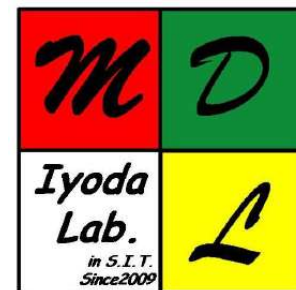


コンクリートの品質確保の ための養生の本質理解と 炭酸化の利用

芝浦工業大学 先進国際課程

教授 伊代田 岳史



A.養生の重要性！

1. 養生とはいったい何のためにするのか？
 - 養生の規準とその根拠
 - 養生の方法
2. 養生をしないとコンクリートの性能は？
 - 養生不足による不具合事例
 - 水和反応
 - 圧縮強度
 - 耐久性（中性化、塩分浸透）
3. 養生の影響範囲とその度合いは？
4. 養生の取り扱い方法の一例
5. 養生終了判定手法の提案

コンクリート構造物には . . .

- ひび割れが発生する。
- その原因は多種多様 . . .



ひび割れの制御・抑制に

設計、材料、施工、維持管理のすべてのPlayerが関与

そのPlayerの思想と管理者（発注者）の意図が大きく関与

意識の高い管理者とPlayerにより、極限まで抑制・制御可能

制御において「養生」も有効

- 新設構造物での養生は、長期耐久性確保に大切
- 既設構造物への補修における養生は、かぶりコンクリートとしては同じ



- でも、なぜ「養生」が有効に働くのか？
- そもそも「養生」を施すことは何が良いのか？

そもそもコンクリートとは

セメント



砂



石



水



↓
コンクリート

**適切な配合
適切な材料の提案**

密度の異なる物質の集合した、複合材料

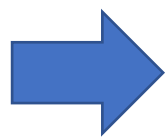
いつも同じものを安定して供給できるか？

1. 養生の規準と歴史的背景

養生とは、

「コンクリートの強度、耐久性、ひび割れ抵抗性、水密性、鋼材を保護する性能などの所要の品質を確保するため、打込み後の一定期間を硬化に必要な温度および湿度に保ち、有害な作用の影響を受けないように保護する作業」

(コンクリート標準示方書)



つまり、性能を最大限に発揮させるための手段！

コンクリートを育てる技術！！

養生とその意義

コンクリートが硬化するためのセメントの水和反応を、十分に進めるための行為

- ①水分を**与える**行為
- ②水分が**逸散するのを防ぐ**行為
- ③**温度を制御**する行為
- ④有害な作用から守る

- 所要の強度
- ひび割れ抵抗性
- 鋼材を保護する性能
- 耐久性
- 水密性
- 美観

養生日数（湿潤養生期間）の基準

●土木学会_コンクリート標準示方書（2017年度版）

日平均気温	普通ポルトランドセメント	混合セメントB種	早強ポルトランドセメント
15°C以上	5日	7日	3日
10°C以上	7日	9日	4日
5°C以上	9日	12日	5日

●日本建築学会_JASS5（2018）

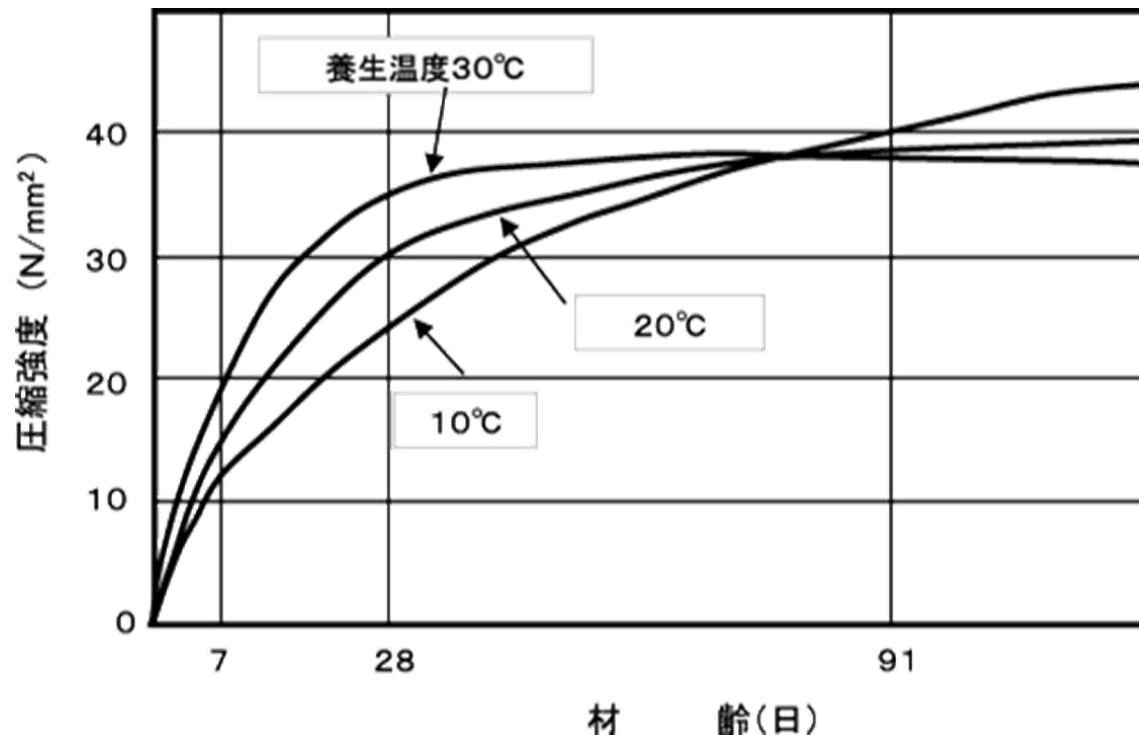
	短期および標準	長期および超長期
早強ポルトランドセメント	3日以上	5日以上
普通ポルトランドセメント	5日以上	7日以上
M,L,BB,FB	7日以上	10日以上

型枠および支保工の取り外しに必要な圧縮強度が早期に得られた場合でも養生期間内は湿潤状態を保つ必要がある。

- * 汎用でないセメントの規定がない。
- * W/Cに大きく依存する可能性がある。

温度制御養生

コンクリートは、十分に硬化が進むまで、**硬化に必要な温度条件に保ち**、低温、高温、急激な温度変化等による有害な影響を受けないように必要に応じて養生時の温度を制御するため。



(環境温度に依存するコンクリートの強度発現)

有害な作用に対する保護

コンクリート養生期間中に予想される振動、衝撃、荷重、海水等の有害な作用から保護するため。

- ・ 衝撃や過大な荷重・振動
- ・ 打ち込み作業時の降雨
- ・ 養生水の水質
- ・ 給熱養生用ヒーターの過熱

⇒ ひび割れ等の損傷から守る

どうやってこの湿潤養生期間が決められた？

土木

コンクリートが凍害を受けなくなると見なされる圧縮強度を得るまでは凍結させないように養生

初期凍害を防ぐために養生終了時に必要となる圧縮強度の標準 (N/mm²)
(コンクリート示方書)

型枠の取り外し直後に構造物は曝される環境	薄い場合	普通の場合	厚い場合
(1)コンクリート表面が水で飽和される頻度が高い場合	15	12	10
(2)コンクリート表面が水で飽和される頻度が低い場合	5	5	5

●土木学会_コンクリート標準示方書(2017年度版)

日平均気温	普通ポルトランドセメント	混合セメントB種	早強ポルトランドセメント
15°C以上	5日	7日	3日
10°C以上	7日	9日	4日
5°C以上	9日	12日	5日

どうやってこの湿潤養生期間が決められた？

建築

JASS5での表記

JASS5では、**所要の圧縮強度が確認できれば**養生期間の終了以前でも

湿潤養生を打ち切ることができる

- ・短期および標準の場合、 **10 N/mm^2** 以上
- ・長期および超長期の場合、 **15 N/mm^2** 以上

であれば、打ち切ることができる。

* 中性化と強度の実験結果からも裏付けている結果もある

コンクリート標準示方書では、「型枠および支保工の取り外しに必要な圧縮強度が早期に得られたとしても、この養生期間は必要である」としている

養生の方法

水分の補給、保持を目的とした養生

- ✓ 給水養生：水中養生、湛水養生、散水養生、湿布養生、湿砂養生
- ✓ 保水養生：シート養生、膜養生

温度抑制を目的とした養生

- ✓ 保温養生：断熱養生
- ✓ 給熱養生：電気養生、温風養生、蒸気養生
- ✓ 冷却養生：プレクーリング、ポストクーリング

養生方法の一覧

目的	対象	対策	具体的な手段
湿潤状態に保つ (湿潤養生)	コンクリート全般	給水	湛水、散水、散布、養生マット等
		水分逸散抑制	せき板存置、シート・フィルム被覆、膜養生剤等
温度を制御する (温度制御養生)	暑中コンクリート	昇温抑制	散水、日覆い等
	寒中コンクリート	給熱	電熱マット、ジェットヒーター等
		保温	断熱性の高いせき板、断熱材料
	マスコンクリート	冷却	パイプクーリング等
		保温	断熱性の高いせき板、断熱材料等
	工場製品	給熱	蒸気、オートクレーブ等
有害な作用に対して保護する (有害な作用に対する保護)	コンクリート全般	防護	防護シート、せき板存置等
	海洋コンクリート	遮断	せき板存置等

示方書における養生記述の変遷

制定年	解説への記載(気になること)
S15(1940)	養生作業の中で、硬化中に 十分湿気を与える ことが最も大切
S24(1949)	水和の観点 から、理想は 少なくとも6ヶ月間湿潤状態 に保つ必要
S49(1974)	水和作用の観点から湿潤養生期間は長い方が良いが、長期間の養生は 不経済 。・・・湿潤養生の効果は初期の養生期に得られ、 長期の養生は、利益少ない 。
S61(1986)	強度増進のためには、できるだけ長いのが良いが、初期の硬化増進が著しく、 長期の養生は不経済 である
H3(1991)	強度、 耐久性、水密性等の品質 を高めるために、長い方がよい。・・・湿潤養生の効果の大部分は初期の養生期に限られる。
H8(1996)	「 型枠で保護されていないすべてのコンクリート面 に対して・・・」

長期の養生 水和の観点では必要 ↓ 経済的に不必要	養生 強度増進 ↓ 耐久性や品質	養生の必要な場所 型枠のないコンクリート面 ↓ 型枠面も（早期脱型，各種養生法）
------------------------------------	---------------------------	---

養生の意味と重要性

養生の良否により、コンクリートの性能は大きく左右される。

養生により得られる特徴

- コンクリートの力学的性能、耐久性、およびその他の性能等の品質を高める
- コンクリートを十分硬化させる
- 硬化中の乾燥による収縮をできるだけ小さくする

養生が不足する際に起きる若材齢での影響

表面が乾燥して内部の水分が失われるとセメントの水和反応が十分に行われない

直射日光や風などによって表面だけが乾燥するとひび割れ発生の原因

2. 養生しないとどうなる？

養生不足による不具合とは・・・

- 微細な表面ひび割れ、ドライアウト
- 温度ひび割れ、乾燥収縮ひび割れ
- 引張強度不足（冬季打込み）
- 表面剥離
- 寒冷地において、コンクリート表面の初期凍害
- 色むら
- 初期強度不足
- 硬化不良

しかし、さまざまな疑問が・・・？

何を評価すれば
よい？
(達成項目は？)

いつまで養生
すればよい？

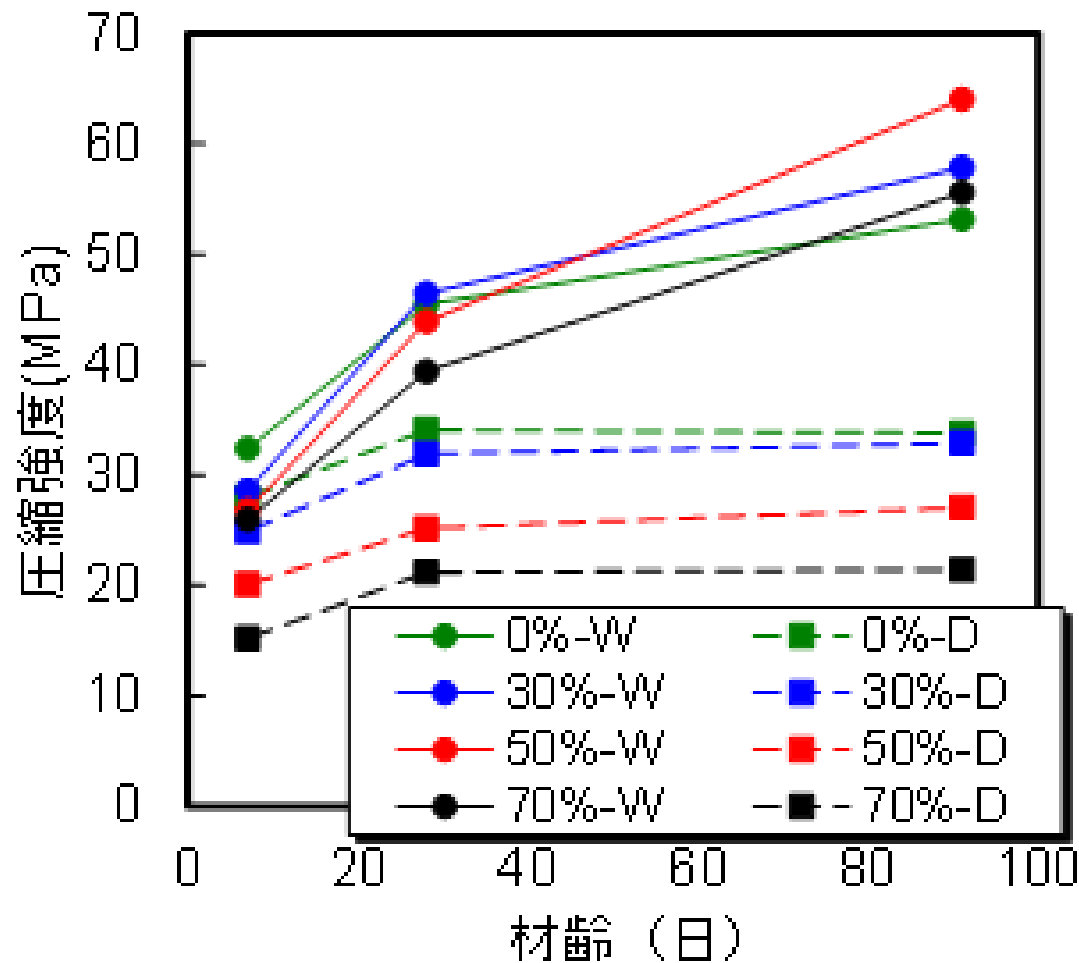
養生ってどの
くらい効果
あるの？

どの程度の影響
範囲がある？

型枠存置は
養生??

異なるコンクリート
でも一律でいい？

圧縮強度＜水中養生と乾燥＞



養生すれば、強度は発現。
不足すれば。。

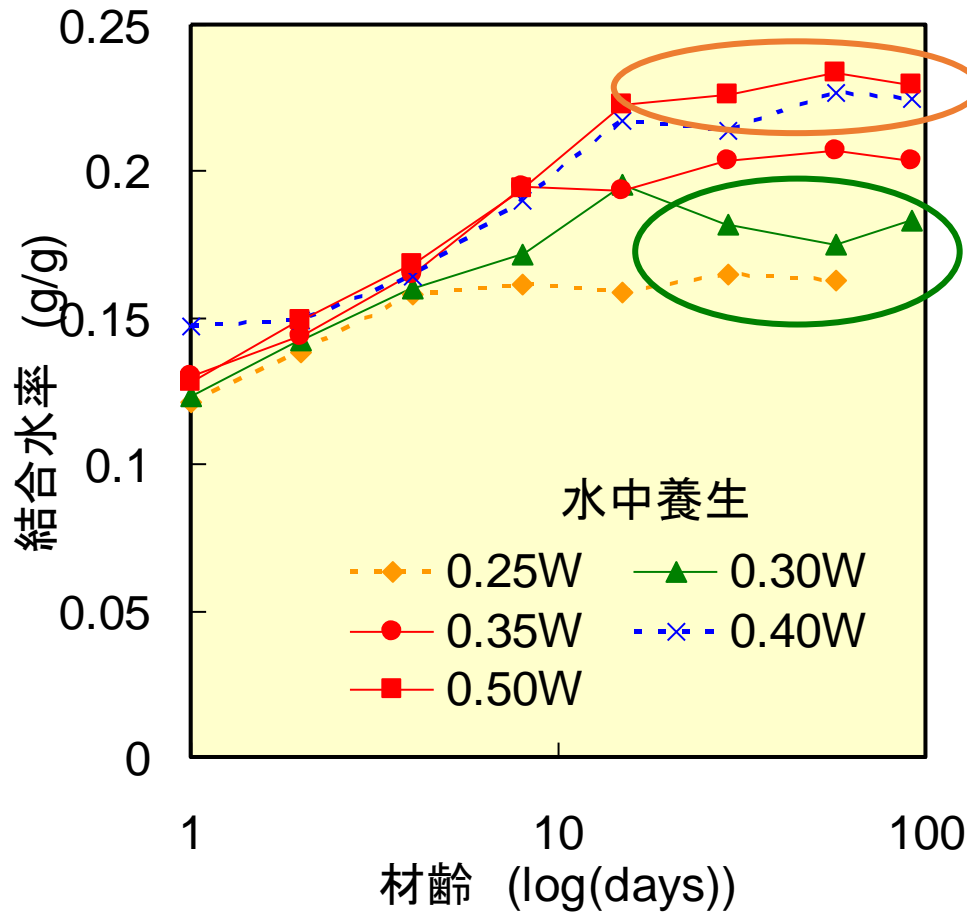


なぜ養生すると強度が
発現するのか？

養生と水和反応

伊代田(2003)

水和挙動 (連続水中養生)



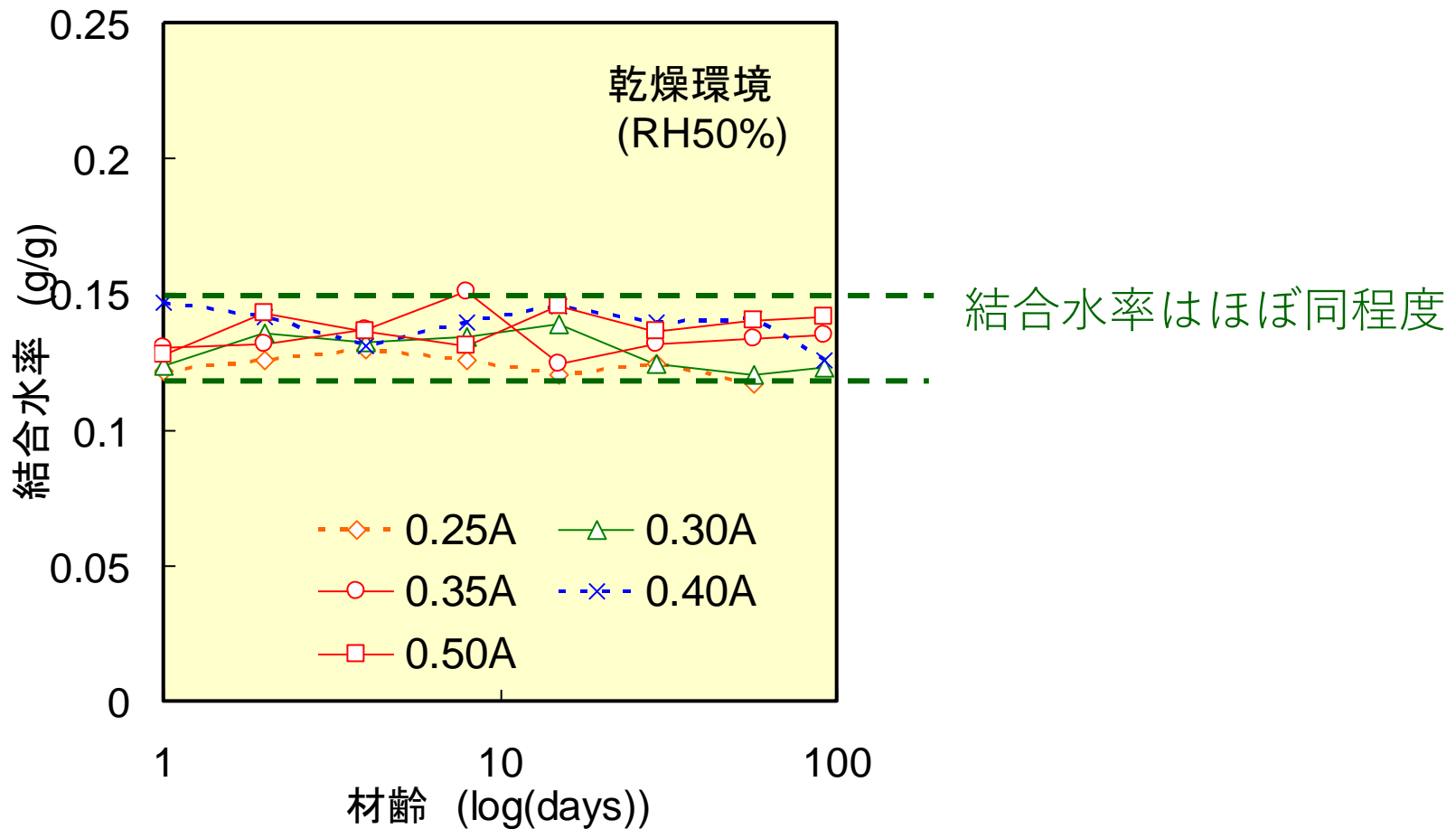
最終結合水量はほぼ同等
(0.40,0.50)
水和反応はほぼ完了
水和反応のための水分不足
(0.25,0.30)
水和反応は停止

高W/C → 水和反応はほぼ完了
低W/C → 水分不足

低W/Cではセメントの配置が密実であることから水分の浸透が困難であり、水和生成物の析出する場所が不足する。

セメントの水和作用が完全に行われるために必要な水セメント比：22～27%

連続乾燥環境下(RH50%)における水和挙動



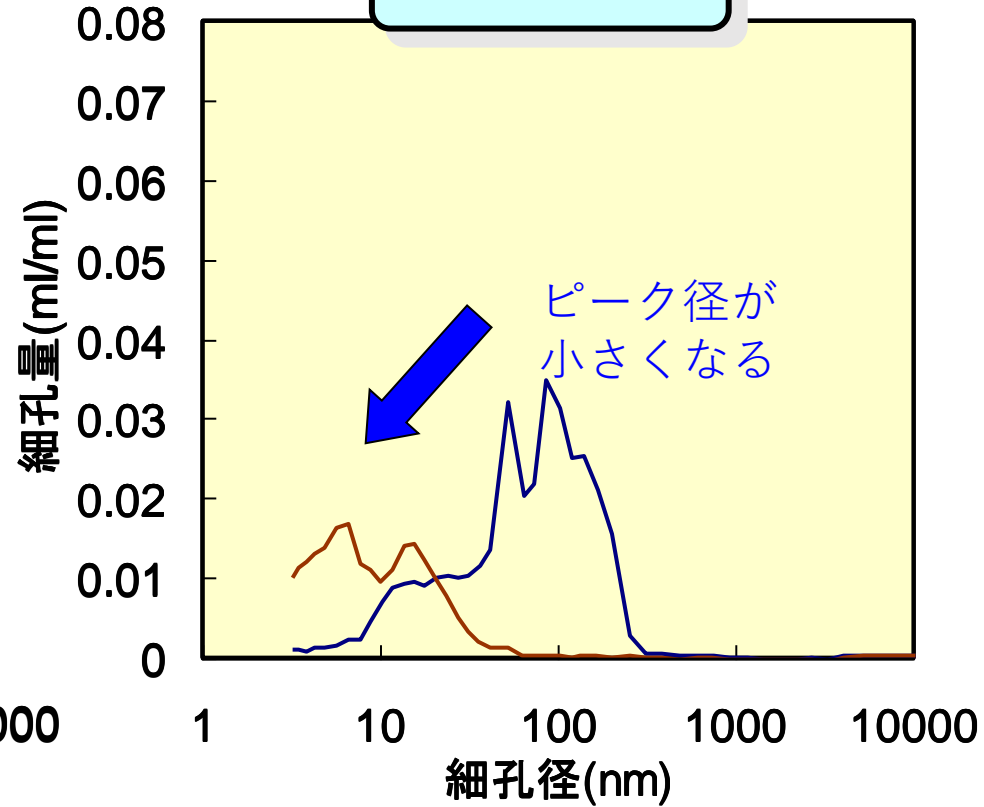
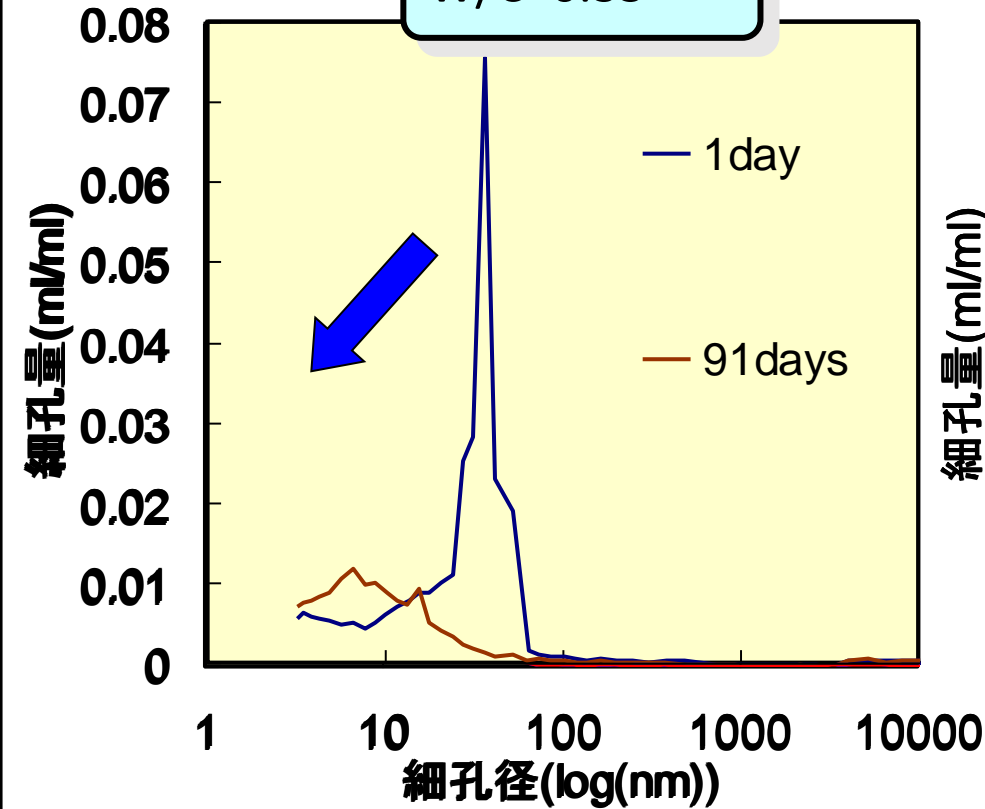
W/Cによらず結合水率が0.13g/g程度に収束する
高W/Cの方が乾燥による水分逸散の影響を受けやすい

養生と空隙構造

W (水中養生)

W/C=0.35

W/C=0.50



水銀圧入式ポロシメータ使用

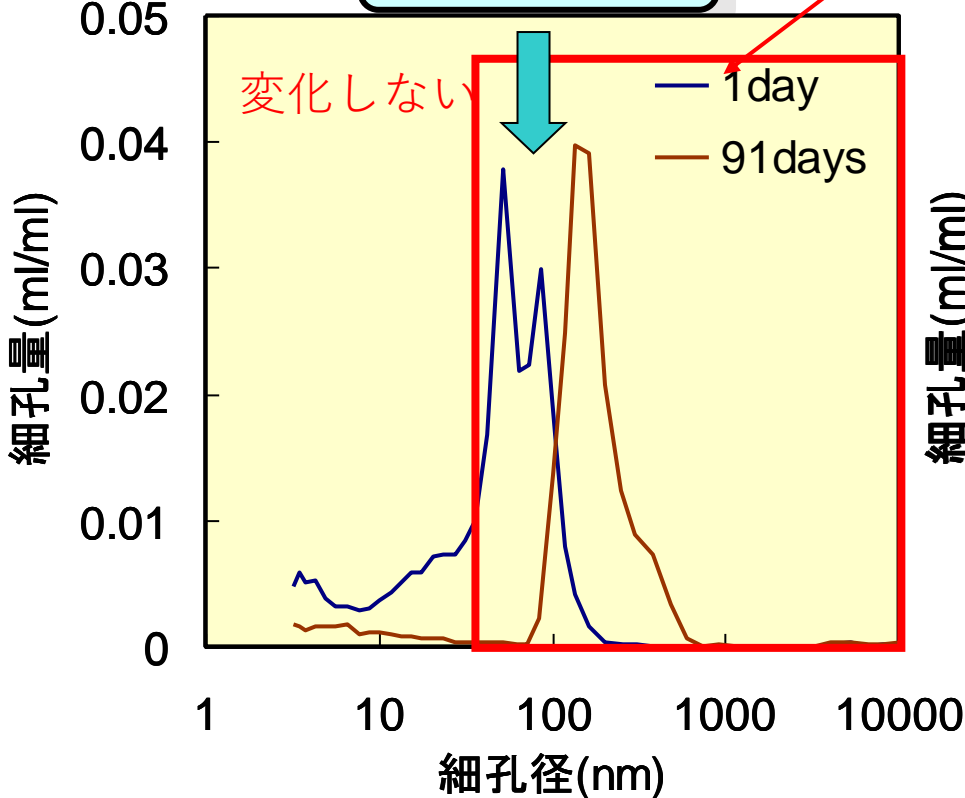
RH50% (連続乾燥)

強度や耐久性に影響を与える空隙径

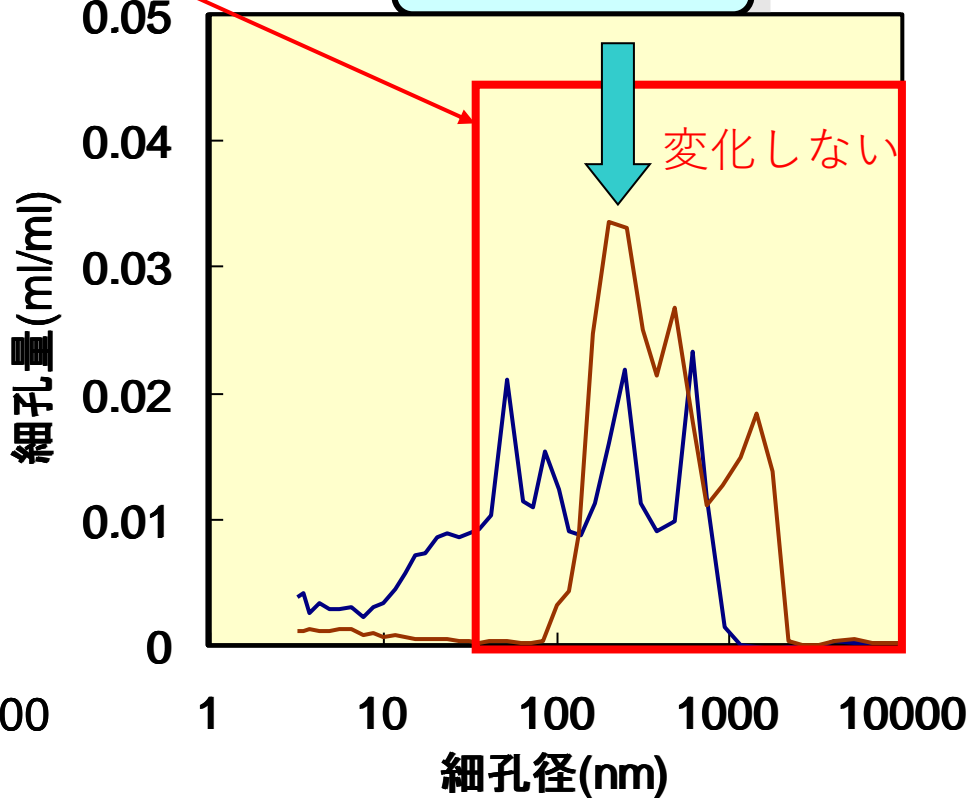
50nm~100nm 以上

多量の空隙が残存

W/C=0.35

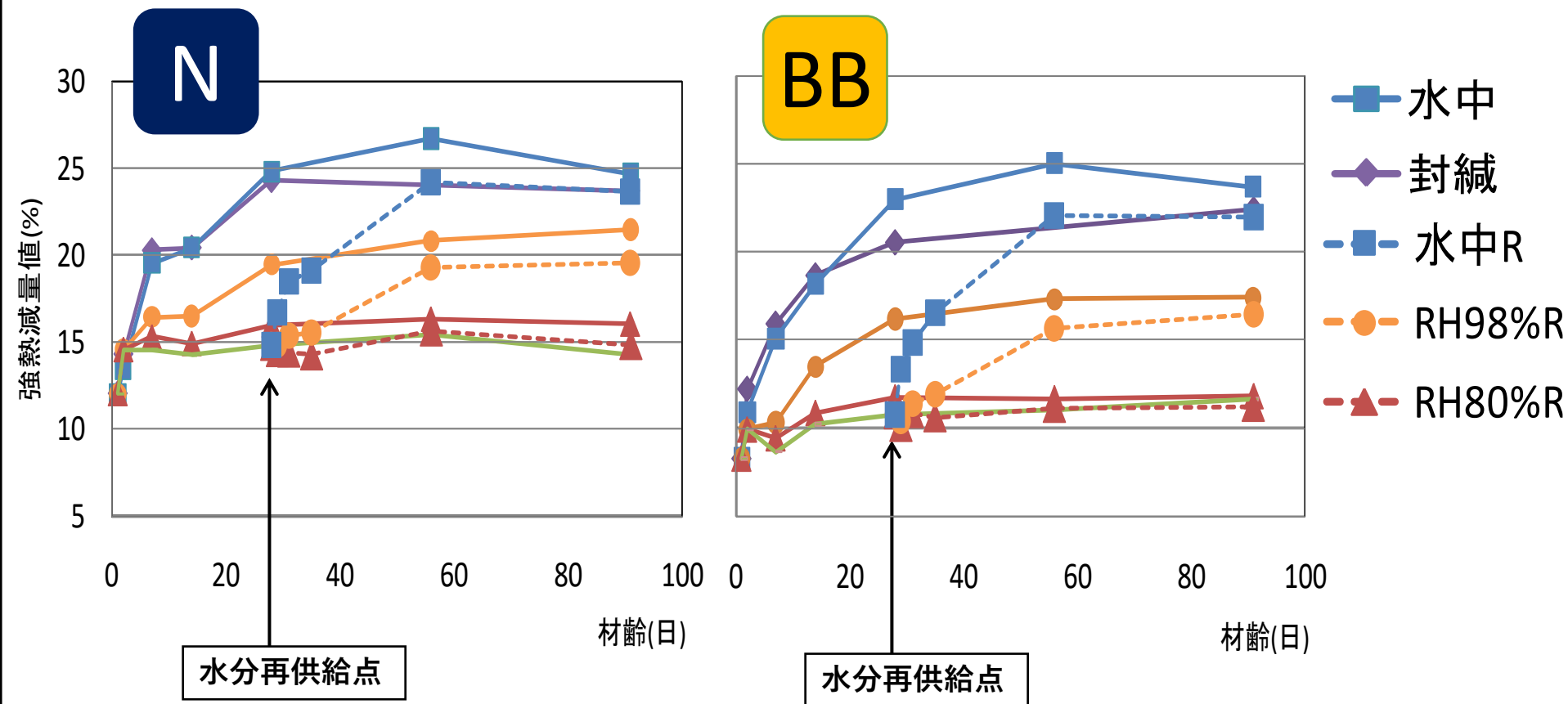


W/C=0.50



ピーク径は材齢が経過しても変化しない

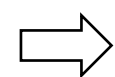
水分再供給と水和反応



RH60%, RH80%では反応が停止

→試験体の水分が逸散

湿度変化後に水和反応が再開

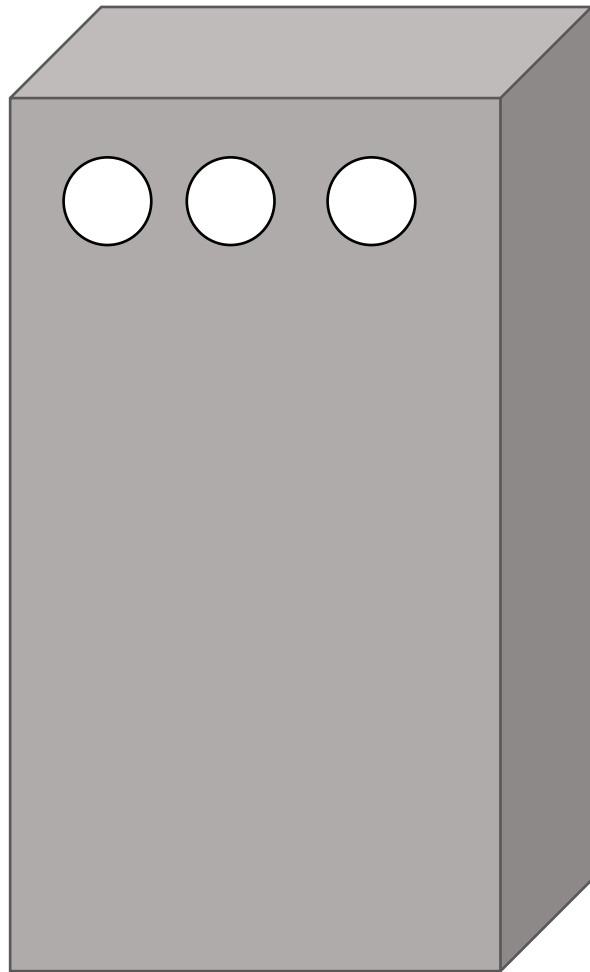


水中R, RH98%Rは回復

→未反応分に水分が供給

圧縮強度だけ満たせば担保できるのか？

耐久性確保の視点：圧縮強度と耐久性の相違



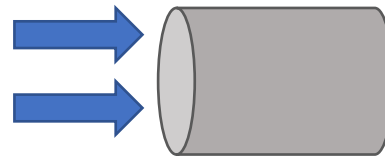
圧縮強度



両端からの荷重

- ・試験体全体として受け持つ
- ・試験体内の弱い部分が先行

耐久性



表層から物質が浸透

- ・奥行き方向に異なった物性
- ・表層からの連続空隙

中性化の進行は？（実験概要）

配合条件

セメント種類	水セメント比
OPC: 普通ポルトランドセメント	30%
BB: 高炉セメント B種	45%
※高炉スラグ微粉末50%置換	60%

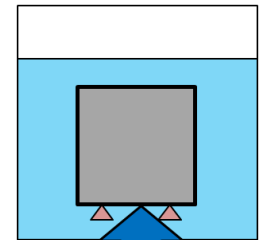
養生条件

養生方法	養生期間
気中	●: 1日
封緘	◆: 3日
水中*	▲: 5日
(※水中はW/C45%のみ)	■: 7日
	×: 28日

気中養生

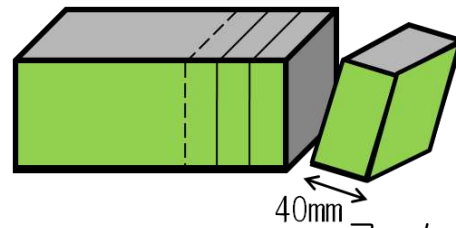
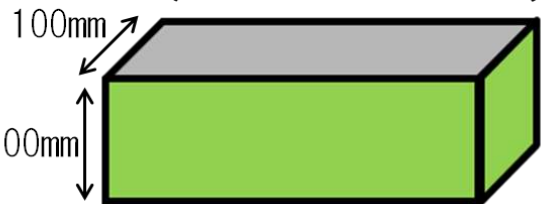


封緘養生



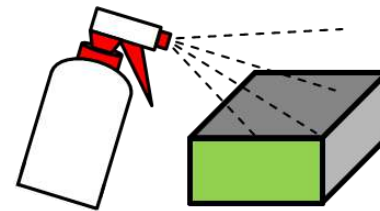
水中養生

400mm

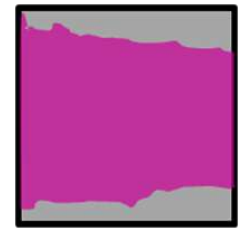


40mm

フェノールフタレイン溶液を噴霧



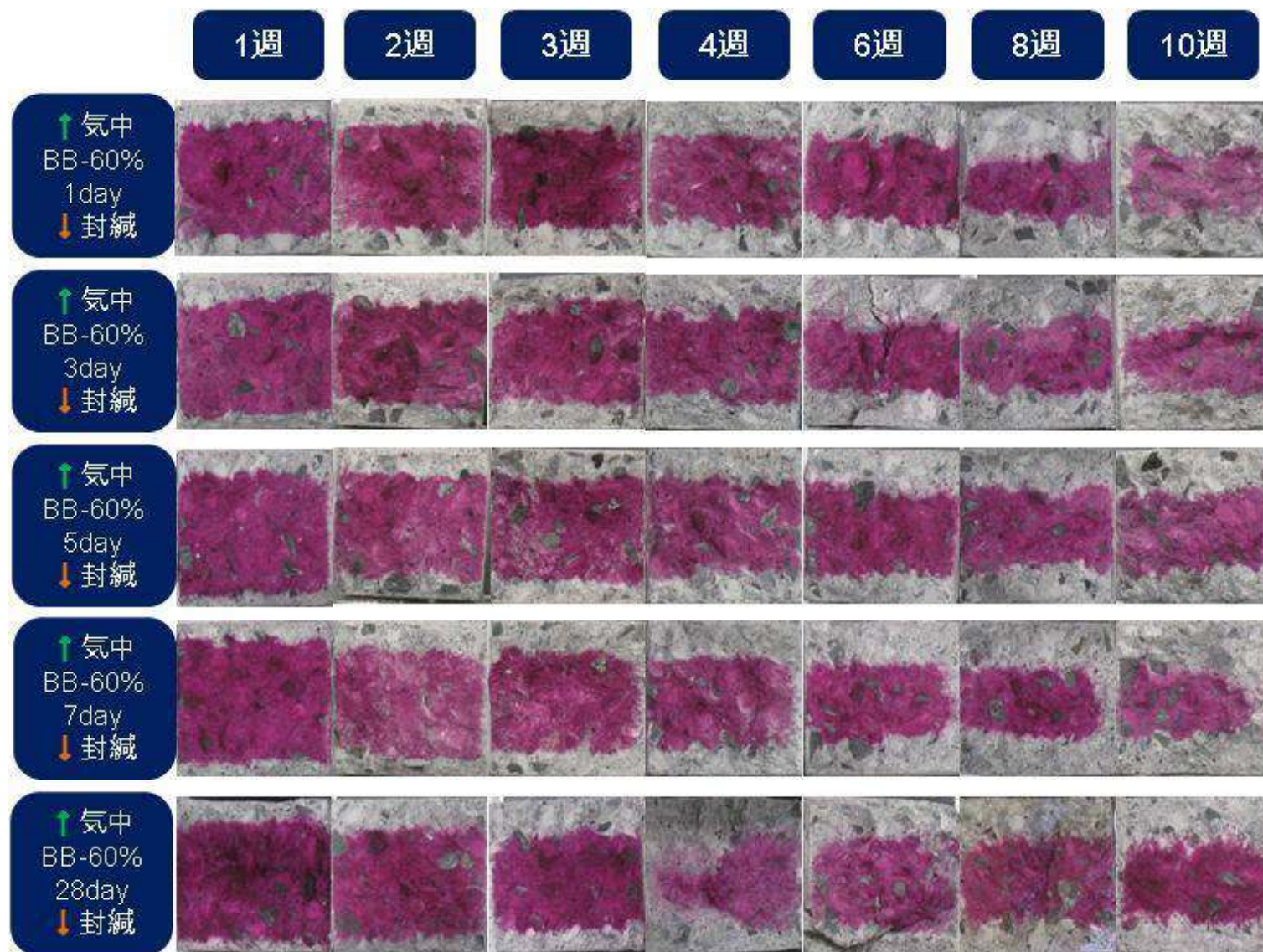
噴霧後の断面図



中性化促進試験 (温度:20℃ 湿度:60% CO₂:5%)

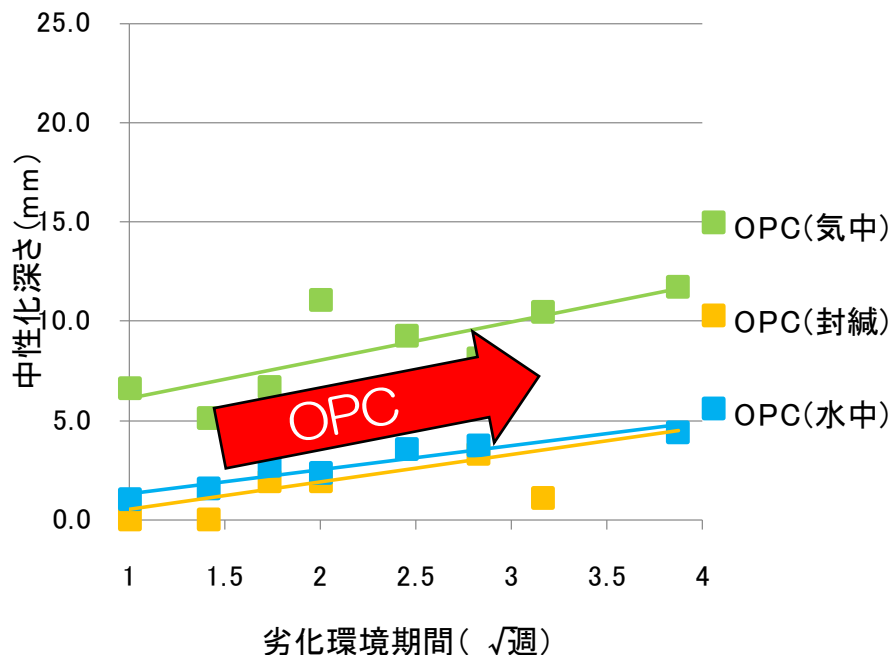
養生と中性化抵抗性 (BB)

豊村(2010)

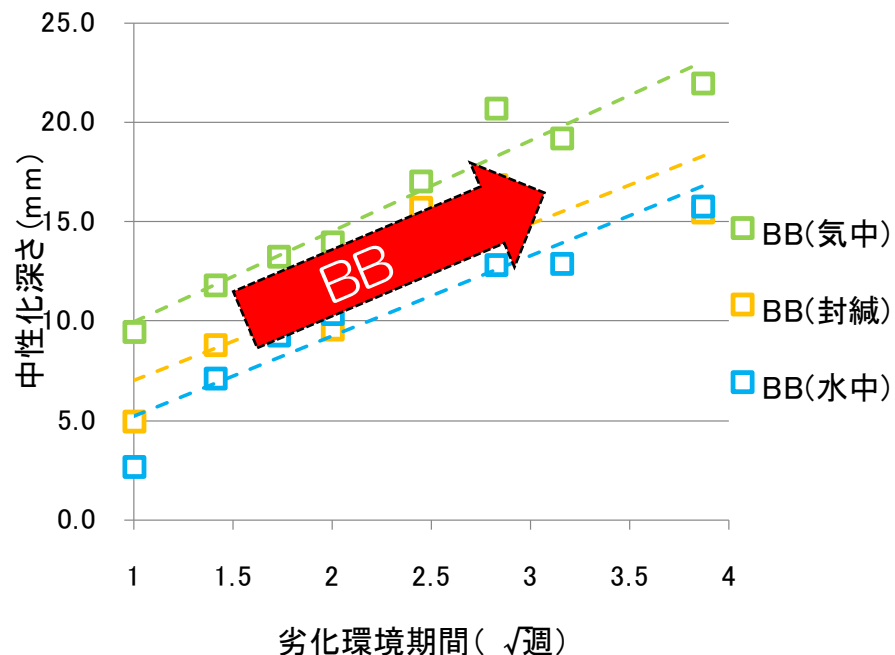


養生方法

OPC-45%-7日



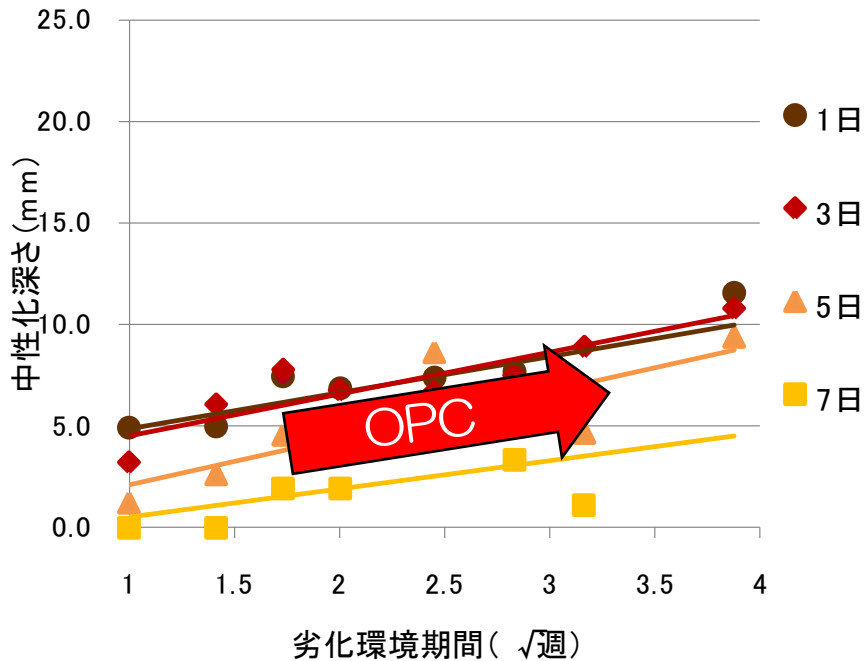
BB-45%-7日



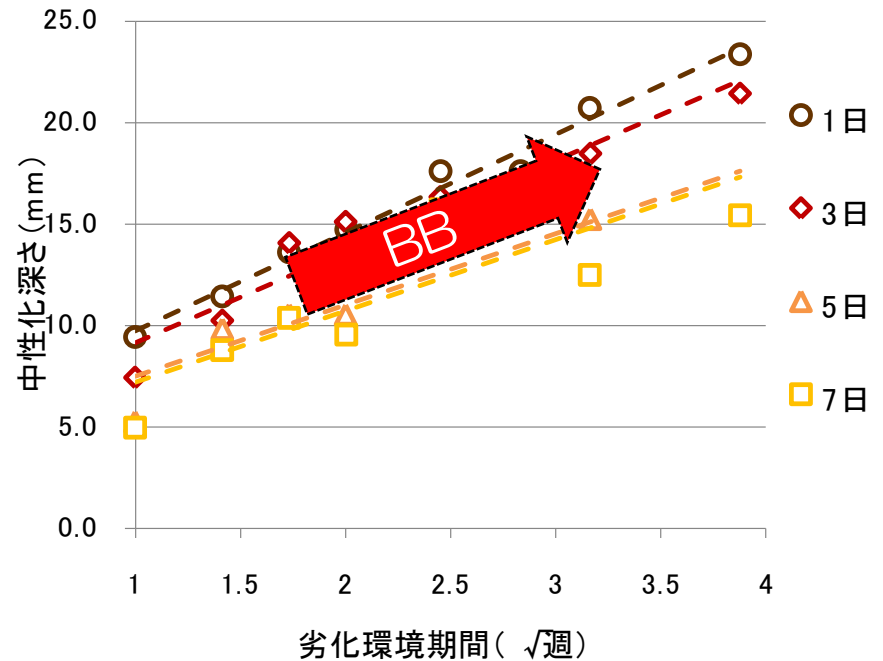
- 中性化深さは 気中 > > 封緘 > 水中 の順に大きい
- 養生方法によらず中性化速度係数はほぼ同等

養生期間

OPC-45%-封緘



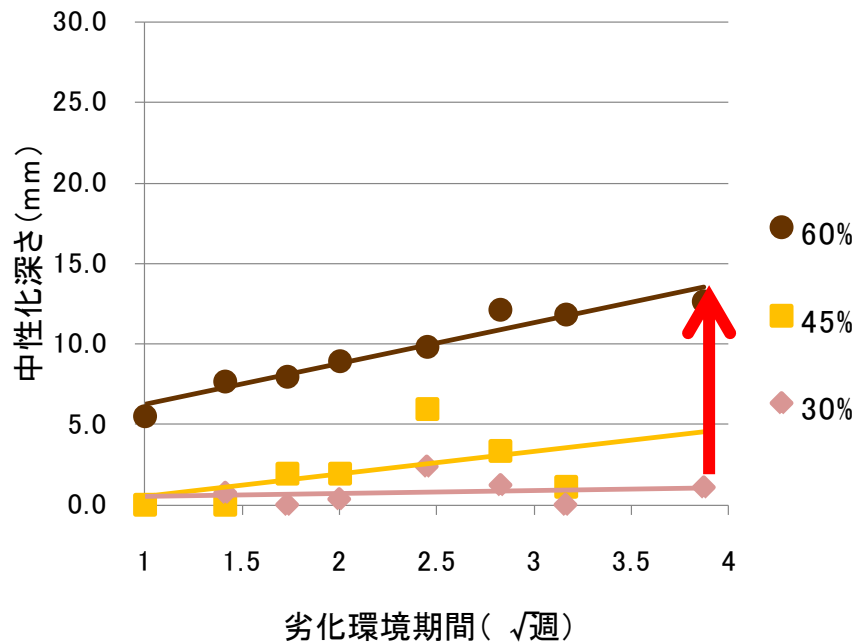
BB-45%-封緘



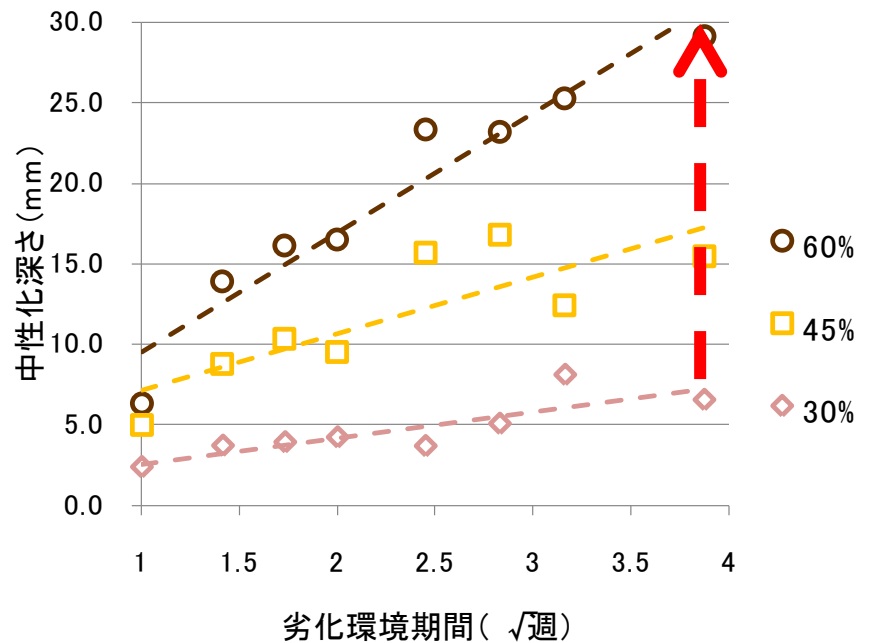
- 中性化深さは 1 > 3 > 5 > 7日 の順で大きい
- 養生期間によらず中性化速度係数はほぼ同等

配合条件

OPC-封緘7日



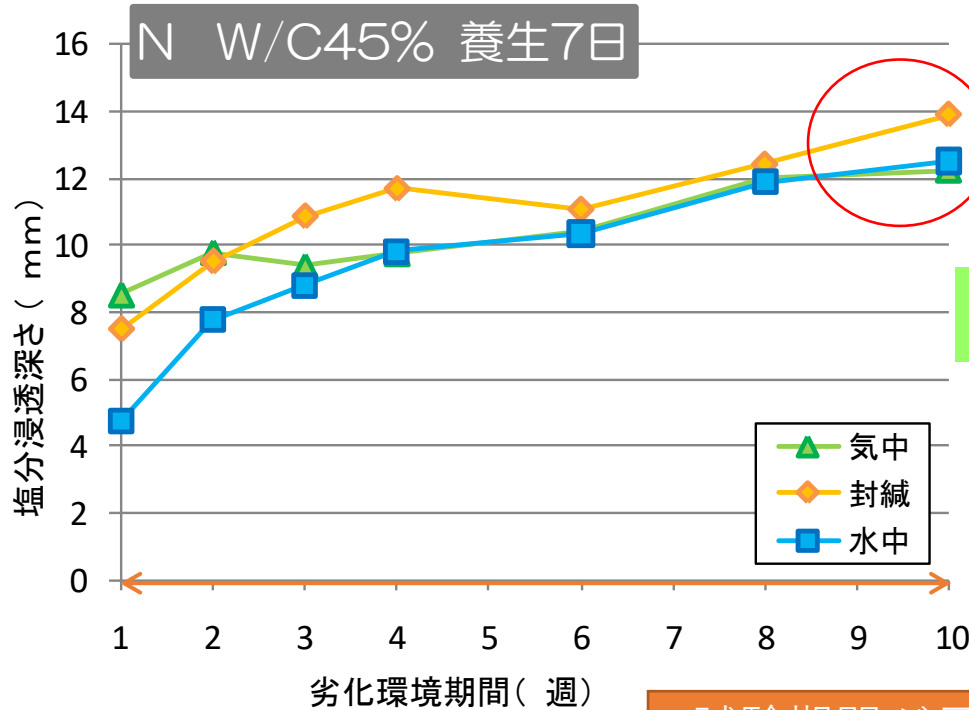
BB-封緘7日



- 水セメント比の増加に伴い中性化深さが増加し、中性化速度係数は大きくなる
- BBはOPCに比べ中性化速度係数が大きく、水セメント比の影響による傾きの差が大きい

(青山：2011)

塩水浸せき試験

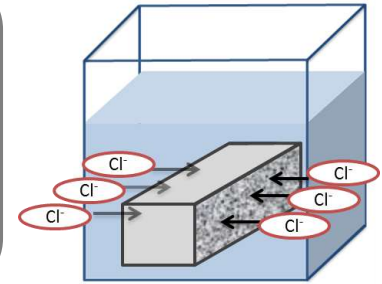


養生方法

気中

封緘

水中



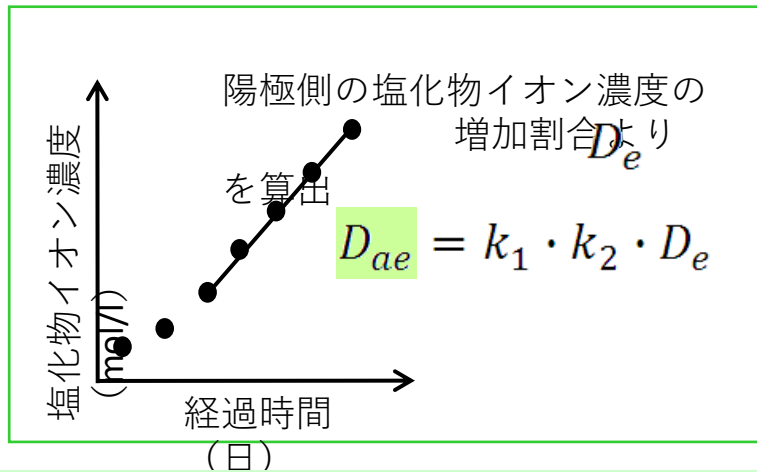
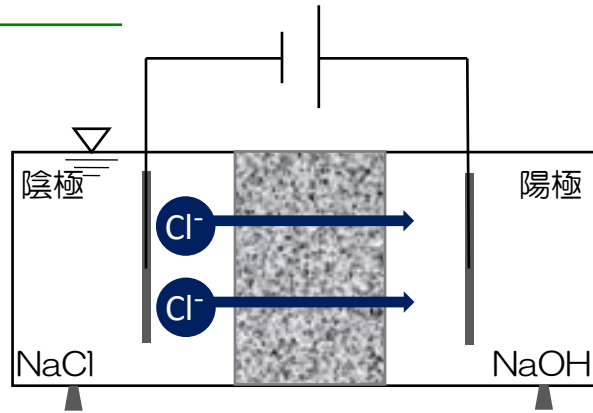
気中養生の塩分浸透深さは小さい

未水和セメントが
塩水と反応し緻密になった

試験期間が長期間

養生条件が塩化物イオンの侵入に与える影響は把握できていない

定常状態



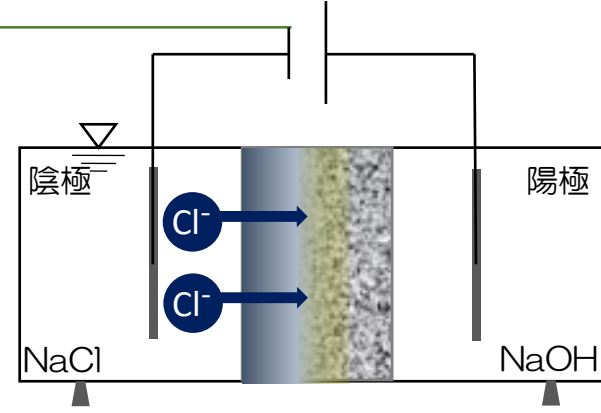
定常状態

試験期間が長期に及ぶ

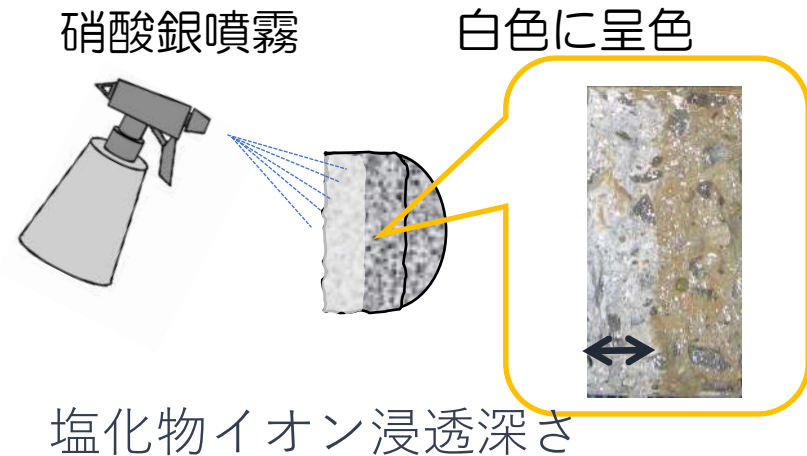


未水和セメントが反応する可能性

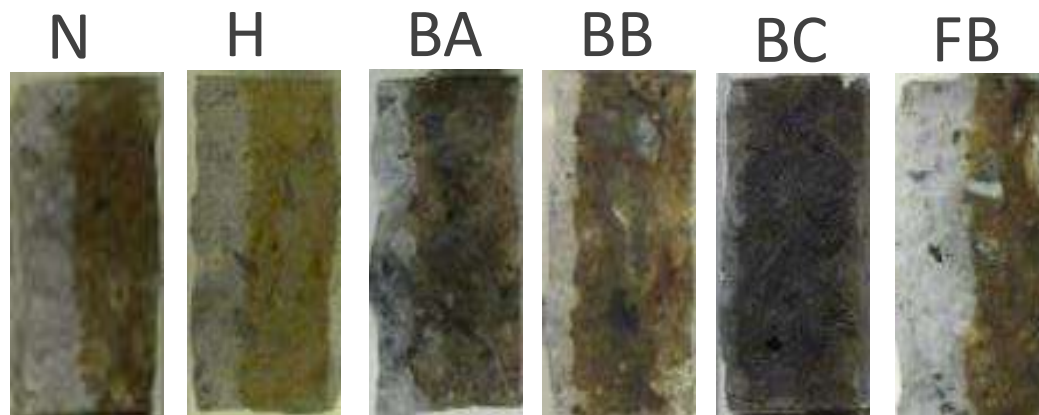
非定常状態



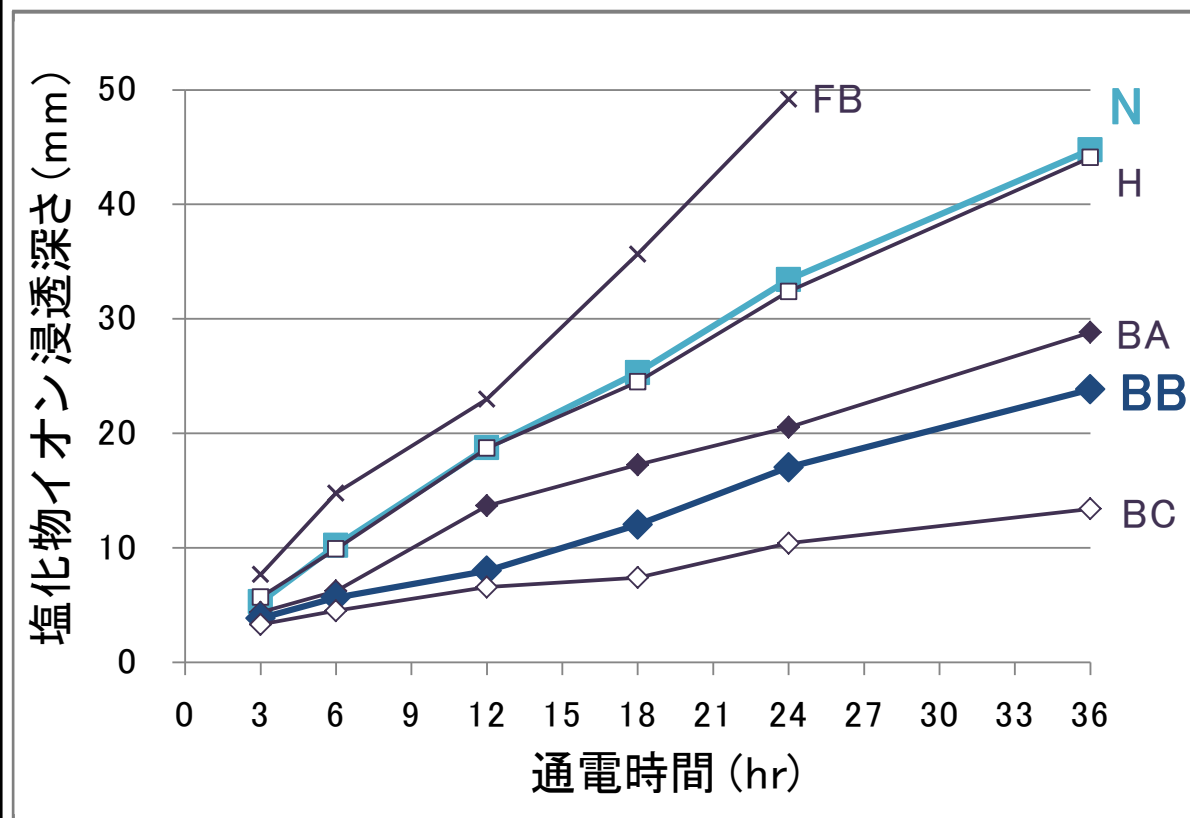
所定の時間通電



試験時間の短縮化



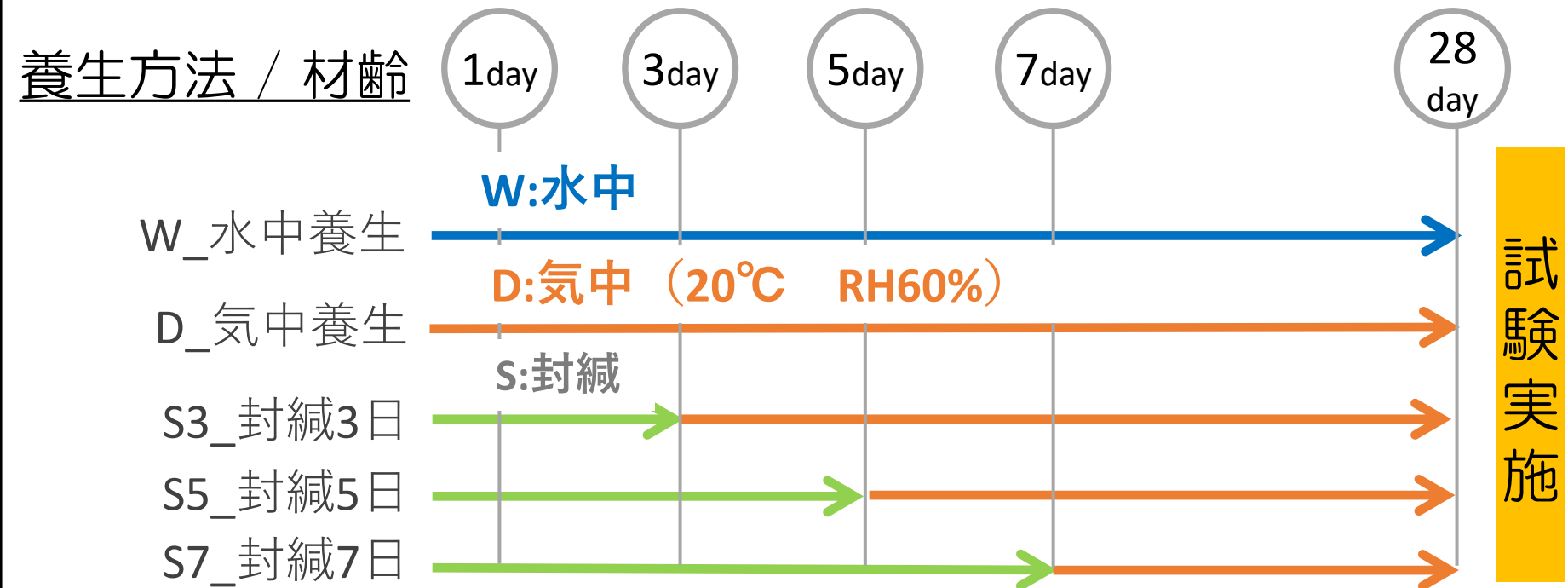
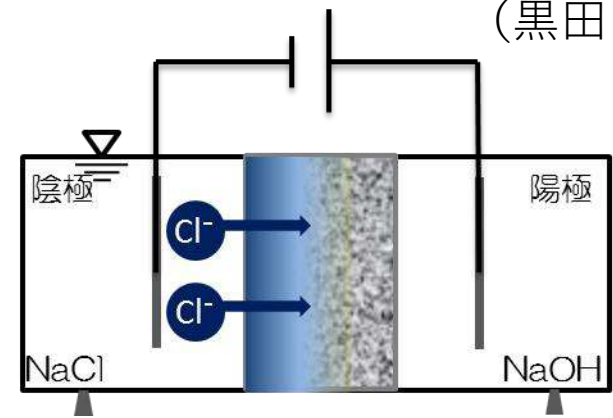
12時間
通電 ⚡



いずれのセメントでも
通電時間の増加に伴い、
塩化物イオンの
浸透深さは大きくなる

(黒田 : 2013)

- ◇セメント種類 N, BB
- ◇水セメント比 30%, 60%
- ◇養生方法 水中, 封緘, 気中
- ◇養生期間 1, 3, 5, 7, 28日



供試体概要

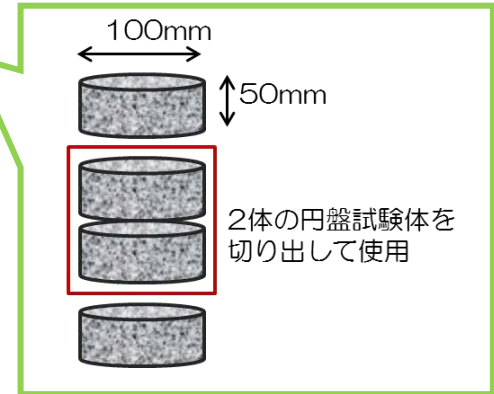
供試体作製

◇従来の電気泳動試験

φ100×200mmの円柱供試体を切断して使用

◇佐藤らの研究

表層から30mm程度まで乾燥の影響を受ける



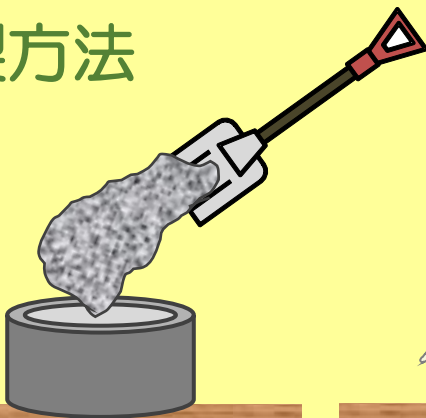
本研究

- ✓ 養生の影響を考慮
- ✓ 試験体中の乾燥状態を均質
- ✓ φ100×50mmの試験体を作製

作製方法

打設

50mm

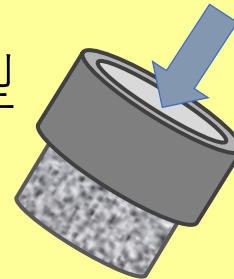


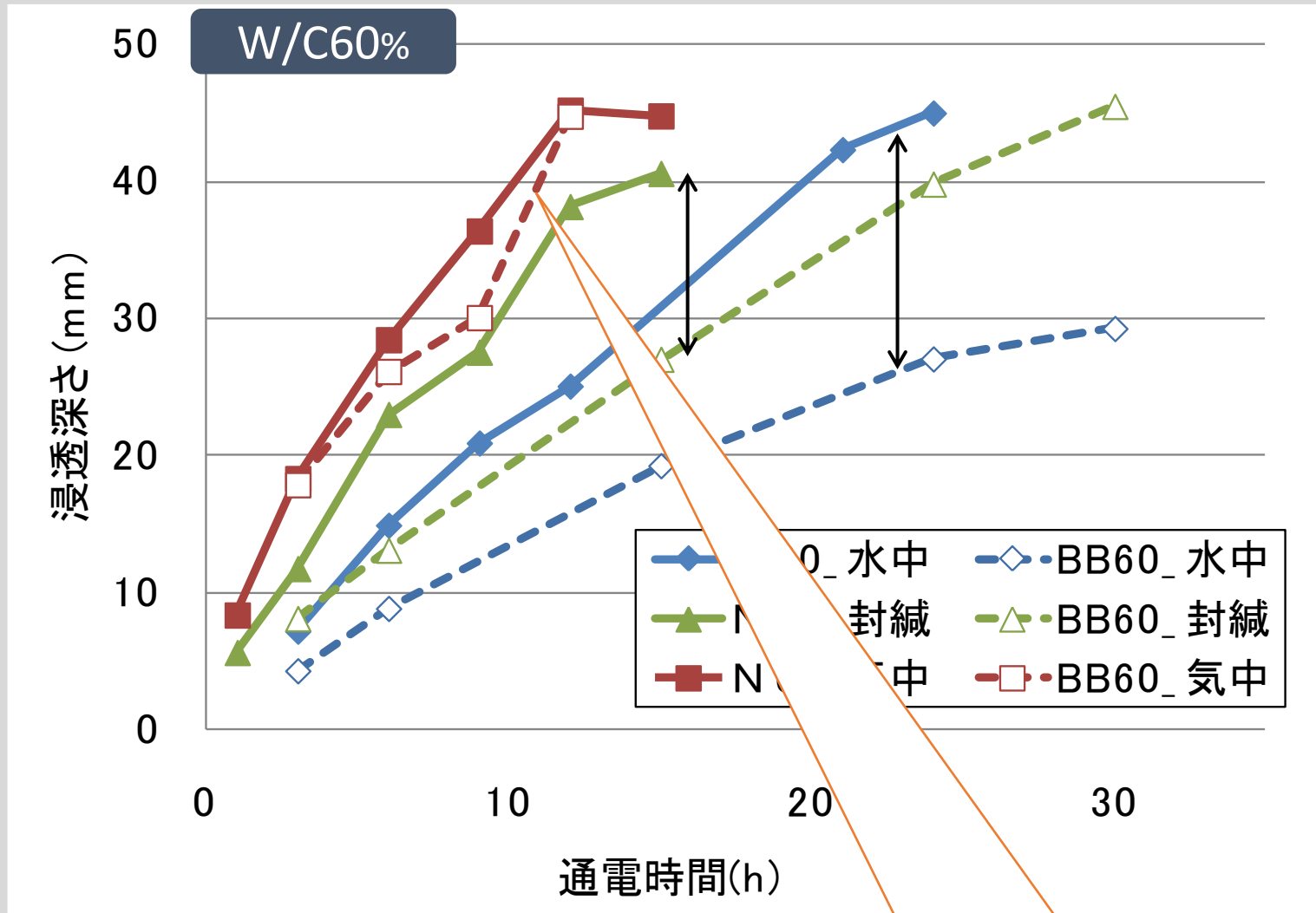
100mm

養生

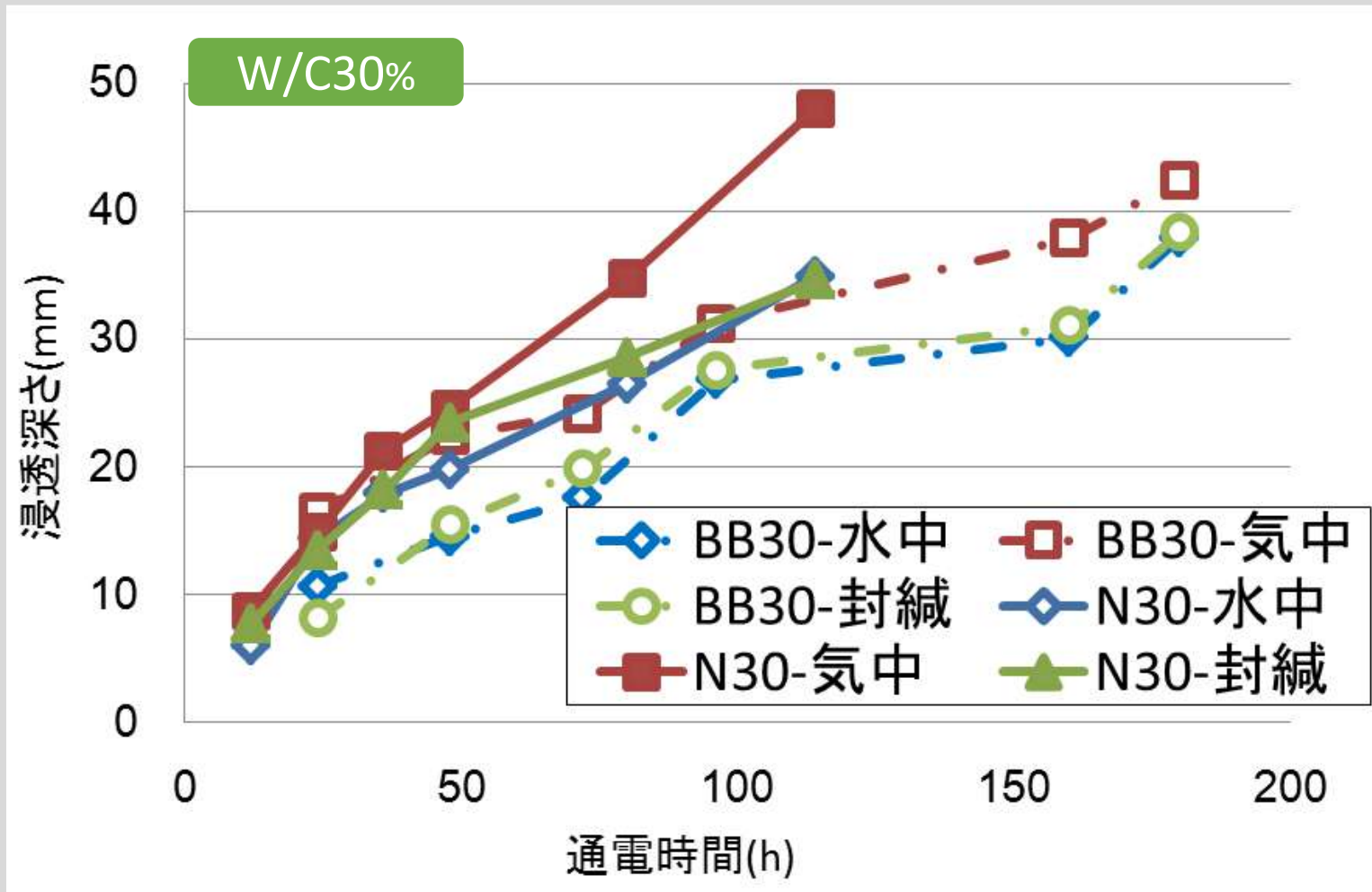


脱型



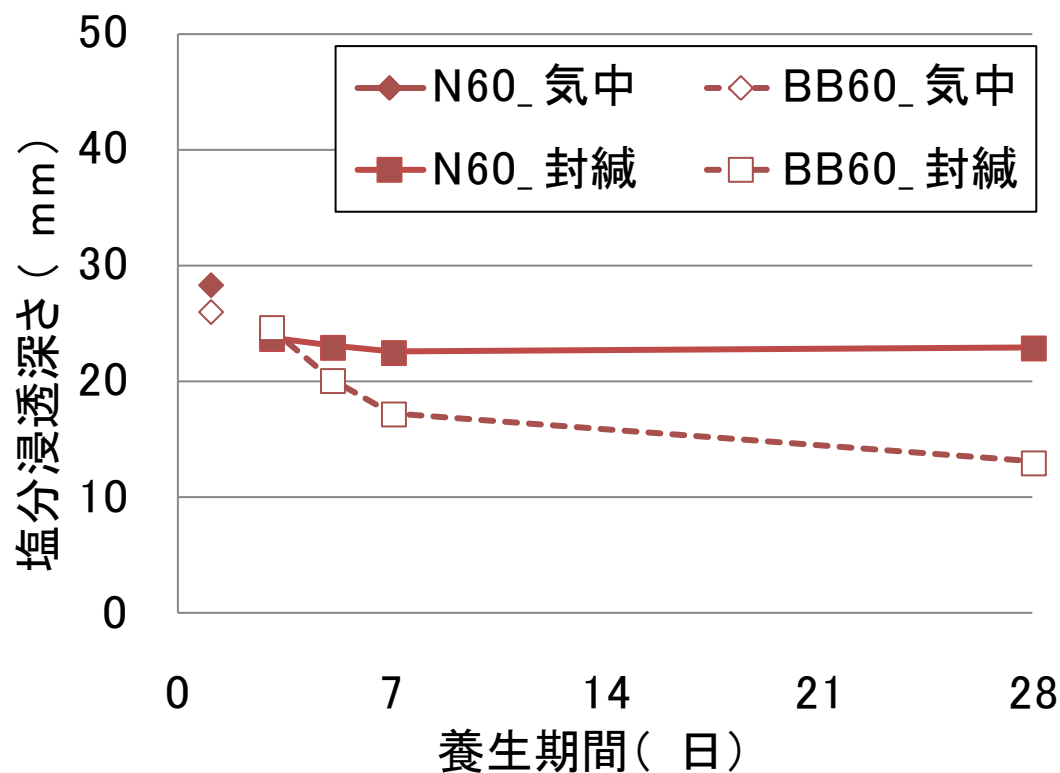


塩分深さは **気中** > **封緘** > **水中**

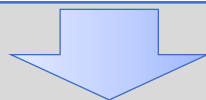


W/C60%と同様に、塩分浸透深さ **気中** > **封緘** > **水中**

W/C60%

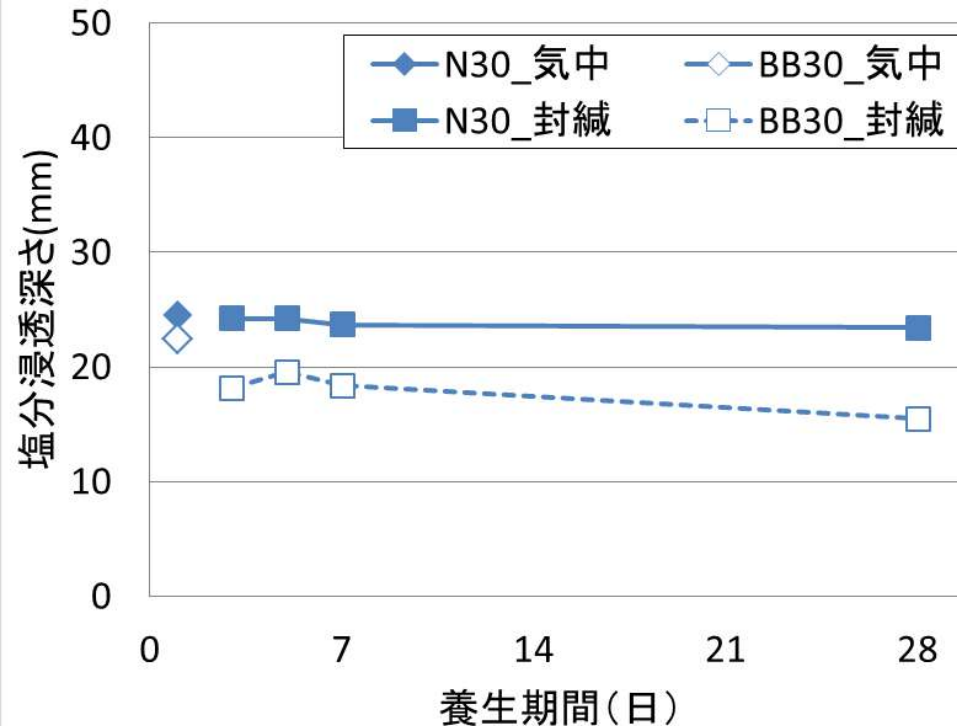


養生期間が3日以降BBはNより
塩化物イオンに対する抵抗性が高くなる



水セメント比60%のBBは
養生すると塩害に対する抵抗性があがる

W/C30%



BBはNに比べ塩化物イオンに対する
抵抗性が高くなる

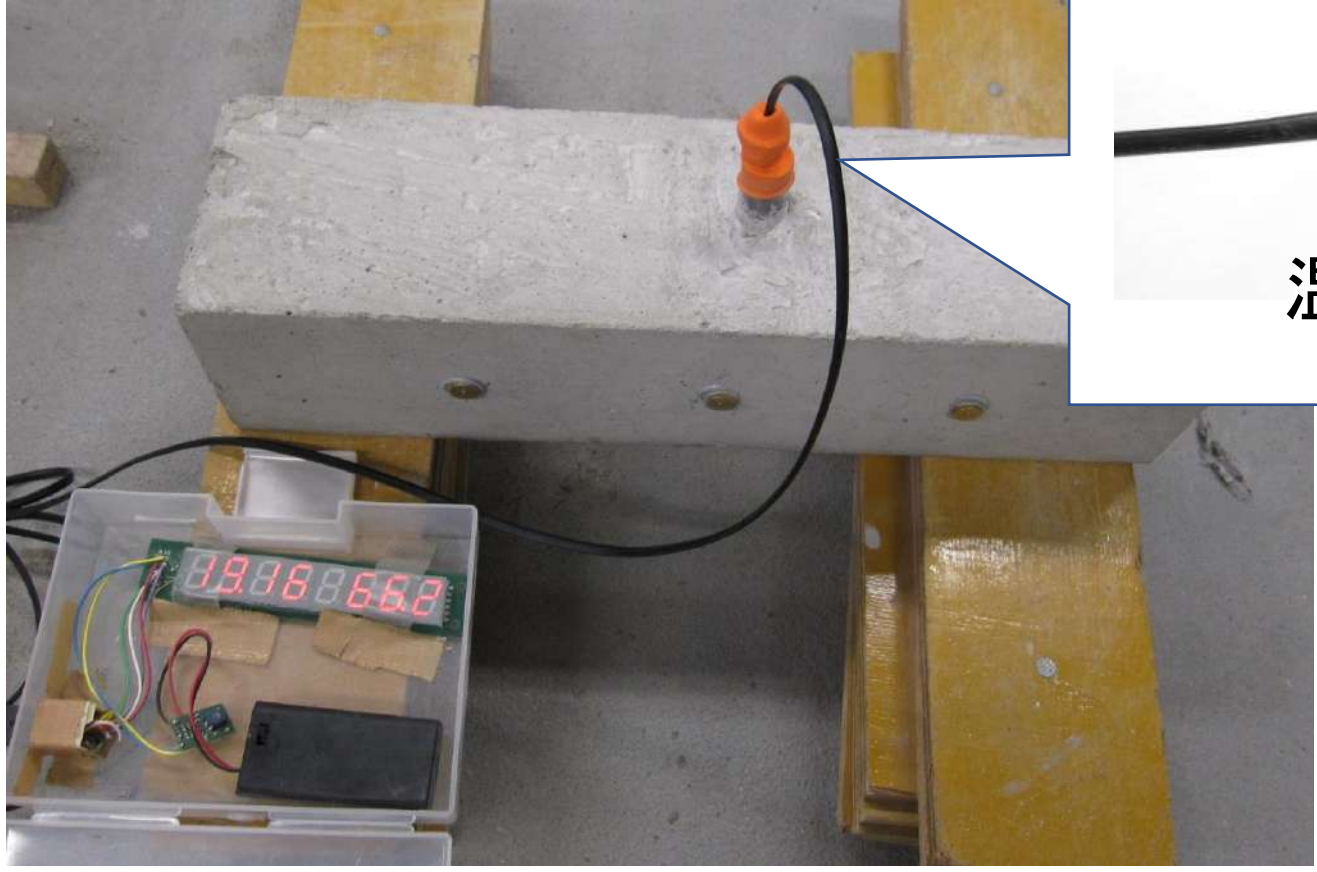


水セメント比30%のBBは
養生すると塩害に対する抵抗性は向上する

3.養生・乾燥の影響範囲はどの程度？

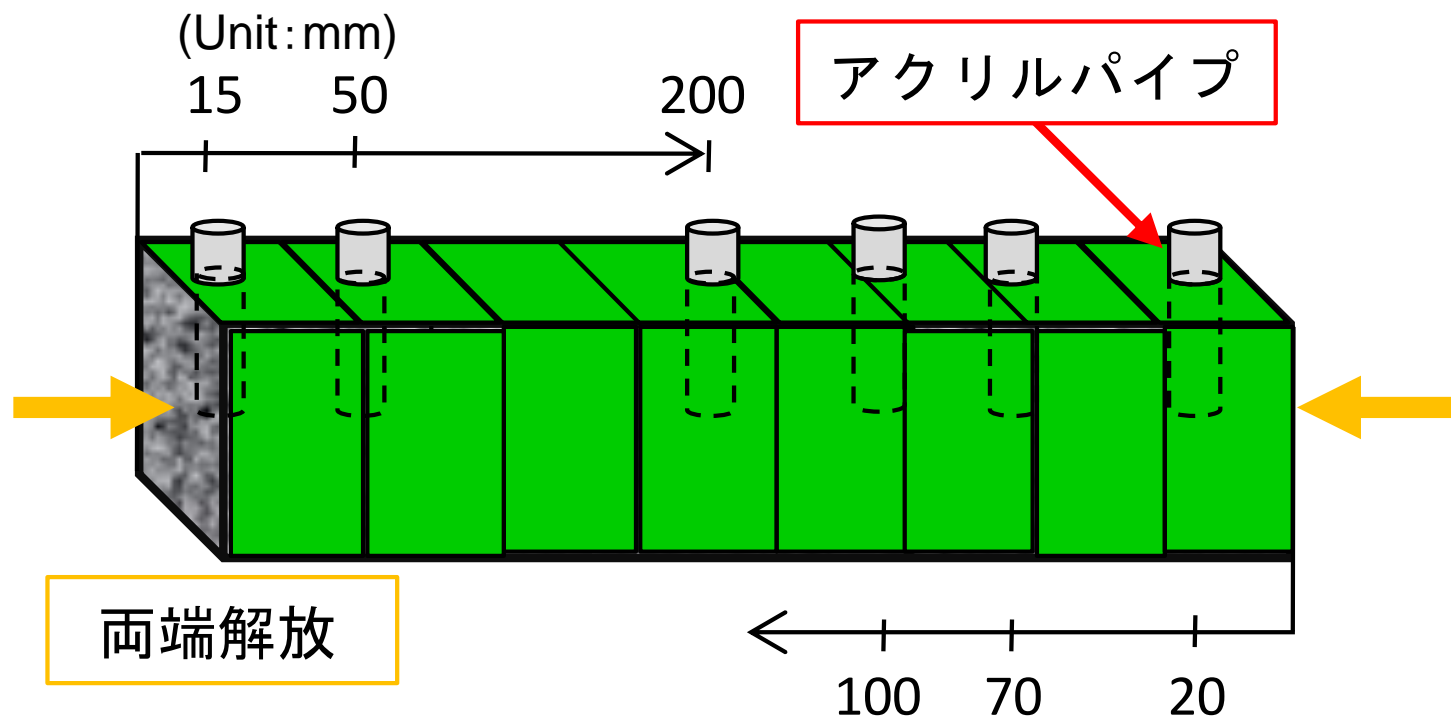
佐藤(2009)

内部相対湿度測定方法

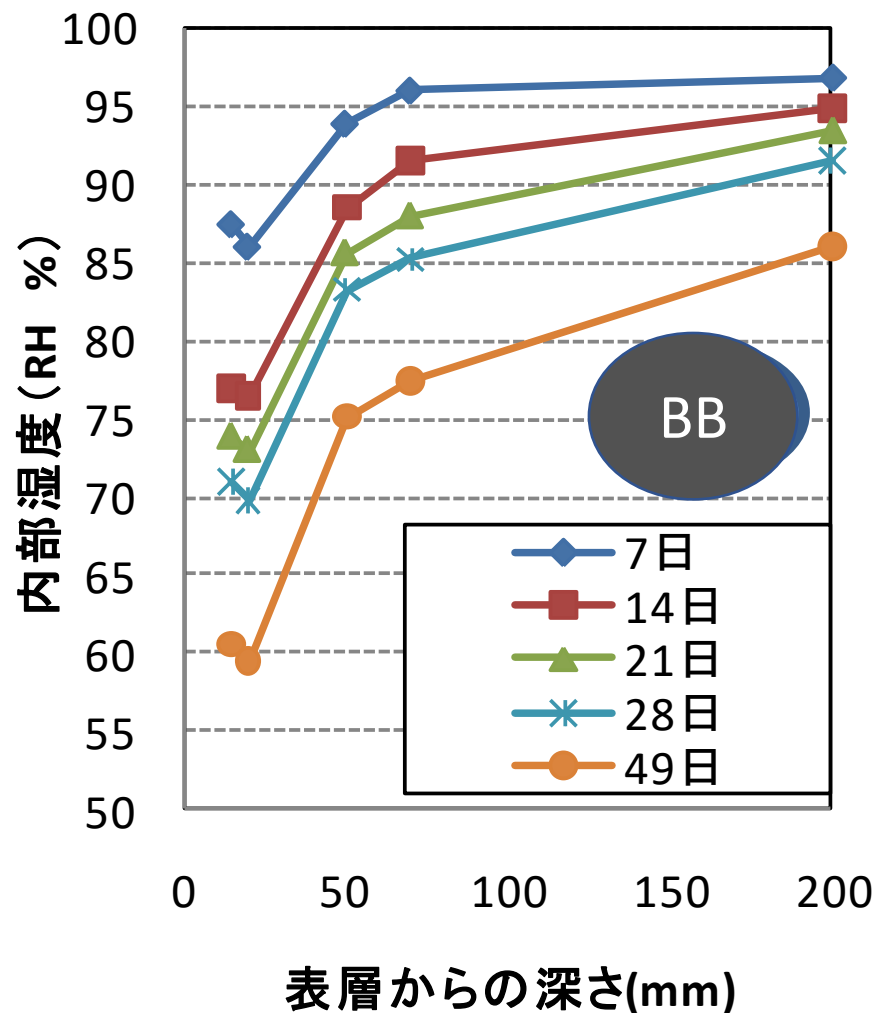
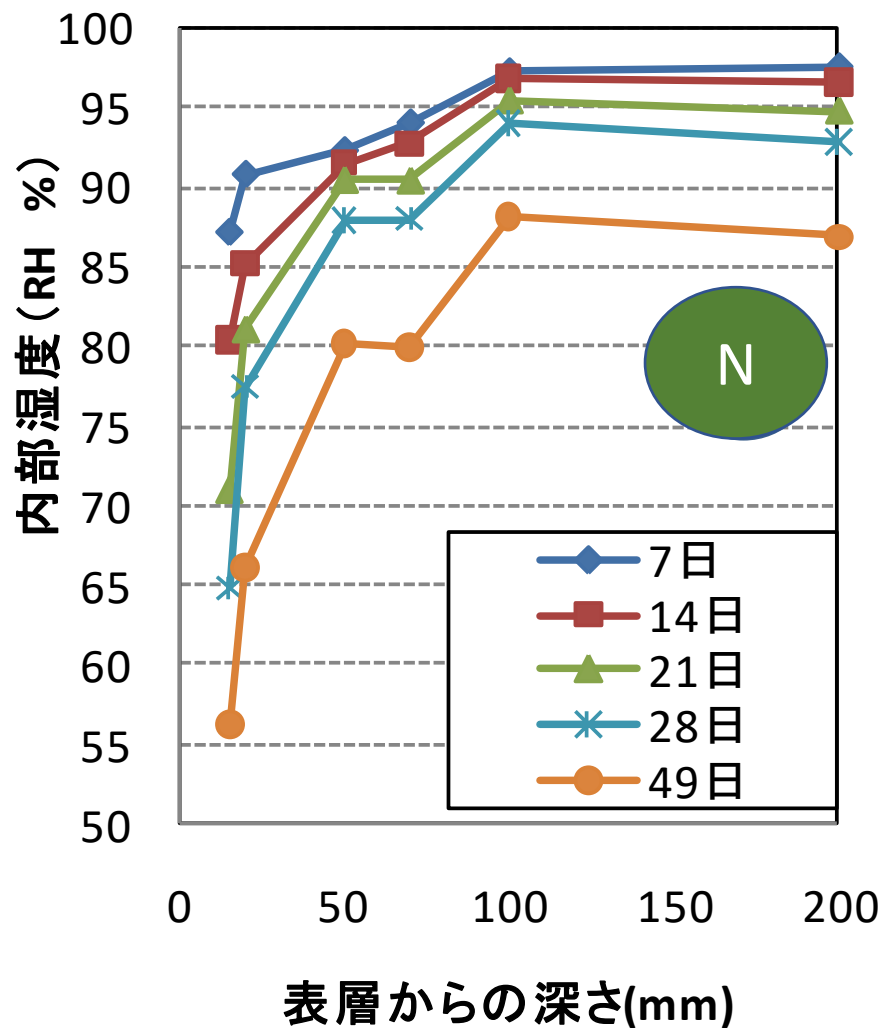


温湿度センサ

室温：20±2°C
湿度：約RH60%



解放面からの距離：15,20,50,70,100,200mm



表層20mmまでは大きく影響！

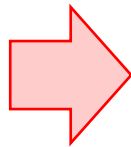
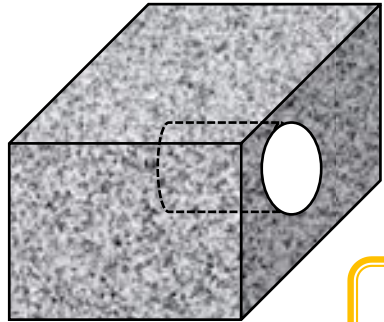
もっと連続的に把握？

真空吸水試験

(井ノ口：2011)

1 供試体の作製

壁構造物を模擬



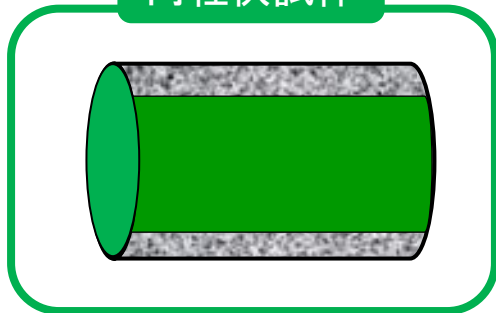
供試体サイズ
Φ10×2.0cm



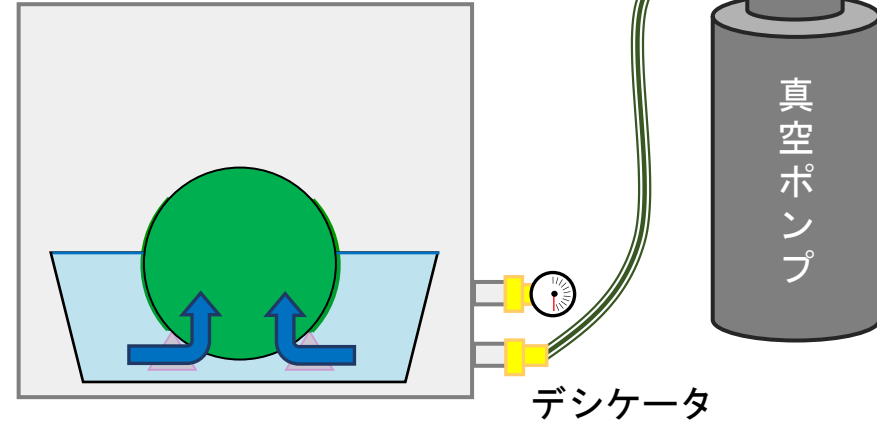
2 前処理

試験前に乾燥炉(40℃)で5日間乾燥させる

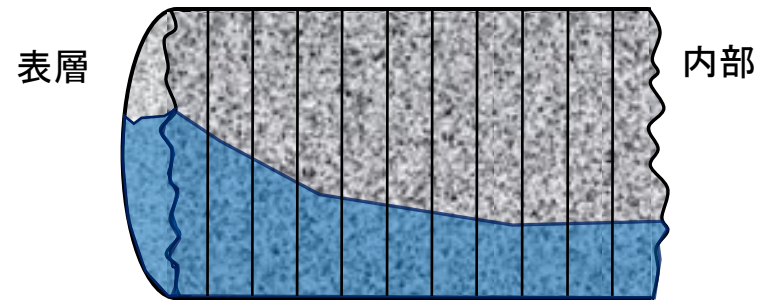
円柱供試体



3 真空吸水試験



4 割裂

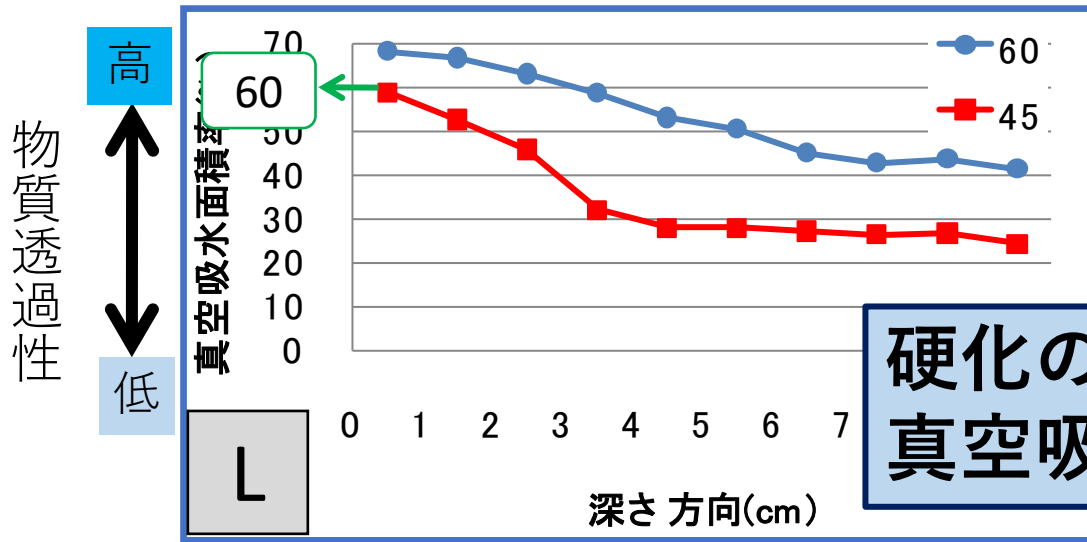
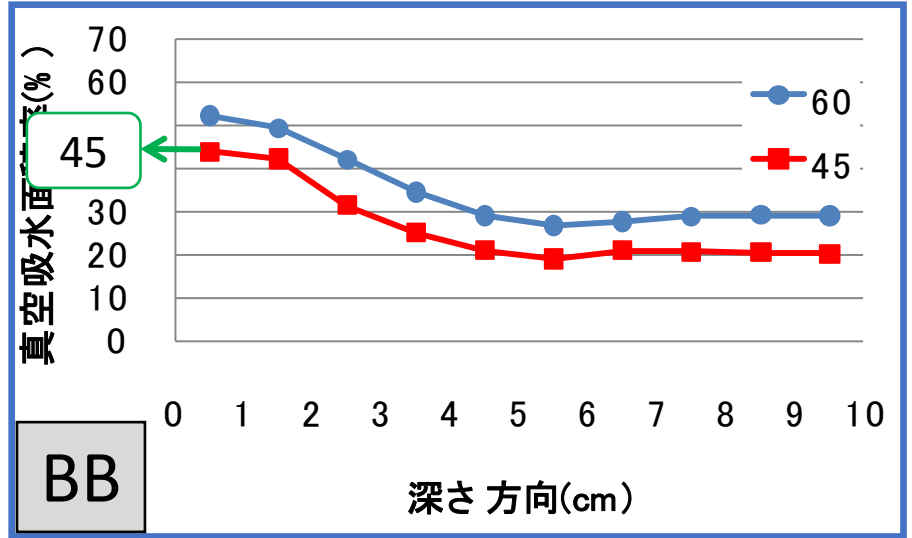
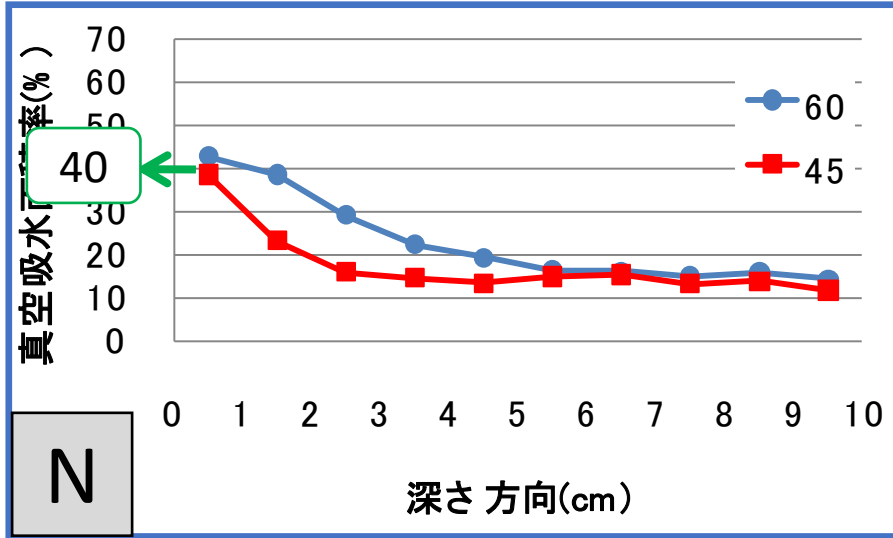


割裂後の断面図

$$\text{真空吸水面積率}(\%) = \frac{\text{吸水面積}}{\text{断面積}}$$

試験結果 W/C

(青木：2011)

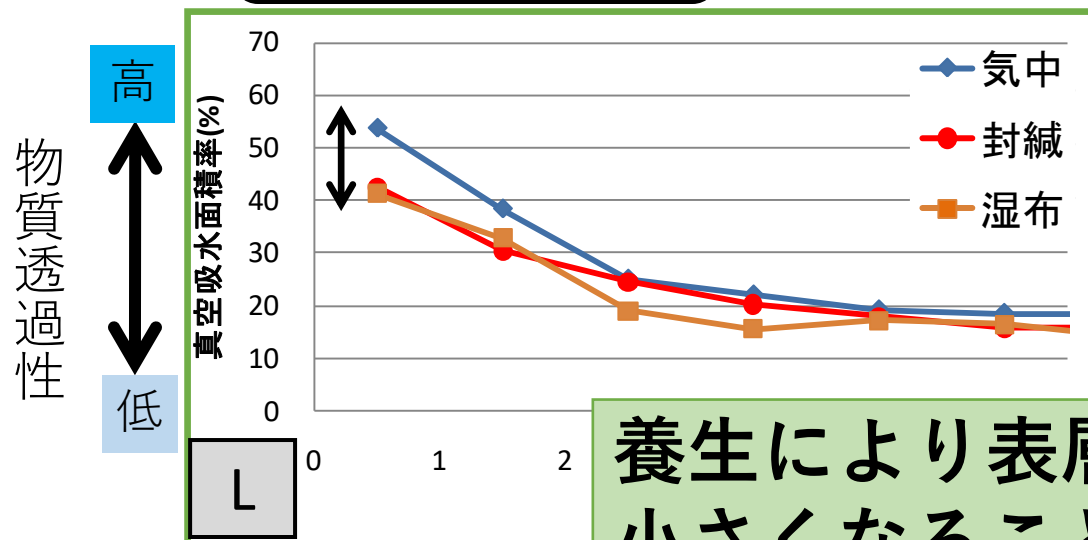
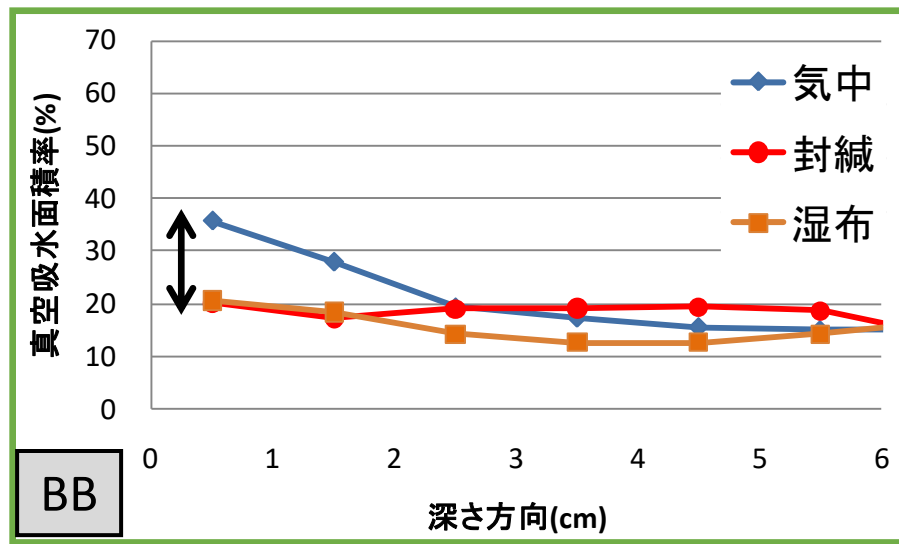
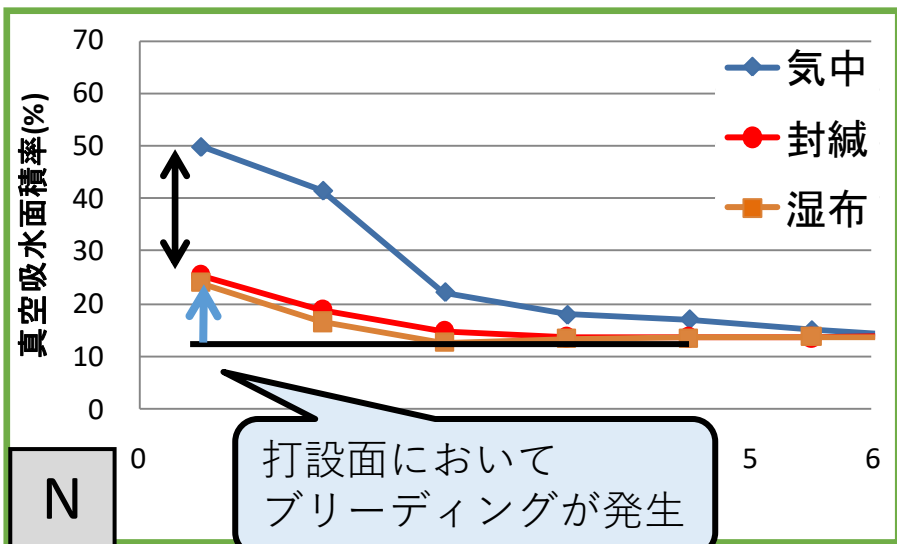


硬化の速さ
N > BB > > L

硬化の遅いLでは
真空吸水面積率は大きくなる

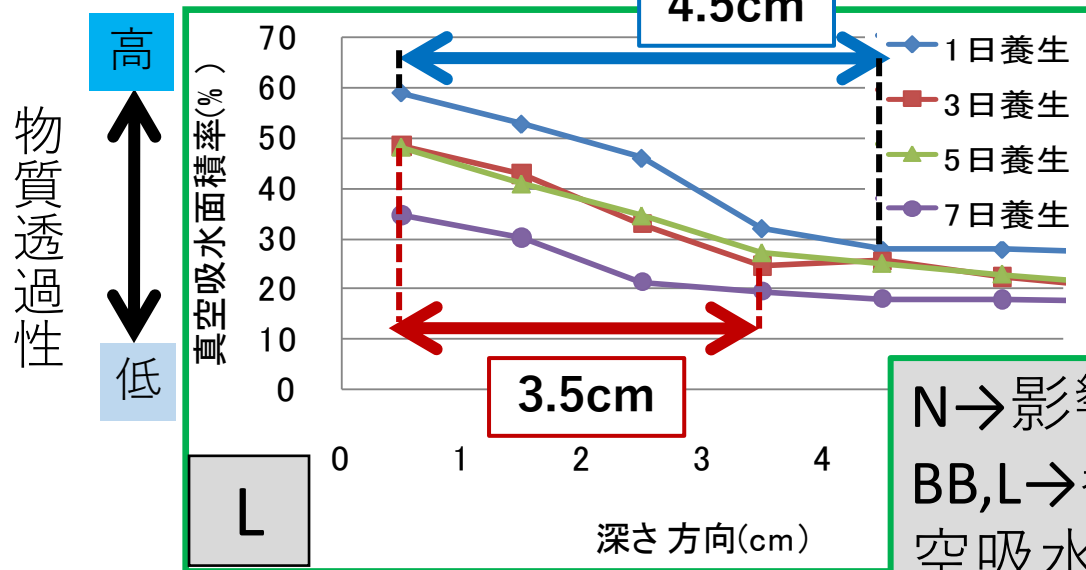
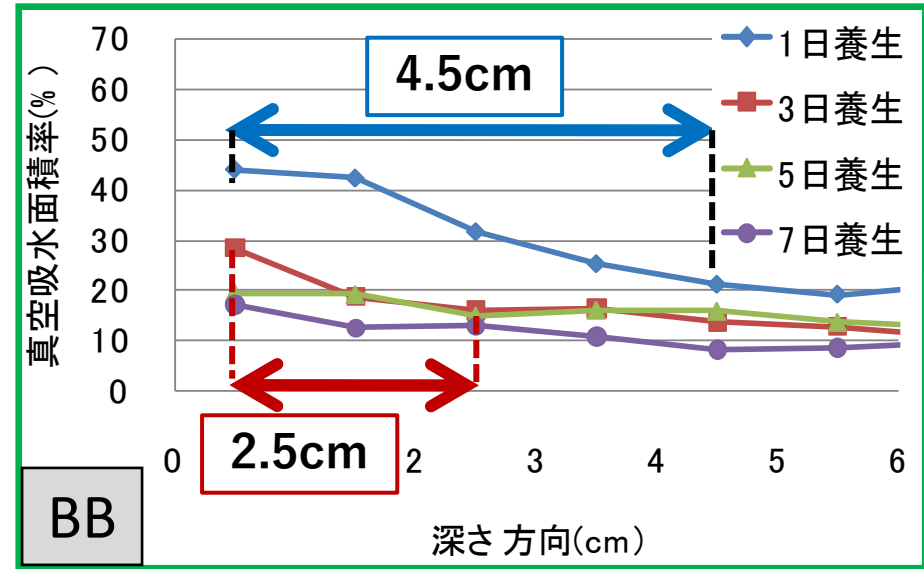
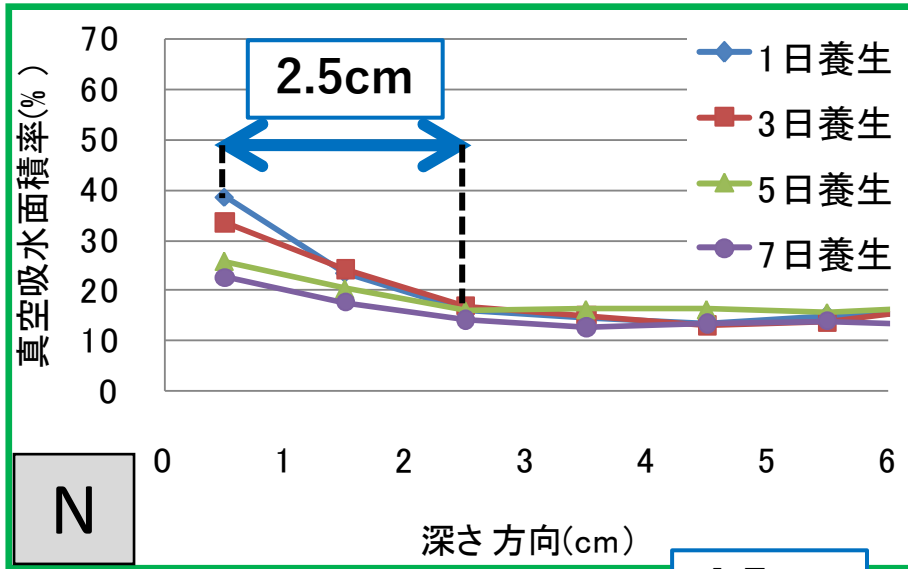
物質透過性
↑ 高
↓ 低

試験結果 養生方法



養生により表層の真空吸水面積率は小さくなることが確認できた

試験結果 養生期間



硬化の速さ
N > BB > > L

N → 影響なし
BB, L → 養生期間が長くなると真空吸水面積率は小さくなる⁴⁶

「養生の影響範囲と度合い」の評価

(杉山、名古屋：2021)

□セメント種類

普通ポルトランドセメント(OPC)

高炉セメントB種 (BB)

低熱ポルトランドセメント (LPC)

高置換高炉セメント (ECM)

No.	Kinds of cement	W/C (%)	s/a (%)	Unit (kg/m ³)			
				W	C	S	G
N35	OPC	35	44	170	486	788	886
N45		45	46		378	830	934
N55		55	48		309	858	965
N65	BB	65	50		262	876	986
BB35		35	44		486	780	877
BB45		45	46		378	824	927
BB55		55	48		310	852	959
BB65	LPC	65	50		262	872	981
L55		55	48		309	861	969
E55		ECM	55		48	309	850

□W/C: 35, 45, 55, 65%

□養生期間 1, 3, 5, 7, 10, 28d

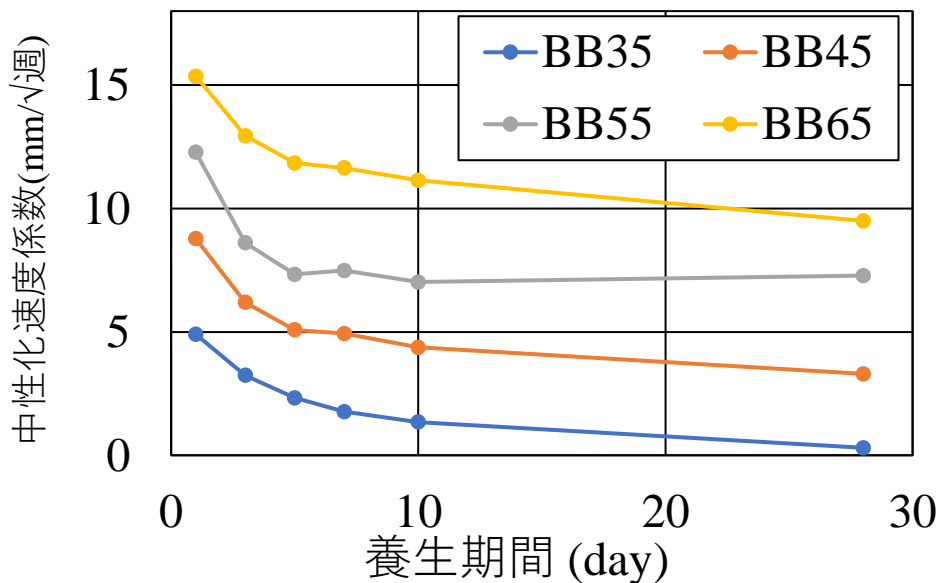
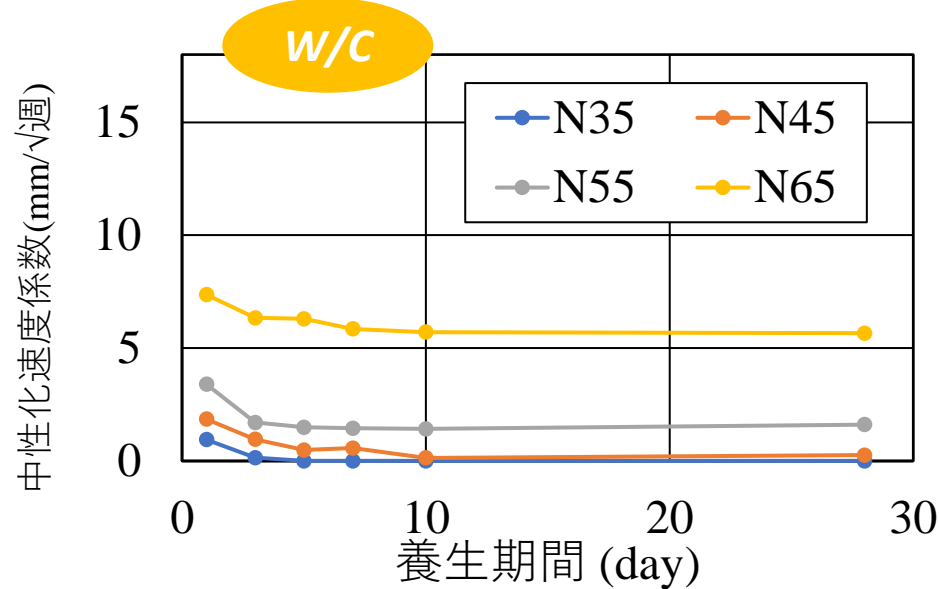
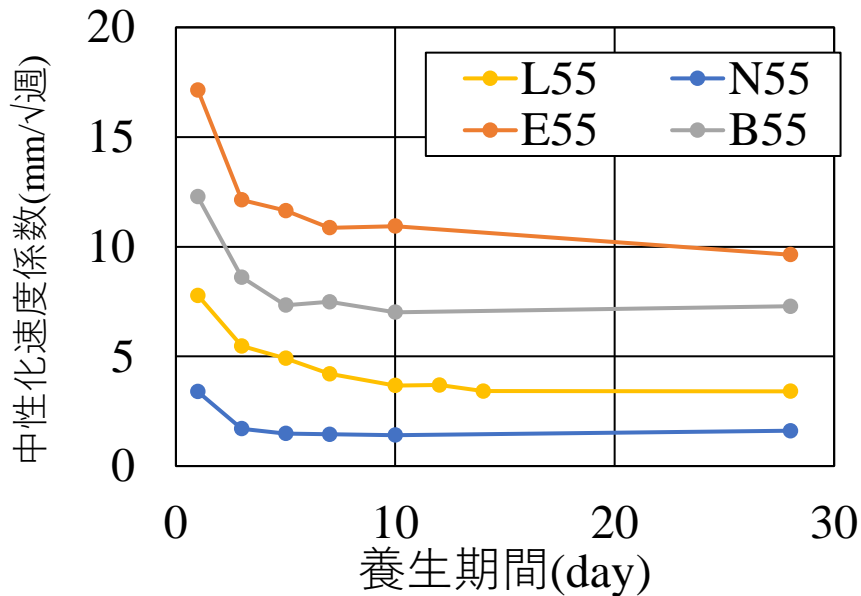
□養生方法：封緘（養生シート）



- ・促進中性化試験
- ・真空吸水試験
- ・表層水分吸水試験

促進中性化試験結果

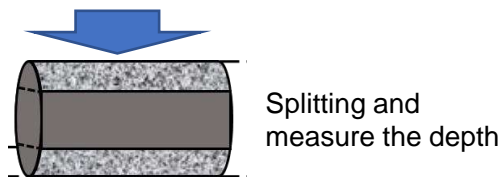
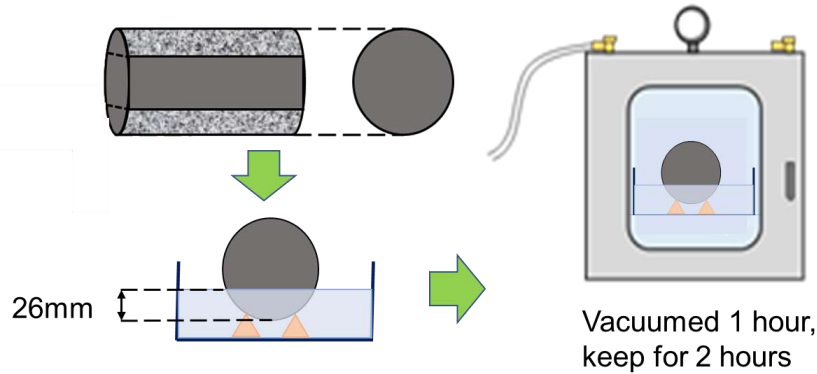
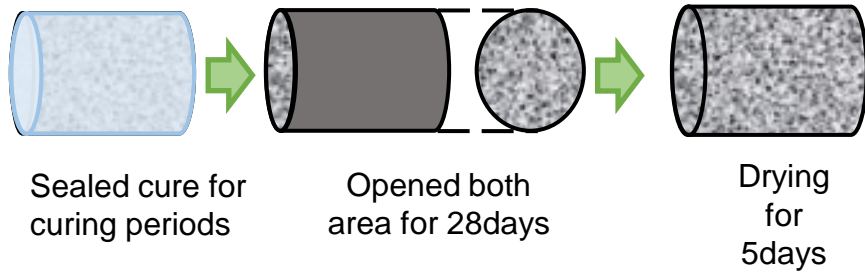
Cement



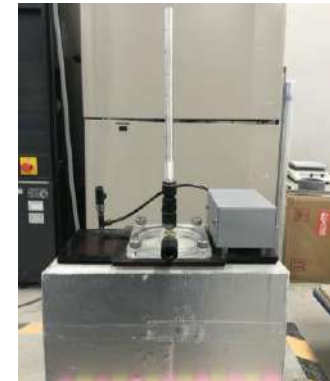
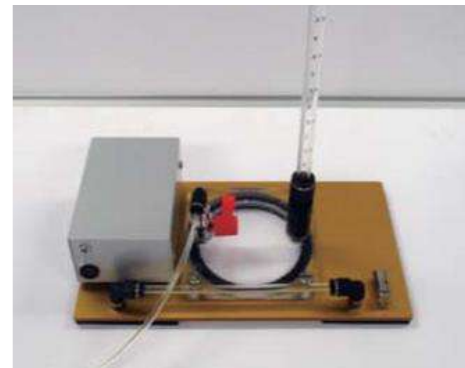
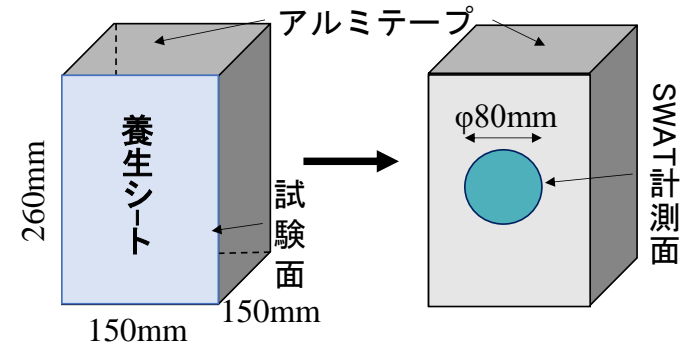
- 養生期間の延長により中性化速度が低下.
- 中性化速度係数は、W/Cやセメント種類に大きく依存

吸水試験による養生の影響範囲の推測手法

真空吸水試験



表層吸水試験

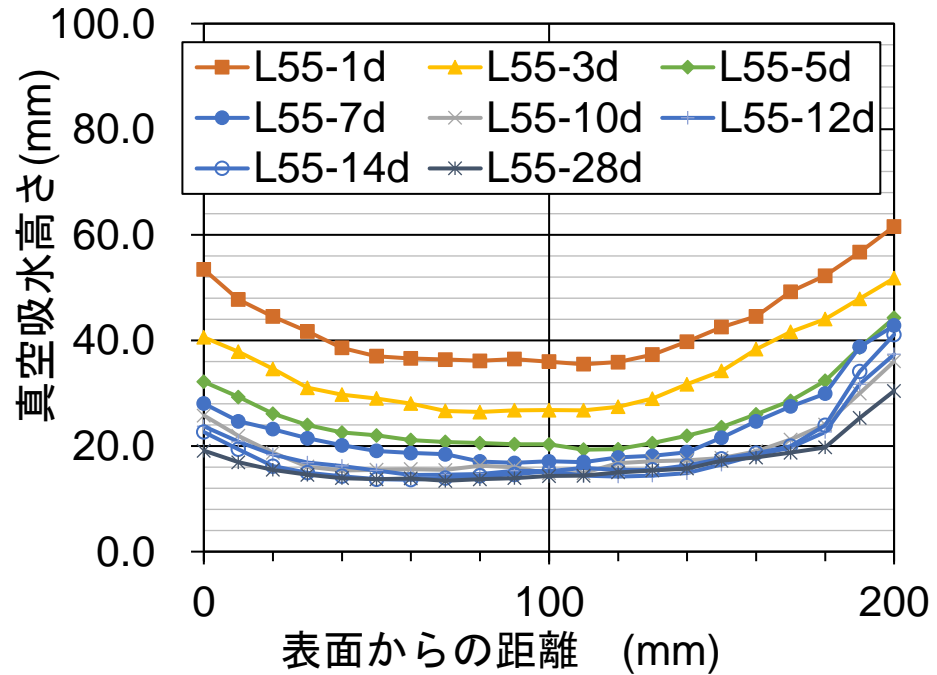
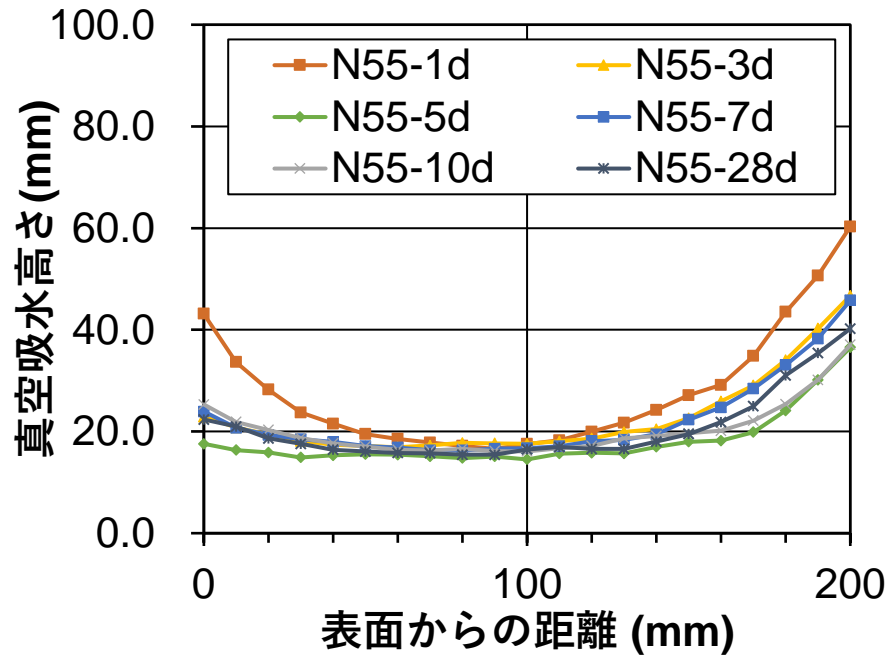


真空吸水試験結果

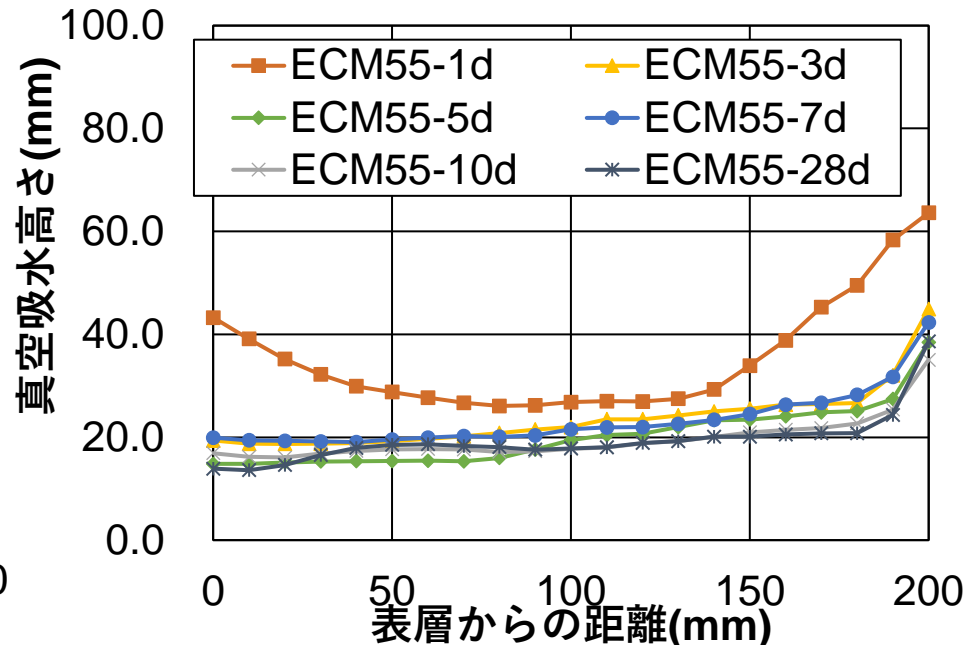
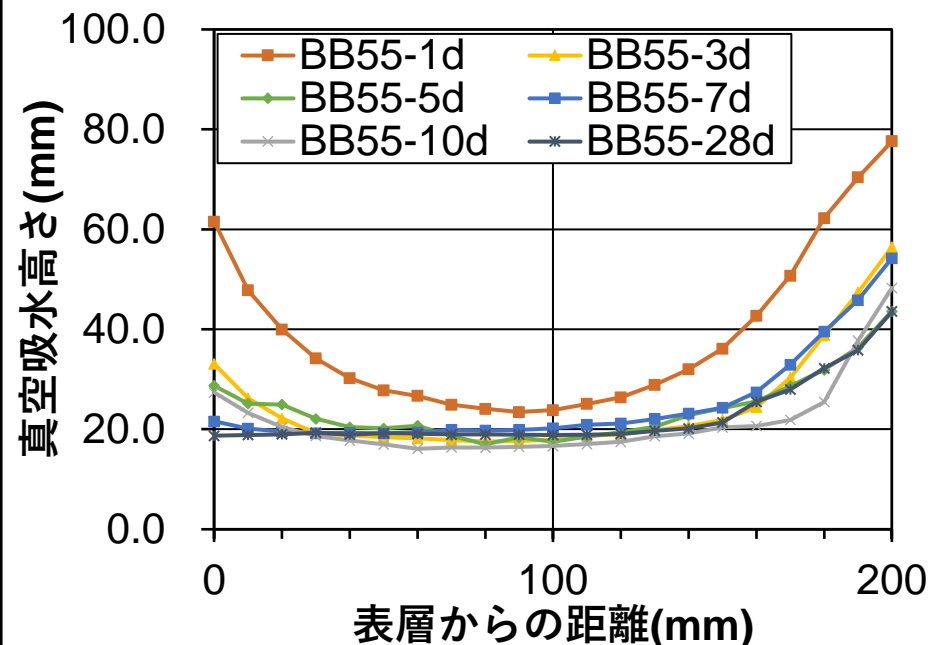
L55



※ ブリーディングと乾燥の影響を考慮して試験体底面側を利用



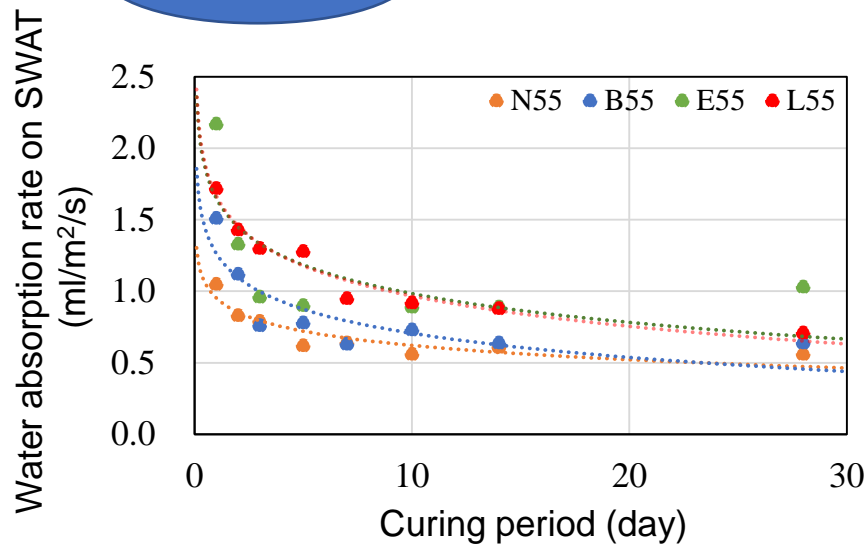
真空吸水試験結果



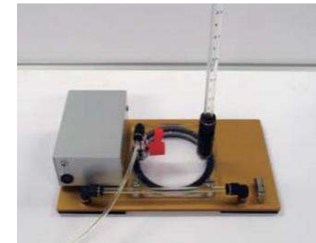
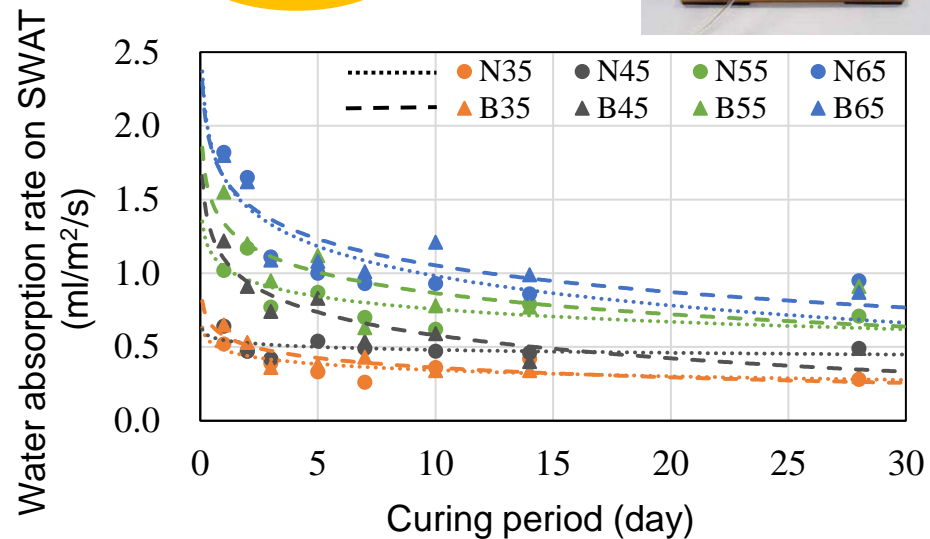
- 水分浸透は表層からの空隙の連続性に依存する。
- 養生期間の影響は、セメント種類に依存する

表層吸水試験結果

Cement



W/C

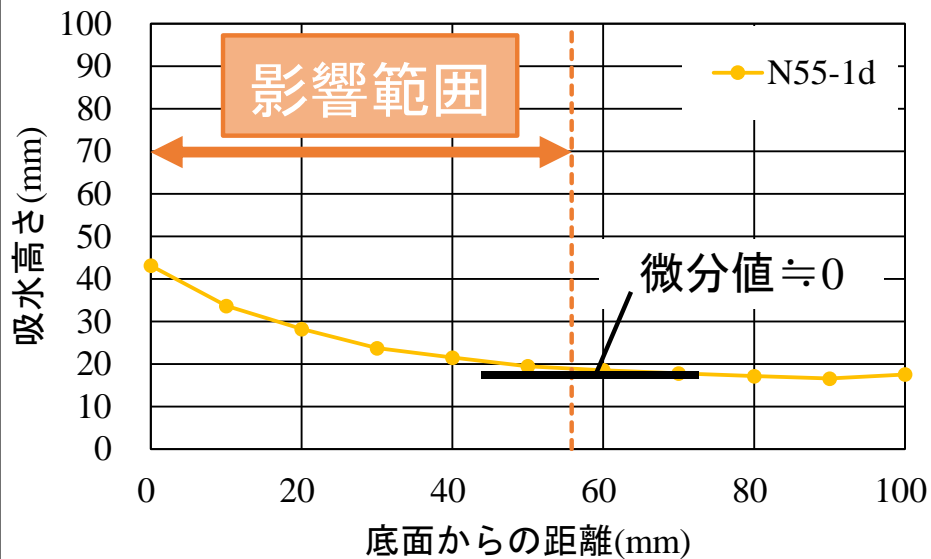
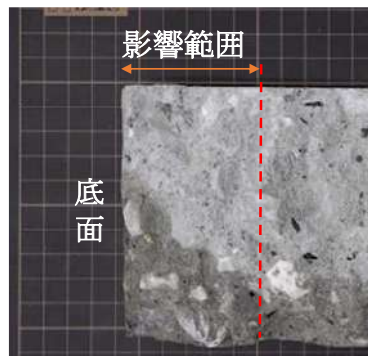


- 表層吸水速度は養生期間の延長により小さくなる。
- 養生期間の影響はセメント種類とW/Cに依存する。

Discussion ~curing indexを作る~

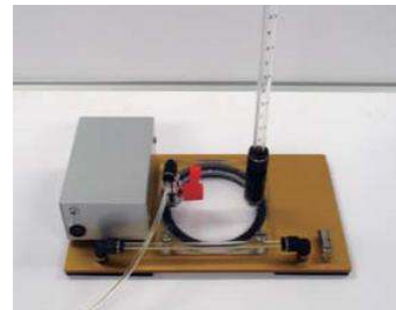
養生の影響範囲

真空吸水試験

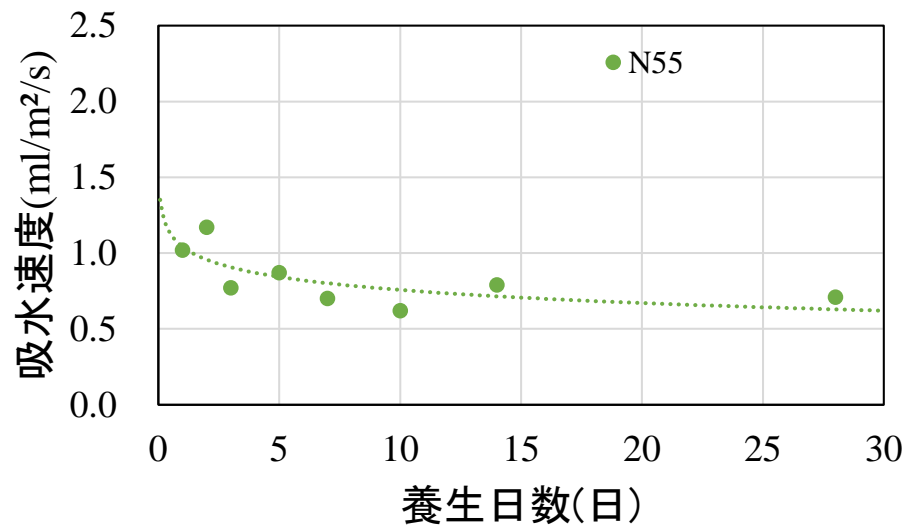


表層のPermeability

表層吸水試験



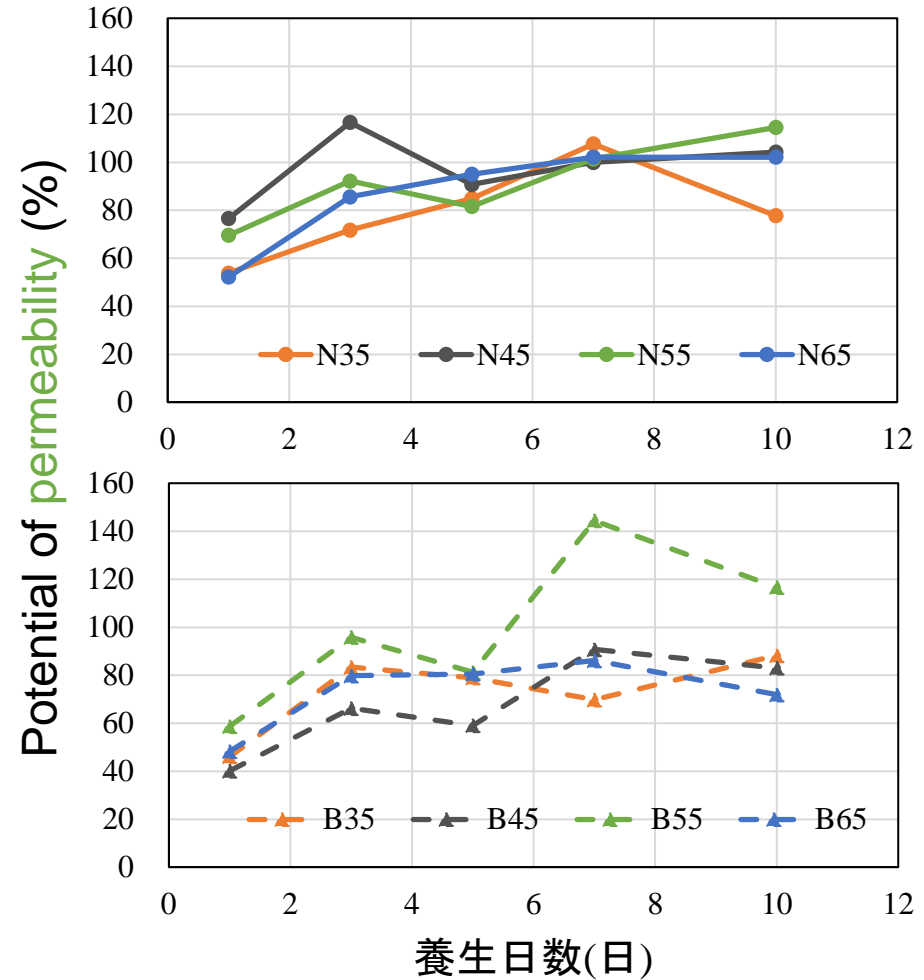
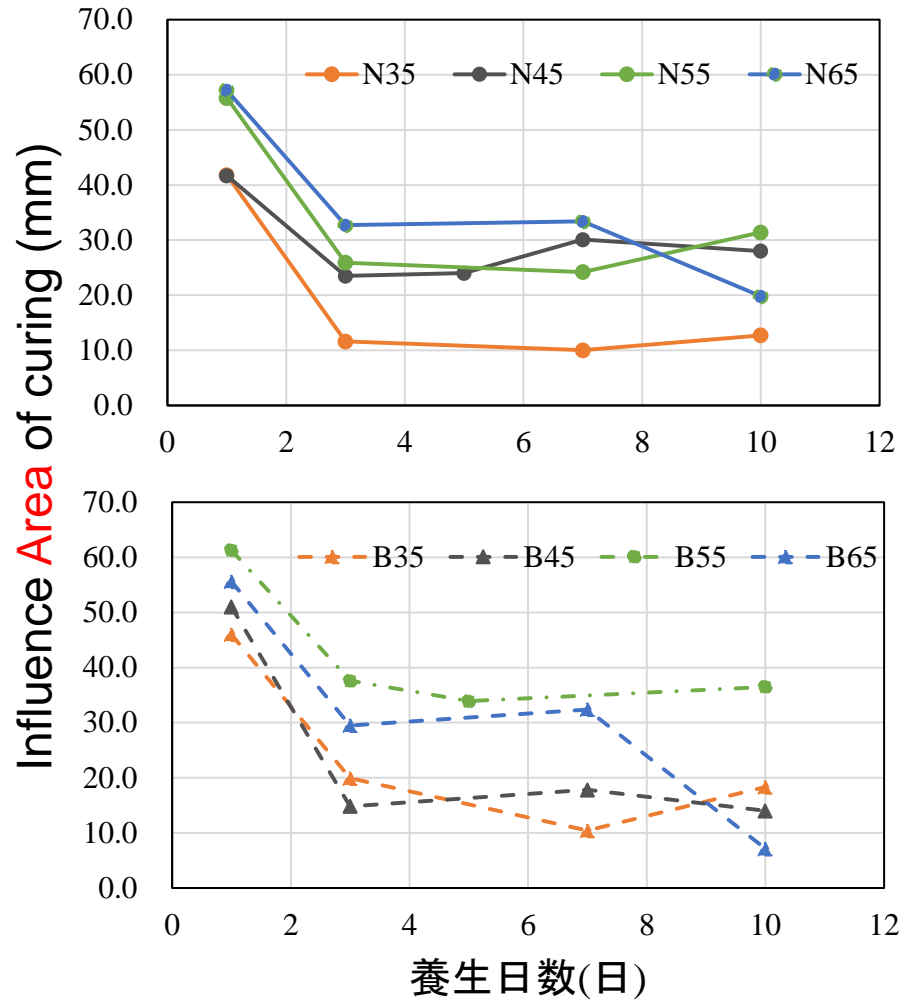
$$\text{Potential} = \frac{\text{water absorption ratio on curing at 28d}}{\text{water absorption ratio on curing at x-d}}$$



真空吸水試験

表層吸水試験

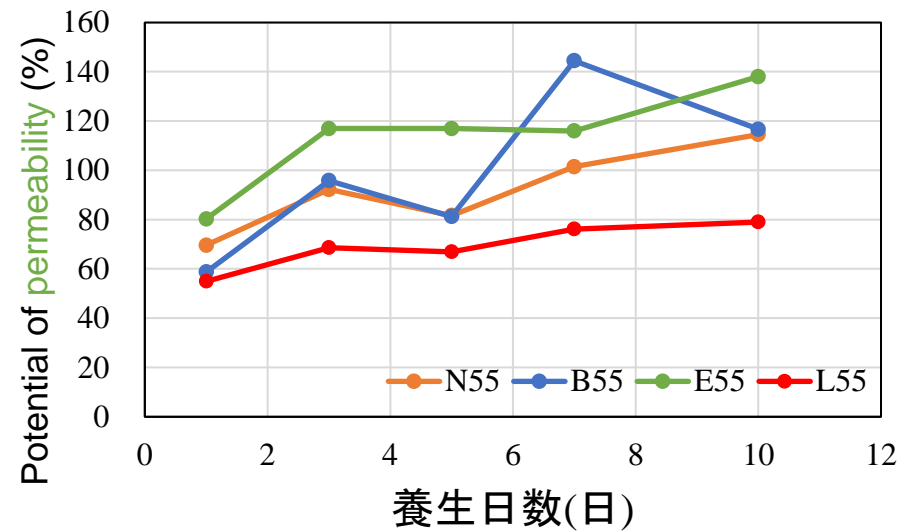
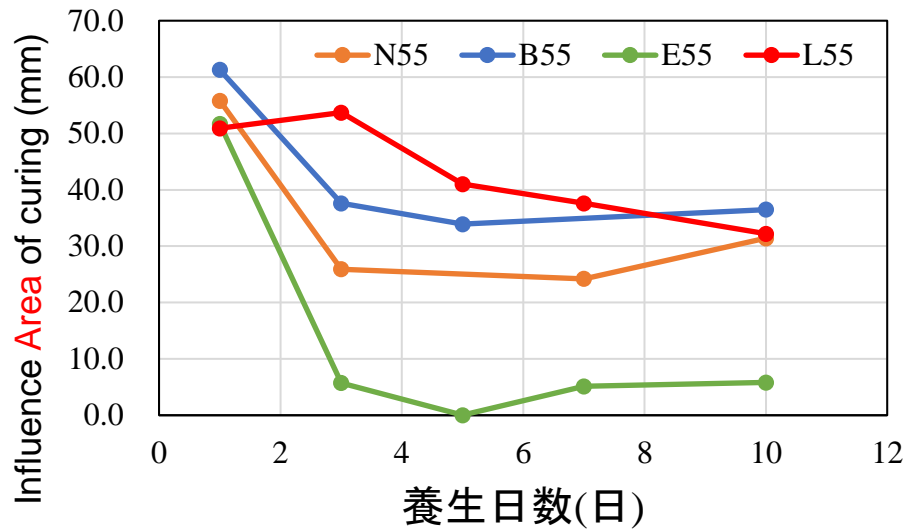
W/C



真空吸水試験

表層吸水試験

Cement



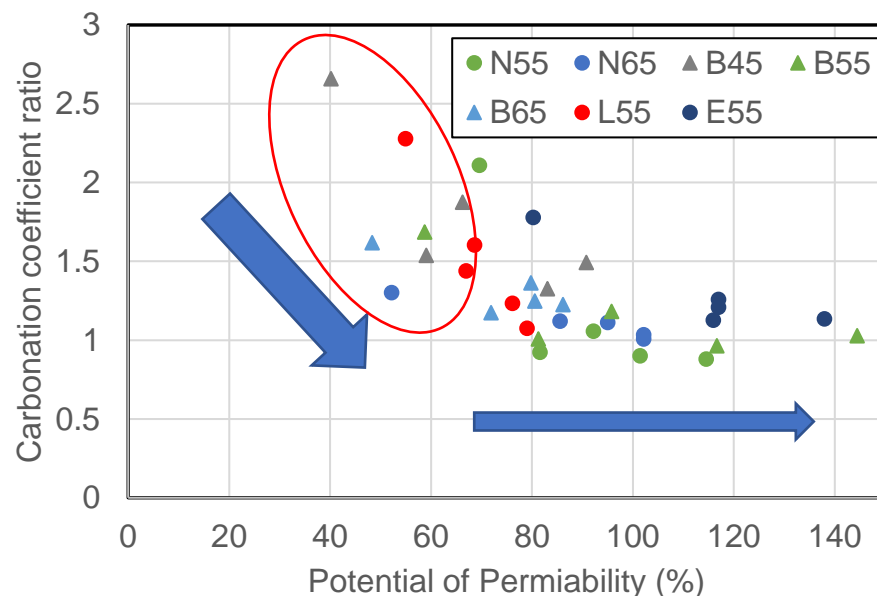
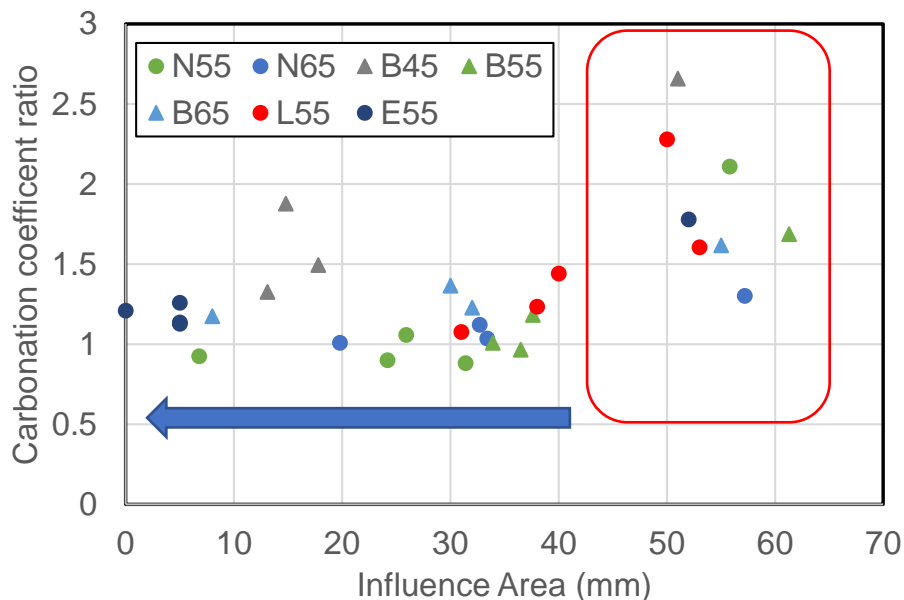
- 養生期間を延長すると、養生の影響範囲は減少する。
- 養生期間の延長により、表層の品質も向上する。

中性化速度と *curing index* の関係

養生の影響範囲

表層のPermeability

$$\text{Carbonation coefficient ratio} = \frac{\text{Carbonation coefficient at curing periods}}{\text{Carbonation coefficient at 28days curing}}$$



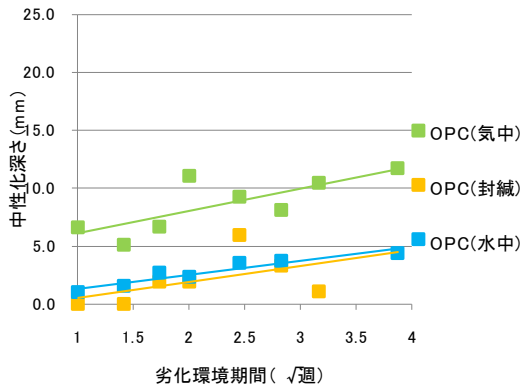
- 中性化の進行は、養生影響範囲が約40-45 mmで大きくなる。
- 表層の品質が水中養生の60%以下になると、中性化の進行が大きくなる。

4. 養生の影響度の扱い方 (豊村：2010)

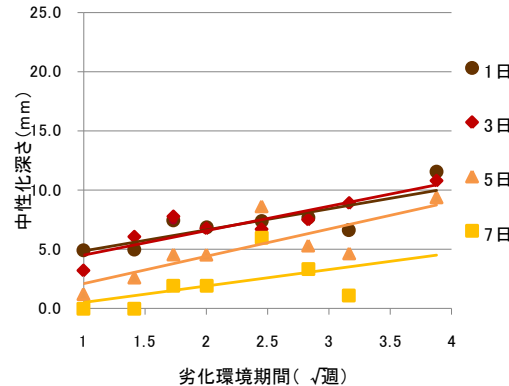
【1】中性化の進行における取り扱い

同一セメント種 (OPC) で比較すると

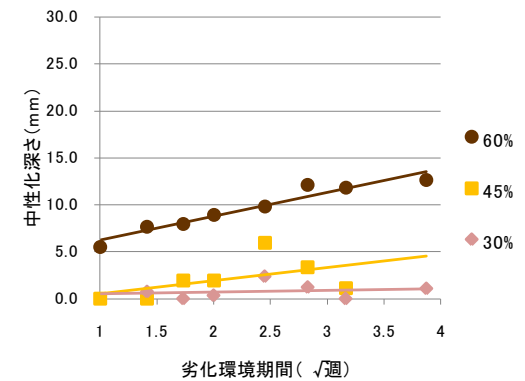
養生方法



養生期間



水セメント比



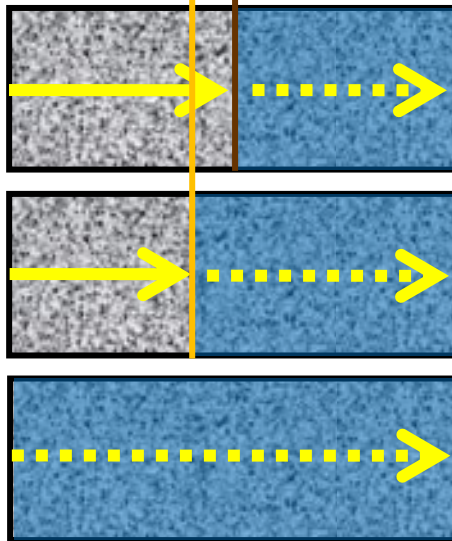
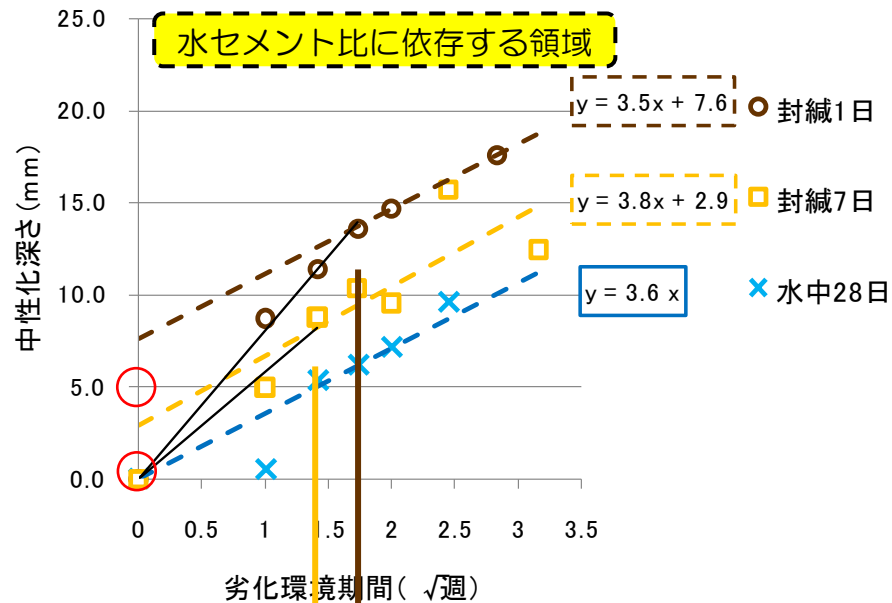
傾き同程度で養生条件に応じて式がスライドする

中性化速度係数 (傾き)
大きく影響を受ける

中性化速度式に
養生の影響を組み込むために、

中性化速度係数 (傾き) は配合による影響が卓越するため、
養生条件によって変動する中性化深さに着目する

養生方法および期間と速度式の関係



現在の中性化速度式に養生条件を組み込むために

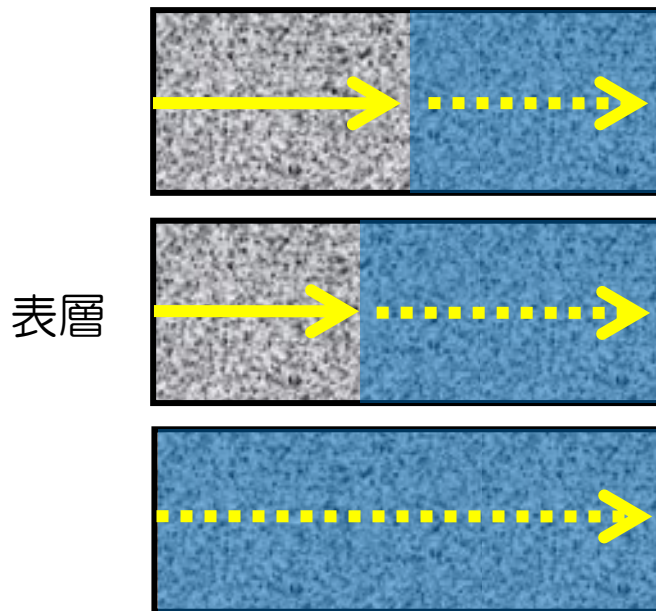
本実験における水中養生（28日）を基準として、他の養生方法・期間の傾きを近似

$$Y = a\sqrt{t} + b$$

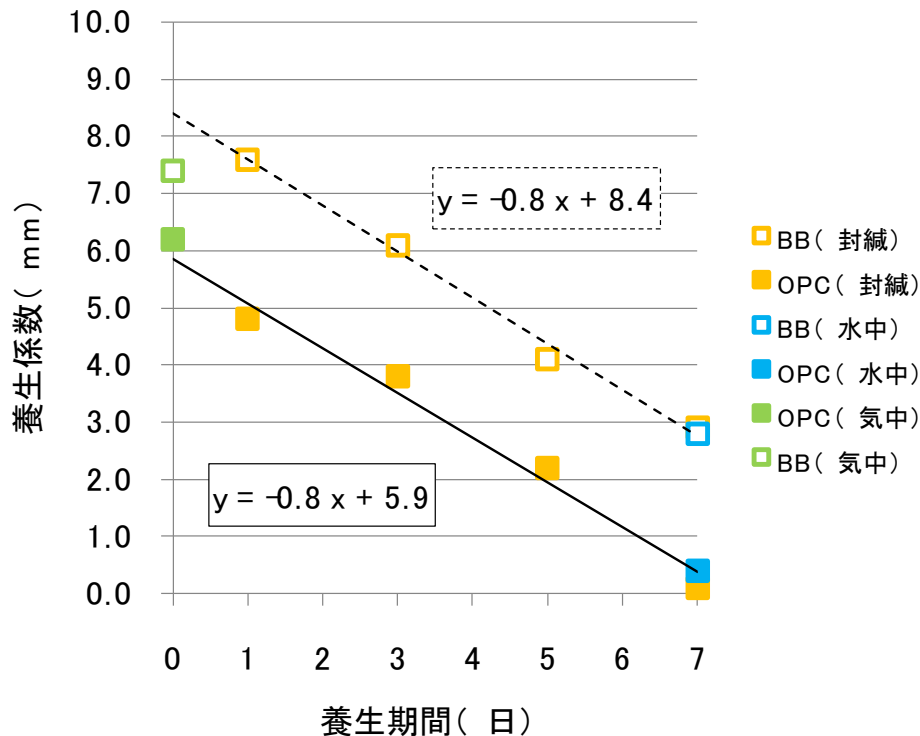
養生条件によって変動するため

養生係数と定義

養生方法および期間と養生係数の関係

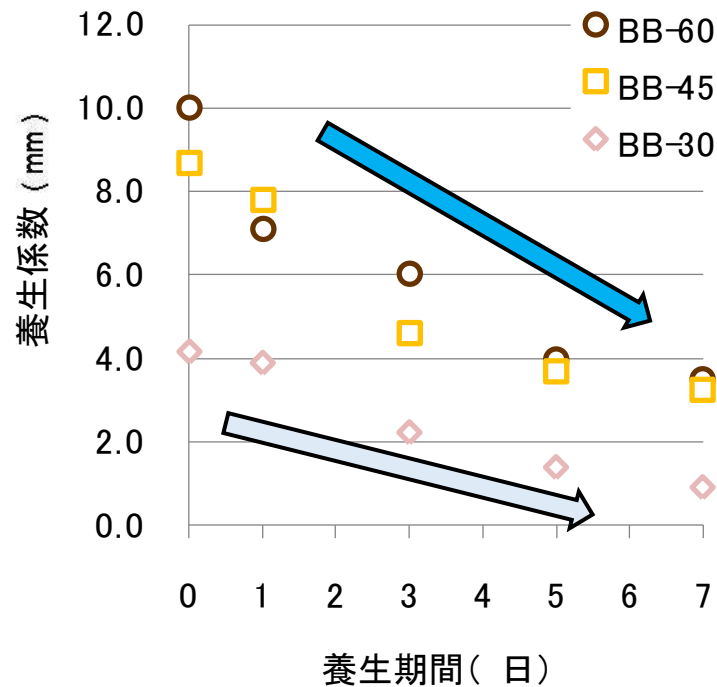
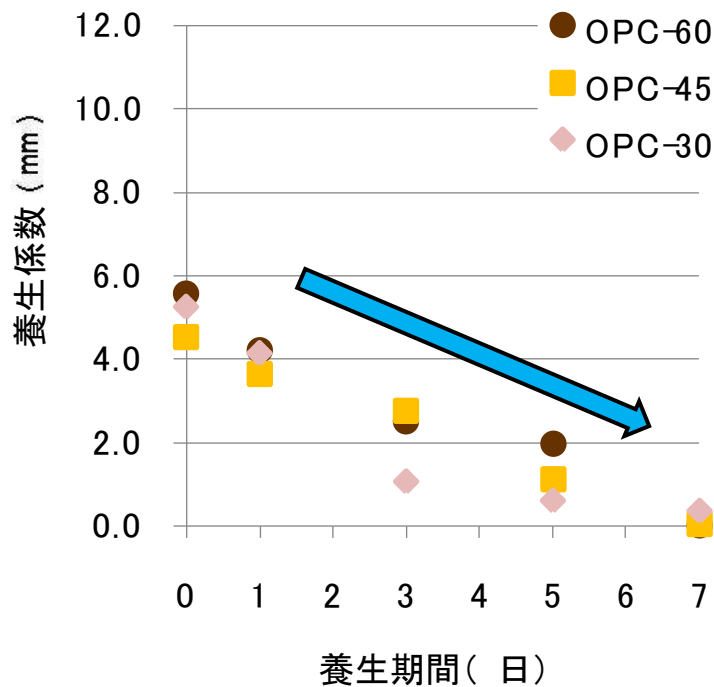


養生係数の概念図



- 養生期間の増加に伴い養生係数は減少し、水中養生に近似
- 近似式より、BBは養生係数OPC+0.25で耐久性予測に組み込めると考えられる

養生係数と水セメント比の関係

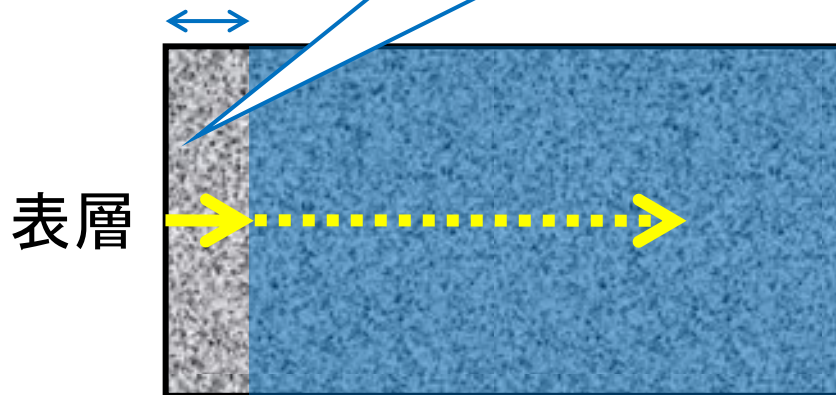


- 封緘養生期間の増加に伴い、養生係数が減少
- 養生係数は、OPCは水セメント比によらずほぼ同等である一方、BBは水セメント比30%と45, 60%で差がある

養生影響範囲の取り扱い

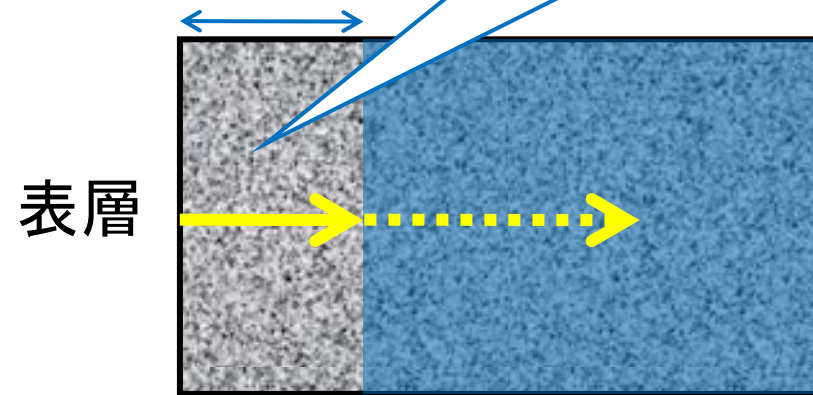
養生が十分な場合

水和反応が
滞っている領域



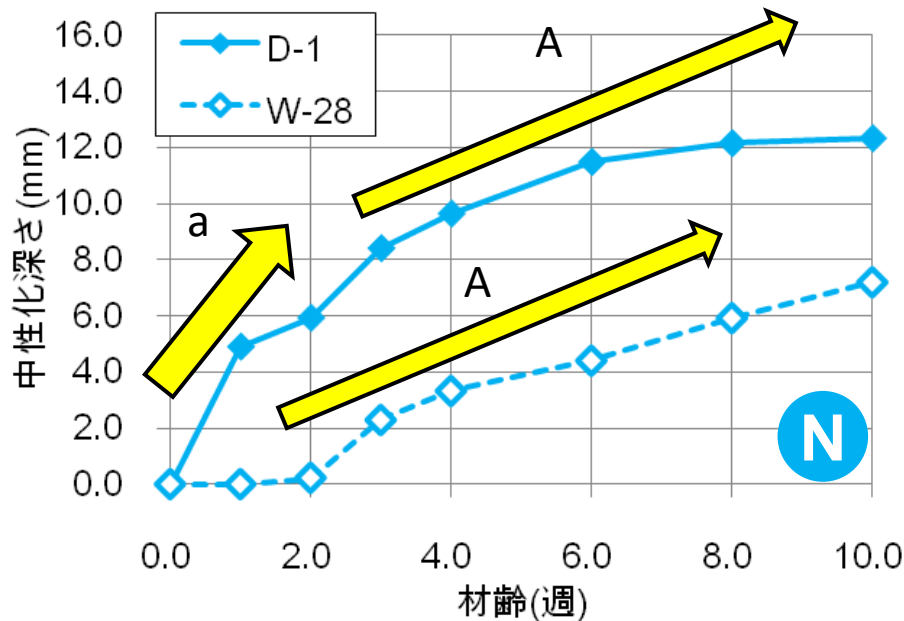
養生が不十分な場合

水和反応が
滞っている領域

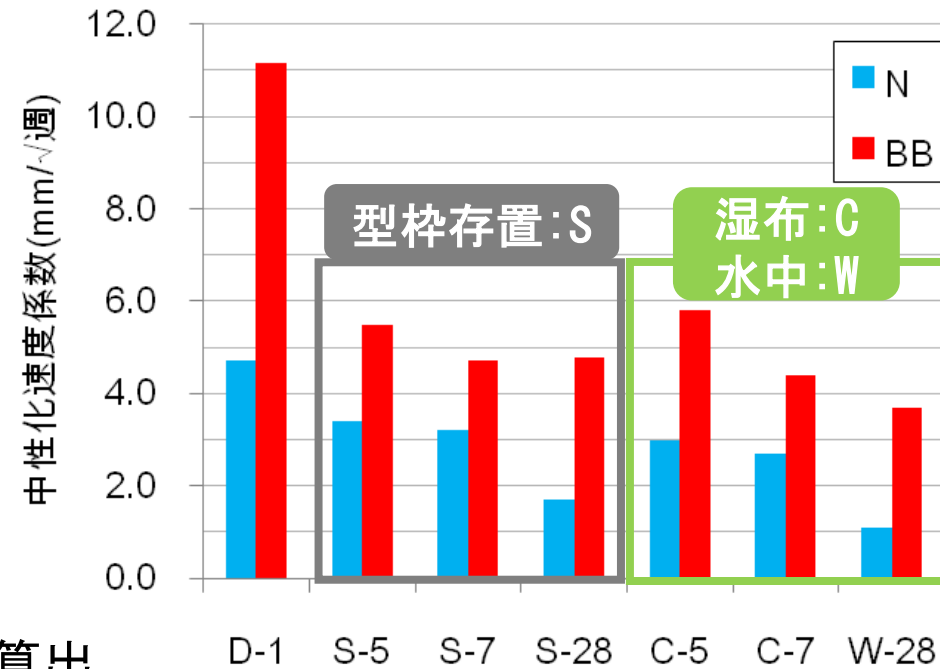


養生方法および期間で生ずる乾燥影響範囲が劣化（中性化）進行速度に及ぼす影響を把握

【2】劣化予測への反映



a : 表層部での中性化速度係数



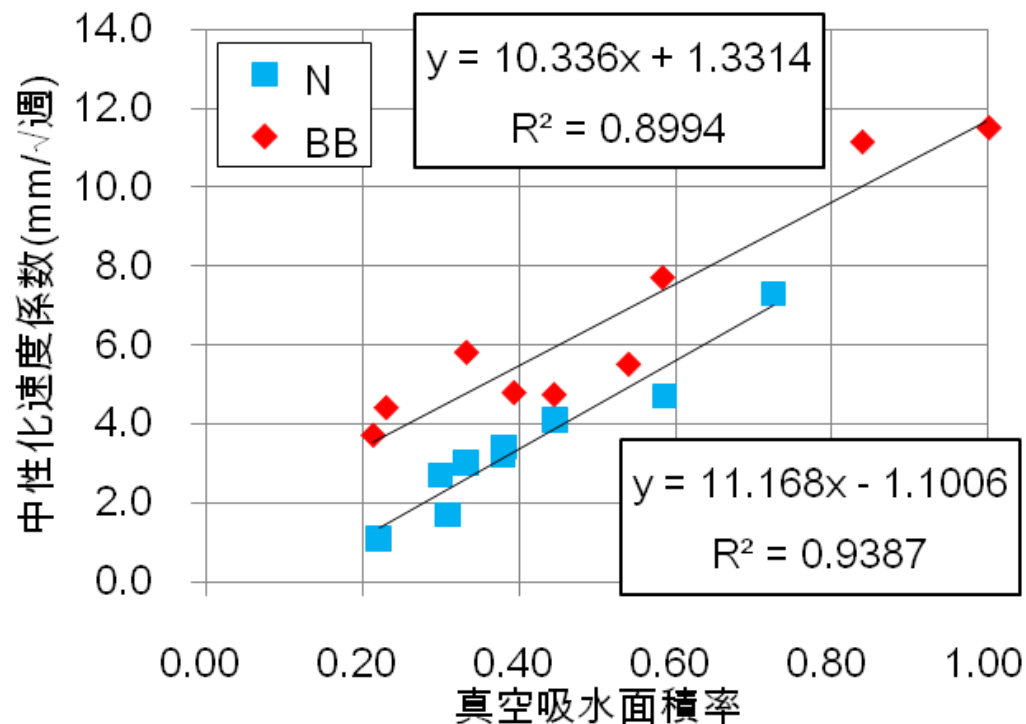
➡ $y = a\sqrt{t}$ より, 中性化速度係数を算出

y : 中性化深さ(mm), a : 中性化速度係数(mm/√週), t : 材齢(年)

- ・Nの場合, 養生期間が長くなるほど, 中性化速度係数は低下する傾向を示していた
- ・BBの場合, Sでは養生期間で差はみられないが, C, Wについては養生期間が長いほど, 中性化速度係数が低下していた

吸水性と耐久性の関係

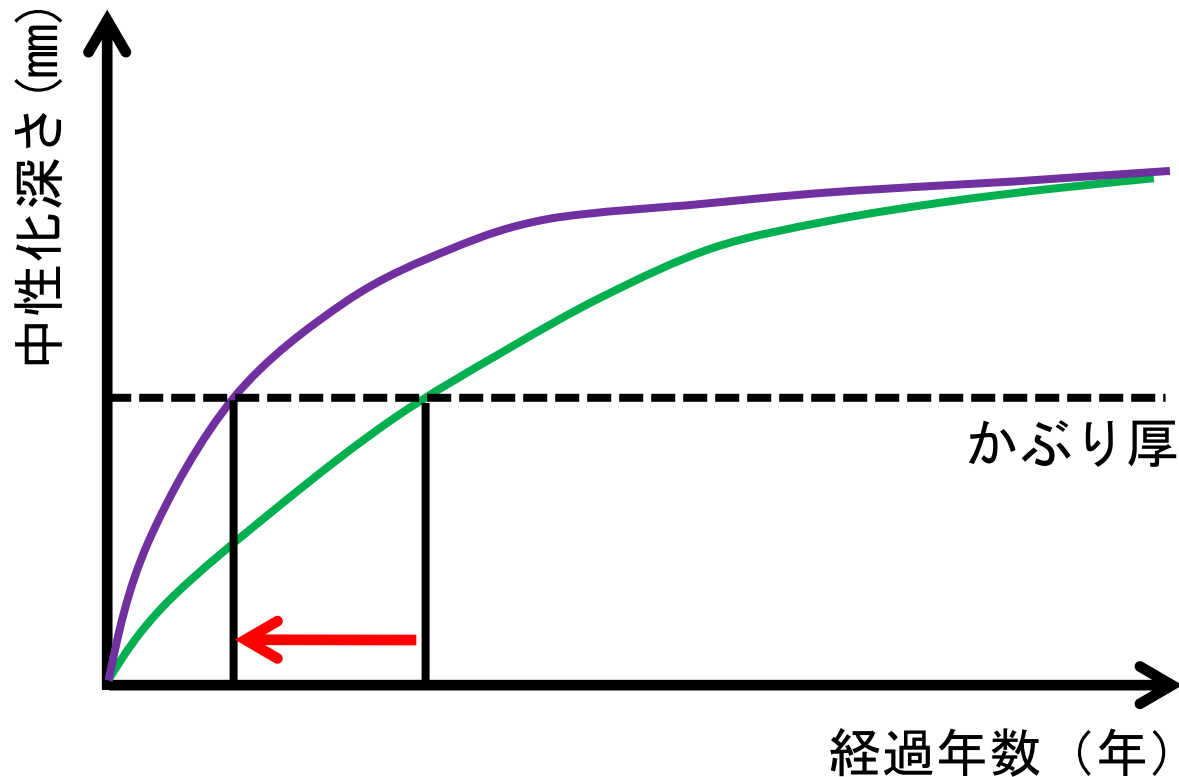
<真空吸水面積率と中性化速度係数の関係>



- ・吸水面積率と中性化速度係数には高い相関性がみられる
- ・N, BBで二つの直線関係がみられ, 吸水面積率の表す同一の空隙連続性であってもセメント種類により中性化速度係数は異なる

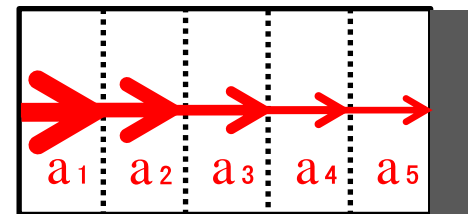
真空吸水試験を用いた劣化予測手法の提案

<中性化の劣化進行速度の違い>



提案している劣化予測手法

表層 内部 鉄筋

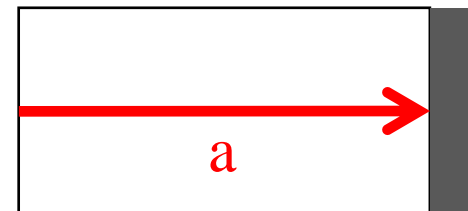


d_1 d_2 d_3 d_4 (mm)

深さ位置ごとに空隙構造が異なる
⇒ 中性化速度係数 (a) は深さ位置ごとに異なる

コンクリート標準示方書

表層 内部 鉄筋



コンクリートは深さ方向に一様
⇒ 中性化速度係数 (a) 一定

・養生の影響を深さ方向に定量的に評価することができる

5. 養生終了時期を判定する^(上原：2011)

比抵抗

・・・ 電気の流れにくさ ($k\Omega \cdot m$)

コンクリート内の水の消費 \Rightarrow 水和反応・乾燥

水和反応の影響

打設時から経時的に比抵抗測定
水和反応進行に伴う比抵抗の変化



水和反応の進行

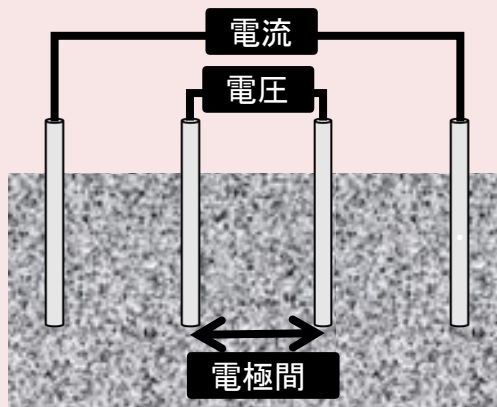
表層からの深さと乾燥の影響

比抵抗計測深さを調整



深さ位置ごとの
養生と乾燥による影響範囲を把握

比抵抗の測定：四電極法



直流電流

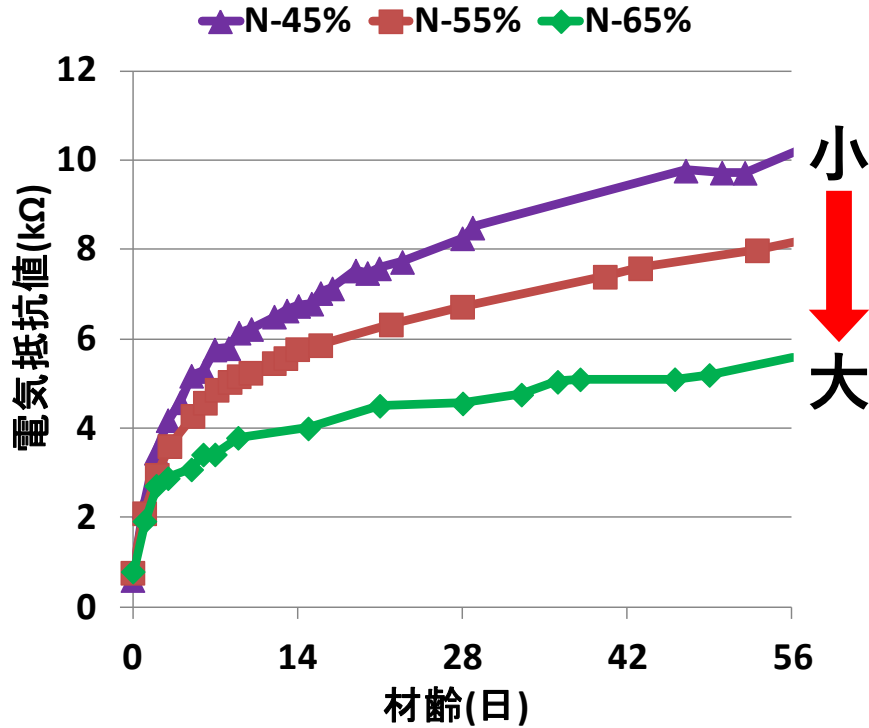
○交流に比べ装置が小さく現場向き
○帯電現象によって比抵抗が増加し続ける
 \rightarrow パルス波で帯電を抑制

オンの時間と**オフ**の時間がある波形

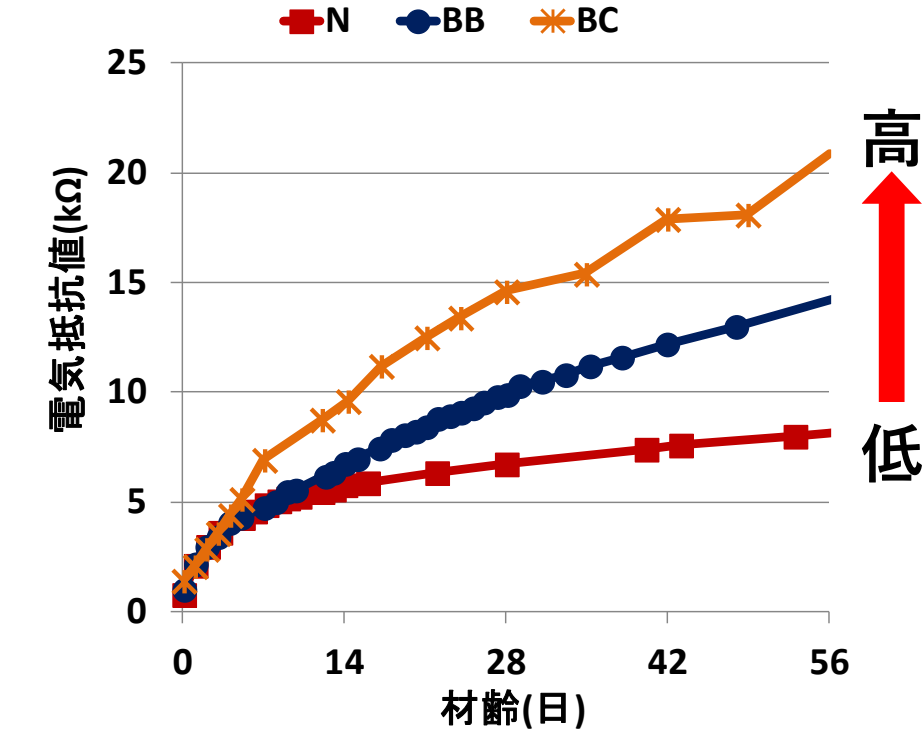


配合が電気抵抗値に及ぼす影響

W/C



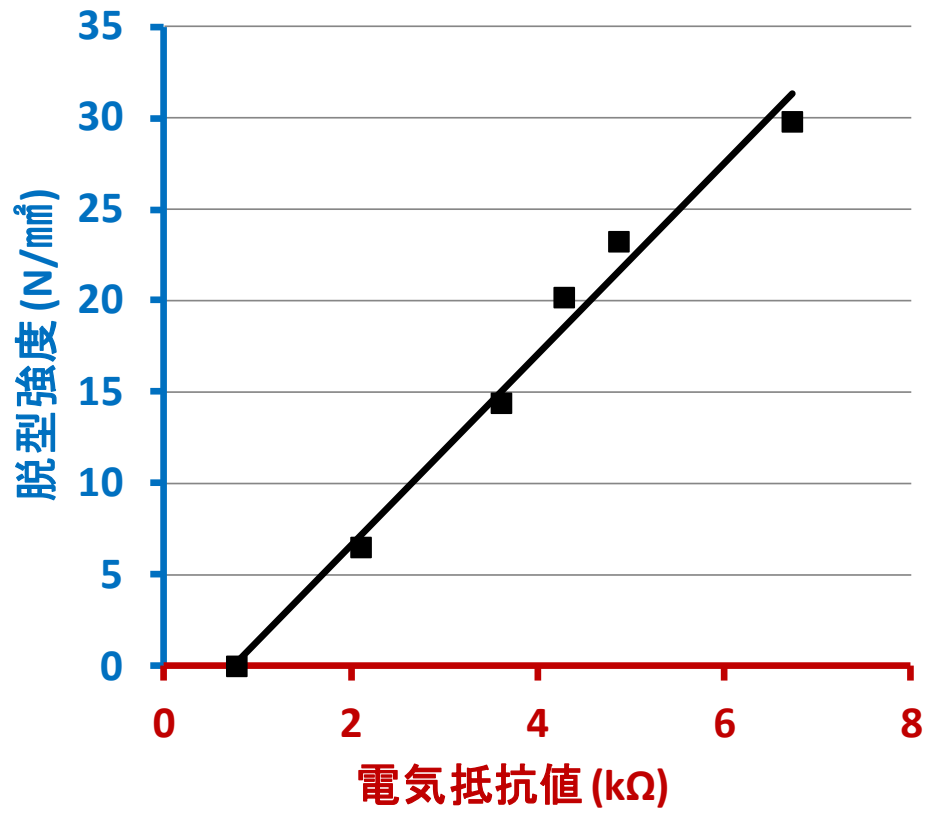
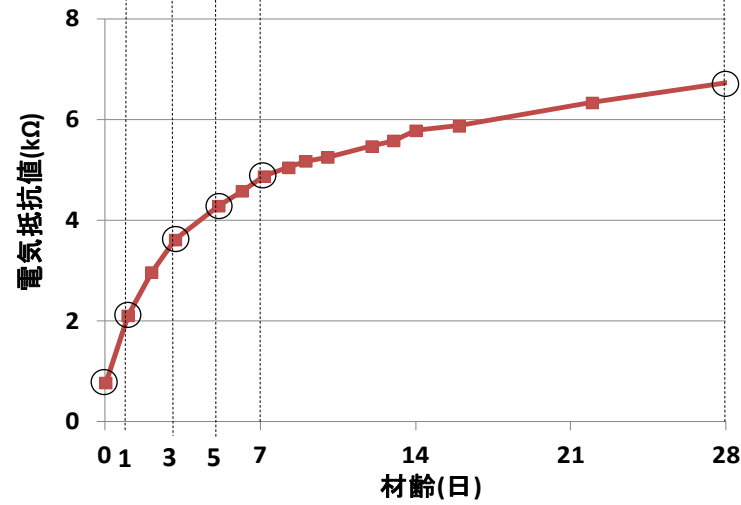
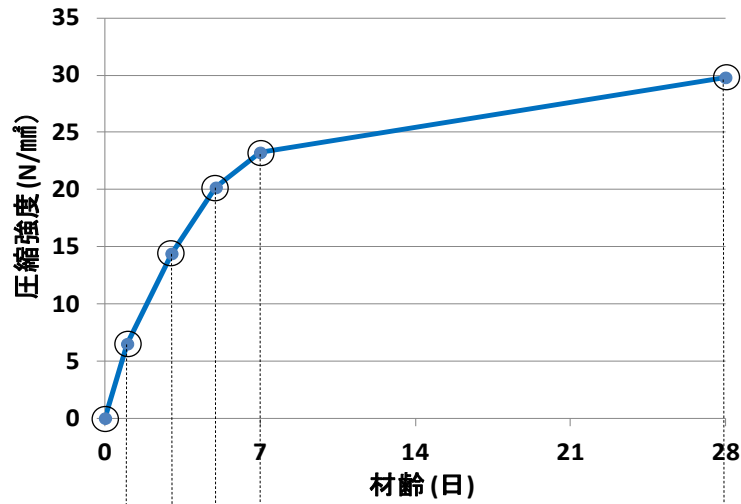
セメント種類



- W/Cが小さいほど電気抵抗値は大きくなる
⇒ セメント量が増えコンクリート内の水分が少なくなる
- スラグ置換率が高いほど電気抵抗値が大きくなる

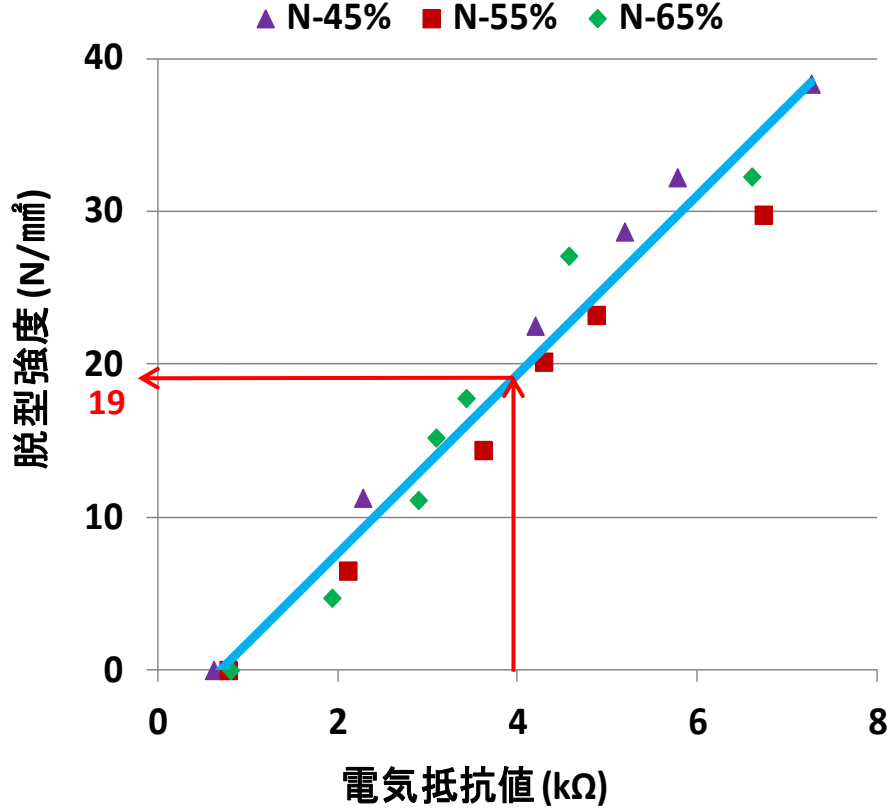
電気抵抗値と脱型強度の比較方法

N-55%

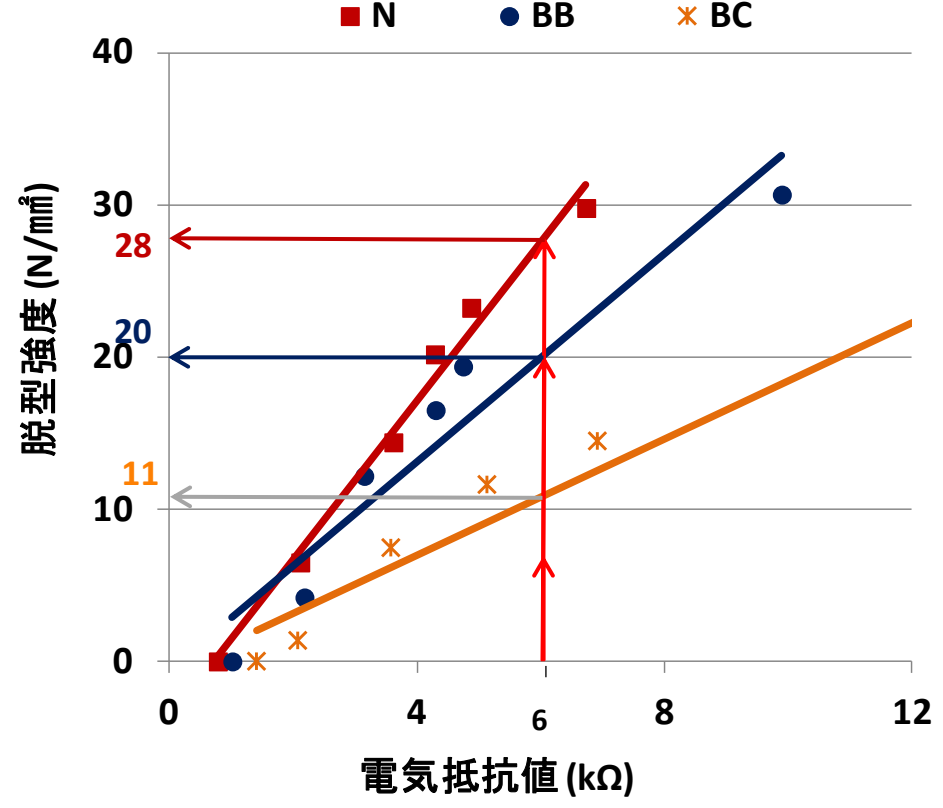


電気抵抗値と脱型強度の関係

W/C



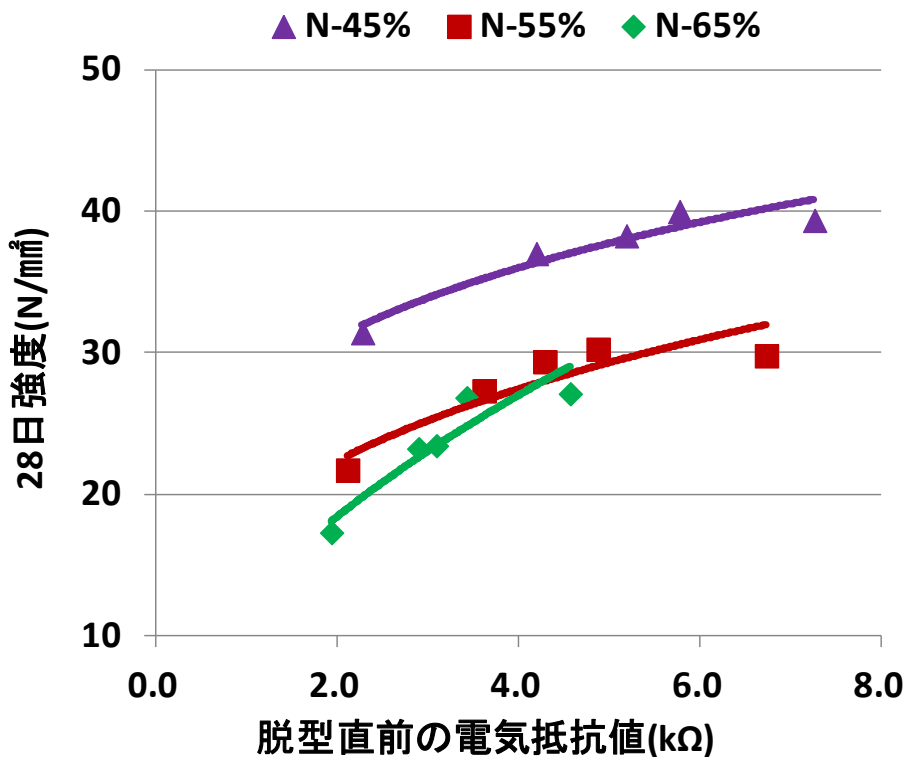
セメント種類



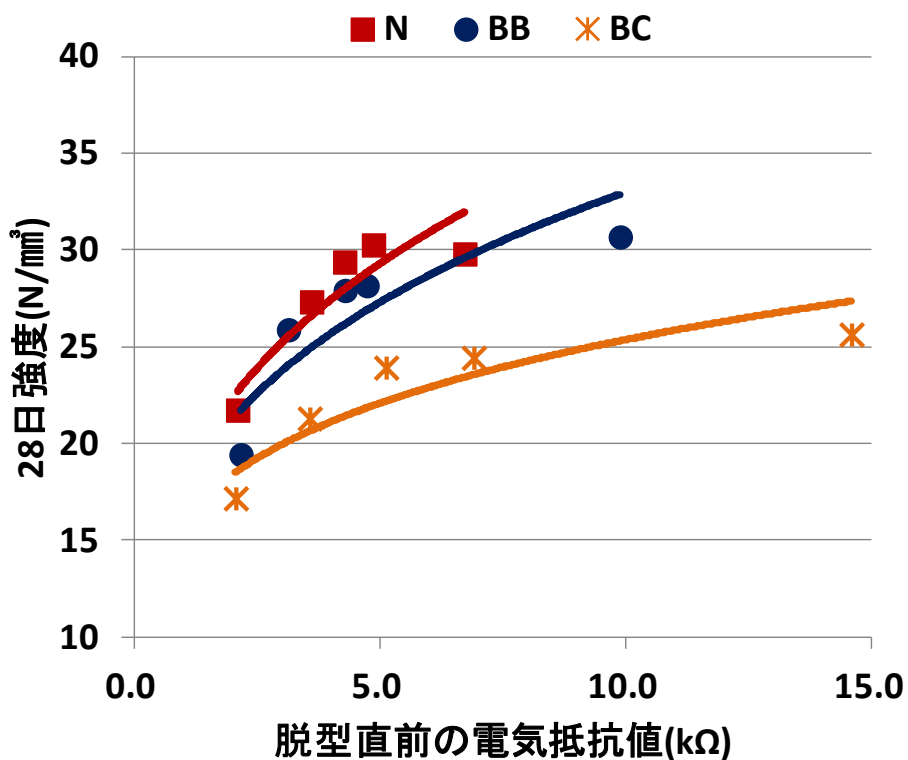
- W/Cによらず同一の推測式で推測できる可能性がある
- 高炉セメントの場合，置換率ごとに推測式が必要となる

電気抵抗値と28日強度の関係

W/C



セメント種類

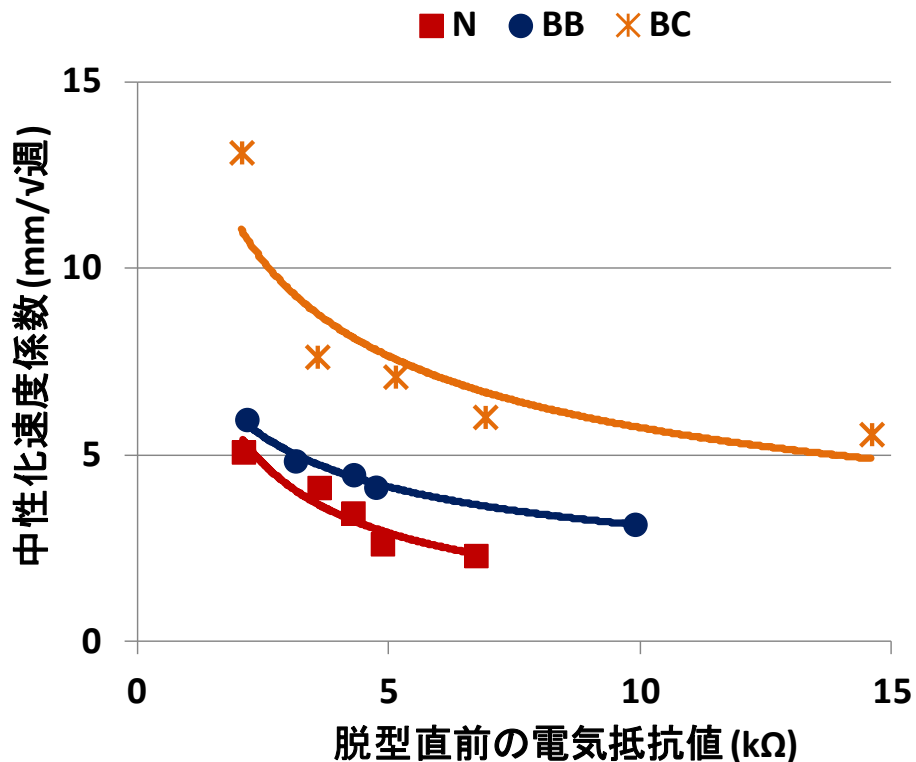
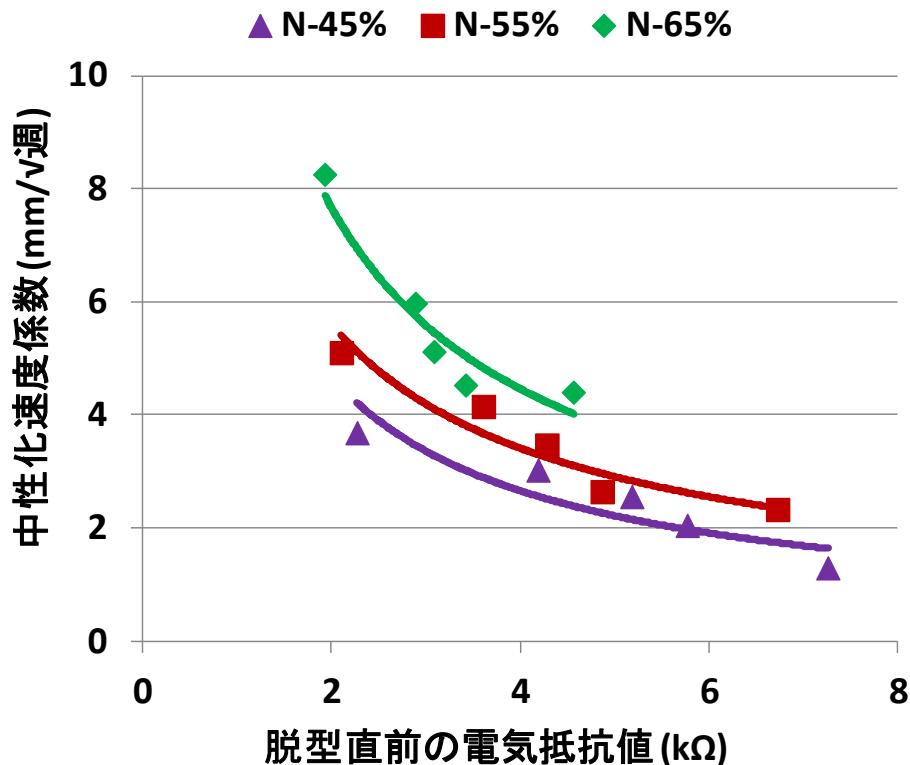


- 脱型直前の電気抵抗値と28日強度には相関関係が認められる
- 電気抵抗値から28日強度を推定できる可能性が示唆された

電気抵抗値と中性化速度係数の関係

W/C

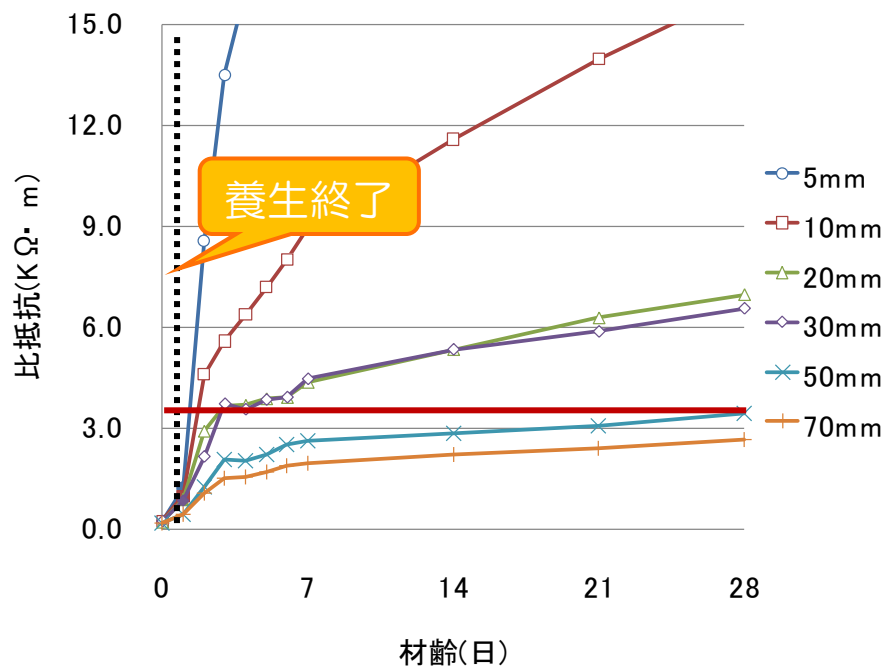
セメント種類



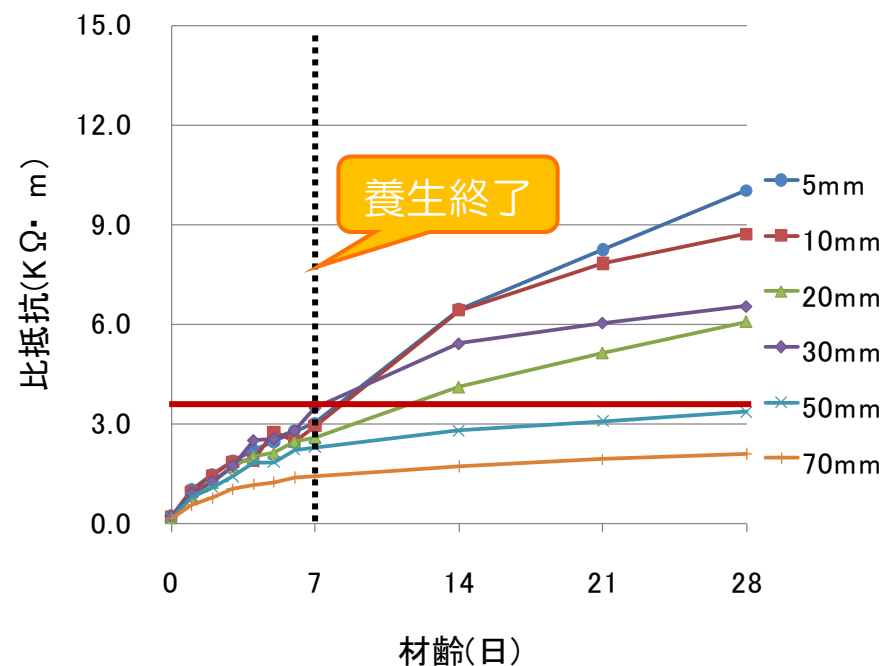
- 脱型直前の電気抵抗値と中性化深さには相関関係が認められる
- 電気抵抗値から中性化速度係数が推測できる可能性が示唆された

養生1日，7日における表層からの深さが異なる比抵抗

1日養生

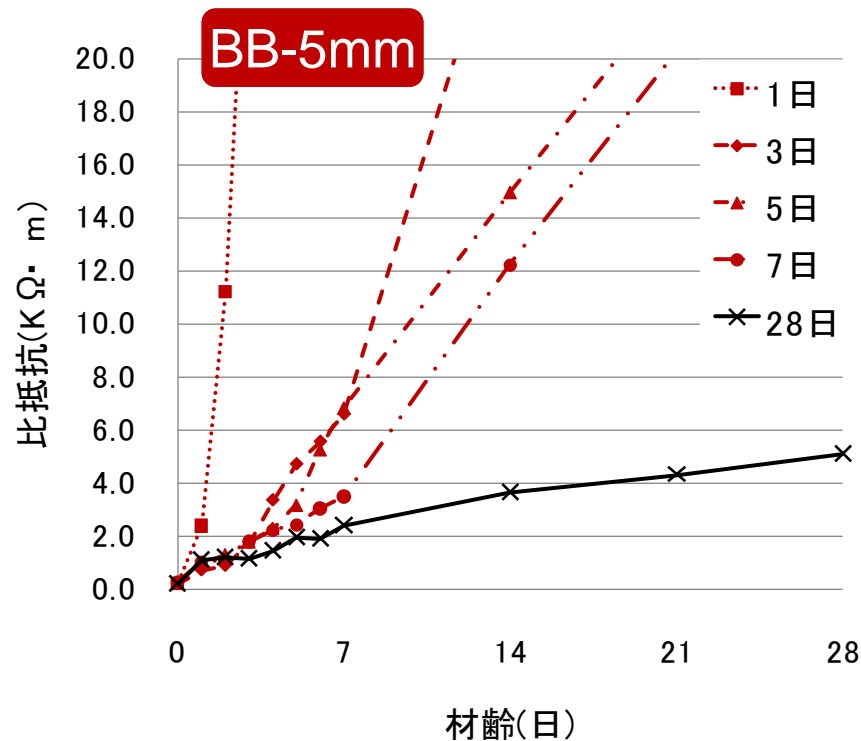
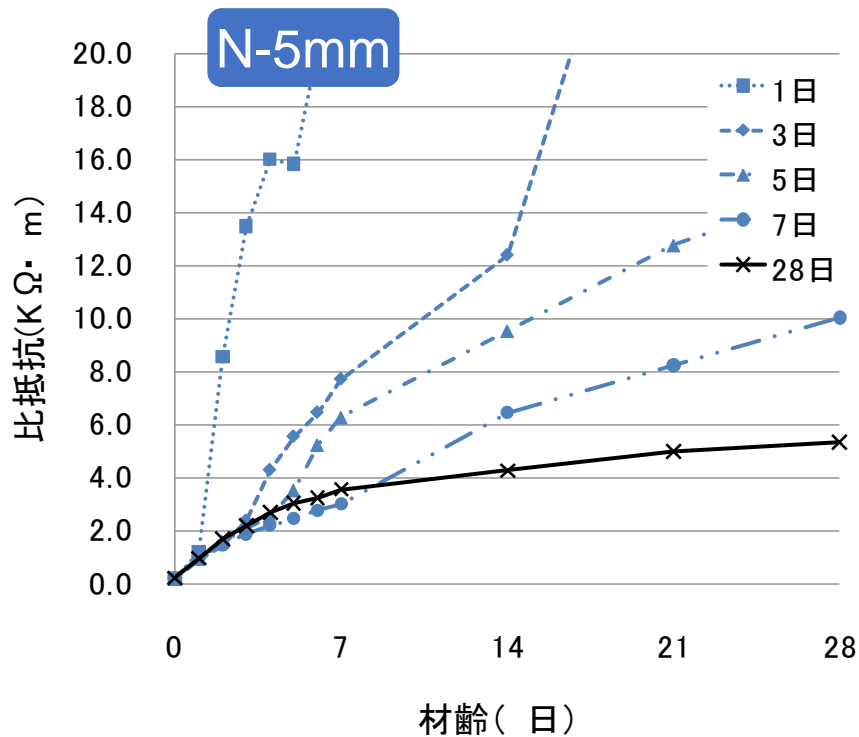


7日養生



- 表層付近では養生終了後，比抵抗が増大
- 養生期間1日、7日共に表層付近では比抵抗は大きくなり，
深さ50mm以降は比抵抗の変化が見られず，乾燥の影響を受けない

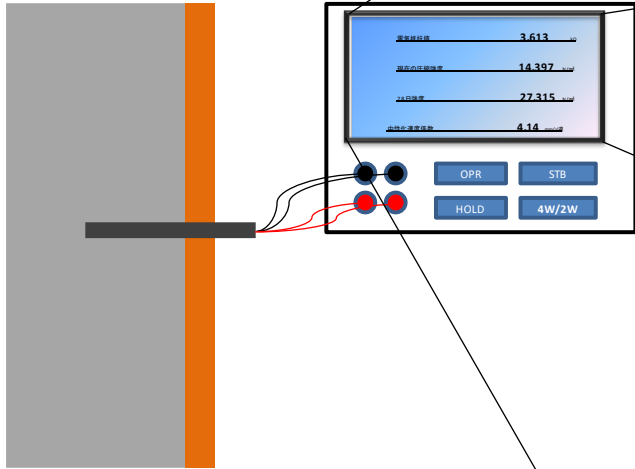
養生条件が比抵抗に与える影響



○1, 3, 5, 7日は養生終了後急激に比抵抗が増加
 Nは乾燥に伴う比抵抗の傾きが低下
 →養生期間が増加することで水和進行, 乾燥の影響を抑制

養生終了タイミング推定システム

(三坂：2016)



電気抵抗値	3.613	kΩ
現在の圧縮強度	14.4	N/mm ²
28日強度	27.3	N/mm ²
中性化速度係数	4.14	mm/V週

コンクリートの施工支援システムの構築

- 養生は重要であるが・・・
- 急激な温度変化や環境変化に対してのケアも必要
特に、敏感なセメントほどそのケアを怠ると大変なことになる

ex. コンクリート製品メーカーにおけるヒートショック
(養生終了直後に蒸気養生を終了して常温乾燥によるひび割れ発生事例)
高炉セメントコンクリートの保持する水分が急激逸散
(水分保持が必要なセメントでは急激な乾燥は養生が十分であってもひび割れ発生につながる？)

今後更なる研究を積み重ねる必要があると考えている。。。

まとめとして

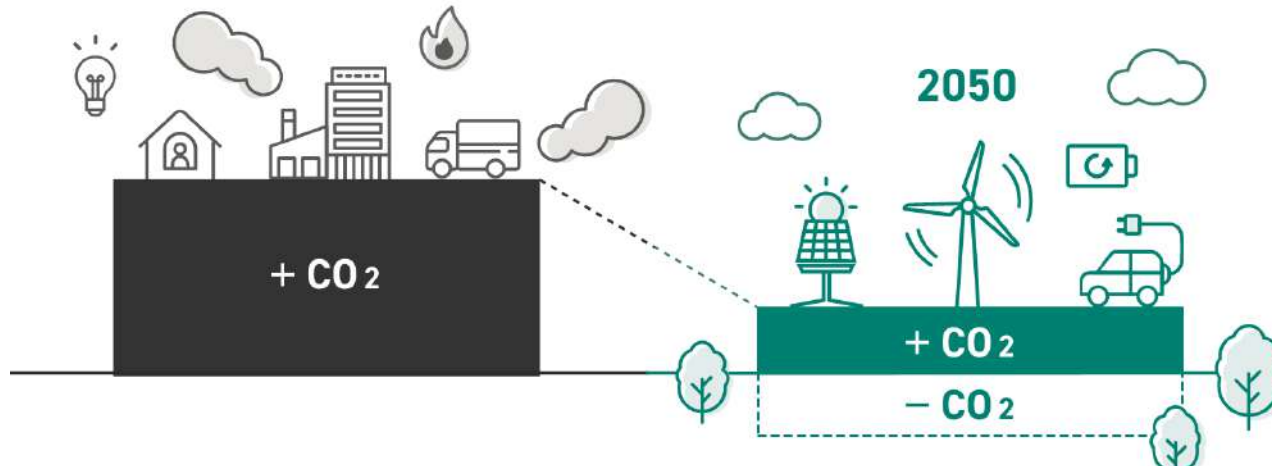
- 養生はセメントの水和と密接に関わっている
- 養生の影響範囲は極表層（せいぜい20mm程度）
- 養生が問題になるのは、かぶりコンクリートの耐久性
- 型枠存置も養生になるが、過剰な期待は??
- セメント種類によっては養生とその後の挙動は異なる
- W/Cによっても養生の影響の大きさは異なる
- かぶり部の物質移動を考慮すれば設計効率化が可能
- 直接的に養生効果を測定し、終了タイミングを測定
- 養生をすればすべて解決というわけでもないのでは？
- よい構造物の建設には施工は非常に重要！！

B. カーボンニュートラル社会

カーボンニュートラル

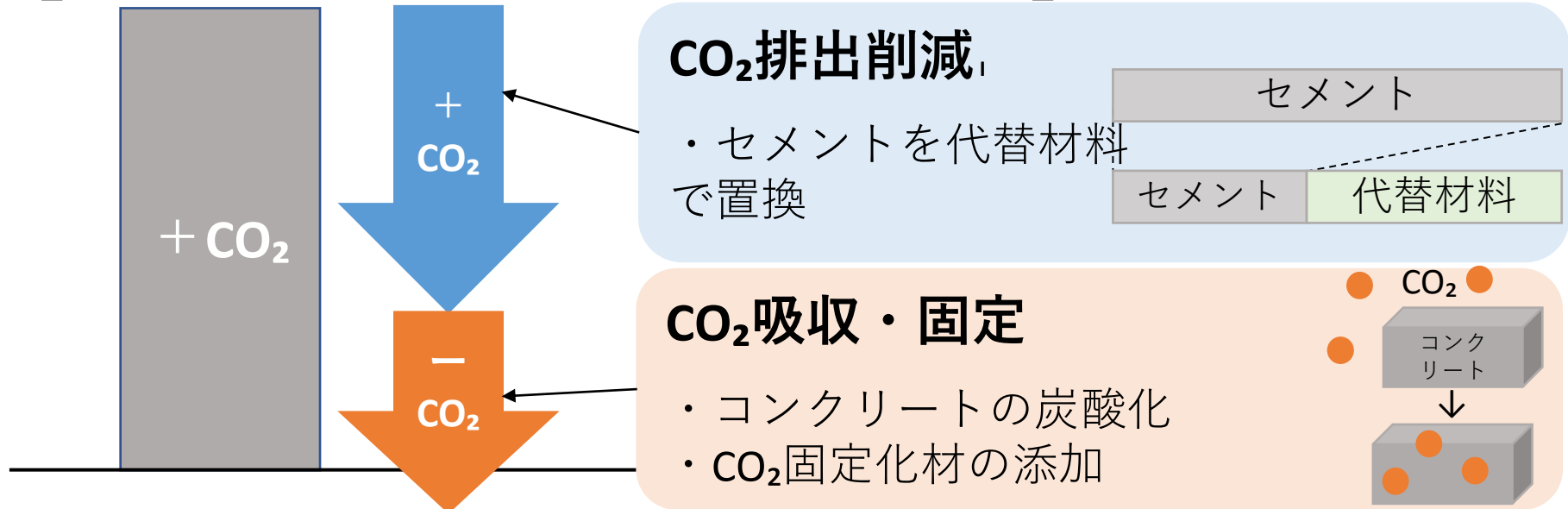
環境省 カーボンニュートラルとは

https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/



排出量 - 吸収量 = 0

【セメント・コンクリート分野では】



実現に向けて

➤CO2排出削減

セメントクリンカの使用量削減

混和材（高炉スラグ微粉末、フライアッシュ等）
の大量使用

石灰石微粉末の利用

➤CCU材料_CO2吸着技術

Γ-C2Sなどの利用（SUICOMなど）

炭酸化による粉体・硬化体への吸着

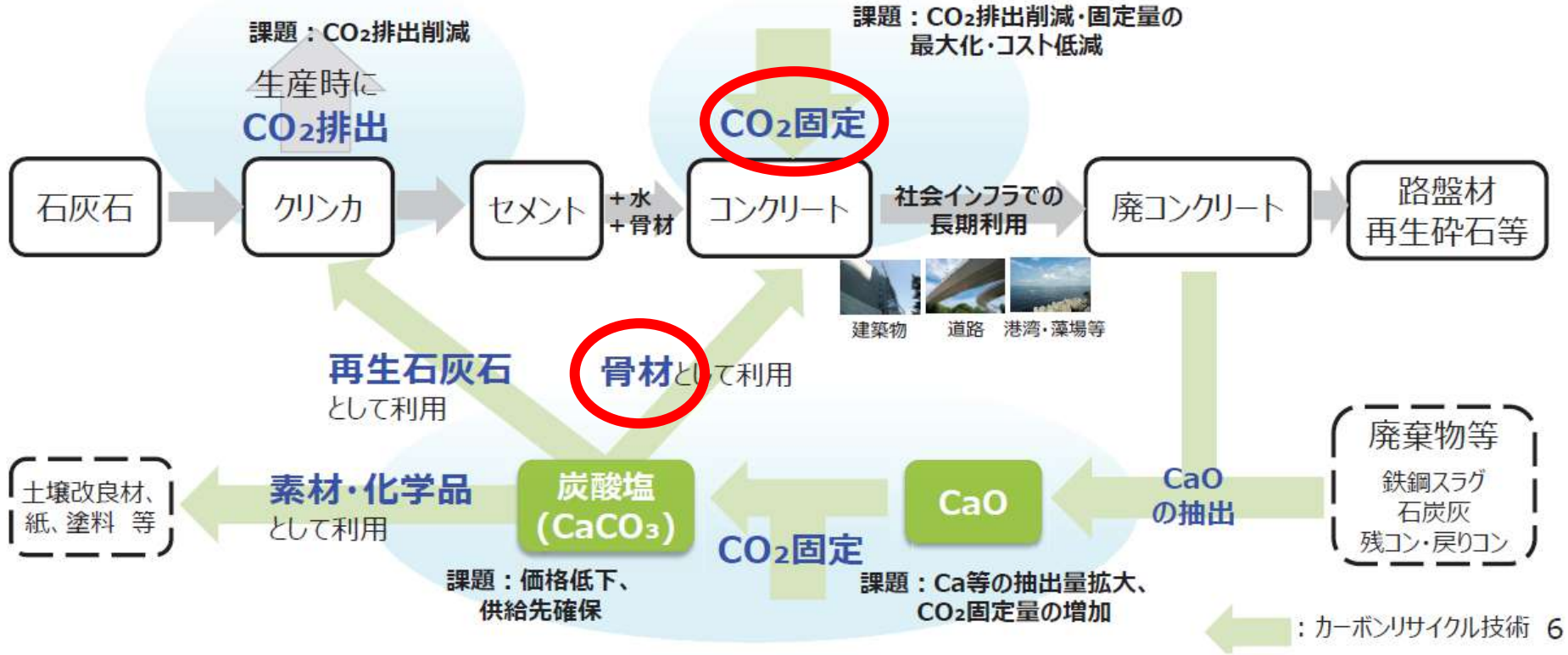
➤構造物の延命化

- 非腐食系鉄筋コンクリート
- 鉄筋を使わないコンクリート

実現に向けて

経産省資料

コンクリート・セメントの全体像



2つのTopic

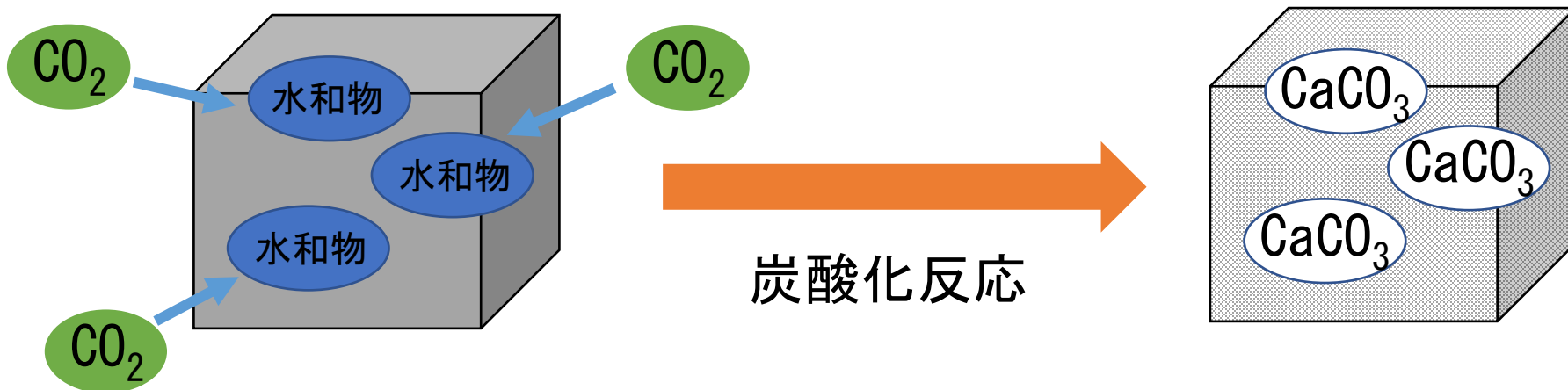
- 1) コンクリートの可能性_中性化によるCO₂の固定化
- 2) 再生材料へのCO₂の固定化とその利用価値向上

1. コンクリートの中酸化を活かす

(坂井：2021)

カーボンニュートラル社会を実現するために

コンクリートの炭酸化反応

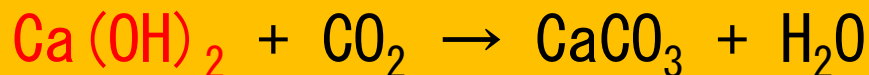


コンクリート中の水和物がCO₂と反応し、CaCO₃を生成



コンクリート内部にCO₂を吸着

主要な水和物の炭酸化反応式：



炭酸化によるCO₂吸着能～環境と硬化体条件～

環境条件

- 温度
- 湿度
- 炭酸ガス濃度
- 炭酸化の時間
- 気中（乾式）・水中（湿式）

硬化体条件

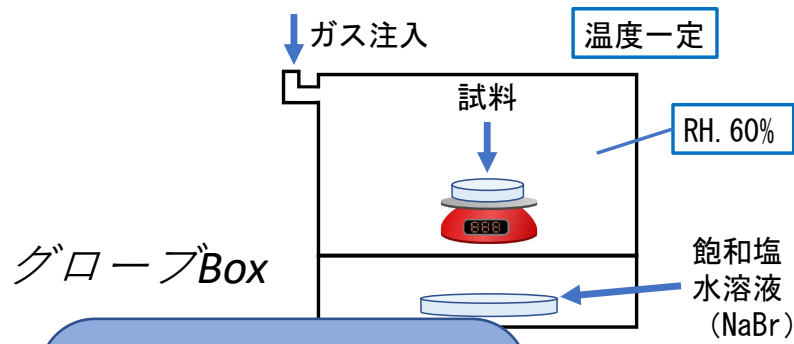
- セメント種類
- W/C
- 経過年数
- 硬化体のサイズ・形状

影響を整理して、コンクリート塊での簡易なCO₂吸着能の算定

⇒ 質量変化によるCO₂吸着量の定量
(但し、水分の需給が存在するため困難?)

調湿試料の炭酸化前後の質量変化計測によるCO₂測定方法を検討

硬化体サイズと種類の違いによる炭酸化量



【試料調湿】

- 20°C
- RH60%

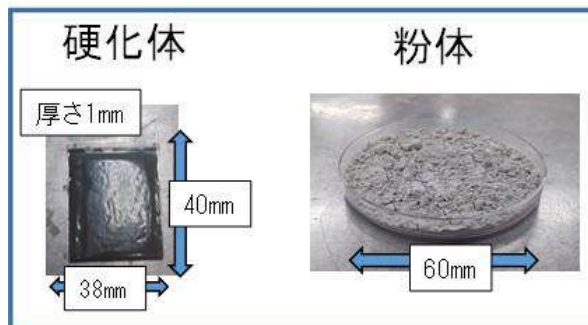


中性化促進装置

【炭酸化】

- 20°C
- RH60%
- CO₂濃度5%

使用した試料形状



【比較検討】

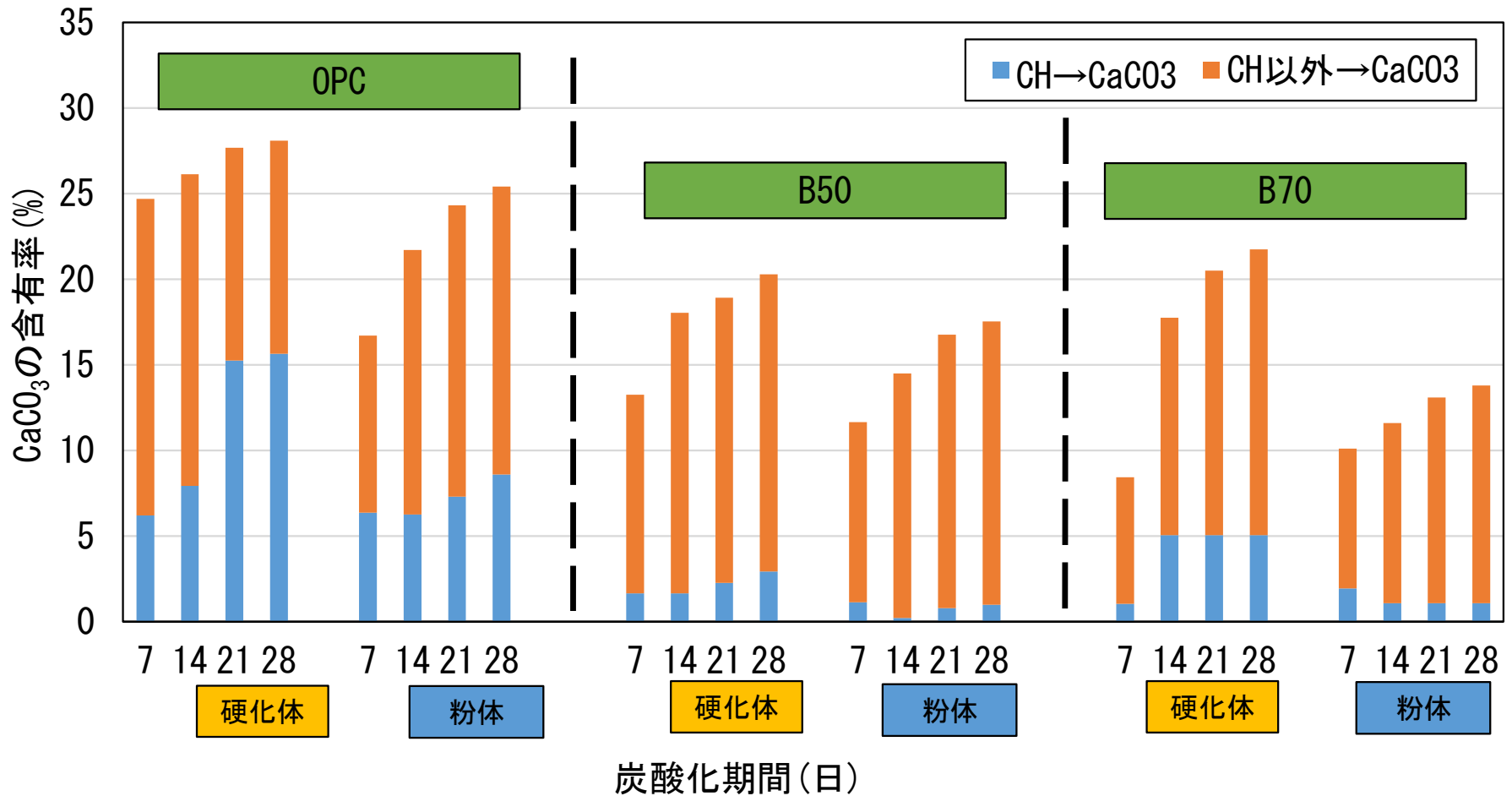
- ✓ 比表面積が異なる試料
- ✓ セメント種類 (OPC, B50, B70)

乾式による炭酸化

⇒ 水和物の炭酸化量を比較
(TG-DTA; DTG曲線から)

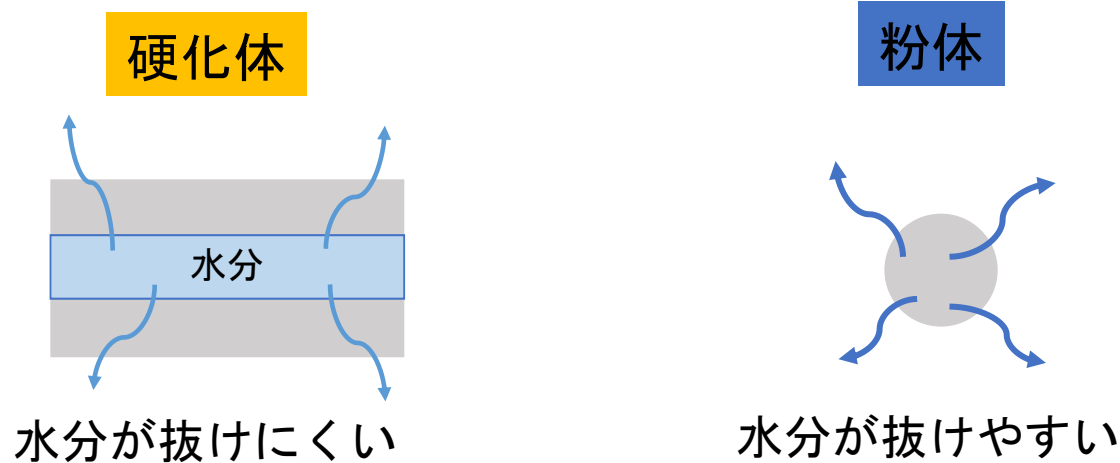
炭酸化前後のCO₂吸収量, CHの炭酸化量, CH以外の水和物の炭酸化量を算出

水和物の炭酸化により生成されるCaCO₃量



- ・ いずれの形状においてもCaCO₃の生成を確認
- ・ CH：硬化体では炭酸化が進行するが粉体では炭酸化が進行しない
- ・ CH以外の水和物：硬化体・粉体で炭酸化の進行
- ・ 高炉セメントではCHがほとんど炭酸化しない

硬化体と粉体での炭酸化の違い



【考察】

硬化体：CHの炭酸化に必要な水分が残存

粉体：CHの炭酸化に必要な水分が不足

課題：試料の形状により炭酸化の進行に解離が起こる要因は何か

水の存在による水和物の炭酸化への影響を把握



水分量の異なる粉体試料を炭酸化⇒水和物の炭酸化量を比較

試料の加水方法と炭酸化条件

○作製した試料の条件

セメント種類：OPC (普通ポルトランドセメント)
B50 (高炉スラグ微粉末50%置換)

水セメント比：50%

打設



温度20°Cで
封緘養生7日

試料を作製



温度20°C
相対湿度60%で
21日間静置

調湿を行う

試料に水分を添加

水分の添加方法

- 1、水の添加無し
- 2、試料に対し30%の水を添加
- 3、試料に対し50%の水を添加
- 4、試料に対し70%の水を添加

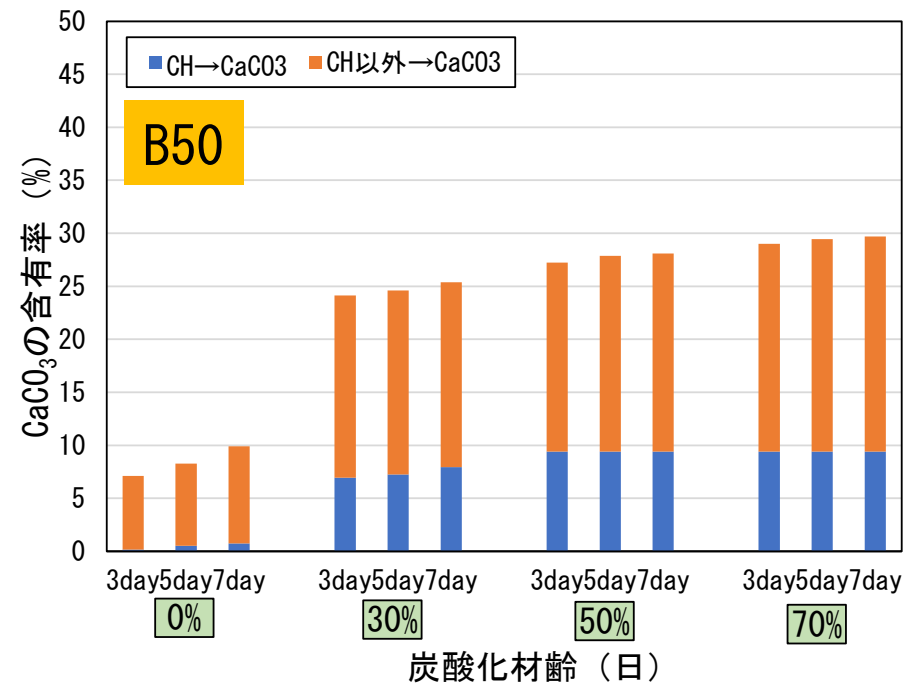
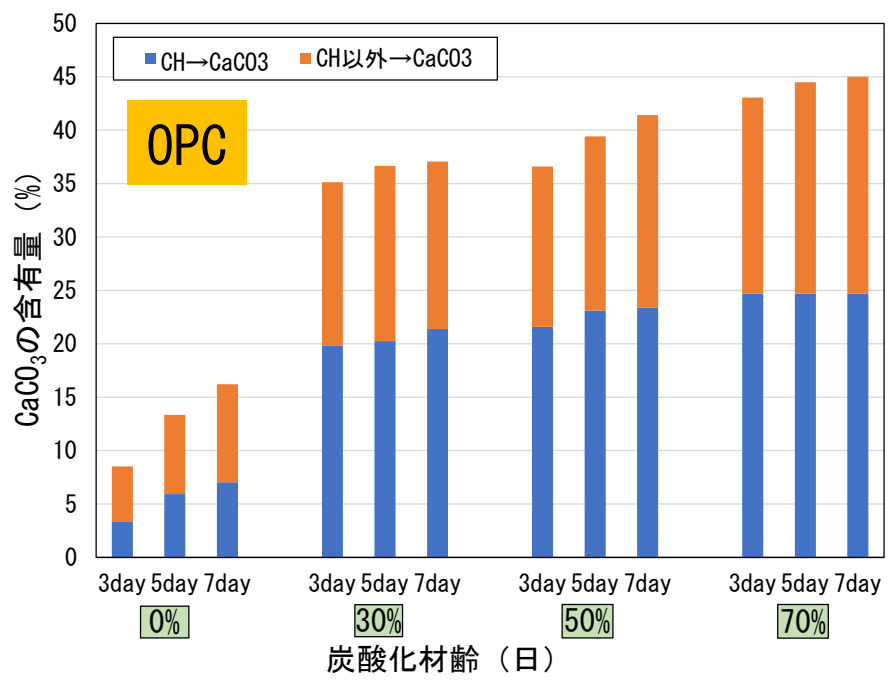


促進炭酸化

環境条件：
温度20°C
相対湿度60%
CO₂濃度5%

各種セメント水和物の炭酸化量

炭酸化後のCH由来のCaCO₃量とCH以外の水和物由来のCaCO₃量



CHの炭酸化 . . . 水分が多い試料ほど炭酸化が進行

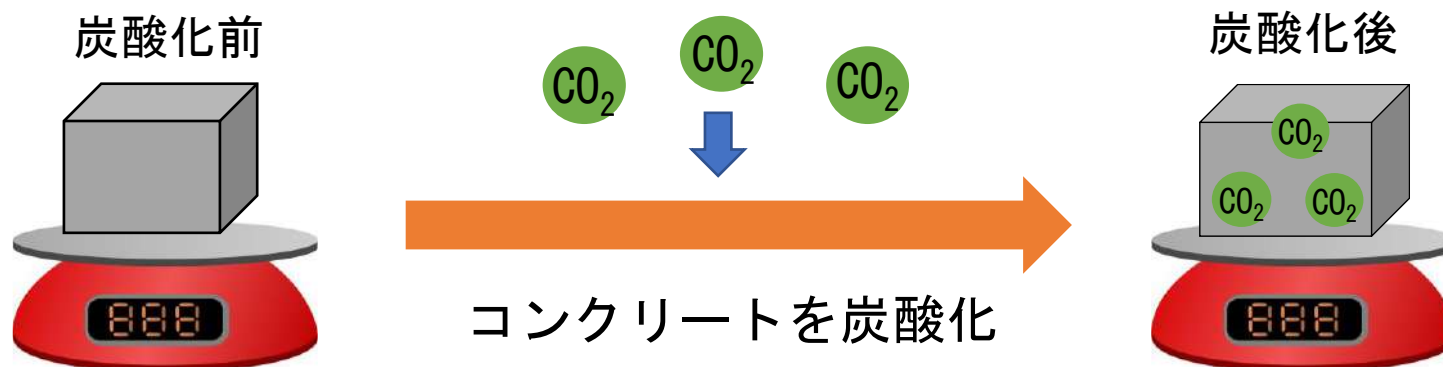
CH以外の水和物 . . . CH程ではないが水分が多い試料ほど炭酸化が進行



セメント硬化体内部の水分は炭酸化を進行させる要因となる

質量変化によるCO₂吸収量測定手法

- 形状の違い ⇒ 炭酸化進行メカニズムが異なる
- セメント種類 ⇒ 炭酸化反応が異なる
- 水分量の違い ⇒ 炭酸化速度が異なる

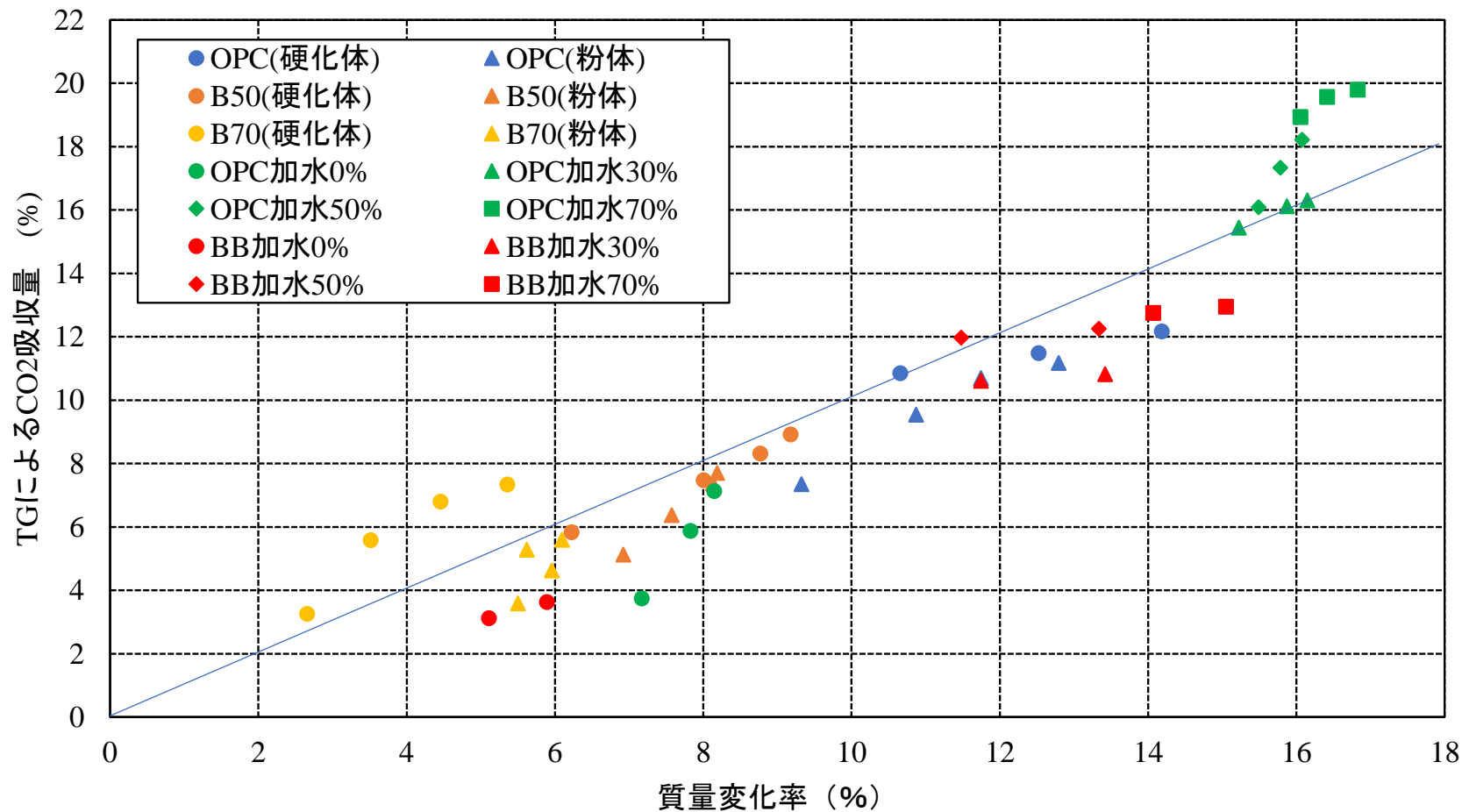


炭酸化後の質量 — 炭酸化前の質量 = CO₂吸収量 ?

質量計測で簡易的にCO₂吸収量を測定できないか

質量変化率とCO₂吸収量の比較

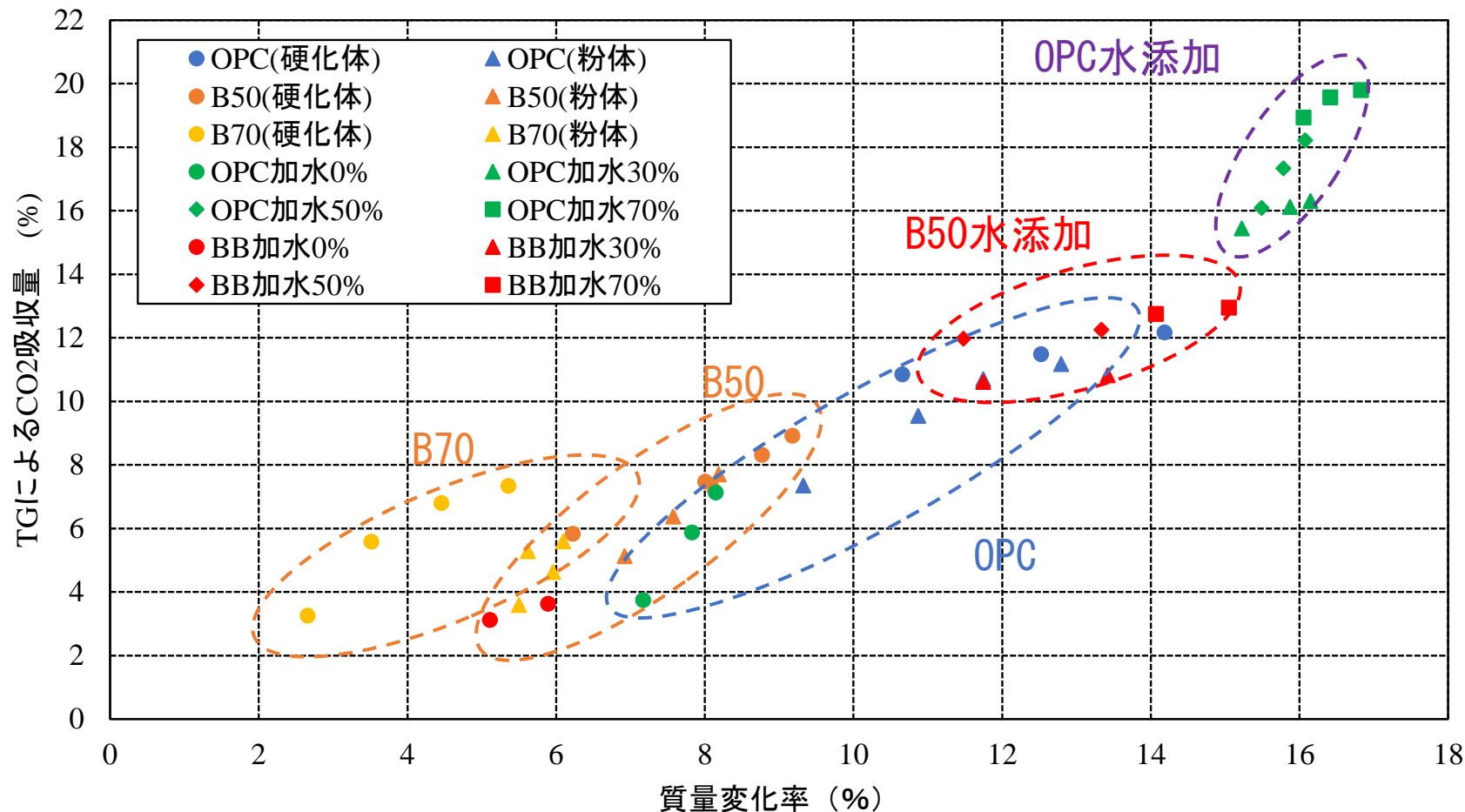
形状・セメント種類・水分量が異なる試料の質量変化率とCO₂吸収率の関係



- ・ 試料の条件に問わず質量変化率とCO₂吸収率に一定の関係性を確認
⇒ 様々な条件で質量変化率からCO₂吸収率を評価できる可能性が示唆された

質量変化率とCO₂吸収量の比較

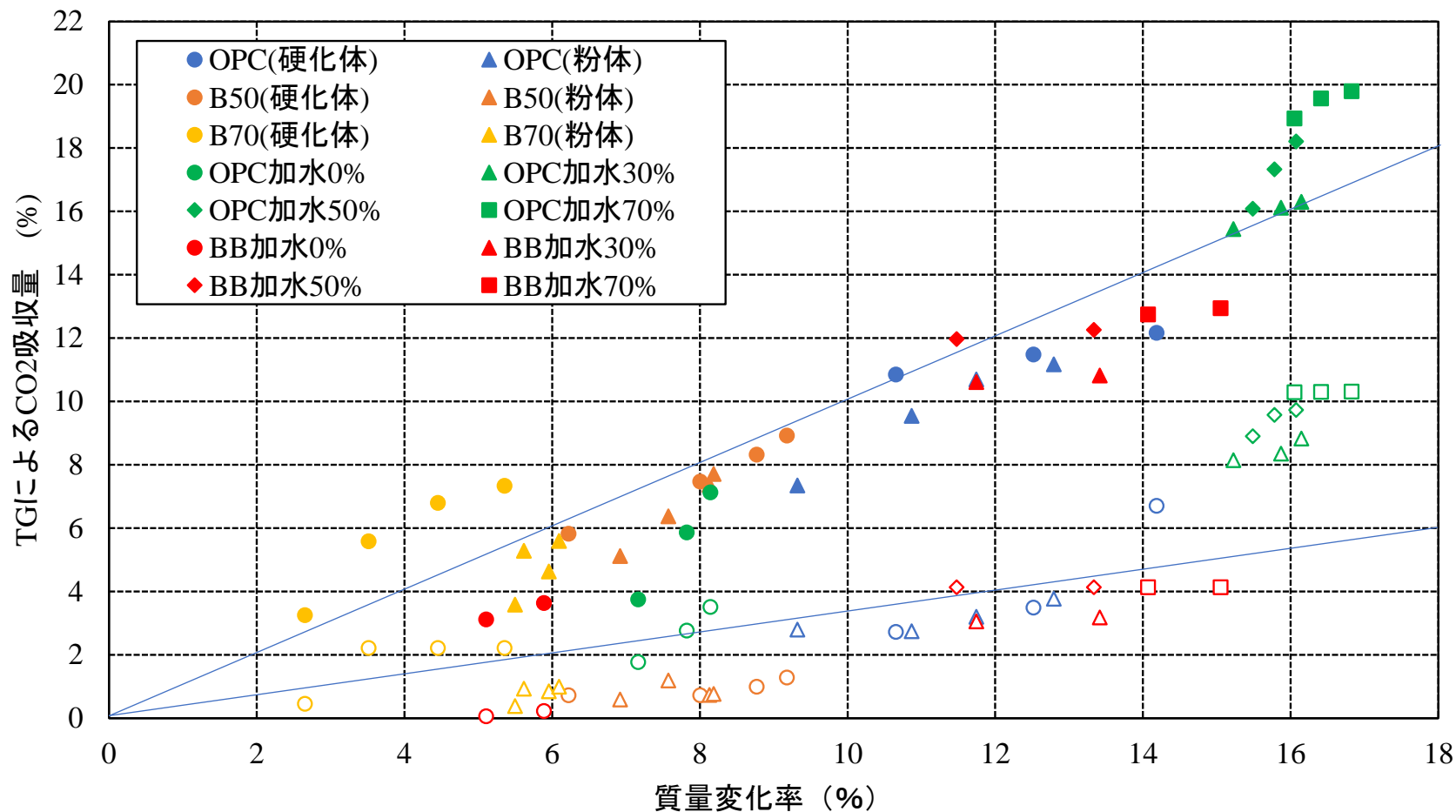
形状・セメント種類・水分量が異なる試料の質量変化率とCO₂吸収率の関係



- ・ 試料の条件に問わず質量変化率とCO₂吸収率に一定の関係性を確認
⇒ 様々な条件で質量変化率からCO₂吸収率を評価できる可能性が示唆された

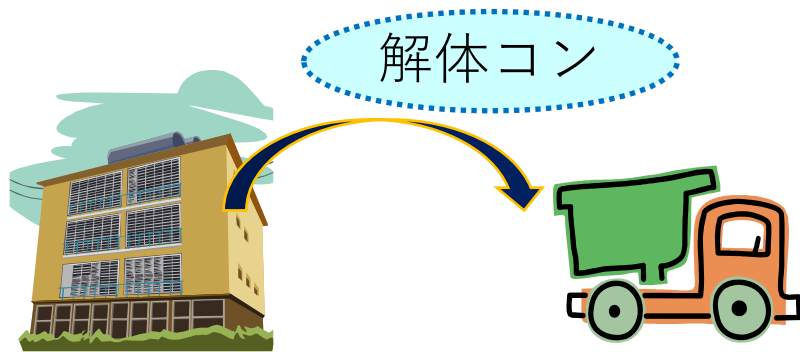
質量変化率とCHおよびCSH由来のCO₂吸収量

形状・セメント種類・水分量が異なる試料の質量変化率とCO₂吸収率の関係

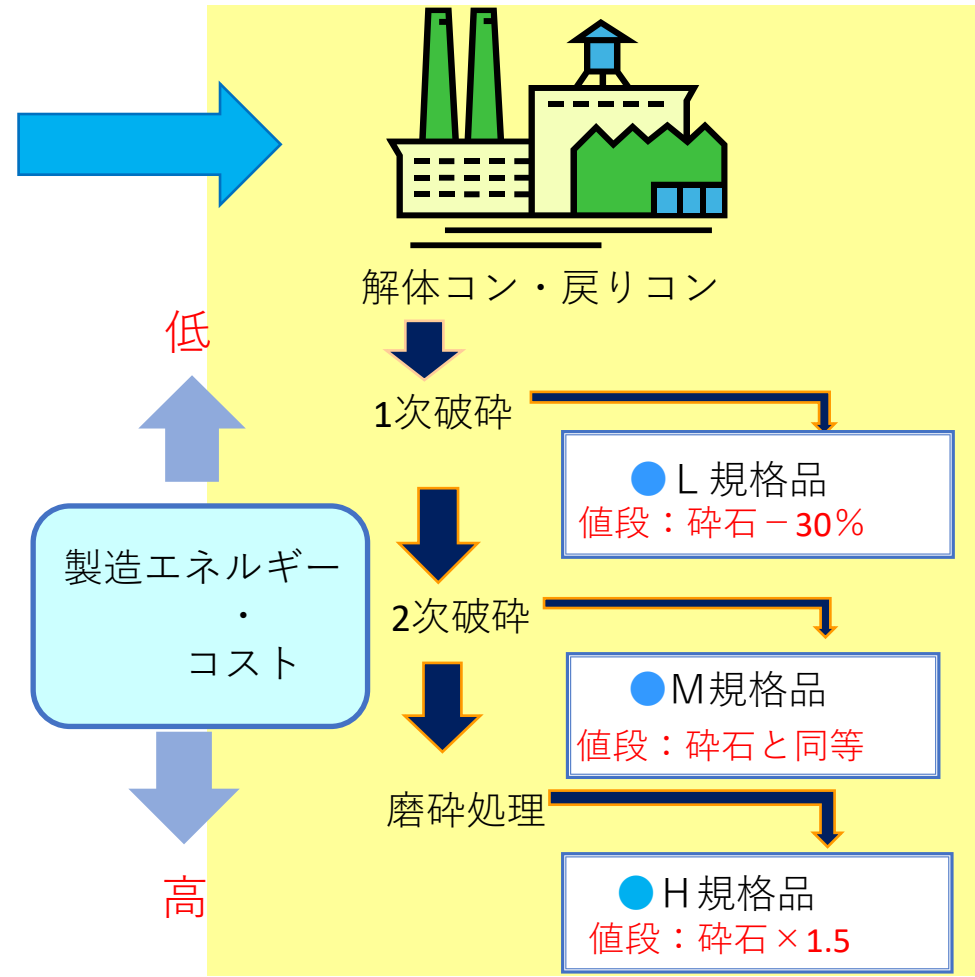
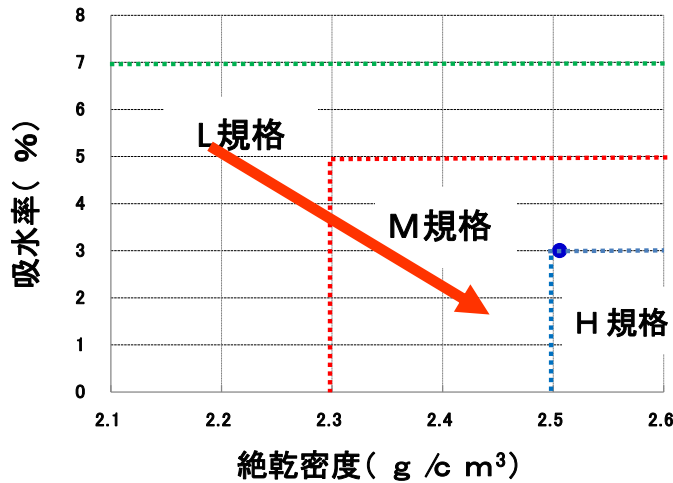


W/Cの相違により異なる緻密性を持つコンクリートの深部までのCO₂固定量とCa量による固定量とのトレードオフ? → 本年度検討を実施中!

2. 炭酸化技術による再生骨材改質への挑戦



◆再生骨材の規格値



再生骨材に用いる原コンクリート



解体コン



戻りコン



破碎等の処理



再生骨材

再生骨材の利用

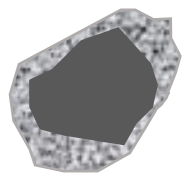
- ・コンクリート構造物の更新に伴い、大量に発生
- ・戻りコン、残コンの発生

⇒ 持続可能な社会の実現

再生骨材の問題とは？

品質

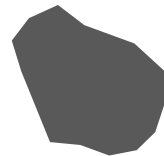
コンクリート塊の破碎，摩砕などの加工状態により
L, M, Hの3種類の品質に分けられる
密度と吸水率で評価



L



M



H



付着モルタル



原骨材

骨材周りの
付着Mortar

原骨材の
反応性

課題

強度不足，乾燥収縮，凍結融解抵抗性，ASR
遷移帯の影響が大きい
高品質⇒高コスト

再生骨材の問題と改質の糸口

課題

付着Mortar

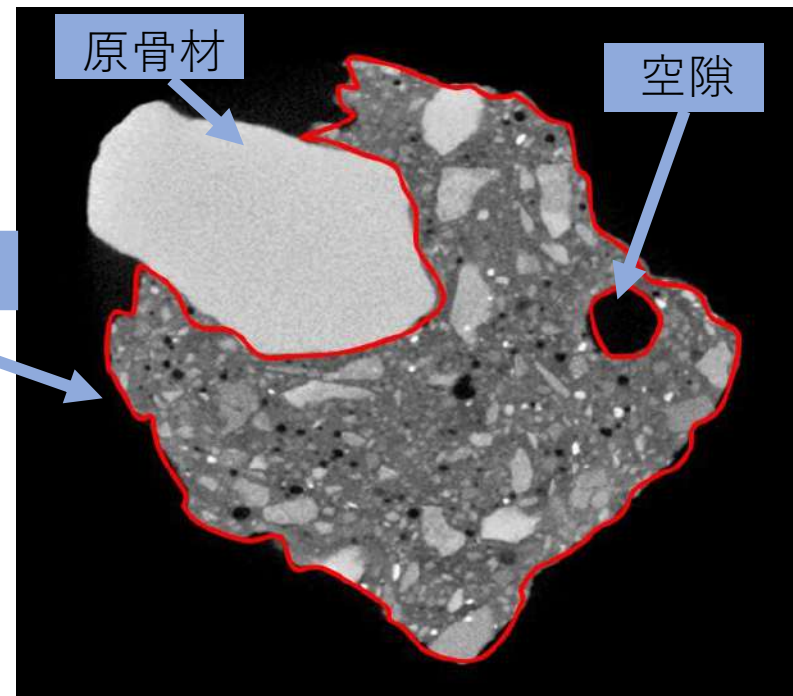
- ・ 吸水率が高い
 - ・ 空隙が多い
- } 凍害
乾燥収縮



付着モルタル

再生粗骨材CTスキャン図

提供：北海道大学



炭酸化による骨材の改質技術

付着しているモルタル部分が強度低下などの諸物性に影響

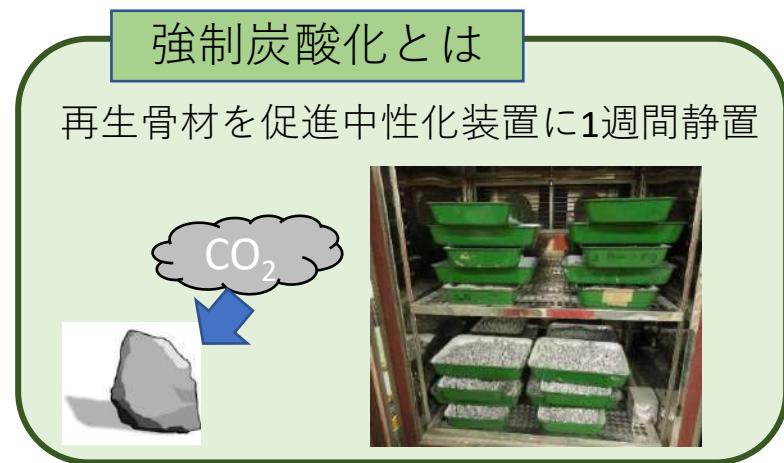
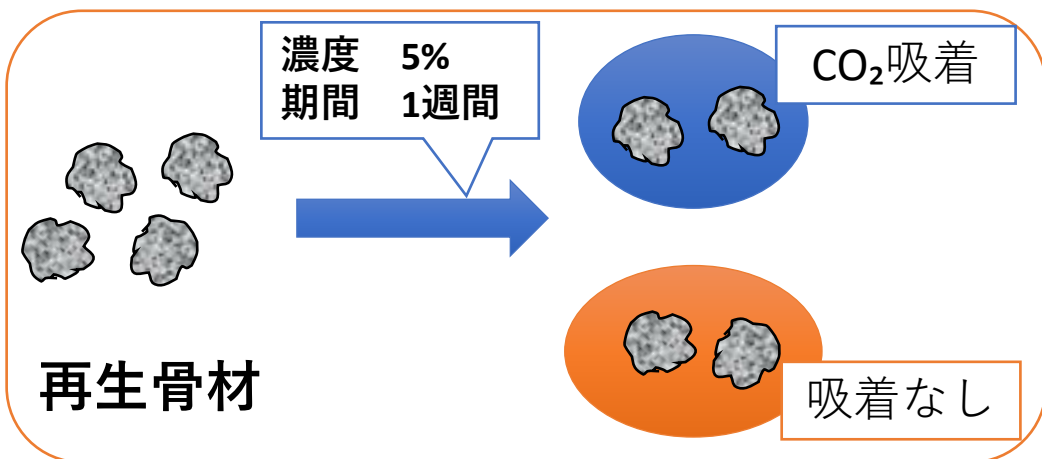


再生骨材にCO₂吸着させることで付着モルタル部分を緻密化

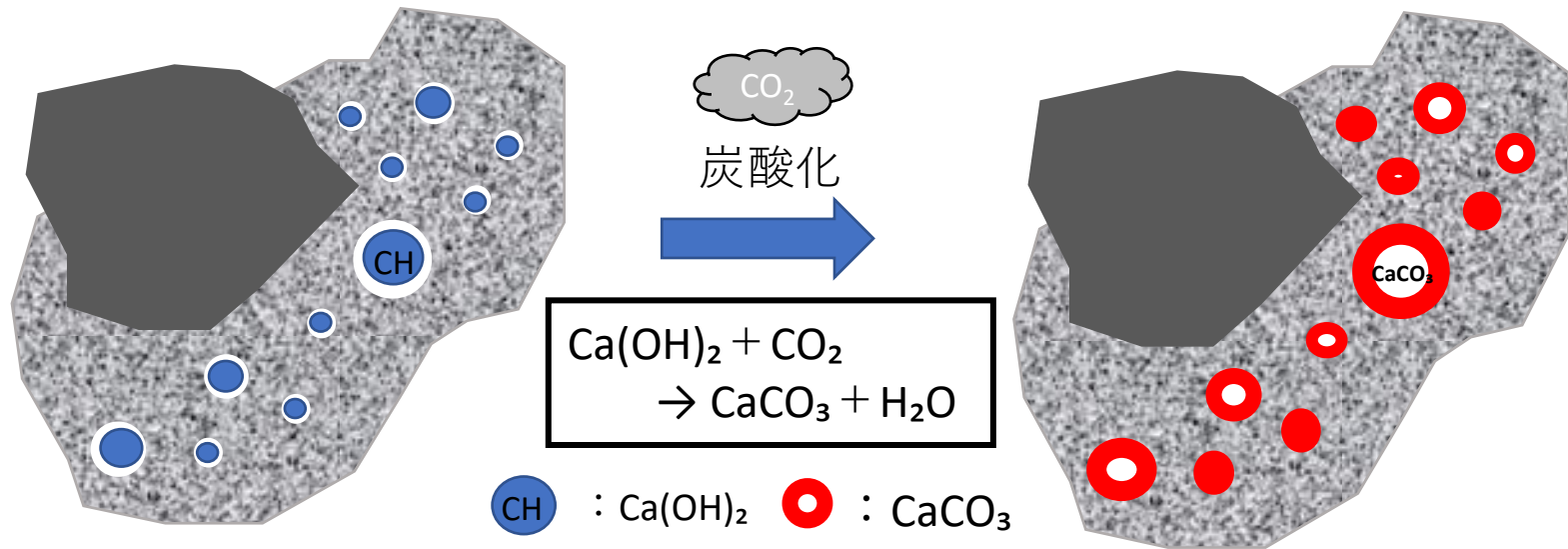


- ・付着モルタルの強度
- ・吸水率の低下

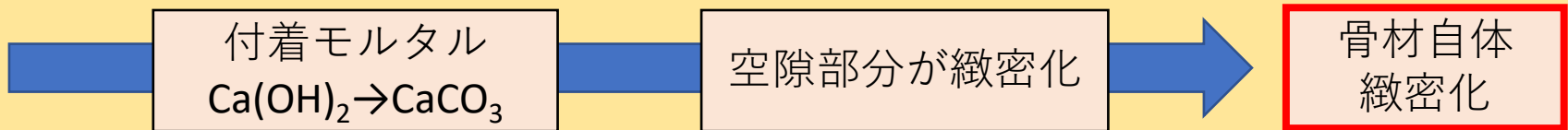
再生骨材の品質、再生骨材コンクリートの強度、耐久性の向上につながるのではないかと検証



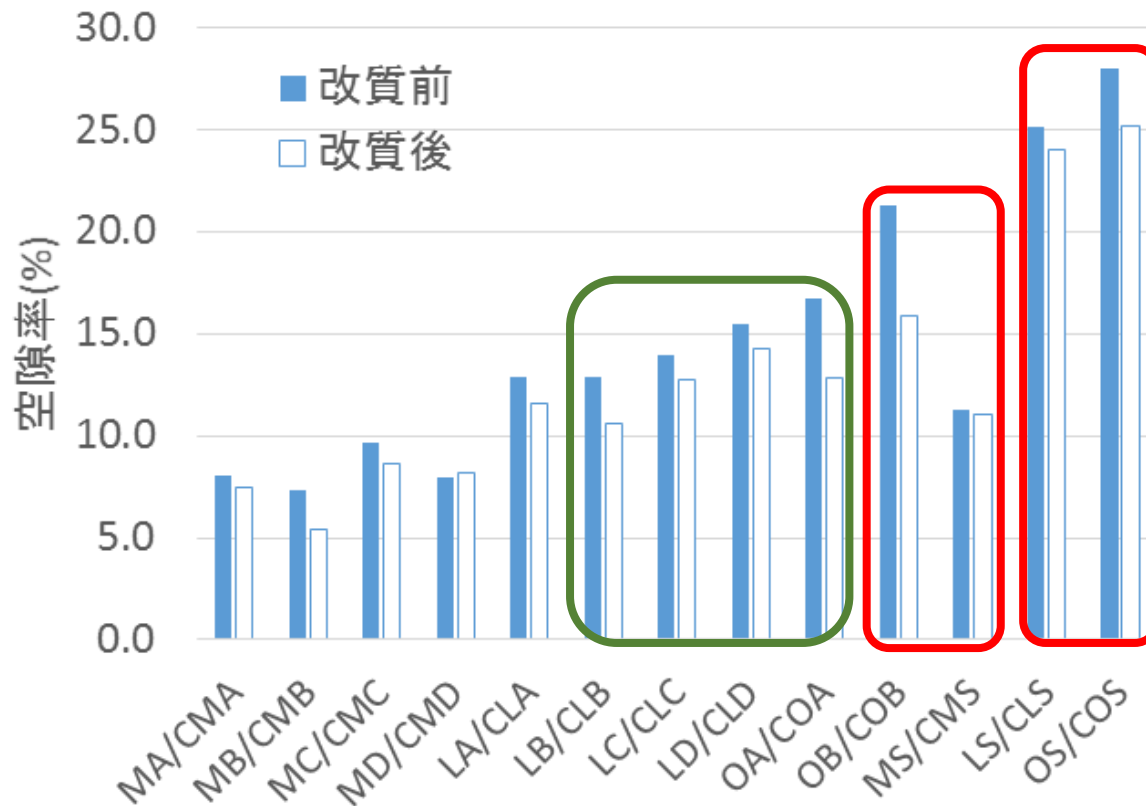
炭酸化のメカニズム



炭酸化により・・・



骨材空隙率の比較



骨材空隙率の改善（品質の悪いものほど、回復率が高い）
空隙の量と形状は耐久性に影響

走査型電子顕微鏡（SEM）による観察

CO₂吸着後の再生骨材の付着モルタル部分を観察

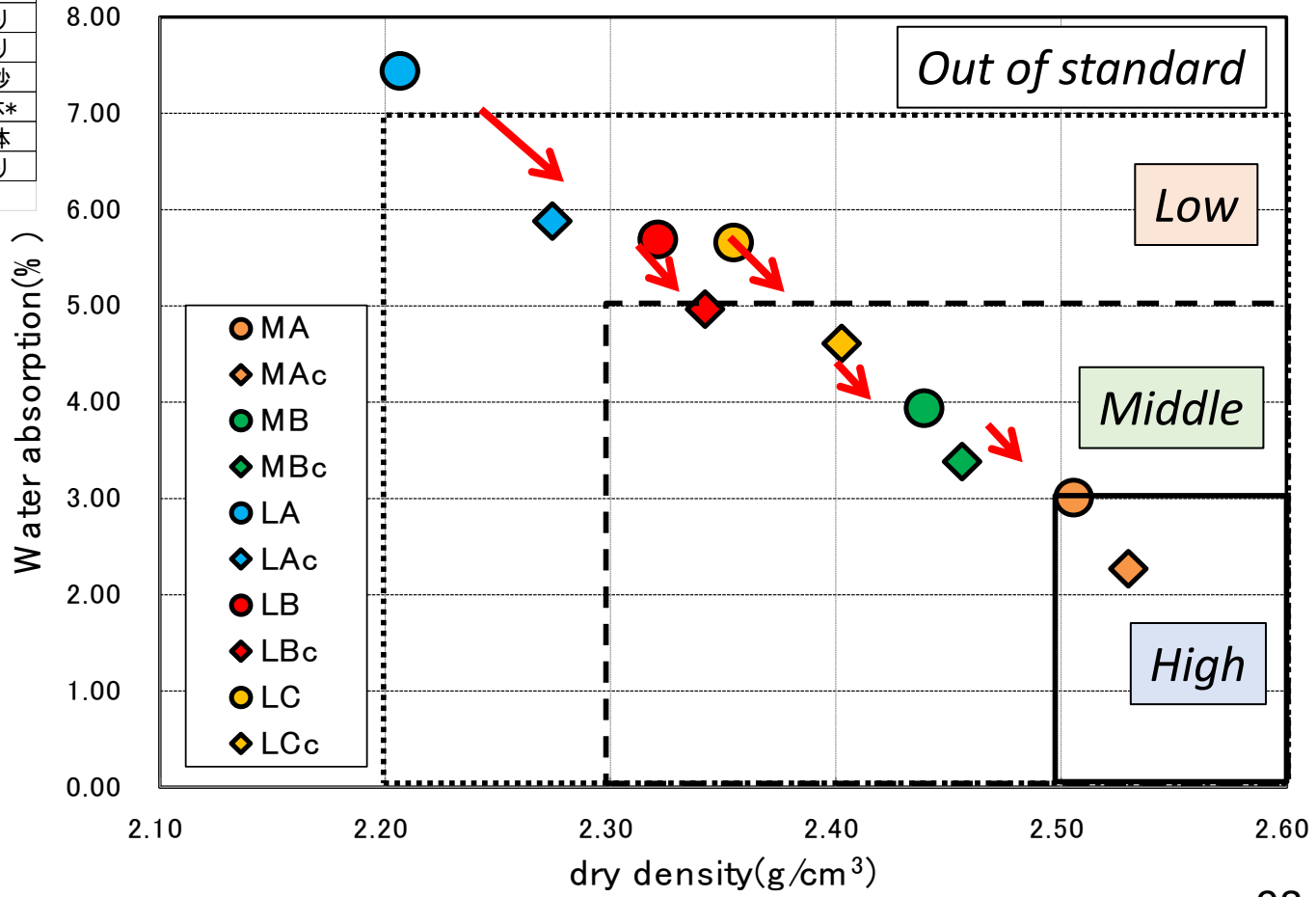


再生骨材を強制炭酸化することによりCaCO₃が生成

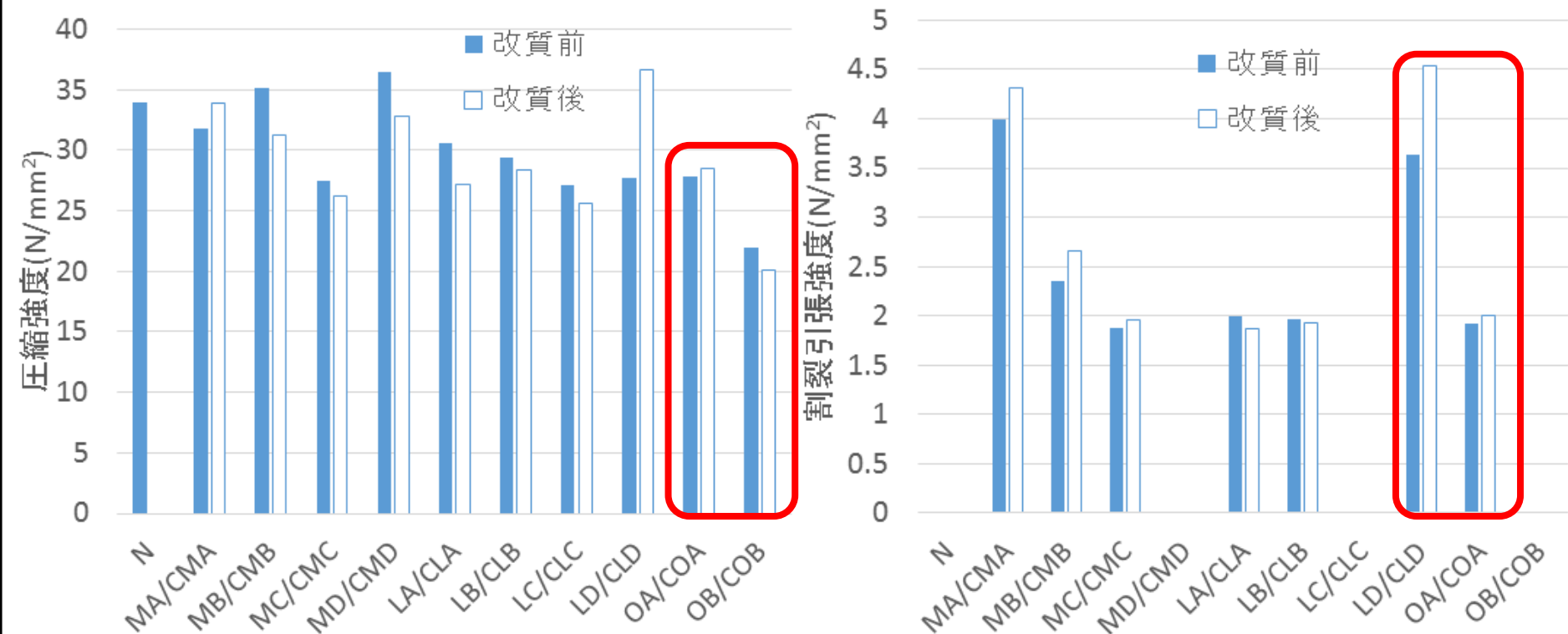
骨材の密度及び吸水率試験

	記号	class	製造方法		原コンクリート
			破碎	磨碎	
粗骨材	N	碎石			碎石
	MA	M	○	○	解体
	MB		○	○	解体*
	MC		○	○	解体*
	MD		○	○	解体*
	LA		○	—	解体
	LB	L	○	—	解体
	LC		○	—	解体
	LD		○	—	解体
	OA		○	—	戻り
OB	規格外	○	—	戻り	
細骨材	NS	碎砂			碎砂
	MS	M			解体*
	LS	L			解体
	OS	規格外			戻り

* 一部、戻りコンクリートを含む



再生コンクリートの強度試験結果



全体的に、改質後が改質以前よりも強度増進。ただし、微量割裂引張強度でも大きな差が認められない。

* 一部、大きく改質したのものもある。また、低品質のほうが効果あり

再生骨材の問題点

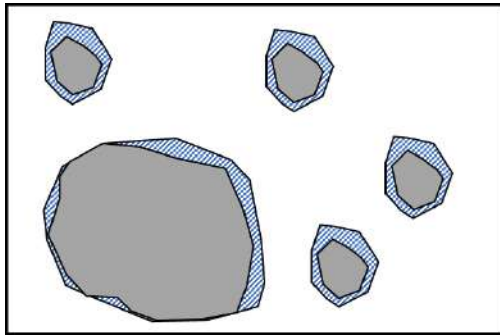
低品質再生骨材は
骨材にモルタルが多く付着



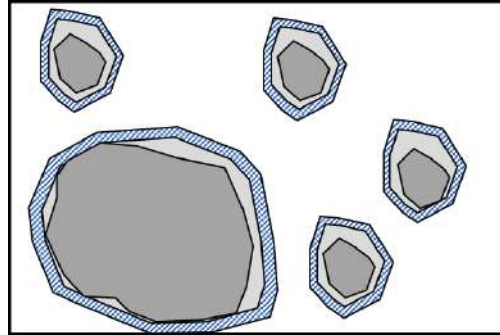
コンクリートの
強度および耐久性の低下

◆再生骨材コンクリートの品質を向上させるには・・・

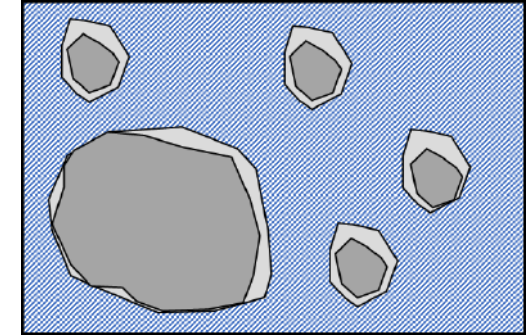
空隙の減少



付着モルタル部分の
空隙



骨材界面の
空隙



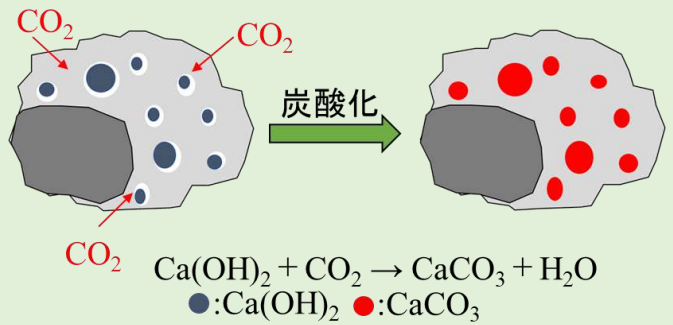
新モルタルの
空隙

再生骨材コンクリートの強度・耐久性の向上とそのメカニズム

骨材の強制炭酸化

- ◆ コンクリートの炭酸化メカニズムに着目した手法
- ◆ 再生骨材はモルタルが多く付着
 - ・ CO₂ガスを吹き付けることで、付着モルタルを炭酸化

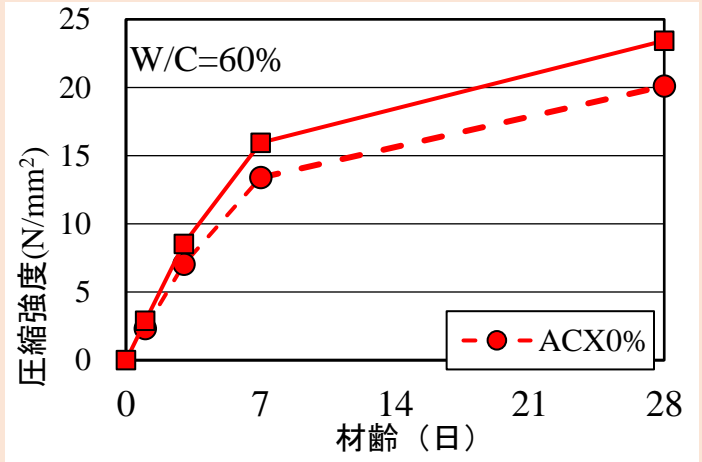
➡ 再生骨材の密度・吸水率が改善



20°C, RH60%, CO₂濃度5%で
1週間炭酸化

C-S-H系硬化促進剤(ACX)の添加

- ◆ カルシウムシリケート水和物(C-S-H)ナノ粒子を主成分とする硬化促進剤
- ◆ 既往の研究（普通コンクリート）
 - ・ 初期強度だけでなく、長期強度も向上

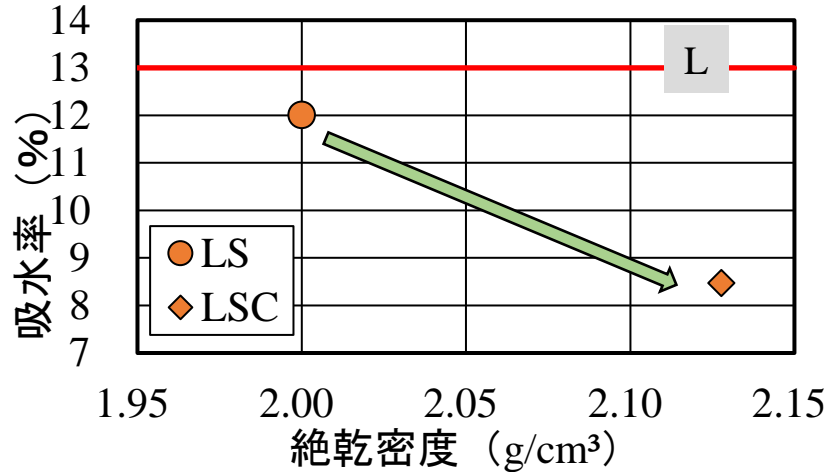


ACXの添加率:W × 10%

使用した再生骨材

細骨材

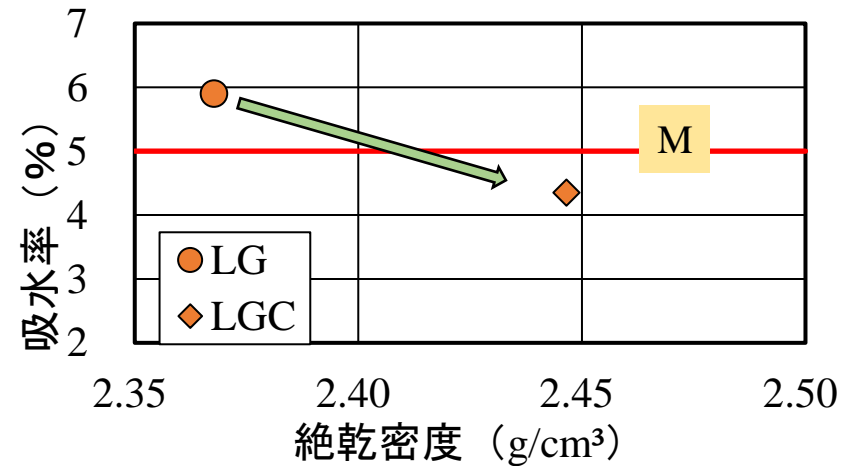
- NS . . . 普通細骨材
- LS . . . 再生細骨材L
- ◆ LSC . . . 炭酸化再生細骨材



骨材種類	表乾密度 (g/cm³)	絶乾密度 (g/cm³)	吸水率
NS	2.60	2.55	1.92%
LS	2.24	2.00	12.01%
LSC	2.31	2.13	8.47%

粗骨材

- NG . . . 普通粗骨材
- LG . . . 再生粗骨材L
- ◆ LGC . . . 炭酸化再生粗骨材



骨材種類	表乾密度 (g/cm³)	絶乾密度 (g/cm³)	吸水率
NG	2.70	2.69	0.32%
LG	2.51	2.37	5.90%
LGC	2.55	2.45	4.35%

配合と試験項目

配合名	改質方法		使用骨材		W/C (%)	s/a (%)	air (%)
	骨材の炭酸化	ACX	細骨材	粗骨材			
NSNG	-	-	NS	NG	50	48	4.5
LSLG	-	-	LS	LG	50	48	4.5
LSLG-ACX	-	○					
LSCLG	S炭酸化	-	LSC	LG	50	48	4.5
LSCLG-ACX	S炭酸化	○					
LSCLGC	S,G炭酸化	-	LSC	LGC	50	48	4.5
LSCLGC-ACX	S,G炭酸化	○					

試験（養生日数：28日）

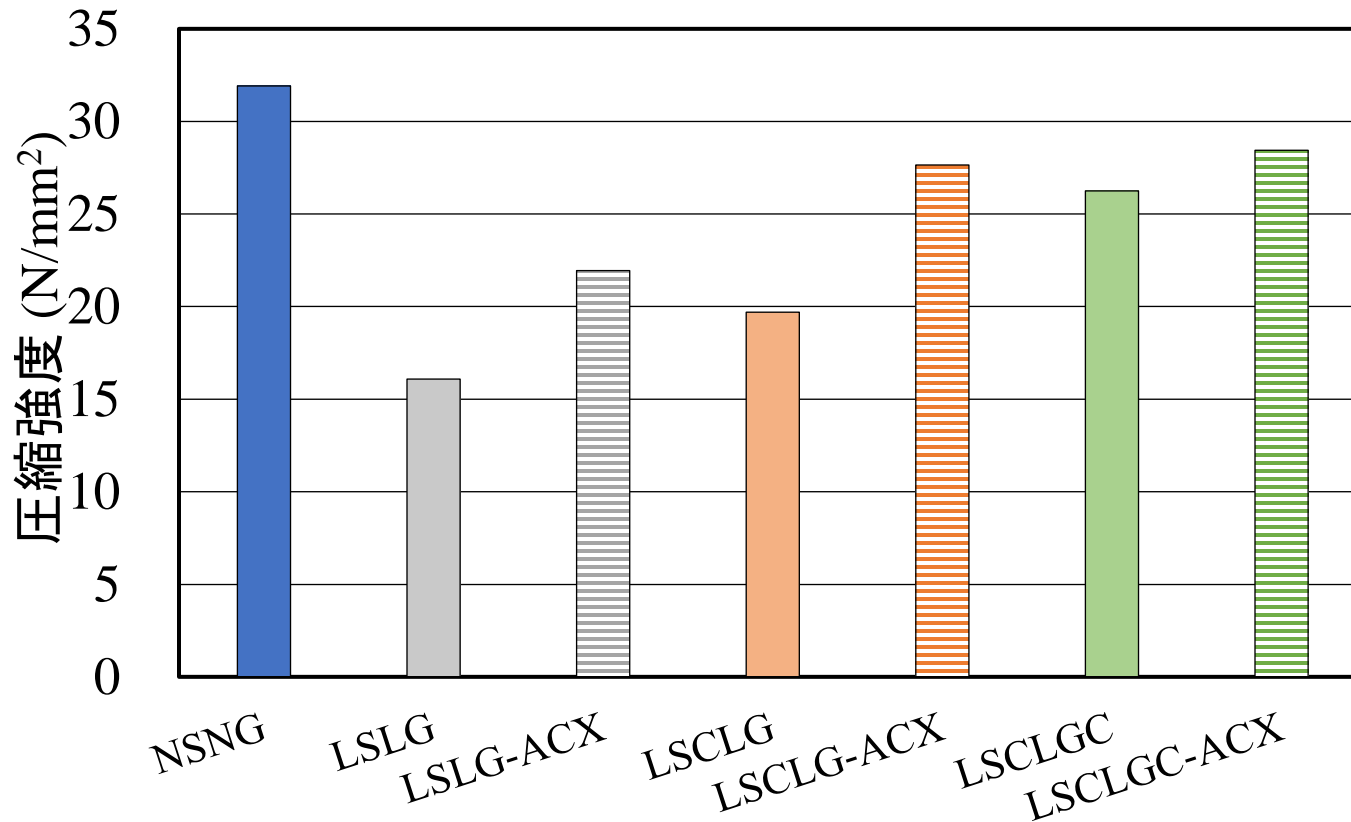
◆ 圧縮強度

◆ 透気

◆ 乾燥収縮

圧縮強度

青：普通コンクリート
灰：再生コンクリート
橙：S炭酸化
緑：S,G炭酸化
横線：ACX10%添加

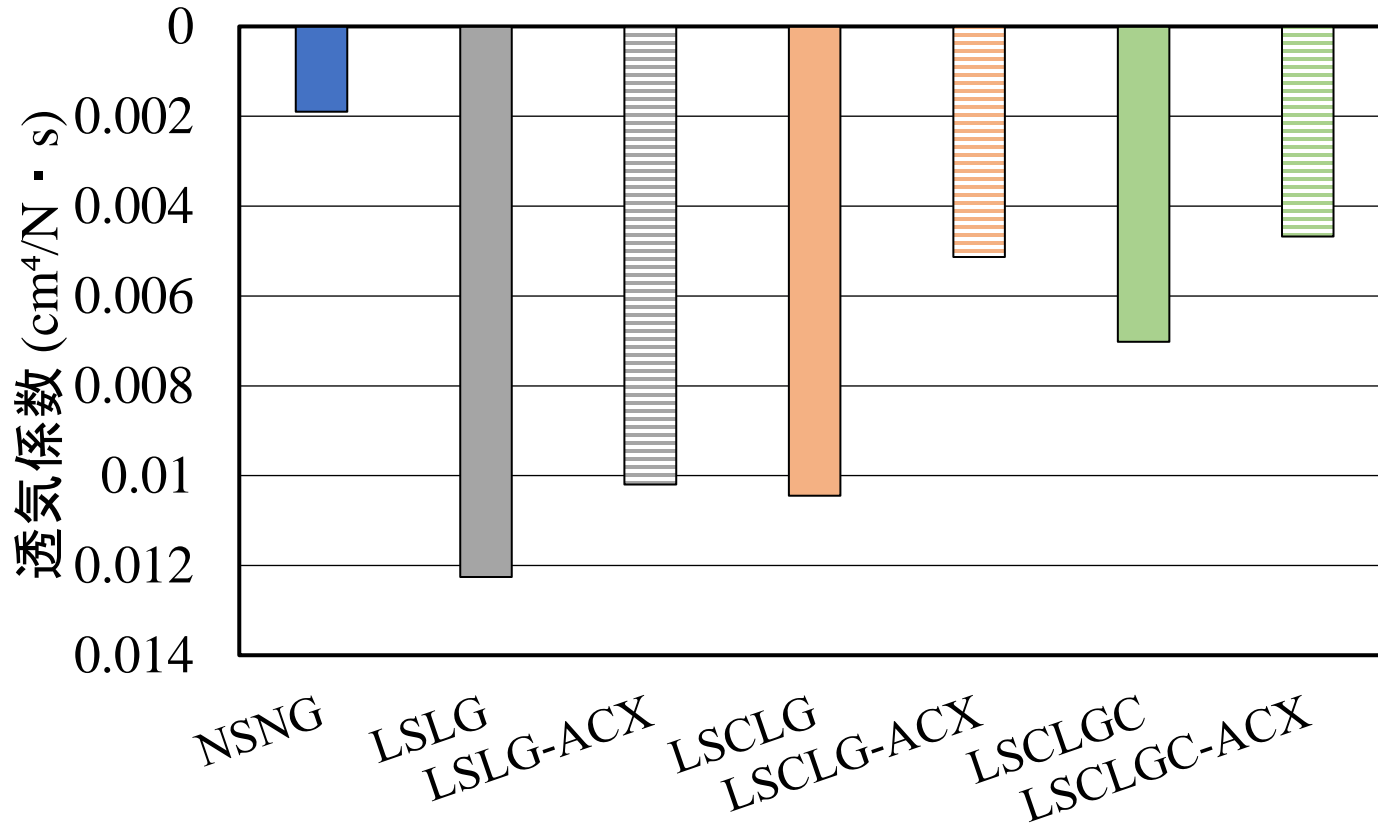


◆ LSLGはNSNGの5割程度

◆ LSCLG-ACXの改善効果が高く、LSCLGC-ACXと同程度、NSNGの9割程度

透気係数

青 : 普通コンクリート
灰 : 再生コンクリート
橙 : S炭酸化
緑 : S,G炭酸化
横線 : ACX10% 添加

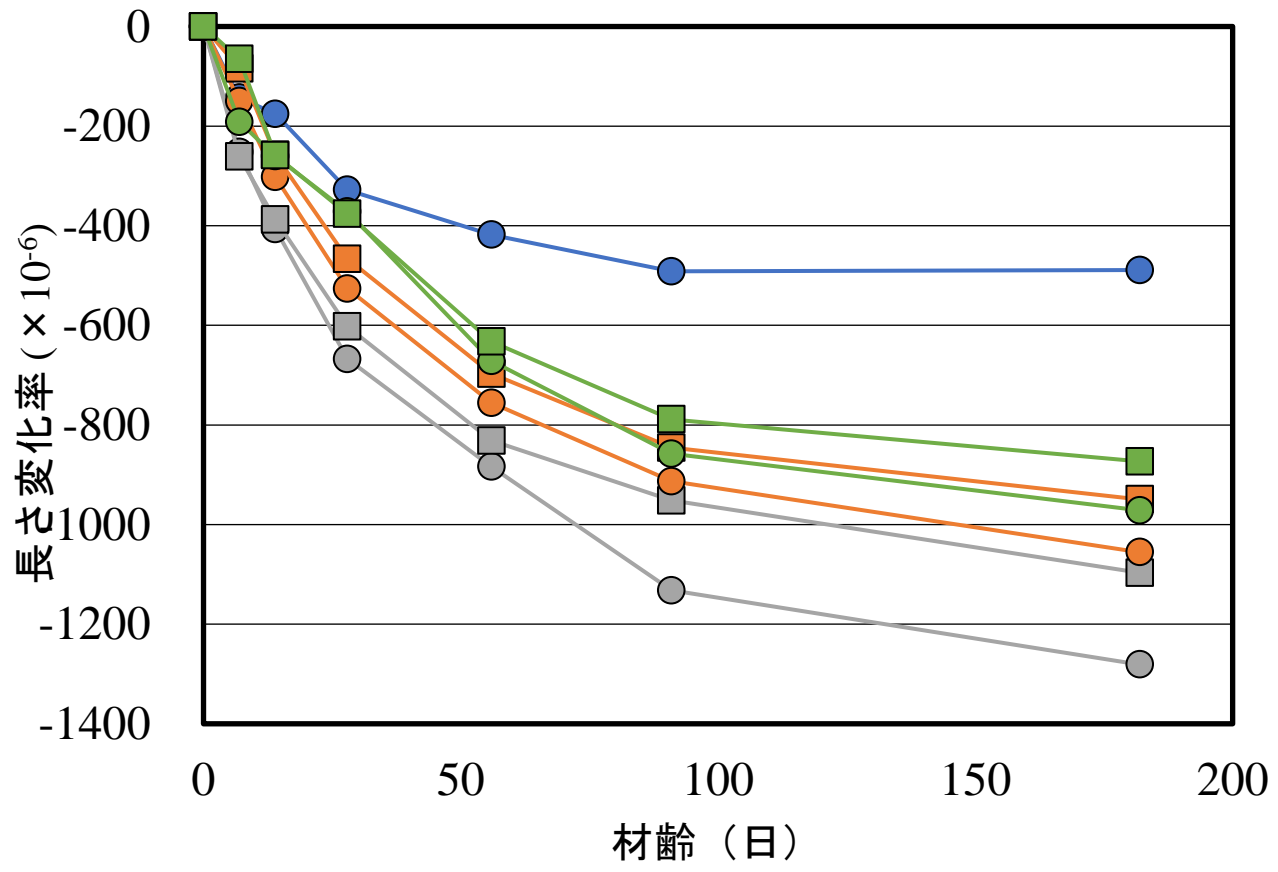


◆ LSLGはNSNGと比較するとかなり大きい

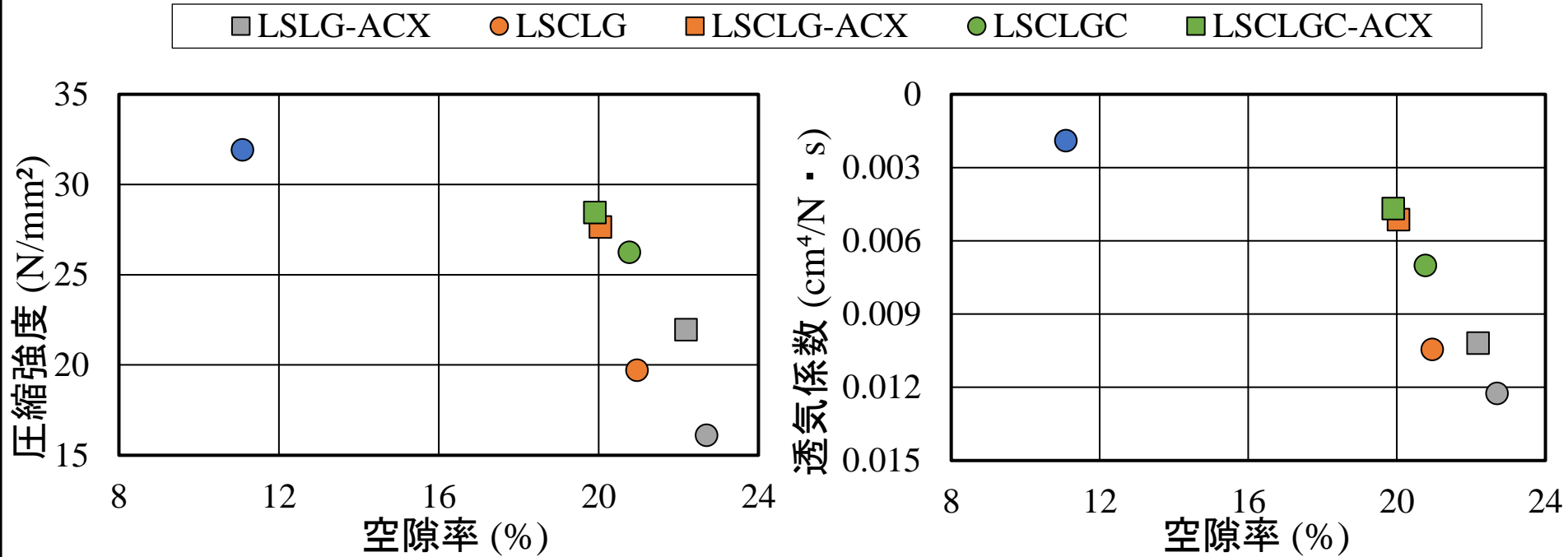
◆ LSCLG-ACXの改善効果が高く、LSCLGC-ACXと同程度

乾燥収縮

- 青：普通コンクリート
- 灰：再生コンクリート
- 橙：S炭酸化
- 緑：S,G炭酸化
- ：ACX10%添加



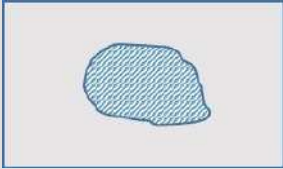
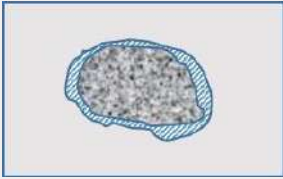

空隙率（アルキメデス法）との関係



- ◆ 圧縮強度，透気係数はNSNGに近づく
- ◆ どの空隙が，どの程度改善したのか不明

吸水率の改善が効果的なのか？
それ以外の効果があるのか？検証中

再生コンクリートの汎用化に向けて

	改質方法	改質効果	コンクリート特性
①骨材自体 	<ul style="list-style-type: none">・ 強制炭酸化・ 硬化促進剤の含浸 (プレウェット)	<ul style="list-style-type: none">・ 骨材の吸水率低下・ 骨材密度の向上・ 骨材中の空隙の減少・ コンクリートの空隙量減少	<ul style="list-style-type: none">・ (圧縮強度)・ 割裂引張強度・ 乾燥収縮・ 凍結融解・ ASR
②骨材界面 	<ul style="list-style-type: none">・ 骨材への硬化促進剤の噴霧・ 硬化促進剤の少量添加	<ul style="list-style-type: none">・ 遷移帯の改質・ 遷移帯に水和物を生成	<ul style="list-style-type: none">・ 物質移動抵抗性 (透水、透気など)
③モルタル部分 	<ul style="list-style-type: none">・ 硬化促進剤の多量添加・ 配合の見直し	<ul style="list-style-type: none">・ マトリックスの改質	<ul style="list-style-type: none">・ 圧縮強度・ 物質移動抵抗性

* 再生骨材という名前の変更も視野に入れたらどうか？

改質再生骨材を生産するシステム概念

日経コンストラクション2015年3月9日号

NEWS  技術

CO₂で再生骨材を改質

破砕処理程度の骨材ほど改善効果大

芝浦工業大学の伊代田史雄教授は東京テクノ（東京都町田市）と共同で、二酸化炭素（CO₂）を吸着させることによって、再生骨材の品質を改善する技術の有用性を確認した。

技術の検証を目的、コンクリート構造物の解体で生じた品質の低い骨材を改質して、構造体などに再利用する技術の確立を目指す。

CO₂の吸着による改質効果が高かったのは、解体した構造物や、建設現場でのコンクリート打設後の戻りコンクリートによって生じたコンクリート塊に、細砕程度の処理を加

えた材料だ。日本工業規格（JIS）で示す再生骨材し相当や、しの規格を満たさない水準の骨材品質が低いものに相当する。

再生骨材のクワンを上げる

こうした材料には、ももとの骨材にモルタルが多く付着している。このモルタル部がCO₂を吸着する。伊代田教授らによる検証では、しやしよりも品質の高いMなどの品質に相当する再生骨材を温度20℃、相対湿度60%、CO₂濃度5%の条件下で、中性化促進装置に1週間静置。

品質の劣化を調べた。

CO₂を吸着させた骨材の密度と吸水率を確認したところ、絶対密度と吸水率が改善していた。例えば、再生骨材しの規格に満たない粗骨材はM相当に品質が上がるなどした。

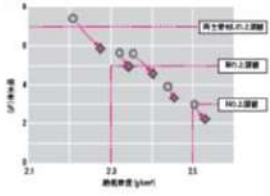
さらに、モルタル混入率が50%を超える材料については、圧縮強度が増加し、長さ変化率が顕著に小さくなる傾向を確認できた。

この研究は、現段階では実験室レベルでの検証にとどまる。それでも、CO₂の吸着による再生骨材の改質が実現すれば、戻りコンクリートの再利用が進んだり、セメント工場などからのCO₂排出量を減らしたりする効果も期待できる。

解体で生じたコンクリート塊の利用促進を図るために、再生骨材のJIS規格が整備されたものの、品質の高い再生骨材を生み出すコストやエネルギー消費量が大きく、産業界以外への普及が進んでいない状況にある。

（伊代田 史雄）

CO₂吸着前後での骨材の性質変化

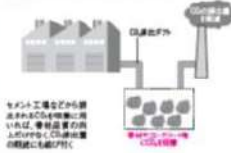


図中の破線はCO₂吸着前の状態を示す。CO₂の吸着によって、吸水率が低下し、骨材品質が向上していることが確認できた。（CO₂への吸着は常温常圧下で芝浦大学の伊代田史雄教授が実施）



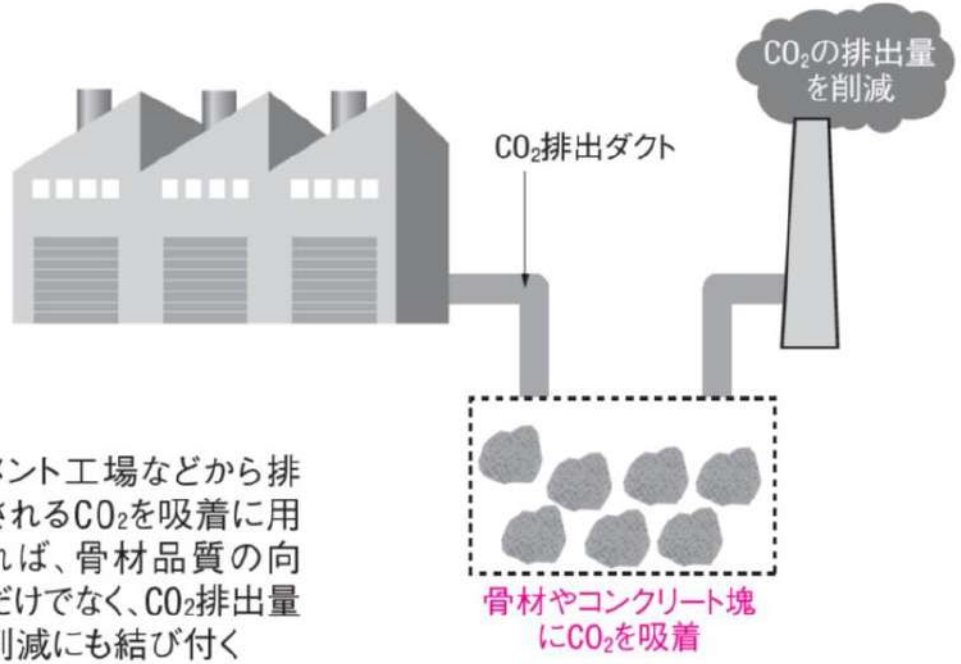
実験で吸着した骨材

再生骨材を生産するシステム概念



セメント工場などから排出されるCO₂を吸着に利用すれば、骨材品質の向上だけでなく、CO₂排出量の削減にも結び付く。

再生骨材を生産するシステム概念



セメント工場などから排出されるCO₂を吸着に利用すれば、骨材品質の向上だけでなく、CO₂排出量の削減にも結び付く

セメント製造で生じるCO₂を再生骨材に吸着させることで
コンクリート産業全体のCO₂排出量を削減可能

ご清聴ありがとうございました

芝浦工業大学 伊代田研究室は

「材料化学から設計・施工

そして維持管理・リサイクルまで」

様々な面で社会のお役にたてるよう
努力し続けます。



研究室web



 YouTube



連絡先：
iyoda@shibaura-it.ac.jp
iyoda.mdl@gmail.com

Webサイト：
<http://www.db.shibaura-it.ac.jp/~iyoda/>

