

乾燥スラッジ微粉末を混和材として用いたプレキャストコンクリート部材の開発

Development of Precast Concrete Members Using Dehydrated Sludge Powder as Admixture

巴 史 郎 閑 田 徹 志 百 瀬 晴 基 石 関 浩 輔

要 約

工事に使用されなかった戻りコンクリートは、骨材を回収、脱水したスラッジケーキとして、廃棄処分されていた。このスラッジケーキを乾燥、粉砕した乾燥スラッジ微粉末を混和材としてコンクリートに再利用する技術を開発した。さらに、CO₂ 排出量を低減するために、フライアッシュなどの副産物も混和材として使用し、セメントの使用量を結合材の質量比で 10%以下まで削減したコンクリートを開発した。このコンクリートを研究施設に PCa 部材として適用し良好な結果を得た。また、普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリート（以下、普通コンと呼ぶ）のセメントを質量比の 20%の乾燥スラッジ微粉末で置換したコンクリートの物性は、普通コンと遜色ないことを実験的に確認した。このコンクリートについて、構造用 PCa 部材に適用するために、Fc60N/mm² までに実験範囲を広げた検討を行った結果、普通コンと遜色のない結果が得られ、適用範囲拡大の目途が立った。

目 次

- I. はじめに
- II. DSP を用いたコンクリートの概要
- III. 高含有タイプの適用検討
- III. 低含有タイプの適用拡大検討
- IV. おわりに

I. はじめに

工場から出荷されたものの工事に使われなかったレディミクストコンクリート（以下、生コンと呼ぶ）は、建設産業における主要な副産物となっている。現場で使われず生コン工場に戻されたり、アジテータ車に残り生コン工場に戻るコンクリート（以下、総称して戻りコンとする）は、全国で年間 100 万 m³ 超に及ぶともいわれる。

一方で、国内の CO₂ 排出量のうちセメント製造の占める割合は約 4%に上り、戻りコン起源の廃棄物の縮減と再利用は大きな社会的な課題である。このため 2011 年に JIS A 5308「レディミクストコンクリート」においてスラッジ水の使用方法が緩和され、スラッジ水をコンクリートに再利用する端緒を開いた。しかしながら、スラッジ水を再利用する場合、スラッジ水に含まれる固形分を 1%以下とすることが望ましいが、生コン工場の排水に含まれる固形分

は数%とその数倍多く、また、副産物であるスラッジ水の品質管理は容易ではないため、スラッジ水のコンクリートへの再利用は進んでいない。このため、ほとんどのスラッジ水は、脱水した後、スラッジケーキとして廃棄処分される。そこで、筆者らは、戻りコンを起源とする乾燥スラッジ微粉末（Dehydrated Sludge Powder 以下 DSP と略す）に着目した。

Fig. 1 に DSP の製造工程を示す。未水和のセメント成分が多く残っているスラッジケーキは、乾燥粉砕をすることで水硬性を有する混和材となる。この混和材から品質の高いものを選別して、混和材としてコンクリートへの再利用の道を開いた。普通コンのセメントを質量比で 30%程度の DSP で置換したコンクリートの物性は、普通コンと遜色がないことを実験的に確認¹⁾し、混和材として建築物に使用できる環境を整備した。

また、より環境に配慮した材料への要望から、フライアッシュや高炉スラグ微粉末を混和材に加えることで、セメントの使用量を結合材の質量比で 10%以下に抑えた環境配慮型コンクリートを開発した。既報^{2) 3)}では、結合材の 20%程度を DSP で置き換えた生コンの結果を報告したが、本報では主に結合材の 90%以上を混和材で置き換えたコンクリートをプレキャスト（以下 PCa）部材へ適用した事例について述べる。併せて、PCa への適用を念頭に、結合材の 20%を

キーワード：戻りコンクリート、乾燥スラッジ微粉末、プレキャストコンクリート、高強度コンクリート
Keyword: returned waist concrete, dehydrated sludge powder, precast concrete, high strength concrete

DSP で置換したコンクリートを $Fc60N/mm^2$ の高強度コンクリートとして初めて使用した実験結果について述べる。

II. DSP を用いたコンクリートの概要

当社では DSP を混和材として使用するコンクリートをエコクリート R³ と称している。R³ は Reuse,Reduce,Recycle を指し、産業廃棄物の縮減、戻りコンの混和材としての再利用を意味する。

エコクリート R³ は前述のように DSP の含有率によって大きく 2 種類あり、各々に品質確保の観点から使用上の制約を設けている。Table 1 にエコクリート R³ の概要を示す。まず、普通コンのセメントを質量比で 30% 以下の DSP で置換し、普通コンと同等な性能を有するものをエコクリート R³ 低含有タイプ（以下：低含有タイプと略す）とした。一方、環境負荷の低減を重視し、結合材の 30% 以上を DSP で置換し、更に高炉スラグ微粉末およびフライアッシュなどを混和材として加え、セメントの使用量を結合材の 10% 以下に抑えたコンクリートを開発し、これをエコクリート R³ 高含有タイプ（以下：高含有タイプと略す）とした。建築に適用するにあたり、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」お

よび JIS A 5364「プレキャストコンクリート製品」の混和材に相当することを一般財団法人日本建築総合試験所の技術性能証明（GBRC 材料証明第 16-10 号）により確認し、建築物に適用している。この性能証明においては、コンクリートの品質を確保するために、実験的に物性が確認されている $Fc36N/mm^2$ 以下の普通強度コンクリートまでに適用を制限している。また、普通ポルトランドセメントと比較して強度発現しにくい混和材が 90% 以上を占める高含有タイプは、出荷前に強度を確認できる PCa 部材とすることで、必要性を確保している。加えて、高含有タイプは、主要構造部材である梁・柱には、原則として適用不可となっており、適用は、今後の実績データの積み重ねによって管理手法が確立して以降のこととしている。

III. 高含有タイプの適用検討⁵⁾

1. PCa 用の高含有タイプの基礎物性試験

(1) 調合およびフレッシュ性状

混和材を大量に用いてセメントを 10% 以下に削減したコンクリートの基礎物性を把握し、実大部材の製作の可否を判断する目的で基礎物性試験を行った。基礎物性試験の概要を Table 2 に示す。Table 3 に試験を行った PCa 工場(埼玉県本



Fig. 1 DSPの製造工程
(Production Process of DSP)

Table 1 エコクリート R³ の概要
(Outline of Eco-CreteR³)

| | DSP含有率 | セメント 使用量 | 高炉 スラグ 微粉末 | フライ アッシュ | 配合例 | 用途 | 適用例 | 建設材料 技術性能証明 による制限 |
|--------|--------|-------------|------------------|-------------|-----|-------------|-----------|---------------------------------------|
| 高含有タイプ | 30%以上 | 10%以下 | 50%以下 | 10% | | PCa限定 | PCa部材 | $Fc36N/mm^2$ 以下 柱・梁以外のPCa 部材に限る |
| 低含有タイプ | 30%以下 | 70%以上 | 無し | 無し | | 生コン・ PCa | 生コン | $Fc36N/mm^2$ 以下 |

庄市)の使用材料を示す。DSP 単独のモルタルの圧縮強度とブレン値には相関があり¹⁾²⁾³⁾ブレン値を品質管理に用いたり、ブレン値から残存未水和セメント量の推定も可能である。Table 4 に調査を示す。東日本大震災以降の石炭火力発電所の需要拡大により、大量に排出されるフライアッシュの利用を想定し、フライアッシュを結合材質量のうち10%使用することとした。結合材は、既往の試験⁴⁾により、強度の増進および中性化抵抗性の高い DSP50%にセメント10%の調合(記号：D50-C10)とし、水結合材比をパラメーターとして検討を行った。併せて、フライアッシュ10%、DSP30%以上、セメント5%以上、残りを高炉スラグ微粉末とした組合せの中で、使用材料の原単位から算出したCO₂排出量が最小の調合(記号：D35-C5)も試験対象とした。

(2) 混練とフレッシュ性状

混練は、パン型ミキサー(容量50L)を用い、30L練りで実施した。Table 5 に目標値およびフレッシュ試験の結果を示す。一部で目標値を外れた調合もあったが、概ね目標値を

満足した。

(3) 圧縮強度

Table 5 に強度試験の結果を示した。標準養生(20℃水中養生)、および PCa 部材と同様に蒸気養生(ピーク 50℃維持 5 時間)実施後 20℃の環境に置いた部材同一養生に関して、材齢 16 時間、28 日、91 日での圧縮強度を確認した。養生の違いによる圧縮強度試験結果を Fig. 2 および Fig. 3 に示す。PCa 部材に必要な強度として、材齢 28 日の実強度 40N/mm²(Fc30N/mm²)とした場合、Fig. 2 から W/B=45%以下、Fig. 3 から W/B=45%と 35%の間に適値があると考えられた。また、脱型時強度を 12N/mm²とすると、脱型時強度の確保には 5 時間の蒸気養生では不足していることが試験により、判明した。

(4) 促進中性化試験

二酸化炭素濃度 5%、温度 20℃、湿度 60%RH の環境で、促進中性化試験を行った。Fig. 4 は、中性化深さの測定結果から促進材齢(週)の平方根と中性化深さの関係を示したも

Table 2 基礎物性試験の概要
(Outline of Experimental Parameter)

| 記号 | W/B | 結合材構成比(%) | | | | フレッシュ試験 | 圧縮試験 数字は試験材齢 | | 中性化速度試験 |
|-------------|-----|-----------|-----|----|----|---------|-----------------|--------|---------|
| | | DSP | OPC | FA | BB | | 部材同一 | 標準養生 | |
| (D50-C10)35 | 35 | 45 | 50 | 10 | 40 | ○ | ○1(16h),28,91 | ○28,91 | ○ |
| (D50-C10)45 | 45 | 45 | 50 | 10 | 40 | ○ | ○1(16h),28,91 | ○28,91 | ○ |
| (D50-C10)55 | 55 | 45 | 50 | 10 | 40 | ○ | ○1(16h),28,91 | ○28,91 | ○ |
| (D35-C5)35 | 35 | 35 | 5 | 50 | 50 | ○ | ○1(16h),28,91 | ○28,91 | ○ |

Table 3 基礎物性試験の使用材料
(List of Concrete Material)

| 項目 | 記号 | 材料 | 密度 | ブレン値 |
|-----|-----|--------------|------|------|
| 結合材 | DSP | DSP | 2.73 | 6780 |
| | OPC | 普通ポルトランドセメント | 3.16 | 3270 |
| | BB | 高炉スラグ微粉末 | 2.89 | 4300 |
| | FA | フライアッシュ | 2.33 | 3770 |
| 細骨材 | S | 砂 | 2.69 | — |
| 粗骨材 | G | 碎石 | 2.71 | — |
| 混和剤 | SP | 高性能AE減水剤 | 1.06 | — |
| | AE | AE剤 | — | — |

Table 4 基礎物性試験の調合一覧
(Concrete Mix Proportions)

| 記号 | W/B (%) | s/a (%) | 調合(kg/m ³) | | | | | | |
|-------------|---------|---------|------------------------|-----|-----|-----|----|-----|------|
| | | | W | OPC | DSP | B | FA | S | G |
| (D50-C10)35 | 35 | 45 | 170 | 48 | 240 | 149 | 48 | 738 | 908 |
| (D50-C10)45 | 45 | 45 | 170 | 38 | 187 | 116 | 38 | 785 | 967 |
| (D50-C10)55 | 55 | 45 | 170 | 31 | 153 | 95 | 31 | 815 | 1004 |
| (D35-C5)35 | 35 | 40 | 170 | 24 | 167 | 247 | 48 | 737 | 910 |

Table 5 基礎物性試験の試験結果
(Results of Fresh Concrete Test and Compressive Strength Test)

| 記号 | W/B (%) | 目標値 | | フレッシュ | | | 強度試験(N/mm ²) | | | | |
|-------------|---------|------------|-------------|----------|--------|--------------|--------------------------|------|------|------|------|
| | | スランプ(cm) | 空気量(%) | スランプ(cm) | 空気量(%) | コンクリート温度(°C) | 脱型時16h | | 標準養生 | | |
| | | | | | | | 28日 | 91日 | 28日 | 91日 | |
| (D50-C10)35 | 55 | 18 ±2.5 | 4.5 ±1.5 | 19.5 | 3.4 | 17 | 0.8 | 27.8 | 34.1 | 31.1 | 41.3 |
| (D50-C10)45 | 45 | | | 14.5 | 5.5 | 17 | 3.2 | 36.4 | 42.4 | 45.9 | 55.6 |
| (D50-C10)55 | 35 | | | 17 | 5.5 | 17 | 8.4 | 54.0 | 66.2 | 53.6 | 74.0 |
| (D35-C5)35 | 35 | | | 21 | 6 | 17 | 5.4 | 47.8 | 56.9 | 32.1 | 61.4 |

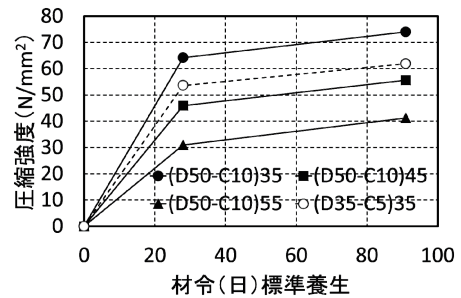


Fig. 2 圧縮強度試験結果・標準養生試験体
(Compressive Strength Test Results of Standard Curing Test Piece)

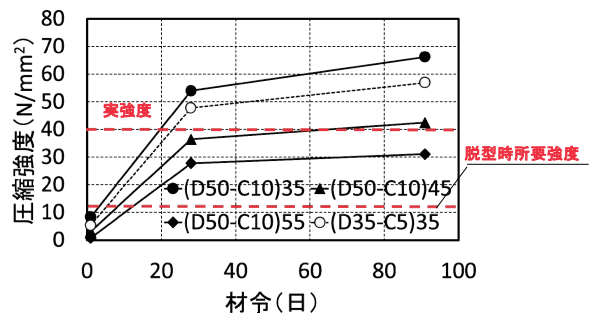


Fig. 3 圧縮強度試験結果・部材同一養生試験体
(Compressive Strength Test Results of Same Curing Test Piece as PCa Members)

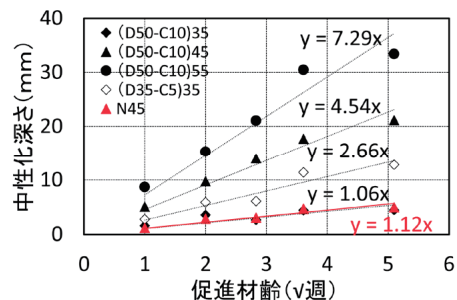


Fig. 4 促進中性化試験の結果
(Carbonation Depth on Accelerated Carbonation Test)

のである。Fig. 4 には普通コンの試験体による測定結果例 (N45) を併せて示した。中性化速度係数は、原点を通る近似直線の傾きとして図中に示した。Fig. 4 より、調合 (D50-C10) の W/B=35% は、W/B=45% の普通コンとはほぼ同等の中性化速度係数であった。

2. PCa モックアップの試作

(1) 概要

Table 6 に試験の概要を示す。工場の実機ミキサーで混練したコンクリートの物性確認と部材製作時の施工性の確認を目的に、Fig. 5 に示すバルコニー部材をモックアップとして試作した。一般的な部材の製作フローを Fig. 6 に示す。Table 7 に使用材料、Table 8 に調合を示す。部材の製作調合は W/B=35% の (D50-C10) 35 および (D35-C5) 35 の 2 種類とした。混練は 1m³ の実機ミキサーを用いた。また、脱型に必要な強度を発現させるため、最高温度 50℃、温度維持時間 12 時間に養生時間を設定した。部材同一養生は、蒸気養生後、部材と同じ場所に静置した試験体により各材齢の圧縮強度を確認した。バルコニー部材は東京都調布市で屋

外暴露し、ひび割れ等の外観異常や鉄筋の発錆状況を確認した。Photo 1 に暴露状況を示す。

(2) 試験結果

a. 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を Table 9 に示す。Fig. 7 に部材同一養生試験体の試験結果を示す。(D50-C10) の部材同一養生の試験体は、脱型時強度 12N/mm² を満足した。標準養生の強度は、前述の基礎物性試験と同程度であったが、厳冬期 (2 月) の試験であったため、低温の室内に置かれていた部材同一養生試験体の結果は、材齢 28 日の圧縮強度が 30N/mm² となり、強度が発現しにくい傾向にあった。

b. バルコニー部材の製作と暴露試験

バルコニー部材に関して、製造上、大きな問題は生じなかった。脱型直後に両調合同も 0.05mm 程度のひび割れが認められた。これらは、気温と蒸気養生の温度差で生じたと考えられ、冬期は採暖や断熱材で温度差を小さくする必要があると考えられた。ひび割れは補修モルタルで補修し、調布で暴露試験に供した。バルコニー部材には、暴露 3 年後でも、幅 0.2mm 以上のひび割れや発錆の兆候は認められなかった。

Table 6 バルコニー部材製作試験概要
(Outline of Mock Up Production Test)

| 調合 | W/B (%) | 結合材 (B × %) | | | | 強度試験 | モックアップ製作 |
|-------------|---------|-------------|----|----|-----|------|----------|
| | | DSP | BB | FA | OPC | | |
| (D50-C10)35 | 35 | 50 | 30 | 10 | 10 | ○ | ○ |
| (D35-C5)35 | 35 | 35 | 50 | 10 | 5 | ○ | ○ |

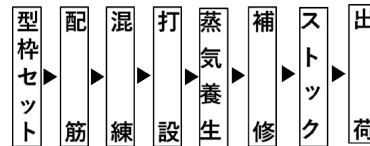


Fig. 6 部材の製造フロー
(Flow of Mock Up Production)

Table 7 バルコニー部材製作使用材料
(List of Concrete Materials)

| 項目 | 記号 | 材料 | 密度 | ブレン値 |
|-----|-----|--------------|------|------|
| 結合材 | DSP | DSP | 2.88 | 6350 |
| | OPC | 普通ポルトランドセメント | 3.16 | 3270 |
| | B | 高炉スラッジ微粉末 | 2.89 | 4300 |
| | FA | フライアッシュ | 2.33 | 3770 |
| 細骨材 | S | 砂 | 2.69 | - |
| 粗骨材 | G | 碎石 | 2.71 | - |
| 混和剤 | SP | 高性能AE減水剤 | 1.06 | - |
| | AE | AE剤 | - | - |

Table 9 圧縮試験結果
(Results of Compressive Strength Test)

| 記号 | 空気量 (%) | 強度試験 (N/mm ²) | | | | | | | | |
|-------------|---------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 部材同一養生 | | | | | | | 標準養生 | |
| | | 16H | 2日 | 3日 | 7日 | 14日 | 28日 | 91日 | 28日 | 91日 |
| (D50-C10)35 | 4.4 | 12.8 | 15.5 | 17.8 | 20.2 | 20.8 | 28.0 | 36.4 | 55.6 | 64.8 |
| (D35-C5)35 | 4.0 | 8.6 | 10.3 | 13.7 | 18.7 | 22.9 | 30.2 | 35.1 | 54.3 | 59.5 |

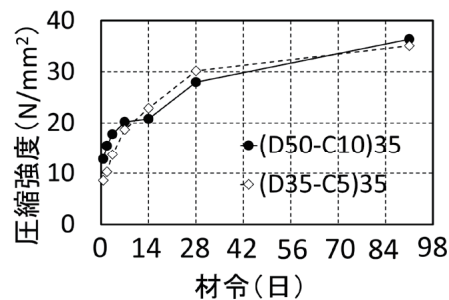


Fig. 7 部材同一養生圧縮強度試験結果
(Compressive Strength Test Results of Same Curing Test Piece as PCa Members)

Table 8 バルコニー部材製作調合
(Mix Proportion of Concrete)

| 記号 | W/B (%) | s/a (%) | 調合 単位量 (kg/m ³) | | | | | | |
|-------------|---------|---------|-----------------------------|-----|-----|-----|----|-----|-----|
| | | | W | OPC | DSP | B | FA | S | G |
| (D50-C10)35 | 35 | 40 | 170 | 48 | 240 | 149 | 48 | 661 | 998 |
| (D35-C5)35 | 35 | 45 | 170 | 24 | 167 | 247 | 48 | 743 | 914 |



Fig. 5 バルコニー部材の外観
(Appearance of Mock Up)



Photo 1 モックアップ暴露状況
(Mockup Exposure Status)

3. 実建物への適用

(1) 適用部材

Fig. 8 に示す都内の研究施設の屋上に設置する PCa 部材への適用を検討した。この部材は、屋上に設備を設置する時の基礎の一部となるもので、PCa 化が進む部材である。

(2) 調合と管理材齢の決定

まず、強度発現を確認する目的で製造開始 1 カ月前に強度確認試験を実施した。Table 10 に試験の概要を示す。Table 11 に使用材料を、Table 12 に調合を示す。調合は、部材同一養生の材齢 28 日で 30N/mm² 以上、ポテンシャル強度として、標準養生の材齢 28 日で 42N/mm² 以上を目標とした。

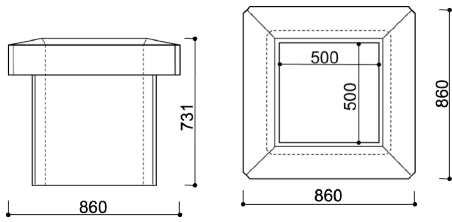


Fig. 8 PCa部材の外観
(Appearance of Member)

Table 10 強度確認試験の概要

(Outline of Compressive Strength Confirmation Test)

| 記号 | 結合材構成比 (%) | | | | フレッシュ試験 | 圧縮強度試験 | | |
|-------------|------------|-----|----|----|---------|--------|-----|----|
| | DSP | OPC | BB | FA | | 部材同一 | | 標準 |
| | | | | | | 16h | 28日 | |
| (D50-C10)35 | 50 | 10 | 30 | 10 | ○ | ○ | ○ | |

Table 11 使用材料一覧

(List of Concrete Materials)

| 項目 | 記号 | 材料 | 密度 | フレン値 |
|-----|-----|--------------|------|------|
| 結合材 | DSP | DSP | 2.88 | 6350 |
| | OPC | 普通ポルトランドセメント | 3.16 | 3270 |
| | B | 高炉スラグ微粉末 | 2.89 | 4600 |
| | FA | フライアッシュ | 2.33 | 3770 |
| 細骨材 | S | 砂 | 2.69 | — |
| 粗骨材 | G | 砕石 | 2.71 | — |
| 混和剤 | SP | 高性能AE減水剤 | 1.06 | — |
| | AE | AE剤 | — | — |

Table 12 強度確認試験調合

(Mix Proportion of Concrete)

| 記号 | W/B (%) | s/a (%) | 調合 単位量 (kg/m ³) | | | | | | |
|-------------|---------|---------|-----------------------------|-----|-----|-----|----|-----|-----|
| | | | W | OPC | DSP | B | FA | S | G |
| (D50-C10)35 | 35 | 40 | 170 | 48 | 240 | 149 | 48 | 660 | 997 |

Table 13 フレッシュ試験, 強度試験の結果

(Results of Fresh Concrete Test and Compressive Strength Confirmation Test)

| 項目 目標 記号 | フレッシュ試験 | | | 圧縮強度 (N/mm ²) | | |
|----------------|---------------|-----------|---------|---------------------------|------|------|
| | コンクリート温度 (°C) | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 部材同一 | | 標準 |
| | | | | 脱型時 16h | 28日 | |
| (D50-C10)35 | 23 | 20 | 3.8 | 22.4 | 46.0 | 57.2 |

脱型強度を確保するため、10 時間の蒸気養生後、強度発現を確認した。圧縮試験結果を Table 13 および Fig. 9 に示す。10 時間の蒸気養生後、材令 16 時間で強度 20N/mm² 以上、28 日材齢の部材同一養生 46N/mm²、標準養生で 57N/mm² となり強度は十分であった。このため調合は (D50-C10) 35 とし 10 時間の蒸気養生を実施し、出荷可能な材齢を 28 日とした。

(3) 適用結果

a. 圧縮強度

実部材は Table 11 と同じ材料、Table 12 と同じ調合で 1 日当たり 2 ピースを 3 日間 (計 6 ピース) で製作した。

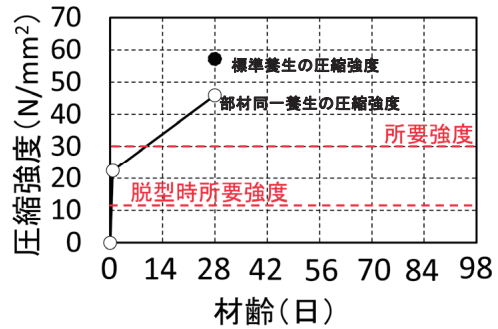


Fig. 9 圧縮強度試験結果

(Results of Compressive Strength Confirm Test)

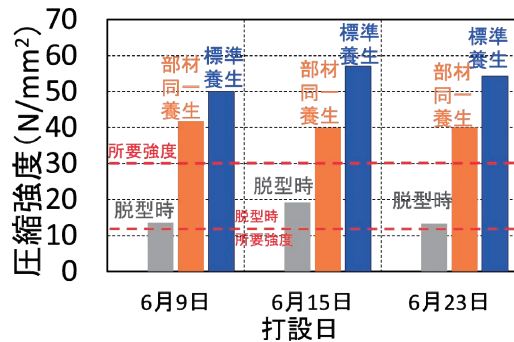


Fig. 10 圧縮強度管理試験結果

(Compressive Strength Test for Quality Management)



Photo 2 施工状況
(Construction Status)

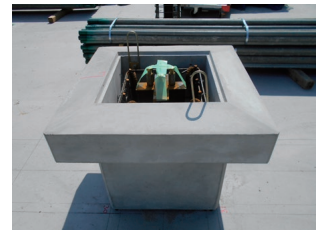


Photo 3 施工状況
(Construction Status)

製造日 3 日分の圧縮強度試験の結果を Fig. 10 に示す。圧縮強度は、材齢 28 日の部材同一養生試験体で 30N/mm² 以上、標準養生供試体で材齢 28 日で 42N/mm² 以上を確認した。脱型時強度含め目標値の圧縮強度を満足した。

b. 施工および仕上がり

施工は夏期（8 月）に実施した。Photo 2,3 に施工状況を示す。現場施工において、普通コンと比較して、色調も含めて仕上がりに大きな差はなかった。

4. 今後の課題

部材を製作するにあたり、大きな問題は生じなかった。ただし、混和材の種類が多いため、サイロなどの工場設備の増設・整備、投入手間、蒸気養生時間など、コストアップ要因が多く、適用に際しての課題となることがわかった。今後は、生産数量の増加によるコストの抑制効果や混和材のプレミックス化による手間の削減などのコスト対策が期待される。また、厳冬期において強度発現がしにくかったり、微細なひび割れの発生が考えられるため、厳冬期に製造が予定される場合には、脱型時強度の発現のため W/B を高く設定したり、ひび割れ発生を防止するために保温して温度差を低減するなどの対策が必要となる。製造データの充実に伴い、調合設計や一連の製造方法・管理方法を確立する計画である。

Ⅲ. 低含有タイプの適用拡大検討

1. 高強度 PCa 構造部材の検討

(1) 計画

従来、低含有タイプ（DSP の置換率 20%）は、Table 1

に示したように、Fc36N/mm² 以下の範囲で検討してきた。今回、構造用 PCa 部材への適用検討にあたり、その多くが Fc60N/mm² までの範囲で用いられるため、実験範囲を拡大して Fc36N/mm² を超える高強度コンクリートの範囲での物性の確認を行った。

(2) 試験方法

低含有タイプの高強度 PCa 構造部材への適用に向けて、実機ミキサにより製造した時のフレッシュ性状、圧縮強度、構造体強度補正值を確認することを目的に、PCa 工場（埼玉県本庄市）で、夏期および標準期の 2 シーズンでの S 値の確認試験を行った。強度試験概要を Table 14 に示す。比較対象として、同工場でプレハブ建築協会が認定する N 認定を取得するために同時期に行った普通コンクリートの実験を併記する。Table 15 に使用材料と Table 16 に調合を示す。使用材料は夏期と標準期とも同ロットで実施した。普通コン（N）は工場の実績から水結合材比を決定し、低含有タイプ（D20-C80）は、DSP を使用することで強度が低下する可能性があることから、水結合材比を 1% 低減した。Fig. 11 に示すマス部材を模擬した試験体から 1 回の試験当たり中央部および端部から 4 本ずつコアを採取した。8 本のコアの圧縮強度の平均値である模擬部材強度と、模擬部材と同じ養生の供試体（部材同一養生）および、標準養生について強度試験を実施した。条件の厳しい夏期および標準期で試験を実施して、各養生条件での強度を比較した。Photo 4 に製作状況を示す。

Table 14 強度試験の概要
(Outline of Compressive Strength Test)

| 種類 | 記号 | 結合材構成比 (%) | | W/B (%) | 圧縮強度 (JIS A 1108) | | | |
|--------|-------------|------------|-----|---------|-------------------|------|---------|----------|
| | | DSP | OPC | | 標準 | 部材同一 | 模擬部材 端部 | 模擬部材 中央部 |
| 低含有タイプ | (D20-C80)25 | 20 | 80 | 25 | ○ | ◎ | ○ | ○ |
| | (D20-C80)35 | | | 35 | ○ | ◎ | ○ | ○ |
| | (D20-C80)45 | | | 45 | ○ | ◎ | ○ | ○ |
| 普通コン | N26 | — | 100 | 26 | ○ | ◎ | ○ | ○ |
| | N36 | | | 36 | ○ | ◎ | ○ | ○ |
| | N46 | | | 46 | ○ | ◎ | ○ | ○ |

○は試験実施材齢7日、28日、56日、91日で実施
◎は試験実施材齢16時間、7日、28日、56日、91日で実施

Table 15 使用材料
(Concrete Materials)

| 項目 | 記号 | 材料 | 標準期 | | 夏期 | |
|-----|-----|--------------|------|------|------|------|
| | | | 密度 | ブレン値 | 密度 | ブレン値 |
| 結合材 | DSP | DSP | 2.81 | 6790 | 2.81 | 6790 |
| | OPC | 普通ポルトランドセメント | 3.16 | 3290 | 3.16 | 3290 |
| 細骨材 | S | 砂 | 2.69 | — | 2.69 | — |
| 粗骨材 | G | 砕石2005 | 2.71 | — | 2.71 | — |
| 混和剤 | SP | 高性能AE減水剤 | 1.06 | — | 1.06 | — |
| | AE | AE剤 | 1.07 | — | 1.07 | — |

Table 16 調合
(Concrete Mix Proportions)

| 記号 | W/B (%) | s/a (%) | 調合 (kg/m ³) | | | | | |
|--------|-------------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|------|
| | | | W | OPC | DSP | S | G | |
| 低含有タイプ | (D20-C80)25 | 25 | 36 | 168 | 538 | 134 | 550 | 985 |
| | (D20-C80)35 | 35 | 41 | 168 | 384 | 96 | 695 | 1008 |
| | (D20-C80)45 | 45 | 43 | 168 | 299 | 75 | 769 | 1027 |
| 普通コン | N26 | 26 | 36 | 160 | 615 | — | 581 | 1041 |
| | N36 | 36 | 41 | 160 | 444 | — | 721 | 1046 |
| | N46 | 46 | 43 | 160 | 348 | — | 792 | 1058 |

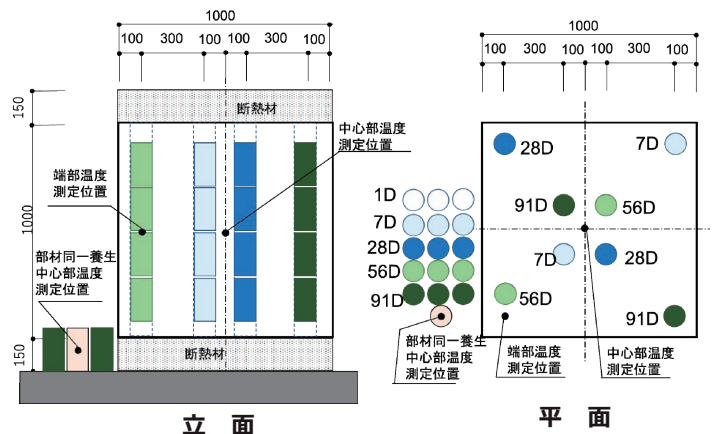


Fig. 11 模擬部材試験体
(Compressive Strength Specimen for Simulated Members)



Photo 4 模擬部材試験体製作状況
(Production Status Compressive Strength Specimen for Simulated Members)

(3) 試験結果

Table 17 に試験結果の一覧を示す。夏期の結合材水比と強度の関係について、標準養生の試験体による材令 7 日、28 日、91 日の圧縮試験結果を Fig.12 に、部材同一養生供試体の材令 7 日、28 日、91 日および脱型時(材令 16 時間)の試験結果を Fig.13 に、模擬部材のコア強度の材令 7 日、28 日、91 日の試験結果を Fig.14 に示した。図には材令 28 日の原点を通る近似直線の傾きと決定係数を記した。結合材水比と強度の間に強い相関があり、普通コンと低含有タイプに顕著な差は認められなかった。

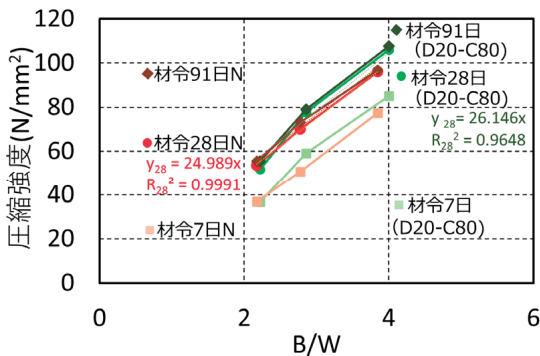


Fig. 12 夏期圧縮強度試験結果(標準)

(Results of Summer Season's Compressive Strength Test)

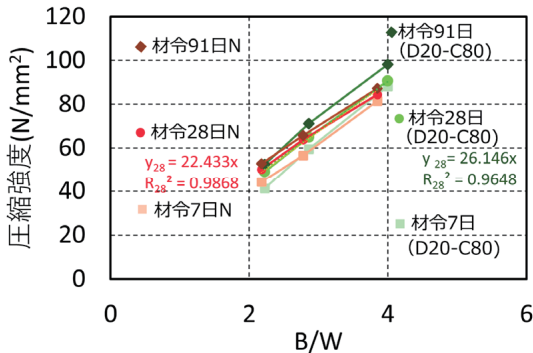


Fig. 14 夏期圧縮強度試験結果(模擬部材)

(Results of Summer Season's Compressive Strength Test)

(4) 構造体強度補正值

構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ を Fig. 15 に示す。JASS5 では、普通コンの構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ は、コンクリートの打込みから材齢 28 日までの期間の予想平均気温が 8°C 以上は 3N/mm²、日平均気温が 25°C を超える場合は 6N/mm² と定めている。一方、高強度コンクリートは、36 N/mm² を超えて 48N/mm² までは 9N/mm²、48N/mm² を超えて 60N/mm² までは 12N/mm² としている。Fig. 15 に示す通り、R³ と表記する低含有タイプは、JASS5 に定める $_{28}S_{91}$ を下回り、安全側で JASS5 記載の $_{28}S_{91}$ を採用できることが確認できた。

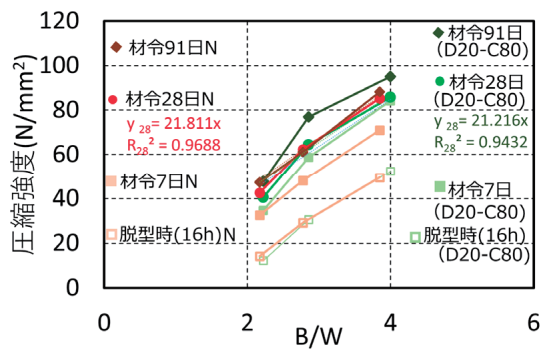


Fig. 13 夏期圧縮強度試験結果(部材同一)

(Results of Summer Season's Compressive Strength Test)

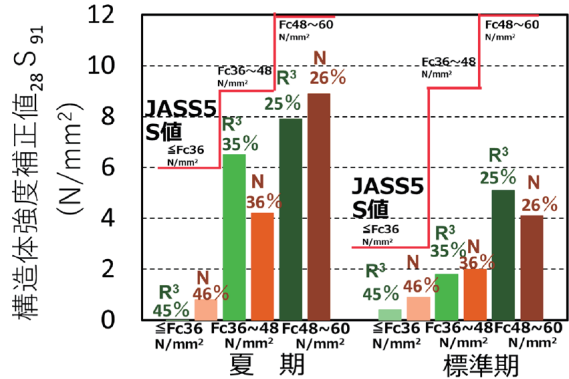


Fig. 15 構造体強度補正值

(Structure Strength Correction Value)

Table 17 試験結果一覧
(Results of Compressive Strength Test)

| 時期 | 記号 | スラブ | 空気量 (%) | 圧縮強度 (N/mm ²) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-------------|------|---------|---------------------------|-------|-------|-------|------|-----------|------|------|-------|------|---------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | 標準養生試験体 | | | | | 部材同一養生試験体 | | | | | 模擬部材試験体 | | | | | | | | | | |
| | | | | 7日 | 28日 | 56日 | 91日 | 脱型 | 7日 | 28日 | 56日 | 91日 | 7日 | | 28日 | | 56日 | | 91日 | | | | | |
| 標準期 | (D20-C80)25 | 23 | 4 | 83.4 | 110.3 | 107.2 | 110.0 | 47.0 | 77.3 | 81.7 | 91.4 | 90.0 | 87.7 | 87.6 | 87.6 | 96.5 | 97.8 | 97.2 | 101.3 | 104.0 | 102.7 | 104.9 | 105.4 | 105.2 |
| | (D20-C80)35 | 22.5 | 4 | 61.9 | 83.9 | 84.8 | 82.8 | 24.1 | 55.5 | 63.4 | 71.9 | 75.3 | 60.8 | 59.3 | 60.0 | 75.0 | 76.7 | 75.9 | 79.3 | 79.7 | 79.5 | 82.8 | 81.3 | 82.1 |
| | (D20-C80)45 | 20.5 | 4.3 | 43.9 | 63.4 | 63.6 | 64.3 | 10.6 | 39.0 | 46.3 | 49.9 | 52.5 | 41.8 | 43.2 | 42.5 | 58.1 | 57.5 | 57.8 | 60.9 | 61.7 | 61.3 | 62.5 | 63.5 | 63.0 |
| | N26 | 22 | 3.1 | 81.9 | 99.4 | 98.7 | 100.6 | 46.2 | 67.1 | 82.8 | 85.6 | 82.7 | 81.4 | 83.1 | 82.2 | 89.4 | 87.3 | 88.3 | 93.1 | 93.3 | 93.2 | 96.4 | 94.2 | 95.3 |
| | N36 | 20 | 3.3 | 52.1 | 74.1 | 75.5 | 78.7 | 25.5 | 47.6 | 64.2 | 65.7 | 66.3 | 58.6 | 59.3 | 58.9 | 70.8 | 68.0 | 69.4 | 71.5 | 71.3 | 71.4 | 72.4 | 71.8 | 72.1 |
| 夏期 | (D20-C80)25 | 23.5 | 3 | 85.1 | 106.0 | 102.7 | 107.7 | 52.4 | 84.1 | 85.8 | 95.1 | 100.4 | 91.3 | 85.2 | 88.2 | 92.8 | 88.5 | 90.6 | 96.5 | 95.5 | 96.0 | 98.9 | 97.2 | 98.1 |
| | (D20-C80)35 | 20.5 | 3.3 | 59.1 | 77.7 | 79.8 | 79.0 | 30.6 | 58.6 | 64.4 | 77.0 | 72.9 | 61.0 | 58.0 | 59.5 | 64.5 | 65.5 | 65.0 | 69.0 | 69.8 | 69.4 | 70.4 | 72.0 | 71.2 |
| | (D20-C80)45 | 16 | 3.3 | 36.7 | 51.7 | 52.7 | 55.5 | 12.3 | 34.6 | 40.6 | 47.7 | 46.0 | 46.8 | 35.4 | 41.1 | 50.2 | 48.0 | 49.1 | 53.4 | 52.4 | 52.9 | 52.6 | 52.2 | 52.4 |
| | N26 | 22 | 3.1 | 77.5 | 96.1 | 93.7 | 96.8 | 49.5 | 71.0 | 85.3 | 88.2 | 88.1 | 83.2 | 79.9 | 81.5 | 86.1 | 82.8 | 84.4 | 87.2 | 85.2 | 86.2 | 88.0 | 86.4 | 87.2 |
| | N36 | 21.5 | 3.3 | 50.8 | 70.0 | 71.0 | 73.1 | 29.2 | 48.0 | 62.4 | 61.1 | 63.0 | 57.7 | 55.5 | 56.6 | 63.9 | 63.6 | 63.8 | 64.1 | 64.2 | 64.2 | 64.1 | 65.8 | 64.9 |
| N46 | 17 | 3.2 | 36.9 | 53.6 | 57.3 | 55.5 | 14.2 | 32.6 | 42.6 | 47.3 | 47.7 | 44.0 | 44.5 | 44.2 | 50.4 | 50.0 | 50.2 | 53.8 | 52.0 | 52.9 | 52.6 | 53.1 | 52.8 | |

Table 18 強度およびコンクリート種類による適用範囲
(Scope of Application)

| 用途 | 強度範囲 | 低含有タイプ | 高含有タイプ |
|-----|---|----------|---------|
| PCa | Fc36N/mm ² 以下 | ○適用範囲 | ○適用範囲※) |
| | Fc36N/mm ² を超えFc60N/mm ² 以下 | ○適用範囲※※) | 適用範囲外 |
| | Fc60N/mm ² を超え | 適用範囲外 | 適用範囲外 |
| 生コン | Fc36N/mm ² 以下 | ○適用範囲 | 適用範囲外 |
| | Fc36N/mm ² を超え | 適用範囲外 | 適用範囲外 |

※) 高含有タイプは柱・梁を除く
※※) 結合材に占めるDSPの質量比が20%以下の低含有タイプで、PCa生産技術性能証明もしくはN認定取得工場で生産するものに限る

2. 建設材料性能証明における制約

参考文献

上記の実験結果から、Fc36N/mm²を超え Fc60N/mm²の範囲に適用できるように建設材料技術性能証明の改定を行った。日本建築総合試験所では、品質向上に伴い、PCa工場に対して製造・管理技術に関する「プレキャスト生産技術性能証明」の認定も行っている。今回の改定でも、材料としては、普通コンと同等であるが、品質を確保するには工場の生産技術が不可欠なため、下記の二つの条件が必要となっている。改定後の、適用範囲を Table 18 に示す。

- ①DSP を 20%以下に制限し、実験により、強度や調合設計に必要なデータを得ていること。
- ②生産に関して日本建築総合試験所が認定するプレキャスト生産技術証明または、プレハブ建築協会が認定するN認定を所持しているPCa工場で製造すること。

IV. おわりに

本報では、前半で、高い環境性能を目指して開発した高含有タイプをPCa部材として初めて適用するにあたり実施した検討結果について述べた。また、後半は汎用性の高い低含有タイプに関して、Fc36N/mm²を超える高強度コンクリートとしての検討を実施し、普通コンの物性と遜色ない結果となることを確認した。これにより Fc36N/mm²を超え Fc60N/mm²までのPCa部材は、適切な生産技術を有するPCa工場で製造する条件で構造部材に適用可能であることを示した。これらの結果から環境性能の高いコンクリートを用いたPCa部材への適用範囲の拡大の目途が立った。コストなどの課題もあるが、脱炭素社会に向けて、開発を継続して進めていく予定である。

- 1) 大川憲ほか：乾燥スラッジ微粉末と産業副産物混和材を併用したクリンカーフリーコンクリートに関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.710, 2015.4, pp.539-549.
- 2) 百瀬晴基ほか：乾燥スラッジ微粉末を混和材として用いたレディーミクストコンクリートの開発, 鹿島技術研究所年報, 第66号, 2018.12, pp.75-84.
- 3) 百瀬晴基ほか：乾燥スラッジ微粉末を混和材として用いたレディーミクストコンクリートの適用事例, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, 2018.7, pp.1467-1472.
- 4) 百瀬晴基ほか：乾燥スラッジ微粉末と産業副産物混和材を使用したクリンカーフリーコンクリートの耐久性確保に関する研究(その1: 促進中性化試験), 2014年度(第85回)日本建築学会関東支部研究報告集I, 2015.3, pp.149-152.
- 5) 巴史郎ほか：乾燥スラッジ微粉末を混和材として大量に使用した再生コンクリートのプレキャスト部材への適用事例, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019.9, pp.567-568.

謝 辞

本研究は、環境研究総合推進費(平成27-29年度 J153001)「スラッジ再生セメントと産業副産物混和材を併用したクリンカーフリーコンクリートによる鉄筋コンクリート部材の開発研究」の一環として実施した部分を含むものである。また、製作工場である岡村建興株式会社、DSP製造に関して三和石産株式会社に多大な協力を得た。ここに記して謝意を表する。

Development of Precast Concrete Members Using Dehydrated Sludge Powder as Admixture

Shiro Tomoe, Tetsushi Kanda, Haruki Momose and Kohsuke Ishizeki

We have developed a technology for reusing dehydrated sludge powder (DSP) made from waste concrete as an admixture for concrete. There are two types of concrete using DSP, depending on the amount of cement. To improve the environmental performance, we developed the concrete to reduce the amount of cement used to 10% or less, and we applied it to a building as a Precast concrete (PCa) member with good results. In addition, the other concrete in which 20% of the weight ratio of cement is replaced with DSP, the experimental range was expanded to Fc60N/mm² in order to apply it to structural PCa members. The results were comparable to those of ordinary concrete, and there is the prospect of expanding the scope of application.