

季節変動に対応した配合設計方法・統計的手法の提案

○横山剛之*1 辛崎秀剛*1 向田史朗*1 橋田浩幸*1 砂田栄治*1

要旨：硬化コンクリートの耐久性確保の観点から単位水量と水セメント比を一定とし、修正標準配合（コンクリート温度等による標準配合の修正）の配合設計方法を確立することを目的に、①試験室と実機の試し練りによる圧縮強度差、②夏期と冬期におけるスランプ、空気量および圧縮強度の90分までの経時変化、③製品の年間圧縮強度変化と変動の把握を行った。これらを基に、合理的なレディーミクストコンクリートの配合設計方法、修正標準配合作成方法および統計的手法の提案をした。

キーワード：配合設計方法、修正標準配合、単位水量、圧縮強度、統計的手法

1. はじめに

広島県生コンクリート工業組合 技術委員会 品質技術部会では、購入者からの品質に対する要求（荷卸し時におけるワーカビリティの確保、強度保証および耐久性確保等）に四季を通じて応じることができる配合設計方法として、単位水量および水セメント比を一定とする新しい配合設計方法の提案を行うため、検証実験を行った。本論文では、その実験結果と提案内容の概要を述べる。

2. 実験の概要

2.1 室内と実機の圧縮強度差

室内と実機の圧縮強度（以下、強度）差は、広島地区生コンクリート協同組合技術委員会が実施した「全配合高性能 AE 減水剤使用コンクリート標準化実験」の実験結果を採用した。実験の実施時期は標準期で、両者のコンクリート温度は $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ を条件とし、同一ロットの原材料を用い、水セメント比35~65%の5水準、実機の試料採取は小型アジテータ車に積載した生コン 2m^3 を練混ぜ後60分とした。

2.2 実機による経時変化試験

(1) 経時変化試験方法

試験は2年間にわたり行い、初年度において1工場の夏期・冬期の実験結果から新しい配合設計手法の方向性を定めた。次年度においては、その配合設計方法の妥当性を6工場で検証した。

初年度の配合は30-18-20 N ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤（以下、建築配合）と、24-10-20 BB ポリカルボン酸系の AE 減水剤高機能タイプ（以下、土木配合）の2種類である。なお、次年度は建築配合を27-18-20 Nに変更した。

練混ぜ量は 2m^3 とし、骨材の表面水率を練混ぜ直前に計量ゲートで採取し測定した。試料採取は小型アジテータ車に積載した生コンを工程検査として練混ぜ後5・10・15分、製品検査として30・60・90分で採取し、スランプ、空気量および

*1 広島県生コンクリート工業組合 技術委員会 品質技術部会

強度試験（15・60・90分）を行った。なお、次年度の工程検査は5分のみとした。

(2) 圧縮強度用供試体の保管方法

工程検査の供試体は屋内（約20℃に管理）で48時間ラップをして保管し、その後キャッピングを行い標準養生とした。

製品検査の供試体は60分と90分で各2組（屋内保管と屋外保管）を採取した。屋外保管は十分に湿らせた養生マットで保護して48時間屋外で保管し、その後キャッピングを行い標準養生とした。屋内保管は工程検査と同様の保管・養生を行った。

2.3 製品実績における年間圧縮強度の変動

製品における四季を通じた強度の変動把握は、約1年間継続した大型の土木工事における1配合で行った。

3. 実験結果および結果に基づく提案

3.1 室内と実機の圧縮強度差

室内と実機のセメント水比（以下、C/W）と強度の関係式（以下、関係式）は図-1のとおり。その強度差は4~6N/mm²程度あることを確認した。したがって、製品（実機）の関係式は、室内の関係式から切片を6程度減じることを提案した。

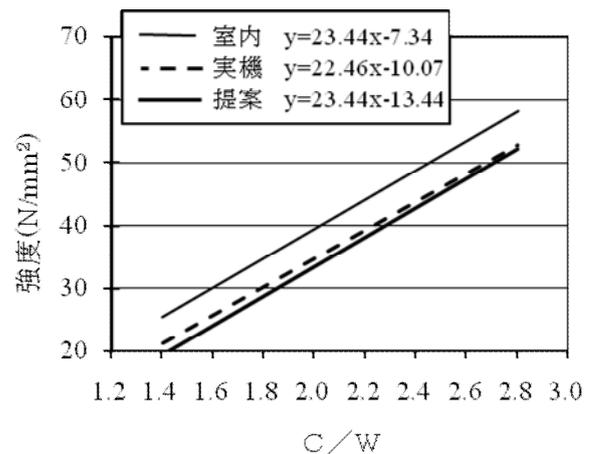


図-1 室内と実機の強度差

3.2 スランプおよび空気量の経時変化と修正標準配合

(1) 初年度実験結果

スランプの経時変化を図-2に示す。夏期の混和剤は遅延形を使用し、両配合とも0.70C×%の添加率、冬期は標準形で建築配合0.60C×%、土木配合0.48C×%とした。高性能AE減水剤（以下、HAE）およびAE減水剤高機能タイプ（以下、MAE）の種類の変更および添加率を調整することで、夏期・冬期ともに30分~60分程度まではスランプの経時変化を一定と考えて問題ないと判断できた。また、工程検査の5・10・15分でもスランプの経時変化量は僅かであり、次年度では工程検査の試料を5分のみとした。

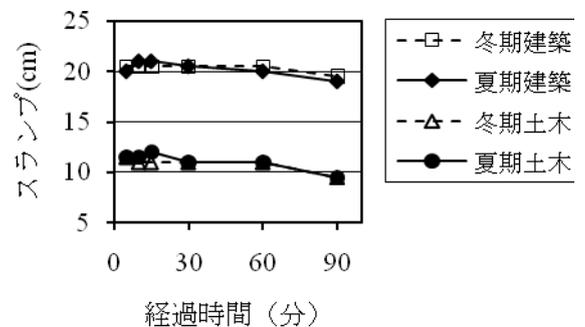


図-2 初年度スランプの経時変化

空気量の経時変化を図-3に示す。やや上昇傾向が伺えるものの特に定まった傾向はなく、3.0~5.4%の範囲で変化した。

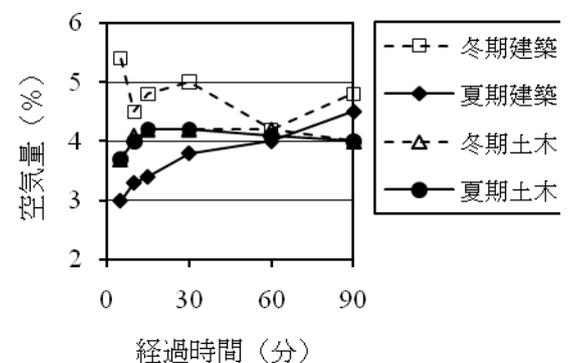


図-3 初年度空気量の経時変化

(2) 次年度実験結果

建築配合および土木配合とも製品60分で、スランプが2cmを超えて低下した割合は、6工場中4工場であった。建築配合のスランプ経時変化を図-4に示す。ここで、記号A~Fは工場を示し、A,45はA工場

において 45-18-20N HAE を実施した結果である。変化量が大きい工場は、比較的粒形の良い骨材を使用しており、HAE および MAE の添加率が小さいという特徴が見られた。したがって、特にスランプ低下が大きかった A 工場の建築配合で、コンクリート用化学混和剤協会中国ブロック会の協力を得て、スランプ保持能力の高い HAE 遅延形（以下、HAER）を用いスランプ変化の改善を試みた。

スランプ変化の改善結果を図-5に示す。HAER では夏期でも 90 分までスランプを保持できることが確認できた。なお、ここでは 30 分後の試料採取時のみ、高速攪拌を行っていないことで、スランプ変化量が大きいがこのことは、高速攪拌によるスランプ保持能力の消費という一因を排除する目的で行った。

空気量は土木配合で 2 工場を除き -1.0% ~ +0.5% の範囲となり、経過時間による傾向はなく、建築配合では -0.5% ~ +0.9% の範囲で経過時間とともに増加する傾向があった。

3.3 実機による圧縮強度の経時変化

(1) 初年度実験結果

初年度 1 工場における強度変化量を図-6 ~ 図-9 に示す。

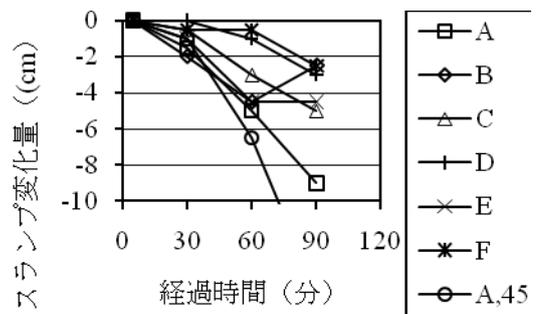


図-4 次年度建築配合のスランプ経時変化

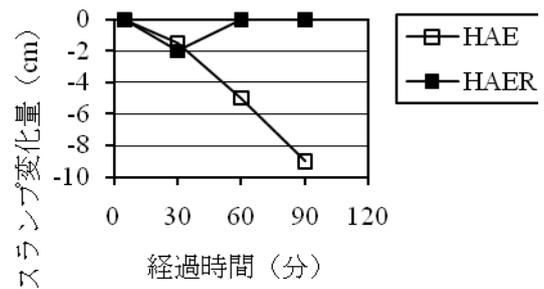


図-5 次年度建築配合のスランプ経時変化改善

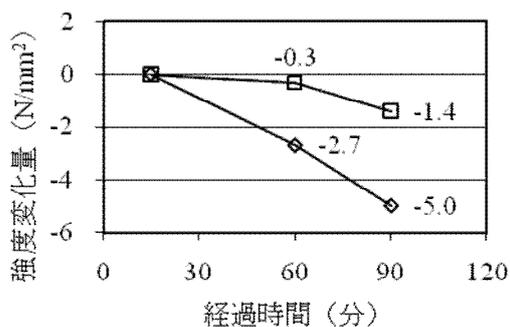


図-6 初年度夏期建築配合

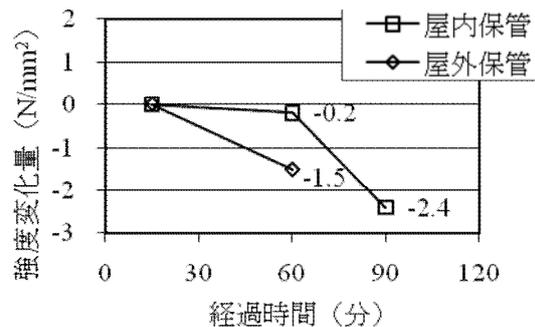


図-7 初年度夏期十木配合

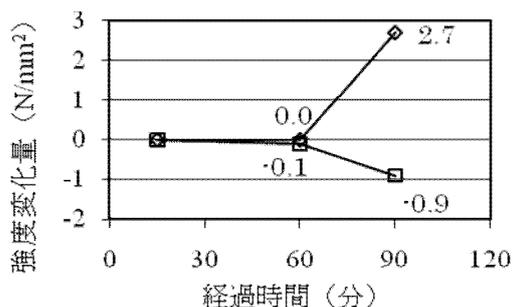


図-8 初年度冬期建築配合

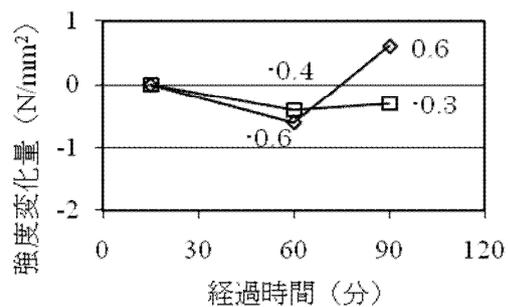


図-9 初年度冬期十木配合

夏期は時間が進むにつれ強度が低下し、その傾向は屋外保管で大きい。冬期は屋内保管の 60 分で強度低下がわずかに認められたが、屋外保管の 90 分では増加を確認した。なお、**図-7**の屋外保管 90 分は、供試体採取ミスによりデータがない。

強度は、コンクリート温度以外に標準養生までの供試体の保管環境温度に影響され、低温環境であるほど比較的緻密な繊維状の結晶が生成された¹⁾ことで増加したと判断される。また、試料採取時のコンクリート温度はほぼ一定であったことから、供試体の保管環境温度がほぼ一定でも、練混ぜから供試体採取までの経過時間が強度に影響を与えと考えられる。

以上のことより、強度保証上考慮しなければならない夏期の強度変化について、次年度に 6 工場で重点的検証実験を行うこととした。

(2) 次年度夏期実験結果

強度の変化は**(1)**で述べた初年度の夏期実験とほぼ同様の傾向が確認された。したがって、ここでは製品検査（屋外保管）の結果について述べる。

建築配合を**図-10**に、土木配合を**図-11**に示す。ここで、D,H は D 工場において 24-10-20 H MAE を実施した結果である。なお、C および D 工場については、両配合とも明らかに傾向が異なることから、図中の平均には含めていない。

建築配合は経過時間 60 分で平均強度が -3.6N/mm^2 、90 分で平均 -5.9N/mm^2 の変化が確認された。土木配合は建築配合に比べ、工場間のバラツキは大きいが、平均強度の変化は経過時間 60 分で -2.4N/mm^2 、90 分で -4.2N/mm^2 と小さかった。

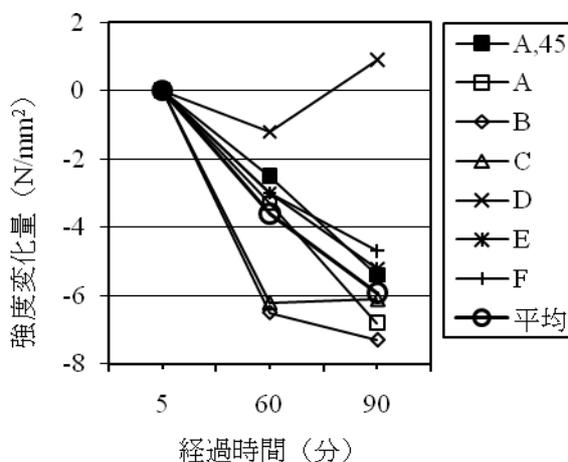


図-10 次年度建築配合

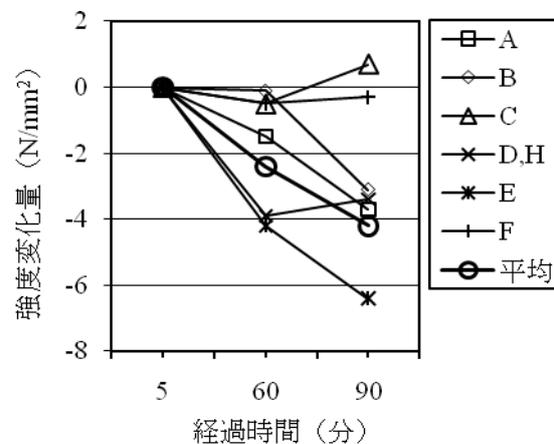


図-11 次年度土木配合

(3) 製品における年間の圧縮強度変化と変動

図-12は組合員工場より提供してもらった 1 配合の年間データである。これは MAE の添加率を調整して単位水量および水セメント比の安定化に向けた努力がなされた、荷卸し地点で採取（練混ぜ後 40~60 分）した供試体の強度である。夏期から冬期に向けて強度が大きくなり、冬期から夏期に向け強度が小さくなる傾向が明解である。

図-13は**図-12**のデータにおけるコンクリート温度と強度の相関関係を示したものである。両者には強い相関が認められ、回帰式によると、コンクリート温度が 15°C 上下することで強度は 5.9N/mm^2 減増することになる。

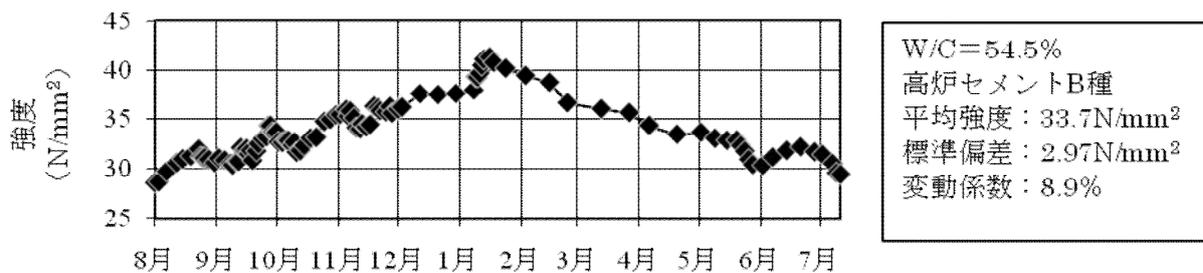


図-12 年間強度の推移

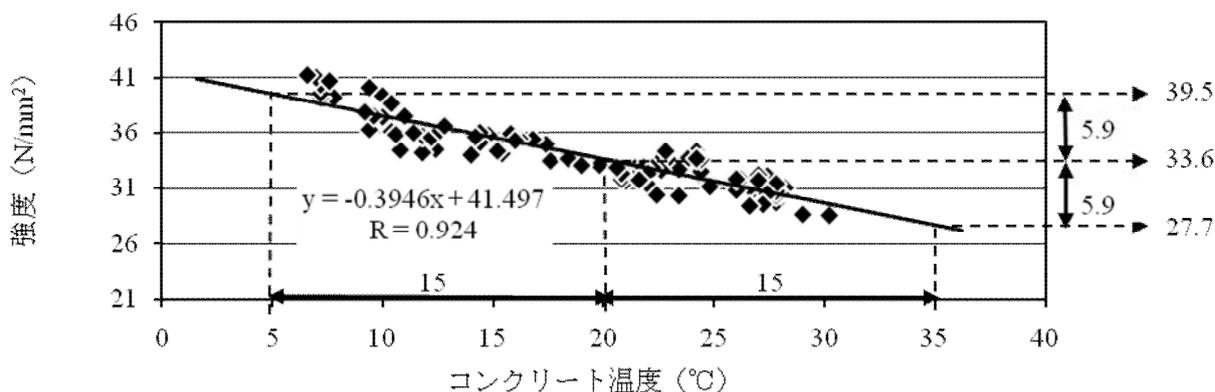


図-13 コンクリート温度と強度

(4) 圧縮強度の変化と変動に対する対応

図-6～図-13により、強度はコンクリート温度、練上りからの経過時間および供試体の保管環境温度などの影響を受けることがわかった。しかし、その影響を受ける程度を要因ごとに明解にするまでには至っていない。したがって、図-12に示した1年間の強度推移と、JASS 5に示されている実績がない場合の標準偏差を参考に、採用する1年間の変動係数は10%程度を推奨することとした。

また、強度保証についてはJIS A 5308の品質では購入者の理解が求めにくい現実がある。したがって、正規偏差は2を推奨することとした。

3.4 統計的手法の検討

3.3 (4)で述べたように、すべての配合において変動係数10%および正規偏差2を採用すると、目標強度は呼び強度値の1.25倍となる。したがって、すべての配合で得られる強度値を呼び強度比に換算して一元管理を行うことができる。

(1) 採用変動係数の検定

提案した変動係数10%は、四季を通じた1年間のコンクリート温度変化や運搬時間に起因する変動も含む。したがって製品検査で得られる1年分の全ての呼び強度比をデータとして採用し、JIS Z 9041-2 書式E「分散または標準偏差と与えられた値との比較」により検定し、適否を判断することを提案した。

(2) C/Wと強度の関係式の検定

関係式の検定方法は、1年間の製品検査で得られるすべての強度値から、関係式ごとにコンクリート温度13℃～27℃のデータを抽出し、C/Wと強度の回帰式と信頼区間を求め、信頼区間の上限値が、関係式以上であれば適切と判断することを提案した。ここで、コンクリート温度が13℃～27℃のデータを抽出するとした理由は、

3.1 で述べたとおり、関係式は製品（実機）の標準期の関係式と位置づけたためである。また、実績については3点以上のC/Wでデータが得られていることを原則とし、不足している場合は実機試し練りでデータを追加することなども提案した。

4. まとめ

以上の検証実験結果と考察を基に、提案した「季節変動に対応した配合設計方法・統計的手法」の概要をまとめると、以下のとおりである。

(1) C/Wと圧縮強度の関係式

製品における採用するC/Wと圧縮強度の関係式は、室内試し練りで作成したC/Wと圧縮強度の関係式から、製品（実機）の標準期における圧縮強度低下を想定し、切片を 6N/mm^2 程度減じることを提案した。

(2) 採用変動係数（標準偏差）と正規偏差

採用する変動係数は10%、正規偏差は2を提案した。これは化学混和剤の添加率のみで配合修正を行った1年間の変動係数実績値8.9%や、圧縮強度保証上の安全性等を考慮した。

(3) 標準配合と修正標準配合

耐久性確保の観点から、高性能AE減水剤またはAE減水剤高機能タイプを用いることを前提とし、①標準配合および修正標準配合の単位水量と水セメント比は年間を通し一定とする、②標準配合から夏期・冬期修正標準配合へは、高性能AE減水剤で単位量を±15%、AE減水剤高機能タイプで単位量を±20%を目安とする、③運搬時間60分程度までのスランプの経時変化については、化学混和剤の種類を変更することなどで一定とすることを提案した。

(4) 採用変動係数の検定

製品における四季を通じた1年間の全呼び強度比をデータとし、JIS Z 9041-2 書式E「分散または標準偏差と与えられた値との比較」により適否を判断することを提案した。

(5) C/Wと圧縮強度の関係式の検定

C/Wと圧縮強度の関係式ごとに標準期の製品強度値をデータとし、回帰式とその95%信頼区間を求め、信頼区間の上限値が、採用したC/Wと圧縮強度の関係式以上であれば適切と判断することを基本とし、実績が少ない場合の対応も提案した。

5. おわりに

本提案の実現には、安芸菱光（株）呉工場、（株）エム・アール・シー志和工場、（株）サンナマ、中国生コンクリート（株）、広島味岡生コンクリート（株）、備北小野田レミコン（株）、（株）マテリアル・サービス高田宇部工場、（株）まるせによる協力と、コンクリート用化学混和剤協会中国ブロック会皆様および広島地区生コンクリート協同組合技術委員会皆様のご尽力によったことを報告させていただき、改めて謝意を表します。

参考文献

- 1) 森野奎二、大井孝和、内藤幸雄：種々の養生温度におけるコンクリートの強度発現と微細組織の関係について、コンクリート工学年次論文集、1979 第1巻、pp.9-12