

低発熱セメントを用いた高流動コンクリートの諸性質に関する実験的研究

河井 徹*・黒田泰弘**・武川芳廣***

本研究は、低発熱セメントを用いた高流動コンクリートの諸性状と型わくに作用する側圧に関する実験結果を報告するものである。まず、各種混和剤がコンクリートの諸性状に与える影響を明確にし、凝結時間を制御する配合方法を提示した。次に、凝結時間を相違させたコンクリートを使用して側圧実験を行い、側圧の経時変化と最大値を示すとともに、コンクリートの物性値から側圧の試算を行った。

Keywords : highly flowable concrete, setting time, lateral pressure, cohesion, internal friction angle

1. はじめに

コンクリートの多様化に伴い、締固め不要の高流動域まで流動性を増加させたコンクリート（以下、高流動コンクリートと称する。）の研究が最近盛んに行われている^{1)~4)}。高流動コンクリートは、一般に材料分離抵抗性を出すために 500 kg/m³ 程度の結合材を用いており、さらに少量の増粘剤を添加する場合が多い。また、施工に必要な流動性を確保し、その性能を一定時間保持するために高性能 AE 減水剤を添加する場合も多い。増粘剤や高性能 AE 減水剤は凝結時間を遅延させる傾向があるために、高流動コンクリートの凝結時間は長い傾向にある。高流動コンクリートの型わくに作用する側圧は、流動性が良いことと凝結時間が長いことにより、一般のコンクリートと比較してかなり大きくなるものと考えられる。マスコンクリートを対象とした場合には、発熱量やセメント量の規制からさらに凝結時間が遅れる傾向にあると考えられる。

そこで、著者らは低発熱セメントを用いた高流動コンクリートに関して必要な性能を保持しながら、凝結時間を制御する配合の研究を行った。そして、混和剤の添加により、始発時間を約 7 時間から 30 時間程度まで制御する配合方法を確認した。また、実機プラントでそのコンクリートの練りまぜが充分に行えることを確かめた。さらに、凝結時間を変えた高流動コンクリートの側圧を実験で測定するとともに、その側圧の経時変化を把握する試みを行った。

この場合、高流動コンクリートとして必要な性能とは①振動機による締固めなしで十分な充てん性を発揮するために、高い流動性と材料分離抵抗性を有すること。②

施工に必要な時間中はその流動性と材料分離抵抗性を保っていることの 2 点が挙げられる。①は材料分離試験と鉄筋通過試験を行って、材料分離抵抗性と充てん性を把握することにした。②は経過時間 1 時間でスランプフロー 50 cm 以上を確保することとした。なお、マスコンクリートへの適用も可能な配合となるように、結合材（以下、セメントと称する。）は 3 成分系低発熱セメントを用い、基本配合の単位セメント量を 344 kg/m³ とした。

2. 各種の要因がコンクリートの性状に与える影響

(1) 目的

単位結合材量、細骨材率、増粘剤、急硬剤および徐放性分散剤の添加率等が、高流動コンクリートの諸性状に与える影響を定量的に把握することを目的として、室内実験を行った。

(2) 使用材料、配合、実験方法

a) 使用材料と配合

セメント C は、普通ポルトランドセメント：高炉スラグ微粉末：フライアッシュが 35：45：20 の比率で混入した 3 成分系低発熱セメント（比重 2.78，比表面積 3 630 cm²/g，水和熱 7 日 48.6 cal/g，水和熱 28 日 62.1 cal/g）を使用した。粗骨材 G は鳥形山産の石灰岩碎石（最大寸法 20 mm，FM 6.63，比重 2.70），細骨材 S は君津市産の山砂（FM 2.59，比重 2.60）を使用した。

配合表を Table 1 に示す。水セメント比は全て 45% とした。コンクリートの練り上がり直後のスランプフローが 60±3 cm，空気量が 5±1% になるように、各配合とも高性能減水剤と AE 剤を添加した。さらに、材料分離を抑制する目的で増粘剤を添加した。なお、高性能減水剤と増粘剤との組合せには適合性に良否が認められる場合がある⁵⁾ので、問題がない組合せのものを使用した。

* 正会員 清水建設（株）技術研究所特別研究 G 主任研究員
（〒135 江東区越中島 3-4-17）

** 正会員 工修 清水建設（株）技術研究所特別研究 G

*** 正会員 清水建設（株）技術開発本部

Table 1 Mix Proportions

No.	Sand Percentage s/a (%)	Unit Content (kg/m ³)			
		Water W (W/C=45%)	Cement C	Fine Aggregate S	Coarse Aggregate G
1	47.1	140	311	855	997
2	42.5	155	344	742	1042
3	45.0			785	997
4	47.5			829	952
5	50.0			873	906
6	42.7			170	378
7	40.2	185	411	645	997

Table 2 Combinations of Admixtures

No.	Dosages of Admixtures (%)		
	Viscous agent V/W (%)	Accelerator A/C (%)	Dispersant D/C (%)
A	2.2	0	0
B	1.1, 2.2, 3.3	0, 0.3, 0.6, 0.9	0
C	2.2	0	0, 0.03, 0.06, 0.09
D	2.2 2.2	0.6 0	0 0.03

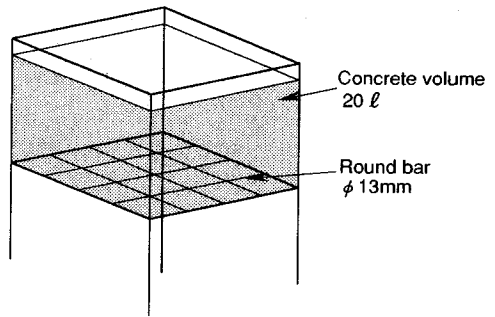


Fig.1 Apparatus of Filling Capacity Test

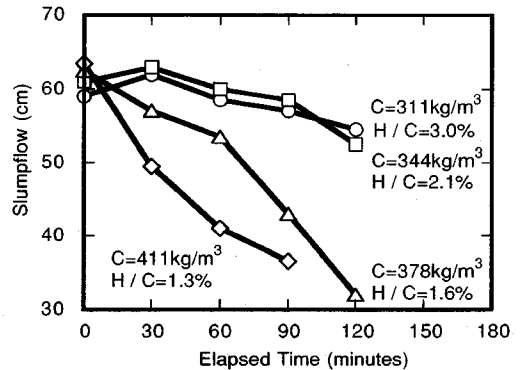


Fig.2 Change in Slumpflow

すなわち、高性能減水剤 *H* はナフタリンスルホン酸系、増粘剤 *V* はポリアクリルアミド系化合物を主成分としたもの（比重 3.05、比表面積 3100 cm²/g）とした。凝結時間の短縮を目的として、CaO-Al₂O₃-SO₃ 系の無機化合物からなる急硬剤 *A* を使用した。また、スランプフローの経時変化量の制御と凝結時間の延長を目的として、高性能 AE 減水剤に含まれる徐放機能を有する分散剤 *D*（主成分はオレフィンと無水マレイン酸の共重合体、以下、徐放剤と称する。）を使用した。

b) 練りませ方法

ミキサは容量 100 l のパン型強制練りを使用した。粗骨材、細骨材、セメントのほか、増粘剤や急硬剤等の粉末混和剤をミキサ内に順に投入後 10 秒間空練りを行い、その後、練りませ水をミキサに投入した後に 2 分間練りませた。なお、高性能減水剤、AE 剤、徐放剤等の液体混和剤は予め練りませ水に混入しておいた。コンクリートの温度は 20 ± 2°C に保った。

c) 試験項目と試験方法

スランプフロー試験は土木学会規準「コンクリートのスランプフロー試験方法（案）」に準じて行った。経時変化の試験は、練り置いたコンクリートを所定時間に練直してから測定した。空気量試験は JIS A 1128 の空気室圧力法に準じて行った。練りませ直後の試料を φ 15 × 30 cm の円柱形型わくに自重のみで詰めて 30 分間

静置したもの、および同様な方法で試料を詰めた後型わくごと振動数 3000 cpm、振幅 1.1 mm の振動テーブル上で 30 秒間振動させたもの、の 2 種類について、材料分離試験を行った。材料分離の程度は、型わく内の上部 2 l と下部 2 l の試料中の粗骨材量から式（1）により算出した材料分離指数 *SI* で表示した⁶⁾。

$$SI = \{ (G_2 - G_1) / (G_1 + G_2) \} \times 100 (\%) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、*G*₁：上部 2 l のコンクリート中の粗骨材量

*G*₂：下部 2 l のコンクリート中の粗骨材量

コンクリートの充てん性能の評価には、格子鉄筋通過試験²⁾を用いた。つまり、Fig.1 に示すように、鉄筋のあきが約 5 cm になるような格子配筋をした装置を約 20 l の試料が自重のみで流下する時の通過率によって評価した。凝結時間の測定は、JIS A 6204「コンクリート用化学混和剤」の附属書 1「コンクリートの凝結時間試験方法」に準じて行った。圧縮強度試験は JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて φ 10 × 20 cm の円柱供試体を用いて行った。ただし、試料は自重のみで流込んだ。材齢は 7, 28, 91 日とした。モルタルの粘着力はウェットスクリーニングしたモルタルをベーン試験にて測定した。

(2) 要因別の試験結果と考察

a) 単位ペースト量および細骨材率の影響

Table 1 の全配合に対して、混和剤の組合せを Table

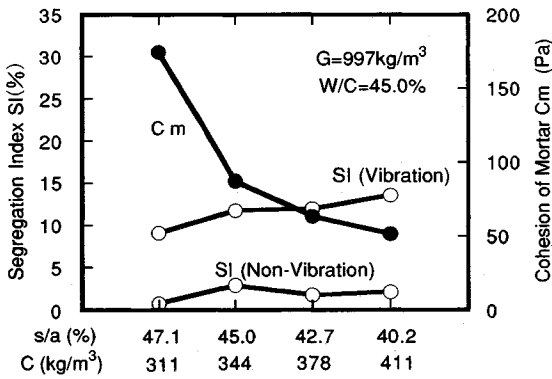


Fig.3 Cohesion of Mortar and Segregation Index

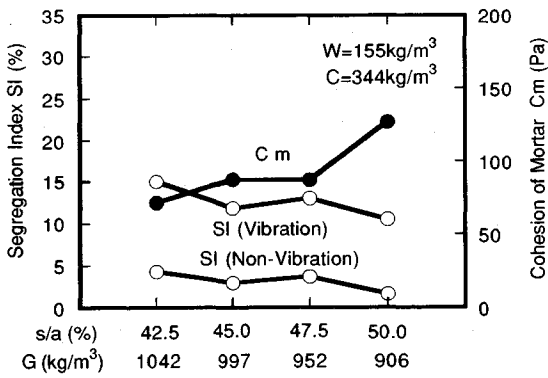


Fig.4 Cohesion of Mortar and Segregation Index

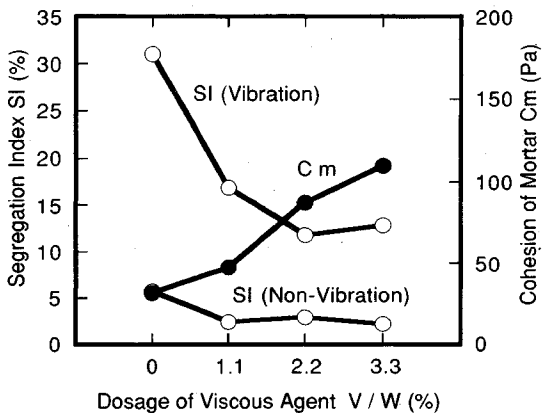


Fig.5 Cohesion of Mortar and Segregation Index

2のNo. Aで試験を行った。Fig.2からFig.4に主な試験結果を示す。Fig.2は単位粗骨材量と水セメント比が同一であり、単位ペースト量が相違する場合の試験結果である。Fig.2から、単位ペースト量が多いほど、つまり単位水量が多いほど、所定のスランプフローを得るための高性能減水剤の添加率は小さくなっている。しかし、スランプフローの経時変化量は単位ペースト量が多いほど大きくなっていることが分かる。Fig.3による

Table 3 Result of Filling Capacity Test

Mix No.	Viscous Agent V/W (%)	Sand Percentage s/a (%)	Unit Content		Judgement
			Cement C	Coarse Aggre. G	
3	0	45.0	344	997	79 ×
	1.1				94 ×
	2.2				95 ○
	3.3				96 ○
2	2.2	42.5	344	1042	94 ×
4		47.5		952	97 ○
5		50.0		906	96 ○
1	2.2	47.1	311	997	96 ○
6		42.7	378		96 ○
7		40.2	411		97 ○

○ : Concrete was not blocked on the wire mesh.
 × : Concrete was blocked on the wire mesh.

と、単位ペースト量の増加に伴ってモルタルの粘着力は減少し、それに伴い材料分離指数SI(振動)はやや増加していた。この4配合は単位粗骨材量が同一であり、モルタルの粘着力が大きいかほどコンクリート中の粗骨材の移動による材料分離を抑制することにより、SI(振動)が小さくなっていると考えられる。以上より、スランプフローの経時変化や材料分離面から判断すると、単位粗骨材量と水セメント比が一定と言う条件下では単位ペースト量は少ない方が望ましいことなる。Fig.4は、単位ペースト量が同一で、細骨材率が相違する場合の試験結果である。細骨材率の増加に伴い、モルタルの粘着力が増加し、SI(振動)も減少する傾向にある。単位ペースト量が一定という条件下では、単位粗骨材量が906 kg/m³~1042 kg/m³の範囲であっても、モルタルの粘着力の大小で振動下における粗骨材の移動による材料分離の程度が評価できることが分かった。

なお、材料分離指数SI(無振動)の値はどれも小さく、実験に用いたコンクリートの静置時の材料分離は小さいことが分かった。

b) 増粘剤の添加率の影響

Table 1のNo. 3の配合に対して、増粘剤の添加率V/Wを0, 1.1%, 2.2%, 3.3%に変化させて試験を行った。Fig.5によると、増粘剤の添加率が増加するに伴い、モルタルの粘着力が増加し材料分離指数が大きく減少している。つまり、増粘剤の添加による材料分離抑制効果がよく表れている。また、増粘剤の添加率V/Wを1.1%以上にすると、ブリージングは皆無であった。

Table 3に、格子鉄筋通過試験の結果を前項の結果も併せて示す。V/Wが2.2%以上で単位粗骨材量が997 kg/m³以下の配合では、鉄筋網上でコンクリートが閉塞することは全く無く通過していることがわかる。この場合のモルタルの粘着力は50 Pa以上であった。これらの結果から判断すると、モルタルの粘着力が一定値以上

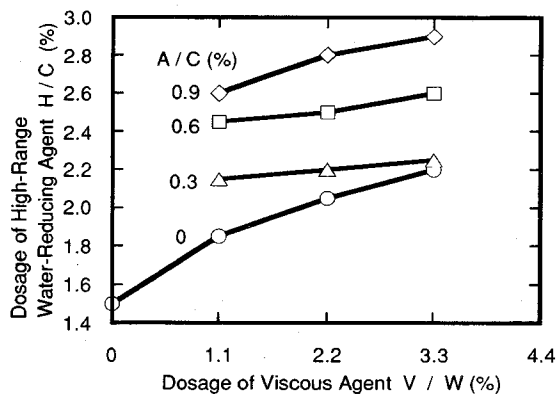


Fig.6 Dosage of High-Range Water-Reducing Agent

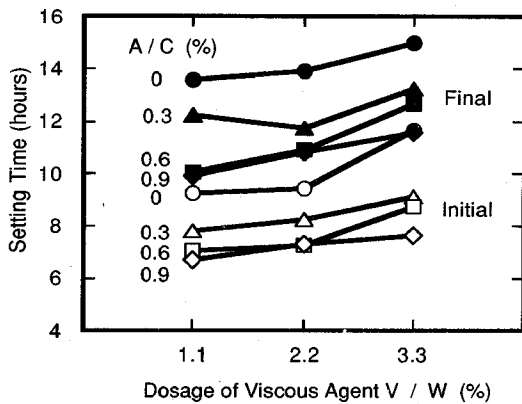


Fig.7 Change in Setting Time

で、且つ単位粗骨材量が一定値以下の配合の場合にコンクリートの格子鉄筋間の通過性能が良好になることが分かった。

c) 急硬剤および徐放剤の添加率の影響

Table 1のNo.3の配合を用い、混和剤の組合せはTable 2のNo.BとNo.Cとして試験を行った。つまり、増粘剤、急硬剤および徐放剤の添加率を変化させた場合の検討を行った。Fig.6からFig.9に主な試験結果を示す。Fig.6によると、増粘剤の添加率が増加するに伴って高性能減水剤の添加率が増加している。この理由は、増粘剤の添加率の増加に伴ってコンクリートの塑性粘度や降伏値が増加するためである。また、急硬剤の添加率の増加に伴い、高性能減水剤の添加率も増加している。この理由は、実験に用いた急硬剤は水との接触と同時にエトリンガイトを生成するように調整してあるためであると考えられる。なお、徐放剤の添加率を増加させても高性能減水剤の添加率は増加していなかった。

Fig.7から、凝結時間は始発・終結時間とも、増粘剤の添加率の増加に伴って長くなっている。一方、急硬剤の添加率の増加に伴い短縮されており、急硬剤の添加率A/C=0.6%以上の場合に始発時間が約2.5時間、終結

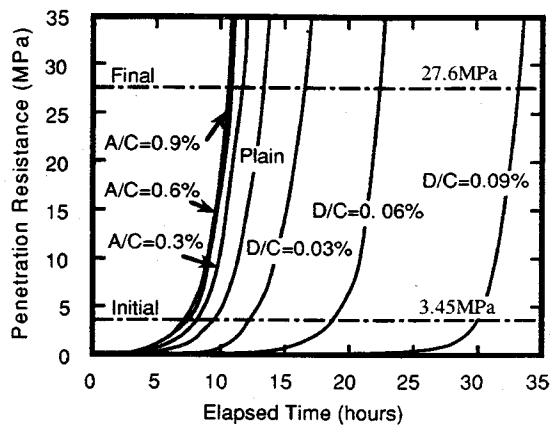


Fig.8 Penetration Resistance

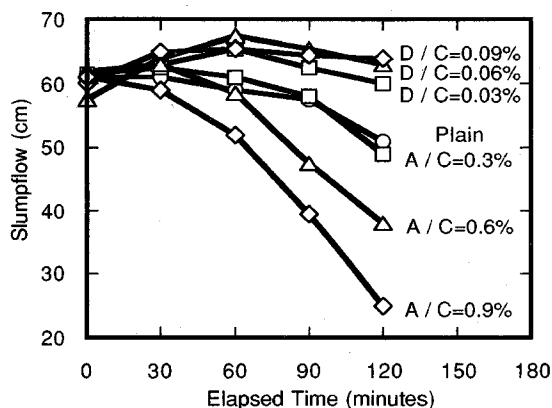


Fig.9 Change in Slumpflow

時間が約3時間短縮されている。Fig.8は増粘剤をV/W=2.2%添加した場合の徐放剤と急硬剤の添加率別の凝結硬化速度を示したものである。徐放剤の添加率がD/C=0.03~0.09%までの範囲で増加するに伴って、凝結時間が大幅に増加していることが分かる。Fig.9に、徐放剤と急硬剤の添加率別のスランプフローの経時変化を示す。急硬剤を添加した場合は、添加率の増加に伴ってスランプフローの経時変化はやや大きくなっている。この理由は、急硬剤がC₃A等のアルミネート相の水和反応を促進しているからであると考えられる。しかし、経過時間1時間でのスランプフローの経時変化量は添加率がA/C=0.6%の場合で4cm程度と小さく、添加率がA/C=0.9%の場合でも10cm程度であった。以上より、急硬剤をA/C=0.6%添加した配合では、1時間程度の施工時間を確保する条件下で、始発時間を2.5時間程度、終結時間を3時間程度短縮することが可能であることが分かった。一方、徐放剤をD/C=0.03%以上添加した場合、スランプフローは練りませ直後からやや上昇し、経過時間2時間程度で練りませ直後の値にも

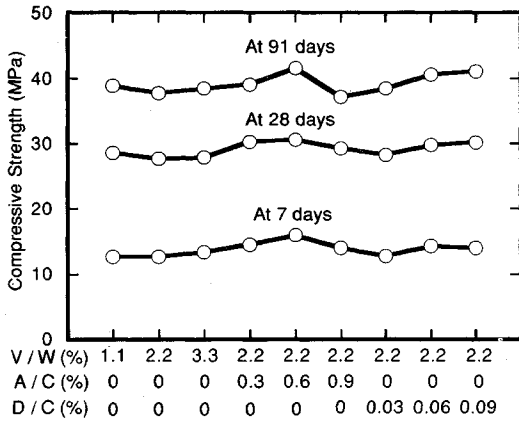


Fig.10 Compressive Strength

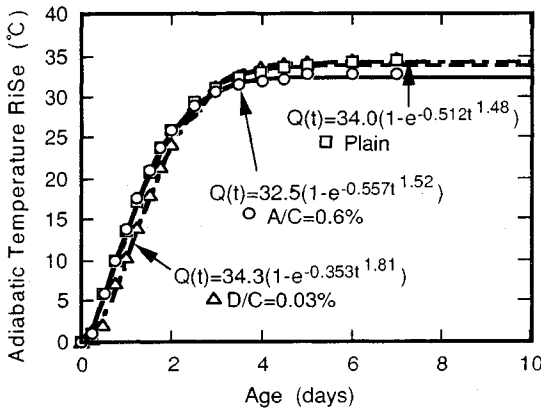


Fig.11 Results of Adiabatic Temperature Rise Test

どっている。徐放剤は、ある種の高性能 AE 減水剤に含有されているものであり、その添加によりスランブフローの経時変化を抑制する効果を有している⁷⁾。以上の結果より、徐放剤の添加率により、凝結時間を遅延させることが出来ることが分かった。この場合、所定のスランブフローの保持時間が長くなるために施工可能時間も増加することになる。

なお、増粘剤、急硬剤、徐放剤の添加が圧縮強度に及ぼす影響は Fig.10 に示すように大差がなかった。

(3) 発熱量

急硬剤と徐放剤を添加した配合および両混和剤が無添加の配合について断熱温度上昇試験を行った。試験装置は空気循環式とした。配合は Table 1 中の No. 3, 混和剤の組合せは Table 2 中の No. A と No. D とした。試験結果を Fig.11, および回帰式を式 (2), (3), (4) に示すが、初期の発熱量が小さいために、発熱曲線の近似には、時間 t のべき乗の項を考慮した式が適している。材齢 2 日までは徐放剤を添加した配合の発熱量が少ないが、3 配合の終局断熱温度上昇量の差は僅かであり、急硬剤や徐放剤を用いてもコンクリートの温度上昇特性に

は影響しないものと判断できる。また、終局断熱温度上昇量が 32.5~34.3°C であることから、これらの配合がマスコンクリートにも適用可能であると判断できる。

急硬剤添加 $Q = 32.5(1 - e^{-0.557t^{1.52}}) \dots\dots\dots (2)$

プレーン $Q = 34.0(1 - e^{-0.512t^{1.48}}) \dots\dots\dots (3)$

徐放剤添加 $Q = 34.3(1 - e^{-0.353t^{1.81}}) \dots\dots\dots (4)$

式 (2), (3), (4) とも相関係数は 0.999 であった。

3. 実機プラントにおける練りませ実験

(1) 目的

高流動コンクリートを室内実験のミキサと実機プラントを用いて練りませた場合とでは、コンクリートの性状がかなり相違する⁸⁾との報告がある。しかし、その詳細は明らかにされていない。そこで、実機プラントでの練りませ実験を実施して、室内実験との比較を行いながら、高流動コンクリートの諸性質を把握した。

(2) 実験方法

a) 材料と配合

材料は前章の実験と同一のものを使用した。配合は、前章の実験結果から、Table 1 中の No. 3, 混和剤の組合せは Table 2 中の No. D とし、急硬剤を添加した配合と徐放剤を添加した配合をそれぞれ配合 A および配合 B とした。

b) 練りませ方法と実験方法

ミキサは水平二軸強制型で容量 3 m³ のものを使用し、練りませ量は 2.5 m³ とした。練りませ方法は室内実験と同一とした。練りませ時間を 1 分、2 分および 3 分と変化させた実験も行った。各練りませ時間別にコンクリートのスランブフローおよびその経時変化、空気量、凝結時間、圧縮強度試験を行った。各試験方法は室内実験の時と同一とした。また、2 分間練りませたコンクリート 2 バッチ分を 1 台のトラックアジテータに投入して実際に走行して運搬を行い、20 分、60 分および 100 分の運搬時間ごとに試料を採取して、スランブフロー、空気量および圧縮強度の試験を行った。

この種のコンクリートは単位水量の相違がコンクリートの性状に及ぼす影響が大きいと考えられたために、骨材の表面水率の管理を徹底した。つまり、各バッチごとに細骨材と粗骨材の試料を各計量器の中心位置から採取して、その表面水率を赤外線水分計を用いて測定し、水量補正を行ってから練りませた。表面水率は細骨材が 5.7~7.0%, 粗骨材が 0.8~0.9% であった。

c) 実験結果と考察

室内実験の場合と比較して、所定のスランブフローを得るための高性能減水剤の添加率 H/C は、配合 A の場合、室内実験では 2.70%, 実機プラントでは 2.80%, 配合 B の場合、室内実験では 2.42%, 実機プラントでは

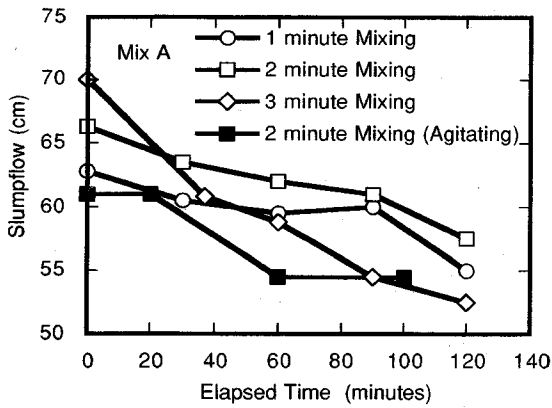


Fig.12 Change in Slumpflow

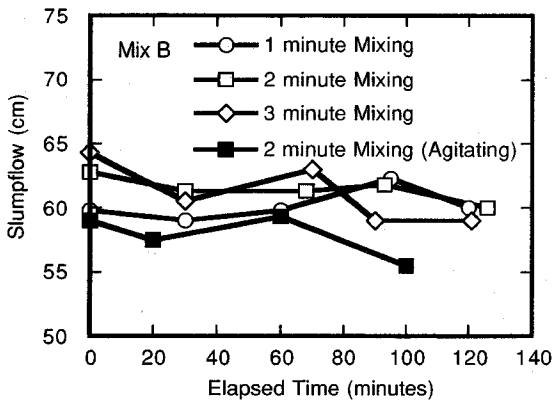


Fig.13 Change in Slumpflow

2.47%であり大差なかった。コンクリートの練り上がり温度は17~18°Cであり、室内実験と大差なかった。練りませ時間とスランプフローおよびその経時変化、空気量、圧縮強度、凝結時間との関係をFig.12からFig.15に示す。

練りませ直後のスランプフローは、両配合とも練りませ時間が長くなるほど大きくなる傾向であった。しかし、経時変化は配合Aでは練りませ時間が長い方がやや大きく、配合Bでは練りませ時間との関係は大差がない傾向であった。これらの傾向は室内実験の結果と同様であった。

トラックアジテータにより運搬したコンクリートのスランプフローと練り置きしたコンクリートのスランプフローとを比較すると、練りませ直後の値が多少相違していたが経時変化量に大差はなかった。空気量は練りませ時間が長いほど、また運搬時間が長いほど、減少していた。特に配合Aでは、運搬時間の増加に伴って空気量の減少量が大きかった。この原因は不明であるが、混和剤の種類によっては空気量の変化に注意する必要があることが示された。

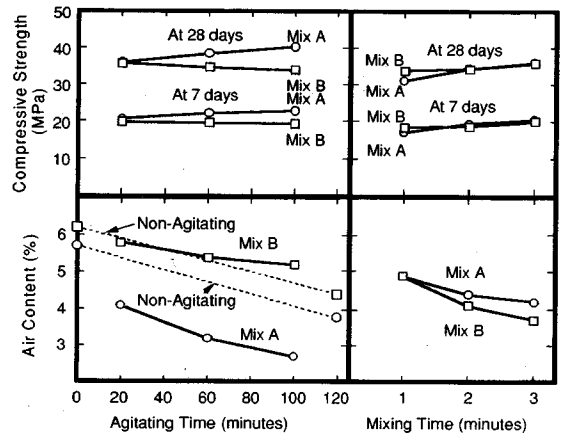


Fig.14 Results of Plant Test

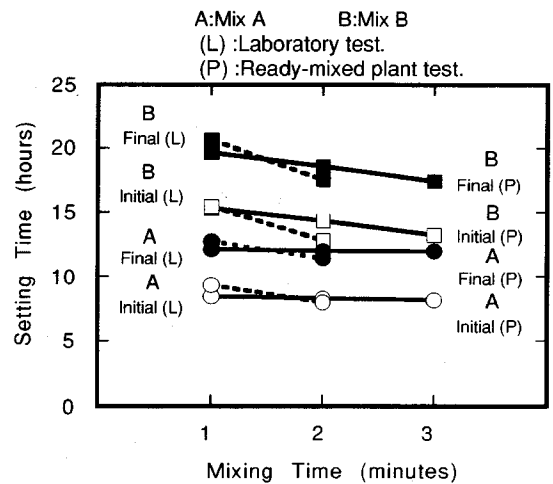


Fig.15 Change in Setting Time

凝結時間は、練りませ時間の増加に伴い短くなっており、室内実験と実機プラントでもその傾向は同様であった。圧縮強度は、両配合とも練りませ時間の増加に伴いやや増加していた。これは練りませ時間の増加に伴う空気量の減少が一つの要因であると考えられる。

以上、実機プラントにおける練りませ実験の結果、練りませ時間とコンクリートの諸性質との関係が明らかになり、その結果も室内実験と同様な傾向が多かった。最適練りませ時間の決定は施工条件や要求品質によって相違するためにこれらの結果のみから決定できないが、諸結果から判断すると今回の条件下では、2分間練りませれば充分であると考えられる。

4. 側圧実験

(1) 目的

高流動コンクリートを打込んだ場合に型わくに作用する初期の側圧は、コンクリートを液体と見なした時の液

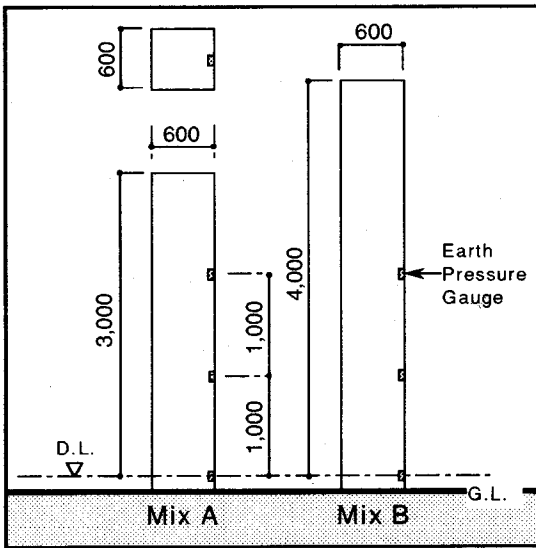


Fig.16 Specimen and Gauge Position

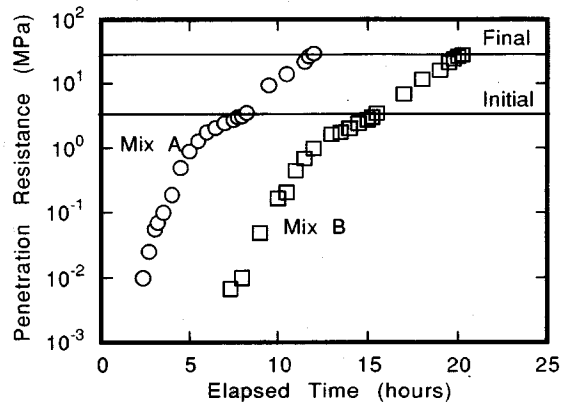


Fig.18 Penetration Resistance

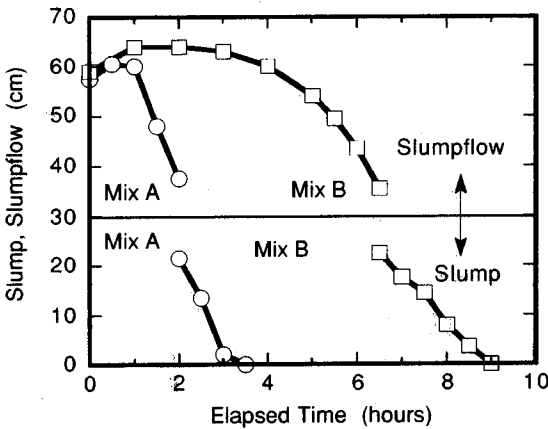


Fig.17 Slump and Slumpflow

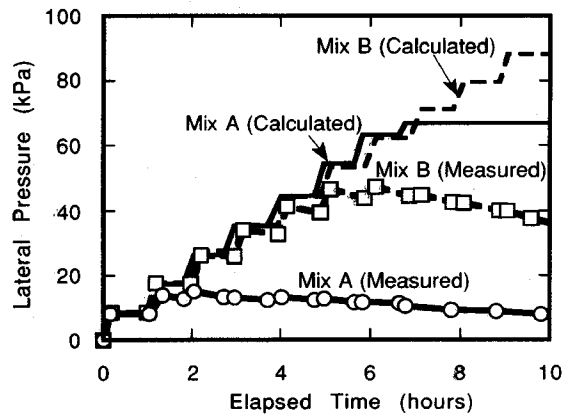


Fig.19 Lateral Pressure

圧、すなわちコンクリートの単位容積重量に打込み高さを乗じた値が作用するとの報告^{9),10)}がある。その後の側圧は、初期値から徐々に低減されていくと考えられるが、その経時変化に関して詳細に検討した文献は少ない。そこで、打上り速度が一定の条件で、高流動コンクリートを徐々に打込んだ場合を想定して、側圧の変化を定量的に把握する目的で側圧実験を行った。

(2) 実験方法

a) 使用材料、配合および練りませ方法

材料と配合は実機プラント実験と同一とした。コンクリートの練りませ方法は室内実験と同一とした。ただし、練りませ量は 100 l とした。

b) 打込み方法、計測方法及各種の試験方法

型わくおよび計測器の設置位置を Fig.16 に示す。コンクリートの打上り速度は 0.4 m/h とした。打込み

方法は、フレキシブルホースを下部に取り付けたホッパを準備し、練りませたコンクリートをそのホッパ内に静かに投入する方法とし、連続して練りませた 2 パッチ分のコンクリートを 1 時間間隔で 0.4 m の高さ分ずつ自重で流し込んだ。配合 A では高さ約 3 m まで、配合 B では高さ約 4 m まで打込んだ。コンクリートは 1 回の打込みごとに練りませた。型わくに作用する側圧の測定は、基準レベル (Fig.16 の D.L.) から 0, 1 m および 2 m の 3 箇所を設置したひずみゲージ式の直径 20 cm の土圧計で行った。コンクリートの練上り温度と型わく周辺の温度は約 20°C に保った。

コンクリートの品質変化を定量的に把握するために、コンクリートの凝結時間、スランブフローおよびスランブの経時変化の他、コンクリートの粘着力の経時変化をペーン試験により測定した。ペーン試験の羽根は、10×20 cm の寸法の 4 枚羽根とした。

(3) 実験結果と考察

a) 品質試験結果

スランブフローおよびスランブの経時変化とプロクター貫入抵抗値の経時変化を Fig.17 と Fig.18 に示す。

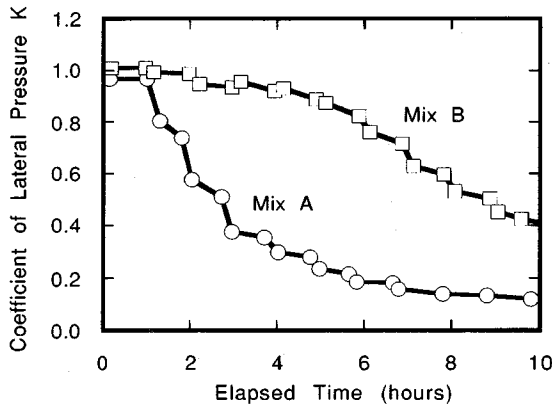


Fig.20 Coefficient of Lateral Pressure

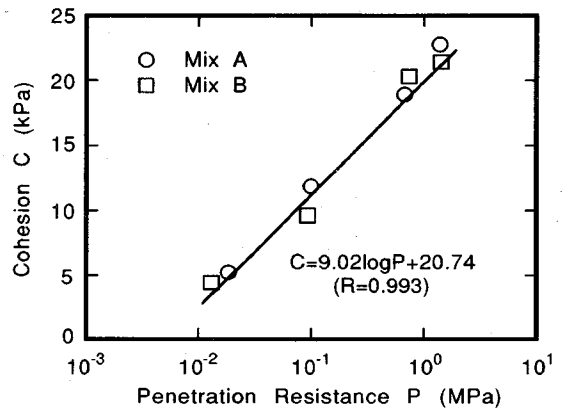


Fig.22 Cohesion from Triaxial Test

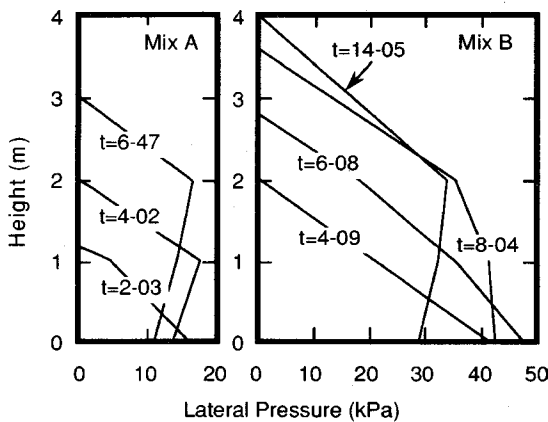


Fig.21 Change in Lateral Pressure

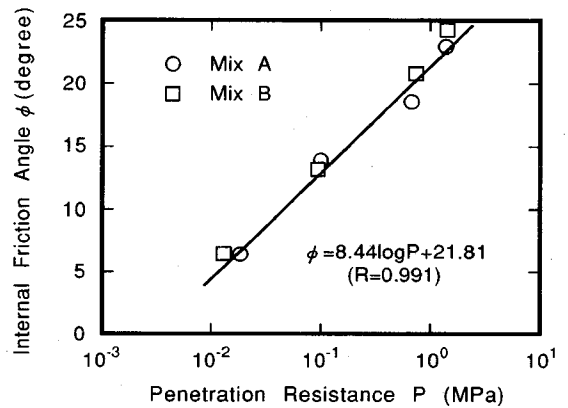


Fig.23 Internal Friction Angle from Triaxial Test

b) 側圧の経時変化

コンクリートを打込んだ場合に型わくに作用する側圧は一般に式(5)で表示される。

$$p = K\gamma H \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 p : 側圧 (kPa)

K : 側圧係数 (0~1)

γ : コンクリートの単位容積重量 (kN/m³)

H : 打込まれたコンクリートの高さ (m)

基準レベルにおいて、 γH を計算によって求めた値と土圧計で検出した側圧の値の経時変化を Fig.19 に示す。配合AおよびBの場合とも第一層の打込み開始時には、側圧はほとんど γH の値を示している。このことは高流動コンクリートが高い流動性を有していること、且つ高流動コンクリート中の粗骨材のかみ合いがほとんど生じていないことを示していると考えられる。Fig.19より、配合Aの場合の側圧は打込み開始後約2時間で最大側圧約17 kPaを示し、その後は減少している。また、配合Bの場合の側圧も、打込み開始後約6時間で最大側圧約47 kPaを示し、その後は徐々に減少していた。側圧が最大値を示す時のスランプフローは両配合とも40 cm

程度であった。式(5)から算出した側圧係数の経時変化を Fig.20 に示す。配合Aの場合は、側圧係数は打込み開始時の1.0から徐々に低下し、側圧が最大を示した約2時間後には約0.58であった。配合Bの場合は、側圧係数は打込み開始時の1.0から徐々に低下し、側圧が最大を示した約6時間後には約0.76であった。

高さ別の側圧の経時変化を Fig.21 に示す。各土圧計で検出した側圧は、コンクリートの打込み高さの上昇に伴い増加するが、Fig.21 に示したように側圧は最大値を示した後に減少する。そのため、配合Aでは高さ0、1 m、2 m に設置した土圧計の最大値を示す時間はそれぞれ、約2時間後、約4時間後および約6時間後になり、側圧の最大値を示す位置が徐々に上方へ移動していくことが示されている。配合Bでは凝結時間が遅いために、高さ0、1 m に設置した土圧計のみに最大値が表れており、その時間は約6時間後と約8時間後であった。しかし、最大値が上方へ移動する傾向は表れている。

c) 三軸圧縮試験結果から算出した側圧の試算

ランキンの主動土圧式により、側圧が推定できるかどうかの検討を行った。すなわち、コンクリートの粘着力

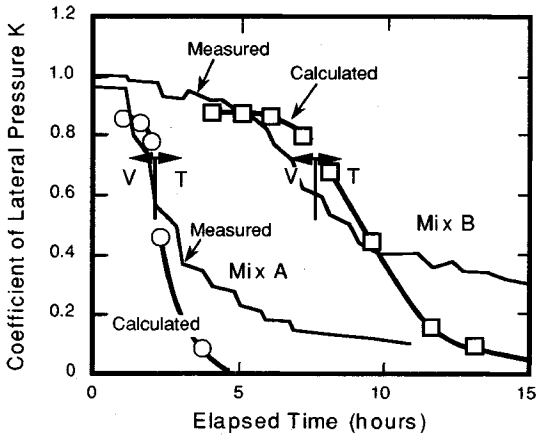


Fig.24 Coefficient of Lateral Pressure

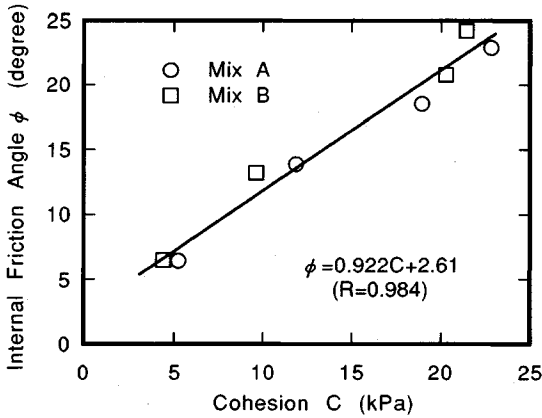


Fig.25 Relationship between C and φ

Cと内部摩擦角φを三軸圧縮試験により求め、その経時変化を測定して、その時間におけるCとφから側圧係数を算出してみた。試験方法は土質工学会基準「土の非圧密非排水(UU)三軸圧縮試験方法」に準じて行った。供試体寸法はφ10×h20cmの円柱形とし、予備実験の結果から側方向応力σ₃は0~3.0 kgf/cm²(0.294 MPa)、載荷速度は軸ひずみが2%/分の割合で生じる速度とした。試験は配合AとBについて行った。両配合とも、試料の自立状況と測定誤差を考慮して、スランプが10cm程度以下になってから計測を始めた。プロクター貫入抵抗値PとCとの関係をFig.22に、Pとφとの関係をFig.23に示す。両図とも配合間では大差がなかった。両配合は混和剤の種類が相違するだけであるのでこれらの結果は当然であると考えられる。ここで、実験で求めたCとφから、式(6)を用いて算出したランキンの主動土圧係数の変化をFig.24中(記号Tの範囲)に示す。

$$K = \tan^2(45^\circ - \phi/2) - (2C/\gamma H) \times \tan(45^\circ - \phi/2) \dots \dots \dots (6)$$

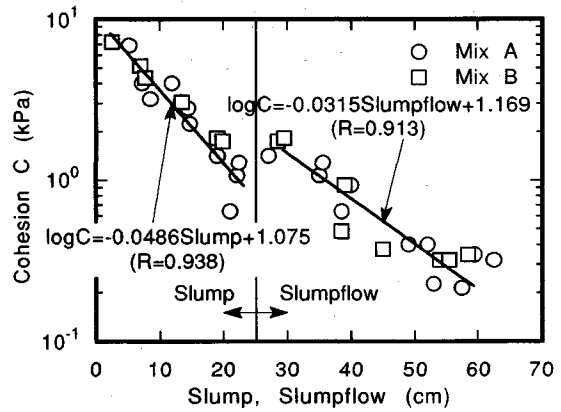


Fig.26 Change in Cohesion

ここで、C：粘着力 (kPa)
φ：内部摩擦角 (°)

一般に土圧計による側圧の測定では最大値を示した後の減少過程の値の測定の信頼度は低く、定量的な検討は無意味であると言われている。しかし、配合Aで3時間、配合Bで10時間程度までは、実測の側圧係数と計算値とは比較的良く一致している。その後は両者が大きく相違する。

ここで、Cとφの値はスランプが10cm程度以下になった後しか求めていない。そこで、それ以前の側圧を推定するために、次のような手順で試算を行った。すなわち、①三軸圧縮試験で求めたCとφとの関係は、実験範囲より小さい範囲でも成立すると仮定する。②コンクリートの粘着力Cをベーン試験で測定する。③Fig.25に示す三軸圧縮試験から求めたCとφとの関係およびベーン試験から求めたコンクリートの粘着力Cからφを求める。④それらのCとφから式(6)を用いて側圧係数を算出する。

この方法にて、側圧係数を算出した結果をFig.24(記号Vの範囲)に示す。Fig.24で、Tは三軸圧縮試験から算定した範囲であり、Vはベーン試験から算定した範囲である。計算結果と実測結果とは比較的良く一致している。これにより、本実験に用いた配合のコンクリートであれば前述の仮定は含むものの、このような手順で側圧の変化が試算できたことになる。

なお、ベーン試験で求めたコンクリートの粘着力とスランプフロー、スランプとの関係はFig.26に示すように比較的良好的な相関があった。そのため、Fig.25とFig.26に示すように、両者の関係が明確に求まる配合であれば、両者の関係を予め求めておき、スランプフローやスランプを管理することで側圧の経時変化の試算が行えることになると考えられる。

以上、側圧実験の結果、本実験に用いた高流動コンクリートの型わくに作用する側圧に関して、打込み直後は

コンクリートを液体と見なしたときの液圧が作用することのほか、側圧の最大値、およびその後の変化の概要が把握できた。

5. ま と め

3成分系低発熱セメントの単位量を 350 kg/m^3 程度にし、アクリル系の増粘剤を添加した高流動コンクリートの性状に関して各種の実験を行った。

まず、各種混和剤の効果を定量的に明らかにし、実機プラントで練りませが可能であることを確認した。そして、高流動コンクリートを使用した場合の型わくに作用する側圧の変化を測定するとともに、その側圧の変化の試算を行った。本実験の範囲で得られた主な結論をまとめると次のようになる。

(1) モルタルの粘着力は増粘剤の添加や細骨材率の増加に伴って増加する。モルタルの粘着力が大きくなるにしたがって、粗骨材の材料分離が抑制される。また、コンクリートの格子鉄筋の通過性能は、モルタルの粘着力が大きいくほど、単位粗骨材量が少ないほど良好になる。

(2) 徐放機能を有する分散剤の添加により、凝結時間が遅延し、スランプフローの保持時間も増加する。また、無機化合物系の急硬剤の添加により、施工に必要なスランプフローを1時間以上保持しながら、始発時間を2.5時間程度、終結時間を3時間程度短縮することができる。

(3) 実機プラントでの実験では、練りませ時間と運搬時間が高流動コンクリートの諸性状に与える影響を明らかにした。そして、実機プラントでも、室内実験とほぼ同様のコンクリートが得られることが分かった。

(4) 始発時間を約7時間と約15時間程度に制御した高流動コンクリートをそれぞれ高さ3mと4mの型わくに0.4m/hの打込み速度で打込んだ場合の側圧を測定した。その結果、両配合いずれの場合も、型わくに作用する側圧は、打込み当初はコンクリートを液体とみなした時の液圧を示したが、時間経過とともに側圧は減少した。前者では約2時間後に最大側圧値約17kPaを示し、後者では約6時間後に最大側圧値約47kPaを示した。側圧が最大値を示す時のスランプフローは両配合

とも約40cmであった。

(5) 本実験で使用したコンクリートに関して、コンクリートの粘着力 C と内部摩擦角 ϕ の値とその変化を三軸圧縮試験やベーン試験から求めた。それらの値から、ランキン式を用いて側圧の経時変化の試算を行った。側圧が最大値を示した後ある程度の範囲までの試算結果は、実測値と比較的良好一致した。

参 考 文 献

- 1) 河井 徹・岡田武二：流動化した高強度軽量コンクリートの材料分離に関する一実験、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9, No. 1, pp. 235~240, 1987年6月。
- 2) 小沢一雅・前川宏一・岡村 甫：ハイパフォーマンスコンクリートの開発、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 11, No. 1, pp. 699~704, 1989年6月。
- 3) 竹下治之・佐原晴也・横田季彦：締固め不要高流動コンクリートに関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 1, No. 1, pp. 143~154, 1990年6月。
- 4) 新藤竹文・松岡康訓・T. Somnuk・坂本 淳：締固め不要コンクリートのフレッシュな状態における性状、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, V-101, pp. 228~229, 1990年9月。
- 5) 河井 徹：流動化剤と増粘剤のコンパティビリティに関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, pp. 37~42, 1990年6月。
- 6) 河井 徹：高流動域まで流動化したコンクリートに対する粘稠剤の効果について、土木学会第43回年次学術講演会講演概要集, V-155, pp. 358~359, 1988年10月。
- 7) 藤王 明・田中秀輝・飯塚正則：反応性高分子によるコンクリートのスランプコントロール、セメント技術年報, 39, pp. 81~84, 1985年。
- 8) 中島良光・梶尾秀幸・三浦信一・牧野英久：二成分系のハイパフォーマンスコンクリートの配合に関する一考察、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, pp. 173~178, 1991年6月。
- 9) 坂本 淳・松岡康訓・新藤竹文・S. Tangtermsirikul：超流動コンクリートの実構造物への適用に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, pp. 881~886, 1991年6月。
- 10) 小門 武・三宅正人：スラグ系締固め不要コンクリートの基礎特性と充填性実験、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, pp. 875~880, 1991年6月。
(1992. 2. 12 受付)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE PROPERTIES OF HIGHLY FLOWABLE CONCRETE USING LOW HEAT GENERATING CEMENT

Toru KAWAI, Yasuhiro KURODA and Yoshihiro MUKAWA

This paper describes the properties of the highly flowable concrete using low heat generating cement. Firstly, influences of several admixtures on the properties of the concrete were determined. It was verified that setting time of the concrete could be controlled by adding the additives, maintaining the required qualities of the concrete. Secondly, the two mixtures were placed into the formwork. The time-dependent change in the lateral pressures and those maximum values against the formwork were measured. The actual lateral pressures were tentatively calculated using both the cohesion and the internal friction angle of the concrete.