コンクリート工学の基礎と応用

北海道大学大学院工学研究科
環境機能マテリアル工学研究室
杉山　隆文

コンクリートとは？ ⇔ 構造材料

（他に鉄、石材、木材）

- 一般にはJIS製品
  （品質規格：JISA5308）
- セメント、水、骨材で構成
- 工程（流動体から固体への変化）
  練混ぜ→運搬→打込み→養生→硬化
- 圧縮強度：18～60N/mm^2
- 透水性：10^{-5}～10^{-9}ダルシー

コンクリート工学

第1章　緒論
　　よいコンクリートを造るための条件ほか
第2章　セメントの硬化および硬化体の性質
　　ポルトランドセメントの水和　ほか
第3章　まだ固まらないコンクリートの性質
　　ワーカビリティー、材料分離、初期性状ほか
第4章　コンクリートの強度
　　圧縮強度、各種強度　ほか
第5章　コンクリートの変形性能
　　応力－ひずみ曲線、弾性係数、時間依存性の変形ほか
第6章　水密性、耐久性、その他の性質
　　気象作用に対する耐久性、化学的侵食ほか

コンクリート工学（つづき）

第7章　セメントおよび水
第8章　骨材および混和材料
第9章　配合
第10章　製造およびレディーミクストコンクリート
第11章　運搬、打込み　および養生
第12章　特殊なコンクリートの施工
第13章　品質管理、品質検査および試験

コンクリートの構成

コンクリートの構成

コンクリートの一般的な混合割合
（1,000リットル当り）

コンクリートの種類

- 一般的に使用されるコンクリート
  - 一般構造物　　：普通コンクリート
- 特殊な構造物に使用されるコンクリート
  - コンクリートダム：ダムコンクリート
  - 大型構造物　　：マスコンクリート
  - 超高層ビル　　：高強度コンクリート
- 特殊な施工に使用されるコンクリート
  - 狭隘な箇所　　：高流動コンクリート
  - 水中施工　　：水中コンクリート
  - などなど

コンクリート配合設計

JCI コンクリート技術の要点

コンクリートの配合設計手順

START

粗骨材の最大寸法の選定 ← 構造物の種類、部材の寸法、鉄筋あき、かぶり

セメントの種類、スランプ、空気量の選定 ← 構造物の種類、環境条件、施工方法

配合強度の決定 ← 設計基準強度、変動係数、気温、材齢、構造物の重要度

水セメント比の決定 ← 配合強度、耐久性、水密性

フレッシュコンクリートの要求性能

1. 所要の空気量を有すること
2. 取扱いによる材料の分離をできるだけ起こさないこと
3. 適度な柔らかさを持つこと
4. 変形と流動に対する抵抗性

（コンシステンシー）

5. ゆっくりとした変形性

（プラスティシティー）

6. 比較的容易にポンプ圧送できること

（ポンパビリティー）

7. 仕上げが容易であること

（フィニッシャビリティー）

これらを総称する
コンクリートの性質

ワーカビリティー

構造物の種類
施工条件
で異なる

JCI コンクリート技術の要点

スランプとスランプフロー

スランプコーンと検尺

スランプ8cm

スランプ18cm

不適切なコンクリート

高流動コンクリート；スランプフロー；60～70cm

セメントの種類

セメントの種類		特性と用途
ポルトランドセメント（JIS R 5210）	普通ポルトランドセメント	工事用または製品用として最も多く使用されている一般的なセメントである。
	早強ポルトランドセメント	早期に高い強度が得られ、プレストレストコンクリート、寒中コンクリート、工場製品などに使用される。
	超早強ポルトランドセメント	早強ポルトランドセメントよりさらに早期に強度が得られ、緊急工事、寒中工事、グラウト用などに用いられる。
	中庸熱ポルトランドセメント	水和熱が比較的小さいセメントであり、ダムなどのマスコンクリートに使用される。
	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が低く、マスコンクリート、高強度コンクリートなどに使用される。
	耐硫酸塩ポルトランドセメント	硫酸塩との反応性が小さく、硫酸塩を含む土壌地帯での工事に適する。耐海水性にも優れている。
混合セメント	高炉セメント（JIS R 5211）	潜在水硬性のある高炉スラグを混合したセメント。化学抵抗性、水密性、アルカリ骨材反応防止効果などに優れる。
	シリカセメント（JIS R 5212）	純度の高いけい石などの粉末を混合したものであり、オートクレーブ養生をする製品に使用される。
	フライアッシュセメント（JIS R 5213）	火力発電所などから発生するフライアッシュを混合したセメント。水和熱が低いため、ダムなどのマスコンクリートに使用される。
その他	エコセメント（JIS R 5214）	都市ごみを焼却した際に発生する灰に、必要に応じて下水汚泥などの廃棄物を加えたものをセメント１ｔあたり５００ｋｇ程度原料として用いたセメント。
	白色セメント	鉄分を極端に少なくして白色にしたセメント。顔料を入れて着色することもできる。
	アルミナセメント	アルミン酸カルシウムを主成分とし、非常に早強性が高く、1日で普通ポルトランドセメントの28日に相当する強度が得られる。緊急工事用のほかキャスタブル耐火物としても利用も多い。

Raw Materials for Manufacturing Cement

セメントができるまで（原料工程・焼成工程）

セメント協会HP

セメントができるまで（仕上工程）

Process for burning

Process for pre-heating and pre-ground with rotary kiln

セメントの主成分

セメント原料（天然材料）	酸化カルシウム CaO	二酸化けい素 SiO_2	酸化アルミニウム Al_2O_3	酸化第二鉄 Fe_2O_3
石灰石	47～55%	～4%	～2%	～2%
粘土	～5%	45～80%	10～30%	3～10%
けい石	～2%	70～95%	2～10%	～5%
酸化鉄原料				40～90%
参考：ポルトランドセメント	63～65%	20～23%	3.8～5.8%	2.5～3.6%

Lime stone ⇨ $CaO + CO_2$

Clay ⇨ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + H_2O$

$3CaO \cdot SiO_2$（珪酸三石灰）
$2CaO \cdot SiO_2$（珪酸二石灰）
$3CaO \cdot Al_2O_3$（アルミン酸三石灰）
$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$（アルミン鉄酸四石灰）

硬化セメントペーストの構成

1.CSH: Calcium Silicate Hydrate
（珪酸カルシウム水和物：無定形）
2.CH: Calcium Hydroxide
（水酸化カルシウム：六角板状）
3.Ettringite（エトリンガイト：針状）
4.Monosulfate（モノサルフェート）

セメント協会提供

$$2C_3S(3CaO \cdot SiO_2)+7H_2O \rightarrow C_3S_2H_4+3Ca(OH)_2$$

$$2C_2S(2CaO \cdot SiO_2)+5H_2O \rightarrow C_3S_2H_4+Ca(OH)_2$$

$$C_3A(3CaO \cdot Al_2O_3)+3Ca^{2+}+3SO_4^{2-}+32H_2O \rightarrow C_6AS_3H_{32}$$

$$C_3A(3CaO \cdot Al_2O_3)+ C_6AS_3H_{32} +4H_2O \rightarrow 3C_4ASH_{12}$$

骨材の種類

骨材の種類	説明
砂（細骨材）および砂利（粗骨材）	岩石をその起源とし、自然の作用によって作られた骨材。採取される場所により、川砂・川砂利、海砂・海砂利、山砂・山砂利、陸砂・陸砂利などに区分して呼称されることが多い。
砕砂（細骨材）および砕石（粗骨材）	岩石を破砕して製造した骨材。粒度よって細骨材の砕砂と粗骨材の砕石となる。
スラグ骨材（細骨材、粗骨材）	金属製錬などの際に発生するスラグ（鉱さい）を原材料にして人工的に製造される骨材の総称。高炉スラグ、フェロニッケルスラグおよび銅スラグを原料とするスラグ骨材がコンクリート用骨材として実用されており、電気炉酸化スラグ、汚泥スラグなども実用化のために検討がなされている。
人工軽量骨材（細骨材、粗骨材）	けつ岩、フライアッシュなどを主原料として人工的に製造した普通の岩石と比較し密度の小さい骨材。
再生骨材（細骨材、粗骨材）	廃棄コンクリートをクラッシャなどで破砕して人工的に製造した骨材。単にコンクリートを小さく砕いて粒度調整したものが多く、このような場合には、骨材周囲にセメントペーストやモルタルが付着しており、通常の骨材より吸水率が高いなど品質が低下する。最近では、通常の骨材の品質にほぼ同等な再生骨材を製造する方法も提案されている。

コンクリート断面写真

セメントペースト
粗骨材（HFA）
砂

コンクリートの強さ

JST webラーニング教材抜粋

圧縮強度と水セメント比の関係

1、**水セメント比説**（1919年、D.A.Abrams提唱）

$\sigma = A / B^{(W/C)}$

2. **セメント水比説**（1932年、I.Lyse提唱）

$\sigma = A + B \cdot (C / W)$

3. **セメント空隙説**（1921年、A.N.Talbot提唱）

$\sigma = A + B \cdot (c / v)$　　ここで、c：セメントの絶対容積

v：単位水量と空気量との和

＊**コンクリートの強度とセメント強度の関係**

$\sigma = K\{A \cdot (C / W) + B\}$　　ここで、K：セメントの圧縮強度

図１　水セメント比と圧縮強度[4.6.2)]

JCI コンクリート技術の要点

JST webラーニング教材抜粋

問題：設計時にこの構造物で留意することは？

答：鉄筋腐食しないように、コンクリートの耐久性を高めるように設計すること

鉄筋の腐食

日本は35000kmの海岸線を有する．構造物の塩害は、主要な研究テーマ

コンクリート構造物では、鉄筋の腐食で耐久性の低下、構造安全性の低下が発生する。
塩害に対して高い抵抗性を有するコンクリート材料の開発

実験室内の腐食実験

- 供試体寸法:100×100×400mm
- 鉄筋（丸鋼：直径19mm）
- 自然電位計測：埋込み型鉛照合電極

塩水供給試験

断面

コンクリート中の鉄筋腐食

コンクリート中のマクロセル腐食機構

腐食の電気化学的反応

アノード酸化反応　$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$

カソード還元反応　$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$

$FeO \cdot (H_2O)_x$
酸化第一鉄
酸化第二鉄他

腐食によるコンクリートのひび割れ発生（腐食物の体積膨張による）

異型鉄筋の腐食

❖ コンクリートの人工バリアへの適用研究

・地下水のアタック
　カルシウム成分の溶出
　バリアや構造の機能低下
・アルカリ影響

コンクリート中の細孔溶液

		Portland Cement	Flyash 1	Flyash 2
CaO	%	64.78	6.35	5.20
SiO_2	%	21.06	49.78	48.83
Al_2O_3	%	4.86	22.54	23.98
Fe_2O_3	%	3.13	10.13	7.36
SO_3	%	2.59	0.68	0.67
MgO	%	1.22	3.61	2.44
Loss on ignition	%	1.06	3.20	3.86
Na_2O	%	0.32	0.61	0.90
K_2O	%	0.60	2.74	3.66
Total alkalies as Na_2O equivalent	%	0.71	2.41	3.31
Blaine fineness	cm^2/g	3100	2170	4950*
Apparent specific gravity	g/cm^3	ND	2.23	2.15

*after grinding

コンクリートとアルカリ

- コンクリート内部の細孔溶液
  - ・高濃度水酸化アルカリ
- セメント水和物（水酸化カルシウム）

- アルカリ骨材反応（アルカリシリカ反応）
  - ・ある種のシリカ鉱物（オパール、クリストバライト、トリジマイト、火山ガラス等）含有骨材と化学反応によるコンクリートの異常膨張

超長期間コンクリートと接することで生じる ナトリウム型ベントナイトの変質：カルシウム型化

電気泳動法を利用した促進試験

Composite of Concrete-Bentonite sand mixture under the electrical migration test

Change in color in the Bentonite

コンクリート工学における環境対応

ポルトランドセメント
CO_2 756．9kg/t
×6089万t
＝4600万t

エネルギ-起源：化石燃料燃焼
原料起源：石灰石脱炭酸

エコセメント（ＪＩＳ Ｒ５２１４）
製品１t につき，都市ゴミ焼却灰，下水汚泥などの廃棄物を５００kg（乾燥）以上使用

原料や熱源としての廃物利用，産業副産物利用の推進

石炭灰，高炉スラグ，汚泥，建設発生土
燃え殻，ばいじん，ダスト，非鉄鋼屑

沿岸の環境保全（磯焼け対策）を目指すコンクリート材料の開発

コンクリート工学

1．構造材料としてのコンクリート

2．製造，施工，硬化後の性質，（維持管理），（解体・廃棄），（リサイクル）における配慮

3．環境調和型，環境対応型コンクリート