

3. 建築用高強度コンクリートの JIS 規格化に関する検討

3.1 高強度コンクリートの JIS 化

検討委員会での検討結果を基に、高強度コンクリートの日本工業規格の立案に係わる方向性として次の2つの案を提案し、その問題点を整理した。

3.1.1 第1案

[概要]

現行の JIS A 5308 のコンクリートの種類において「高強度コンクリート」の呼び強度の最大値を 60 から 80 程度まで拡張する。

[利点]

改正が最小限の作業で済む。

[問題点]

建築基準法で要求しているコンクリート強度は構造体における圧縮強度であり、告示によって現場水中養生した供試体の材齢 28 日の圧縮強度または構造体から切り取ったコア供試体の材齢 91 日の圧縮強度が設計基準強度以上であることが要求されている。通常の強度レベルのコンクリートでは、構造体コンクリート強度として現場水中養生 28 日強度でもコア 91 日強度でも問題はないが、高強度コンクリートでは現場水中養生 28 日強度は、構造体中で生じる材齢初期の高温履歴などの養生条件とは乖離した養生条件であるため、これを構造体コンクリート強度の評価に用いるのは不适当であり、現場水中養生が適用できる範囲を法令で規定する必要がある（本研究の課題）。

一方、JIS A 5308 は標準養生した供試体の呼び強度を基準としており、呼び強度と設計基準強度との関係を新たに規定する必要がある。現在は、設計基準強度と呼び強度の関係は JASS 5 に拠っており、標準養生した供試体の材齢 28 日の圧縮強度とコア供試体の材齢 91 日の圧縮強度との差を構造体強度補正值（S 値）とし、設計基準強度に S 値を加えた調合管理強度を呼び強度としている。荷卸し地点で、標準養生した供試体の圧縮強度を保証している現行の JIS A 5308 の中で S 値を規定することは馴染まない。

3.1.2 第2案

[概要]

新たに「建築用高強度コンクリート」（仮称）の JIS を制定する。

[利点]

圧縮強度の基準値として設計基準強度、S 値を規定することができ、建築基準法の体系とも整合することが出来る。

[問題点]

S 値はセメント種類、セメント製造者、強度、部材寸法によって異なり、一律に規定することは困難である。

レディーミクストコンクリート工場に2つの JIS の認証を取得させ、保持させることになり、負担が大きい。また、原案作成団体として全国生コンクリート工業組合連合会以外の団体は困難であり、同連合会が2つの JIS を保持することは困難である。

第1案、第2案のいずれも高強度コンクリートの規定を JIS 化しても、規定に適合していることを認証する必要があり、JIS マーク認証制度を合わせて考える必要がある。現行の大臣認定では、一度取

得すれば、実際に製造することになった場合でも試験練りをするることによって出荷・対応が可能である。しかし、JIS マークの認証は発注がなくても維持し続けなければならない、負担が大きい。

3.2 高強度コンクリートの日本工業規格の追加の方針と課題

日本工業規格に鉄筋コンクリート造建築物に使用する呼び強度の強度値 60N/mm^2 を超える高強度コンクリートを追加する場合の課題として、建築基準法と JIS A 5308 とにおけるコンクリート強度の定義が異なることが上げられる。以下に両規定の整理をした。

3.2.1 建築基準法・同施行令・同告示におけるコンクリート強度

- a) 構造体で発現している強度である。
- b) 工事現場で採取し、現場水中養生した供試体の強度で表す。

建築では古くから現場水中養生した供試体を構造体コンクリートと見なしてきており、昭和 46 年の告示で規定された。

昭和 56 年の建築基準法および関連法令の改正で、構造体から切り取ったコア供試体に加えられた。

- c) 型わくの取り外しに必要な強度は、型わくを取り外したい材齢で試験し、型わくの取り外しに必要な強度に達していなければ型わくの存置期間を延長する。
- d) 設計基準強度に対しては、現場水中養生した供試体の材齢 28 日の圧縮強度の平均値またはコア供試体の材齢 91 日の圧縮強度の平均値が設計基準強度以上でなければならない。

設計基準強度に達していなければ、その強度を用いて再度構造計算を行い、安全であることを確かめなければならない。

3.2.2 建築基準法を補完する JASS 5 の規定

- a) 強度発現が遅い寒冷期において、JASS 5 では材齢 28 日において現場養生した供試体の強度が設計基準強度を満足するように予想平均気温による強度補正值を加えて調合を定めている。

材齢 28 日で設計基準強度を満足するように強度補正したコンクリートは、材齢 28 日以降の強度増進が大きく、最終的に到達する強度は設計基準強度を大きく上回る。そこで、昭和 56 年の建築基準法の改正で、コンクリートの強度が設計基準強度を満足しなければならない材齢を 91 日まで延長できるようにし、構造体から切り取ったコア供試体またはコア供試体と類似の強度特性を有する供試体として現場封かん養生した供試体を定めた。同様に、JASS 5 でも現場封かん養生した場合の強度補正值を定めた。

- b) 上記一般のコンクリートに比べて、マスコンクリートや高強度コンクリートは水和熱が大きく、構造体コンクリートの内部温度は現場環境の温度よりも高くなる。そのため、現場水中養生した供試体の強度とマスコンクリート等を使用した構造体のコンクリート強度が乖離する場合がある。

材齢の初期に高温履歴を受けたコンクリートは初期の強度発現は大きいですが、長期材齢において強度発現が停滞する傾向にあることが知られるようになった。

- c) JASS 5 でのマスコンクリートの場合、初期の材齢における高温履歴が長期材齢の強度発現に悪影響を及ぼさない範囲で、標準養生した供試体が設計基準強度を満足すれば構造体コンクリートも設計基準強度を満足しているとした。
- d) 高強度コンクリートについては、1986 年版の JASS 5 では、現場水中養生した供試体の材齢 28 日の圧縮強度が設計基準強度の 1.1 倍あれば構造体コンクリートも設計基準強度を満足しているとした。その後、日本建築センターにおける高層鉄筋コンクリート造建築物の技術評価や建設省

NewRC 総プロの技術開発を経て、標準養生した供試体の材齢 28 日強度と構造体から切り取ったコア供試体の材齢 91 日強度との差を構造体強度補正值 (S) とし、標準養生した供試体の強度が設計基準強度に S 値を加えた値以上であればよいこととした。この方法は、現在、建築基準法第 37 条に基づく国土交通大臣認定における性能評価で採用されており、JASS 5-2009 で一般のコンクリートにも適用できるようになった。しかし、国土交通省の公共建築工事標準仕様書では建築基準法に明確な規定がされていないという理由で採用されていない。

3.2.3 日本工業規格 JIS A 5308 におけるコンクリートの強度規定

- a) 荷卸し地点で採取し、標準養生した供試体の強度である。
当該コンクリートが持つポテンシャルの強度という位置づけである。
- b) 1978 年の改正後は呼び強度で発注することになっているが、改正前は設計基準強度（主として土木用）または設計基準強度に予想平均気温による強度の補正值を加えた指定強度（主として建築用）で発注した。いずれも標準養生した供試体の強度である。
- c) 1978 年の改正後は、品質として 3 回の試験結果の平均値が呼び強度以上であることと規定されている。しかし、改正前は設計基準強度または指定強度を下回る確率が 1/6 以下であることと規定しており、その規定は JASS 5 や土木学会のコンクリート標準示方書と同じであった。

以上のように、建築基準関連法令では構造体で発現しているコンクリート強度を対象にしているが、JIS A 5308 は荷卸し地点で採取して標準養生した供試体の強度を対象にしている。これら両者の強度は、JASS 5 の規定によって関係づけられて運用されているが、高強度コンクリートでは大臣認定によって認定された S 値が運用されている。

3.2.4 日本工業規格に呼び強度 60 を超える高強度コンクリートを追加する場合の方法

(1) 設計基準強度の規定または呼び強度の規定

- a) 現行の JIS A 5308 のコンクリートの種類「高強度コンクリート」の呼び強度を 50、55、60 から 80 あるいは 100 程度まで拡張する（第 1 案）。
- b) 新たに「建築用高強度コンクリート」の JIS を制定する（第 2 案）。

(2) 第 1 案の利点と問題点

- a) 現行の JIS A 5308 を拡張する案は、比較的早期に成案化が可能と考えられる。
- b) 呼び強度と設計基準強度との関係を告示等で規定することが必要になる。告示では、セメント種類、打込み時期、強度範囲別などによって S 値を定めるか、もしくは、S 値は JASS 5 による、などを定めた内容になると考えられる。
- c) 原案作成団体は全国生コンクリート工業組合連合会であり、建築工事と細部が異なる土木分野での考慮も必要となる。

3.3 コンクリート強度の合格判定基準

コンクリート強度の合否判定を計量基準型一回抜取検査方式とした場合の課題の検討を行った。

3.3.1 「椎名町アパート」の工事の品質管理における合格判定基準¹⁾

目標として合格させたい母集団と合格させたくない母集団を決める。

不良率 2.3 % ($F = F_c + 2\sigma$) が合格する確率を 95 % (生産者危険 5 %) 以上

不良率 21.2 % ($F = F_c + 0.8\sigma$) が不合格となる確率を 90 % (消費者危険 10 %) 以上

とし、これを満たすための試験方法と合格判定基準を定める。

試験回数は 6 回

合格判定基準は

$$X_6 \geq F_c + 1.32 Se$$

ただし、 X_6 は 6 回の試験結果の平均値

Se は σ の推定値 (標準偏差未知)

<解説>

母集団分布を正規分布とすると、標準偏差 σ が既知の場合は

$$2\sigma - 0.8\sigma = 1.2\sigma$$

95 % に対する正規偏差 1.645

90 % に対する正規偏差 1.282

N 回の試験の平均値の分布の標準偏差は σ/\sqrt{N}

$$1.2\sigma = (1.645 + 1.282) \sigma/\sqrt{N}$$

これより試験回数は $N = 5.95 \approx 6$ 回

合格判定基準は

$$(2 - 1.645/\sqrt{6}) \sigma = 1.328 \sigma$$

標準偏差未知の場合は、標準偏差の推定値 Se から σ を推定し、結果として

$$X_6 \geq F_c + 1.32 Se$$

となる。

参考文献

- 1) 梶田佳寛：建築基準法第 37 条に基づく指定建築材料の国土交通大臣認定と JIS A 5308 レディーミクストコンクリート、コンクリート工学年次大会 2015 (千葉) 生コンセミナー、2015.07

3.3.2 JIS A 5308 (レディーミクストコンクリート) の品質基準

品質基準は 3 回の試験結果の平均値が呼び強度以上であり、下式で表すことができる。

$$F = F_N + 1.73 \sigma$$

ここでは不良率が 4 % のコンクリートを 99.7 % 以上 (生産者危険 0.3 %) の確率で合格させることとし、不合格としたいコンクリートの不良率については定めていない。

試験回数が 3 回としているため、不合格としたい不良率とその合格率を決めることが可能である。

以上、標準養生強度から S 値を介して推定した構造体コンクリートの不良率を想定することが可能か否かは、現時点では明確には確認することができない。

3.4 建築用高強度コンクリート（案）と検討事項

これまでの検討結果を基に、現在考えられる建築用高強度コンクリートの日本工業規格(案)の内容と検討事項を以下に記す。

JISA 〇〇〇〇:〇〇〇〇

建築用高強度コンクリート High strength concrete for building

1. 序文

2. 適用範囲

この規格は、鉄筋コンクリート造建築物に用いる設計基準強度が 36 N/mm^2 を超え 80 N/mm^2 以下、または呼び強度が 45 N/mm^2 を超え 100 N/mm^2 以下の高強度コンクリートの材料、品質・調合及び製造に適用する。

3. 引用規格

下記に示す規格は、この規格に引用されることによって、この規格の規定の一部を構成する。これらの引用規格は、その最新版を適用する。

4. 用語

高強度コンクリート 設計基準強度が 36 N/mm^2 を超えるコンクリート、または呼び強度が 45 N/mm^2 を超えるコンクリート

5. コンクリートの種類

5.1 コンクリートの製造方法による種類

5.1.1 レディーミクストコンクリート

5.1.2 プレキャストコンクリート

5.1.3 工事現場練りコンクリート

5.2 発注方法による種類

5.2.1 設計コンクリート

コンクリートの設計基準強度と構造体強度補正値を指定して発注する

5.2.2 標準仕様コンクリート

呼び強度を指定して発注する

6. 高強度コンクリートの材料

6.1 セメント

セメントは、表-A に示す品質基準に適合するものを用いる。

【検討事項】 セメントの種類は、JIS 規格セメントのすべてを対象とすることが原則であると考えられるが、実績のあるセメントは、普通・中庸熱・低熱ポルトランドセメント、高炉セメントB種及びフライアッシュセメントB種に限定される。

品質基準については、比表面積及び圧縮強度を JIS 規格通りとするか、または JIS 規格より品質基準を上げるかの検討が必要。

6.2 骨材

骨材は、表-B～表-C に示す品質基準に適合するものを用いる。

骨材を混合して用いる場合は、粒度と塩化物量を除いて、混合前の品質が各々表-B～表-C に示す

品質基準に適合しなければならない。

【検討事項】 骨材の種類は、砂・砂利、碎石・砕砂に限定するか、または人工軽量骨材やスラグ骨材、再生骨材、回収骨材の使用を可能とするかの検討が必要。

密度、吸水率は JISA 5308 の附属書 A に規定する数値でよいか、あるいは JASS 5 の高強度コンクリートの規定のように品質基準を上げるかの検討が必要。

密度、吸水率が JISA 5308 の附属書 A の規定に適合しない骨材の扱いの検討が必要。

6.3 水

水は、JISA 5308「レディーミクストコンクリート」附属書 A に適合するものを用いる。ただし、回収水は用いない。

【検討事項】 回収水は用いないでよいか、スラッジ水は上澄水は使用を認めるか、骨材の種類は砂・砂利、碎石・砕砂に限定するか、人工軽量骨材やスラグ骨材、再生骨材、回収骨材などの使用をどこまで認めるか、などの検討が必要。

6.4 混和材料

混和材料は、コンクリート及び鋼材に有害な影響を及ぼすものであってはならない。

使用する混和材料は、購入者の承認を得なければならない。

フライアッシュ、膨張材、化学混和剤、防せい剤、高炉スラグ微粉末及びシリカフェームは、各々次ぎの規格に適合するものを用いる。

フライアッシュ JIS A 6201

膨張材 JIS A 6202

化学混和剤 JIS A 6204

防せい剤 JIS A 6205

高炉スラグ微粉末 JIS A 6206

シリカフェーム JIS A 6207

【検討事項】 高性能 AE 減水剤の使用が不可欠であり、高強度コンクリートを製造する上で高性能 AE 減水剤の選択が重要である。しかし、フレッシュコンクリートのスランプ、スランプフロー、空気量の調整方法（使用材料・組合せ、使用量）は製造会社によって異なるため、JIS の中でどのような規定・表記とするかの検討が必要。

7. 高強度コンクリートの品質・調合

7.1 圧縮強度

コンクリートから切り取ったコア供試体、またはこれに類する圧縮強度に関する特性を有する供試体について圧縮強度試験を行った場合に、材齢が 91 日の供試体の圧縮強度の平均値が設計基準強度の数値以上であることとする。

【検討事項】 告示の内容と同じであり、JIS 規格の中での表記方法の検討が必要。

部材から採取したコア供試体を用いての圧縮強度試験ではないが、部材中のコンクリートに要求される性能であり、建物の完成後にコア供試体を切り取って圧縮強度を調べることがあった場合には、必要な項目となる。

これに類する圧縮強度に関する特性を有する供試体とは、部材中のコンクリートと同じ温度履歴となる条件で養生した供試体を言い、部材内温度分布の積分値を部材寸法で割った平均値と同じ温度履歴となる方法で養生した供試体となる。温度管理された簡易断熱養生などの適用可否の検討が必要。

7.2 調合

調合管理強度は、式 a による。

$$F_m = F_c + mS_n \quad \dots \dots \dots \text{式 a}$$

ここに F_m :調合管理強度(N/mm²)

F_c :設計基準強度(N/mm²)

mS_n :標準養生した供試体の材齢 n 日における圧縮強度とコンクリートから切り取った
コア供試体の材齢 m 日における圧縮強度との差(N/mm²)

mS_n の値は、セメントの種類、コンクリートの予想最高温度の範囲に応じて表-D による。

表-D によらない場合は、購入者との協議による。

調合強度は、式 b 及び式 c を満足するように定める。

$$F \geq F_m + 1.73 \sigma \quad \dots \dots \dots \text{式 b}$$

$$F \geq 0.85 F_m + 3 \sigma \quad \dots \dots \dots \text{式 c}$$

ここに F :調合強度(N/mm²)

σ :コンクリート強度の標準偏差(N/mm²)

標準偏差は、レディーミクストコンクリート工場の実績による。実績がない場合は 0.1 F_m とする。

[検討事項] 調合管理強度は、JIS A 5308 の呼び強度に相当するものであり、規定が必要である。しかし、調合強度は JIS A 5308 における圧縮強度の品質基準を式で表したものであり、現行規定「3 回の試験結果の平均値は調合管理強度以上であり、1 回の試験結果は調合管理強度の 85 %以上でなければならない」と同様の規定とするか、もしくは他の判定基準を設けるかの検討が必要。

7.3 スランプ又はスランプフロー

スランプの目標値は 23 cm 以下、スランプフローの目標値は 65 cm 以下とする。

スランプ又はスランプフローの目標値は、購入者の指示による。

7.4 空気量

空気量の目標値は 1 %以上、4.5 %以下とする。

空気量の目標値は、購入者の指示による。

調合管理強度、スランプ又はスランプフロー、空気量の組合せは表-E による。

表の形式は、JIS A 5308 に準じる。

8. 製造

8.1 製造設備

JIS A 5308 に準じる。

8.2 材料の計量

JIS A 5308 に準じる。

8.3 練混ぜ

JIS A 5308 に準じる。

8.4 運搬

JIS A 5308 に準じる。

9. 品質管理

荷卸し検査の項目、試験方法、検査頻度、判定基準を規定

10. 報告

3.5 国土交通大臣認定申請のための実機実験データの分析

3.5.1 標準養生強度と構造体コンクリート強度（コア強度）の差 S 値

平成 12（2000）年以降に申請された高強度コンクリートの大臣認定の実験データを整理し、S 値に関する分析を行った。一般に S 値は、打込み季節別にコア強度又はセメント水比と S 値との関係で解析されることが多いが、日本国内の地域によって最高温度は必ずしも同じではない。そこで、水セメント比の範囲別に最高温度と S 値の関係を解析することとした。

標準養生した供試体の材齢 28 日の強度と材齢 91 日で部材から採取したコア供試体との差（ $_{28}S_{91}$ ）および標準養生した供試体の材齢 56 日の強度と材齢 91 日で部材から採取したコア供試体との差（ $_{56}S_{91}$ ）についてセメント種類ごと、メーカーごとに算出し、最高温度との関係を検討した。最高温度(t)と S 値(y)の関係から回帰式 ($y=At+B$) を求めた。係数 A および B の一覧を表 3.5.1(1) ～ (3) に示す。また、最高温度と S 値の関係、また S 値の分布（度数分布および累積度数分布）の例を図 3.5.1～図 3.5.36 に示す。セメントメーカーは、宇部三菱セメント、麻生ラファージュセメント、住友大阪セメント、太平洋セメント、トクヤマ、日鉄住金セメント株式会社（日鐵セメント）、電気化学工業、琉球セメントである。

表 3.5.1(1) 最高温度と $_{28}S_{91}$ の回帰式の係数一覧

セメント種別	コード	水セメント比の範囲	A	B	標準誤差	セメント種別	コード	水セメント比の範囲	A	B	標準誤差
普通	1	W/C ≤ 30	0.08	-0.60	4.08	中庸熱	1	W/C ≤ 30	-0.09	3.24	3.86
普通	1	30 < W/C ≤ 35	0.11	-3.39	3.34	中庸熱	1	30 < W/C ≤ 35	-0.07	1.78	2.16
普通	1	35 < W/C ≤ 40	0.17	-7.48	3.35	中庸熱	1	35 < W/C ≤ 40	-0.05	-1.40	4.32
普通	1	40 < W/C	0.12	-4.66	3.48	中庸熱	1	40 < W/C	0.00	-4.45	3.74
普通	2	W/C ≤ 30	0.08	0.24	2.24	中庸熱	3	W/C ≤ 30	-0.07	1.70	3.87
普通	2	30 < W/C ≤ 35	0.05	4.08	4.99	中庸熱	3	30 < W/C ≤ 35	-0.01	-3.51	4.52
普通	2	35 < W/C ≤ 40	0.14	-4.66	3.23	中庸熱	3	35 < W/C ≤ 40	0.10	-9.50	2.74
普通	2	40 < W/C	0.22	-10.52	2.65	中庸熱	3	40 < W/C	-0.03	-3.27	4.76
普通	3	W/C ≤ 30	0.06	3.94	4.04	中庸熱	4	W/C ≤ 30	0.00	-0.46	3.77
普通	3	30 < W/C ≤ 35	0.08	-1.45	2.96	中庸熱	4	30 < W/C ≤ 35	0.00	-1.51	2.99
普通	3	35 < W/C ≤ 40	0.15	-7.94	3.51	中庸熱	4	35 < W/C ≤ 40	0.02	-3.56	3.80
普通	3	40 < W/C	0.12	-4.85	2.62	中庸熱	4	40 < W/C	0.00	-3.25	3.79
普通	4	W/C ≤ 30	0.10	-1.18	4.05	中庸熱	5	W/C ≤ 30	0.03	-5.05	3.58
普通	4	30 < W/C ≤ 35	0.11	-2.32	2.89	中庸熱	5	30 < W/C ≤ 35	-0.04	0.16	4.00
普通	4	35 < W/C ≤ 40	0.17	-6.68	3.30	中庸熱	5	35 < W/C ≤ 40	0.08	-12.43	5.28
普通	4	40 < W/C	0.15	-5.44	3.74	中庸熱	5	40 < W/C	0.03	-7.64	4.71
普通	5	W/C ≤ 30	0.06	0.33	4.41	低熱	1	W/C ≤ 30	0.07	-12.02	6.35
普通	5	30 < W/C ≤ 35	-0.04	8.34	5.49	低熱	1	30 < W/C ≤ 35	0.03	-10.92	5.64
普通	5	35 < W/C ≤ 40	0.18	-9.92	2.77	低熱	1	35 < W/C ≤ 40	0.13	-15.63	7.17
普通	5	40 < W/C	0.10	-4.51	3.61	低熱	1	40 < W/C	-0.05	-7.69	5.51
普通	6	W/C ≤ 30	0.05	3.25	0.93	低熱	3	W/C ≤ 30	0.03	-7.94	6.10
普通	6	30 < W/C ≤ 35	0.10	-0.23	0.57	低熱	3	30 < W/C ≤ 35	0.10	-12.37	7.06
普通	6	35 < W/C ≤ 40	0.09	-1.50	1.16	低熱	3	35 < W/C ≤ 40	-0.10	-5.32	6.73
普通	6	40 < W/C	0.12	-4.56	3.01	低熱	3	40 < W/C	0.05	-10.34	6.42
普通	7	W/C ≤ 30	-0.02	5.94	1.56	低熱	4	W/C ≤ 30	-0.04	-2.44	4.41
普通	7	30 < W/C ≤ 35	-0.05	5.48	3.00	低熱	4	30 < W/C ≤ 35	-0.11	-1.89	4.22
普通	7	35 < W/C ≤ 40	-0.02	4.69	1.44	低熱	4	35 < W/C ≤ 40	0.04	-9.60	5.48
普通	7	40 < W/C	-0.01	3.26	1.69	低熱	4	40 < W/C	-0.01	-6.90	4.69
普通	8	W/C ≤ 30	1.28	-108.42	2.68	SF	1	W/C ≤ 30	0.04	1.34	1.98
普通	8	30 < W/C ≤ 35	1.04	-76.35	0.45	SF	1	30 < W/C ≤ 35	-0.06	3.03	2.27
普通	8	40 < W/C	-1.72	128.78	10.81	SF	1	35 < W/C ≤ 40	0.05	-3.52	1.21
普通	全体	全体	0.12	-3.71	3.55	低熱	全体	全体	0.03	-9.00	5.79
中庸熱	全体	全体	-0.004	-2.41	4.02	SF	全体	全体	-0.06	1.88	5.74

表 3.5.1(2) 最高温度と $_{28}S_{28}$ の回帰式の係数一覧

セメント種別	コード	水セメント比の範囲	A	B	標準誤差	セメント種別	コード	水セメント比の範囲	A	B	標準誤差
普通	1	W/C \leq 30	0.07	7.35	4.18	中庸熱	1	30<WC \leq 35	-0.14	14.53	3.66
普通	1	30<W/C \leq 35	0.06	7.60	4.91	中庸熱	1	35<WC \leq 40	-0.18	14.80	3.69
普通	1	35<W/C \leq 40	0.16	-0.70	3.51	中庸熱	1	40<WC	-0.14	12.12	4.62
普通	1	40<W/C	0.07	4.93	3.75	中庸熱	2	WC \leq 25	-0.18	18.48	5.34
普通	2	W/C \leq 30	0.00	14.61	3.68	中庸熱	2	25<WC \leq 30	0.00	6.57	3.14
普通	2	30<W/C \leq 35	-0.08	23.89	3.05	中庸熱	2	30<WC \leq 35	0.00	6.72	4.02
普通	2	35<W/C \leq 40	0.11	4.53	4.26	中庸熱	2	35<WC \leq 40	0.04	4.01	3.62
普通	2	40<W/C	0.04	5.80	8.68	中庸熱	2	40<WC	-0.04	7.67	4.31
普通	3	W/C \leq 30	0.05	10.34	4.59	中庸熱	3	WC \leq 25	-0.05	12.60	4.41
普通	3	30<W/C \leq 35	0.11	4.13	3.48	中庸熱	3	25<WC \leq 30	-0.12	17.18	3.89
普通	3	35<W/C \leq 40	0.10	3.54	4.02	中庸熱	3	30<WC \leq 35	-0.11	14.82	3.75
普通	3	40<W/C	0.12	1.48	3.80	中庸熱	3	35<WC \leq 40	-0.13	14.90	3.76
普通	4	W/C \leq 30	0.07	7.91	4.19	中庸熱	3	40<WC	-0.11	11.75	3.93
普通	4	30<W/C \leq 35	0.06	8.20	3.66	中庸熱	4	WC \leq 25	-0.29	25.55	0.95
普通	4	35<W/C \leq 40	0.13	2.71	3.82	中庸熱	4	25<WC \leq 30	-0.19	18.92	5.72
普通	4	40<W/C	0.07	4.86	3.44	中庸熱	4	30<WC \leq 35	-0.31	22.57	4.06
普通	5	W/C \leq 30	0.00	13.77	4.10	中庸熱	4	35<WC \leq 40	-0.39	28.49	1.36
普通	5	30<W/C \leq 35	-0.01	12.59	5.99	中庸熱	4	40<WC	-0.37	24.08	3.28
普通	5	35<W/C \leq 40	0.07	7.65	3.33	中庸熱	全体	全体	-0.06	10.64	4.38
普通	5	40<W/C	0.08	5.65	2.74	低熱	1	WC \leq 25	-0.45	34.42	5.24
普通	6	W/C \leq 30	0.06	8.61	1.39	低熱	1	25<WC \leq 30	-0.17	15.89	7.45
普通	6	30<W/C \leq 35	-0.03	12.04	0.99	低熱	1	30<WC \leq 35	-0.30	20.12	5.28
普通	6	35<W/C \leq 40	0.16	1.02	2.95	低熱	1	35<WC \leq 40	-0.22	15.98	6.29
普通	6	40<W/C	0.20	-2.06	3.14	低熱	1	40<WC	-0.25	13.94	7.01
普通	7	W/C \leq 30	0.00	11.23	2.89	低熱	3	WC \leq 25	-0.14	15.97	6.59
普通	7	30<W/C \leq 35	0.07	8.30	1.53	低熱	3	25<WC \leq 30	-0.28	22.40	7.42
普通	7	35<W/C \leq 40	-0.03	9.69	1.40	低熱	3	30<WC \leq 35	-0.28	19.56	6.60
普通	7	40<W/C	-0.04	9.86	2.19	低熱	3	35<WC \leq 40	-0.38	22.70	5.72
普通	8	W/C \leq 30	0.94	-64.49	0.83	低熱	3	40<WC	-0.28	17.45	6.44
普通	8	30<W/C \leq 35	-	-	-	低熱	4	WC \leq 25	-0.33	29.39	5.13
普通	8	35<W/C \leq 40	0.27	-3.31	0.21	低熱	4	25<WC \leq 30	-0.14	17.17	5.73
普通	8	40<W/C	-0.70	64.61	8.19	低熱	4	30<WC \leq 35	-0.44	28.49	5.15
普通	全体	全体	0.12	3.29	4.18	低熱	4	35<WC \leq 40	-0.27	19.00	5.87
中庸熱	1	WC \leq 25	-0.26	21.04	3.60	低熱	4	40<WC	-0.35	20.64	6.17
中庸熱	1	25<WC \leq 30	-0.10	14.00	3.87	低熱	全体	全体	-0.18	15.96	6.75

表 3.5.1(3) 最高温度と $_{56}S_{91}$ の回帰式の係数一覧

セメント種別	コード	水セメント比の範囲	A	B	標準誤差	セメント種別	コード	水セメント比の範囲	A	B	標準誤差
中庸熱	1	W/C \leq 25	-0.18	16.18	4.51	中庸熱	5	35<W/C \leq 40	0.04	1.18	4.87
中庸熱	1	25<W/C \leq 30	-0.05	8.71	3.90	中庸熱	5	40<W/C \leq 30	0.02	2.46	3.94
中庸熱	1	30<W/C \leq 35	-0.07	10.08	2.62	中庸熱	全体	全体	0.010	4.716	4.082
中庸熱	1	35<W/C \leq 40	-0.03	6.66	4.48	低熱	1	WC \leq 25	-0.10	9.62	4.85
中庸熱	1	40<W/C \leq 30	-0.02	4.80	3.60	低熱	1	25<WC \leq 30	-0.01	4.95	6.07
中庸熱	3	W/C \leq 25	-0.12	13.65	4.89	低熱	1	30<WC \leq 35	-0.05	5.25	4.85
中庸熱	3	25<W/C \leq 30	0.00	4.81	3.12	低熱	1	35<WC \leq 40	-0.01	4.92	6.15
中庸熱	3	30<W/C \leq 35	-0.01	5.02	4.27	低熱	1	40<WC	-0.11	6.25	4.79
中庸熱	3	35<W/C \leq 40	0.08	0.78	3.99	低熱	3	WC \leq 25	-0.18	16.79	4.03
中庸熱	3	40<W/C \leq 30	-0.04	4.65	4.53	低熱	3	25<WC \leq 30	0.01	3.37	6.69
中庸熱	4	W/C \leq 25	0.00	6.79	4.09	低熱	3	30<WC \leq 35	-0.04	5.81	5.94
中庸熱	4	25<W/C \leq 30	-0.04	9.92	4.13	低熱	3	35<WC \leq 40	-0.16	10.73	6.63
中庸熱	4	30<W/C \leq 35	0.00	6.08	3.74	低熱	3	40<WC	-0.07	6.53	5.77
中庸熱	4	35<W/C \leq 40	-0.02	7.31	4.04	低熱	4	WC \leq 25	-0.12	12.89	4.50
中庸熱	4	40<W/C \leq 30	-0.02	5.53	3.78	低熱	4	25<WC \leq 30	0.01	5.59	5.00
中庸熱	5	W/C \leq 25	-0.07	10.69	1.02	低熱	4	30<WC \leq 35	-0.10	9.56	4.45
中庸熱	5	25<W/C \leq 30	0.04	2.66	4.65	低熱	4	35<WC \leq 40	0.04	1.82	5.42
中庸熱	5	30<W/C \leq 35	-0.03	7.38	3.75	低熱	4	40<WC	-0.05	5.98	4.46
						低熱	全体	全体	-0.01	4.78	5.42

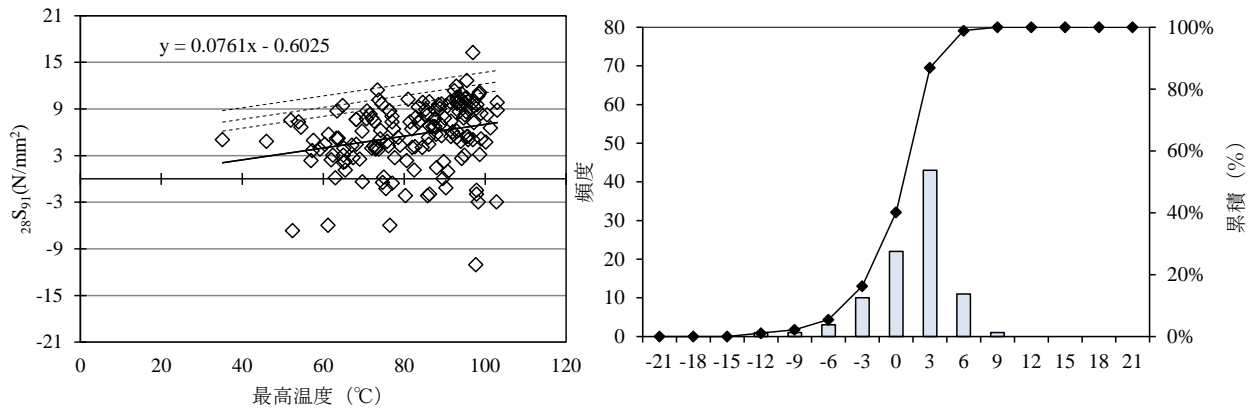


図 3.5.1 N-1 $W/C \leq 30$

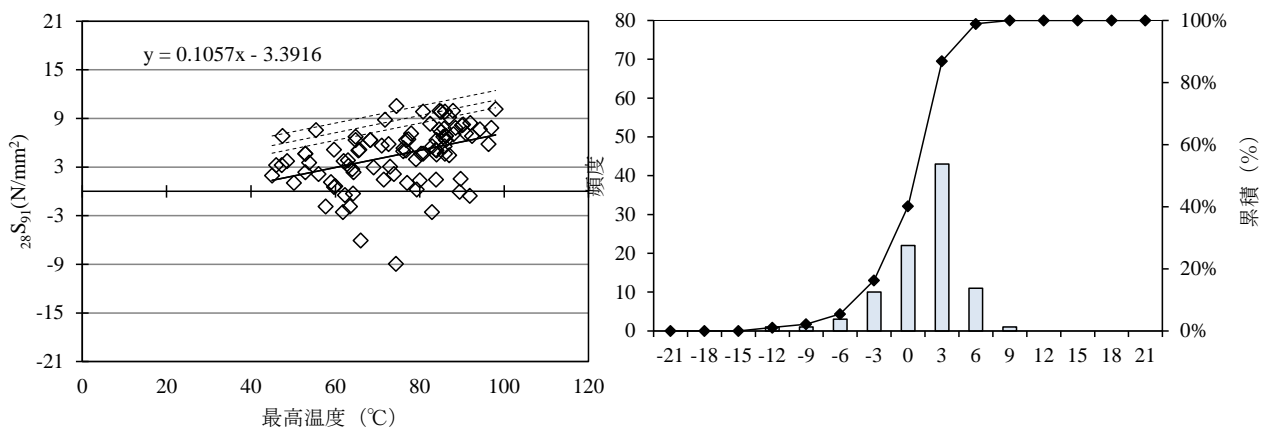


図 3.5.2 N-1 $30 < W/C \leq 35$

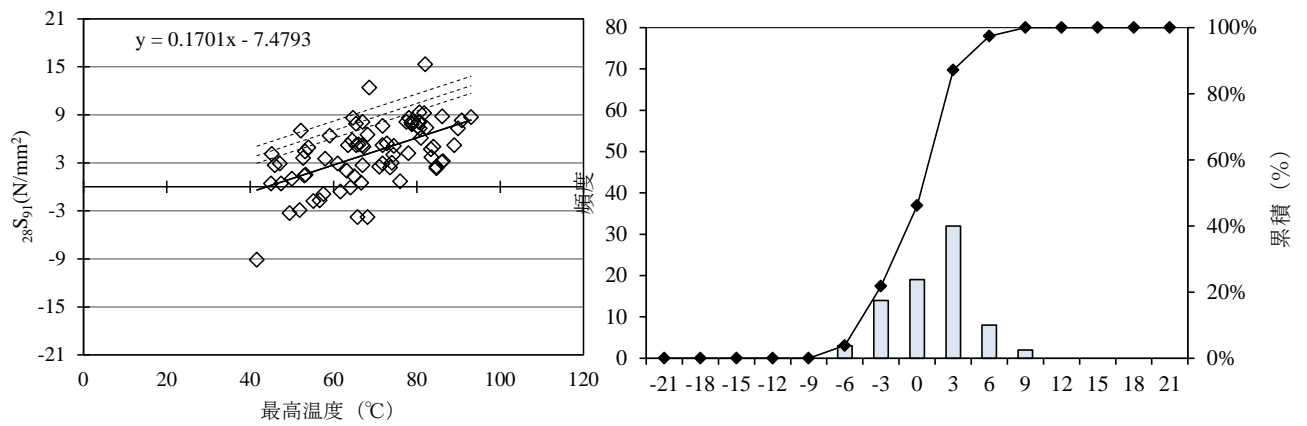


図 3.5.3 N-1 $35 < W/C \leq 40$

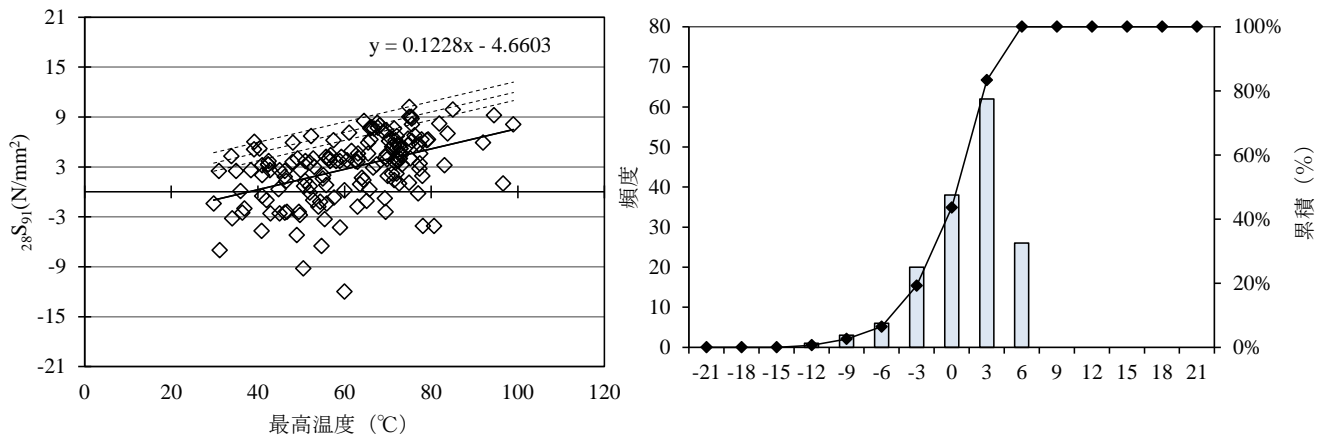


图 3.5.4 N-1 40 < W/C

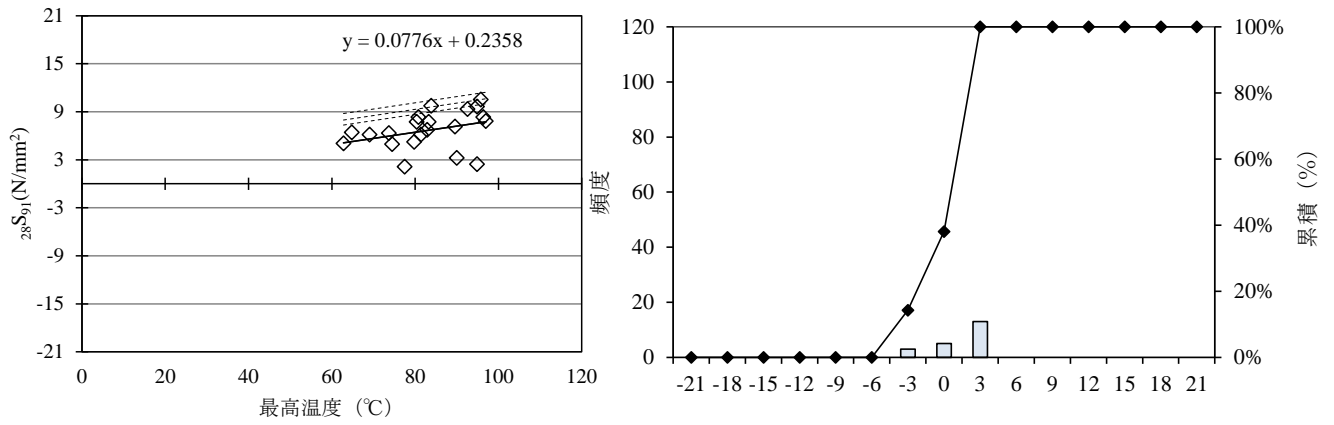


图 3.5.5 N-2 W/C ≤ 30

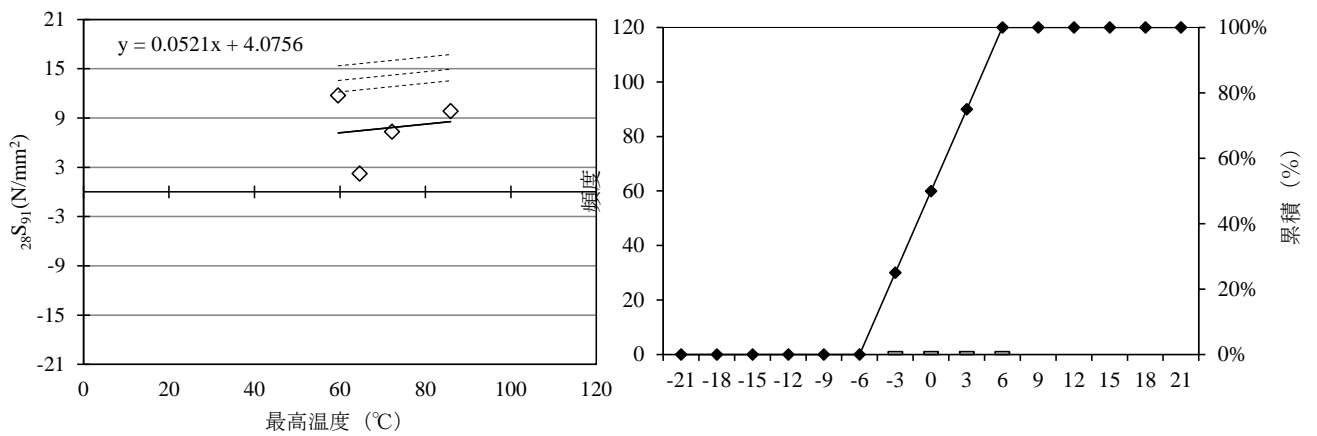


图 3.5.6 N-2 30 < W/C ≤ 35

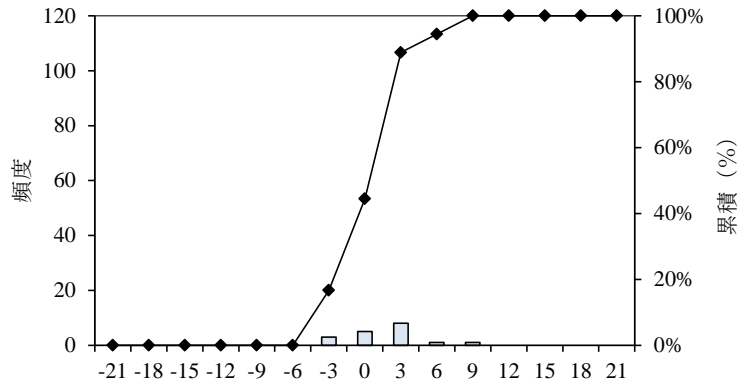
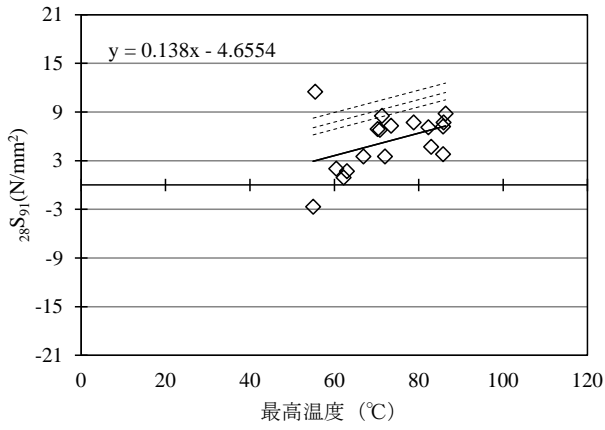


图 3.5.7 N-2 $35 < W/C \leq 40$

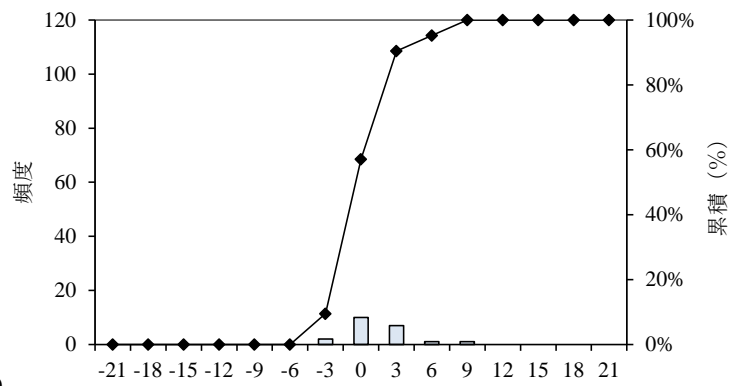
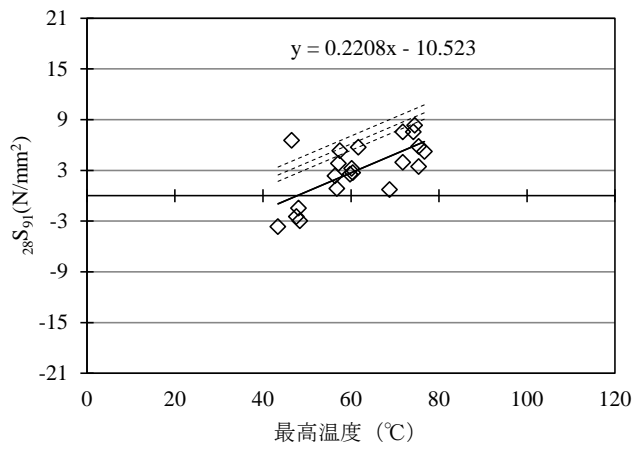


图 3.5.8 N-2 $40 < W/C$

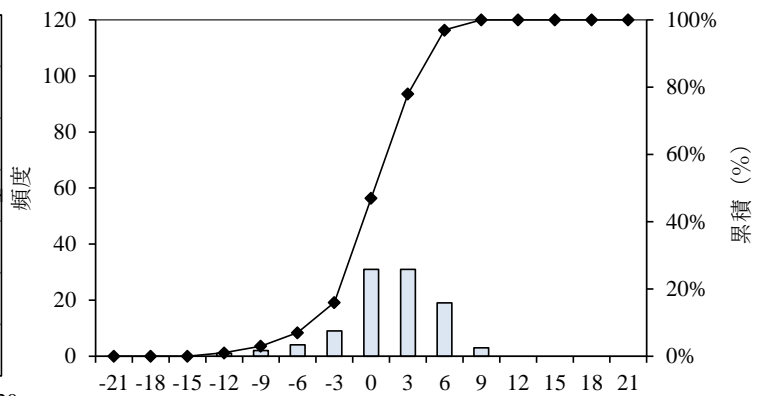
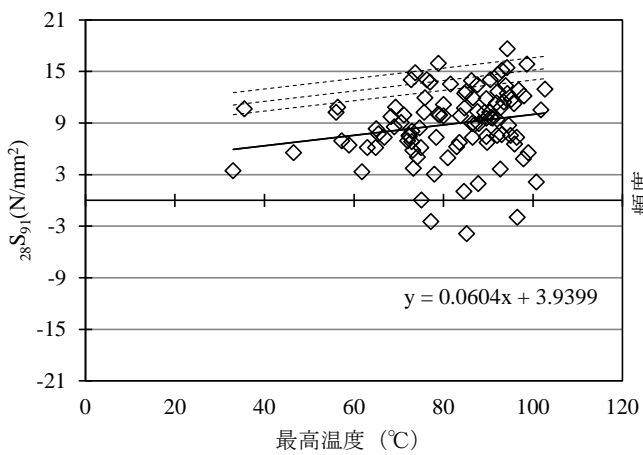


图 3.5.9 N-3 $W/C \leq 30$

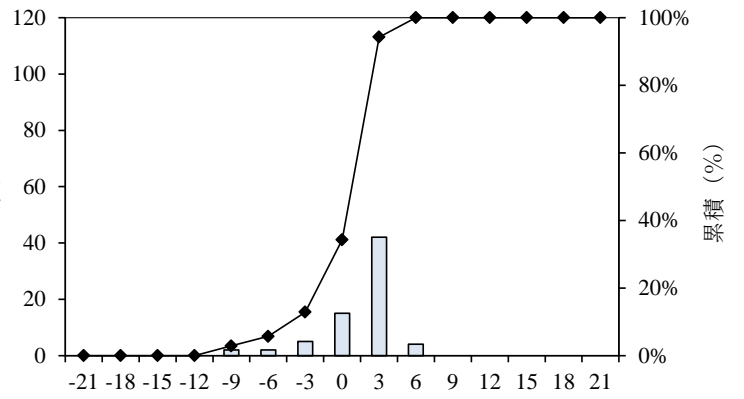
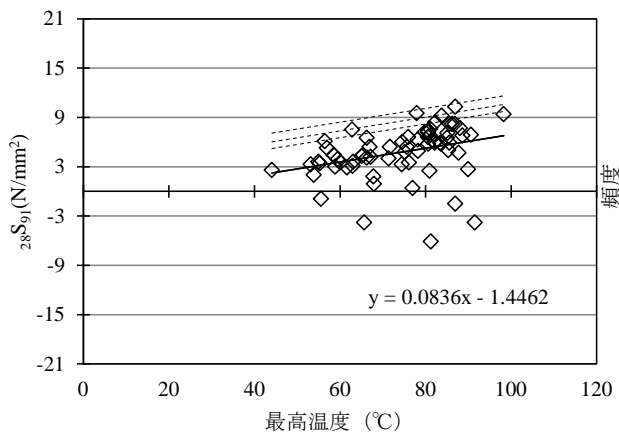


图 3.5.10 N-3 $30 < W/C \leq 35$

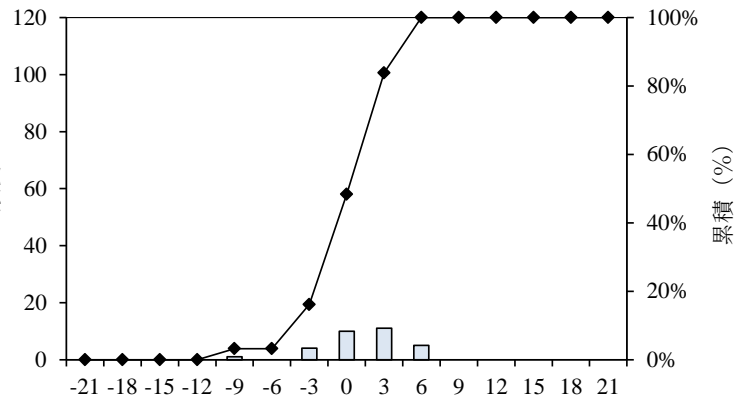
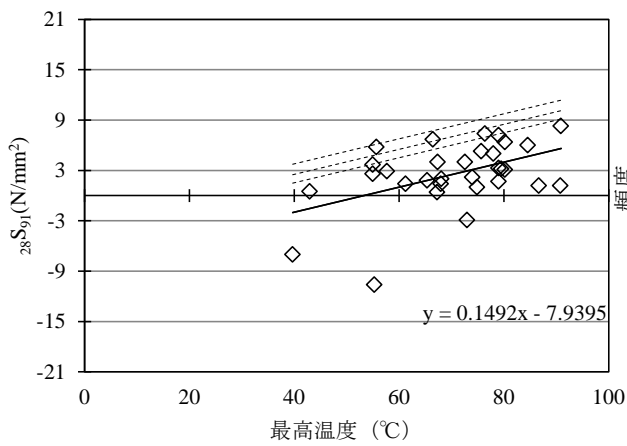


图 3.5.11 N-3 $35 < W/C \leq 40$

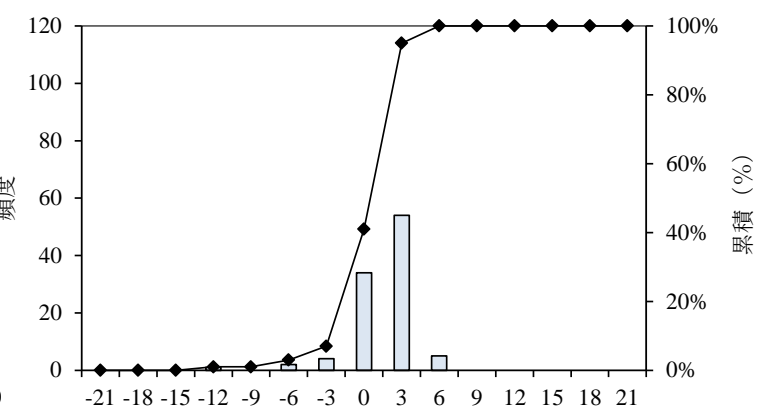
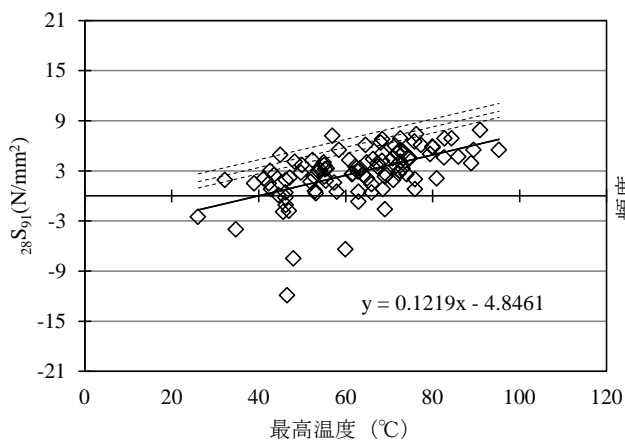


图 3.5.12 N-3 $40 < W/C$

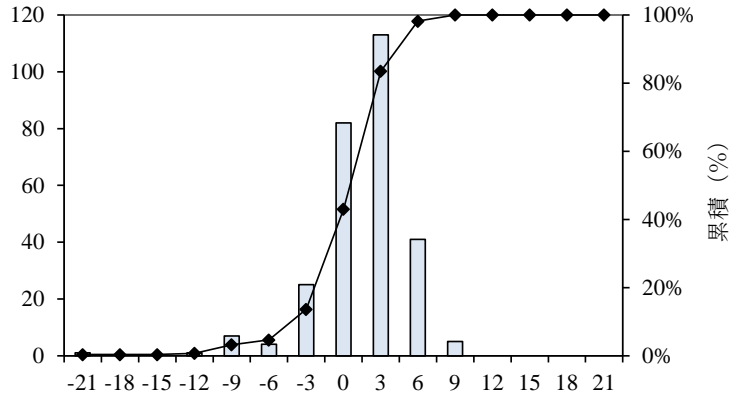
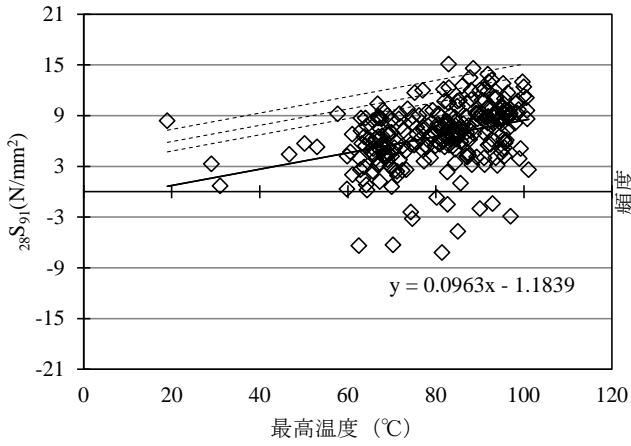


图 3.5.13 N-4 $W/C \leq 30$

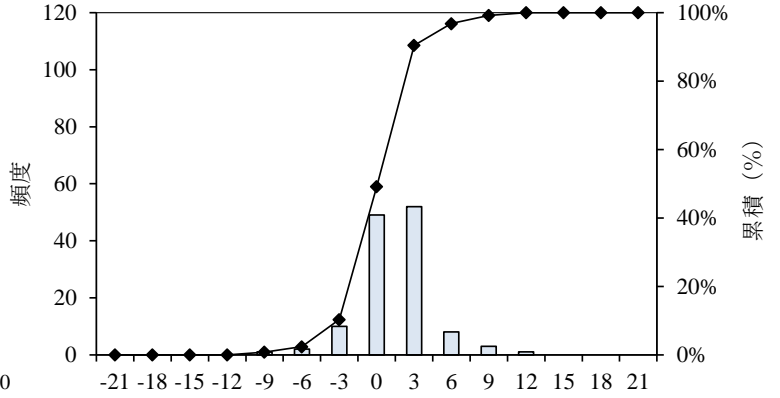
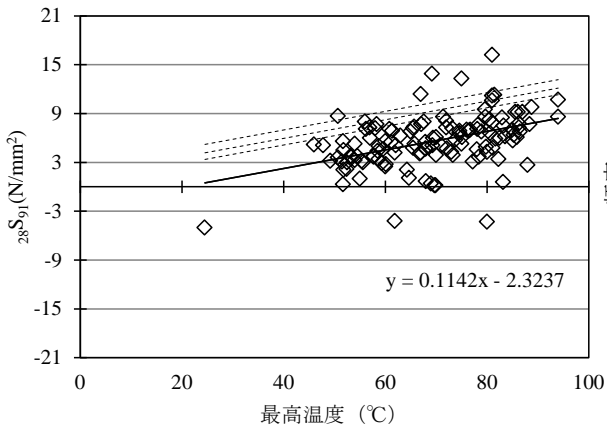


图 3.5.14 N-4 $30 < W/C \leq 35$

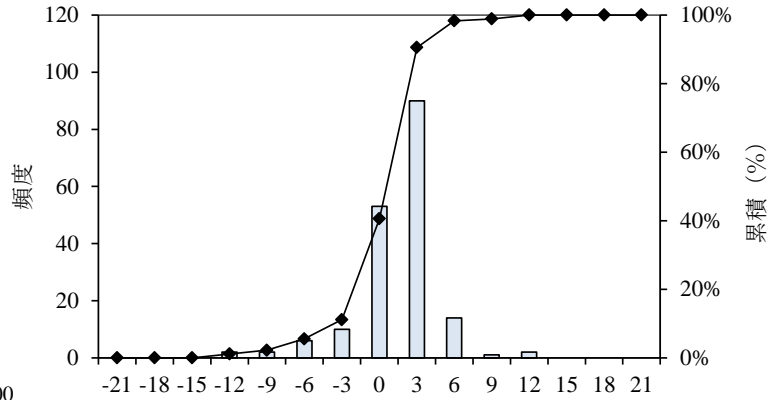
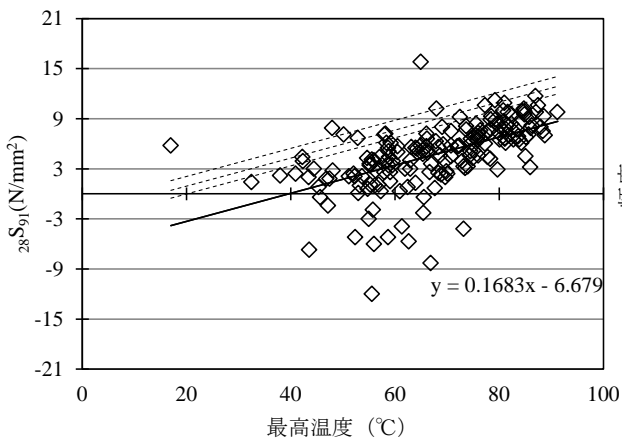


图 3.5.15 N-4 $35 < W/C \leq 40$

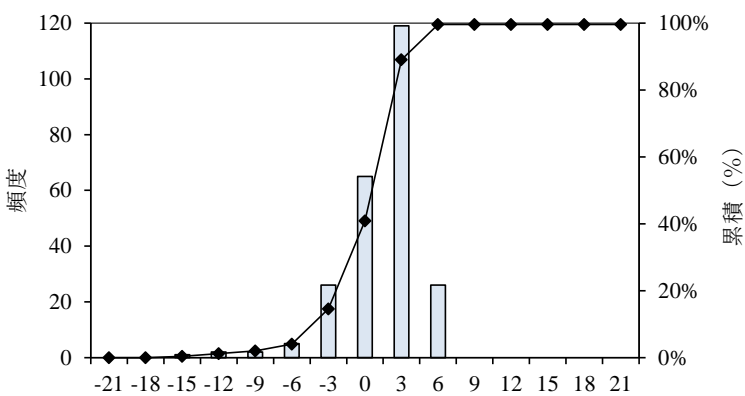
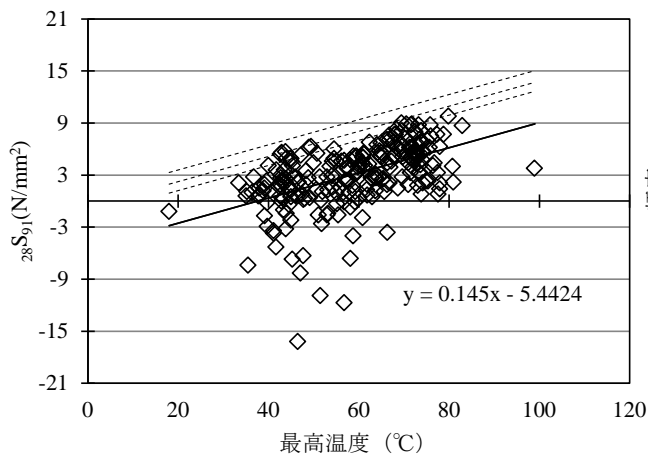


图 3.5.16 N-4 $40 < W/C$

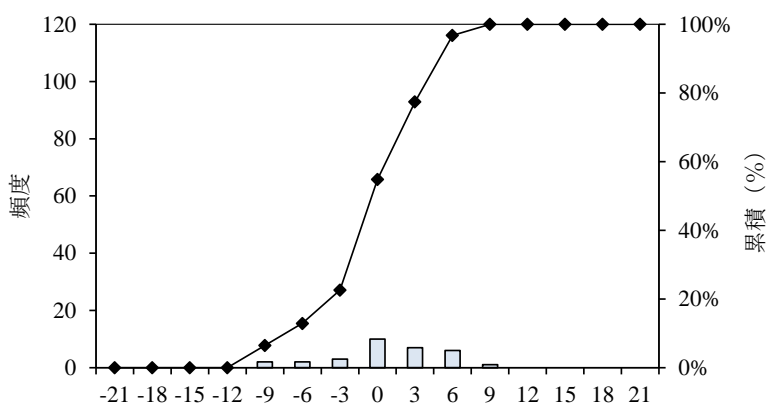
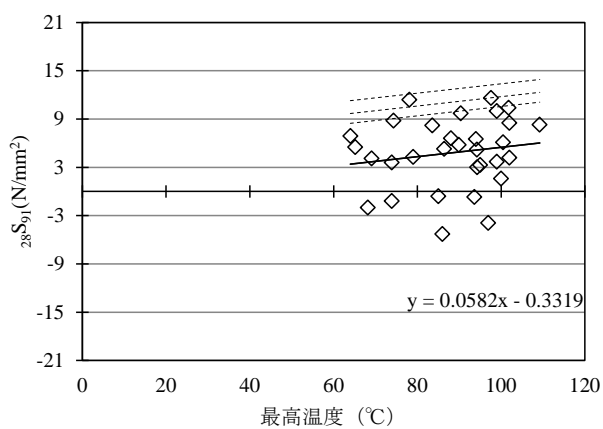


图 3.5.17 N-5 $W/C \leq 30$

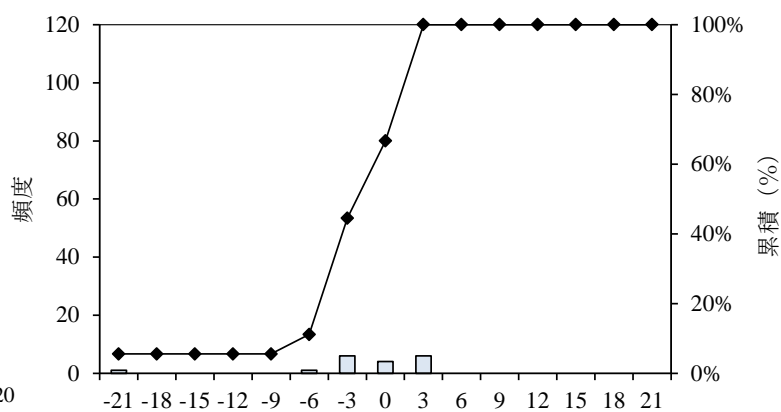
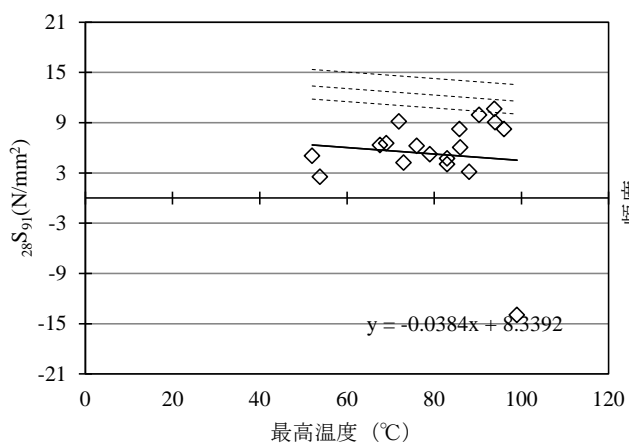


图 3.5.18 N-5 $30 < W/C \leq 35$

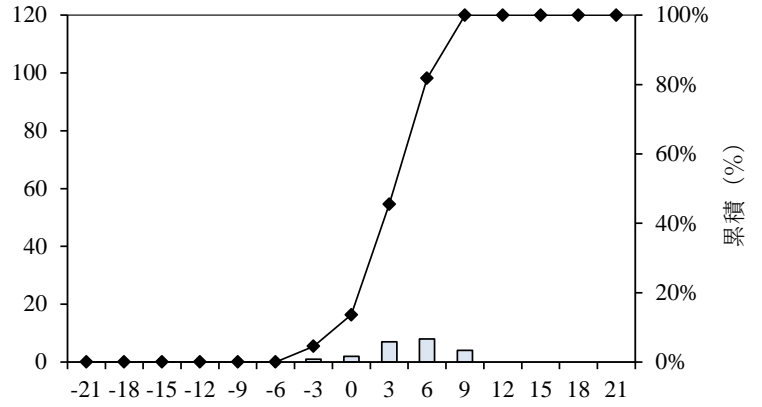
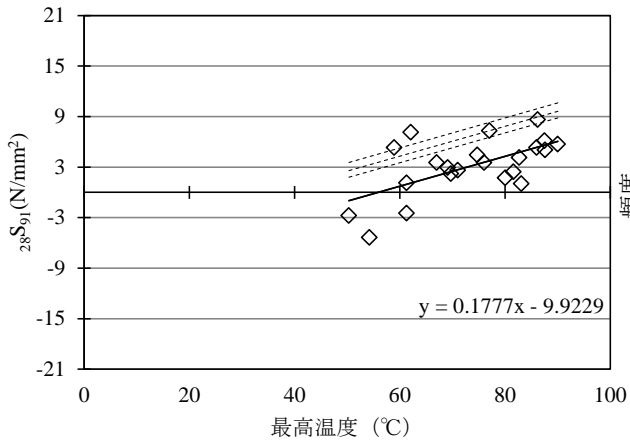


図 3.5.19 N-5 $35 < W/C \leq 40$

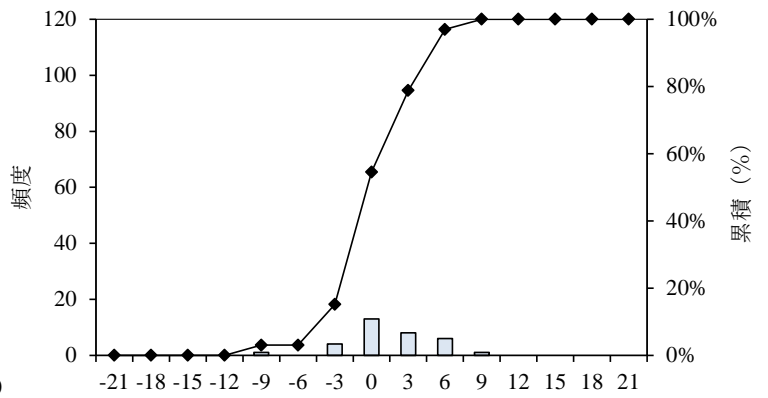
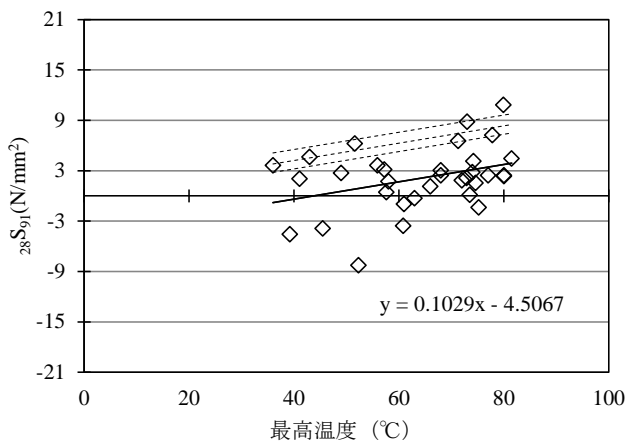


図 3.5.20 N-5 $40 < W/C$

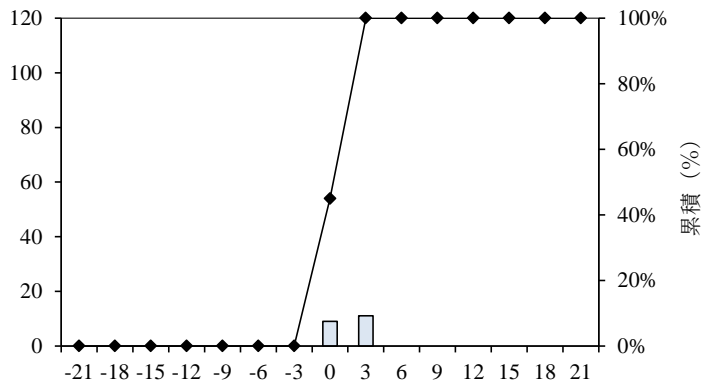
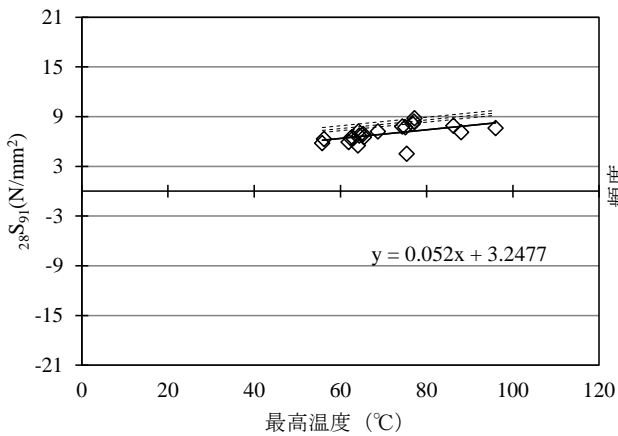


図 3.5.21 N-6 $W/C \leq 30$

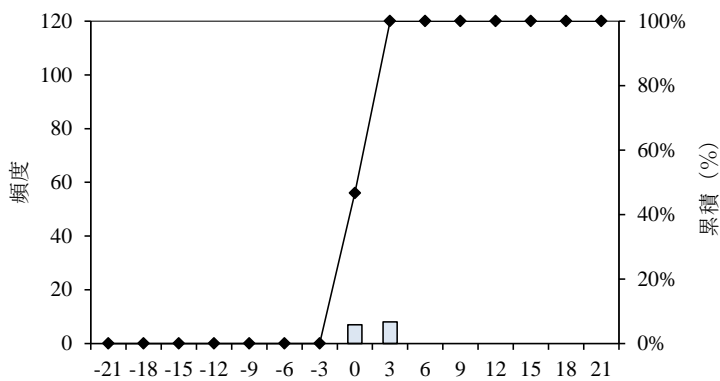
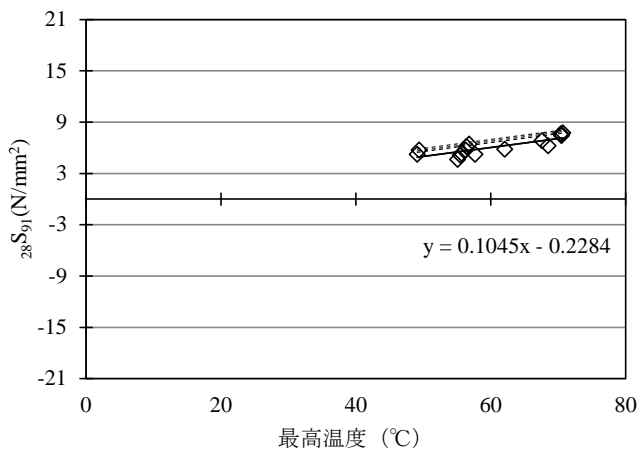


图 3.5.22 N-6 $30 < W/C \leq 35$

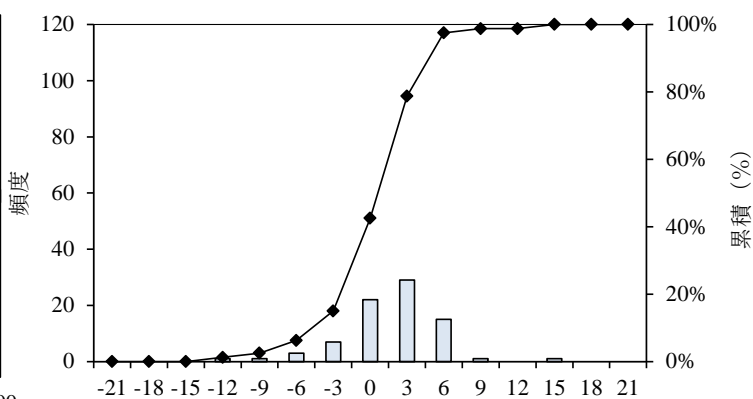
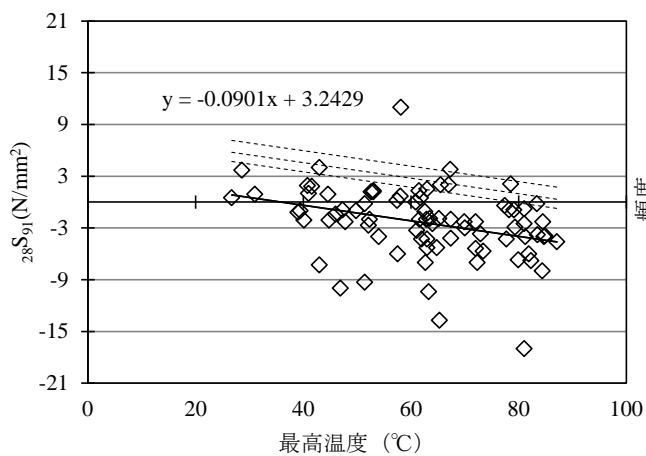


图 3.5.23 M-1 $W/C \leq 30$

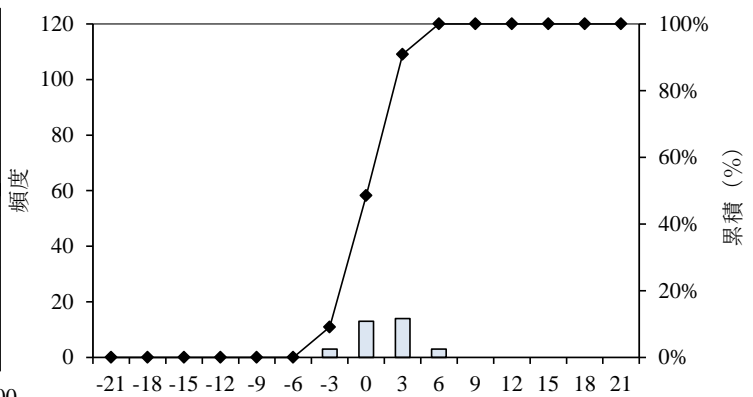
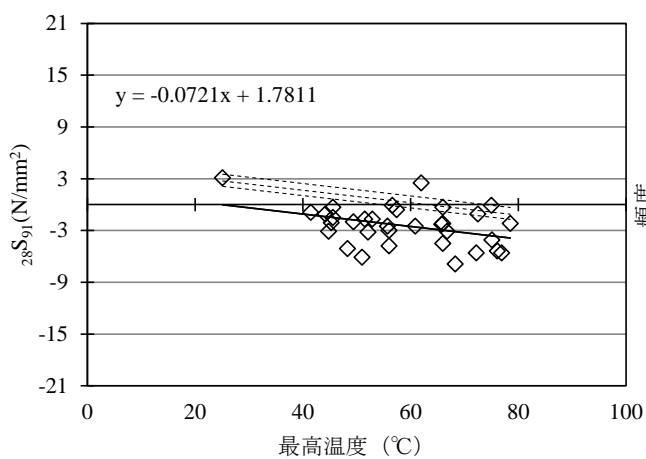


图 3.5.24 M-1 $30 < W/C \leq 35$

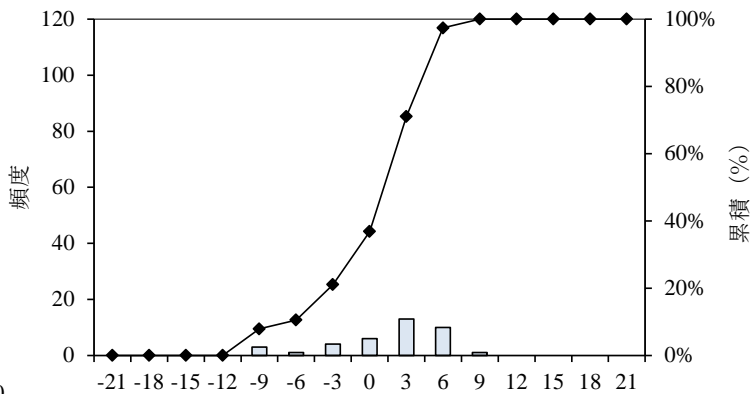
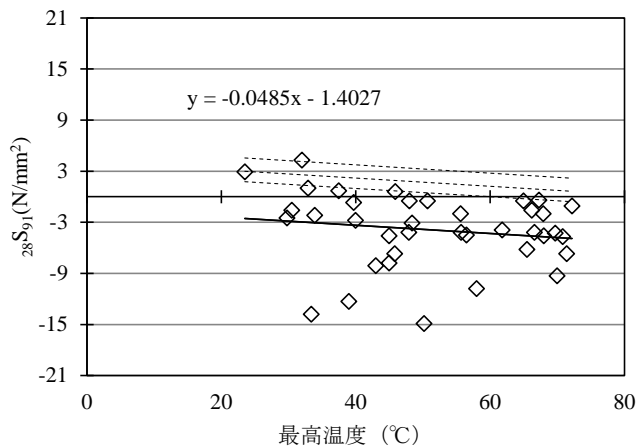


图 3.5.25 M-1 $35 < W/C \leq 40$

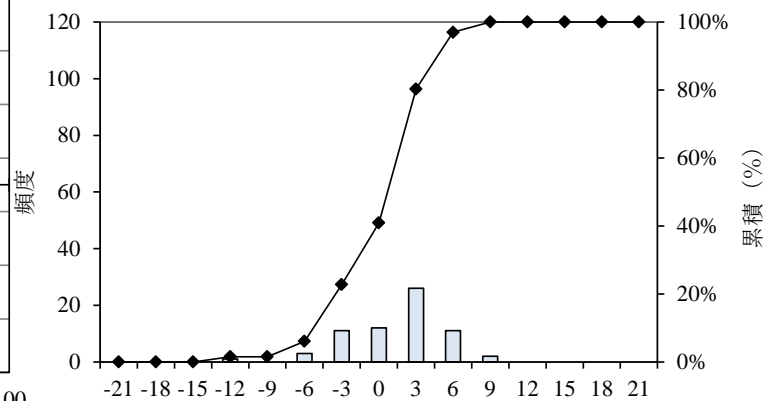
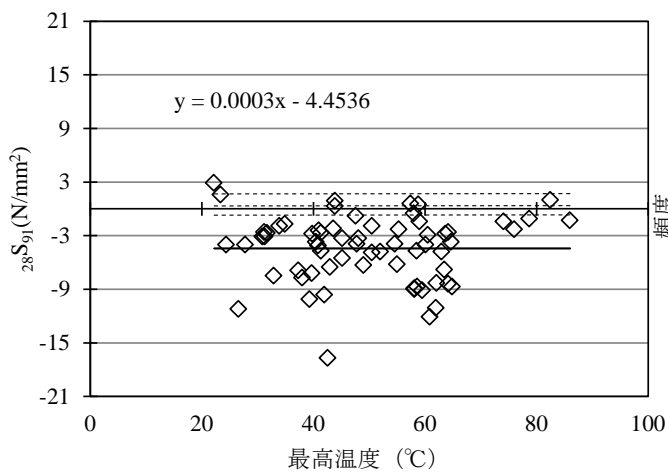


图 3.5.26 M-1 $40 < W/C$

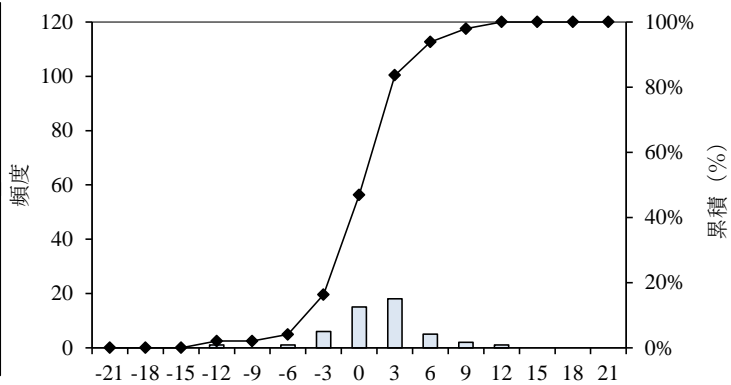
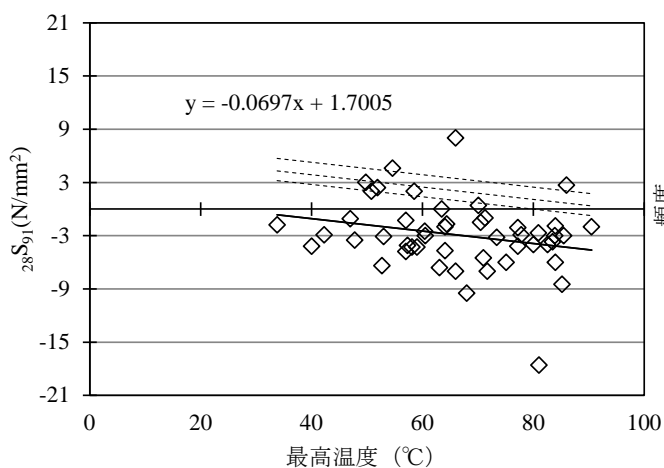


图 3.5.27 M-3 $W/C \leq 30$

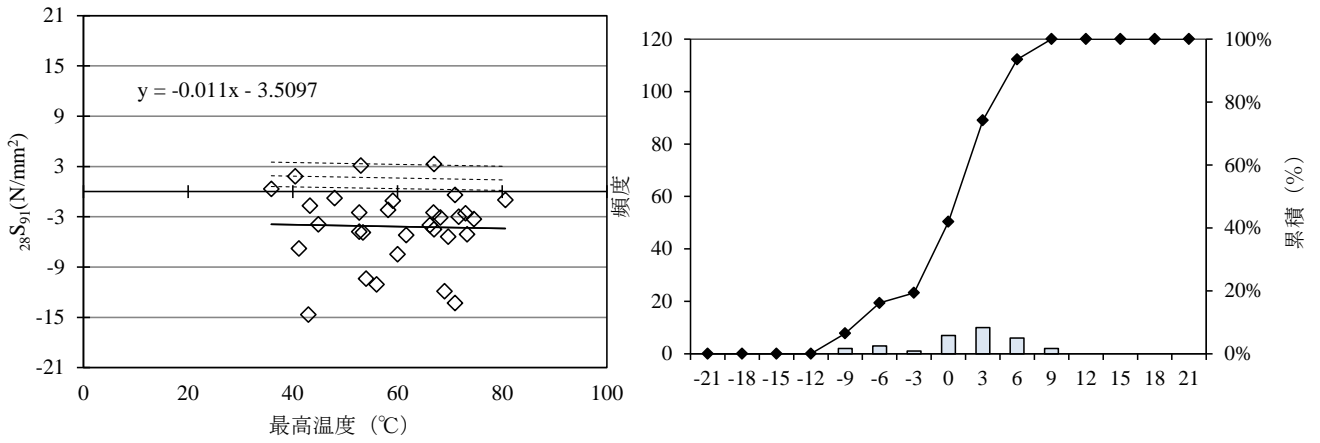


图 3.5.28 M-3. $30 < W/C \leq 35$

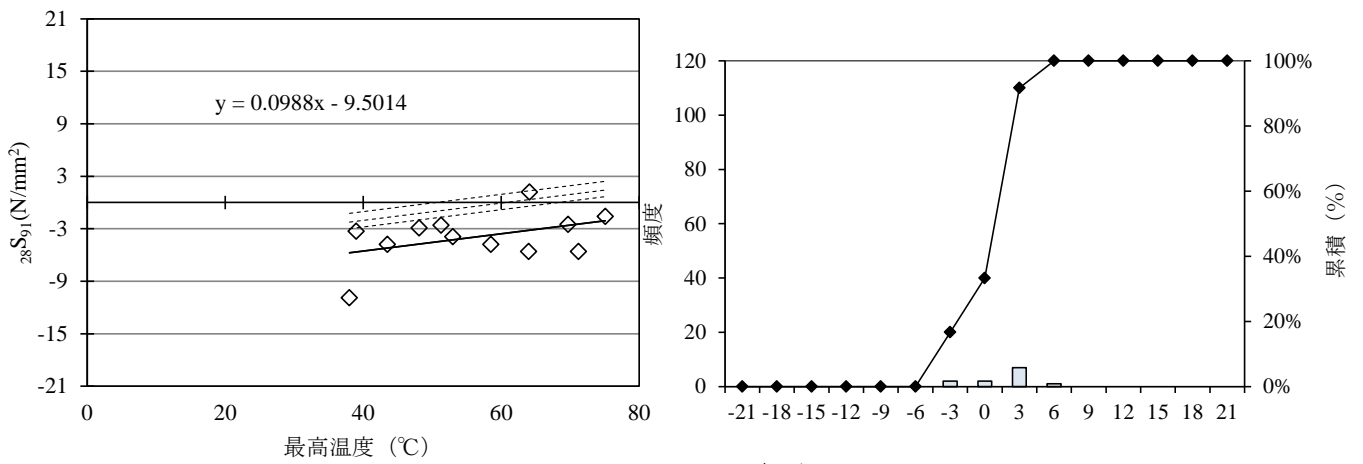


图 3.5.29 M-3. $35 < W/C \leq 40$

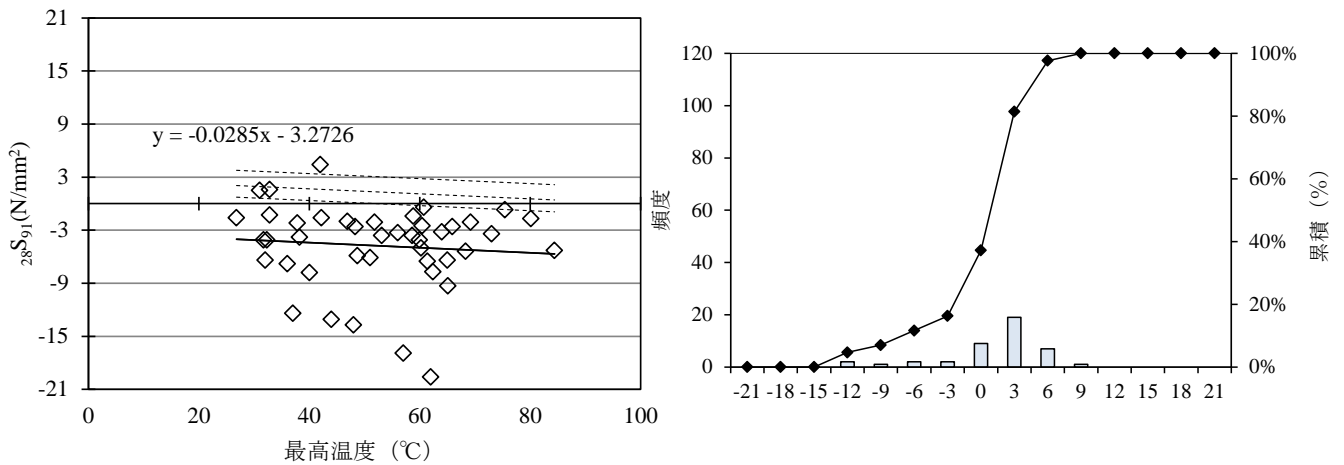


图 3.5.30 M-3 $40 < W/C$

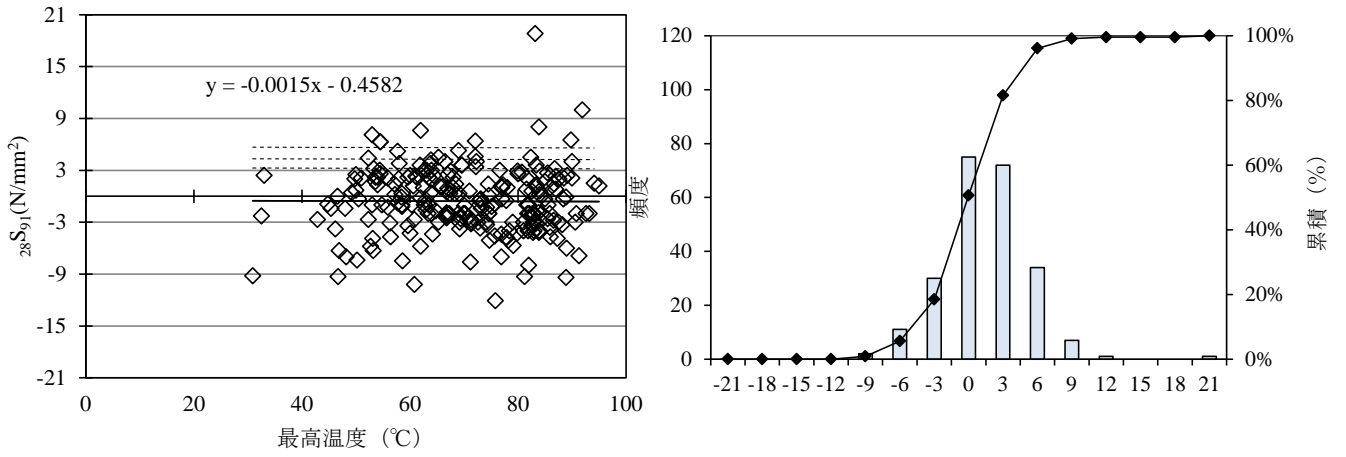


图 3.5.31 M-4 $W/C \leq 30$

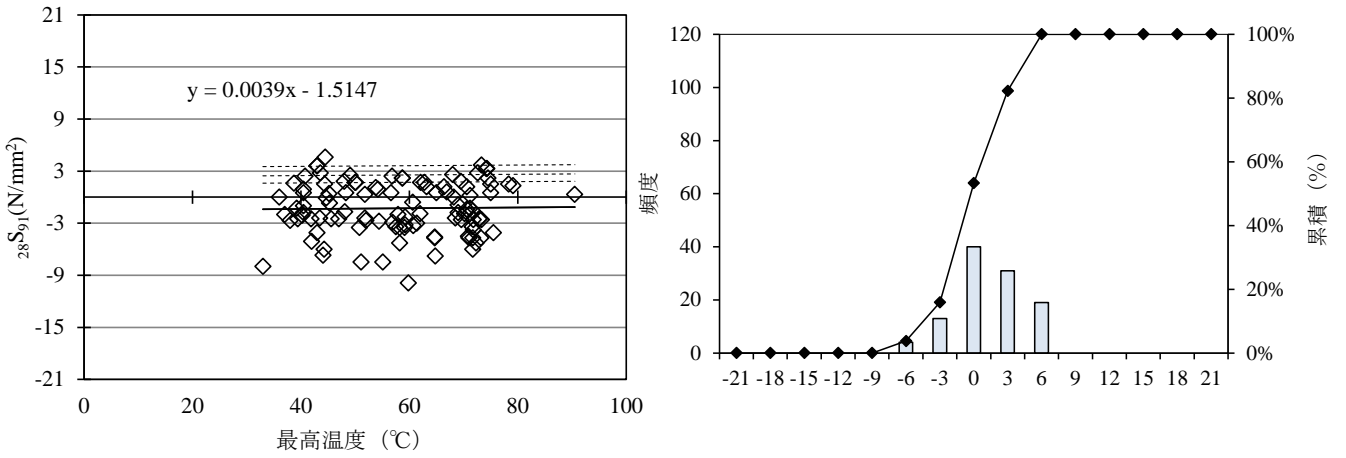


图 3.5.32 M-4 $30 < W/C \leq 35$

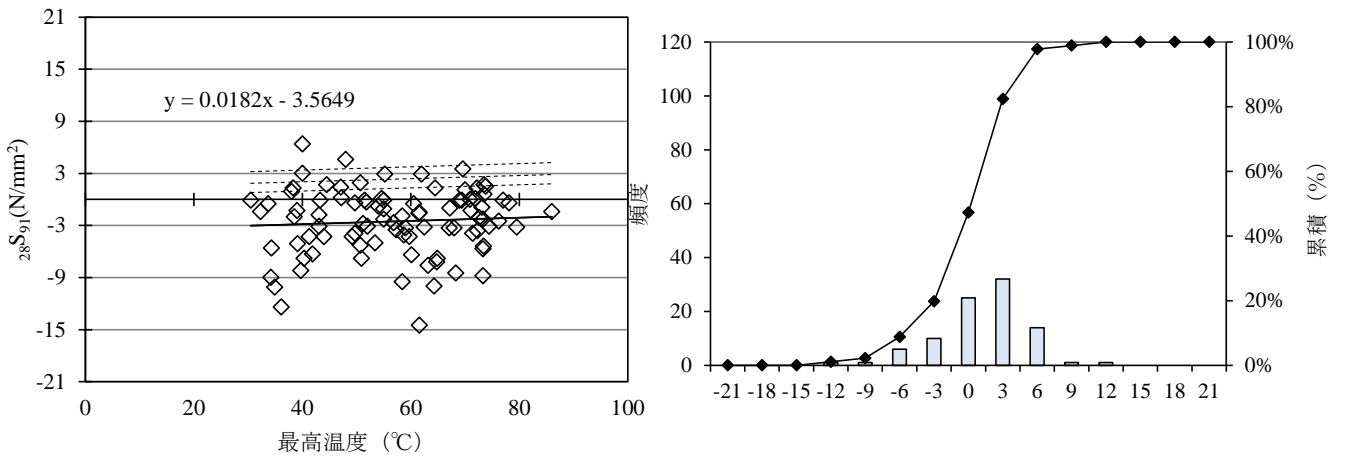


图 3.5.33 M-4 $35 < W/C \leq 40$

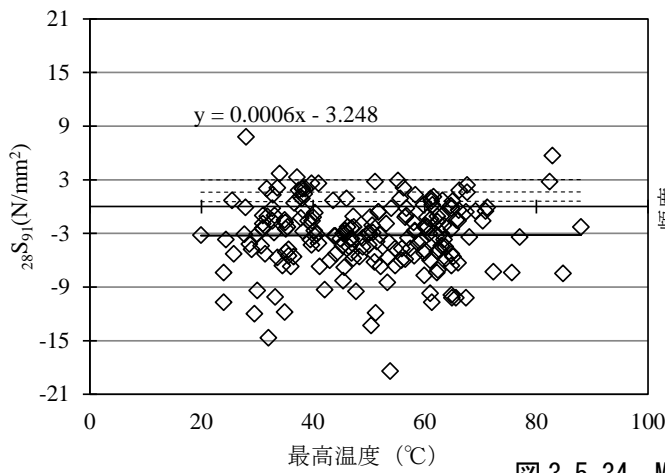


图 3.5.34 M-4 $40 < W/C$

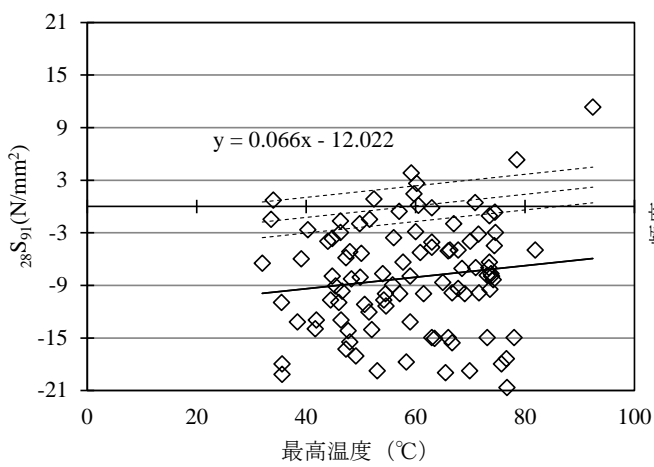
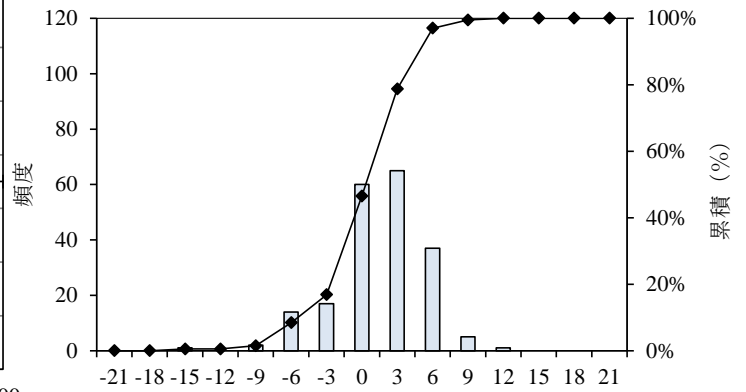


图 3.5.35 L-1 $W/C < 30$

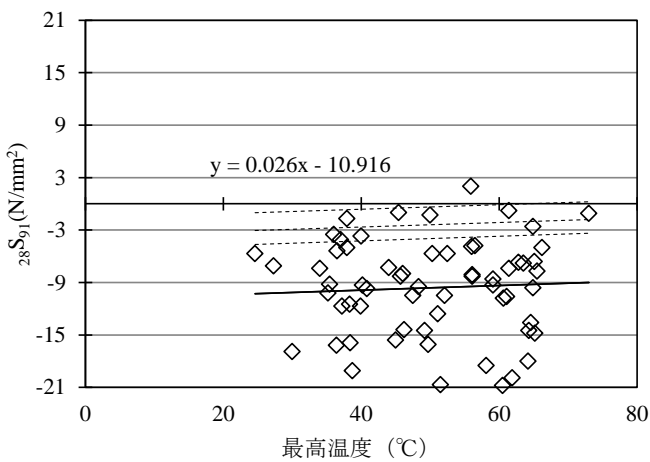
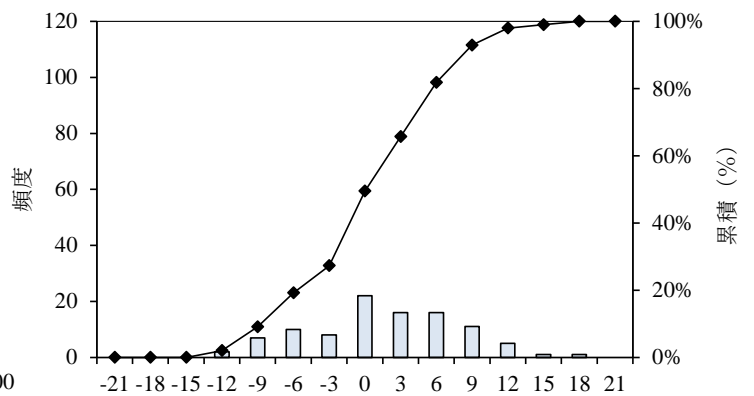
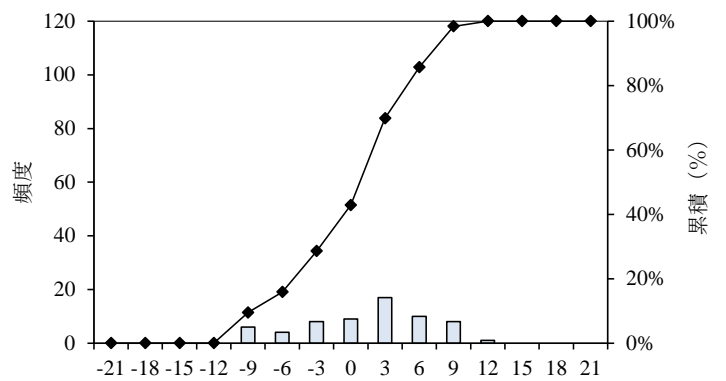


图 3.5.36 L-1 $30 < W/C \leq 35$



3.5.2 セメント水比と圧縮強度の関係

セメント水比と標準養生した管理供試体の材齢 28 日の圧縮強度(F) との関係およびセメント水比(C/W)とコア供試体の材齢 91 日強度(F) との関係を図 3.5.37～図 3.5.47 に示す。また、これらの回帰式 ($F=A \cdot C/W+B$) の係数を表 3.5.2 および表 3.5.3 に示す。なお、コア供試体の材齢 91 日の強度との関係は、最高温度別に 60℃以下、60℃超 80℃以下、80℃超に分類した。

表 3.5.2 セメント水比と標準水中養生 28 日強度の関係の回帰式係数一覧

セメント種別	コード	A	B
普通	1	27.1	-1.3
普通	2	26.6	0.5
普通	3	26.8	-1.8
普通	4	25.1	0.6
普通	5	27.1	-7.1
普通	6	23.9	6.2
中庸熱	1	27.2	-6.8
中庸熱	3	27.9	-8.1
中庸熱	4	25.8	-3.1
中庸熱	5	29.9	-7.7
低熱	1	29.0	-9.5
低熱	3	27.2	-6.3
低熱	4	23.2	3.1
低熱	5	32.7	-26.1

表 3.5.3 セメント水比とコア 91 日コア強度の関係 回帰式係数一覧

セメント種	コート	最高温度	A	B
普通	1	$T_{max} \leq 60^{\circ}\text{C}$	25.2	0.3
普通	1	$60^{\circ}\text{C} < T_{max} \leq 80^{\circ}\text{C}$	27.3	8.1
普通	1	$T_{max} > 80^{\circ}\text{C}$	24.3	-1.0
普通	2	$T_{max} \leq 60^{\circ}\text{C}$	19.6	15.1
普通	2	$60^{\circ}\text{C} < T_{max} \leq 80^{\circ}\text{C}$	23.5	5.1
普通	2	$T_{max} > 80^{\circ}\text{C}$	20.7	12.6
普通	3	$T_{max} \leq 60^{\circ}\text{C}$	25.5	-2.8
普通	3	$60^{\circ}\text{C} < T_{max} \leq 80^{\circ}\text{C}$	25.8	-5.7
普通	3	$T_{max} > 80^{\circ}\text{C}$	22.0	6.1
普通	4	$T_{max} \leq 60^{\circ}\text{C}$	23.5	2.3
普通	4	$60^{\circ}\text{C} < T_{max} \leq 80^{\circ}\text{C}$	20.4	4.6
普通	4	$T_{max} > 80^{\circ}\text{C}$	21.5	0.3
普通	5	$T_{max} \leq 60^{\circ}\text{C}$	26.5	-3.1
普通	5	$60^{\circ}\text{C} < T_{max} \leq 80^{\circ}\text{C}$	25.6	-3.4
普通	5	$T_{max} > 80^{\circ}\text{C}$	21.2	9.3
普通	6	$T_{max} \leq 60^{\circ}\text{C}$	21.0	3.9
普通	6	$60^{\circ}\text{C} < T_{max} \leq 80^{\circ}\text{C}$	21.9	0.6
普通	6	$T_{max} > 80^{\circ}\text{C}$	23.0	-3.0
普通	7	$T_{max} \leq 60^{\circ}\text{C}$	23.5	-0.8
普通	7	$60^{\circ}\text{C} < T_{max} \leq 80^{\circ}\text{C}$	27.9	-10.7
普通	7	$T_{max} > 80^{\circ}\text{C}$	28.1	-14.2
普通	8	$60^{\circ}\text{C} < T_{max} \leq 80^{\circ}\text{C}$	33.9	-21.1
普通	8	$T_{max} > 80^{\circ}\text{C}$	21.7	7.2
中庸熱	1	$T_{max} \leq 60^{\circ}\text{C}$	24.9	2.8
中庸熱	1	$60^{\circ}\text{C} < T_{max} \leq 80^{\circ}\text{C}$	25.4	2.6
中庸熱	1	$T_{max} > 80^{\circ}\text{C}$	27.4	-3.1
中庸熱	3	$T_{max} \leq 60^{\circ}\text{C}$	24.4	4.3
中庸熱	3	$60^{\circ}\text{C} < T_{max} \leq 80^{\circ}\text{C}$	23.3	7.9
中庸熱	3	$T_{max} > 80^{\circ}\text{C}$	26.5	-3.5
中庸熱	4	$T_{max} \leq 60^{\circ}\text{C}$	24.5	4.0
中庸熱	4	$60^{\circ}\text{C} < T_{max} \leq 80^{\circ}\text{C}$	23.6	6.5
中庸熱	4	$T_{max} > 80^{\circ}\text{C}$	23.4	7.6
中庸熱	5	$T_{max} \leq 60^{\circ}\text{C}$	23.2	9.9
中庸熱	5	$60^{\circ}\text{C} < T_{max} \leq 80^{\circ}\text{C}$	26.2	-2.4
中庸熱	5	$T_{max} > 80^{\circ}\text{C}$	6.6	70.3
低熱	1	$T_{max} \leq 60^{\circ}\text{C}$	28.3	-0.3
低熱	1	$60^{\circ}\text{C} < T_{max} \leq 80^{\circ}\text{C}$	27.8	-0.2
低熱	3	$T_{max} \leq 60^{\circ}\text{C}$	24.0	9.0
低熱	3	$60^{\circ}\text{C} < T_{max} \leq 80^{\circ}\text{C}$	22.7	13.7
低熱	3	$T_{max} > 80^{\circ}\text{C}$	30.5	-14.1
低熱	4	$T_{max} \leq 60^{\circ}\text{C}$	23.2	9.9
低熱	4	$60^{\circ}\text{C} < T_{max} \leq 80^{\circ}\text{C}$	23.6	9.9
低熱	4	$T_{max} > 80^{\circ}\text{C}$	27.7	-19.0

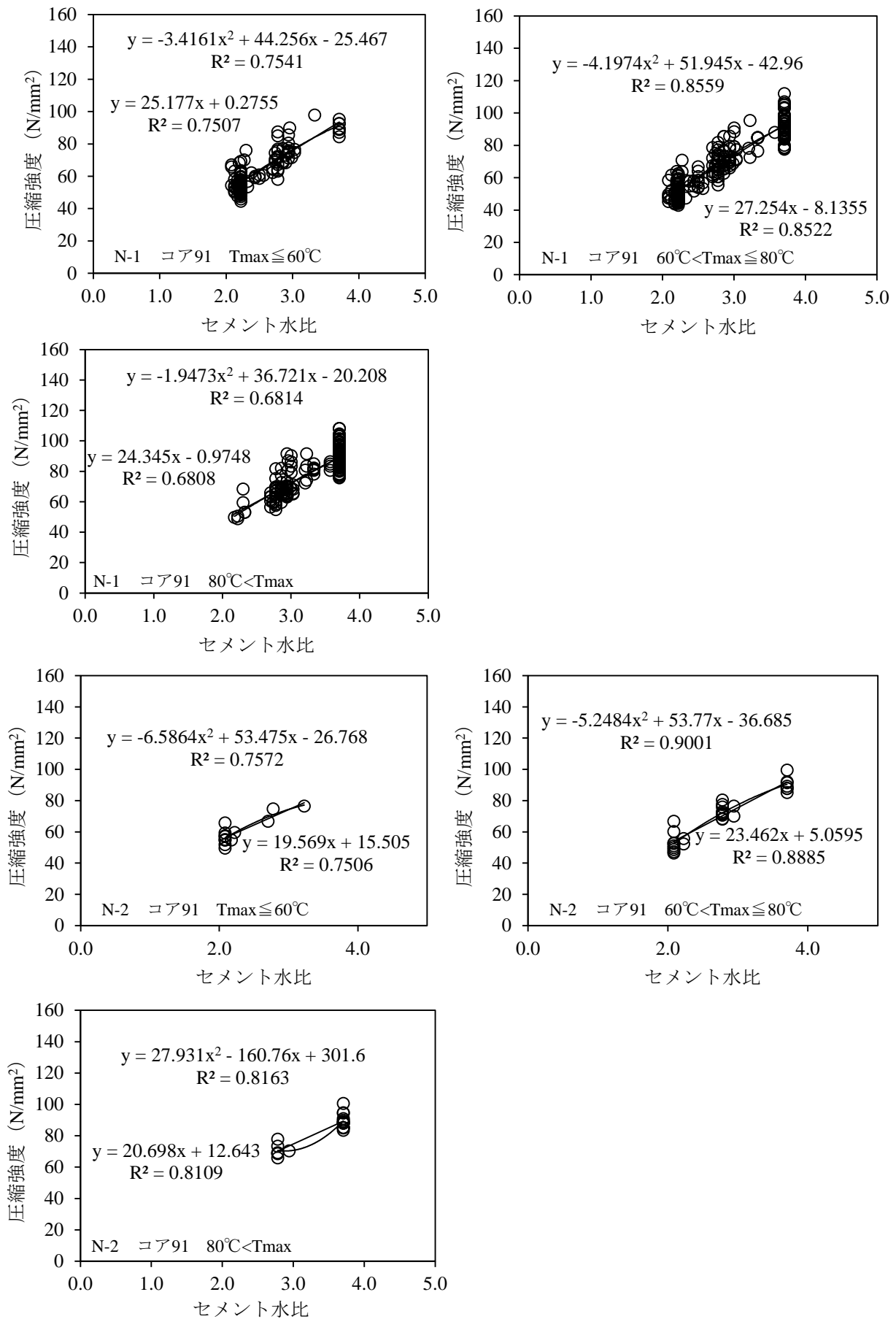


図 3.5.37 セメント水比と材齢 91 日コア強度の関係 (普通ポルトランドセメント)

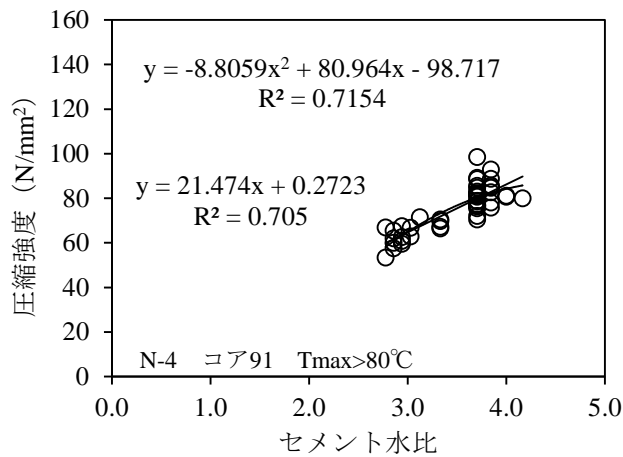
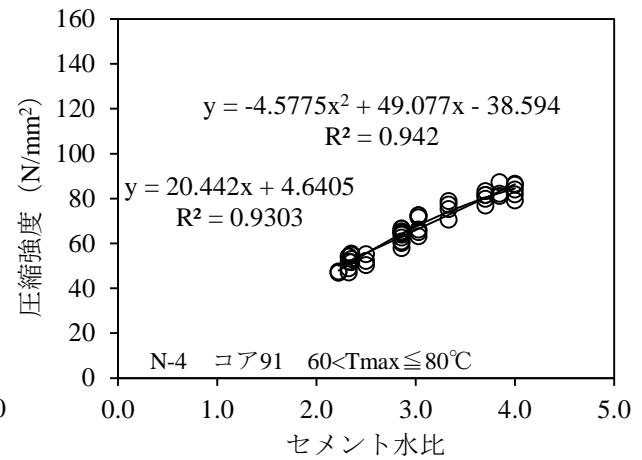
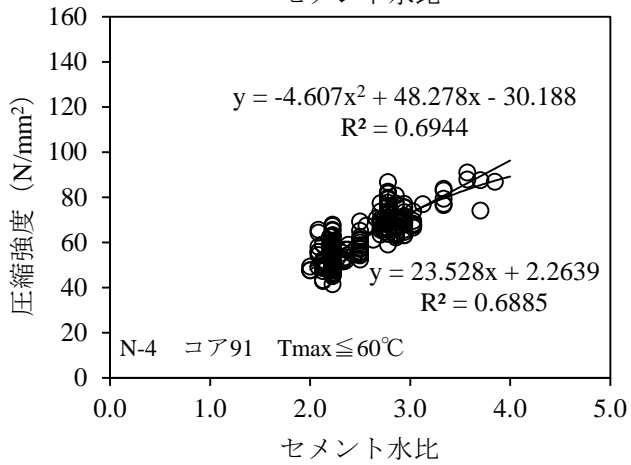
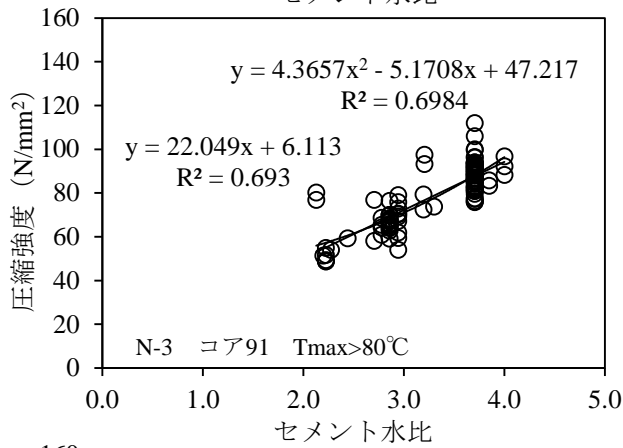
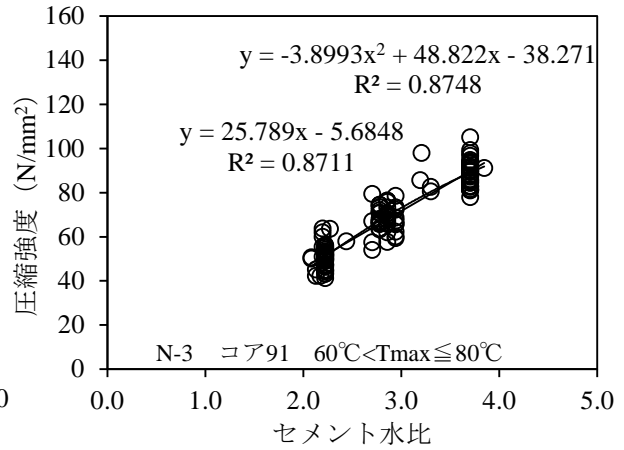
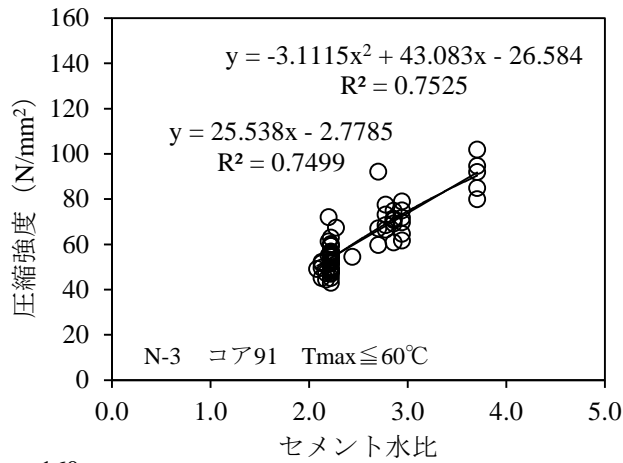


図 3.5.38 セメント水比と材齢 91 日コア強度の関係 (普通ポルトランドセメント)

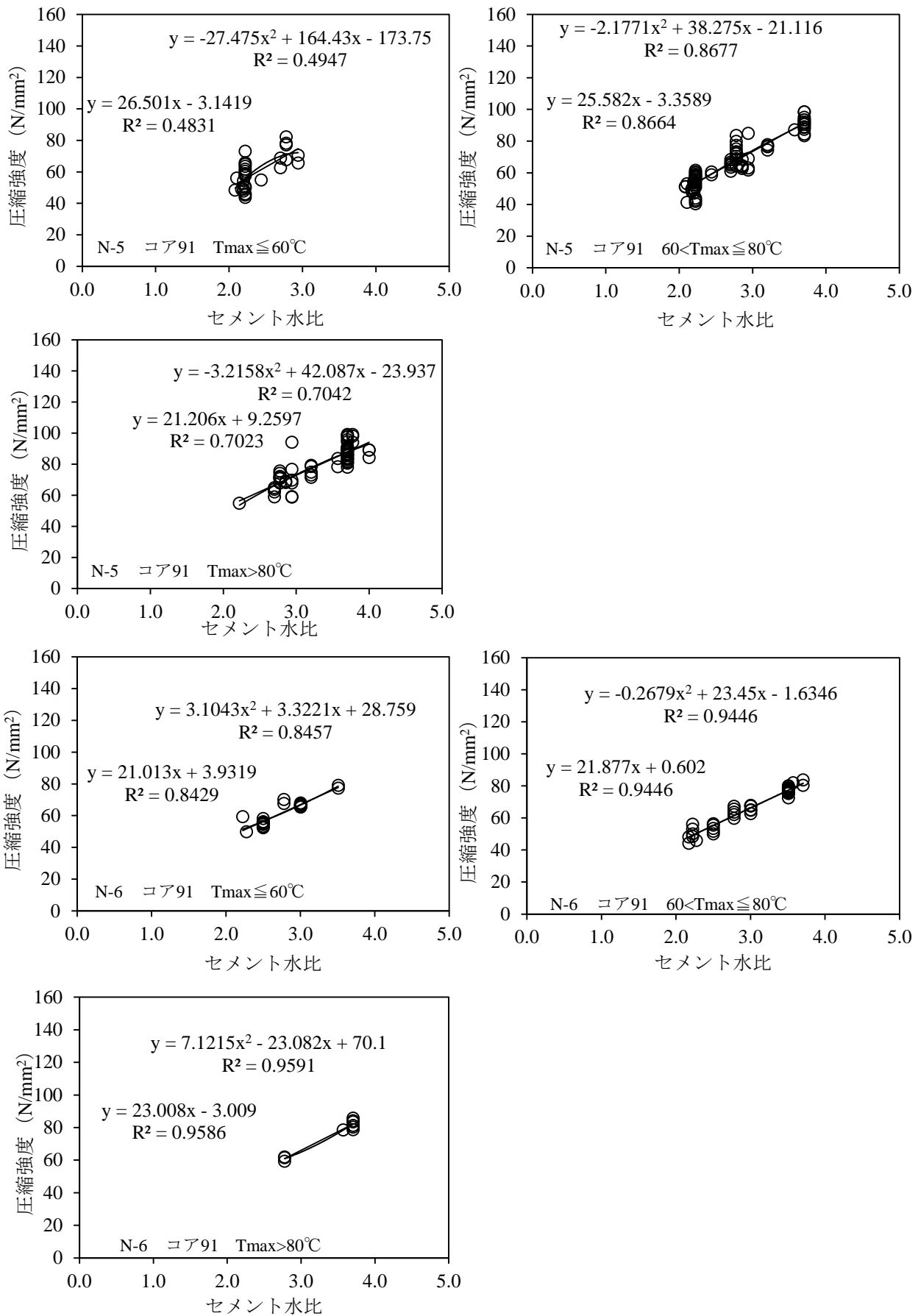


図 3.5.39 セメント水比と材齢 91 日コア強度の関係 (普通ポルトランドセメント)

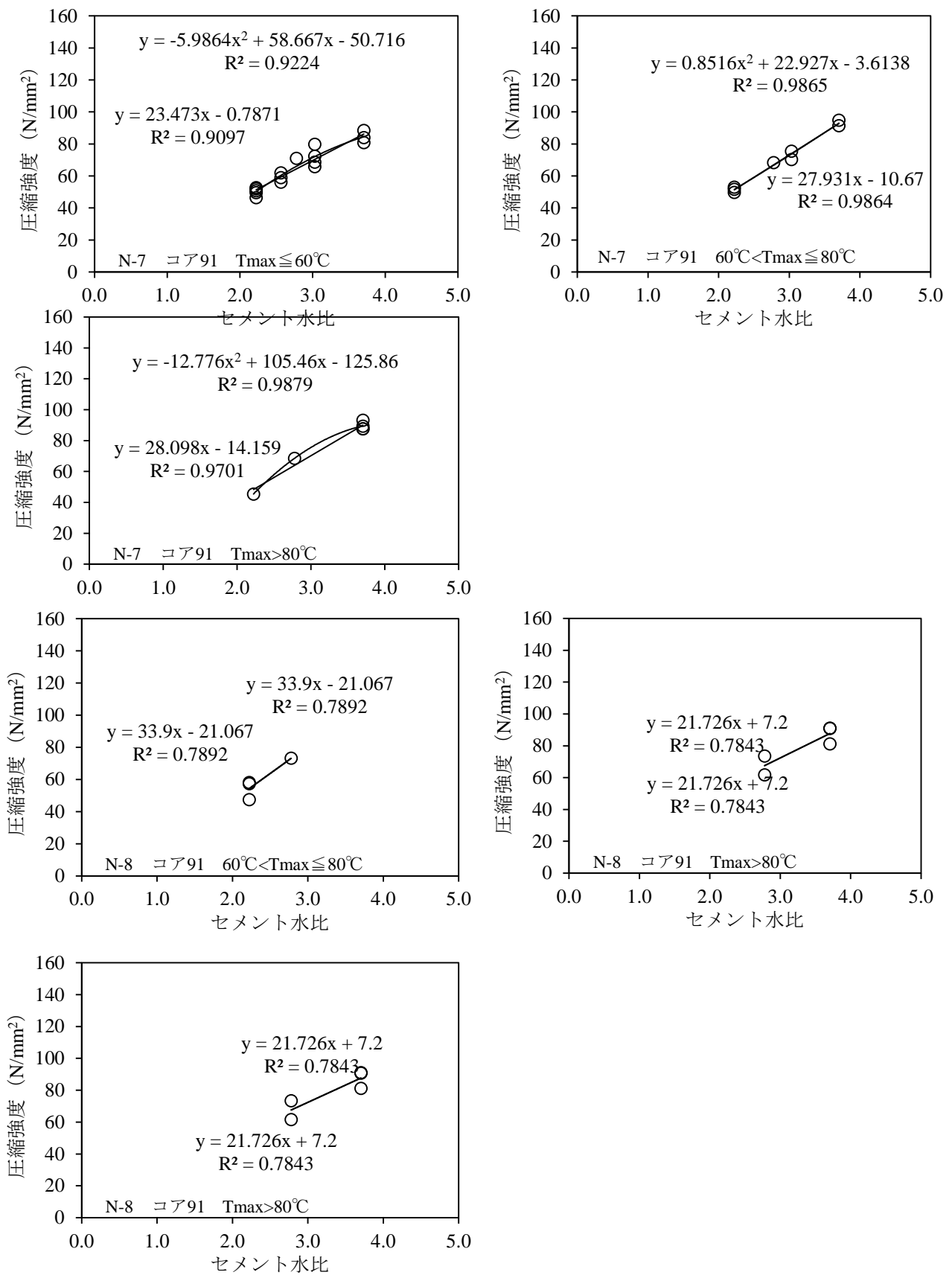


図 3.5.40 セメント水比と材齢 91 日コア強度の関係 (普通ポルトランドセメント)

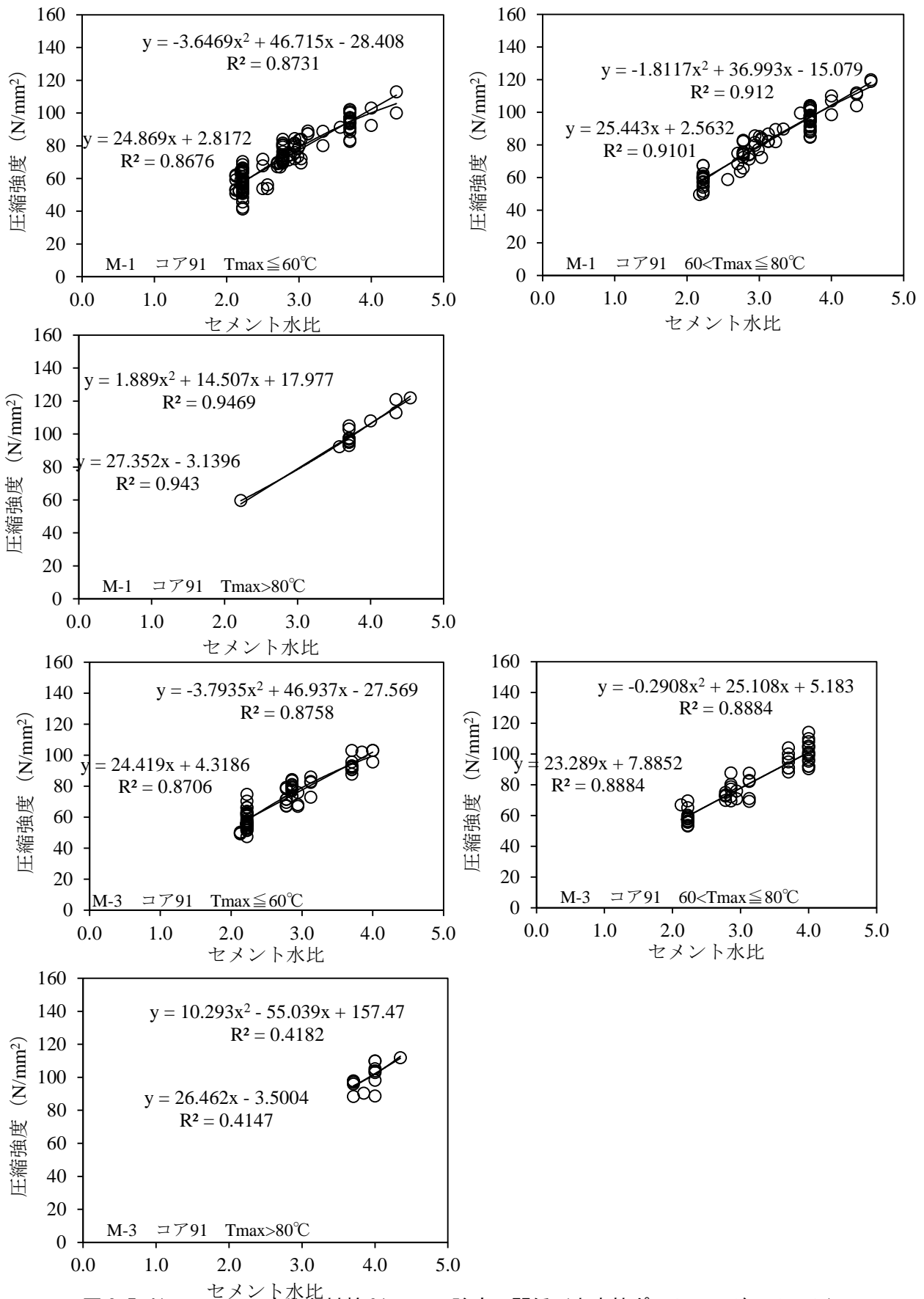


図 3.5.41 セメント水比と材齢 91 日コア強度の関係 (中庸熱ポルトランドセメント)

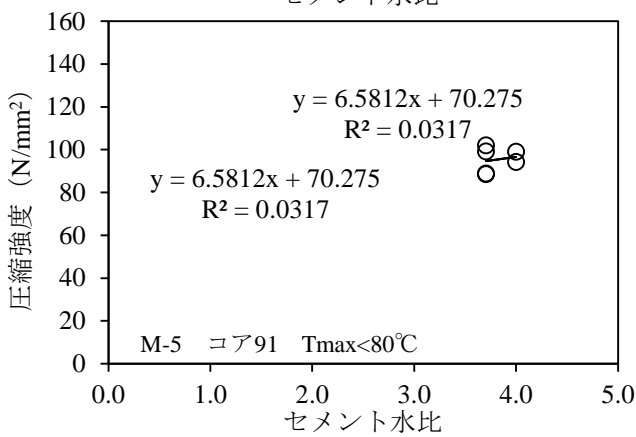
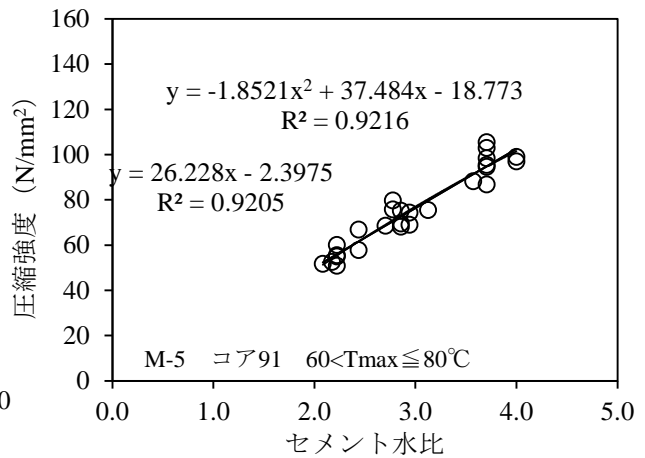
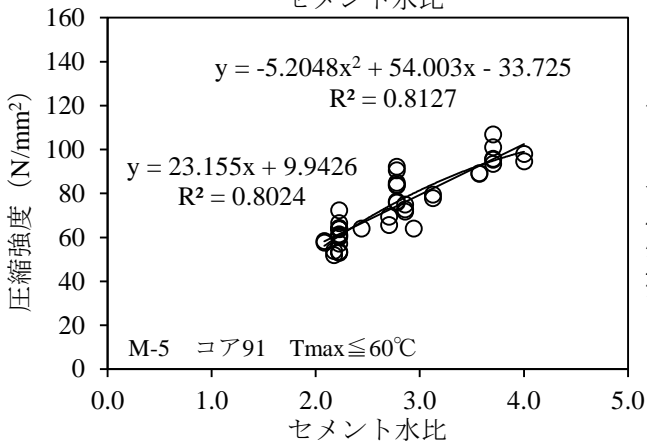
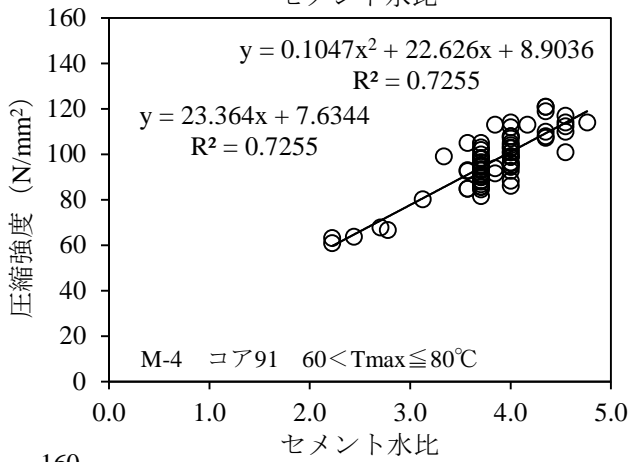
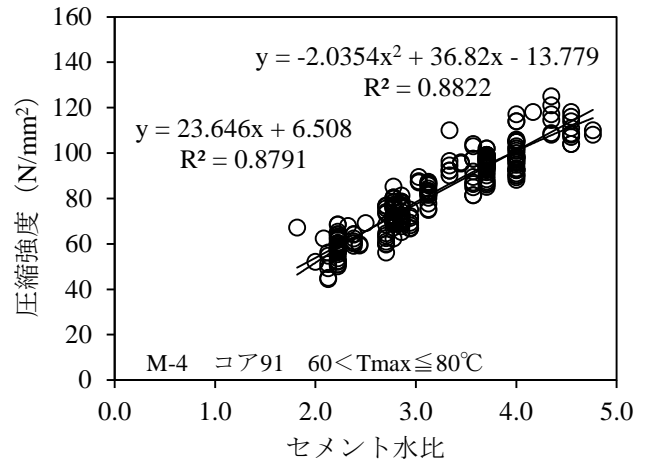
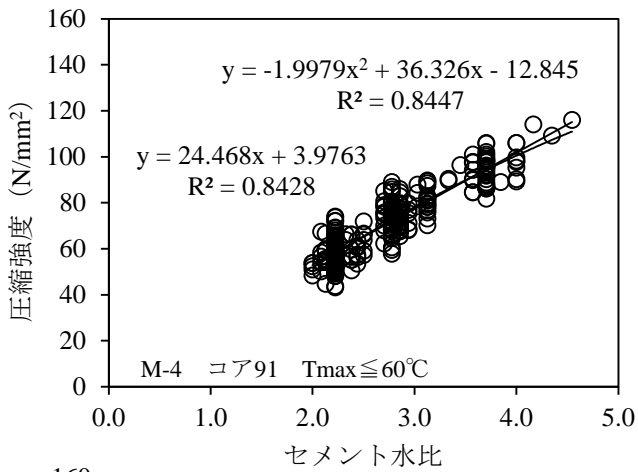


図 3.5.42 セメント水比と材齢 91 日コア強度の関係 (中庸熱ポルトランドセメント)

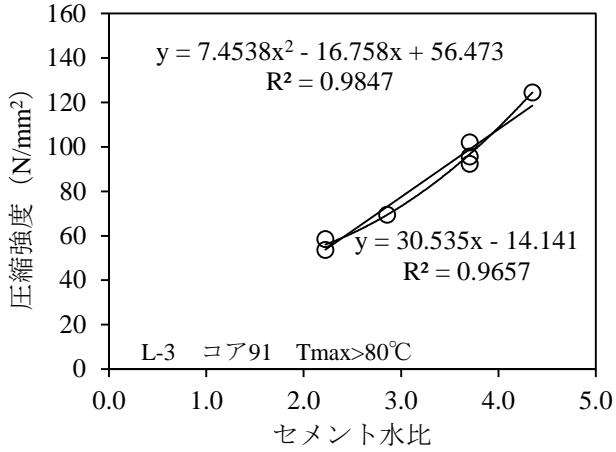
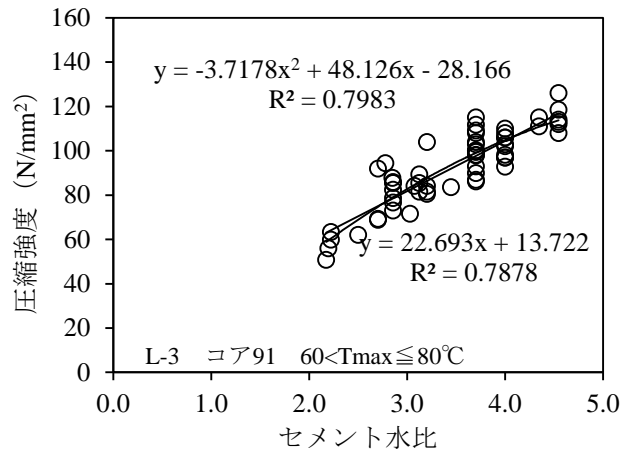
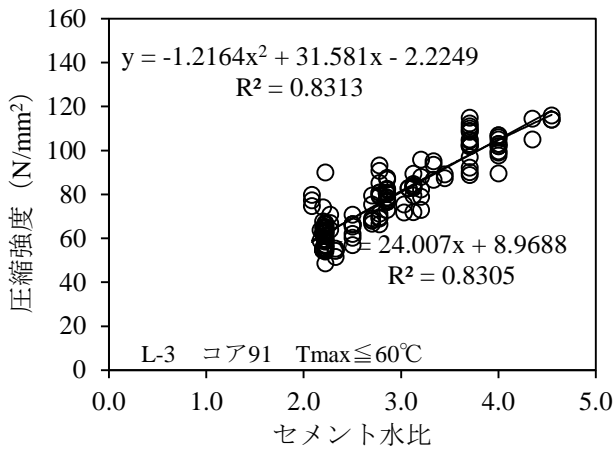
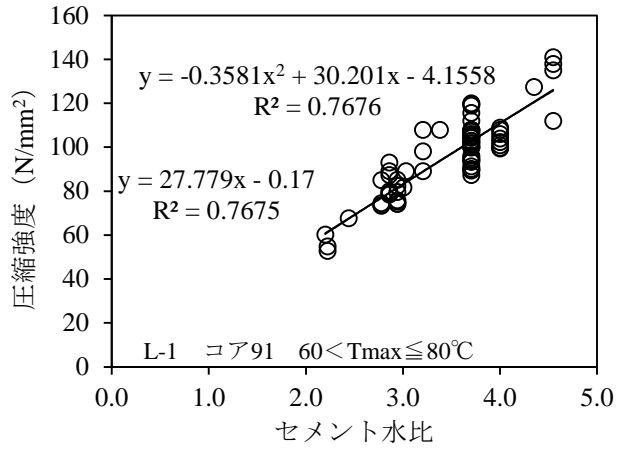
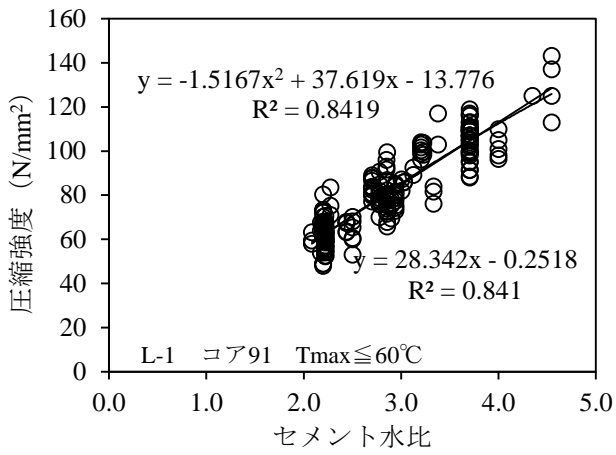


図 3.5.43 セメント水比と材齢 91 日コア強度の関係 (低熱ポルトランドセメント)

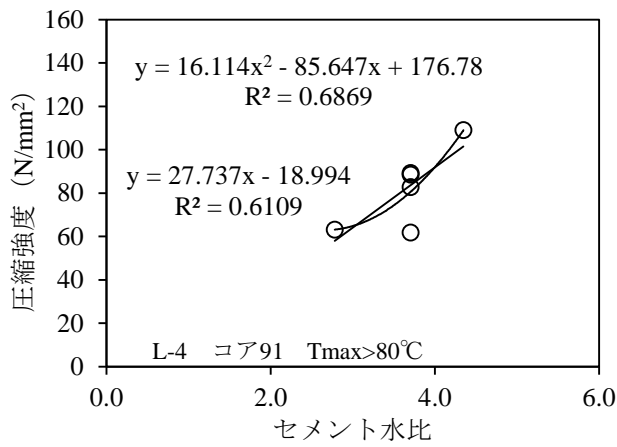
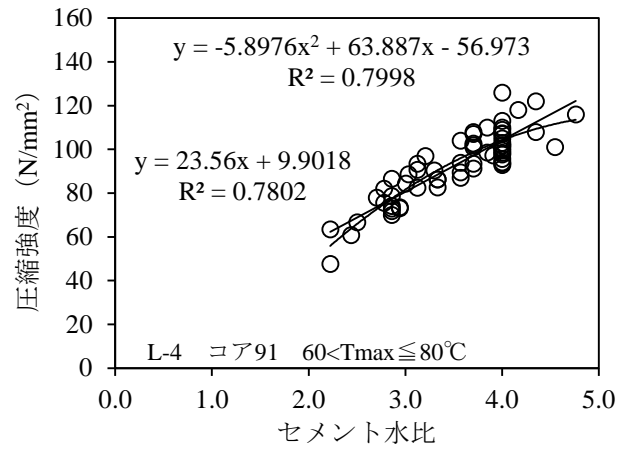
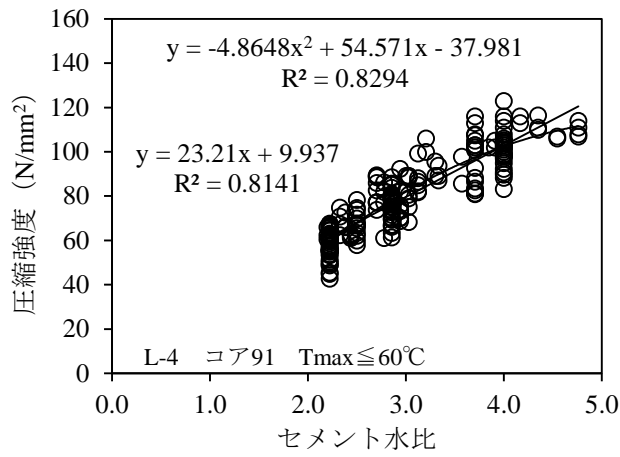


図 3.5.44 セメント水比と材齢 91 日コア強度の関係（低熱ポルトランドセメント）

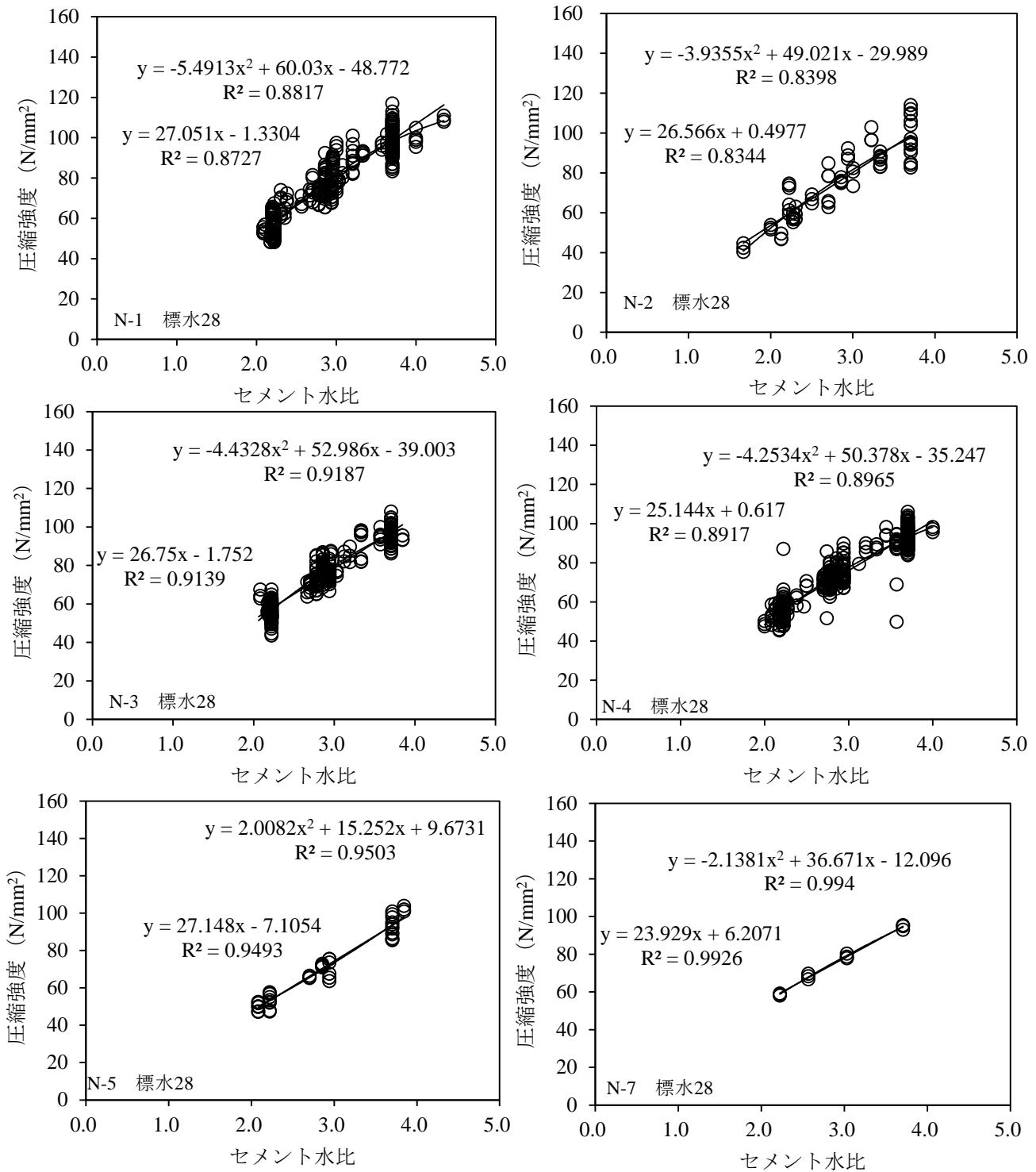


図 3.5.45 セメント水比と標準水中養生 28 日強度の関係 (普通ポルトランドセメント)

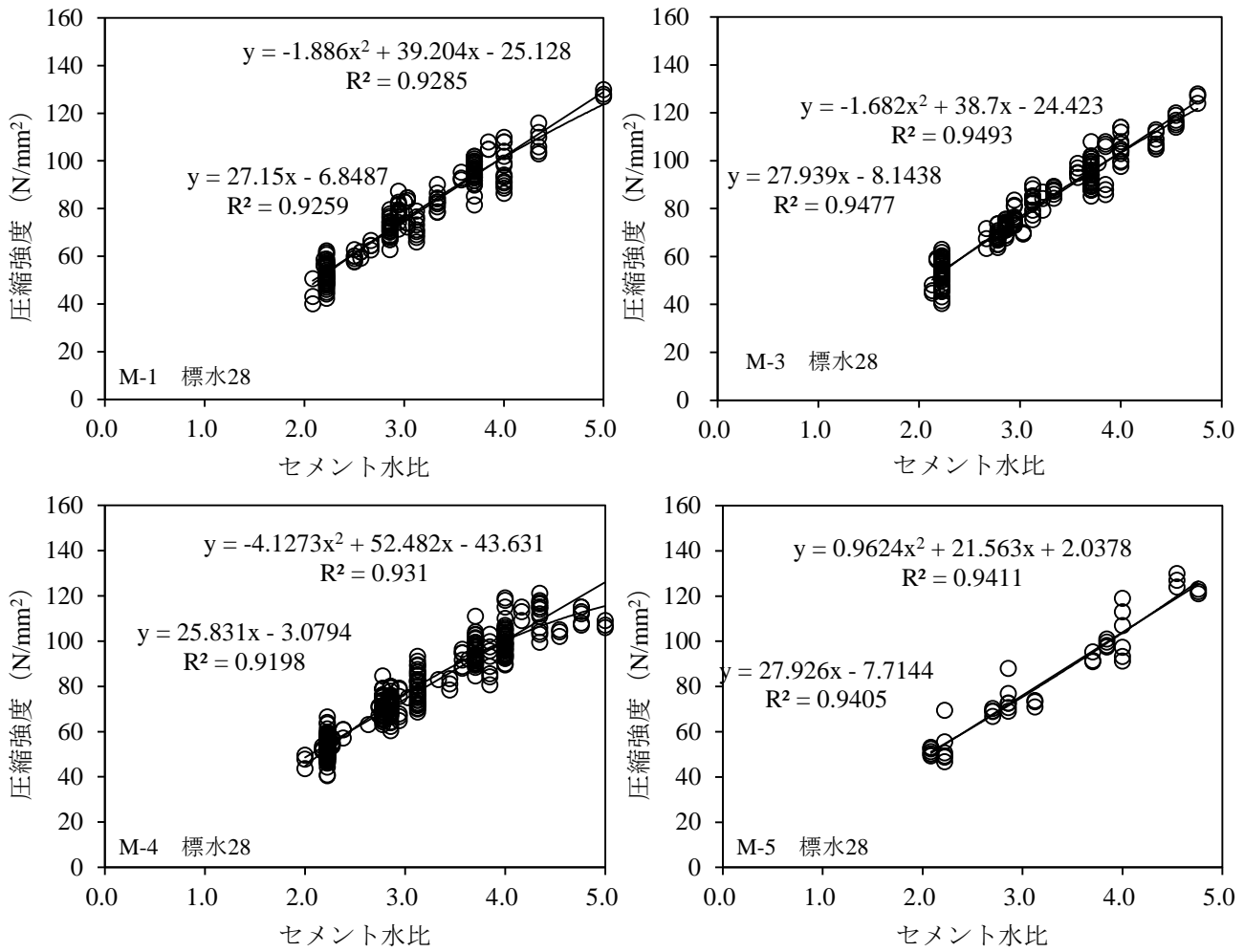


図 3.5.46 セメント水比と標準水中養生 28 日強度の関係 (中庸熱ポルトランドセメント)

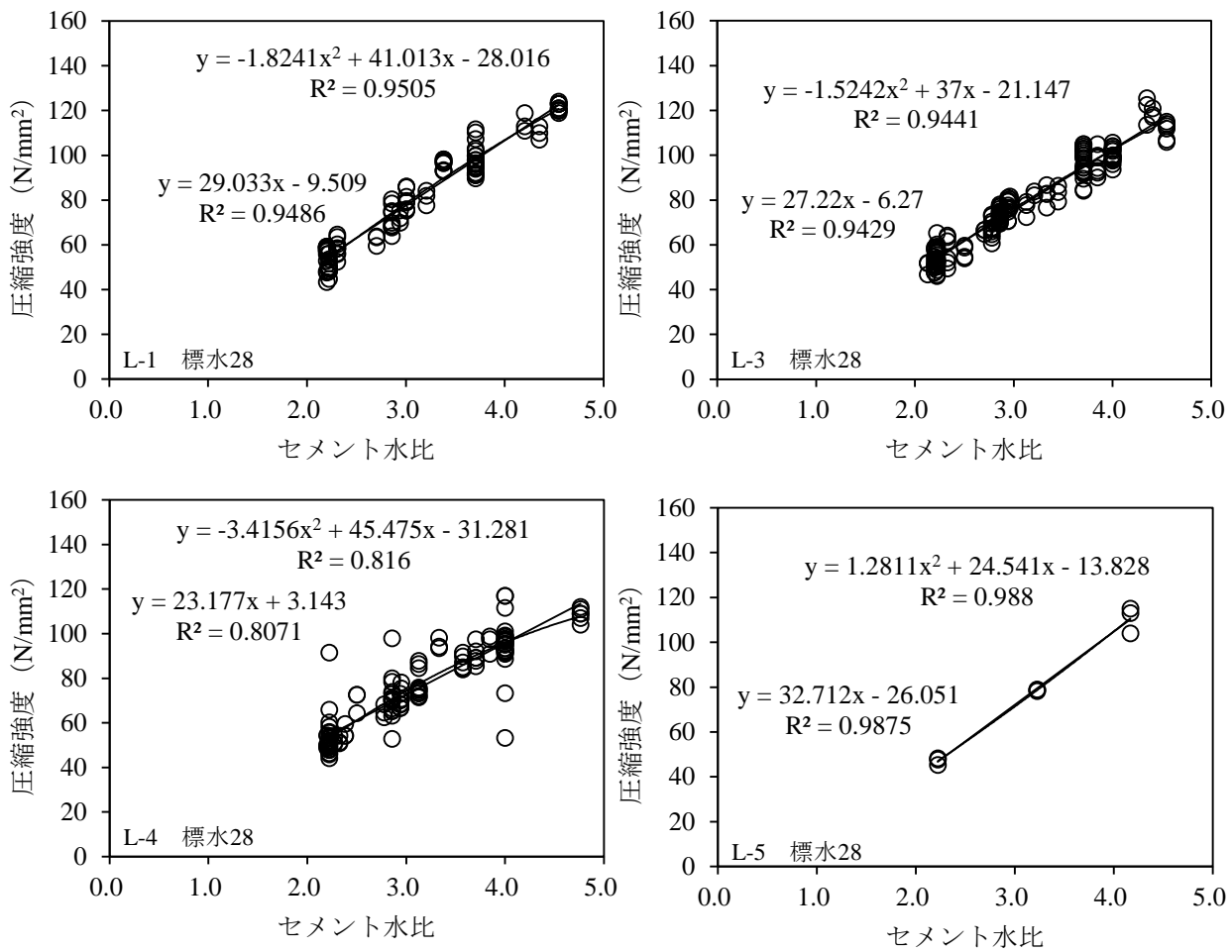


図 3.5.47 セメント水比と標準水中養生 28 日強度の関係 (低熱ポルトランドセメント)

3.5.3 各種要因別の標準的なS値

前述の3.5.1項および3.5.2項の検討結果を基に、平成12(2000)年以降に申請された高強度コンクリートの大臣認定の実験データを用いてセメントの種類、材齢91日のコア強度、打設時の温度および $_{28}S_{91}$ (標準養生した供試体の材齢28日の強度と材齢91日で部材から採取したコア供試体との差)との関係を解析した。

最高温度と $_{28}S_{91}$ との関係については、図3.5.1～図3.5.36に示すようにセメントの種類が同じ場合でも、セメントの製造メーカーごとに傾向が異なるため、ここでは全ての製造メーカーによる分類をせずにセメントの種類ごとに解析することとした。

図3.5.48に、普通ポルトランドセメントを使用した場合の打設時の温度と $_{28}S_{91}$ との関係を、材齢91日のコア強度の範囲(30～55 N/mm²、40～65 N/mm²、55～85 N/mm²)の別に示す。また、大臣認定で申請されたコンクリートは何れも材齢91日のコア強度が40N/mm²を上回るものであるため、40N/mm²を下回る場合の例として既往の研究¹⁾を参考に示す。

図中の青線は全データから求めた回帰直線、赤線はこの回帰直線の95%信頼限界の上限値である。これより、一定のコア強度の範囲にあるコンクリート(同じ種類のセメントを使用)の場合、打込時の温度と $_{28}S_{91}$ の間には直線関係があることが確認できる。さらに、95%信頼限界の上限値を基に、 $_{28}S_{91}$ の上限値がほぼ一定となる打込時の温度の範囲をプロットすると、両者の関係はおおよそ図中の太黒線で示すことができる。なお、JASS5や既往の研究¹⁾などでは温度の範囲の最小単位を1℃で示しているが、ここではコンクリート工事に係わる強度管理として、同様に温度の範囲で基準値を規定している昭和46年建設省告示第110号(最終改正 昭和63年建設省告示第1655号)(型わく及び支柱の取り外しに関する基準を定める件)の別表(い)の存置期間中の平均気温を基に、5℃を最小単位として検討した。また、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、フライアッシュセメントB種および高炉セメントB種についても同様の検討を行った結果、図3.5.49～図3.5.52に示すように、打込時の温度と $_{28}S_{91}$ との間に普通ポルトランドセメントとほぼ同様の関係が確認された。

以上の検討結果および告示1102号の第一の二に基づき材齢91日のコア強度を設計基準強度(下限値)、打込時の温度を打ち込んだ後の養生期間中の(予想)平均気温に読み替えると、表3.5.4に示すように、 $_{28}S_{91}$ をセメントの種類、設計基準強度、養生期間中の平均気温の組み合わせで表すことができる。

参考文献

- 1) 佐藤幸恵、柘田佳寛：各種セメントを用いたコンクリートの構造体における強度発現と強度補正值、日本建築学会構造系論文集、Vol.73、No.630、pp.1219-1224、2008.8

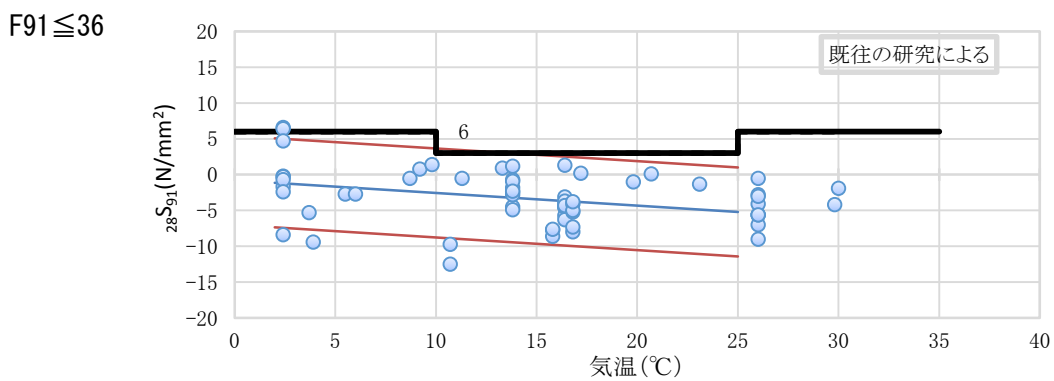
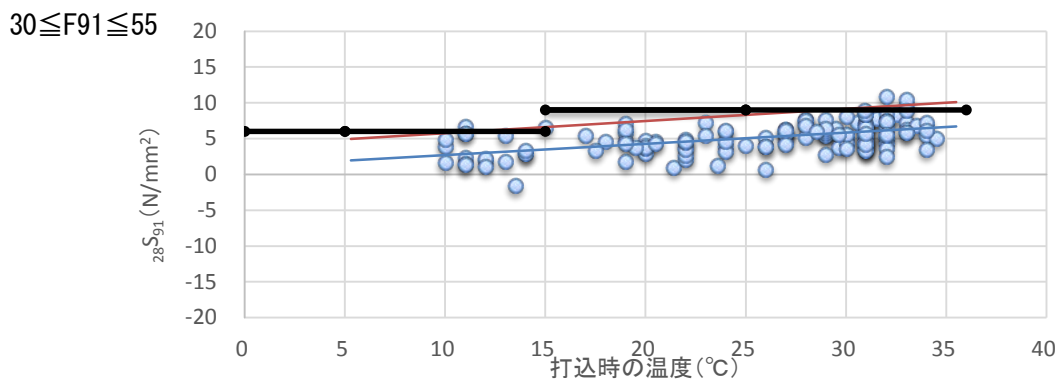
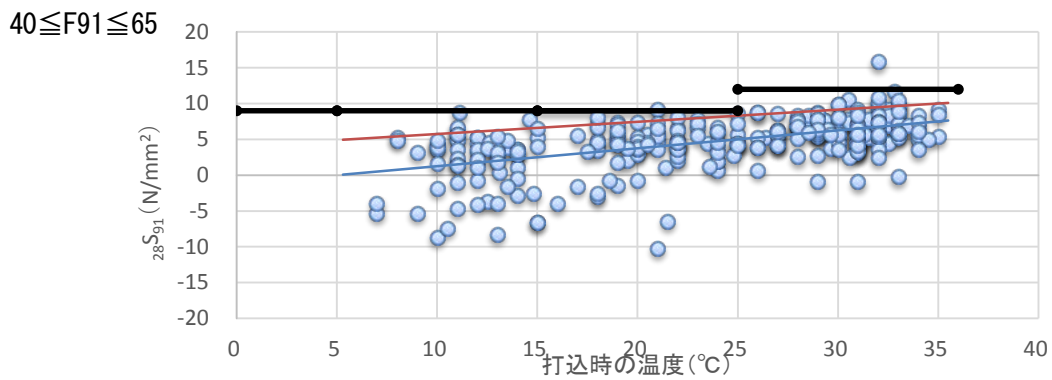
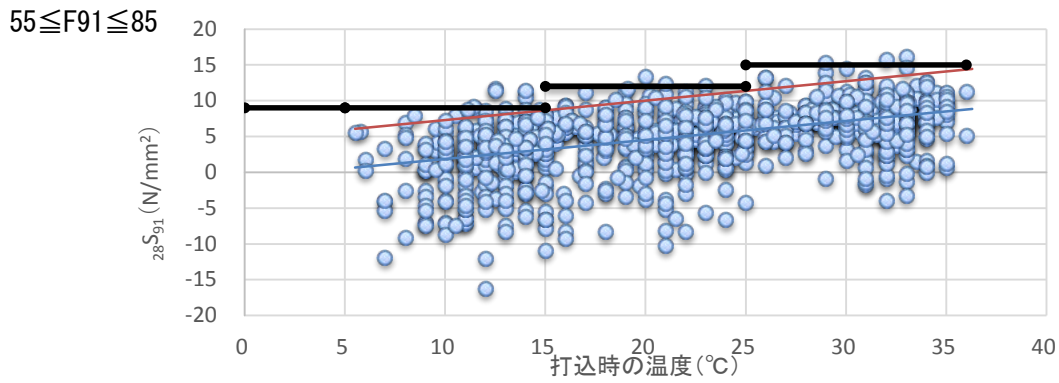


図 3.5.48 打込時の温度と 28S₉₁ の関係 (普通ポルトランドセメント)
(F₉₁ は材齢 91 日のコア強度)

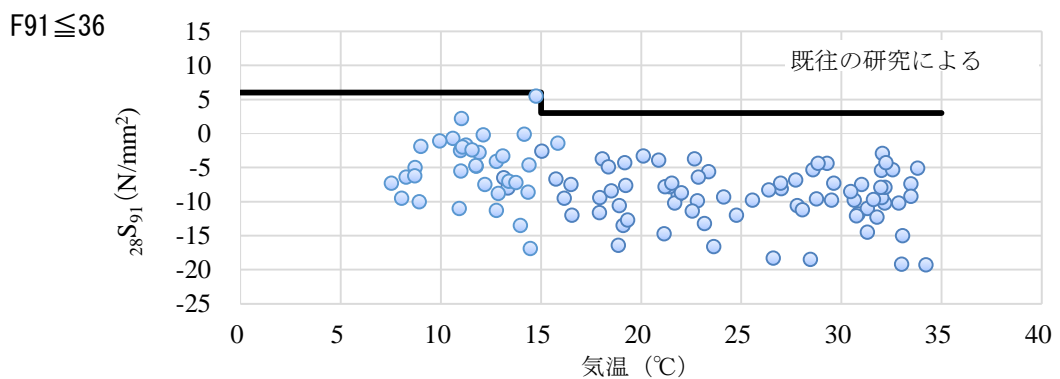
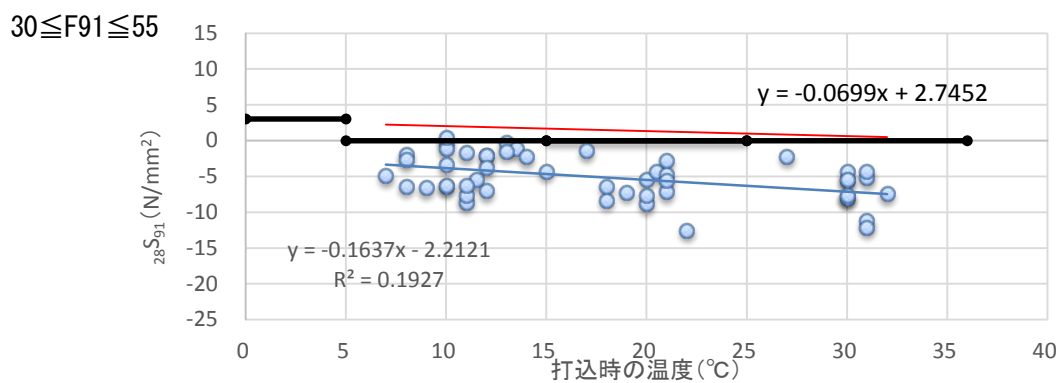
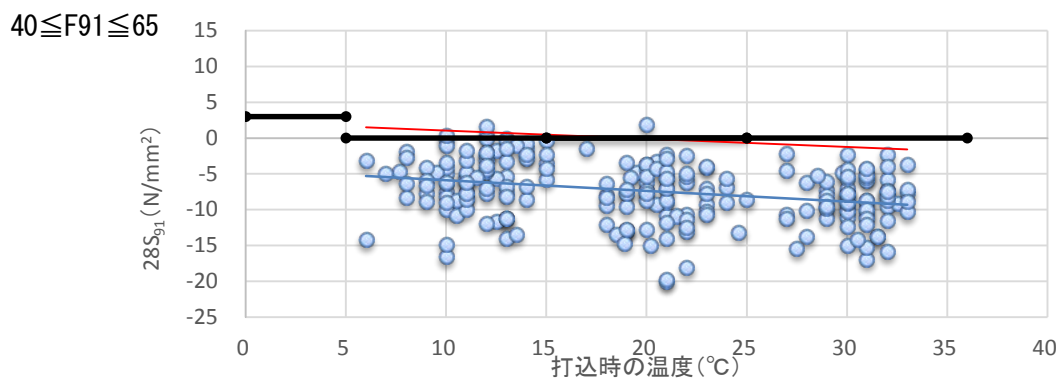
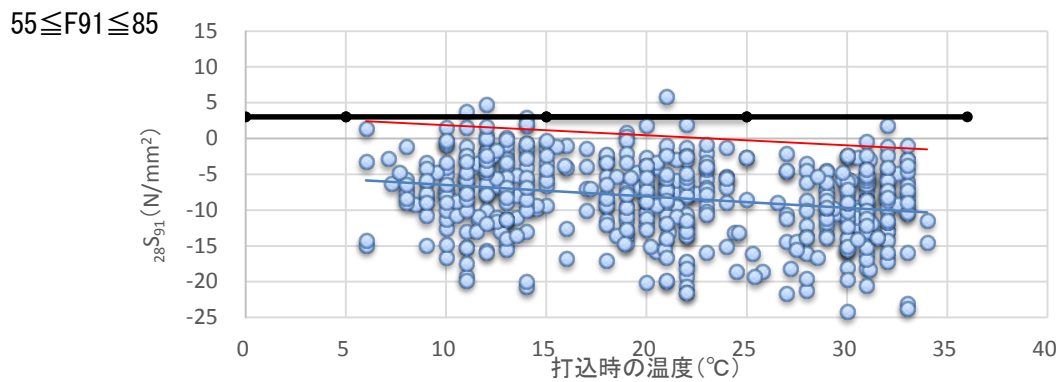


図 3.5.49 打込時の温度と 28S₉₁ の関係 (低熱ポルトランドセメント)
(F₉₁ は材齢 91 日のコア強度)

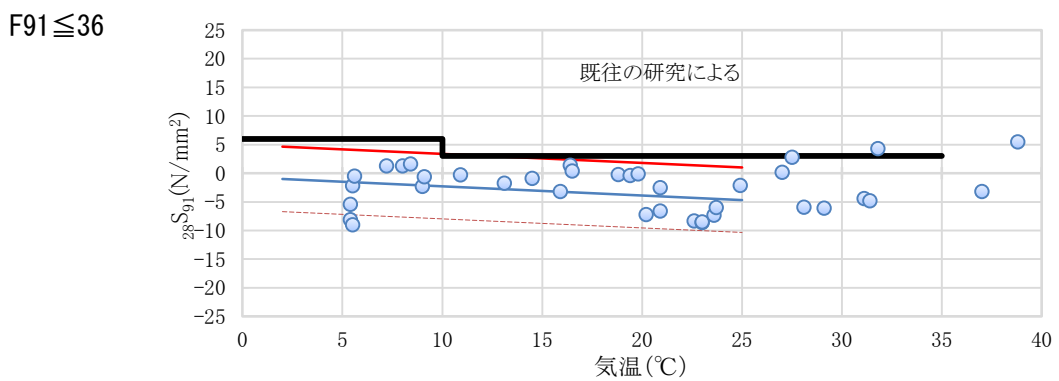
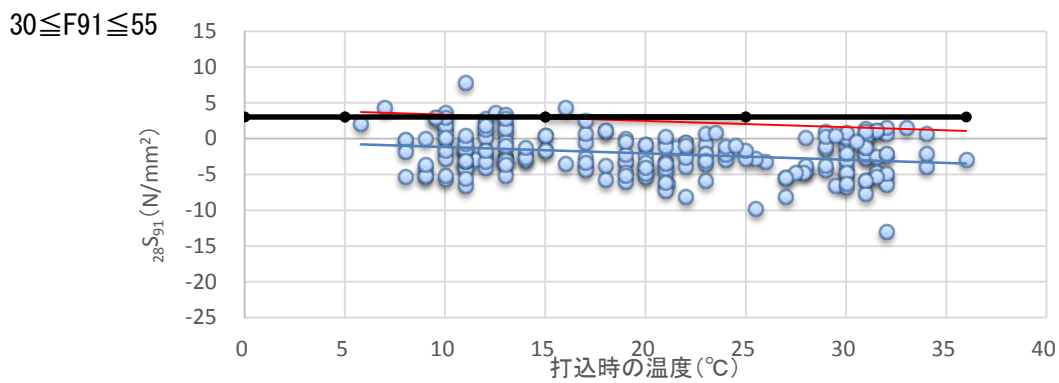
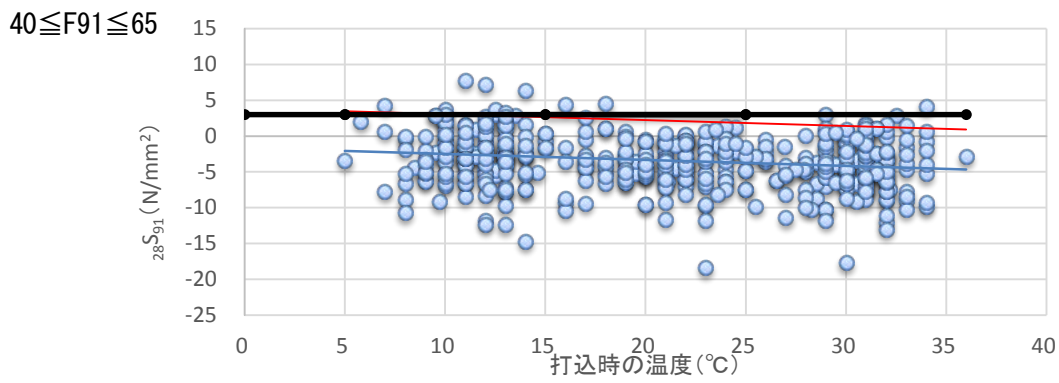
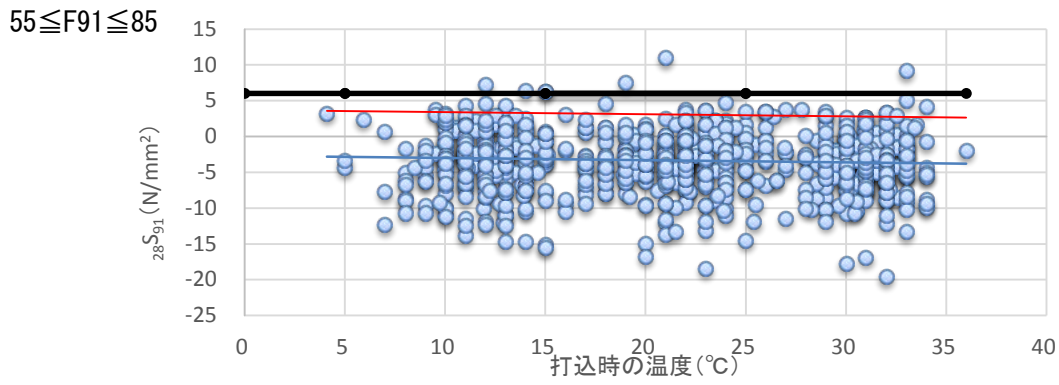


図 3. 5. 50 打込時の温度と $_{28}S_{91}$ の関係 (中庸熟ポルトランドセメント)
(F₉₁ は材齢 91 日のコア強度)

F91 ≦ 36

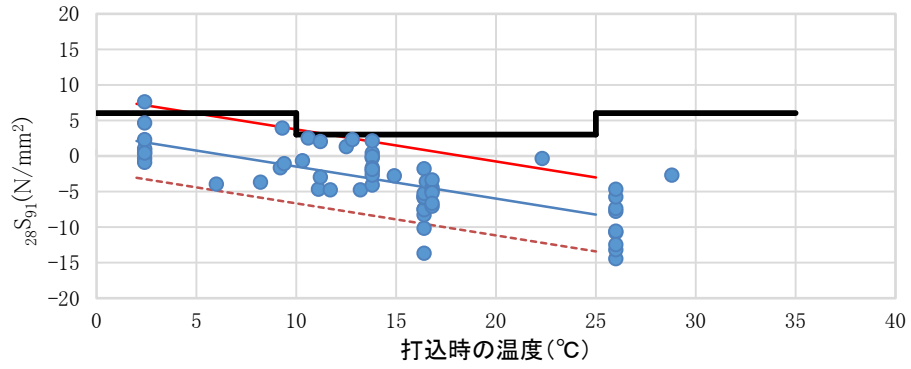


図 3.5.51 打込時の温度と $_{28}S_{91}$ の関係 (フライアッシュセメント B 種)
(F_{91} は材齢 91 日のコア強度)

F91 ≦ 36

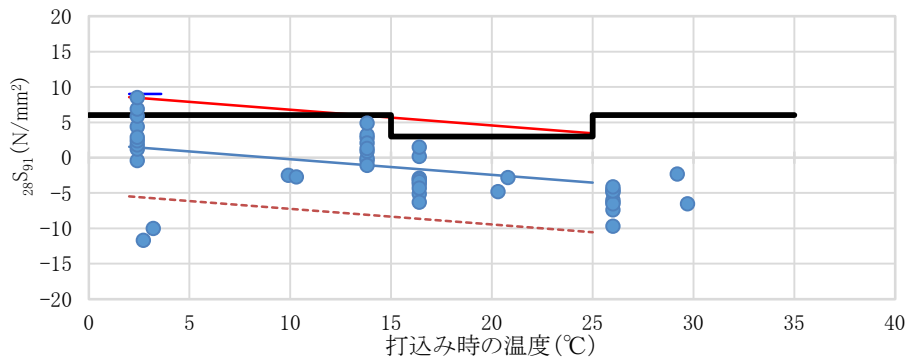


図 3.5.52 打込時の温度と $_{28}S_{91}$ の関係 (高炉セメント B 種)
(F_{91} は材齢 91 日のコア強度)

表 3.5.4 セメントの種類、設計基準強度および養生期間中の平均気温別の $_{28}S_{91}$ の例

セメントの種類	設計基準強度 (F_c : N/mm ²)	養生期間中の 平均気温 (θ : °C)	構造体強度 補正值 (S : N/mm ²)
普通ポルトランドセメント	$F_c \leq 36$	$\theta < 10$	6
		$10 \leq \theta < 25$	3
		$25 \leq \theta$	6
	$36 < F_c \leq 48$	$\theta < 15$	6
		$15 \leq \theta$	9
	$48 < F_c \leq 60$	$\theta < 25$	9
		$25 \leq \theta$	12
	$60 < F_c \leq 80$	$\theta < 15$	9
		$15 \leq \theta < 25$	12
$25 \leq \theta$		15	
早強ポルトランドセメント	$F_c \leq 36$	$\theta < 5$	6
		$5 \leq \theta$	3
中庸熱ポルトランドセメント	$F_c \leq 36$	$\theta < 10$	6
		$10 \leq \theta$	3
	$36 < F_c \leq 60$	—	3
	$60 < F_c \leq 80$	—	6
低熱ポルトランドセメント	$F_c \leq 36$	$\theta < 15$	6
		$15 \leq \theta$	3
	$36 < F_c \leq 60$	$\theta < 5$	3
		$5 \leq \theta$	0
	$60 < F_c \leq 80$	—	3
高炉セメントB種	$F_c \leq 36$	$\theta < 15$	6
		$15 \leq \theta < 25$	3
		$25 \leq \theta$	6
フライアッシュセメントB種	$F_c \leq 36$	$\theta < 10$	6
		$10 \leq \theta < 25$	3
		$25 \leq \theta$	6

3.6 水和反応モデルによる高強度コンクリートの強度発現の解析

3.6.1 はじめに

コンクリートの強度発現挙動を検討する際の基礎データを得る事を目的に、水和反応モデルにもとづく試算を検討した。なお、本解析は今後どのような計算が必要となるか議論のための試算である。

3.6.2 解析概要

試算に用いたモデルは、CCBM3 と呼ばれる名古屋大学で開発している計算コードで、原子力分野での特殊環境（高温、放射線環境下など）における長期強度・剛性・収縮などを予測することを目的としたものである。名古屋大学で過去に実施した 3000 体以上のセメントペースト試験体の水和と物性値との関係が評価できる関数系が組み込まれている。コンクリートについても、最新版は、骨材種類の違いが物性に及ぼす影響を考慮可能としている。ただし、現時点ではまだ外部へ論文公開がなされていない。なお、本解析手法はペーストについては、絶対強度についても実績があるが、コンクリートについては、28 日強度の絶対値を予測することができない。空気量、骨材寸法・形状・粒度分布がコンクリート強度に及ぼす影響について未解決なためである。ただし、28 日に対する比、などについては検証事例があり、比較的現実的な値が得られる。その点に留意して結果を評価する必要がある。

3.6.3 試算の結果

水セメント比 0.55 と 0.30 の普通コンクリートについて、粗骨材を石灰石（線膨張係数 $=3\mu\text{fC}$ ）と粘土鉱物を含む砂岩（ $9\mu\text{fC}$ ）として計算を実施した（図 3.6.1 および図 3.6.2）。いずれも単位水量はコンクリート換算で $180\text{kg/m}^3\text{-conc.}$ である。なお、普通セメントには、JIS で混合が認められている混合材 5%が入っていないため、普通セメントの種類の中ではもっとも強度の増進が順調なケースとなっている。石灰石微粉末が入っている場合、アルミネート相およびフェライト相の水和が高温でゲル状物質を生成して停滞してしまうため、温度履歴条件に依存して著しく強度が低下する場合がある。

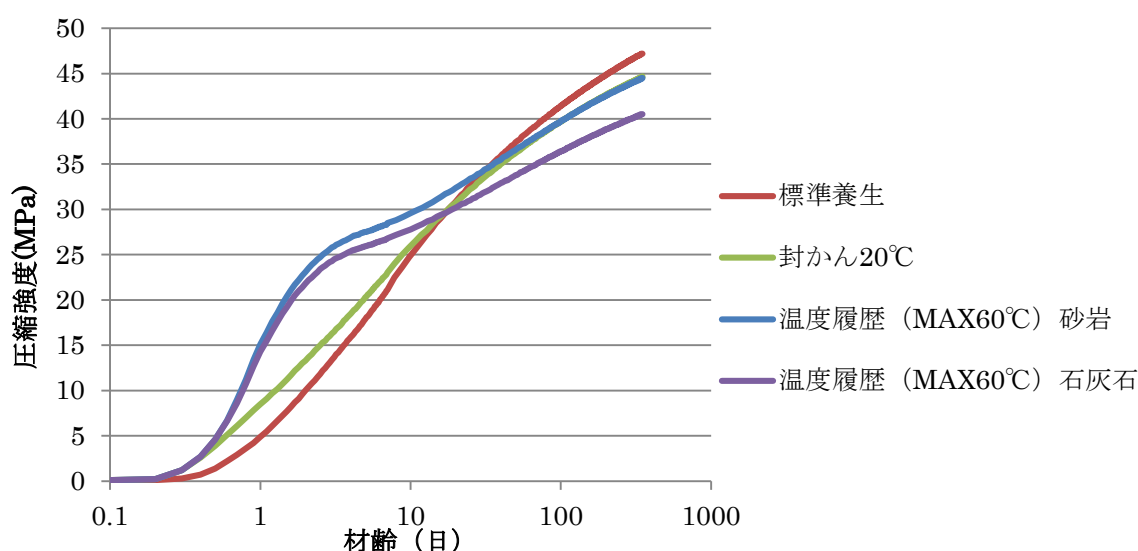


図 3.6.1 W/C=0.55 普通コンクリートの強度増進傾向

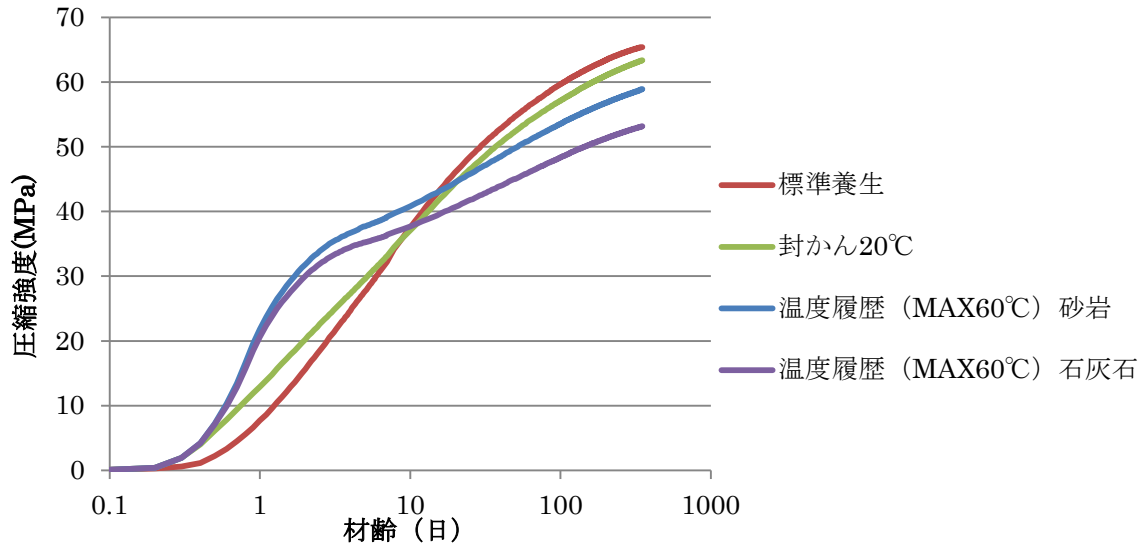


図 3.6.2 W/C=0.30 の普通コンクリートの強度増進傾向

- ・ 封かんと標準養生において初期の強度発現が異なり、封かんの強度発現の方が早くなっているのは、封かんの方がセメントペースト中の細孔溶液のカルシウム濃度の増大が早くなるためである。実際は、有限の大きさの試験体なのでここまで早くなるとは考えられない。
- ・ W/C=0.55 の場合、封かんと標準養生の湿潤条件の影響は、材齢 28 日までほとんどみられない。W/C=0.30 の場合、材齢 14 日程度までみられない。その後は、自己乾燥の影響でセメントの水和と強度増進が封かん試験体の方が若干停滞する。
- ・ 骨材によって強度発現が異なるのは、モルタルと骨材の体積変化（自己収縮ひずみ+温度ひずみ）が異なると骨材周囲に損傷あるいは空隙が生じるというメカニズムがあるからである。石灰石の場合、温度上昇中にその損傷・空隙が累積する傾向にあり、特に W/C=0.30 のケースでその影響が顕著になる。これは、モルタル量が増えるからである。

次に、水セメント比 0.22、0.27、0.32、0.37 の普通コンクリートについて、4 種類のセメントの場合について水中養生とマスコン（いずれも最高温度 60°C）として計算を行った。なお、粗骨材は粘土鉱物を含む砂岩（9 μ/C）とした。いずれも単位水量はコンクリート換算で 175kg/m³-conc. である。

セメントの物性を表 3.6.1 に、各調合条件を表 3.6.2 に示す。解析結果を図 3.6.3~3.6.18 に示す。なお、図中の 20c は水中養生の場合を、60 は最高温度 60°C を想定したマスコンの場合を示す。

表 3.6.1 セメントの物性値

物性値 (鉱物組成、他)	セメントの種類			
	M1	M2	M3	M4
Cement Composition C ₃ S (%)	48.05	40.05	32.05	24.05
Cement Composition C ₂ S (%)	32.76	40.76	48.76	56.76
Cement Composition C ₃ A (%)	3.69	3.69	3.69	3.69
Cement Composition C ₄ AF (%)	12.35	12.35	12.35	12.35
Cement Composition GYP (%)	3.48	3.48	3.48	3.48
Cement Composition CC (%)	0.0	0.0	0.0	0.0
Cement Composition SF (%)	0.0	0.0	0.0	0.0
Cement Composition BFS (%)	0.0	0.0	0.0	0.0
Cement Composition FA (%)	0.0	0.0	0.0	0.0
Blain	2600.0	2600.0	2600.0	2600.0
Initial Temperature (K)	293.0	293.0	293.0	293.0

表 3.6.2 コンクリートの条件および材料物性

		調合の種類			
		M1	M2	M3	M4
調合	単位水量 (kg/m ³)	175.0	175.0	175.0	175.0
	単位セメント量 (kg/m ³)	795.0	648.0	547.0	473.0
	単位細骨材量 (kg/m ³)	558.0	676.0	760.	821.0
	単位粗骨材量 (kg/m ³)	926.0	926.0	926.0	926.0
	空気量 (L/m ³)	20.0	20.0	20.0	20.0
密度	水 (g/mm ³)	1.0	1.0	1.0	1.0
	セメント (g/mm ³)	3.16	3.16	3.16	3.16
	細骨材 (g/mm ³)	2.58	2.58	2.58	2.58
	粗骨材 (g/mm ³)	2.70	2.70	2.70	2.70
熱量	水 (J/gK)	4.185	4.185	4.185	4.185
	セメント (J/gK)	0.780	0.780	0.780	0.780
	細骨材 (J/gK)	0.800	0.800	0.800	0.800
	粗骨材 (J/gK)	0.800	0.800	0.800	0.800

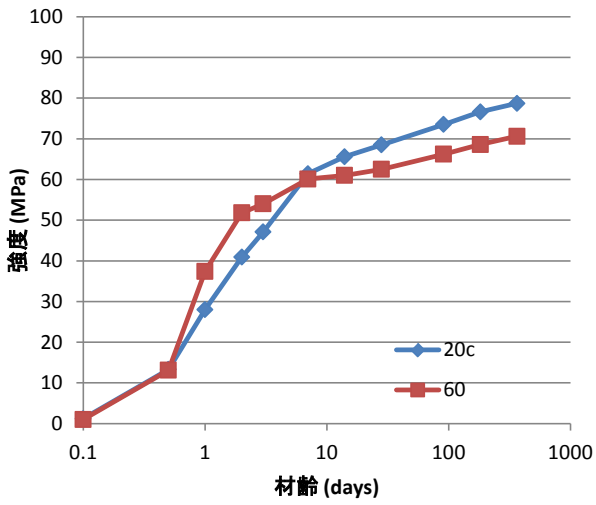


图 3.6.3 解析結果 (W/C0.22 M1)

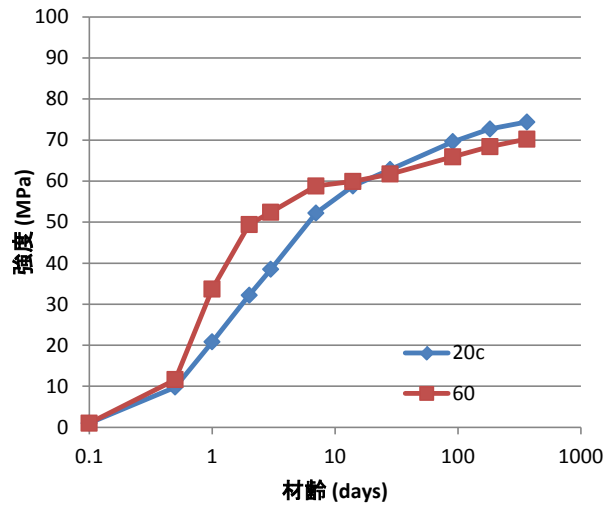


图 3.6.4 解析結果 (W/C0.22 M2)

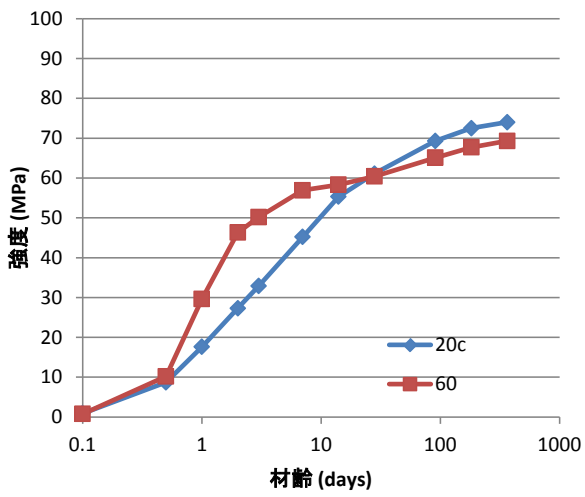


图 3.6.5 解析結果 (W/C0.22 M3)

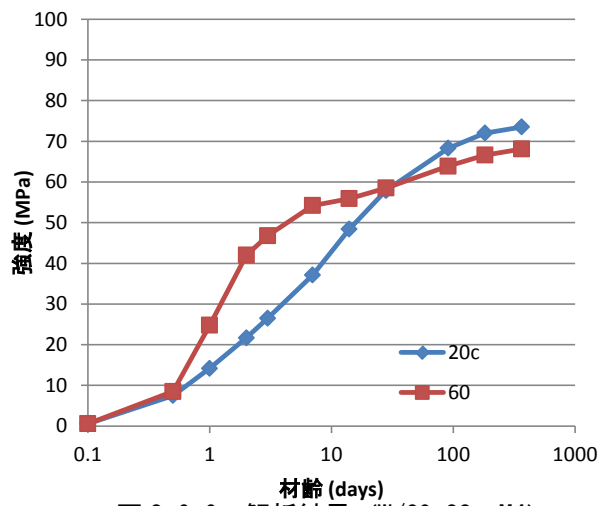


图 3.6.6 解析結果 (W/C0.22 M4)

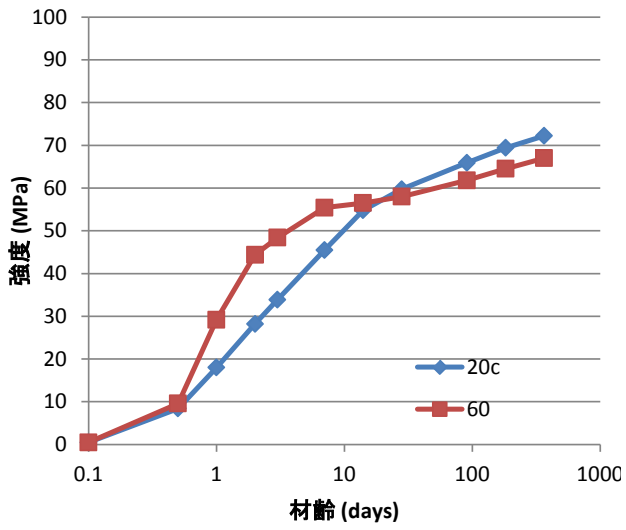


图 3.6.7 解析結果 (W/C0.27 M1)

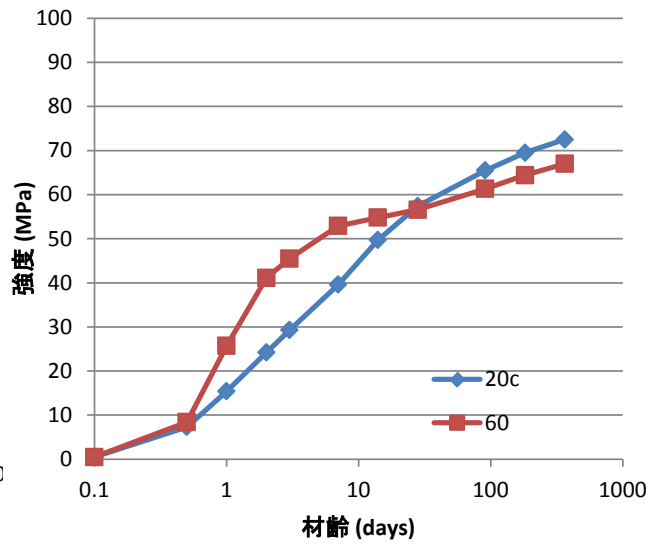


图 3.6.8 解析結果 (W/C0.27 M2)

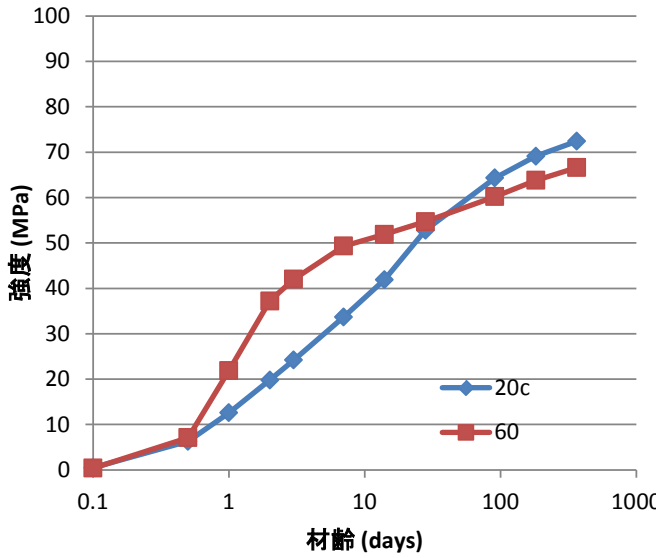


图 3.6.9 解析結果 (W/C0.27 M3)

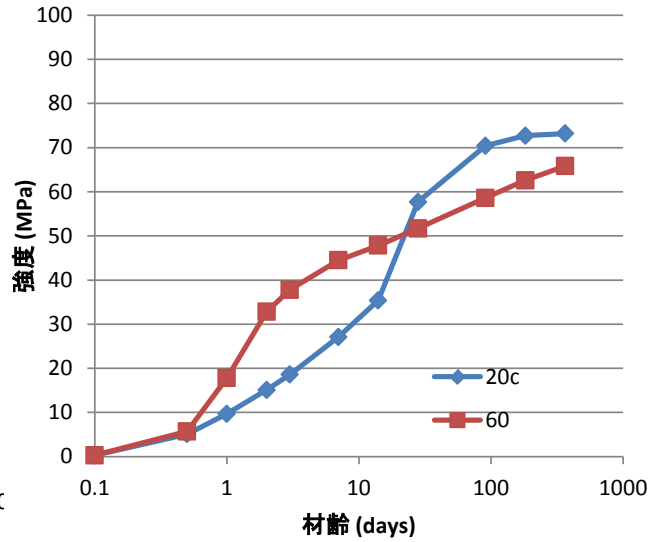


图 3.6.10 解析結果 (W/C0.27 M4)

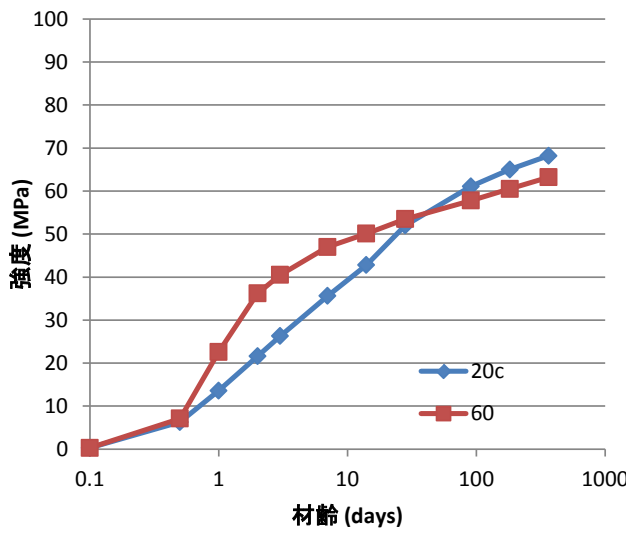


图 3.6.11 解析結果 (W/C0.32 M1)

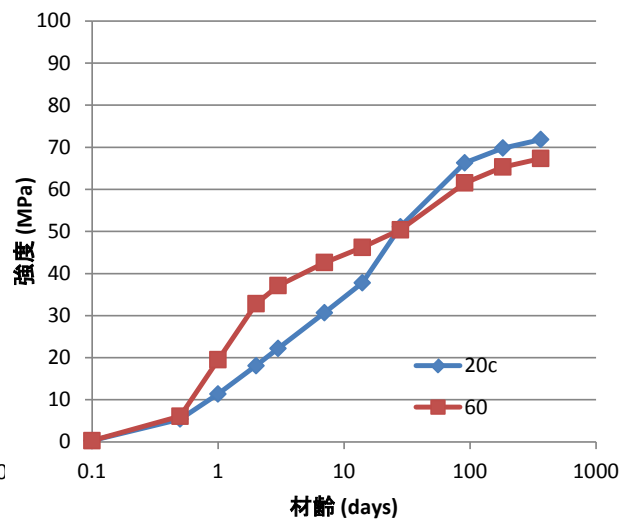


图 3.6.12 解析結果 (W/C0.32 M2)

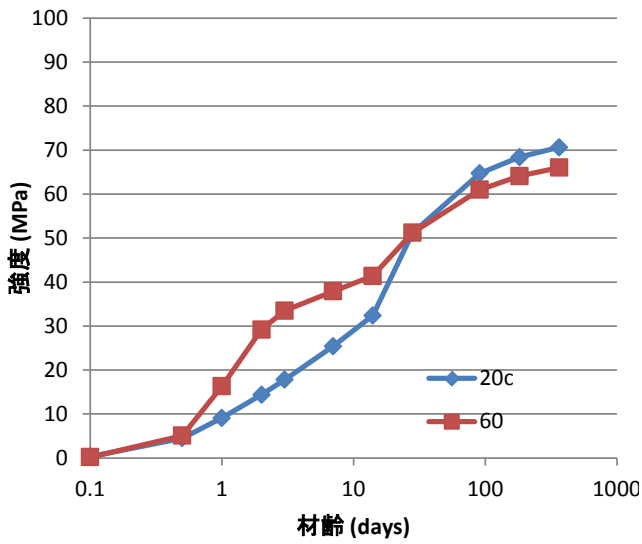


图 3.6.13 解析結果 (W/C0.32 M3)

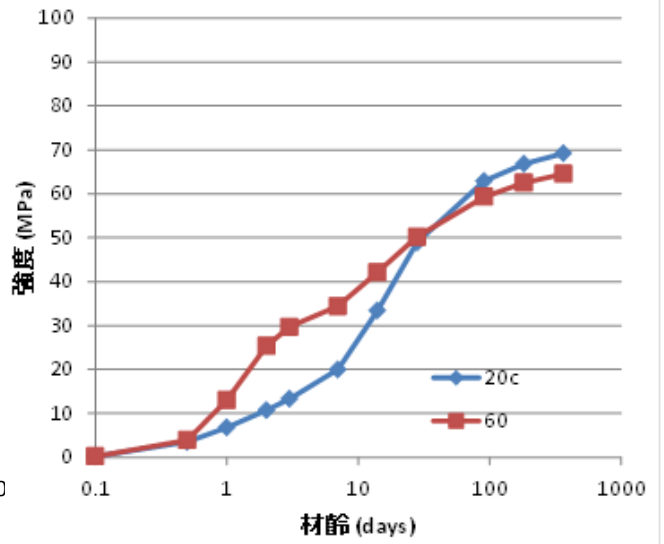


图 3.6.14 解析結果 (W/C0.32 M4)

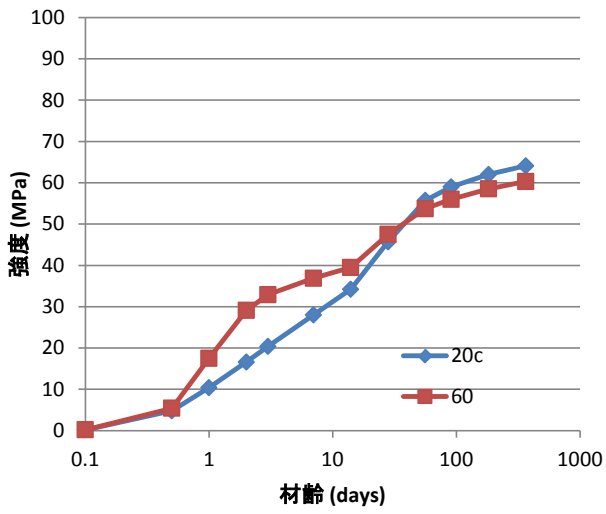


图 3.6.15 解析結果 (W/C0.37 M1)

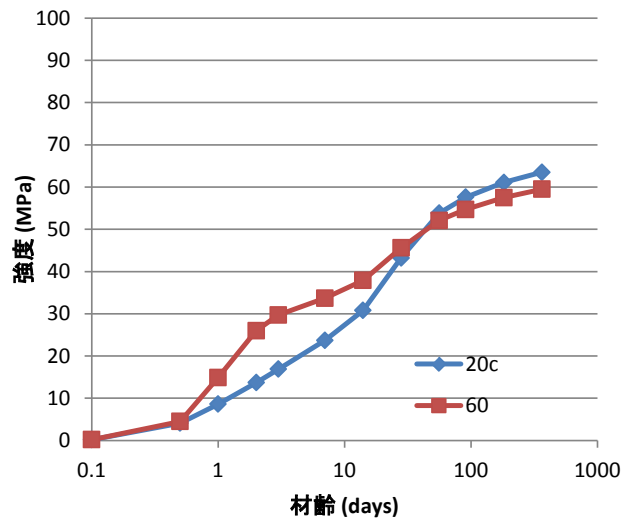


图 3.6.16 解析結果 (W/C0.37 M2)

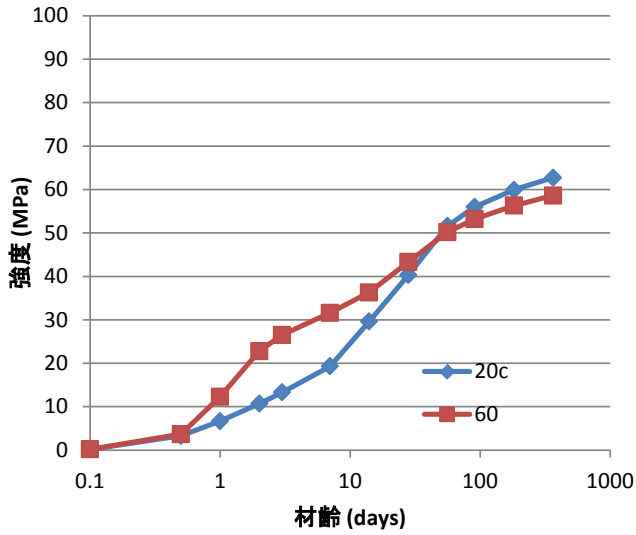


图 3.6.17 解析結果 (W/C0.37 M3)

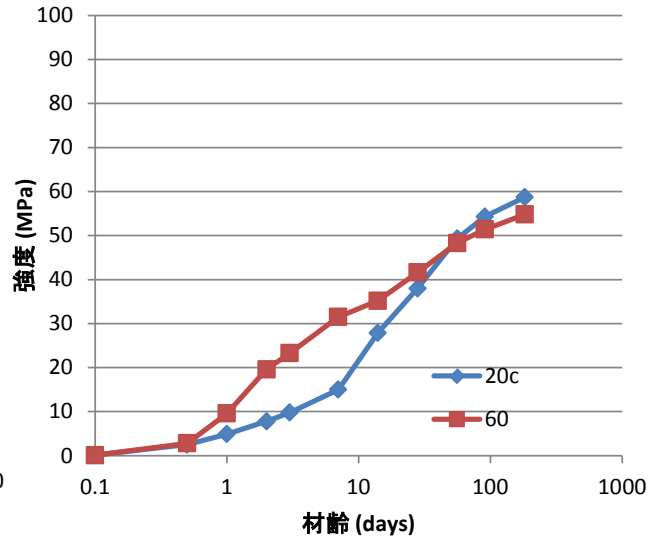


图 3.6.18 解析結果 (W/C0.37 M4)

次に、現状のセメントの化学組成に近い材料条件および高温履歴を生じる場合についての解析結果を示す。調合条件は本研究において実施した実験の調合を用いた。温度履歴は、各セメントの種類に応じて以下の通りとした。

- a) 普通ポルトランドセメント
 - 夏期（練上がり温度 30℃、最高温度 85℃、収斂温度 30℃）、
 - 標準期（練上がり温度 20℃、最高温度 70℃、収斂温度 20℃）
 - 冬期（練上がり温度 10℃、最高温度 55℃、収斂温度 10℃）
- b) 低熱ポルトランドセメント
 - 夏期（練上がり温度 30℃、最高温度 75℃、収斂温度 30℃）
 - 標準期（練上がり温度 20℃、最高温度 60℃、収斂温度 20℃）
 - 冬期（練上がり温度 10℃、最高温度 45℃、収斂温度 10℃）
- c) 中庸熱ポルトランドセメント
 - 夏期（練上がり温度 30℃、最高温度 80℃、収斂温度 30℃）
 - 標準期（練上がり温度 20℃、最高温度 65℃、収斂温度 20℃）
 - 冬期（練上がり温度 10℃、最高温度 50℃、収斂温度 10℃）

図 3.6.19 に設定した温度条件の履歴勾配を示す。また、表 3.6.9 に使用したセメントの鉱物組成を、表 3.6.10 に調合条件を示す。これらの入力条件による解析結果を図 3.6.20～3.6.25 に示す。図 3.6.20～3.6.25 に示す強度発現の経時変化と 4 章に示す強度発現の経時変化（図 4.3.3）を比較すると類似した傾向が得られていることがわかる。

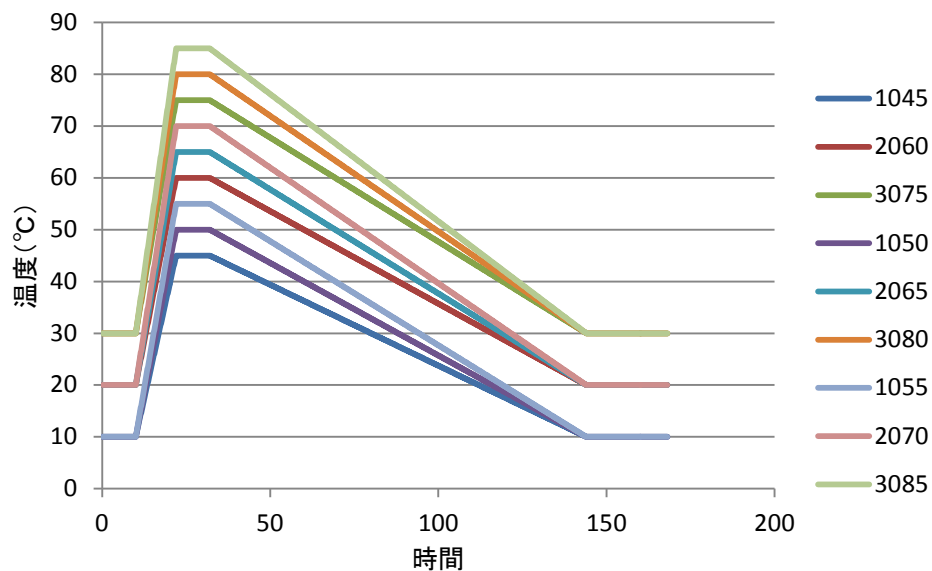


図 3.6.19 温度履歴勾配

表 3. 6. 9 セメントの物性値

物性値 (鉱物組成、他)	セメントの種類		
	普通	中庸熱	低熱
Cement Composition C ₃ S (%)	51.0	43.0	37.0
Cement Composition C ₂ S (%)	25.0	36.0	59.0
Cement Composition C ₃ A (%)	9.0	5.0	2.0
Cement Composition C ₄ AF (%)	8.0	12.0	8.0
Cement Composition GYP (%)	4.0	4.0	4.0
Cement Composition CC (%)	3.0	0.0	0.0
Cement Composition SF (%)	0.0	0.0	0.0
Cement Composition BFS (%)	0.0	0.0	0.0
Cement Composition FA (%)	0.0	0.0	0.0
Blain	3.600.0	3.600.0	3500.0
Initial Temperature (K)	293.0	293.0	293.0

表 3. 6. 10 コンクリートの条件および材料物性

		調合の種類							
		普通		中庸熱			低熱		
調合	水セメント比	30	40	25	30	40	25	30	30
	単位水量 (kg/m ³)	170.0	170.0	170.0	170.0	170.0	165.0	165.0	165.0
	単位セメント量 (kg/m ³)	567.0	425.0	680.0	425.0	425.0	704.0	550.0	412.0
	単位細骨材量 (kg/m ³)	767.0	876.0	675.0	775.0	883.0	704.0	804.0	907.0
	単位粗骨材量 (kg/m ³)	851.0	851.0	851.0	851.0	851.0	851.0	851.0	851.0
	空気量 (L/m ³)	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
密度	水 (g/mm ³)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	セメント (g/mm ³)	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16	3.16
	細骨材 (g/mm ³)	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61
	粗骨材 (g/mm ³)	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70
熱量	水 (J/gK)	4.185	4.185	4.185	4.185	4.185	4.185	4.185	4.185
	セメント (J/gK)	0.780	0.780	0.780	0.780	0.780	0.780	0.780	0.780
	細骨材 (J/gK)	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800
	粗骨材 (J/gK)	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800

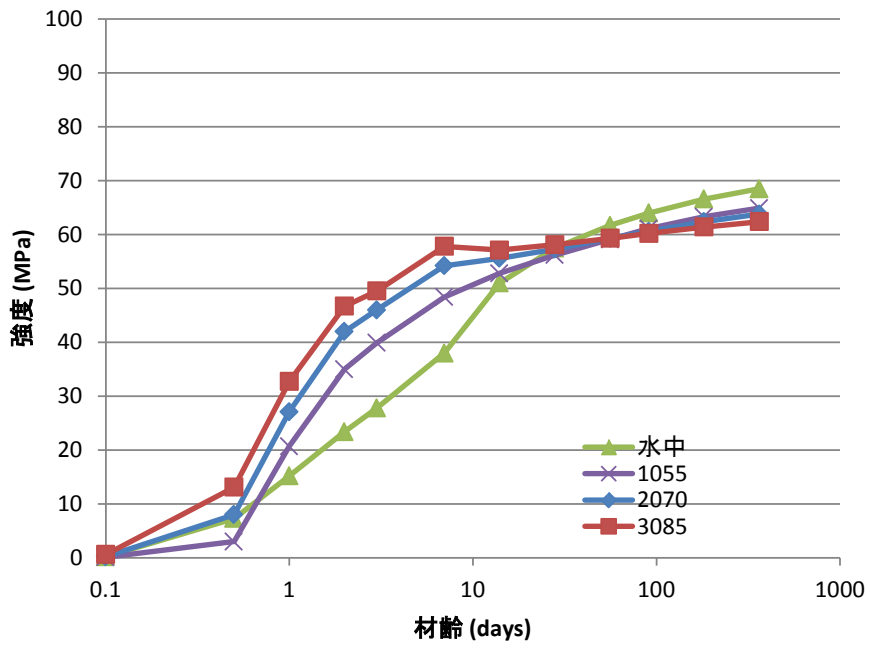


図 3.6.20 解析結果 (N40)

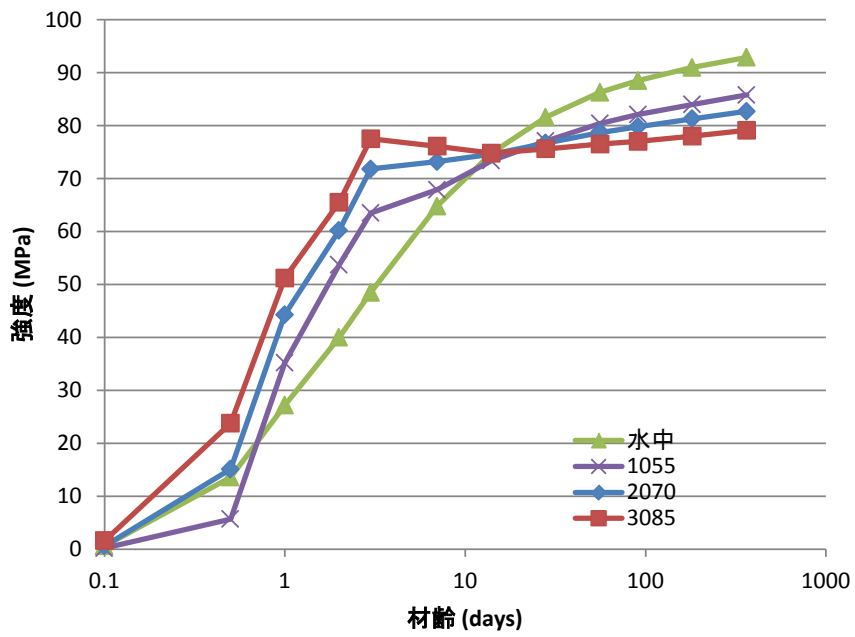


図 3.6.21 解析結果 (N30)

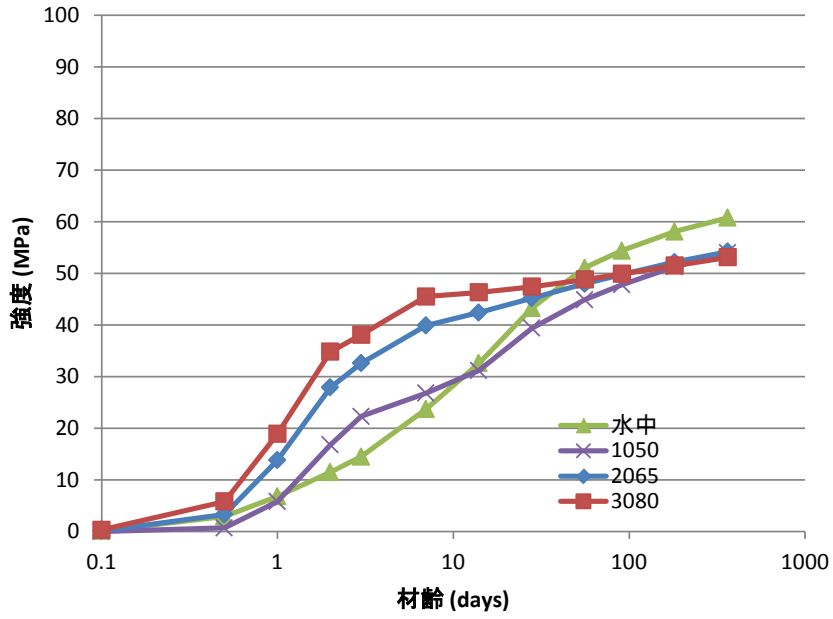


图 3.6.22 解析結果 (M30)

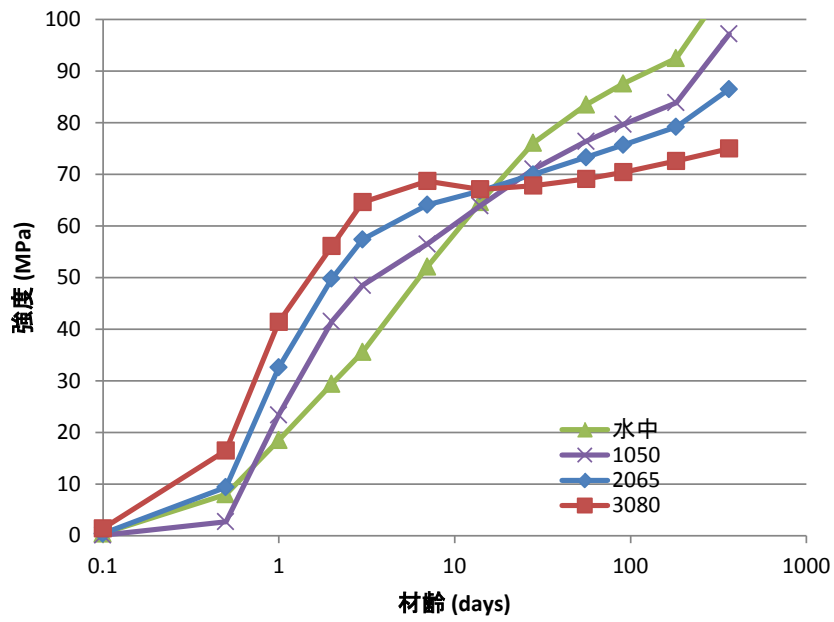


图 3.6.23 解析結果 (M25)

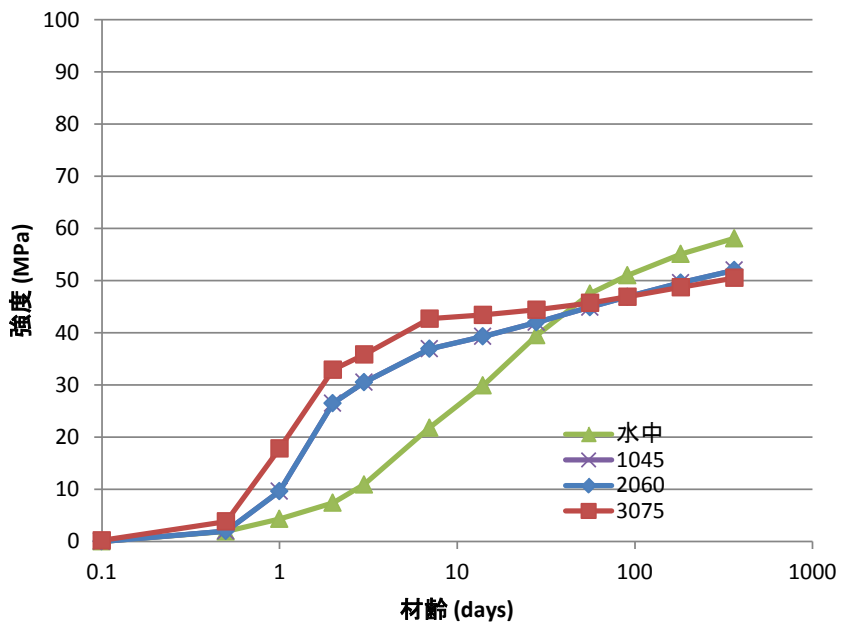


图 3.6.24 解析結果 (L40)

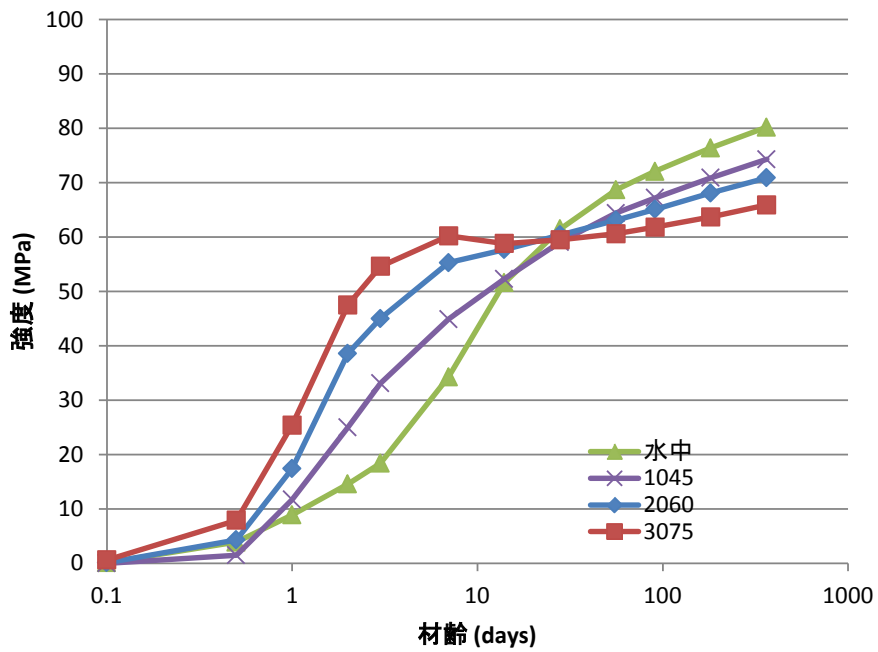


图 3.6.25 解析結果 (L30)

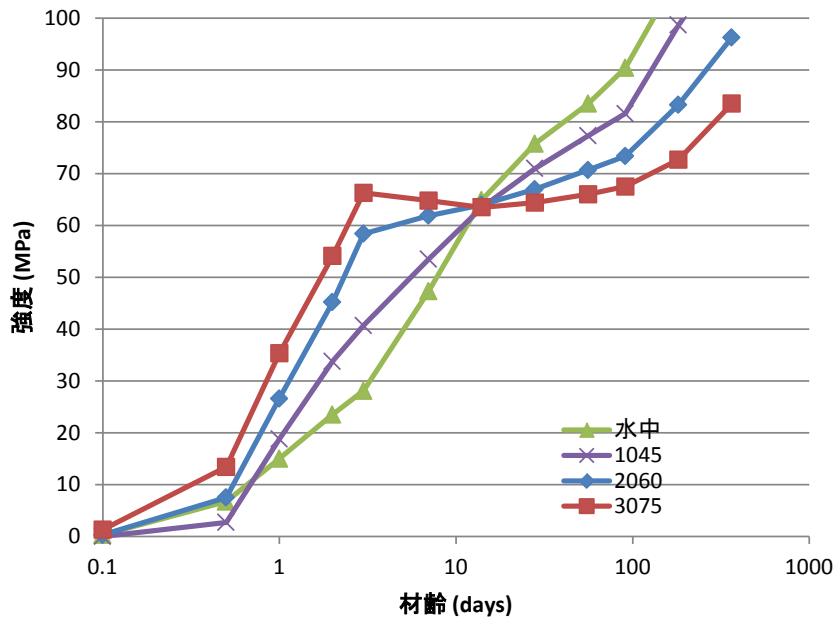


图 3.6.25 解析結果 (L25)