

論文 フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの特性

船本 憲治^{*1}・竇口 繁紀^{*2}・笹原 厚^{*3}・増田 隆行^{*4}

要旨：フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの特性を確認すると共に、火力発電所の配管路地下壁の施工を実施し、以下の結果を得た。単位ペースト量 340 l/m³、単位粗骨材かさ容積 0.525m³/m³、水セメント比 60～80%とした調合では、24 時間圧縮強度以外はすべて日本建築学会における高流動コンクリートの要求性能(ブリーディング量、凝結始発時間、28 日圧縮強度、長さ変化率、促進中性化深さ)を満足できる。また、配管路地下壁からコア採取したコンクリートの単位容積質量および粗骨材断面積率は、高さや水平流動距離による有意な差は認められず、均一なコンクリート打設が可能であった。

キーワード：フライアッシュ、高流動コンクリート、圧縮強度、長さ変化、中性化

1. はじめに

火力発電所から発生するフライアッシュをコンクリート用材料に利用する方法は、種々の方法が検討されているが、本論文では、粉体系の高流動コンクリートに着目し、種々の試験を行い、その性状を確認した。

また、その結果に基づき、火力発電所の配管路地下壁にコンクリート打設を行い、コンクリートの流動性および構造体コンクリートの品質の均一性について検討した。

2. コンクリートの調合

表 - 1 に使用材料を示す。フライアッシュは、九州地区の 700MW 海外炭専焼ボイラーより発生した分級細紛であり、JIS 規格の 種に適合している。

表 - 2 に高流動コンクリートの調合設定値を示すが、目標スランプフローは 60cm、目標空気量は 4.0%とした。

表 - 3 にコンクリートの調合表を示す。セメントは普通ポルトランドセメントとし、単位水量を 170kg/m³で一定とし、水セメント比を 60、

表 - 1 使用材料

項目	特性値
セメント	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
粗骨材(碎石)	最大寸法 20mm 表乾密度 2.65g/cm ³
細骨材(質量比 40%) (海砂 FM1.90)	表乾密度 2.59g/cm ³ 吸水率 2.35%
細骨材(質量比 60%) (海砂 FM2.90)	表乾密度 2.58g/cm ³ 吸水率 2.02%
フライアッシュ (分級細紛)	強熱減量 1.5% 密度 2.37g/cm ³ 比表面積 3850cm ² /g フロー値比 109% 28 日活性度指数 83% 91 日活性度指数 97%
高性能 AE 減水剤	ホリカルボン酸系
流動化剤	ナフソ系

表 - 2 高流動コンクリートの調合設定値

項目	設定値
スランプフロー	60cm
空気量	4.0%
単位水量	170kg/m ³
単位ペースト量	340 l/m ³
単位粗骨材かさ容積	0.525m ³ /m ³
水セメント比	60,70,80%

*1 九州電力(株) 苓北発電所建設所 土木建築課 工修 (正会員)

*2 九州電力(株) 苓北発電所建設所 土木建築課 (正会員)

*3 (株)間組 建築事業総本部 生産技術部 (正会員)

*4 (株)間組 建築事業総本部 生産技術部

表 - 3 コンクリートの調合表

調合種別	スランプ フロー 又はスランプ (cm)	水セメント 比(%)	水結合材比 (%)	空気量 (%)	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	フライアッシュ (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)
高流動 60%	60	60	36.2	4	170	283	186	800	822
高流動 70%	60	70	37.0	4	170	243	217	800	822
高流動 80%	60	80	37.5	4	170	213	240	800	822
通常コンクリート	12 18	54.2	54.2	4	177	327	-	772	1008

70,80%の3水準とし、単位ペースト量が340 l/m³になるように、フライアッシュの量を調整し、レディーミクストコンクリート工場において実機試験を行った。なお、ここで単位ペースト量340 l/m³、単位粗骨材かさ容積0.525m³/m³は、文献1)での推奨値を採用し、フライアッシュを使用した高流動コンクリートでの適用性を検証することとした。また、比較用として、現地のレディーミクストコンクリート工場において28日呼び強度が24N/mm²になる通常のコンクリートについても試験を行った。

3. レディーミクストコンクリートの性状

3.1 フレッシュコンクリート

図 - 1 にアジテータトラックを使用した場合のスランプフローの経時変化を示す。また、図 - 2 に50cm フロー時間および50cm 超フロー時間の経時変化を示す。

当初のスランプフローは55~60cm程度で分離傾向は見られず良好な状態であった。また、スランプフローの90分後の低下量は、W/C=60%で14.5cm、80%で11.3cmであった。

50cm フロー時間は、ほぼ日本建築学会の推奨値4.5~8秒の範囲であったが、フライアッシュの混入によりコンクリートの粘性が低下し²⁾、その値が短くなったものと考えられる。一方、50cm超フロー時間は、日本建築学会の推奨値30秒以下を十分に満足する結果であった。

3.2 プリーディング試験結果

表 - 4 にプリーディング試験結果を示す。

プリーディング量は、高流動60,70,80%および通常のコンクリートでそれぞれ0.13, 0.12, 0.15, 0.22cm³/cm²となり、すべて日本建築学会

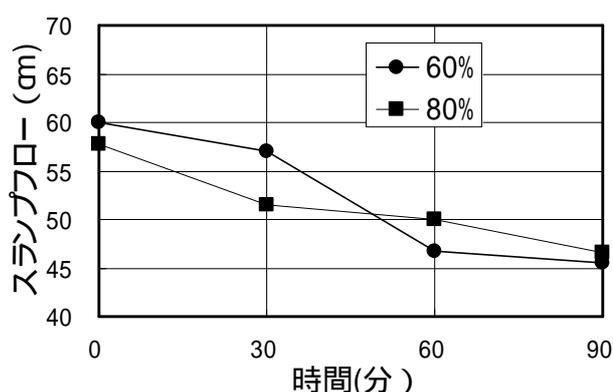


図 - 1 スランプフローの経時変化

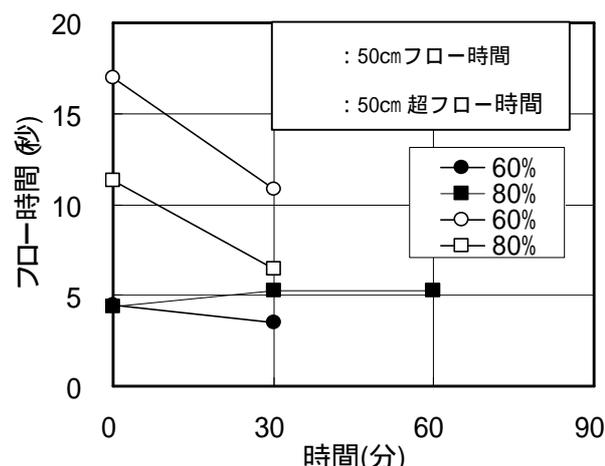


図 - 2 50cm フロー時間および50cm 超フロー時間の経時変化

表 - 4 プリーディング試験結果

調合種別	水セメント比 (%)	プリーディング量 (cm ³ /cm ²)	プリーディング率 (%)
高流動 60%	60	0.13	4.03
高流動 70%	70	0.12	3.68
高流動 80%	80	0.15	4.36
通常コンクリート	54.2	0.22	6.44

の高流動コンクリートの要求性能 $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下であった。なお、ここで通常のコンクリートのブリーディング量が大きくなったのは、単位水量による影響と考えられる。

3.3 凝結試験結果

表 - 5 および図 - 3 に凝結試験結果を示す。

始発時間は高流動コンクリート3調合で13.4～15.3 時間となり日本建築学会の要求性能の20 時間以内を満足できたが、通常のコンクリートでは21 時間となった。これは通常のコンクリートはナフタレン系の流動化剤を使用しているため凝結時間が長くなったと考えられる。

3.4 圧縮強度試験結果

図 - 4 に標準水中養生における材齢と圧縮強度の関係を示す。材齢24 時間における圧縮強度は、 $W/C=60,70,80\%$ でそれぞれ $4.9, 3.5, 3.2\text{N/mm}^2$ となり、日本建築学会の要求性能 5N/mm^2 以下となった。しかし、その後の強度の増進は大きく、28 日圧縮強度も十分に 25N/mm^2 以上を満足している。また、通常のコンクリート($W/C=54.2\%$)の圧縮強度は、フライアッシュを使用した高流動コンクリートの $W/C=70\%$ と 80% の中間に位置しているが、これはフライアッシュを使用したコンクリートにおいては粒径の小さなフライアッシュのマイクロフィラ - 効果³⁾が働いているためと考えられる。

3.5 自己収縮試験結果

(1) 歪み測定結果の解析

自己収縮試験はJCIの高流動コンクリートの「自己収縮試験方法」によって実施し、歪みの解析は以下に示す方法で行った。

測定歪み(計器の示す歪み)

$$\text{測定歪み} (\epsilon_1) = \text{校正計測値} (\epsilon_i) - \text{校正初期値} (\epsilon_0)$$

実歪み(計器に発生した実際の歪み)

$$\text{実歪み} (\epsilon_2) = \text{測定歪み} (\epsilon_1) + C \times 10^{-6} \times t$$

C : 計器の線膨張係数

t : 温度変化量

表 - 5 凝結試験結果

調合	始発時間(hr)	終結時間(hr)
高流動 60%	13.4	15.1
高流動 70%	15.3	18.0
高流動 80%	14.1	17.3
通常コンクリート	21.0	23.6

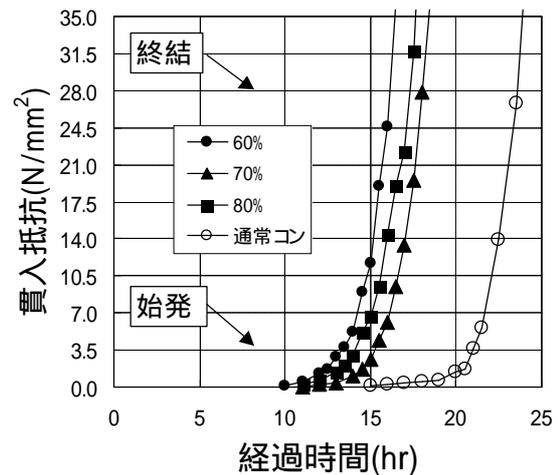


図 - 3 凝結試験結果

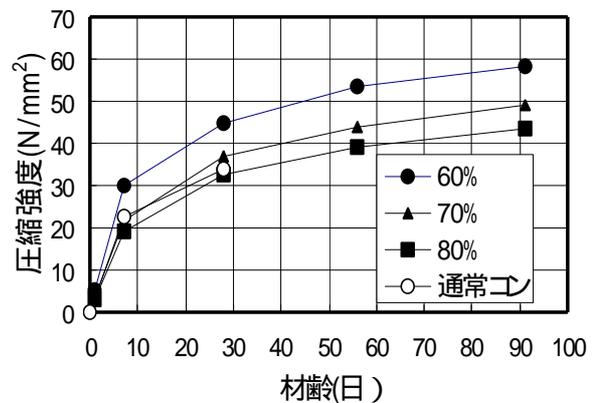


図 - 4 材齢と圧縮強度の関係

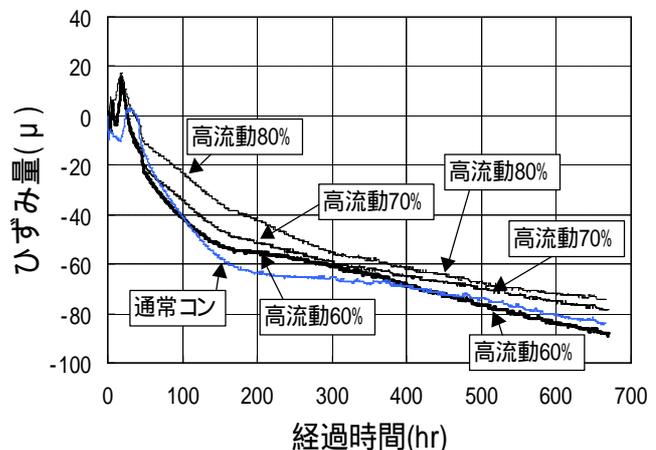


図 - 5 自己収縮試験結果

自己収縮歪み(熱膨張を除去した歪み)

$$\text{自己収縮歪み} (\epsilon_3) = \text{実歪み} (\epsilon_2) - \alpha \cdot t$$

α : コンクリートの線膨張係数

(2) 自己収縮歪み測定結果

図 - 5 に自己収縮試験結果を示す。

材齢 28 日の自己収縮歪み量は ,高流動コンクリート60% ,70% ,80%調合でそれぞれ88μ ,79μ ,74μ ,通常のコンクリートで 84μ といずれも小さな値であった。高流動コンクリート調合の関係では ,水結合材比はほぼ同一であるが ,フライアッシュ置換率が大きくセメント量が減るほど自己収縮歪み量は少なくなる傾向が見られた。

3.6 長さ変化試験結果

乾燥収縮による長さ変化試験は JIS A 1129 に従って実施し , 図 - 6 に試験結果を示す。

材齢 26 週の長さ変化率は ,高流動コンクリート3 調合において ,水セメント比の小さい調合が長さ変化率も小さくなっているが ,646 ~ 674 μ でいずれも差はほとんど見つけられない。一方 ,通常のコンクリートでは814 μ と高流動コンクリート比べてやや大きな値を示した。これらの結果は ,単位水量が大きく影響しているものと考えられる。

3.7 促進中性化試験結果

促進中性化試験は , 日本建築学会の「コンクリートの促進中性化試験方法(案)」に従って実施し , 図 - 7 に 26 週での水結合材比と中性化速度係数の関係を示す。

図 - 7 より ,26 週における中性化速度係数は ,高流動コンクリート調合 60 , 70 , 80%でそれぞれ 0.60 , 1.11 , 1.47mm/ 週となり , 60% < 70% < 80%の順であった。これより , 3 調合の高流動コンクリートの水結合材比はほぼ同じであるが ,フライアッシュ置換率が大きく水セメント比が大きい調合ほど中性化速度係数が大きい値となる傾向が見られた。

図 - 8 に水セメント比と中性化速度係数の関係を示す。3 調合の高流動コンクリートの水セメント比 X(%)と中性化速度係数 Y(mm/ 週)の関係式は、 $Y = 0.044X - 2.0$ となり、水セメン

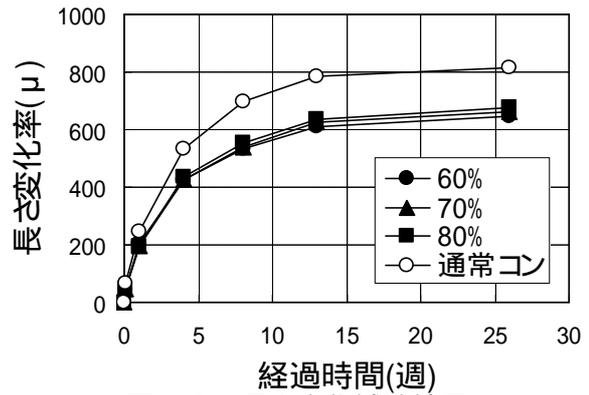


図 - 6 長さ変化試験結果

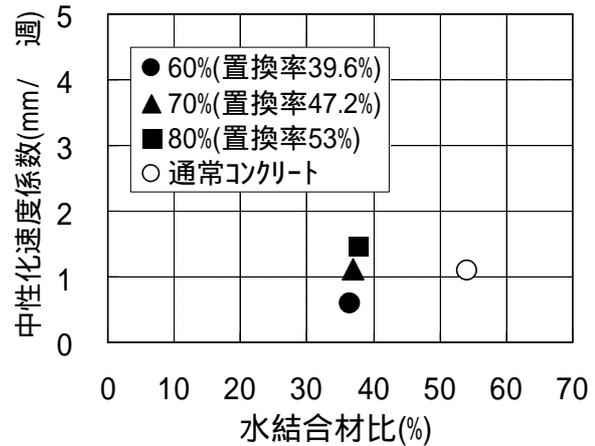


図 - 7 水結合材比と中性化速度係数の関係

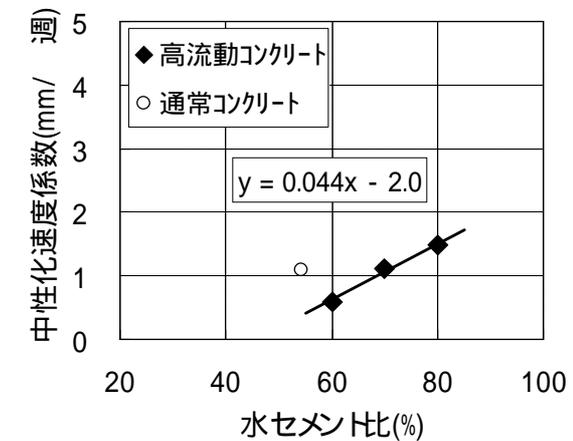


図 - 8 水セメント比と中性化速度係数の関係

表 - 6 フレッシュコンクリートの試験結果

項目	スランプ フ ロ - (cm)	50cm フ ロ - 時間 (秒)	空気量 (%)
平均値	56.9	2.82	3.46
標準偏差	3.26	0.53	0.26
変動係数 (%)	5.73	18.8	7.51
試料数 (個)	23	23	14

ト比が大きくなるほど中性化速度係数は大きくなる傾向が見られた。なお、文献 1) に示されている水セメント比と中性化速度係数の関係式と比べると中性化速度係数はきわめて小さい値であった。

通常のコングリートとの関係では、通常のコングリート(W/C = 54.2%)の中性化速度係数 1.09 に相当する高流動コングリートの水セメント比は、約 70% となり、文献 4) と同様にフライアッシュをセメント外割混入することで、中性化速度を減ずる傾向があることが認められた。

4. 構造体コングリートの性状

4.1 打設コングリートの選定

3. で行った試験結果によると、W/C=60, 70, 80%のすべての調合において、24 時間圧縮強度を除き、日本建築学会の高流動コングリートの要求性能をすべて満足していることが確認できた。今回打設の火力発電所の配管路地下壁においては、特に打設後 24 時間での強度発現の必要はなかったが、JASS5 での水セメント比の最大値 65% 等も考慮し、W/C=60%の調合を採用した。

4.2 フレッシュコングリートの性状

表 - 6 にフレッシュコングリートの試験結果を示す。スランプフローは、目標値の 60cm に対して平均値 56.9cm、変動係数 5.7% と良好な結果を得た。しかし、50cm フロー時間は、平均値が 2.82 秒とフライアッシュ混入効果による粘性低下により、短い値となった。この値は文献 5) における自己充填性ランク 2 の 50cm フロー時間評価試験値 3 ~ 15 秒の最短の値であったが、目視においてはコングリートの分離傾向は見られず良好な状態であった。一方、空気量は、目標値 4.0% に対して平均値 3.46%、変動係数は 7.39% であった。

図 - 9 にスランプフローと 50cm フロー時間の関係を示す。50cm フロー時間 Y(秒) は、スランプフロー X(cm) が増えるにしたがって減少する傾向が見られ、負の関係式 $Y = -0.12X + 9.5$ が得られた。

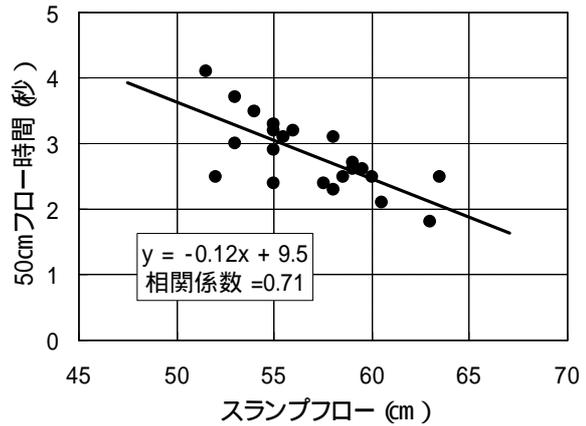


図 - 9 スランプフローと 50cm フロー時間の関係

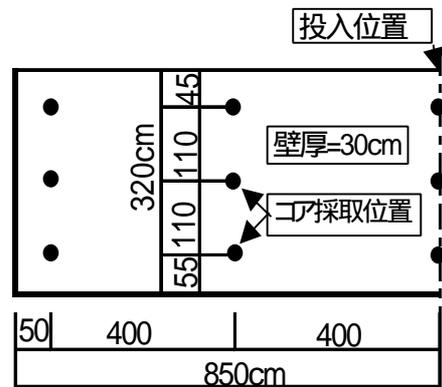


図 - 10 配管路地下壁コア採取位置

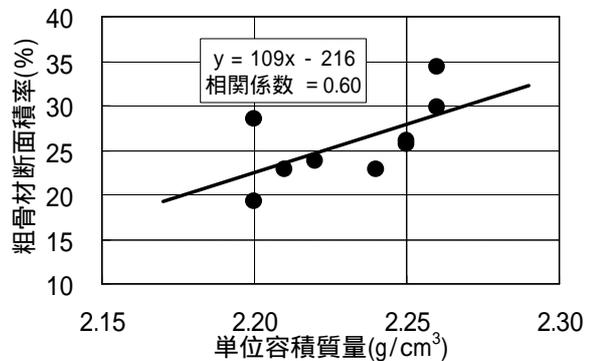


図 - 11 単位容積質量と粗骨材断面積率の関係

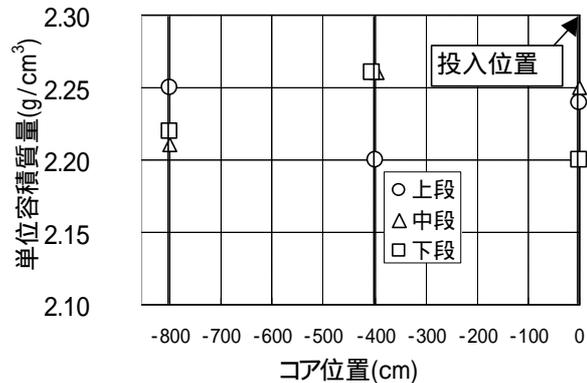


図 - 12 コア採取位置と単位容積質量の関係

4.3 コア採取試験結果

配管路地下壁(高さ 3.2m ,水平流動距離 8.5m , 厚さ 30cm , 配筋D13@200ダブル縦横共 1 部 D16@100)に打設された高流動コンクリートの充填状況を確認するため, 図 - 10 に示す位置で, 直径 150mm のコアを 9 本採取し, 単位容積質量および粗骨材断面積率を測定した。

図 - 11 に単位容積質量と粗骨材断面積率の関係を示す。単位容積質量と粗骨材断面積率の関係は, 緩やかな正の相関が見られる。

図 - 12 にコア採取位置と単位容積質量の関係を, 図 - 13 にコア採取位置と粗骨材断面積率の関係を示す。その結果, 単位容積質量および粗骨材断面積率は, 高さや水平流動距離による有意な差は見られず, 文献 1)の施工実験による粗骨材断面積率 18~33%と比較しても今回の高流動コンクリートの充填性に問題がないことが明らかになった。

5. まとめ

フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートを用いた室内試験および実構造物の施工により, 以下の特性が認められた。

(1)単位ペースト量 340 l/m³, 単位粗骨材かさ容積 0.525m³/m³, 水セメント比 60~80%とすることで, スランプフロー60cm の高流動コンクリートの調合が可能であり, それらの調合は, 24 時間圧縮強度を除き日本建築学会の高流動コンクリートにおける下記の要求性能を満足している。

- 1) ブリーディング量 0.3cm³/cm² 以下
- 2) 凝結始発時間 20 時間以内
- 3) 標準養生 28 日圧縮強度 25N/mm² 以上
- 4) 乾燥収縮による長さ変化率 8×10^{-4} 以下
- 5) 促進中性化深さ 6 ヶ月で 25mm(中性化速度係数 4.93mm/ 週)以下

(2)配管路地下壁に打設された上記高流動コンクリート(W/C=60%)の単位容積質量および粗骨材断面積率は, 高さ(3.2m)や水平流動距離(8.5m)による有意な差は認められず,

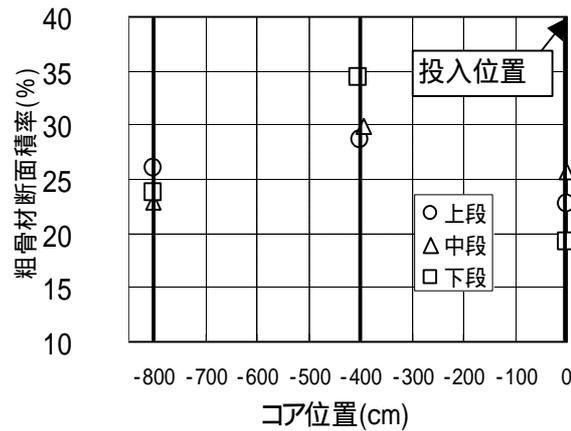


図 - 13 コア採取位置と粗骨材断面積率の関係

今回の調査により, 均一なコンクリートの打設が可能である。

(3)50cm フロー時間は, フライアッシュの混入効果によるコンクリートの粘性の低下により短い値となる傾向にあり, 単位ペースト量 340 l/m³では 3 秒程度となる場合もある。しかし, 目視においてコンクリートの材料分離傾向は見られず, また, コア採取による検討においても均一な充填性が確認できた。

参考文献

- 1) 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説, 1997.1
- 2) 三浦律彦ほか：高流動コンクリートに関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.13, No.1, pp.185~190, 1991.7
- 3) 李昇憲ほか：電気集塵装置から採取した石炭灰の特性, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.18, No.1, pp.327~332, 1996.7
- 4) 松藤泰典ほか：石炭灰を外割大量使用するコンクリートの調合に関する研究, コンクリート工学論文集 Vol.12, No.2, pp.51~60, 2001.5
- 5) 土木学会：高流動コンクリート施工指針, 1998.7