

論文

[1074] ペーストのレオロジー特性に及ぼす高性能 AE 減水剤の影響

陳庭*1・姜丙熙*2・野口貴文*3・李翰承*1

1. はじめに

最近、フレッシュコンクリートの施工性能改善および硬化コンクリートの高品質化を目的とする高流動コンクリートの研究が盛んに行われている。このような高流動コンクリートは、従来のコンクリートに比べ粘性が高いなど、フレッシュ時の性質が異なるため、スランプ試験だけで流動性を評価するのは不十分であり、レオロジー特性に基づいて評価を行う必要がある。また、その調合設計方法は、経験に基づいた従来のコンクリートの方法とは異なり、流動性支配要因およびその材料・調合との関係に基づく理論的な調合設計方法の確立が望まれている。

高流動コンクリートのレオロジー特性に基づいた流動性の評価を調合設計に結び付けるには、コンクリートやモルタルを骨材とペーストの固液二相材料としてとらえ、レオロジー特性に与える材料や調合の影響を解明することが必要であると考えられる。特に、コンクリートの流動性に大きな影響を与えるペーストのレオロジー特性は、粉体の粒度分布・鉱物組成、混和剤の種類等に左右されると考えられる。筆者らは、ペーストのレオロジー特性に与える粉体および混和剤の種類の影響に関する一連の実験を行っている。本研究では、粉体として、普通ポルトランドセメントおよびそれに高炉スラグ微粉末を加えたものを用いた場合を対象とし、高性能 AE 減水剤の種類がペーストのレオロジー・付着特性に与える影響について実験的に検討した。なお、本研究は日本建築学会に設置された高流動コンクリート研究小委員会（委員長：友澤史紀東京大学教授）の研究の一環として行ったものである。

2. 実験概要

2. 1 実験因子および水準

各種高性能 AE 減水剤を用いた高流動ペーストの流動特性を把握するため、水粉体比を約25%とし、高性能 AE 減水剤の種類および粉体の種類を実験因子として、フロー値、レオロジー定数および付着力を測定した。また、経時変化（練混ぜ直後、練混ぜ後45分、練混ぜ後90分）にともなうフロー値、レオロジー定数および付着力の変化についても測定した。実験の因子および水準を表-1に示す。

2. 2 使用材料およびペーストの調合

実験に用いた高性能 AE 減水剤の種類および主成分を表-2に示す。粉体としては、普通ポルトランドセメント（以下OPと略す）および粉体の容積の40%を高炉スラグで置換したもの（以下BSと略す）を用いた。ペーストの調合は表-3のようにペースト中の水の容積を44%一定とし、20℃、RH60%の恒温恒湿室で、落下運動を与えない場合のフロー値が 35±1.5cmになるように高性能 AE 減水剤を添加した。ペーストの容積は 2 l で、均質に混合した粉体をミキサ（容量 5 l）に投入し、水を投入して低速で90秒間練り混ぜた後、さらに高速で 180秒間練混ぜた。

2. 3 測定項目および測定方法

ペーストのフロー試験は、JIS R 5201に定められたフローコーンを用いて落下運動を与えないでフロー値（単位：cm）を測定した。また、フロー値が20cm、30cmまでに到達する時間を測定し、それぞれの

表-1 実験因子および水準

実験因子	水	準
粉体の種類	1. 普通ポルトランドセメント（記号OP, 比重3.16） 2. 普通ポルトランドセメント+高炉スラグ（40%）（記号BS, フレーズ：6000cm ² /g）	
混和剤の種類	1. ポリカルボン酸系 - 4種類 3. アミノスルホン酸系 - 2種類	2. ナフタリン系 - 2種類

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻, 工修（正会員）
*2 韓国, 釜山, 東亜大学教授 工科大学建築工学科, 工博（正会員）
*3 東京大学助手 工学部建築学科, 工修（正会員）

表-2 高性能A E減水剤の種類及び主成分

分類	記号	主成分	用途
ポリカルボン酸系	P 1	ポリカルボン酸エーテル系の複合体	一般高強度
	P 2	特殊アミン系高分子界面活性剤	高強度
	P 3	ポリカルボン酸塩・グラフトコポリマー	一般高強度
	P 4	ポリカルボン酸塩・長鎖グラフトコポリマー	高強度
ナフタレン系	N 1	変性リグニン、アルキルアルシルホン酸塩系及び活性持続ポリマー	高強度
	N 2	ポリアルキルアルシルホン酸塩と反応性高分子	高強度
アミノスルホン酸系	A 1	芳香族アミノスルホン酸塩系高分子化合物	高強度
	A 2	芳香族アミノスルホン酸塩・特殊有機酸塩複合体	高強度* 1

* 1 高炉スラグ混入時使用

表-3 セメントペーストの調合

NO	記号	水粉体比 (%)	ペースト中水の容積比 (%)	混和剤添加量 (B%)	フロー値 (cm)
1	OPP1	25.0	44.2	1.0	36.5
2	BSP1	25.9	44.2	0.7	36.0
3	OPP2	25.0	44.2	0.7	34.5
4	BSP2	25.9	44.2	0.55	34.5
5	OPP3	25.0	44.2	1.2	34.5
6	BSP3	25.9	44.2	0.6	35.5
7	OPP4	25.0	44.2	1.1	35.0
8	BSP4	25.9	44.2	0.75	36.5
9	OPN1	25.0	44.2	4.0	36.5
10	BSN1	25.9	44.2	2.5	36.5
11	OPN2	25.0	44.2	4.0	36.0
12	BSN2	25.9	44.2	2.6	36.0
13	OPA1	25.0	44.2	2.0	36.0
14	BSA1	25.9	44.2	1.8	35.5
15	OPA2	25.0	44.2	1.65	35.0
16	BSA2	25.9	44.2	1.45	37.0

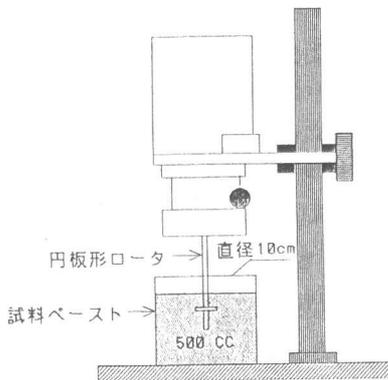


図-1 回転粘度計

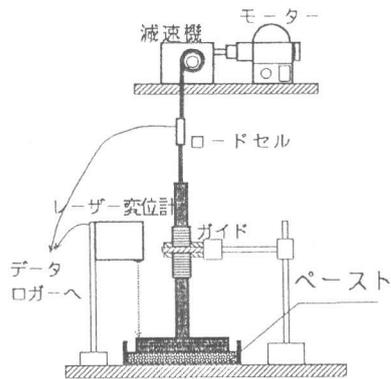


図-2 付着試験機

フロー速度を算出した。

ペーストのレオロジー定数の測定は図-1に示す回転粘度計（内円板回転型、東機産業製R型粘度計、BH5番ロータ使用）を用いた。0.5、2.5、10、20、50、100rpmの回転速度についてそれぞれ60秒ずつ、回転速度の上昇過程および下降過程においてずり応力を測定し、塑性粘度および降伏値を求めた。

また、ペーストの付着特性は、既往の研究[1][2]を参考にして図-2に示す付着試験機によって測定した。直径12cm、高さ1.5cmの皿の中に厚さ1cmとなるように入れたペーストの上面に直径10cmの亚克力板を付着させた後、載荷板を約0.05mm/secの一定速度で引き上げ、ロードセルおよびレーザー変位計を使用して荷重-変形関係を求めた。以上のフロー試験およびレオロジー定数・付着特性の測定を練混ぜ直後および45分、90分経過後に実施した。目視で分離していると認められたペースト（セメント粒子の沈降化傾向が認められたもの）については、レオロジー定数及び付着特性の考察（図8以後）の対象外とした。

3. 実験結果および考察

3.1 フローの経時変化

高性能A E減水剤の種類の違いによるフロー値の経時変化を図-3に示す。

OPの場合、ポリカルボン酸系のフロー値は混練後45分で平均8%程度減少したが、それ以後の減少は見られない。ナフタレン系はフロー値35cmで（OPN1、OPN2の混練直後）分離が見られ、他の高性能A E減水剤に比べ経時変化が大きい。アミノスルホン酸系のA1はフロー値の保持性能が優れているのに対し、同じ系列のA2はその変化が激しい。

B Sの場合、ポリカルボン酸系およびアミノスルホン酸系の経時変化は高炉スラグの混合によってきわめて小さくなった。ナフタレン系の場合は高炉スラグの混合による影響を受けなかった。また、同一フロー値を得るための高性能A E減水剤使用量は高炉スラグの混合により減少し、ポリカルボン酸系では21~50% (平均33%)、ナフタレン系では35~38% (平均37%)、アミノスルホン酸系では10~12% (平均11%) 減少した。

図-4はフロー値20cm到達時までのフロー速度の経時変化を示している。高炉スラグの混合により、ポリカルボン酸系ではフロー速度が増大した。また、経時変化に関しては、OPの場合、ポリカルボン酸系およびアミノスルホン酸系のフロー速度の経時変化は45分後にはほとんど見られなかったが、ナフタレン系は時間経過にともないフロー速度が直線的に低下した。B Sの場合、ポリカルボン酸系ではフロー速度の経時変化が大きく、ナフタレン系およびアミノスルホン酸系では45分以後のフロー速度の変化は極めて小さかった。

従って、混練直後同じフロー値でも、高性能A E減水剤の種類によってフロー値およびフロー速度の経時変化は異なること、ナフタレン系を除いて、高炉スラグの添加によって時間の経過に伴うフロー値の低下は小さくなることわかった。

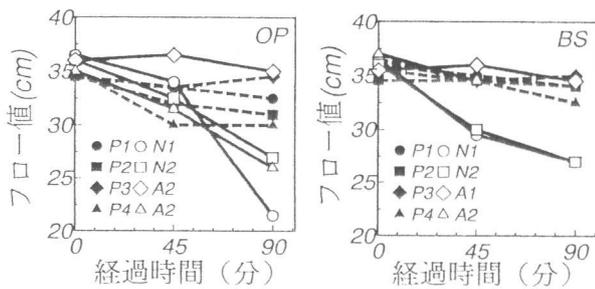


図-3 高性能A E減水剤の種類とフローの経時変化

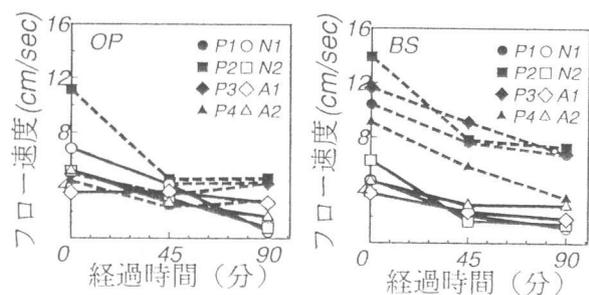


図-4 高性能A E減水剤の種類とフロー速度の経時変化

3. 2 レオロジー特性

3. 2. 1 流動曲線

図-5に回転粘度計で測定したペーストの代表的な流動曲線をフロー値の大きさ別に示す。フロー値が30cm程度以上の流動曲線は直線的でビンガム体の性質を示しているが、30cm未満では曲線となりチクソトロピー体の性質を示している。従ってフロー値が大きい高流動ペーストはビンガム的なレオロジー特性を持っていると言える。本実験では粘度計のずり速度が $0.132S^{-1}$ である時のずり応力をペーストの降伏値とした。また、粘度計のずり速度が2.64, 5.28, $13.2S^{-1}$ である時のずり応力を回帰分析し、その傾きを塑性粘度とした。

3. 2. 2 塑性粘度および降伏値

図-6は混練直後のフロー値が $35 \pm 1.5cm$ を示すペーストにおける高性能A E減水剤の種類と塑性粘度の関係を示している。

OPの場合、ポリカルボン酸系の塑性粘度は種類によって若干差を示しているが、約 $3 Pa \cdot S$ である。また、既往の研究によるとナフタレン系の高性能A E減水剤を用いたコンクリートはポリカルボン酸系のものよりも塑性粘度が高いと報告されている[3]が、本研究では $2 Pa \cdot S$ と低い値を示した。これは分離したペーストの低濃度部分を測定したためと思われる。また、アミノスルホン酸系はポリカルボン酸系より若干大きい塑性粘度を示しているが、A1とA2の差は大きい。

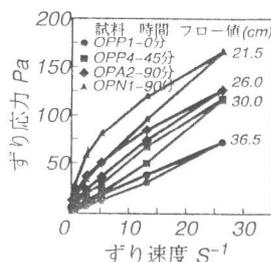


図-5 流動曲線

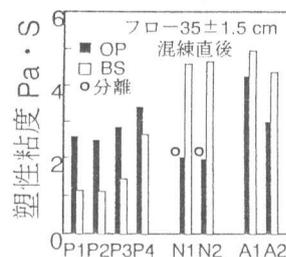


図-6 高性能A E減水剤の種類と塑性粘度

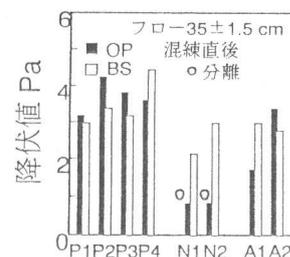


図-7 高性能A E減水剤の種類と降伏値

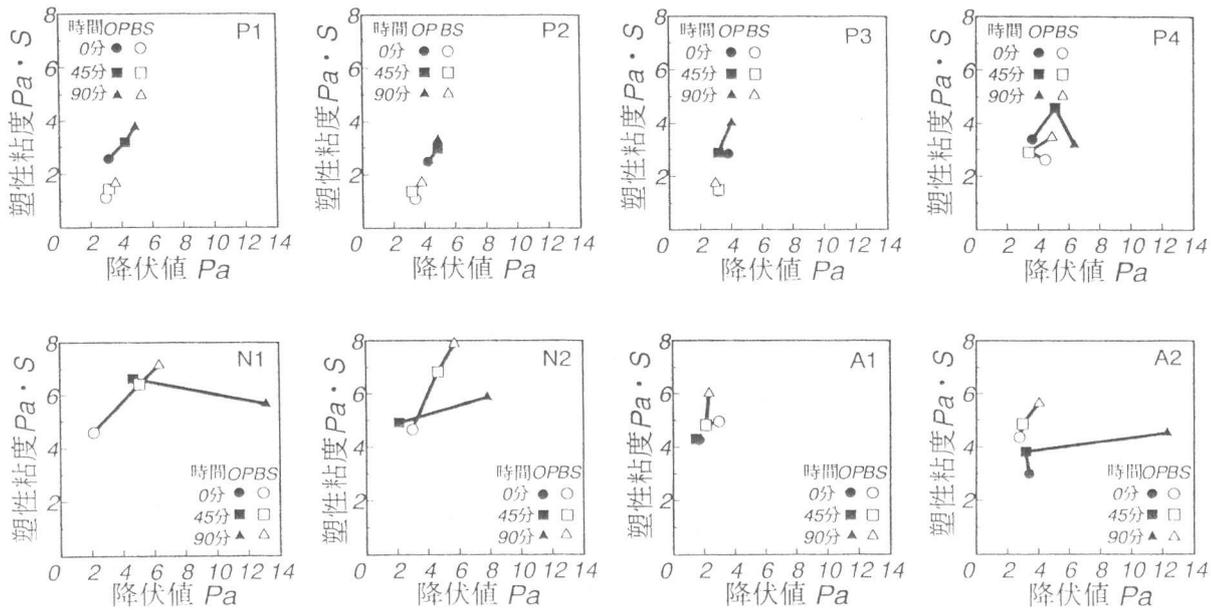


図-8 降伏値と塑性粘度の経時変化

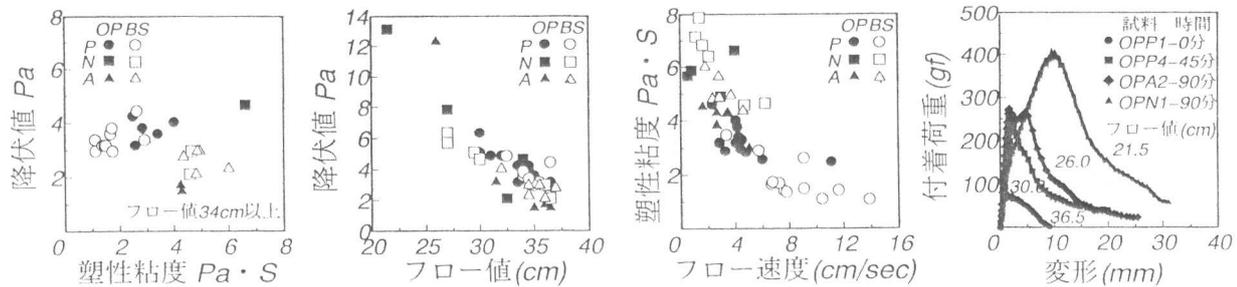


図-9 塑性粘度と降伏値の関係 図-10 フローと降伏値の関係 図-11 フロー速度と塑性粘度の関係 図-12 付着曲線

一方、高炉スラグの混合の影響に関しては、ポリカルボン酸系ではB Sの塑性粘度はOPより非常に低くなったが、アミノスルホン酸系ではむしろB Sの方が塑性粘度が大きくなった。

図-7は高性能A E減水剤の種類と降伏値の関係を示している。

フロー値が 35 ± 1.5 cmが得られるペーストの降伏値は2~3Paであり、図-6において塑性粘度が大きい場合には降伏値は小さくなる傾向を示している。また、高炉スラグの混合による降伏値の変化は、高性能A E減水剤の種類によって異なる傾向を示し、増加する場合、低下する場合がみられた。

3. 2. 3 塑性粘度および降伏値の経時変化

図-8は降伏値と塑性粘度の経時変化を示している。

ポリカルボン酸系の場合、P4を除いて、OPでは塑性粘度と降伏値の経時変化はほぼ直線的に増加した。また、高炉スラグの混合によって降伏値および塑性粘度の経時変化は小さくなる傾向を示した。

ナフタレン系の場合、OPでは、塑性粘度の経時変化は混練後45分以後きわめて小さかったが、降伏値は急激に増加した。また、B Sにおいても他の高性能A E減水剤に比べナフタレン系では降伏値と塑性粘度の経時変化は大きかった。

アミノスルホン酸系のA1では、OP、B Sに関わらず降伏値と塑性粘度の経時変化は小さかったが、A2ではOPの場合、45分以後降伏値が急激に増加した。

降伏値と塑性粘度の経時変化は高性能A E減水剤の種類によって異なる傾向を示した。粉体としてOPを用いた場合、ナフタレン系とアミノスルホン酸系A2の経時変化は大きく、特に降伏値の変化が大きかった。従って、時間経過による降伏値の増加を防ぐためには高性能A E減水剤の適切な選択と高炉スラグの混合が効果があると考えられる。

図-9はフロー値34cm以上のペーストの降伏値と塑性粘度の関係を示したものである。明確な相関性は認められないが、降伏値と塑性粘度との関係は、高性能AE減水剤の種類によって特定の領域に存在することがわかる。ポリカルボン酸系はナフタレン系・アミノスルホン酸系に比べ降伏値が若干大きく、塑性粘度は小さい。以上のことから、高流動ペーストの降伏値と塑性粘度は、フロー値が同一でも、高性能AE減水剤の種類によって異なることがわかる。

また、図-10および図-11に示されるように、フロー値と回転粘度計で測定した降伏値との相関性およびフロー速度と塑性粘度との相関性は高く、フロー値は降伏値に、フロー速度は塑性粘度に強く影響を受けると考えられる。

3.3 附着特性

3.3.1 附着曲線

ペーストの附着破壊は、フロー値が30cm以上ではペーストとアクリル板の界面で発生し、フロー値が30cm以下ではペースト内部で発生した。図-12は附着試験機によって測定した変形と附着荷重との関係を表した附着曲線である。この附着曲線から最大附着荷重(gf)、附着タフネス(附着曲線の面積, gf・mm)、破断時の変形量(mm)を附着特性値として算出した。

3.3.2 高性能AE減水剤の種類と附着特性

図-13~図-15は混練直後のフロー値が 35 ± 1.5 cmのペーストにおいて、高性能AE減水剤の種類が附着特性値(最大附着荷重, 附着タフネス, 破断時の変形量)に及ぼす影響を示したものである。粉体としてOPを用いた場合、降伏値が比較的大きいポリカルボン酸系とアミノスルホン酸系のA2で、いずれの附着特性値も大きい値を示した。また、粉体としてBSを用いた場合、ポリカルボン酸系とアミノスルホン酸系のA2でいずれの附着特性値も低下したが、ナフタレン系とアミノスルホン酸系のA1ではいずれの附着特性値も若干増加した。

3.3.3 附着特性値と塑性粘度・降伏値との関係

図-16~図-18は、それぞれ塑性粘度と各附着特性値との関係を示したものである。いずれの高性能AE減水剤の場合においても、最大附着荷重および附着タフネスは塑性粘度の増加にかかわらずほぼ同じであるが、破断時の変形量は塑性粘度の増加に伴い若干増加する傾向を示した。

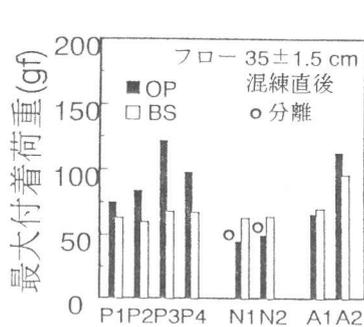


図-13 高性能AE減水剤と最大附着荷重

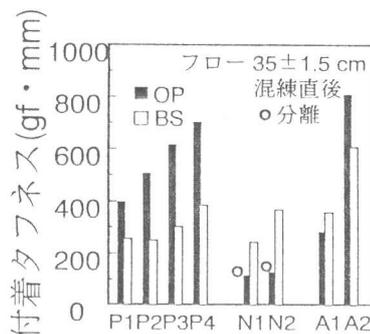


図-14 高性能AE減水剤と附着タフネス

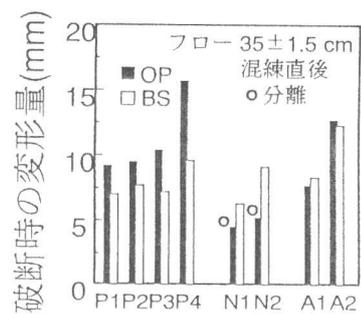


図-15 高性能AE減水剤と破断時の変形量

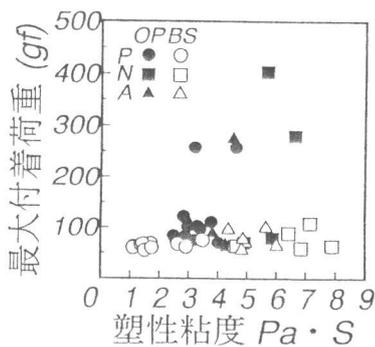


図-16 粘度と最大附着荷重

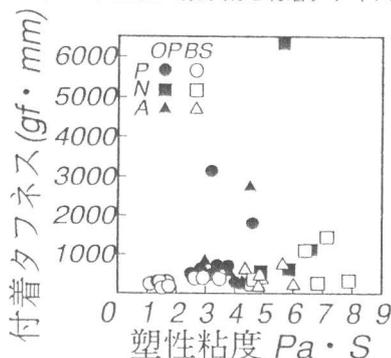


図-17 粘度と附着タフネス

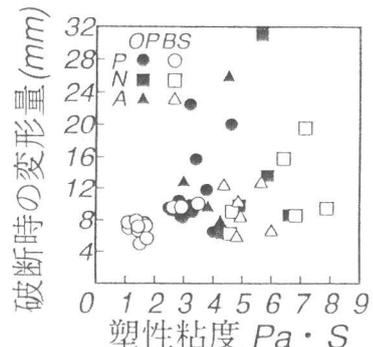


図-18 粘度と破断時の変形量

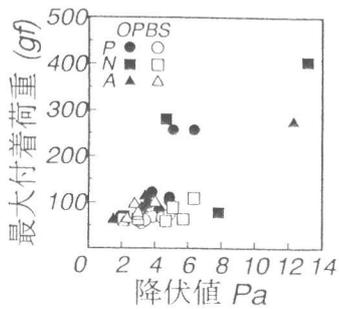


図-19 降伏値と最大付着荷重

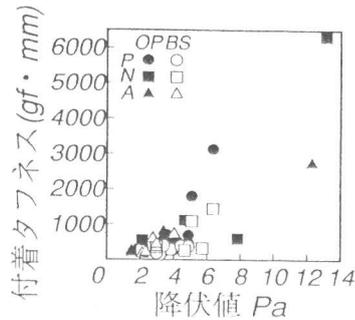


図-20 降伏値と付着タフネス

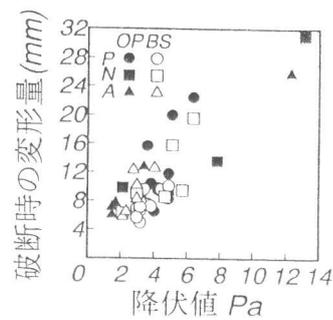


図-21 降伏値と破断時の変形量

図-19～図-21は、それぞれ降伏値と各付着特性値との関係を示したものである。高性能A E減水剤の種類に関係なく、降伏値が増加することによって最大付着荷重、付着タフネスおよび破断時の変形量は若干増加する傾向を示している。

しかしながら、本実験の範囲では、ペーストの粘度・降伏値と付着特性値との相関関係は非常に小さく、それぞれほとんど独立の変数と考えられる。

4. まとめ

以上の実験結果により得られた知見を以下に示す。

- 1) 既往の結果と同様に、回転粘度計で測定した降伏値および塑性粘度は、それぞれフロー値およびフロー速度と密接な関係があった。
- 2) 同一フロー値を得るために必要な高性能A E減水剤の使用量は、セメントの一部を高炉スラグで置換することにより、ポリカルボン酸系では平均33%、ナフタレン系では平均37%、アミノスルホン酸系では平均11%低下した。
- 3) 同一フロー値を示すペーストのレオロジー特性は、高性能A E減水剤の種類によって異なり、ポリカルボン酸系は降伏値が高く塑性粘度が低いが、ナフタレン系およびアミノスルホン酸系では降伏値が低く塑性粘度が高い傾向にあった。
- 4) 粉体の種類がペーストのレオロジー特性に及ぼす影響は、高性能A E減水剤の種類によっても異なり、高炉スラグの混合によって、ポリカルボン酸系の場合、塑性粘度は非常に低くなったが、ナフタレン系とアミノスルホン酸系では逆に大きくなった。
- 5) 混練直後同一フロー値のペーストであっても、その経時変化は高性能A E減水剤の種類によって異なる。ナフタレン系を除いて、高炉スラグの添加によるフロー値の経時変化は極めて小さくなった。
- 6) 降伏値および塑性粘度の経時変化は高性能A E減水剤の種類によって異なる傾向を示した。その変化はナフタレン系とアミノスルホン酸系A2のペーストで大きく、塑性粘度の変化よりも降伏値の変化が大きかった。また、高炉スラグの混合によって降伏値と塑性粘度の経時変化はナフタレン系を除いて小さくなった。
- 7) 高性能A E減水剤の種類に関係なく、付着特性値と降伏値・塑性粘度との間の相関は小さく、付着特性値はこれらとはほとんど独立の変数と考えられる。また、高炉スラグの混合によって付着特性値はポリカルボン酸系では低下、ナフタレン系では若干増加し、アミノスルホン酸系では種類によって異なる挙動を示した。

謝辞：本研究に際して、東京大学工学部建築学科友澤史紀教授の御指導及び卒論生寺西彰君の協力を得た。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 井上和政・和泉意登志ほか：超ワーカブルコンクリートの調合設計に関する基礎研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，A，pp. 917-918，1992. 8
- 2) 谷川恭雄・酒井雅康ほか：低水セメント比フレッシュコンクリートの材料分離の評価方法に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 925-926，1991. 9
- 3) 十河茂幸・近松竜一ほか：三成分系低発熱セメントを用いた高流動コンクリートの基礎的性質，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14，No. 1，pp. 33-38，1992