



プレキャストコンクリート製品 の耐久性とその課題

ー品質管理・品質マネージメントー

岡山大学 綾野克紀

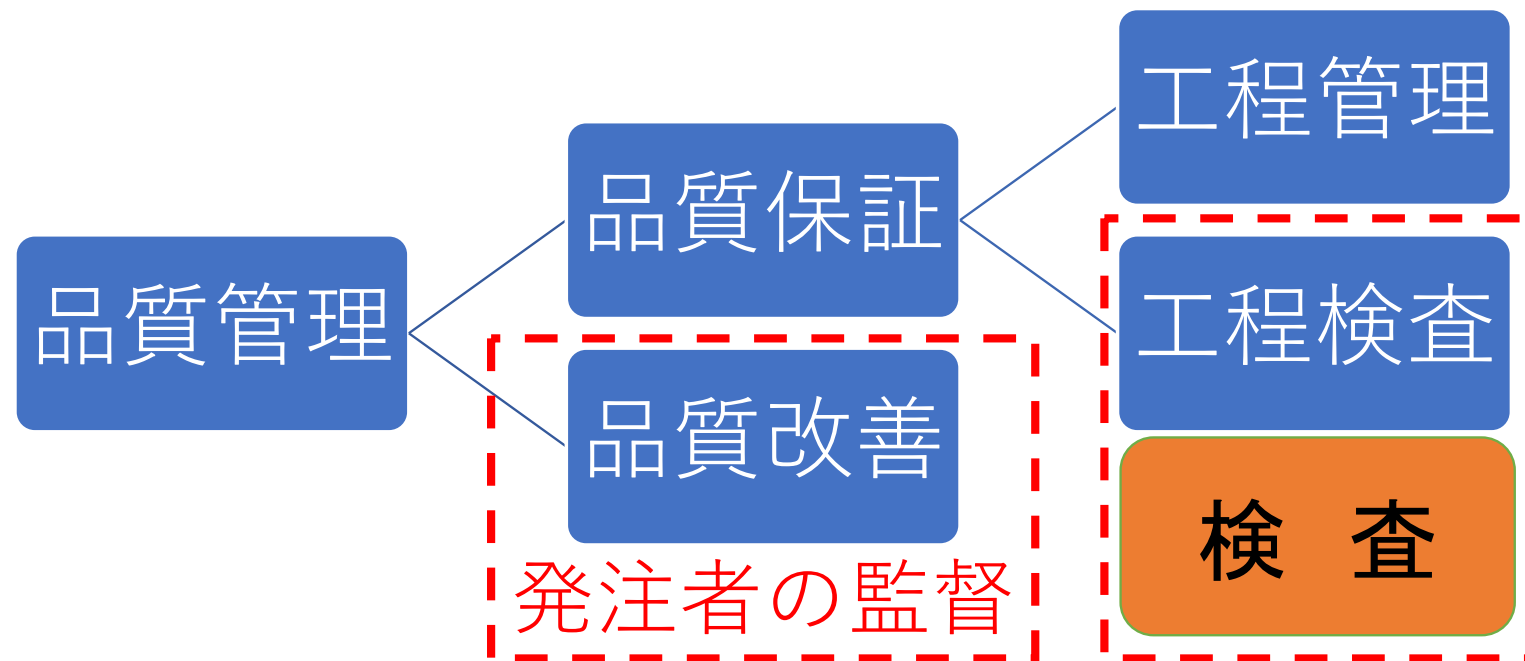


品質管理・検査

品質管理と（発注者の）検査の位置づけ



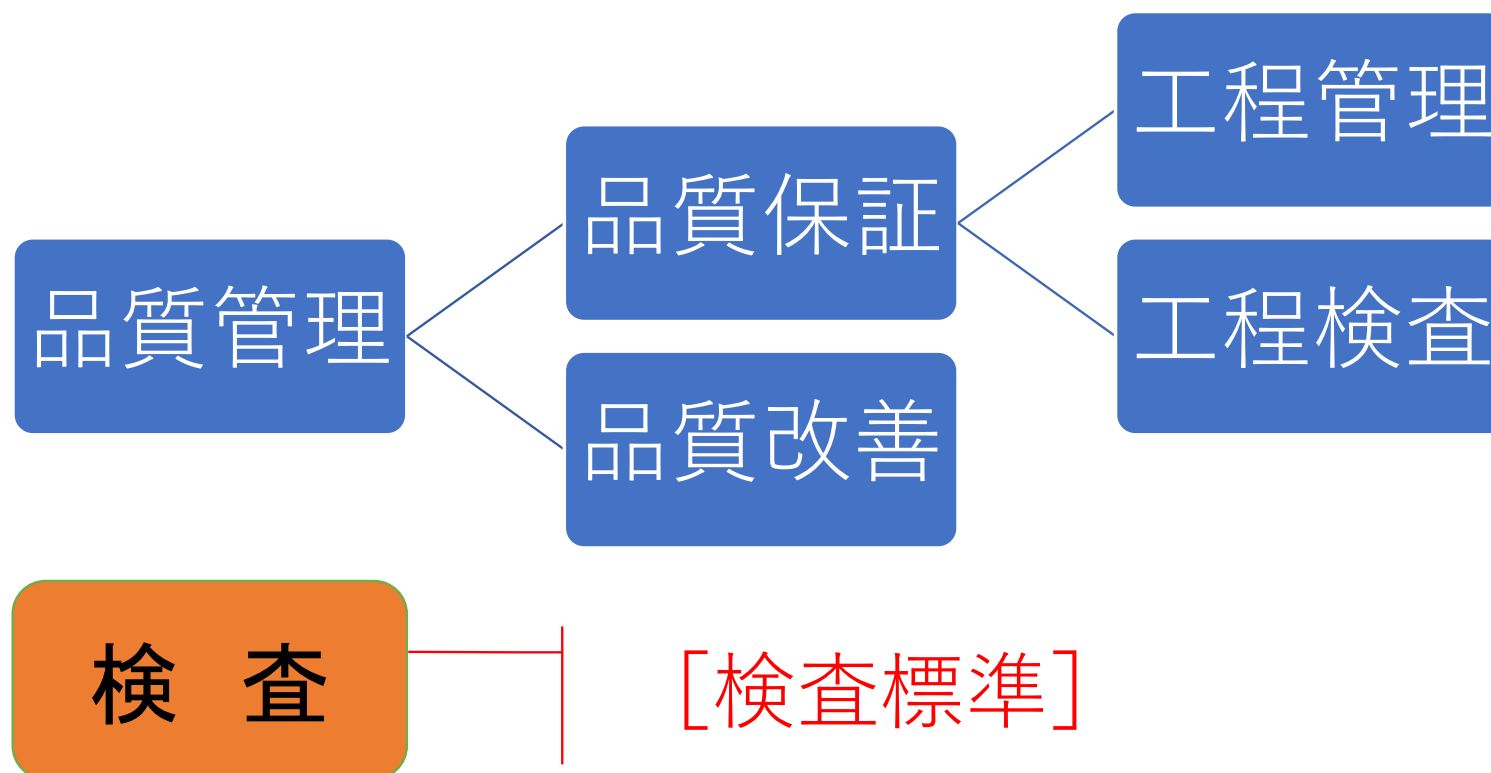
岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY



品質管理とは,



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY



検査の位置づけ

検査とは,

■検査項目 ⇒ スランプ

■試験の方法 ⇒ JIS A 1101

■頻度（時期）⇒ 150m³に1回

■合格判定基準⇒ ± 2.5cm

- ロットで管理：強度，耐久性
- 適宜検査：スランプ，空気量

■ 施工者の行う検査

⇒ [施工標準] 13章品質管理

■ 発注者の行う検査

⇒ [検査標準]

施工者の行う検査と，工事の発注者が行う検査は，目的も方法も異なる

圧縮強度を例に取るなら



発注者 → 不良率が5%のコンクリート

施工者 → JIS A 5308の規定を満足するコンクリート

圧縮強度を例に取るなら

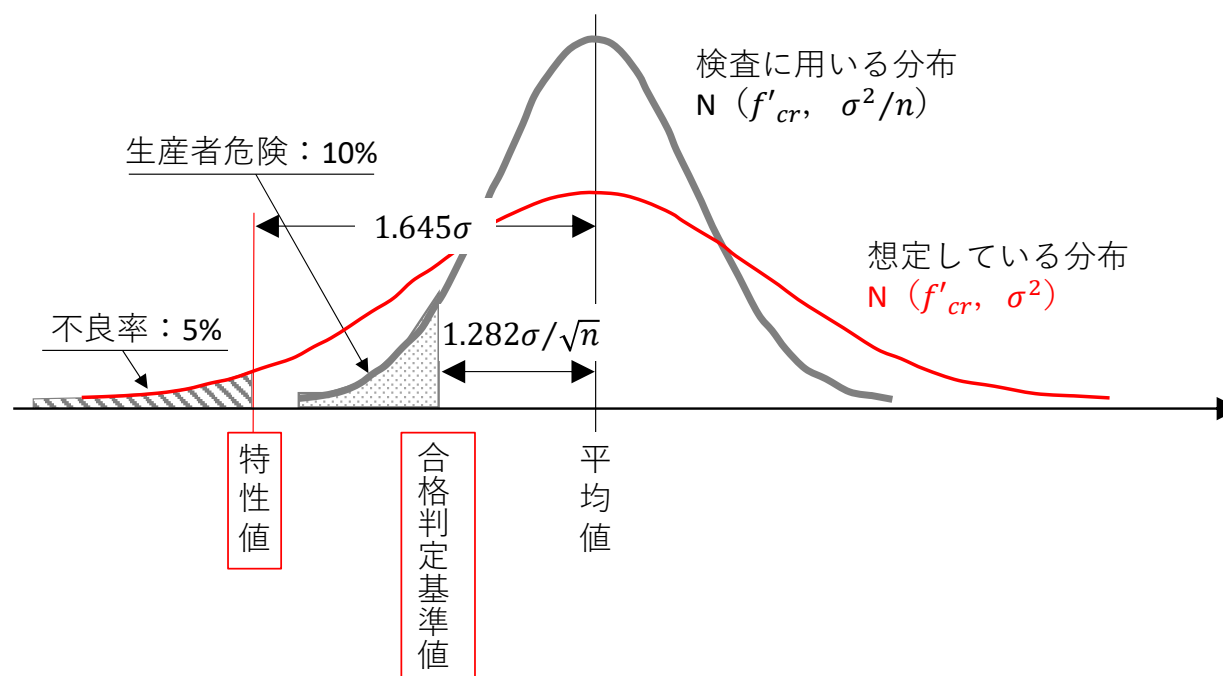


岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY

JIS A 5364, JIS A 5308, コンクリート標準示方書, 土木工事共通仕様書

設計基準強度, 特性値, 呼び強度, 合格判定基準値

発注者の求めるもの



試験値は、正規分布に従うのか？



1回の試験値は正規分布に従う

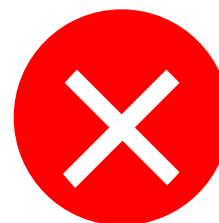
ヒストグラムやQ-Qプロットで視覚的に確認し、

- 歪度・尖度（ダゴスティーノ検定など）
- シャピロ=ウィルク
- 検定コルモゴロフ=スミルノフ検定（**K-S**検定）

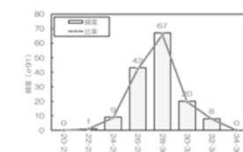
n 回の試験値は正規分布に従う



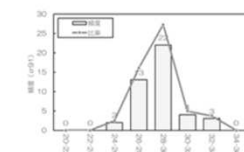
中心極限定理



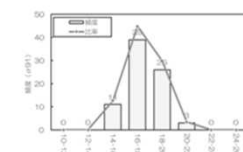
A 配合 $\sigma 91$



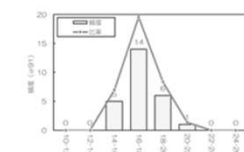
A 配合 $\sigma 91$ (間引きデータ)



B 配合 $\sigma 91$

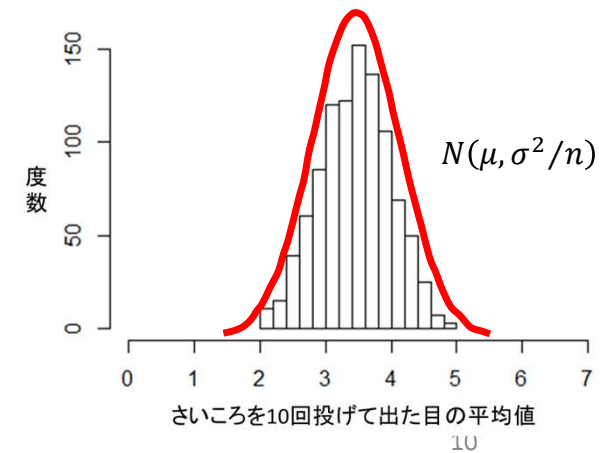
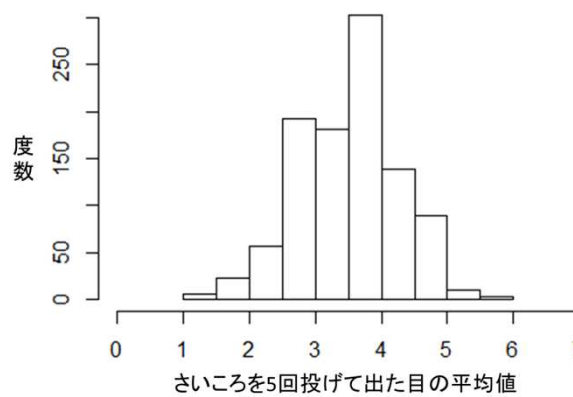
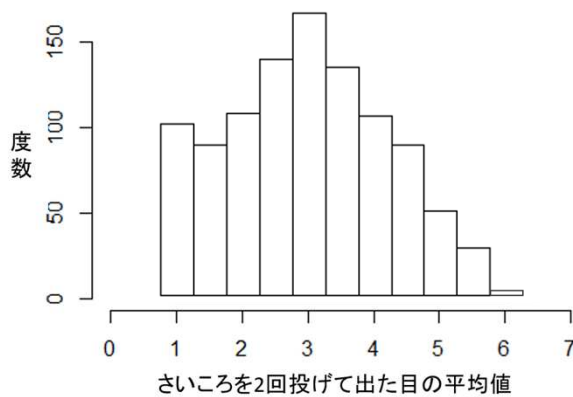
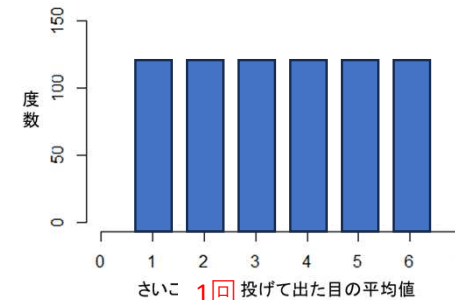
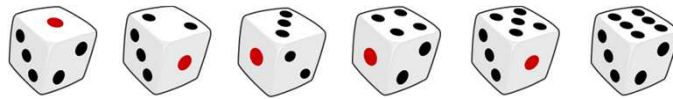


B 配合 $\sigma 91$ (間引きデータ)

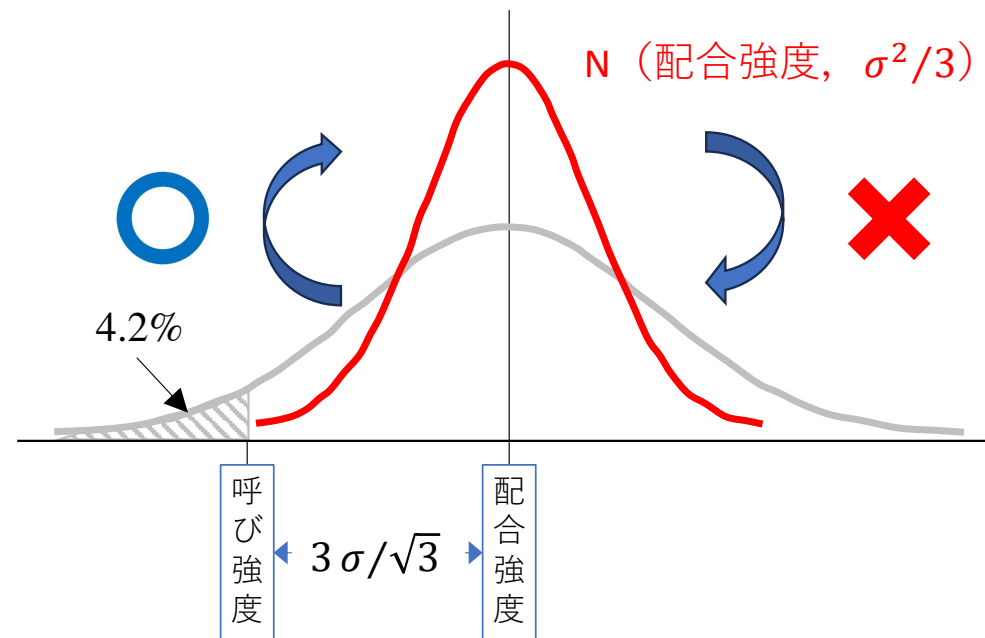


中心極限定理

標本を抽出する母集団が平均 μ 、分散 σ^2 の正規分布に従う場合においても、従わない場合においても、抽出するサンプルサイズ n が大きくなるにつれて標本平均の分布は「平均 μ 、分散 σ^2/n 」の正規分布 $N(\mu, \sigma^2/n)$ に近づく



よくある思い違い

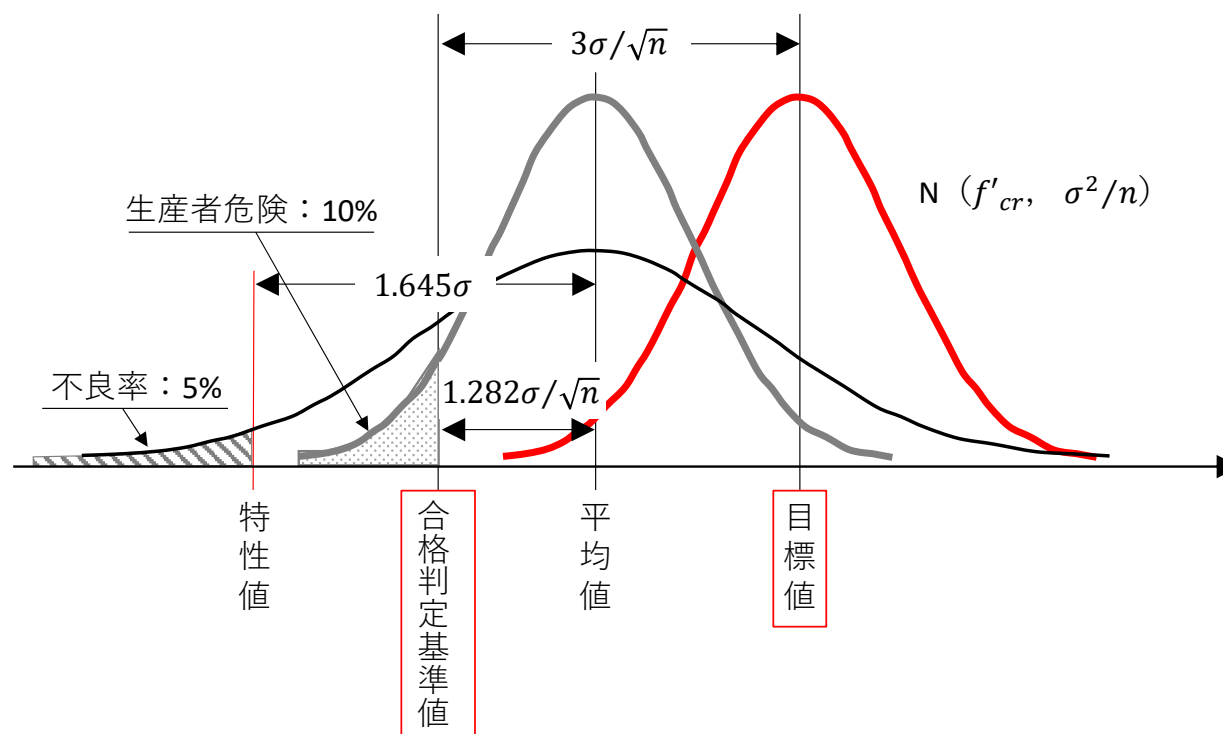


呼び強度に特性値を指定すれば、特性値を下回る確率が5%以下となる
検査に合格するコンクリートが得られる

工事の発注者の求めるもの

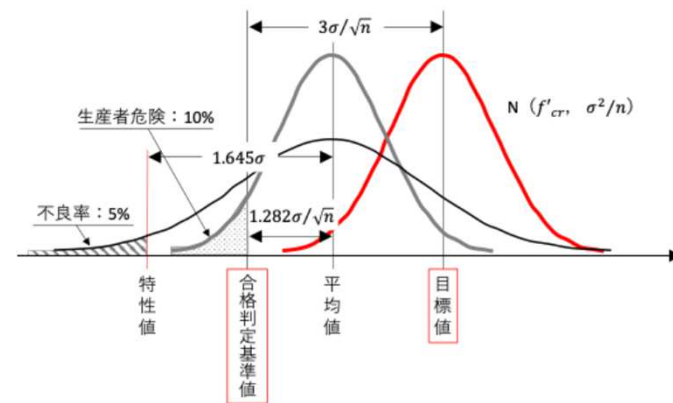


岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY

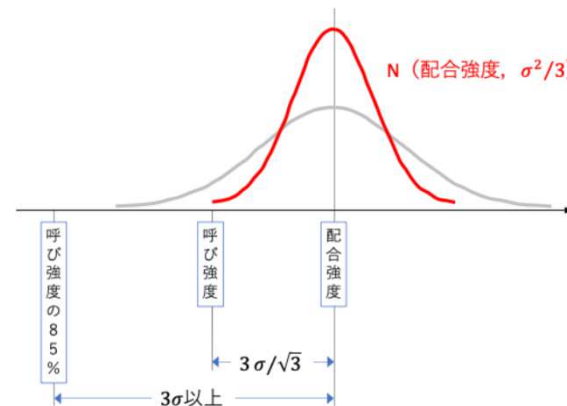


施工者の責任

1. 発注者が求めるコンクリートを発注していること



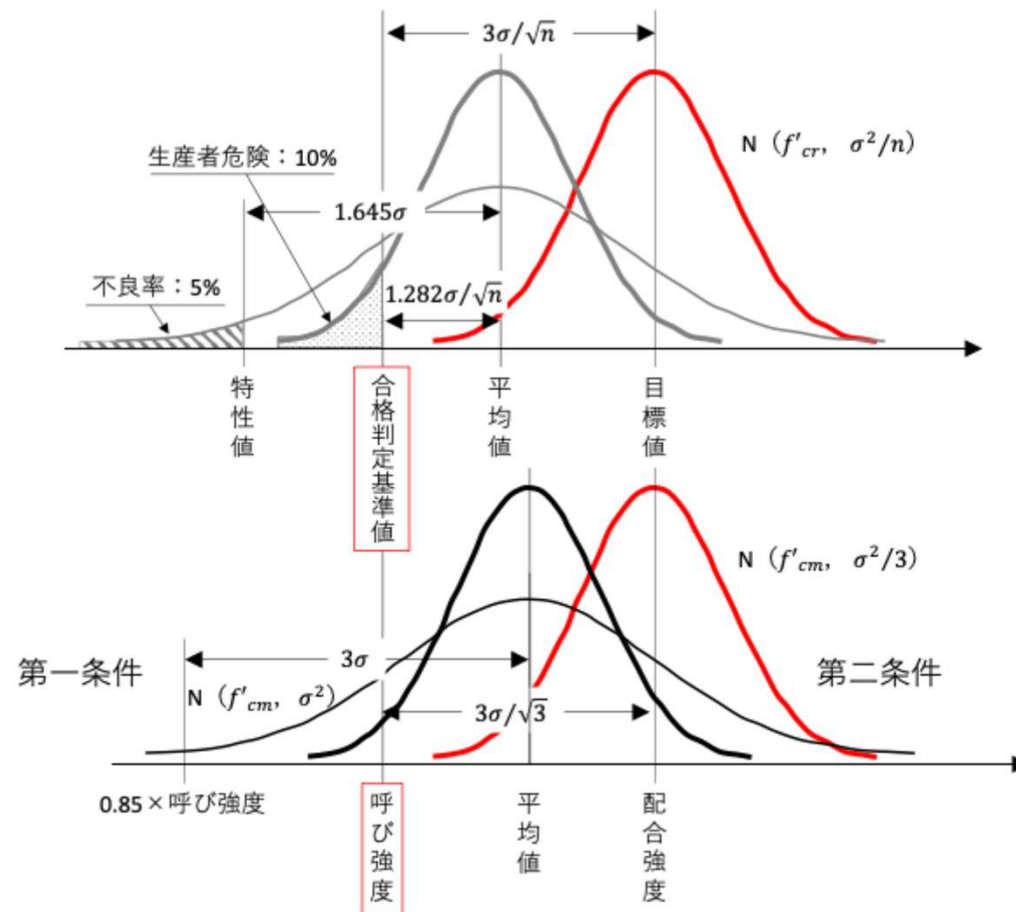
2. 自分の求めるコンクリートを受け入れていること



発注者の求めるコンクリートの発注



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY



施工者の検査（受入れ検査）



- 1回の試験結果が呼び強度の85%を下回らない
- 3回の試験値の平均値が呼び強度を下回らない



1回の試験値が呼び強度を下回るようなコンクリートを持って来るな

「設計基準強度」と「圧縮強度の特性値」



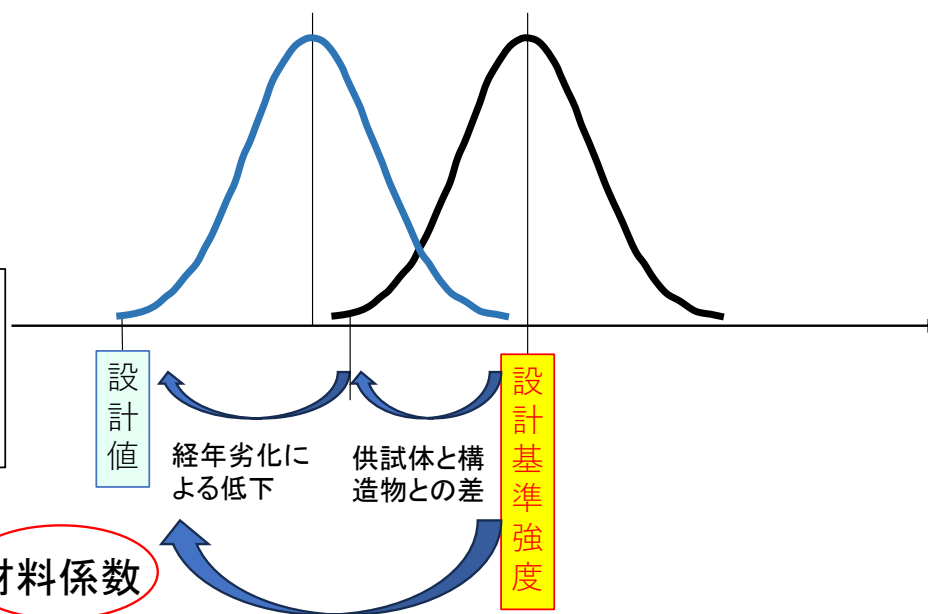
設計基準強度



特性値

「設計基準強度」と「圧縮強度の特性値」

材料実験データの不足・偏り,
品質管理の程度, 供試体と構
造物中との材料強度の差異,
経時変化等による



湿潤養生: 3日～7日

5.2 材料物性の特性値

(1) 材料物性の特性値は、定められた試験法による材料物性の試験値のばらつきを想定した上で、対象とする限界状態の不都合さの程度に応じて、試験値がそれを望ましくない側に下回るもしくは上回る確率を想定して定めることを原則とする。

(2) 材料強度の特性値 f_k は、試験値のばらつきを想定した上で、試験値がその値を下回る確率がある一定の値となると想定される値、もしくは下限規格値として保証される値とする。

解説 表 4.5.1 安全係数により配慮されている内容（線形解析を用いた断面破壊の照査の場合）

配慮されている内容		取り扱う項目
断面耐力	1. 材料強度のばらつき (1) 材料実験データから判断できる部分 (2) 材料実験データから判断できない部分（材料実験データの不足・偏り、品質管理の程度、供試体と構造物中との材料強度の差異、経時変化等による）	特性値 f_k 材料係数 γ_m
	2. 限界状態に及ぼす影響の度合	部材係数 γ_b
	3. 部材断面耐力の計算上の不確実性、部材寸法のばらつき、部材の重要度、破壊性状	
断面力	1. 作用のばらつき (1) 作用の統計的データから判断できる部分 (2) 作用の統計的データから判断できない部分（作用の統計的データの不足・偏り、設計耐用期間中の作用の変化、作用の算定方法の不確実性等による）	特性値 F_k 作用係数 γ_f
	2. 限界状態に及ぼす影響の度合	構造解析係数 γ_a
	3. 断面力等の算定時の構造解析の不確実性	
構造物の重要度、限界状態に達したときの社会的経済的影響等		構造物係数 γ_i

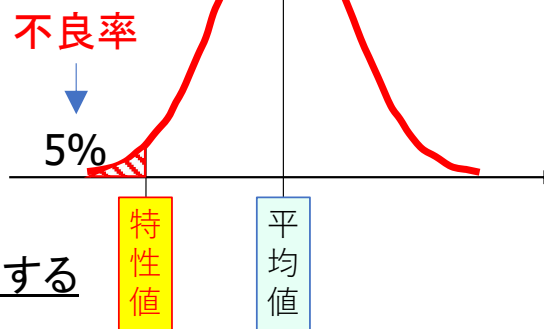
解説 表 4.5.2 標準的な安全係数の値（線形解析を用いる場合）

安全係数 要求性能（限界状態）	材料係数 γ_m		部材係数 γ_b	構造解析係数 γ_a	作用係数 γ_f	構造物係数 γ_i
	コンクリート γ_c	鋼材 γ_s				
安全性（断面破壊）	1.3	1.0 または 1.05	1.1～1.3	1.0	1.0～1.2	1.0～1.2

「設計基準強度」と「圧縮強度の特性値」

〔設計編〕

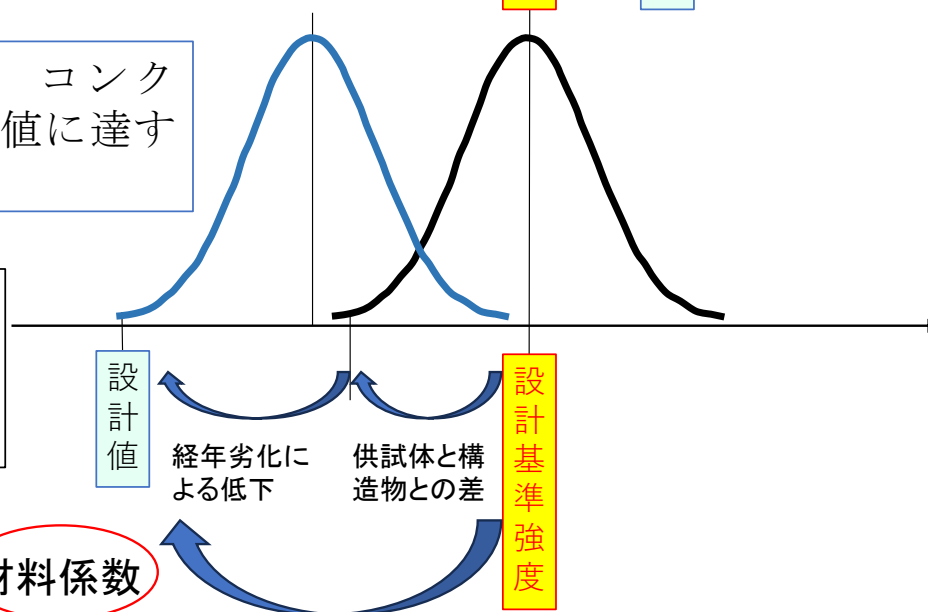
施工標準に従った施工を行ってれば、特性値に設計基準強度をとってよい



特性値と施工方法によって、設計基準強度を担保する

湿潤養生期間の目安は、コンクリートの圧縮強度が特性値に達するまでとしてよい。

材料実験データの不足・偏り、品質管理の程度、供試体と構造物中との材料強度の差異、経時変化等による



水中養生:28日間



湿潤養生:3日~7日

設計基準強度は特性値に読み替える

設計図書で設計基準強度が示された場合は、圧縮強度の特性値に読み替えてよい。 設計図書に示された特性値を確認するための検査方法は、検査計画書で確認する必要がある。検査は、検査項目、試験方法、頻度（時期）、判定基準値からなる。試験方法には、試料の採取方法、供試体の作製方法や試験を行う材齢等の試験条件が含まれる。検査計画書に特性値を確認するための検査方法が示されていない場合や試験条件等が明確でない場合には、発注者に確認する必要がある。

A.2 品質

A.2.1 強度

コンクリートの圧縮強度は、所定の材齢で強度試験を行ったとき、次の事項を満足することが望ましい。

- a) 1回の試験結果は、任意の1バッチから採取した試料で作製した3個の供試体の平均値で表し、その平均値は、設計基準強度の90 %以上とする。
- b) 直近3回の試験の平均値は、設計基準強度以上とする。

特性値

合格判定基準値※

5.7 コンクリートの品質管理

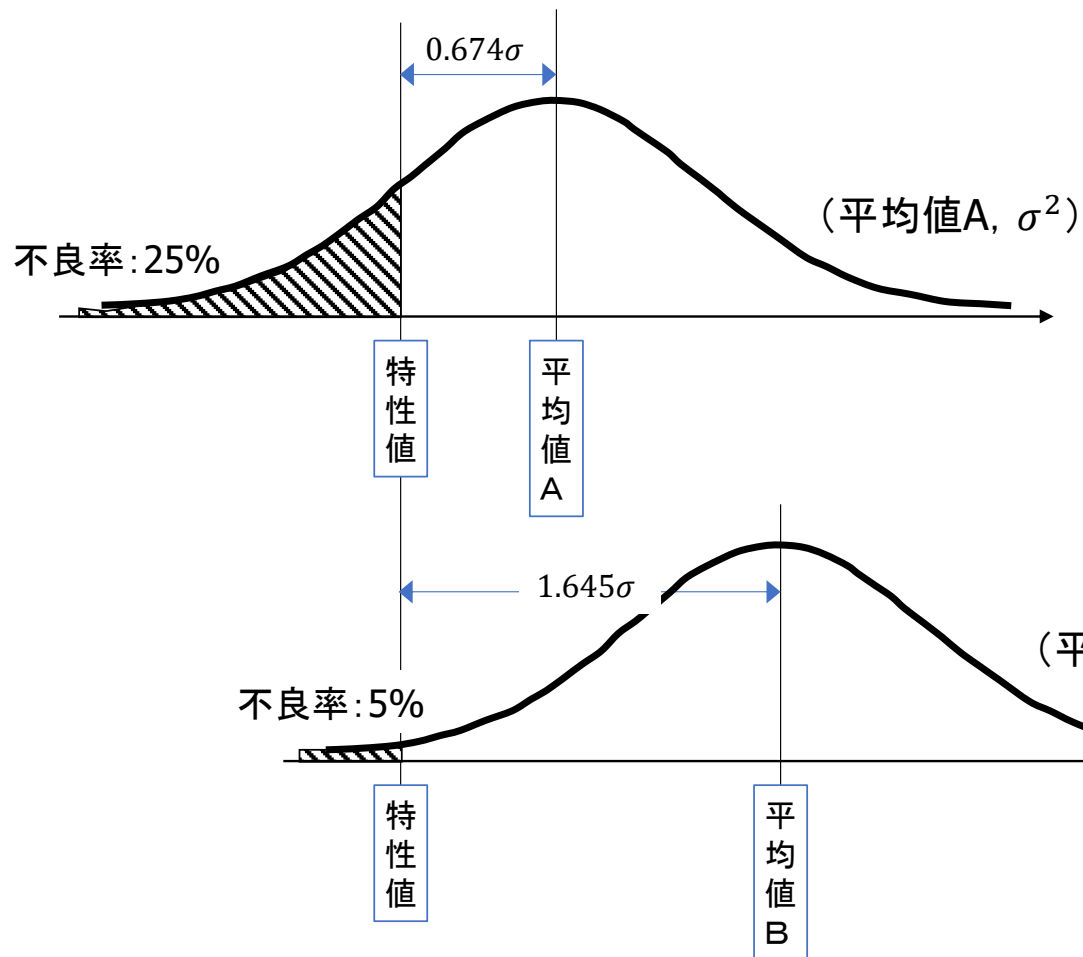
プレキャストの場合は、合格判定基準値 = 特性値でもOK

コンクリートの品質は、PCa製品と同一養生を行った供試体の所定の材齢における圧縮強度又はその他の適切な方法によって管理する。

不良率



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY



【昭和55年制定】示方書まで

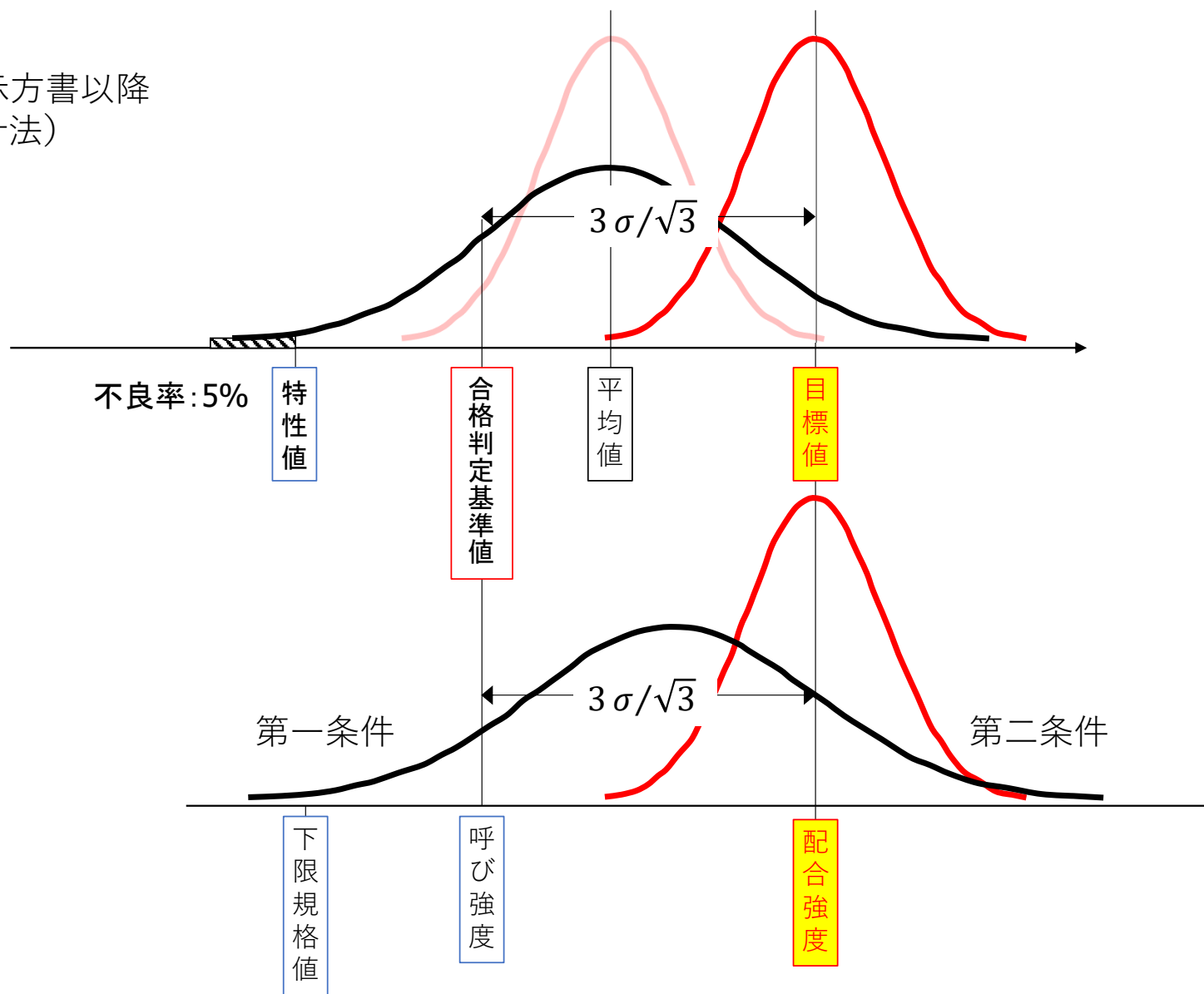
➡ 許容応力度設計法

設計法の変更に伴い、材料強度の特性値が変わることへの整合上、「試験値が設計基準強度 f'_{ck} を下回る確率が5%以下となるよう～」と改めた。
(CL61「昭和61年制定示方書改訂資料」44頁)

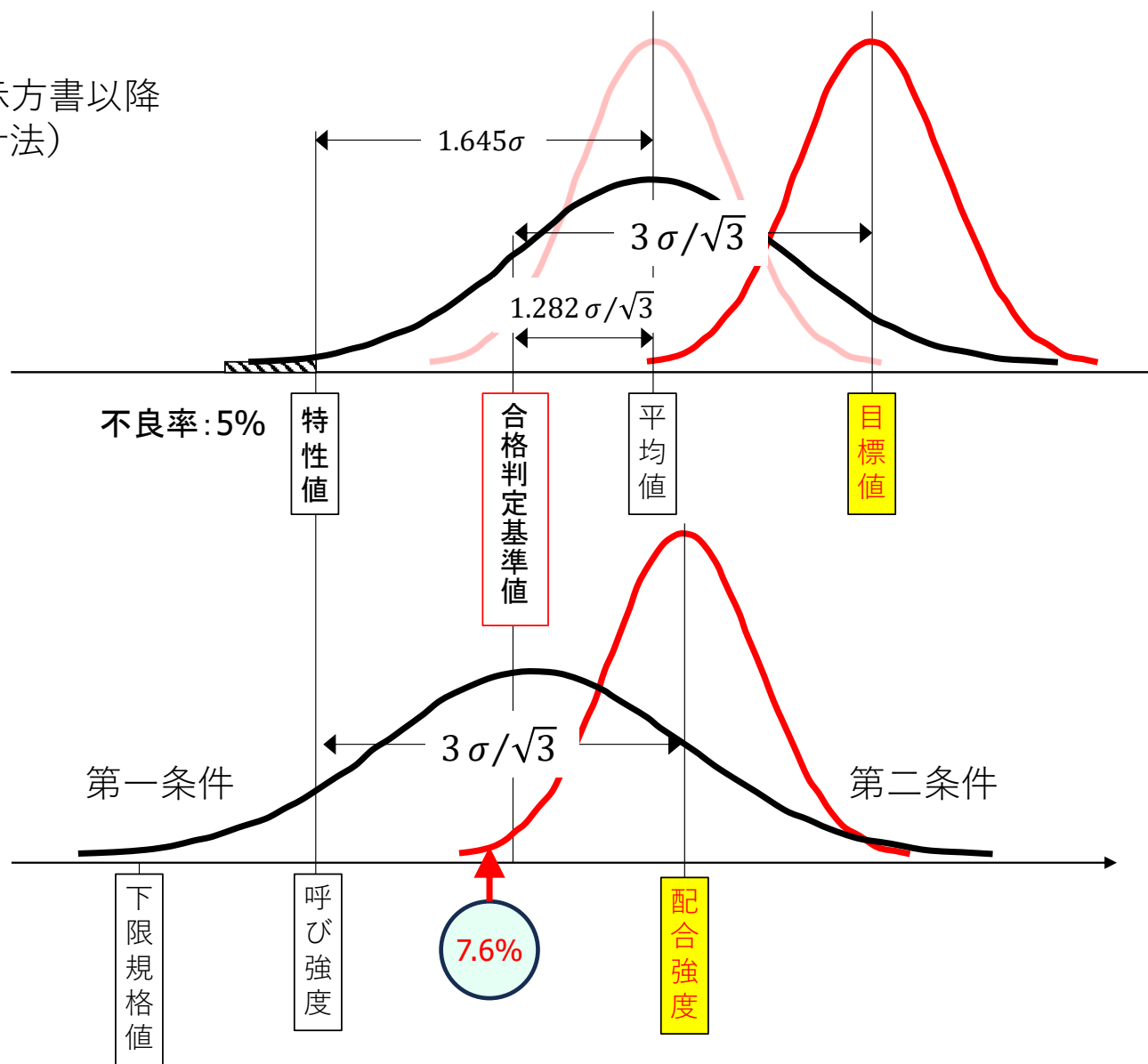
【昭和61年制定】示方書以降

➡ 限界状態設計法

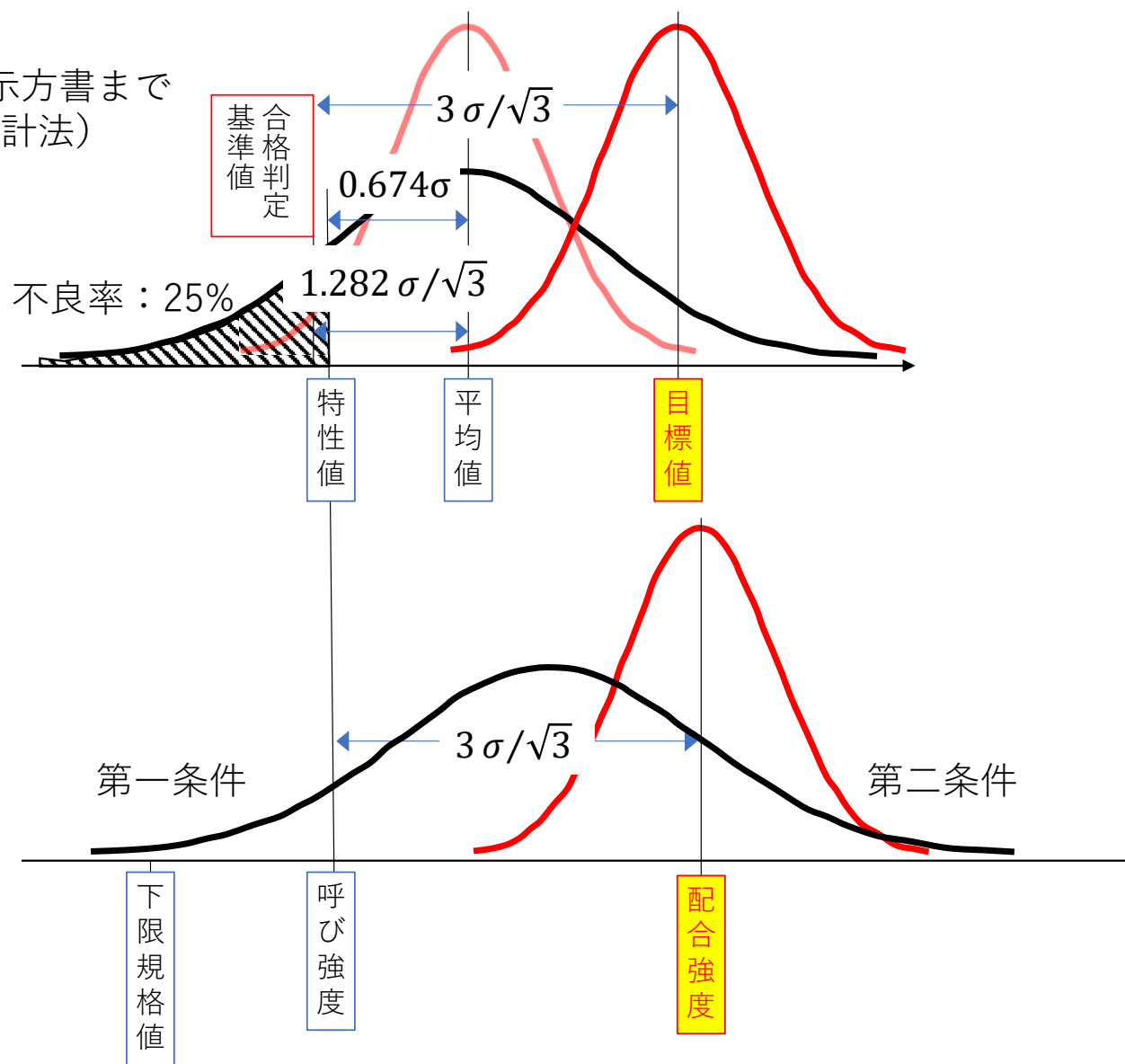
【昭和61年制定】示方書以降
(限界状態設計法)



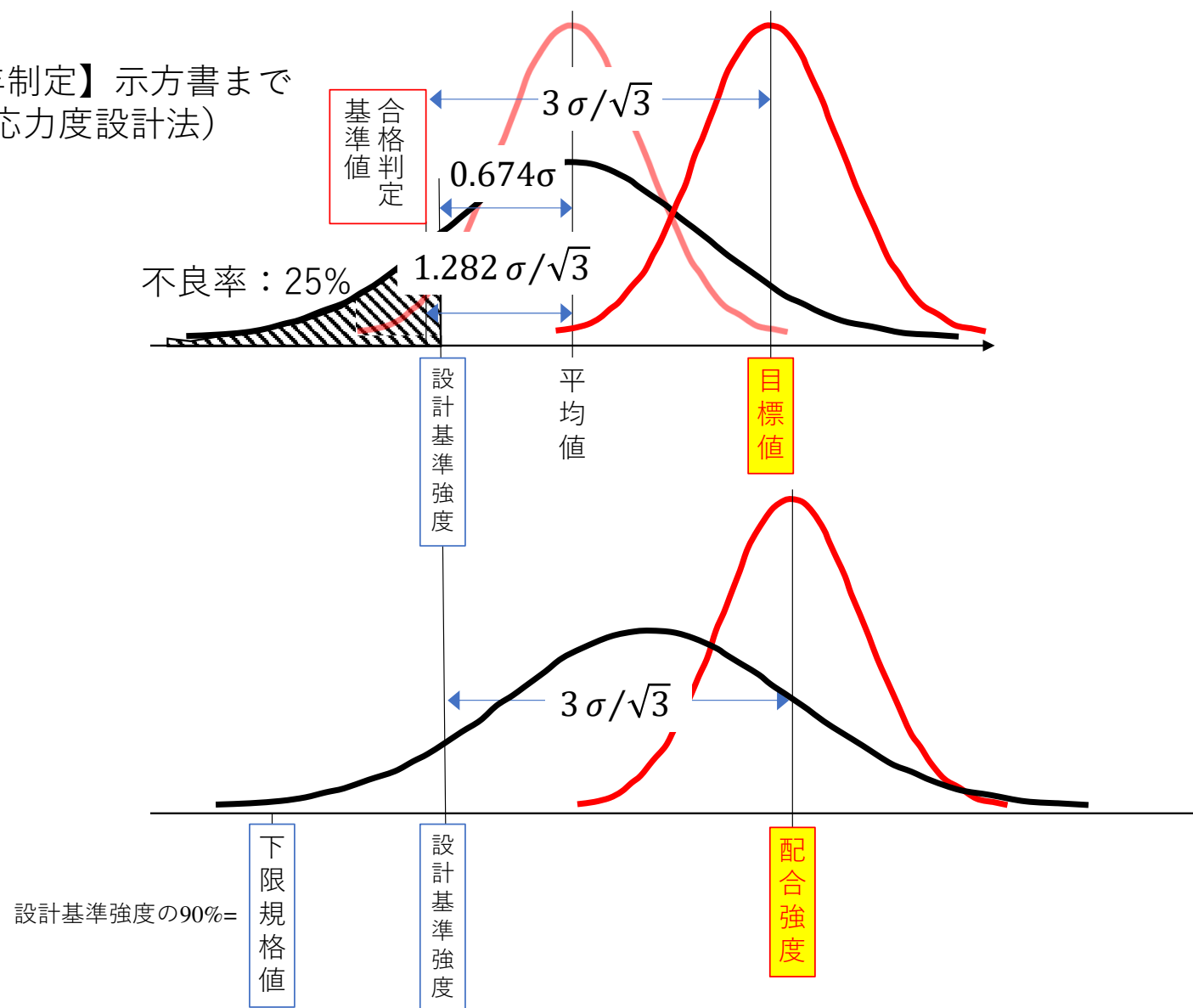
【昭和61年制定】示方書以降
(限界状態設計法)



【昭和55年制定】 示方書まで
(許容応力度設計法)



【昭和55年制定】 示方書まで
(許容応力度設計法)



JIS A 5364とJIS A 5308



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY

JIS A 5364附属書A

A.2 品質

A.2.1 強度

コンクリートの圧縮強度は、所定の材齢で強度試験を行ったとき、次の事項を満足することが望ましい。

- a) 1回の試験結果は、任意の1バッチから採取した試料で作製した3個の供試体の平均値で表し、その平均値は、設計基準強度の90 %以上とする。
- b) 直近3回の試験の平均値は、設計基準強度以上とする。

JIS A 5308

5 品質

5.1 品質項目

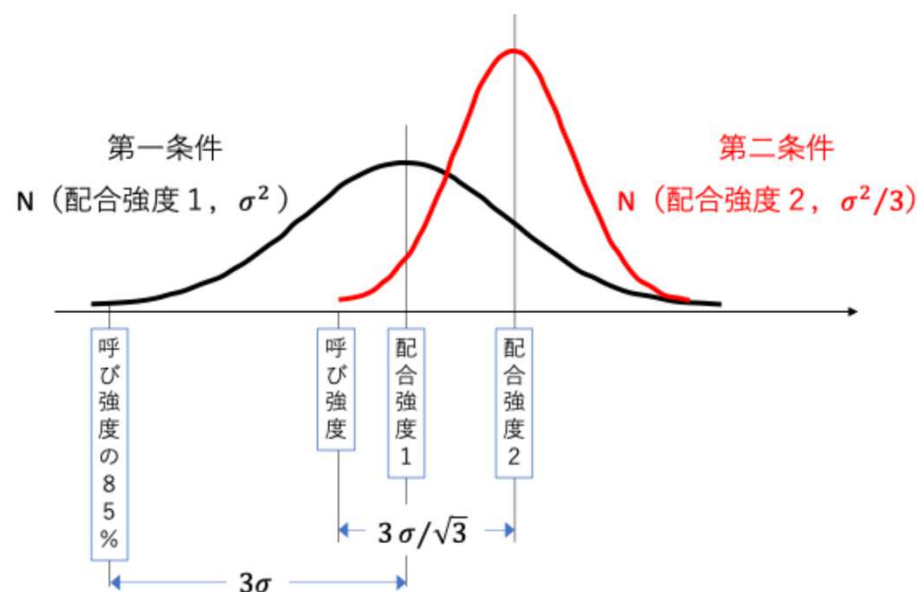
レディーミクストコンクリートの品質項目は、強度、スランプ又はスランプフロー、空気量、及び塩化物含有量とし、荷卸し地点において、5.2～5.6に規定する条件を満足しなければならない。

5.2 強度

強度は、10.2に規定する試験を行ったとき、次の規定を満足しなければならない。強度試験における供試体の材齢は、4.1 i) の指定がない場合は28日、指定がある場合は購入者が指定した材齢とする。

- a) 1回の試験結果は、購入者が指定した呼び強度の強度値5) の85 %以上でなければならない。
- b) 3回の試験結果の平均値は、購入者が指定した呼び強度の強度値5) 以上でなければならない。

第一条件と第二条件の意味



3回の試験値の平均値が呼び強度よりも大きければ,

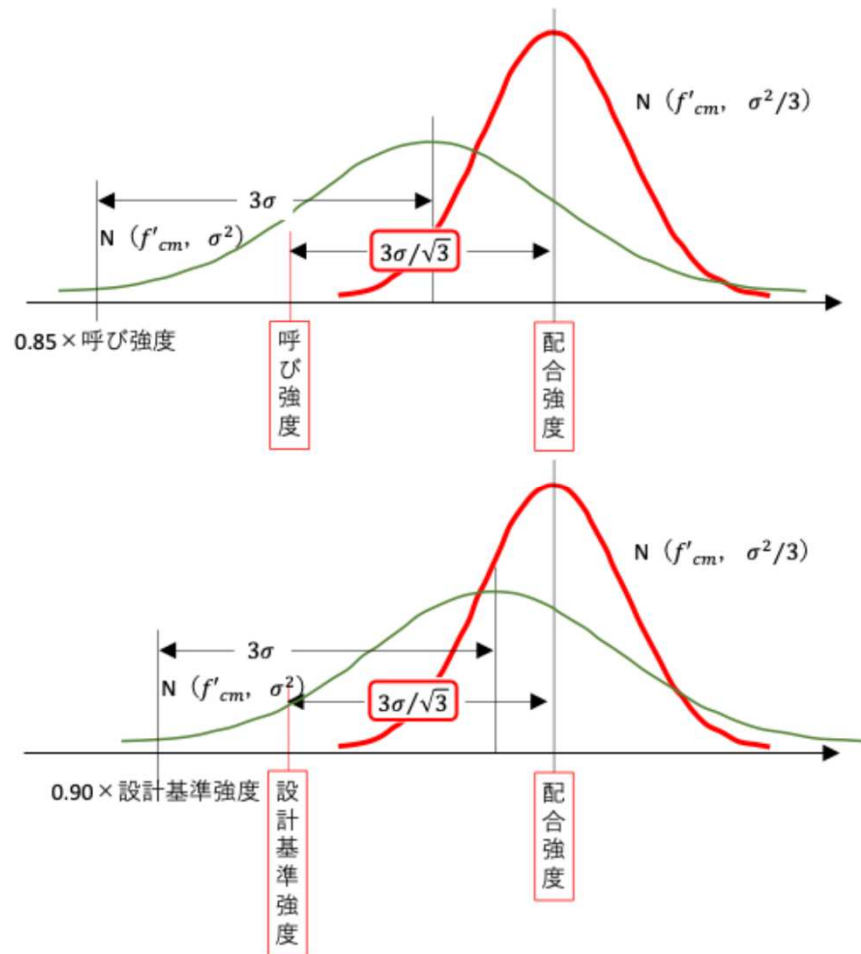
1回の試験値が呼び強度の0.85倍を下回ることはない (はずだ)

$$f'_{cm} \geq \frac{1}{1 - 3V/\sqrt{1}} \times 0.85 \times \text{呼び強度の強度値}$$

$$f'_{cm} \geq \frac{1}{1 - 3V/\sqrt{3}} \times \text{呼び強度の強度値}$$

配合強度2が配合強度1よりも大きいためには, Vは**9.82%以下**

第一条件と第二条件の意味



3回の試験値の平均値が設計基準強度よりも大きければ、

1回の試験値が呼び強度（設計基準強度）の0.90倍を下回ることはない（はずだ）

$$\frac{1}{1 - 3V/\sqrt{3}} \times \text{設計基準強度} \geq \frac{1}{1 - 3V/\sqrt{1}} \times 0.9 \times \text{設計基準強度}$$

Vは、**6.94%未満**

施工標準の目次



2023年版 施工標準		
1章	総 則	2
2章	施工計画	4
3章	コンクリートの製造に用いる材料	15
4章	コンクリートの配合	29
5章	コンクリートの製造	10
6章	構造物の構築に用いる製品	15
	<ul style="list-style-type: none">・ 鋼 材・ レディーミクストコンクリート・ プレキャストコンクリート	
7章	鉄 筋 工	7
8章	型枠および支保工	12
9章	コンクリート工	27
10章	施工環境等に応じたコンクリート工	21
11章	高流動コンクリートを用いたコンクリート工	9
12章	プレキャストコンクリート工	3
13章	品質管理	23
14章	施工の記録	1
15章	施工を引き継ぐ場合の留意事項	4



JIS認証品を用いることが前提

4 要求性能

(略)

注記 JIS A 5371, JIS A 5371及びJIS A 5371の推奨仕様で規定する製品の性能は、**一般的な環境で標準的な荷重作用**に対して設定されている。

5 性能照査

- 鋼材腐食：中性化深さ，塩化物イオン濃度
- コンクリートの劣化：凍結融解試験における相対動弾性係数，スケーリング量，化学的侵食，圧縮強度

4.2.1 フレッシュコンクリートの品質

a. 水セメント比

- URC製品：65%以下
- RC製品：55%以下
- PC製品：45%以下

b. 空気量

型枠投入時の空気量は、 $4.5 \pm 1.5\%$ を標準とし、凍結融解抵抗性が得られるものでなければならない。

c. アルカリシリカ反応抑制対策

d. 塩化物量

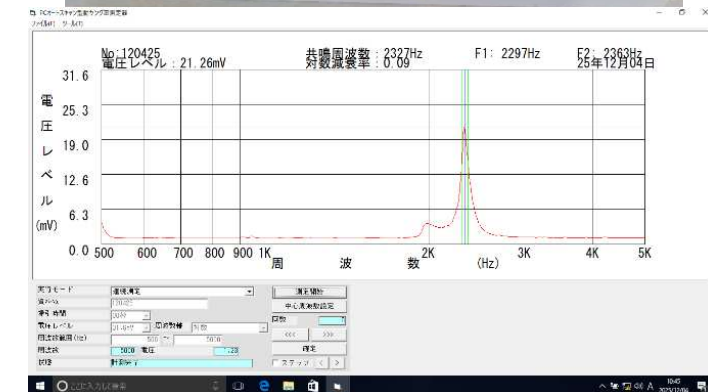
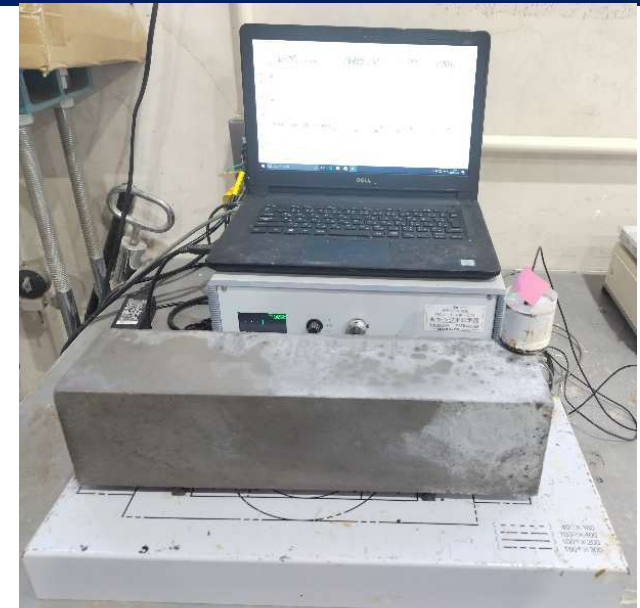
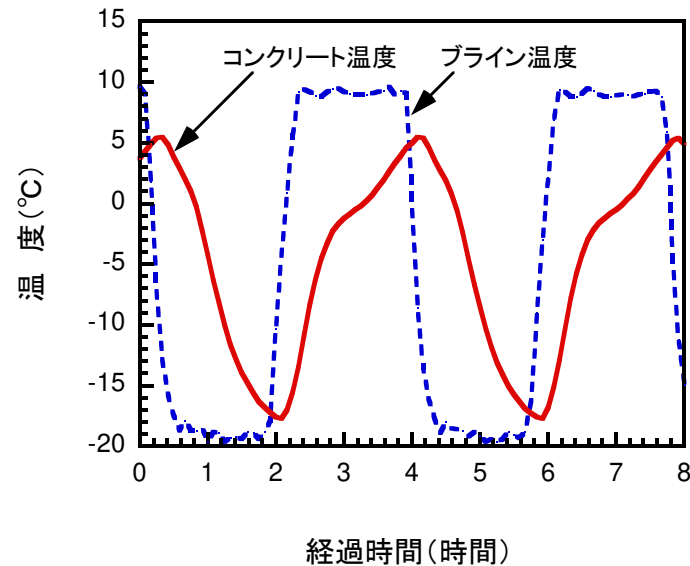
凍結融解試験



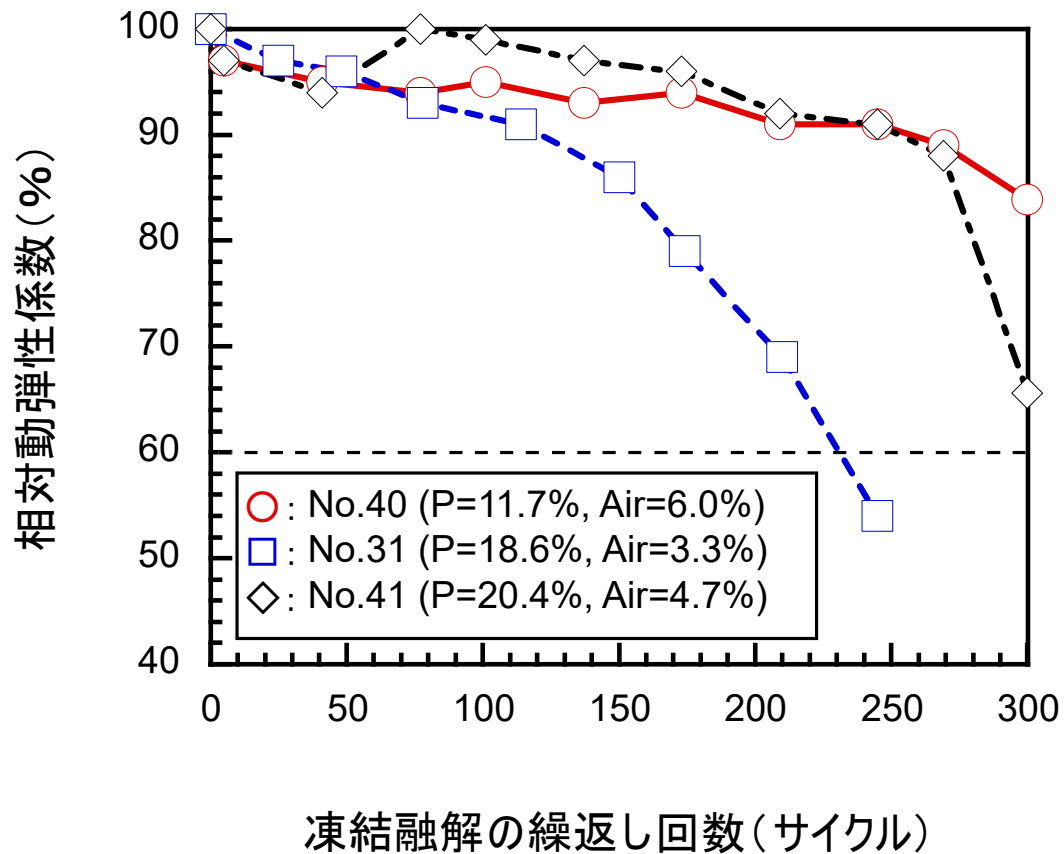
岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY



凍結融解試験機



動ヤング率測定器



$$\text{相対動弾性係数 } P_n (\%) = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100$$

P_n : 凍結融解 n サイクル後のたわみ振動の一次共鳴振動数 (Hz)

P_0 : 凍結融解 0 サイクルにおけるたわみ振動の一次共鳴振動数 (Hz)

$$\text{耐久性指数 } DF = \frac{P \times N}{M}$$

P : N サイクルの時の相対動弾性係数 (%)

N : 相対動弾性係数が 60% になるサイクル数, または 300 サイクルのいずれか小さいもの

M : 300 サイクル

プレキャストコンクリート製品



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY

[施工標準]

- JIS認証品が対象
- 要求する品質を満足するなら，製造方法は問わない

[目的別コンクリート]

- 施工者が製作に関与するものが対象.

JIS相当品は対象外

1. 適用範囲

(略)

なお、この規格は、他の適切な試験方法を制限するものではなく、製品の型式検査（性能試験の区分）、最終検査及び受渡検査における試験に適宜適用するものとする。

1. 適用範囲

(略)

注記 この規格では、繰返しの製造に入った後に、製造された製品の検査を対象とし、“型式検査”については触れない。

附属書 B（規定） 初回工場審査において確認する品質管理体制

B.1 製品の管理

JIS A 5373の附属書E（くい類）の推奨仕様E-1プレストレストコンクリートくいの次の性能は，型式検査の試験成績表によって確認する．

B.4 設備の管理

(5) 型式検査に関する試験は，外部に依頼してもよいが，最終検査及び受渡検査に係る試験設備は，必ず保有する．

検 査

- **型式検査**：目標とする品質の製品が生産者の定める方法によって製造できることを、繰返しの製造が始まる前、および繰返しの製造が始まった後に、生産者が試験あるいは製造実績等によって定期的に確認する行為。
- **工程管理**：構造物の構築や製品の製造過程における作業を分類化、体系化した工程を、効率的な方法で計画、運営すること。
- **工程検査**：施工者があらかじめ定めた工程管理に従い施工を行い、安定した品質の構造物の構築を確認する行為、もしくは、生産者があらかじめ定めた工程管理に従い製造を行い、安定した品質の製品が製造されることを確認する行為。
- **受渡検査**：現場に納入する製品が、購入者が指定した品質を満足することを、生産者が受渡し前に確認する行為。
- **受入れ検査**：現場に納入された製品が、指定した品質を満足することを、購入者が製品の受入れ時に確認する行為。

繰返しの製作前

目標の設定



製作仕様のどおりに製作すれば、要求性能を満足する製品が作れることの確認



製作仕様どおりに製作が行われていることの確認



工程管理によって、適切な製品が製作されていることの確認



製作仕様どおりに製作された製品に所定の品質があることの確認



出荷前の検査

繰返しの製作が始まった後

責任分解点

受入れ前の検査

受入れ検査

目標とする品質

かぶりを40mm, 設計耐用期間を100年とし, 飛沫帯でも鋼材腐食の発生が生じない



水分浸透速度係数 (mm/\sqrt{hour})	耐久性指数	見かけの拡散係数 ($cm^2/year$)	乾燥収縮ひずみ
11.9	95	0.51※	400×10^{-6}

品質管理



繰返しの製作前

目標の設定 → 要求品質を満足する
製作仕様の策定



製作仕様のどおりに製作すれば、要求性能を満足する製品が作れることの確認

→ 型式検査



繰返しの製作が始まった後

製作仕様どおりに製作が行われていることの確認



工程管理によって、適切な製品が製作されていることの確認



製作仕様どおりに製作された製品に所定の品質があることの確認



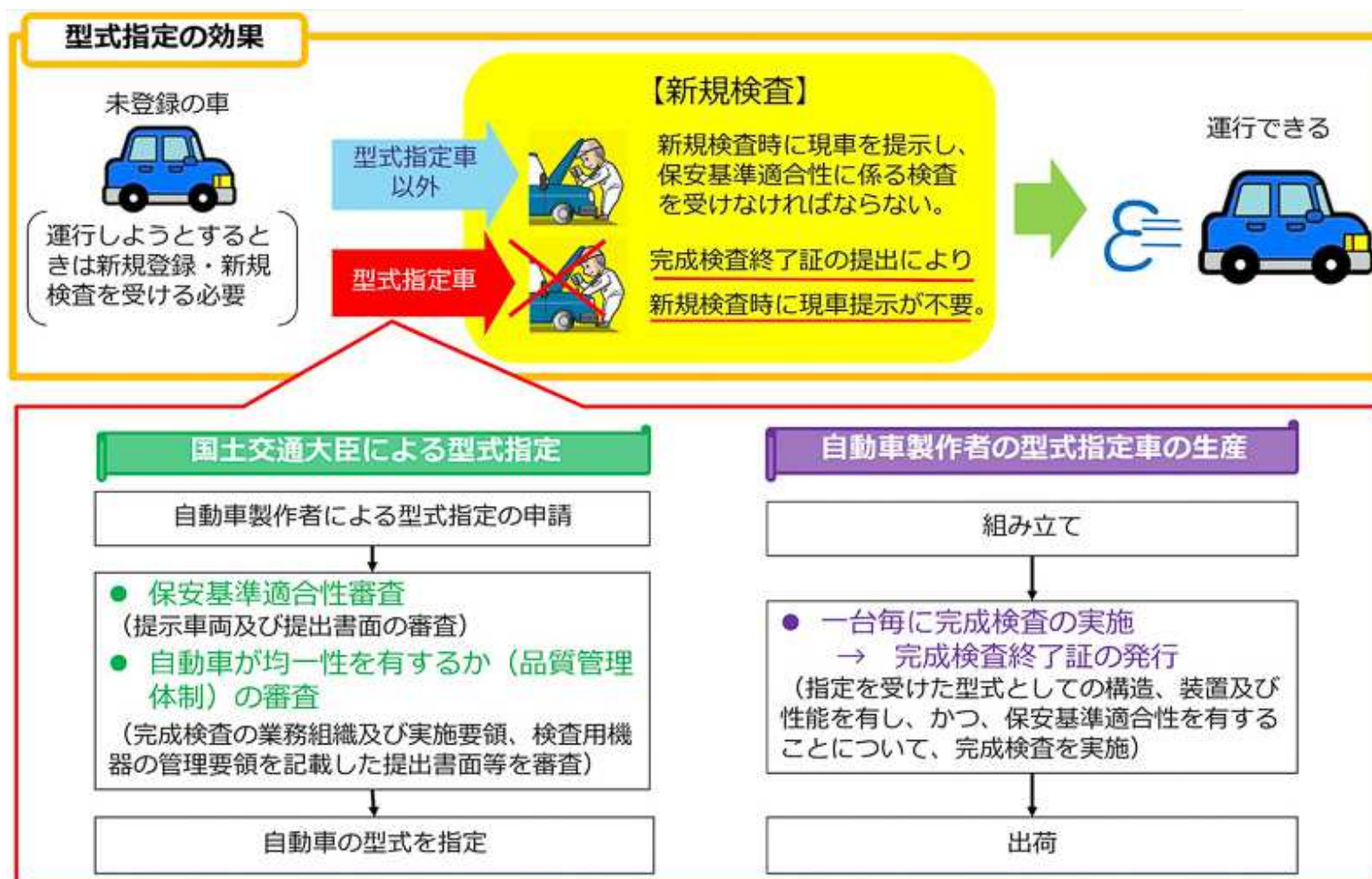
出荷前の検査

責任分解点

受入れ前の検査

受入れ検査

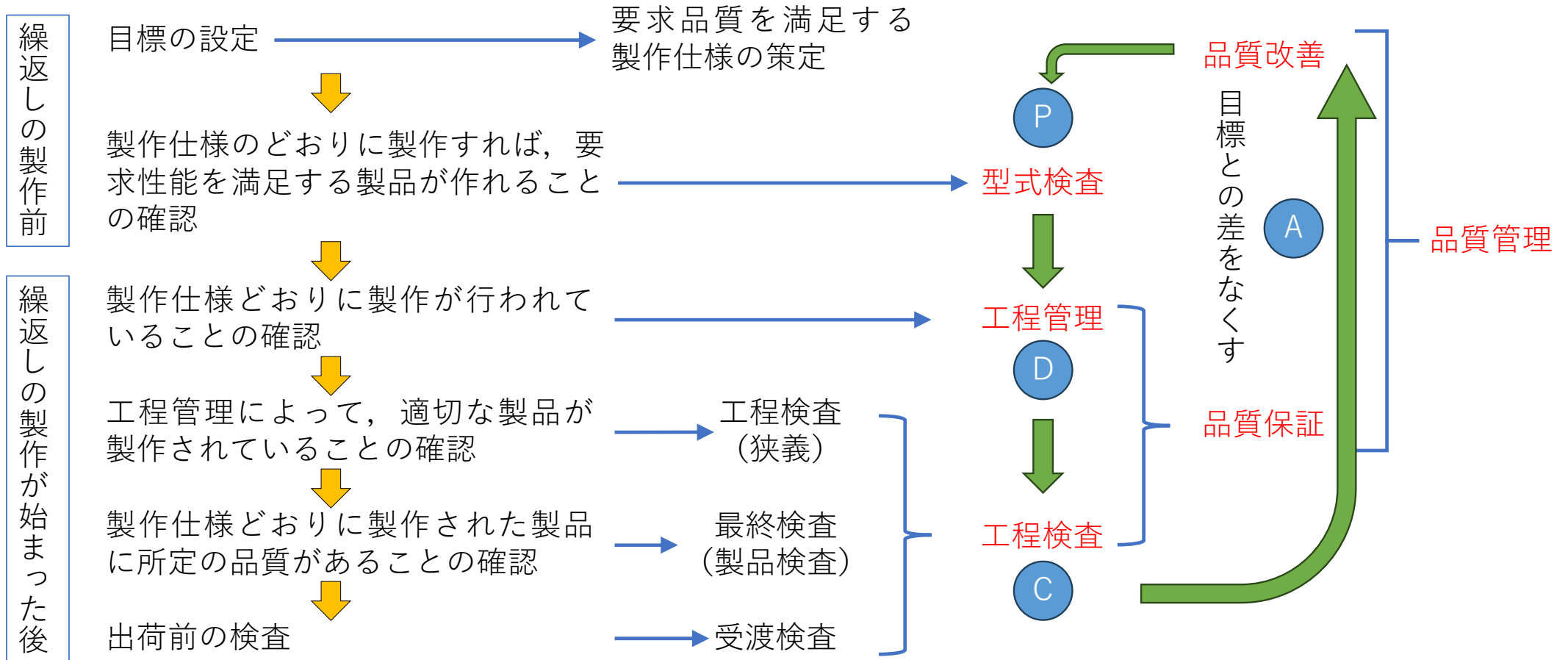
自動車の型式指定制度の概要



品質管理



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY



責任分界点

受入れ前の検査

受入れ検査

QMR等からの〔報告事項〕

- ① 前回までの経営者からの指示事項に対してとった処置の状況
- ② 苦情申出者からのクレームの状況
- ③ 目標品質の達成度
- ④ 製品管理，原材料管理，工程管理，設備管理及び外注管理の状況並びに不適合品の発生状況
- ⑤ 予防処置及び是正処置の状況
- ⑥ 監査の結果
- ⑦ 品質マネジメントシステム（QMS）に影響を及ぼす可能性のある変更
- ⑧ 資源の妥当性
- ⑨ 改善の機会

経営者からの〔指示事項〕

- ① 品質マネジメントシステム（QMS）に関する有効性の向上及び改善の機会
- ② 製品の改善
- ③ 資源の運用の必要性（必要な資源を決定し，その運用を明確にする）

プロトタイプ製作による型式検査の例



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY

シールドセグメントの事例

プロトタイプ（試作品）の製作

部材の性能確認
施工性確認

繰返しの製造



鉄筋・型枠組立



コンクリート打込み・左官仕上げ



脱型



寸法検査

プロトタイプ製作による型式検査の例



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY

シールドセグメントの事例

プロトタイプ（試作品）の製作

部材の性能確認
施工性確認

繰返しの製造



単体曲げ載荷試験



継手部の性能確認試験



組立試験

プロトタイプの部材による型式検査



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY

施工者がプレキャストコンクリート部材の製作仕様に関与する場合

「プレキャストコンクリートの製作の仕様の適切さは、プロトタイプのプレキャストコンクリートの試作等により確認する。」

- ☞ JIS製品の型式検査のように、繰返しの製作が始まる前に、試作品で確認。
- ☞ 繰返しの製作が始まった後は、管理基準を満足していることを定期的に確認する。



要求する品質を満足するなら，製造方法は問わない。

PCa製品の最小かぶりの表



9.3 かぶり

(1) プレキャストコンクリートのかぶりの最小値は、鋼材の直径以上、かつ〔設計編：本編〕8.2 および〔設計編：本編〕10.7 を満足する値に、施工誤差を考慮して定め、図面に明示しなければならない。

(2) 量産される一般の工場製品のかぶりの最小値は、表9.3.1の値以上とする。

表9.3.1 最小かぶり (mm)

分 類		外気に露出される場合、土や水に直接触れる場合、その他耐久性について考慮する必要のある場合	外気に露出されない場合、場所打ちコンクリートに埋込まれる場合、特に耐久性についての考慮を必要としない場合
区 分	締固め方法		
取替えが困難なもの	振動締固め	20	10
	遠心力締固め	15	10
取替えが比較的容易なもの	振動締固め	12	8
	遠心力締固め	9	8

注：酸その他の有害物を含む水や外気に接する場合およびすりへりの恐れのある場合には、かぶりをここに示した値より大きくするか、適切な対策を取らなければならない。

12 章 工場製品

12.1 一 般

(1) この章は、工場製品の製造および工場内での取扱い等において、特に必要な事項についての標準を示すものである。

(2) 所要の品質を有する工場製品が得られるように、材料、配合、練混ぜ、補強材の配置、成形および養生等について特に注意して製造しなければならない。また、運搬および保管等においては、工場製品の品質が損なわれないようにしなければならない。

【解 説】 (1) について 工場製品は、常設された工場で製造されるプレキャストコンクリート製品である。この章は、無筋および鉄筋コンクリート工場製品のほか、プレストレストコンクリート工場製品も含め、工場製品の製造および工場内の取扱い等で特に必要な事項の標準を示したものである。なお、プレキ

12章 工場製品



12.2 コンクリートの品質

12.2.1 一般

工場製品に用いるコンクリートは、品質のばらつきが少なく、所要の強度等、硬化後のコンクリートの品質を満足するものでなければならない。

【解 説】 工場製品は促進養生によって早期に脱型し、工場内の移動や工事現場への運搬を行うことが多い。また、杭や矢板のように施工中に大きな衝撃力を受けたり、局所的な集中荷重を受けたりするものもある。さらに、海岸地域等の腐食環境や、その他の厳しい気象条件下で用いられる場合もある。したがって、工場製品におけるコンクリートは、その種類と用途に応じた強度等、所要の硬化後のコンクリートの品質を満足する必要がある。なお、工場製品に用いられている鋼材の腐食を防止するため、コンクリート中に含まれる塩化物イオンの総量は、[施工編：施工標準]（4章 配合設計）4.3.3の解説によるものとする。無筋コンクリートの工場製品の場合には、塩化物イオンの総量は一般に 0.6 kg/m^3 以下とする。

蒸気養生と耐久性に関する特性値



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY

[設計編：本編] 5章（材料）

5.4.12 水分浸透速度係数

5.4.13 中性化速度係数

5.4.15 凍結融解試験における相対動弾性係数

プレキャストコンクリートの蒸気養生は、硬化後のコンクリートの物性を大きく変化させることがあるため留意が必要である。

5.4.14 塩化物イオン拡散係数

水セメント比と設計耐用年数の関数としてコンクリートの塩化物イオン拡散係数を算定する関係式が、[設計編：標準] 2編3.1.4.2に示されている。これらの式は、過去の実験結果に基づいて求められたものであるが、標準的な材料や施工方法を用いる場合には、式（解 3.1.9）～（解 3.1.12）を参考にして、拡散係数の特性値を求めてよい。ただし、蒸気養生を行うプレキャストコンクリートには適用できないため留意が必要である。

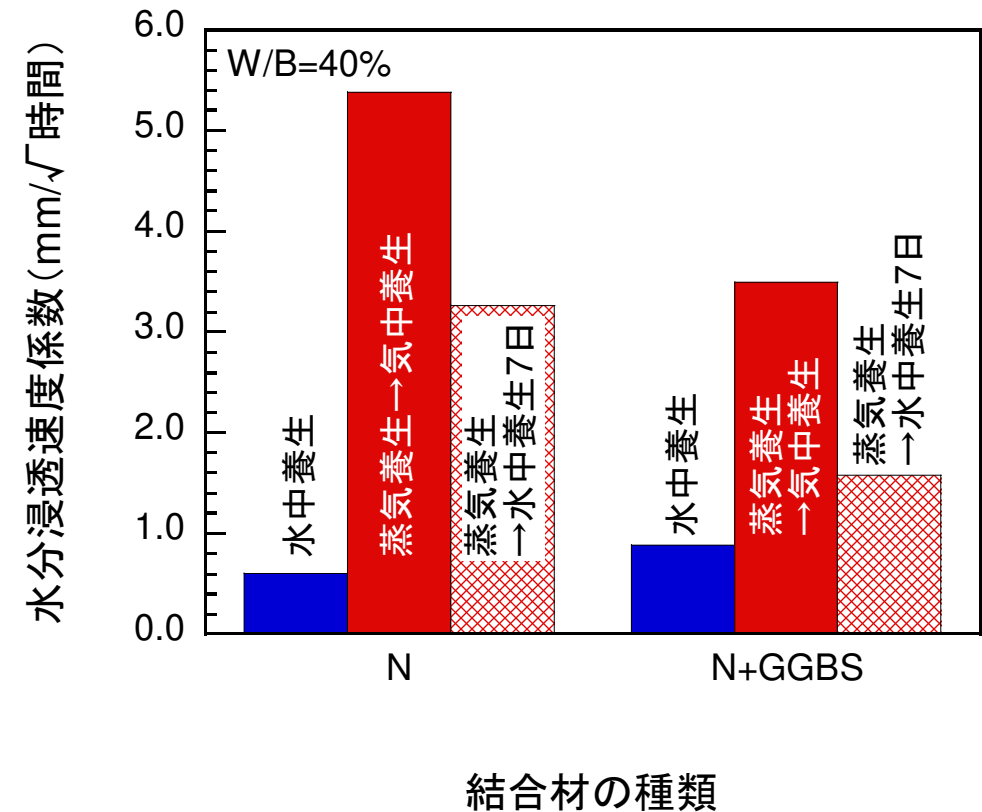
9.6.1 養生の目的および方法

(1) コンクリートは，（中略），コンクリートが所定の品質を確保できるように養生しなければならない。

この〔施工編：施工標準〕で扱う養生は，コンクリートの品質を確保するために実施される養生を対象としている。 早期に，型枠および支保工を解体すること，（中略）を目的に強度発現を促進する蒸気養生およびオートクレーブ養生は，工期を短縮するために実施されるものであって，**コンクリートの所要の品質を確保することを主目的としていない。**

蒸気養生および後養生の影響

【解説】 (1)について (中略)強度発現を促進する**蒸気養生およびオートクレーブ養生**は、工期を短縮するために実施されるものであって、**コンクリートの所要の品質を確保することを主目的としていない。**



(出典)王傑, 鈴木隆雅, 佐々木謙二: 蒸気養生コンクリートの水分浸透特性に関する基礎的検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.21, pp.125-130, 2021.10

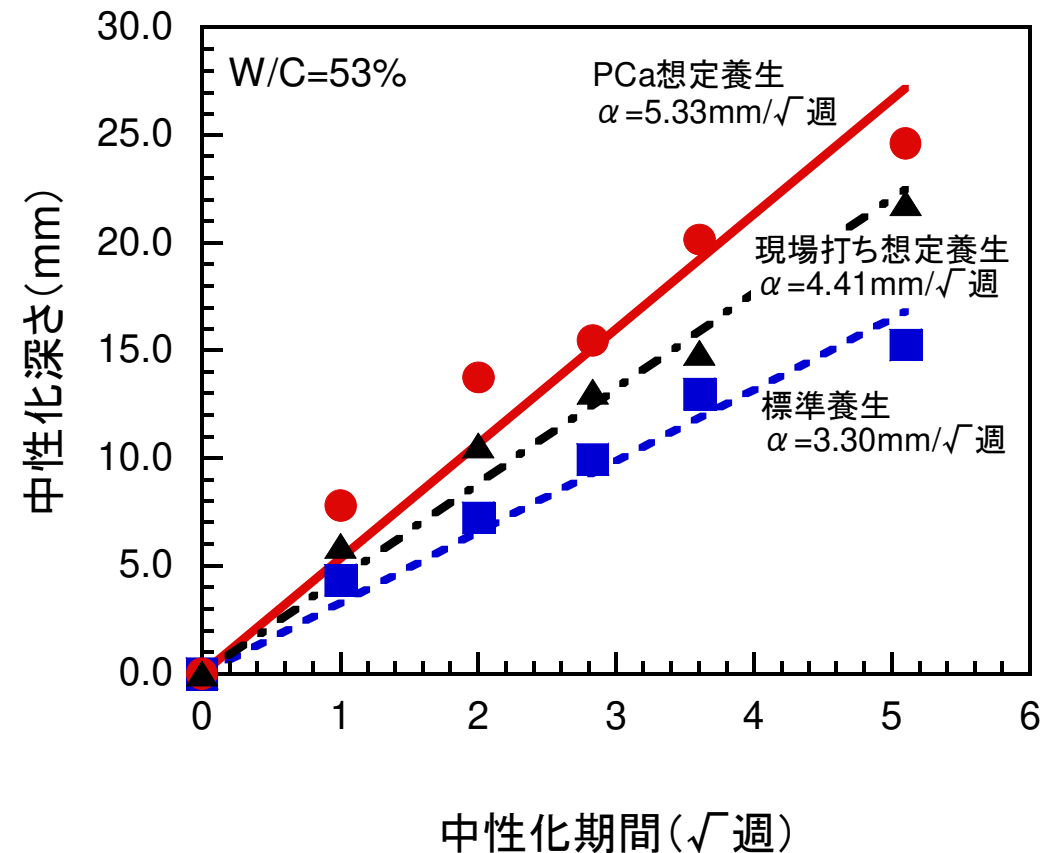
時間の平方根に比例

$$y = \alpha\sqrt{t}$$

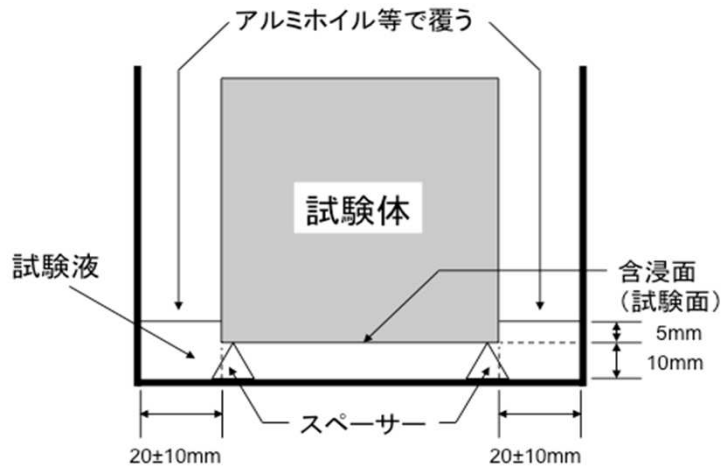
y : 中性化深さ

α : 中性化速度係数

t : 時間



スケーリング



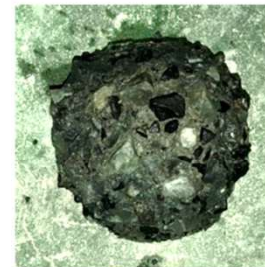
(1) 10/10 作製



(2) 10/11 作製



(3) 10/12 作製



(4) 10/13 作製



(5) 10/14 作製



(6) 10/16 作製



(7) 10/17 作製



(8) 10/18 作製



(9) 10/20 作製

- 蒸気養生は，工期を短縮するために実施されるもので，コンクリートの所要の品質を確保することを主目的としていない。
- プレキャストコンクリート製品が要求する性能を満足していれば，生産者に対してその製作方法は問わない。
- 示方書〔設計編〕に示される耐久性に関する特性値の予測式は，蒸気養生（湿潤養生でない養生）を行うコンクリートが適用の範囲外である。
- 生産者は，耐久性に関する品質の目標値を，製品と同一養生を行った供試体を用いて確認する型式検査を実施する必要がある。

3.1.3 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に対する照査

3.1.3.1 一般

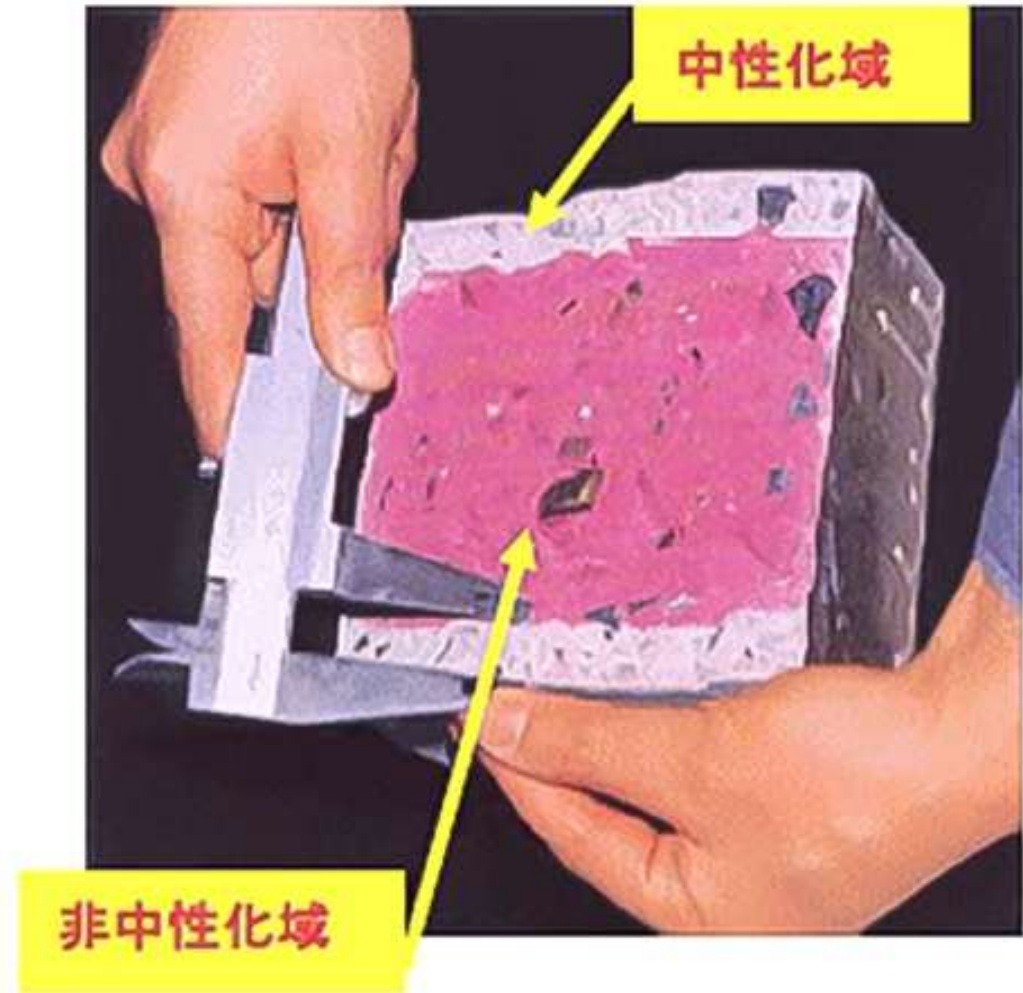
(1) 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に対して、鋼材腐食深さが設計耐用期間中に鋼材腐食深さの設計限界値に達しないことを確認することを、鋼材腐食に対する照査の原則とする。

(2) 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に対する照査を中性化深さをを用いて行う場合には、中性化深さが設計耐用期間中に鋼材腐食発生限界深さに達しないことを確認することで、鋼材腐食に対する照査としてよい。

中性化試験



温度: $20 \pm 1^\circ\text{C}$
相对湿度: $60 \pm 5\%$
 CO_2 濃度: $5.0 \pm 0.2\%$



鋼材腐食深さに対する照査



3.1.3.2 鋼材腐食深さに対する照査

鋼材腐食深さに対する照査は、鋼材腐食深さの設計応答値 s_d の、鋼材腐食深さの設計限界値 s_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行うことを原則とする。

$$\gamma_i \cdot s_d / s_{lim} \leq 1.0 \quad (3.1.1)$$

ここに、 γ_i : 構造物係数。一般に、1.0～1.1としてよい。

s_{lim} : 鋼材腐食深さの設計限界値 (mm)。構造物の重要性、維持管理区分、照査の不確実性や信頼性等を考慮して適切に設定する。

s_d : 鋼材腐食深さの設計応答値 (mm)。一般に、式 (3.1.2) で求めてよい。

$$s_d = \gamma_w \cdot s_{dy} \cdot t \quad (3.1.2)$$

ここに、 γ_w : 鋼材腐食深さの設計応答値 s_d の不確実性を考慮した安全係数。一般に、1.0としてよい。

s_{dy} : 1年当りの鋼材腐食深さの応答値 (mm/年)。一般に、式 (3.1.3) で求めてよい。

t : 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に対する設計耐用年数 (年)。一般に、設計耐用年数100年を上限とする。

$$s_{dy} = 1.9 \cdot 10^{-4} \cdot F_w \cdot \exp(-0.068 \cdot (c - \Delta c_e)^2 / q_d^2) \quad (3.1.3)$$

ここに、 F_w : コンクリートへの水掛かりの程度によって鋼材腐食への影響度が異なることを考慮する係数。一般に1.0としてよい。

c : かぶり (mm)

Δc_e : かぶりの施工誤差 (mm)。

q_d : コンクリートの水分浸透速度係数の設計値 (mm/√時間)。一般に、式 (3.1.4) で求めてよい。

$$q_d = \gamma_c \cdot q_k \quad (3.1.4)$$

ここに、 γ_c : コンクリートの材料係数。一般に1.3とするのがよい。ただし、高流動コンクリートを用いる場合は1.1としてよい。

q_k : コンクリートの水分浸透速度係数の特性値 (mm/√時間)

なお、一般的な構造物の場合は、式 (解 3.1.1) より、鋼材腐食深さの設計限界値を算定してよい。

$$s_{lim} = 3.81 \times 10^{-4} \cdot (c - \Delta c_e) \quad (\text{mm}) \quad (\text{解 3.1.1})$$

ただし、 $(c - \Delta c_e) > 35\text{mm}$ の場合は $s_{lim} = 1.33 \times 10^{-2}$ (mm) とする。

鋼材腐食深さに対する照査



解説 表 6.4.2 水分浸透速度係数の特性値の目安

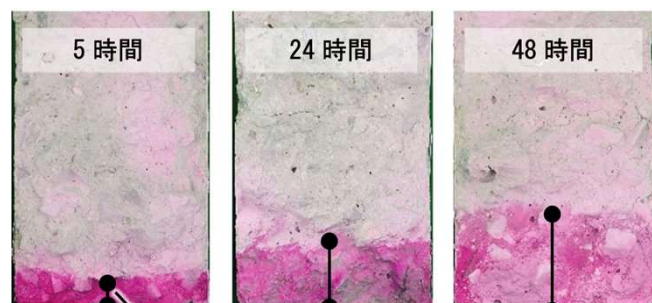
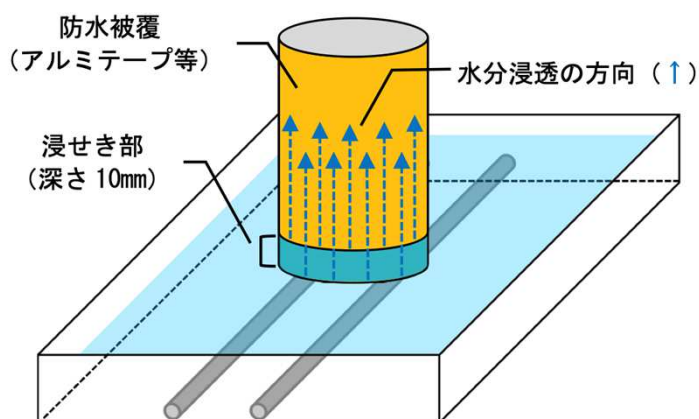
設計耐用期間	プレキャストコンクリート製品の最小かぶり						
	20mm	25mm	30mm	35mm	40mm	45mm	50mm
50 年	7.1	16.4	要求しない				
100 年	3.9	5.6	7.7	10.4	11.9	13.4	14.9

※表中の数値は水分浸透速度係数 (mm/\sqrt{hour})

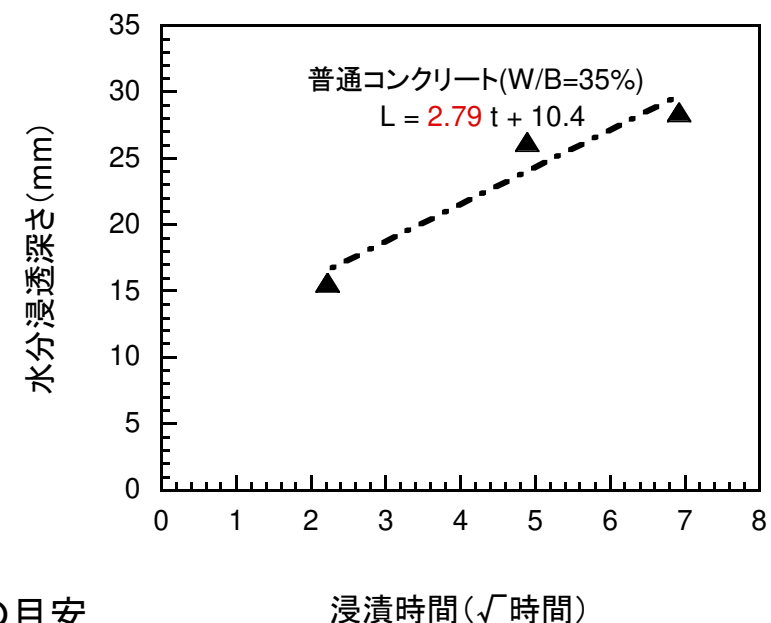
水分浸透速度係数



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY



水分浸透深さ
(現像剤により着色が生じた深さ)



製品カタログや技術資料等の
試験値との比較に用いる値

解説 表 6. 4. 2 水分浸透速度係数の特性値の目安

設計耐用期間	プレキャストコンクリート製品の最小かぶり						
	20mm	25mm	30mm	35mm	40mm	45mm	50mm
50 年	7.1	16.4	要求しない				
100 年	3.9	5.6	7.7	10.4	11.9	13.4	14.9

※表中の数値は水分浸透速度係数 (mm/\sqrt{hour})

プレキャストコンクリート製品の品質の確認

解説 表 6.4.2 水分浸透速度係数の上限値の目安

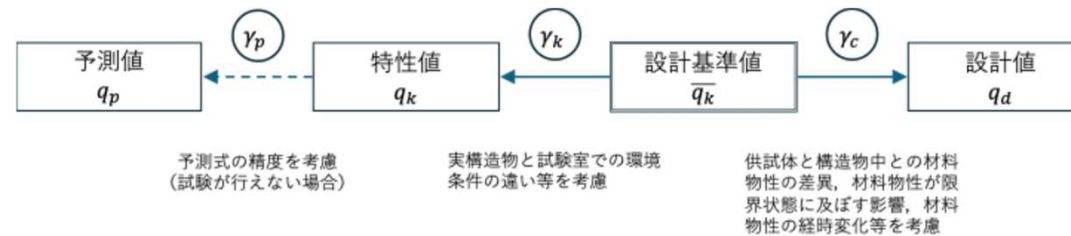
製品カタログや技術資料等の
試験値との比較に用いる値

設計耐用期間	プレキャストコンクリート製品の最小かぶり						
	20mm	25mm	30mm	35mm	40mm	45mm	50mm
50 年	7.1	16.4	要求しない				
100 年	3.9	5.6	7.7	10.4	11.9	13.4	14.9

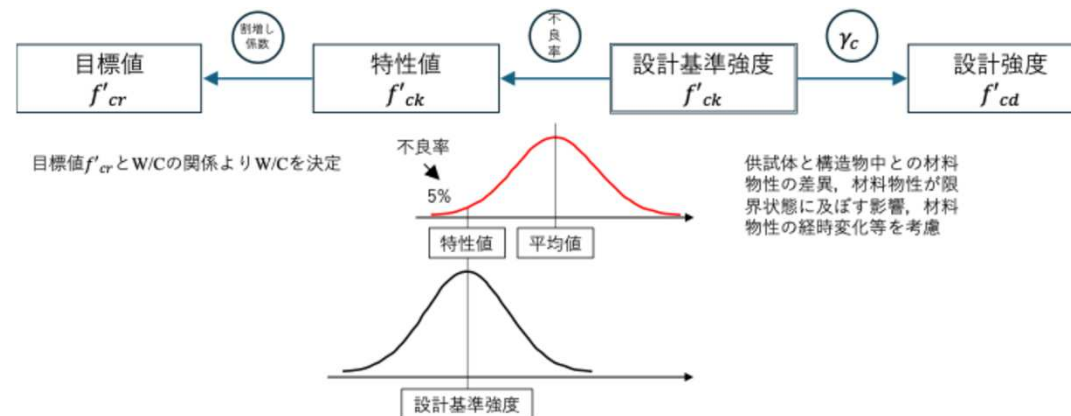
※表中の数値は水分浸透速度係数 (mm/√hr)

試験方法	供試体	1回の試験結果	頻度 (検査の1ロット)	判定
JSCE-G 582 「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法 (案)」	φ10×20cm 製品同一養生	複数の供試体による試験値の平均値 で示されることが望ましい ※水分浸透速度係数の場合、9本で1個の試験値	・半年を1回の検査ロットにする (目安) ・ 少なくとも3回 の試験結果を1ロットとし、平均値とする (5回以上の試験で構成されることを推奨)	$\gamma_p \frac{A_p}{A_k} \leq 1.0$ (γ _p =1.0)
			A _p : 試験の平均値	A _k : 上表の数値+3σ/√n

特性値



解説 図1.3.1 水分浸透速度係数の設計値，設計基準値，特性値および予測値の関係



解説 図1.3.2 圧縮強度の設計強度，設計基準強度および特性値の関係（片側下限値）



1. 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に対する照査とコンクリートに求める水分浸透速度係数の特性値の設定
2. 試験により水分浸透速度係数が求められない場合の特性値を保証する例
3. 試験により水分浸透速度係数の特性値を確認する例
4. **水分浸透試験による水分浸透速度係数の試験値により設計耐用期間を照査する例** ← 既に規格され製作しているJIS製品や各工業会の規格製品の耐用年数期間を求められることで、ゼネコン等に照査結果計算書を提出することをイメージした例

試験値から特性値が決められるのか？



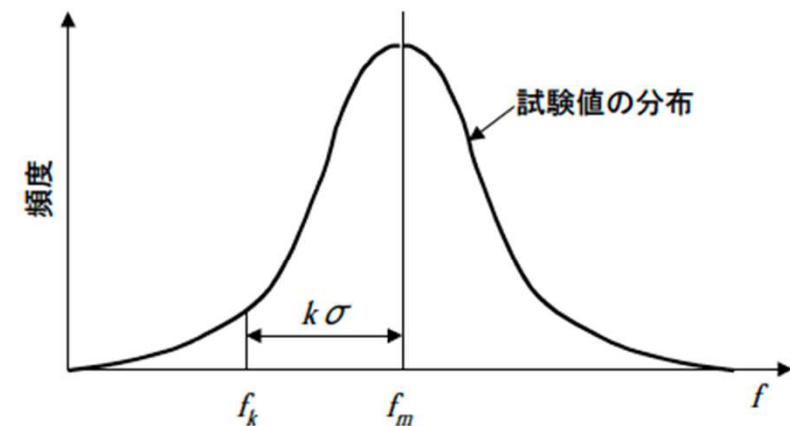
(2) について 材料強度の特性値 f_k は、一般に式 (解 5.2.1) により求めてよい。

$$f_k = f_m - k\sigma = f_m(1 - k\delta)$$

(解 5.2.1)

ここに、
 f_m : 試験値の平均値
 σ : 試験値の標準偏差
 δ : 試験値の変動係数
 k : 係数

係数 k は、特性値より小さい試験値が得られる確率と試験値の分布形より定まるものである。特性値を下回る確率を 5 % とし、分布形を正規分布とすると、係数 k は 1.645 となる (解説 図 5.2.1 参照)。



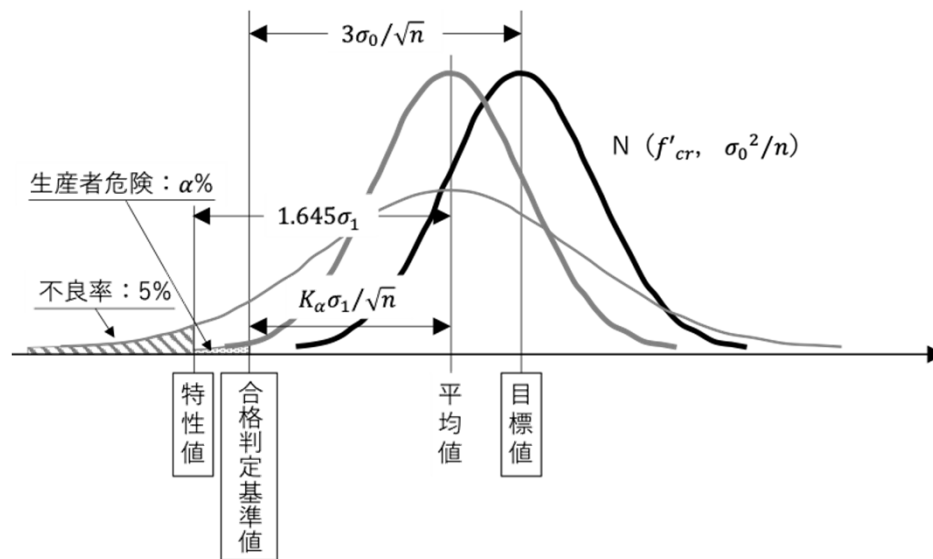
解説 図 5.2.1 材料強度の特性値

判定基準値



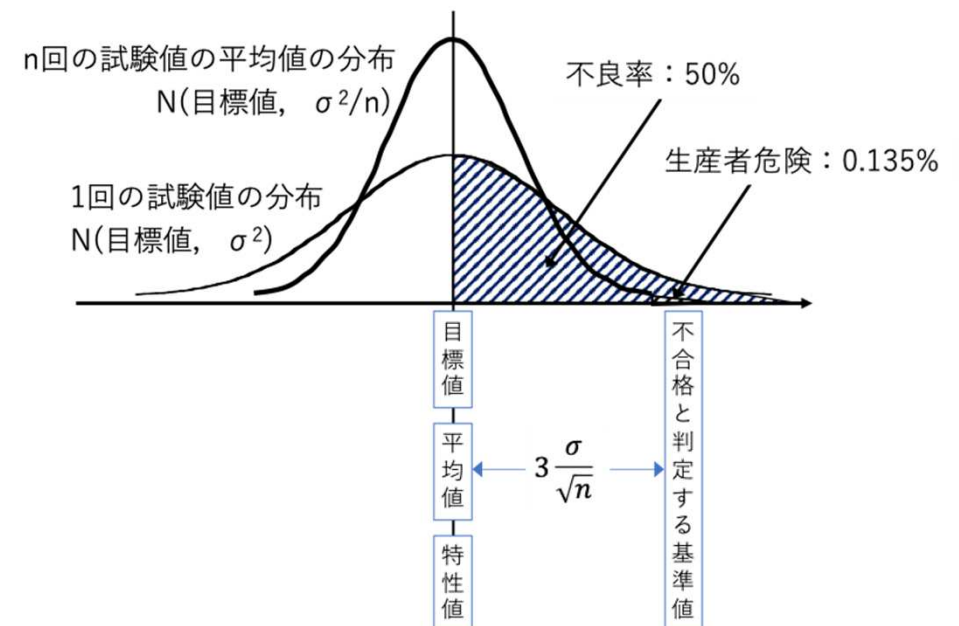
岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY

■ 合格判定基準値



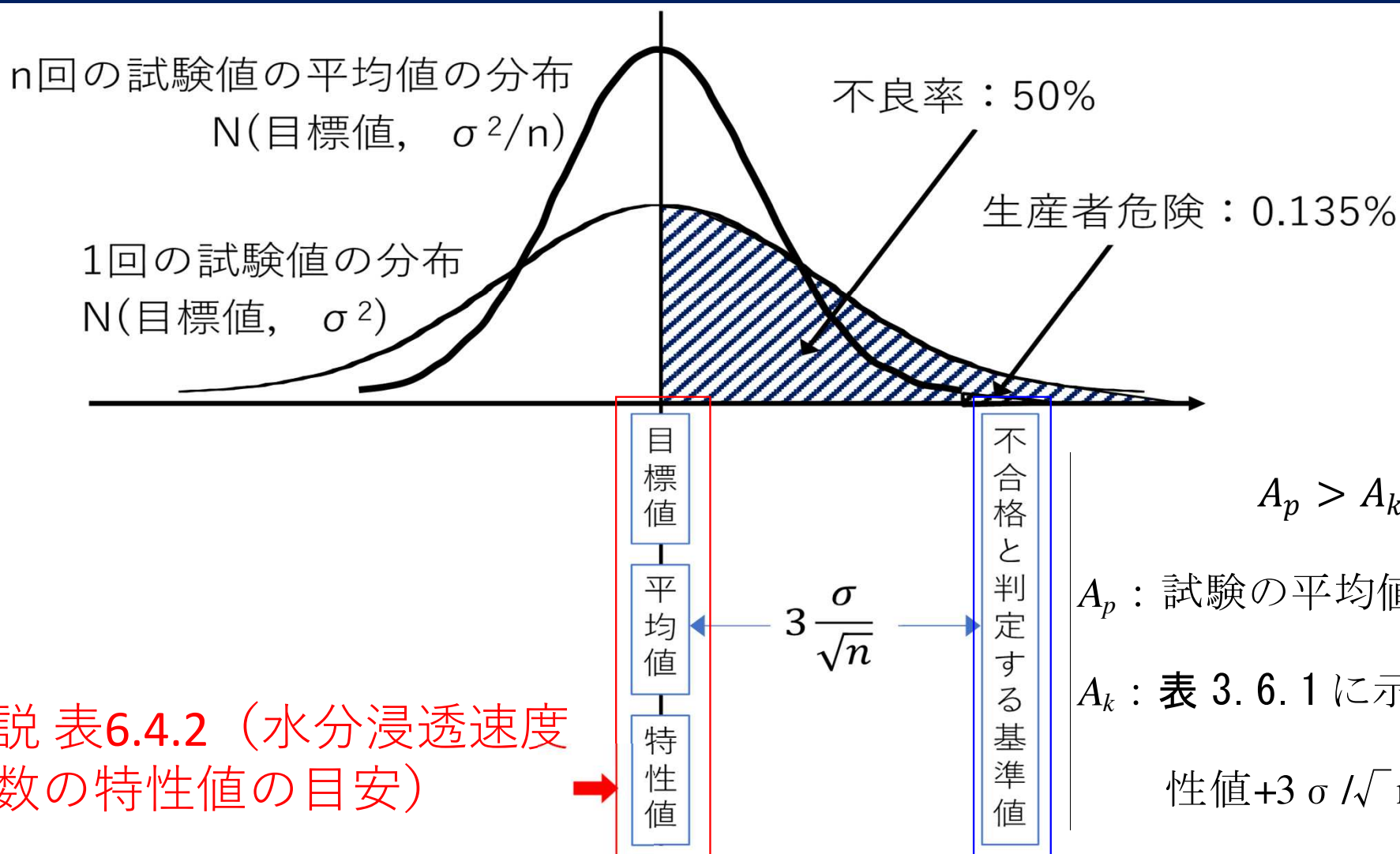
[施工標準] 「4.3.6 圧縮強度の目標値」より

■ 不合格と判定する基準値



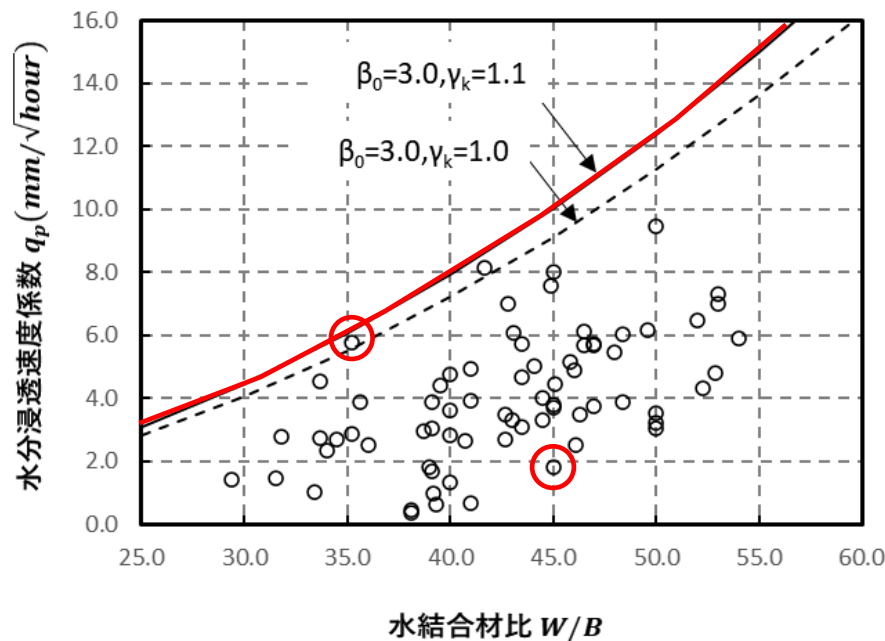
[施工標準] 「4.3.7 圧縮強度以外の特性値」より

不合格と判定する基準値



解説 表6.4.2 (水分浸透速度
係数の特性値の目安)

何の目的でデータを取られますか？



付録I 試験により水分浸透速度係数が求められない場合について

付.1 試験により水分浸透速度係数が求められない場合の予測式

試験により水分浸透速度係数を求めることができない場合のPCa製品の水分浸透速度係数は、次式により求めてもよい。

$$q_p = 5 \cdot (W/B)^2 \cdot \beta_0^2 \quad (W/B \leq 0.60) \quad (\text{付.1})$$

$$q_k = \gamma_k \cdot q_p = \gamma_k \cdot \gamma_p \cdot q_p \quad (\text{付.2})$$

ここに、 q_p ： 試験により水分浸透速度係数を求めることができない場合のコンクリートの水分浸透速度係数の予測値 (mm/ $\sqrt{\text{hour}}$)

W/B ： 水結合材比 (水セメント比)

β_0 ： コンクリートの養生と外部環境の影響を表す係数。 $\beta_0=3.0$ とする。

q_k ： コンクリートの水分浸透速度係数の設計基準値 (mm/ $\sqrt{\text{hour}}$)

γ_k ： 特性値の設定に関する安全係数。 $\gamma_k=1.0$ としてよい。

γ_p ： 材料物性の予測値の精度を考慮する安全係数。 $\gamma_p=1.1$ とする。

塩化物イオンの予測式



3.1.4 塩害環境下における鋼材腐食に対する照査

3.1.4.1 塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査

(1) 塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査は、鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計応答値 C_d の鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行うことを原則とする。

$$\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} \leq 1.0 \quad (3.1.9)$$

ここに、 γ_i : 一般に 1.0～1.1 とするのがよい。

C_{lim} : 耐久設計で設定する鋼材腐食発生限界濃度 (kg/m^3)。類似の構造物の実測結果や試験結果を参考に定めてよい。それらによらない場合、式 (3.1.10) ～ (3.1.13) を用いて定めてよい。ただし、 W/C の範囲は、0.30～0.55 とする。なお、凍結融解作用を受ける場合には、これらの値よりも小さな値とするのがよい。

(普通ポルトランドセメントを用いた場合)

$$C_{lim} = -3.0(W/C) + 3.4 \quad (3.1.10)$$

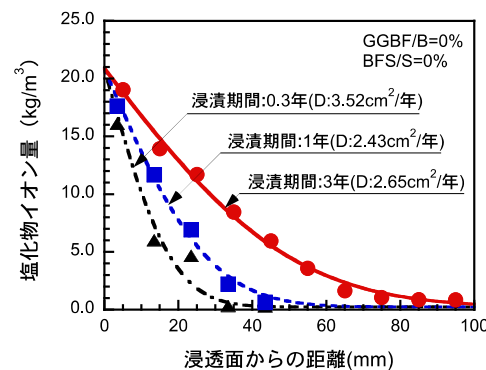
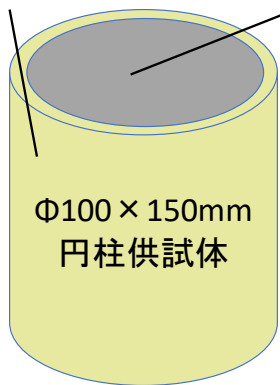
(高炉セメント B 種相当、フライアッシュセメント B 種相当を用いた場合)

$$C_{lim} = -2.6(W/C) + 3.1 \quad (3.1.11)$$

(低熱ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントを用いた場合)

浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法 (JSCE-G 572-2018)

エポキシ樹脂 コンクリート, モルタル



切断面の1面以外をエポキシ樹脂でコーティング

質量パーセント濃度10%塩化ナトリウム水溶液に浸漬

塩水から取り出しスライス

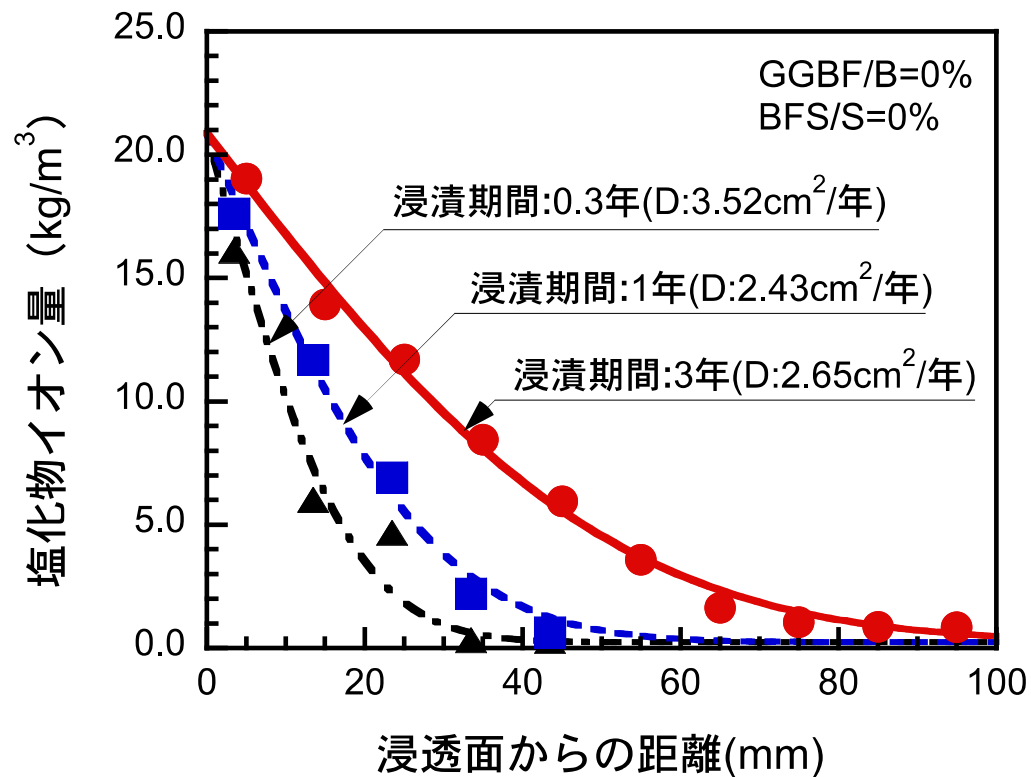
スライス片を乳鉢とミルで微粉砕

塩化物イオン濃度分布を回帰分析して表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数を算出

溶液中の塩化物イオン濃度を測定

硝酸で溶解し、塩化物イオンを抽出

浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法 (JSCE-G 572-2018)



$$C(x, t) = C_{a0} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\}$$

$C(x, t)$: 深さ x (cm), 時刻 t (年)における全塩化物イオン濃度(kg/m³)

C_{a0} : 表面における全塩化物イオン濃度(kg/m³)

D_{ap} : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数(cm²/年)

erf : 誤差関数

塩化物イオンの見掛けの拡散係数



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY

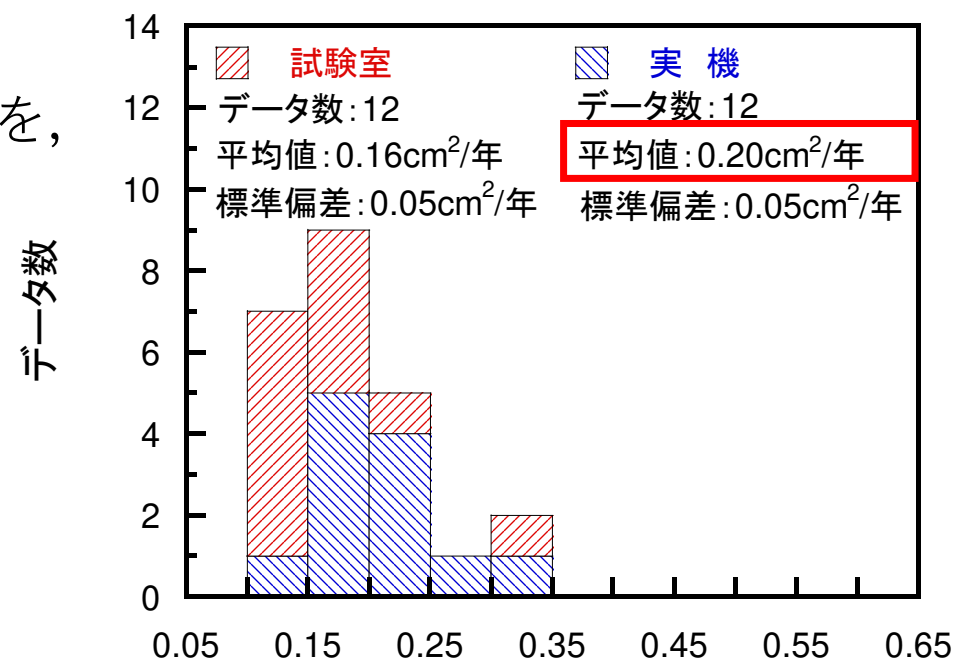
☞ 蒸気養生を行って見掛けの拡散係数を満足できる
プレキャストコンクリート製品はまずない。

→ 細骨材の全てに高炉スラグ細骨材（BFS）を、
結合材の一部に高炉スラグ微粉末を用い、
水結合材比が30% or 35%のコンクリートを
用いたプレキャスト製品（蒸気養生）でも、
見掛けの拡散係数の平均値は

0.20cm²/年程度

出典)

土木学会：高炉スラグ細骨材を用いたプレキャストコンクリート製品の設計・製造・施工指針（案），CL155，2019.3



塩化物イオンの見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

拡散係数 $0.20\text{cm}^2/\text{年}$ で照査に合格できるもの



表 10. 3. 2 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_{ap} ($\text{cm}^2/\text{年}$) (浸せき期間 1 年の場合)

C_0	設計耐用期間	コンクリートの最小かぶり						
		20mm	25mm	30mm	35mm	40mm	45mm	50mm
2.5kg/m^3	50 年	0.353	0.551	0.794	1.081	1.412	1.786	2.206
	100 年	0.253	0.395	0.569	0.775	1.012	1.281	1.581
4.5kg/m^3	50 年	0.101	0.158	0.228	0.310	0.406	0.513	0.634
	100 年	0.073	0.114	0.164	0.223	0.291	0.368	0.454
9.0kg/m^3	50 年	0.049	0.077	0.111	0.151	0.197	0.249	0.308
	100 年	0.035	0.055	0.079	0.108	0.141	0.179	0.221
13.0kg/m^3	50 年	0.038	0.059	0.085	0.116	0.152	0.192	0.237
	100 年	0.027	0.043	0.061	0.083	0.109	0.138	0.170

$C_0=2.5\text{kg/m}^3$ のとき、海岸からの距離 0.1km （飛来塩分が少ない地域）

$C_0=4.5\text{kg/m}^3$ のとき、海岸からの距離 0.1km （飛来塩分が多い地域）または汀線付近（飛来塩分が少ない地域）

$C_0=9.0\text{kg/m}^3$ のとき、汀線付近（飛来塩分が多い地域）

$C_0=13.0\text{kg/m}^3$ のとき、飛沫帯

2022年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕への質問と回答



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY

3.1.4.2 コンクリートの塩化物イオン拡散係数の設定	<p>材料物性の予測値の精度を考慮する安全係数r_pは、予測式の値、電気泳動法での値、実環境での暴露試験の値、実構造物の値を用いる場合は、いずれも1.0とされていますが、浸せき法を用いた室内実験から拡散係数の予測値を得た場合は、1.2を用いることになっています。浸せき法で得た拡散係数のみ、1.2倍大きい拡散係数を用いるようになりますが、実際の現象と比べると逆のように感じます。改訂資料の103ページの図3.5.7には、実環境暴露の結果と浸せき法の結果が示されています。浸せき法の結果が実環境暴露の結果よりも小さくなっているため、r_pを1.2にしたと書かれています。しかし、103ページの(5)補足事項では、「海洋暴露で得たD_{ap}は浸せき法の約1/3であった」とも書かれています。浸せき法で得られた結果の方が大きいという記載になっています。r_pは、浸せき法と実環境暴露で得られる拡散係数のうち、どちらが大きいものとして決められているのでしょうか。また、示方書に示される自然暴露実験とは、飛沫帯や汀線付近に置かれる供試体のことを指しているのでしょうか、それとも、海洋中に置かれる供試体のことを指されているのでしょうか。浸せき法で得た拡散係数を用いる場合のみ、r_pに1.2を用いる理由をご教示いただけますよう、お願いいたします。</p>	<p>改訂資料p.103の図3.5.7の右図で、上側の直線（切片が-1.117の直線）が実環境暴露、下側の直線（切片が-1.206の直線）が浸せき法のデータを回帰した直線になります。実環境暴露のほうが浸せき法の試験よりも同W/Cに対する拡散係数の中央値が大きくなっていることから、このことを補正し、いずれの手法からも同じ参照見掛けの拡散係数を予測するための安全係数として$\gamma_p=1.2$を設定しています。従って、浸せき法から得られたデータから暴露環境を想定する場合には、1.2倍となります。また、電気泳動法の場合には、$\rho_m=3.9$として式(解3.1.18)により$D_p(t)$を求めることになりますので、電気泳動法のデータから暴露環境を想定する場合には3.9倍して算出することになります（図3.5.8参照）。なお、図3.5.7、図3.5.8に記載の実環境暴露のデータは、2007年版コンクリート示方書の元データであり、飛沫帯、干満帯、海を含む様々な場所におかれた供試体の試験結果となっています。γ_pは、これら置かれた環境条件の差異を調整するための安全係数になります。元データの詳細は2002年制定示方書の改訂資料をご参照ください。また、3.1.4.2(ii)にて自然暴露実験を行う場合、設計する構造物が置かれる自然環境と類似し、同様な作用を受けると考えられる環境にて実験を実施することとなります。</p>
3.1.4 塩害環境下における鋼材腐食照査	<p>2022年の示方書より、蒸気養生を行う場合は製品と同一養生した試験で特性値を定めると書かれています。耐久性設計で用いる鋼材腐食発生限界濃度も、特性値と同じように扱わないといけなのではないでしょうか。もしそうでしたら、164ページに書かれている（3、1、10）から（3、1、14）の式は使えないのでしょうか。これらの式が使えないなら、試験によって鋼材腐食発生限界濃度を求めないといけなくなります。鋼材腐食発生限界濃度を求める試験方法を教えていただきたく存じます。</p>	<p>3.1.4.1(1)の解説に記載の通り、鋼材腐食発生限界濃度はコンクリート中の細孔溶液の組成（塩化物イオンと水酸化物イオンの濃度比）の影響を受けますが、示方書では、このことを実用的に考慮した式が採用されています。よって、蒸気養生を行う場合でも、細孔溶液の組成が大きく変化しないと考えられれば、示方書の式をそのまま使用できることとなります。なお、示方書における鋼材腐食発生限界濃度の設定については、2012年制定示方書の改訂資料もご参照ください。</p>

https://www.jsce.or.jp/committee/concrete/QandA/2022_2023Q&A_4.pdf