td> <td></td> <td>133</td> <td>240</td> <td>406</td> <td></td> </tr> <tr> <td>規格</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>70以上</td> <td>150以上</td> <td>300以上</td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">早強セメント</td> <td>実際</td> <td>34.2</td> <td>53.2</td> <td>66.4</td> <td>80.1</td> <td>129</td> <td>238</td> <td>338</td> <td>453</td> </tr> <tr> <td>規格</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>65以上</td> <td>130以上</td> <td>230以上</td> <td>330以上</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">超早強セメント</td> <td>実際</td> <td>47.3</td> <td>63.9</td> <td>72.4</td> <td>77.6</td> <td>202</td> <td>328</td> <td>395</td> <td>453</td> </tr> <tr> <td>規格</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>130以上</td> <td>200以上</td> <td>280以上</td> <td>350以上</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">中庸熱セメント</td> <td>実際</td> <td></td> <td>30.3</td> <td>41.7</td> <td>70.6</td> <td></td> <td>109</td> <td>172</td> <td>371</td> </tr> <tr> <td>規格</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>50以上</td> <td>100以上</td> <td>230以上</td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">耐硫酸塩セメント</td> <td>実際</td> <td>31.0</td> <td>50.0</td> <td>67.0</td> <td></td> <td>140</td> <td>233</td> <td>382</td> <td></td> </tr> <tr> <td>規格</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>70以上</td> <td>140以上</td> <td>280以上</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	種別	材料	引張強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )					圧縮強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )					1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	28日	普通セメント	実際	32.7	50.6	73.3		133	240	406		規格					70以上	150以上	300以上		早強セメント	実際	34.2	53.2	66.4	80.1	129	238	338	453	規格					65以上	130以上	230以上	330以上	超早強セメント	実際	47.3	63.9	72.4	77.6	202	328	395	453	規格					130以上	200以上	280以上	350以上	中庸熱セメント	実際		30.3	41.7	70.6		109	172	371	規格					50以上	100以上	230以上		耐硫酸塩セメント	実際	31.0	50.0	67.0		140	233	382		規格					70以上	140以上	280以上	
規格種			規格値	凝結時間																																																																																																																																								
	普通セメント	早強セメント		超早強セメント	中庸熱セメント	耐硫酸塩セメント																																																																																																																																						
規格値	60分以内	45分以内	15分以内	60分以内	60分以内																																																																																																																																							
規定値	30分以内	30分以内	3分以内	3分以内	3分以内																																																																																																																																							
種別	材料	引張強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )					圧縮強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )																																																																																																																																					
		1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	28日																																																																																																																																			
普通セメント	実際	32.7	50.6	73.3		133	240	406																																																																																																																																				
	規格					70以上	150以上	300以上																																																																																																																																				
早強セメント	実際	34.2	53.2	66.4	80.1	129	238	338	453																																																																																																																																			
	規格					65以上	130以上	230以上	330以上																																																																																																																																			
超早強セメント	実際	47.3	63.9	72.4	77.6	202	328	395	453																																																																																																																																			
	規格					130以上	200以上	280以上	350以上																																																																																																																																			
中庸熱セメント	実際		30.3	41.7	70.6		109	172	371																																																																																																																																			
	規格					50以上	100以上	230以上																																																																																																																																				
耐硫酸塩セメント	実際	31.0	50.0	67.0		140	233	382																																																																																																																																				
	規格					70以上	140以上	280以上																																																																																																																																				
<p>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定まる。</p>	<p><b>【セメントの種類と用途】</b></p> <p><b>普通ポルトランドセメント</b> 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%</p> <p><b>早強ポルトランドセメント</b> 普通セメントより C<sub>3</sub>S の含有量を多く、C<sub>2</sub>S を少なくすると共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日で発現する。 緊急工事、寒冷期の工事用、コンクリート製品</p> <p><b>中庸熱ポルトランドセメント</b> 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</p>																																																																																																																																											
<p><b>低熱ポルトランドセメント</b> 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、C<sub>3</sub>Aを減らしたものの。 大型構造物に適用</p> <p><b>耐硫酸塩ポルトランドセメント</b> 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。</p> <p><b>低アルカリ形ポルトランドセメント</b> 全アルカリ量R<sub>2</sub>Oを 以下としたセメント。アルカリ量がであれば、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。</p>	<p><b>混合セメント</b> 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</p> <p>混合セメントの特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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がそれ以上となる。</li> <li>水和熱が低い</li> <li>化学抵抗性が高い (Ca(OH)<sub>2</sub> が少ないため)</li> </ul>																																																																																																																																											