

論文 下水汚泥焼却灰を用いたコンクリートの配合設計に関する一考察

保坂 信克^{*1}・丸山 久一^{*2}・木村 仁^{*3}

要旨: 下水道整備の進展および処理施設の高度化に伴い下水汚泥の排出量が年々増加しており, その有効利用技術の開発が急務の課題となっている。下水汚泥の有効利用の一環として, 下水汚泥焼却灰をコンクリート材料として用いるための配合設計上の問題点を検討した。下水汚泥焼却灰は粒子が多孔質で水を多量に吸収することから, フレッシュ性状および硬化特性を定量的に管理することが重要である。そこで, 本研究では混和剤の添加量を中心としてコンクリートのスランプおよび圧縮強度を定量的に評価する方法を検討した。

キーワード: 下水汚泥焼却灰, 高性能 AE 減水剤, スランプ, 圧縮強度

1. はじめに

近年, 下水道整備の進展および処理施設の高度化に伴い, 下水汚泥の発生量は年々増加傾向にある。現在のところ, これらの大部分は減量化・無害化処理を行った後, 埋立て処分されている。しかし, 最終処分場の逼迫や, 新規処分場の建設が社会的風潮から困難であることから, 近い将来, 処分場不足や処理費用の高騰が懸念される。このため, 最終処分場への負担軽減や環境への配慮を前提とした廃棄物の発生抑制, 減量化, 再資源化への取組みは必要であると考えられる。特に下水汚泥は, 今後も発生量の増加が予想されることから, その有効利用技術の開発は急務の課題となっている。

下水汚泥を焼却処理した後の残渣である下水汚泥焼却灰は, コンクリート結合材として有効な SiO_2 , CaO などを含んでいることから, コンクリート材料として注目されており, これまでも有効利用に関する研究が行われている^{1,2)}。本研究でも, 下水汚泥焼却灰を多量に混入したコンクリートについて検討を進めており, 消波ブロックや均しコンクリートに適用できることを確認している¹⁾。しかし, コンクリート中に占める粉体割合が大きいため, 粘性の増加による

施工性の低下や, 所定の流動性を得るための単位水量が増加するため, 水セメント比の増大に伴い, 圧縮強度の低下を招くことが問題として提起され, いまだ実用化レベルに達していない。

下水汚泥焼却灰は粒子形状が多孔質で水を多量に吸収するといった性格を有しているため, コンクリート材料として用いた場合, フレッシュ性状と硬化特性を定量的に管理することが難しく, その評価方法を開発することが重要課題となっている。そこで本研究では, 混和剤の添加量を主体として, スランプおよび圧縮強度を配合面から定量的に評価する方法を検討することにした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用した材料の物性値を表-1に示す。また, 下水汚泥焼却灰の化学成分を表-2に示す。なお, 本研究では新潟県中越地区で排出された下水汚泥焼却灰を対象としている。

下水汚泥焼却灰とは, 下水処理によって発生する汚泥を消化・脱水・焼却処理を行った後の残渣である。約 $700\sim 1000^\circ\text{C}$ の範囲で焼却することで, 汚泥中の 80% を占める有機物は消失し,

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学 工学部 環境・建設系 Ph.D. (正会員)

*3 中越環境開発(株) 博士(工学) (正会員)

無害の汚泥固形物質となる。下水汚泥焼却灰は一次粒子 ($1\mu\text{m}$) が凝集した二次粒子 ($10\mu\text{m}$) で構成され、複雑で多孔質な粒子形状をしている。化学成分はコンクリート結合材として有効とされているカルシウム、ケイ素を多く含んでいる。また、コンクリートの凝結に悪影響を及ぼすとされるリンも含有していることから、コンクリート材料として利用する際には注意が必要である。

下水汚泥焼却灰に含まれる有害物質 (重金属) が溶出するかどうか、環境庁告示 46 号に準拠した方法で行った。結果を表-3 に示す。

いずれの物質の溶出量も産業廃棄物の基準値 (土壤環境基準) を満足する値であった。したがって、コンクリートへの混入に関して、これら有害物質の溶出は問題ないと考えられる。

2.2 配合設計

本研究では、下水汚泥焼却灰を出来るだけ多量にコンクリート材料として再利用することを目的としているため、普通コンクリートに比べて粉体量が著しく増加する。また、下水汚泥焼却灰は排出場所などによる品質変動が激しく、同じ混入量でも同一スランプを得るための単位水量が大きく異なる。そのため、従来の配合設計方法で目標スランプに必要な単位水量を推定することが困難である。そこで本研究では、桜井が提案した配合設計方法³⁾を参考に試験練りによって基本配合 (表-4) を決定した。なお、基本配合を決定する際には、単位セメント量、骨材量を固定し、単位水量と下水汚泥焼却灰混入量の混合割合を変化させた。

基本配合の主な配合条件を以下に示す。

- ・目標スランプを $10\pm 2.5\text{ cm}$ とした。
- ・単位セメント量 250 kg/m^3 とした。
- ・細骨材率を 25% とした。
- ・骨材の絶対容積を 300, 400, 500, 600, 700 L/m^3 の 5 種類とした。

2.3 練混ぜおよび養生方法

コンクリートの練混ぜには、50L のパン型強制ミキサーを用いて行った。練混ぜ方法は、セメン

表-1 コンクリートの使用材料

使用材料	種類	記号	物性または成分
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度: $3.15\text{ (g/cm}^3\text{)}$ 比表面積: $3300\text{ (cm}^2\text{/g)}$
細骨材	川砂 (信濃川産)	S	表乾密度: $2.57\text{ (g/cm}^3\text{)}$ 吸水率: 2.26 (%) 粗粒率: 2.51
粗骨材	(信濃川産)	G	表乾密度: $2.72\text{ (g/cm}^3\text{)}$ 粗粒率: 7.20 最大寸法: 20 (mm)
混和材	下水汚泥焼却灰	D	密度: $2.58\text{ (g/cm}^3\text{)}$ pH: 12.2 メディアン径: 168 (μm)
混和剤	高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系
	空気量調整剤	AE	アルキルアシルスルホン酸

表-2 下水汚泥焼却灰の化学成分

試験項目	分析結果 (%)	分析方法
カルシウム (CaO)	16.0	ICP発光分光分析法
マグネシウム (MgO)	1.9	フレイム原子吸光法
鉄 (Fe_2O_3)	7.9	ICP発光分光分析法
アルミニウム (Al_2O_3)	6.1	ICP発光分光分析法
全シリカ (SiO_2)	29.0	重量法
カリウム (K_2O)	0.84	フレイム原子吸光法
ナトリウム (Na_2O)	0.42	フレイム原子吸光法
リン (P_2O_5)	12.0	モリブデン青吸光光度法
硫黄 (SO_3)	0.95	硫酸バリウム重量法
炭素 (C)	0.61	CHNコーダー
アルカリ分	17.0	塩酸法
チタン (TiO_2)	0.26	ICP発光分光分析法
強熱減量 (lg-loss)	1.7	強熱減量法

表-3 下水汚泥焼却灰の溶出試験結果

試験項目	分析結果 (mg/L)	基準値 (mg/L)	定量限界値 (mg/L)
六価クロム (Cr^{6+})	ND	0.05以下	0.01
カドミウム (Cd)	0.001	0.01以下	0.001
鉛 (Pb)	ND	0.01以下	0.001
砒素 (As)	ND	0.01以下	0.001
総水銀 (Hg)	ND	0.0005以下	0.00005
セレン (Se)	0.001	0.01以下	0.001

ND: 定量限界値以下

表-4 配合表 (基本配合)

配合記号	V_A (L/m^3)	W/C (%)	単位量 (kg/m^3)					AE (C%)
			W	C	D	S	G	
D 54	700	64	160	250	54	450	1428	0.002
D163	600	87	218		163	386	1224	
D256	500	112	281		256	321	1020	
D342	400	139	348		342	257	816	
D425	300	166	416		425	193	612	

・配合記号は、「D混入量 (基本配合)」で表す

・ V_A は、骨材の絶対容積を表す

・細骨材率 $s/a=25$ (%)

ト、粗骨材、細骨材および下水汚泥焼却灰を 30 秒間空練りした後、所定の水と混和剤を投入し、60 秒間練混ぜた。高性能 AE 減水剤を添加した場合は、60 秒間の本練りを行った後、5 分間静置し 15 秒間後練りを行った。

コンクリートは型枠（φ10 cm×20 cm）に打設後、材齢 1 日でキャッピング、材齢 2 日で脱型をし、材齢 28 日まで水中養生を行った。

2.4 検討項目

本研究では、下水汚泥の有効利用および最終処分場への負荷低減という観点から、下水汚泥焼却灰を可能な限り多量に混入したコンクリートのスランプおよび圧縮強度を混和剤の添加量によって定量的に管理できるのかを検討した。

主な検討項目を以下に示す。

(1) フレッシュ性状

・高性能 AE 減水剤添加量

高性能 AE 減水剤によるスランプ増大効果を調べるため、表-4 で示した基本配合に高性能 AE 減水剤の添加量を粉体重量に対して 0, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 % に変えてコンクリートのスランプについて検討した。

・下水汚泥焼却灰混入量

コンクリートに下水汚泥焼却灰を可能な限り多量に混入することを目的とし、高性能 AE 減水剤を使用することによって、スランプおよび水セメント比が同一配合における下水汚泥焼却灰混入量をどの程度増加できるのかを検討した。

本実験で用いた配合を表-5 に示す。なお、本実験では、水セメント比を一定に保ち、高性能 AE 減水剤を添加することによって下水汚泥焼却灰混入量を増加できるのかを検討するため、下水汚泥焼却灰混入量の増加分、その他の材料を容積割合ずつ減少させ、配合を決定した。配合設計の概略図を図-1 に示す。

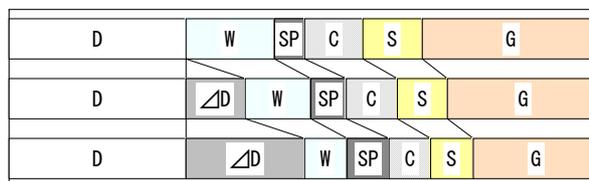
・単位水量

高性能 AE 減水剤の減水効果を確認するため、スランプ同一配合における単位水量の減少量を下水汚泥焼却灰混入量および高性能 AE 減水剤添加量によって定量的に評価する方法について

表-5 配合表（下水汚泥焼却灰量検討用）

配合記号	D増加量 (kg/m ³)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (P×%)
			W	C	D	S	G	
D342-SP 0%	0	139	348	250	342	257	816	0.0
D342-SP1.0%	0							1.0
D342-SP1.5%	0							1.5
D342-SP2.0%-8	8							2.0
D342-SP3.0%-33	33							3.0
D425-SP 0%	0	166	416	250	425	193	612	0.0
D425-SP1.0%	0							1.0
D425-SP2.0%	0							2.0
D425-SP2.5%-13	13							2.5
D425-SP3.0%-26	26							3.0

- ・配合記号は、「D混入量(基本配合)-SP添加量-D増加量」で表す
- ・空気量調整剤(AE)をC×0.002%添加している
- ・高性能AE減水剤(SP)は、粉体重量(P=C+D)に対して添加している
- ・細骨材率 s/a=25 (%)



水セメント比 (W/C) : 一定
 高性能AE減水剤添加量 (P×%) : 一定
 D : 下水汚泥焼却灰混入量 (基本配合) を表す
 ΔD : 下水汚泥焼却灰混入量の増加量を表す

図-1 配合設計の概略図

表-6 配合表（単位水量検討用）

配合記号	W減少量 (kg/m ³)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (P×%)
			W	C	D	S	G	
D342-SP 0%	0	139	348	250	342	257	816	0.0
D342-SP1.0%	0	139	348			257	816	1.0
D342-SP1.5%	0	139	348			257	816	1.5
D342-SP2.0%-8	8	136	340			262	832	2.0
D342-SP3.0%-33	33	126	315			278	883	3.0
D425-SP 0%	0	166	416	250	425	193	612	0.0
D425-SP1.0%	0	166	416			193	612	1.0
D425-SP2.0%	0	166	416			193	612	2.0
D425-SP2.5%-10	10	162	406			202	643	2.5
D425-SP3.0%-35	35	152	381			215	683	3.0

- ・配合記号は、「D混入量(基本配合)-SP添加率-W減少量」で表す
- ・空気量調整剤(AE)をC×0.002%添加している
- ・高性能AE減水剤(SP)は、粉体重量(P=C+D)に対して添加している
- ・細骨材率 s/a=25 (%)

検討した。

本実験で用いたコンクリートの配合を表-6 に示す。なお、セメント量および下水汚泥焼却灰混入量を一定とし、高性能 AE 減水剤の減水効果により、単位水量が減少した分、細骨材および粗骨材を増加して配合を決定した。

(2) 硬化特性

・圧縮強度

下水汚泥焼却灰混入コンクリートの圧縮強度を体系的に予測すること目的とし、下水汚泥焼却灰および高性能 AE 減水剤が強度発現に及ぼす影響について検討した。

3. 試験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

3.1.1 高性能 AE 減水剤添加量

表-4 に示した基本配合に高性能 AE 減水剤を添加したときのスランプと高性能 AE 減水剤添加量の関係を図-2 に示す。図中の凡例は下水汚泥焼却灰混入量を表している。なお、本研究で検討した配合を用いて作製したコンクリートは、フレッシュ時に材料分離はみられなかった。図より、下水汚泥焼却灰混入量が 54 kg/m³ と少ない場合では、高性能 AE 減水剤添加量が 1.0% 以上でスランプが増大するのに対して、下水汚泥焼却灰混入量が 163~342 kg/m³, 425 kg/m³ では、スランプ増大に必要な高性能 AE 減水剤添加量が 1.5%, 2.0% 以上となることがわかった。つまり、下水汚泥焼却灰混入量が増加するに従って、スランプを増大するために必要な高性能 AE 減水剤量は増加すると考えられる。これは、下水汚泥焼却灰混入量の増加によって、粒子間および粉体に拘束される水が増大したため、高性能 AE 減水剤による分散効果が十分に発揮できなかったことが原因であると考えられる。

本研究で対象とした配合の範囲内では、スランプを増大させるために、ある量以上の高性能 AE 減水剤の添加が必要であるが、それ以降の高性能 AE 減水剤添加量の割合とスランプの増大量の関係 (図-2 に示した点線の傾き) は、ほぼ同じとなった。したがって、下水汚泥焼却灰混入量に対してスランプの増大に必要な高性能 AE 減水剤添加量を把握することができれば、高性能 AE 減水剤によって下水汚泥焼却灰混入コンクリートのスランプを調整できると考えられる。

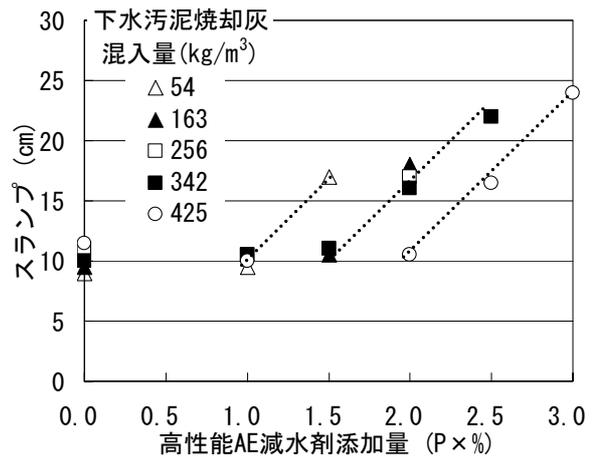


図-2 スランプと高性能AE減水剤添加量の関係

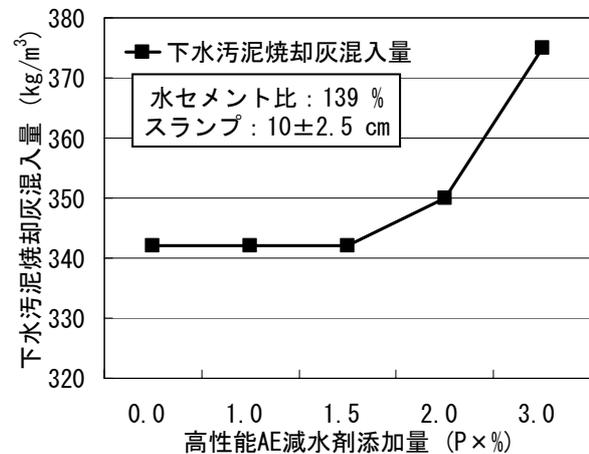


図-3 下水汚泥焼却灰混入量と高性能 AE 減水剤の関係 (基本配合 : D342)

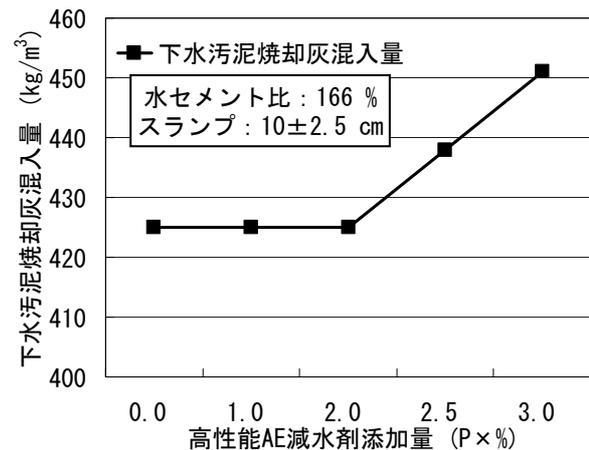


図-4 下水汚泥焼却灰混入量と高性能 AE 減水剤の関係 (基本配合 : D425)

3.1.2 下水汚泥焼却灰混入量

水セメント比一定の場合で、目標スランプ 10 ± 2.5 cm の条件を満足するコンクリート中の下水汚泥焼却灰混入量と高性能 AE 減水剤添

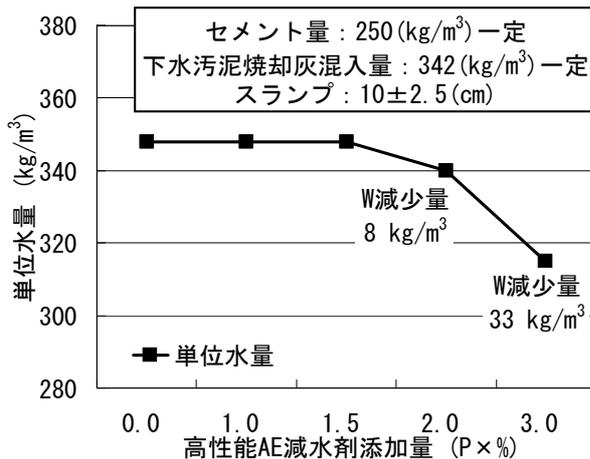


図-5 単位水量と高性能 AE 減水剤添加量
の関係 (基本配合 : D342)

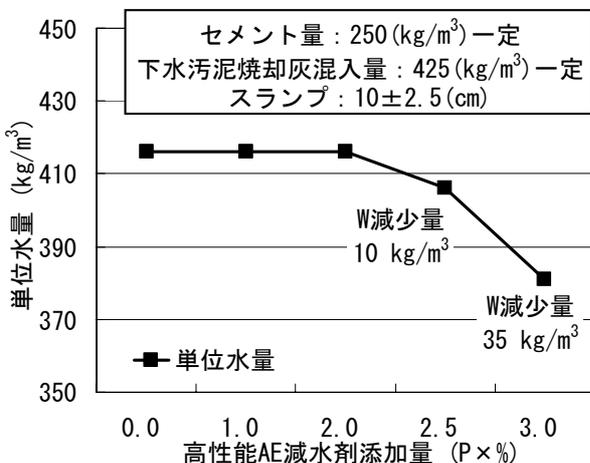


図-6 単位水量と高性能 AE 減水剤添加量
の関係 (基本配合 : D425)

加量の関係を図-3, 4に示す。これらの図は、
図-2における高性能 AE 減水剤添加量の増加
に伴うスランプの増大量に対応する下水汚泥焼
却灰混入量の増加分を表している。今後、高性
能 AE 減水剤添加量と下水汚泥焼却灰混入量の
関係を明らかにすることができれば、所定の水
セメント比およびスランプを満足するコンク
リート中に混入できる下水汚泥焼却灰混入量の最大
値が推定できると考えられる。

3.1.3 単位水量

スランプ 10±2.5cm の条件を満足するコンク
リート中の単位水量と高性能 AE 減水剤添加量
の関係を図-5, 6に示す。なお、図中の数値
は、基本配合の単位水量を基準値とし、その基
準値からの減少量を表している。これらの図は、
図-2における高性能 AE 減水剤添加量の増加

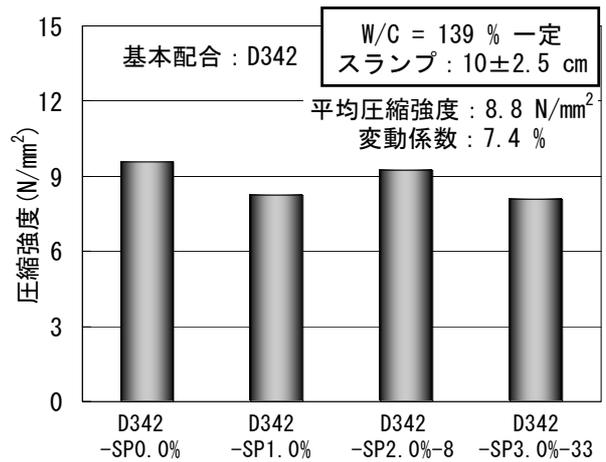


図-7 圧縮強度のバラツキ
(基本配合 : D342)

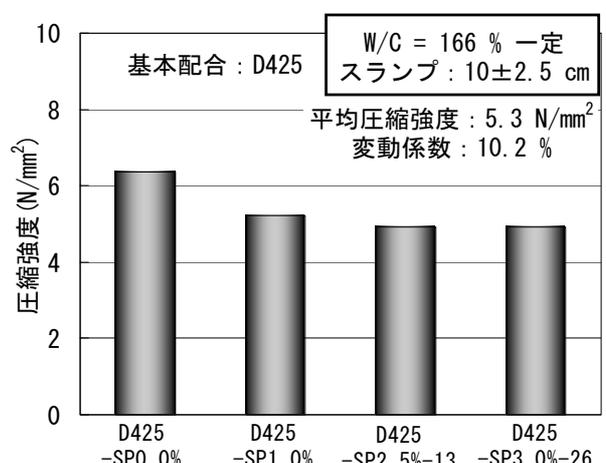


図-8 圧縮強度のバラツキ
(基本配合 : D425)

に伴うスランプの増大量に対応する単位水量の
減少分を表している。これらの結果より、下水
汚泥焼却灰混入コンクリートでも一般的なコン
クリートと同様に、高性能 AE 減水剤を添加す
ることによって、スランプが同一配合での圧縮強
度および耐久性の増大が期待できる。

また、高性能 AE 減水剤の減水効果による単位
水量の減少量は、下水汚泥焼却灰混入量が異
なるにもかかわらず、ほぼ同じ値となった。こ
れは、高性能 AE 減水剤のスランプ増大効果と相
関関係にあると考えられるが、現在のところ把握
できていないため、高性能 AE 減水剤の作用機構
について、更に調査する必要があると思われる。

3.2 硬化特性

3.2.1 圧縮強度

水セメント比およびスランプが同一配合で下

水汚泥焼却灰混入量，高性能AE減水剤添加量が異なる配合で作製したコンクリートの圧縮強度を図-7，図-8に示す。図中の横軸は，配合記号（表-5）を表している。これらの図より，下水汚泥焼却灰混入量および高性能AE減水剤添加量が異なることによって圧縮強度に若干のバラツキがみられたが，一般的なコンクリートと同程度のバラツキであったことから，水セメント比が同一であれば，ほぼ同じ圧縮強度が得られると考えられる。したがって，本研究で検討した範囲内では下水汚泥焼却灰や高性能AE減水剤が強度発現に及ぼす影響は小さいと考えられる。しかしながら，既往の報告によれば，下水汚泥焼却灰や高性能AE減水剤の混入量を増加させた場合では，凝結反応が遅延し，初期強度に影響を及ぼす可能性があることが示唆されていることから，配合設計において注意を払う必要がある。

表-4で示した基本配合で作製したコンクリートの圧縮強度とセメント水比の関係を図-9に示す。図より，下水汚泥焼却灰混入コンクリートの圧縮強度は，一般的なコンクリートと同様にセメント水比と強い相関関係があることが認められた。したがって，本研究で検討した範囲内（下水汚泥焼却灰混入量：54～425 kg/m³，高性能AE減水剤添加量：0～3%）であれば，下水汚泥焼却灰混入量や高性能AE減水剤添加量を選定し，セメント水比を制御することで，設計基準強度30 N/mm²程度以下のコンクリート構造物（消波ブロック，均しコンクリートなど）に十分に適用できると考えられる。

4. まとめ

下水汚泥焼却灰混入コンクリートのスランプおよび圧縮強度を混和剤の添加量によって定量的に評価する方法について検討した。

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 下水汚泥焼却灰混入量が増加するに従って，所定のスランプを得るために必要な混和剤量は増加する。

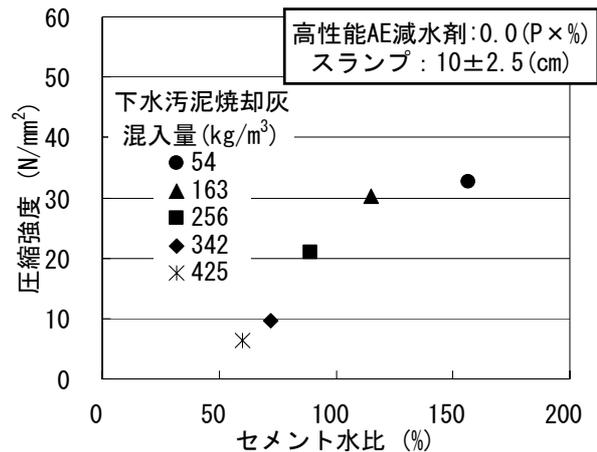


図-9 圧縮強度とセメント水比の関係

- 2) 下水汚泥焼却灰混入コンクリートの圧縮強度は，下水汚泥焼却灰混入量および混和剤添加量に関係なく，セメント水比によって概ね予測できる。
- 3) 混和剤量および水セメント比を選定することによって，下水汚泥焼却灰混入コンクリートのスランプおよび圧縮強度をコントロールできると考えられる。

参考文献

- 1) 宮澤 聡ほか：下水汚泥焼却灰の再資源化に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.1383-1388，2002.7
- 2) 野尻 拓男ほか：下水汚泥焼却灰のコンクリートへの有効利用について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.43-48，2000.7
- 3) 桜井 邦昭ほか：粉体状産業廃棄物を多量に混入したコンクリートの配合設計方法に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.1153-1158，2000.7
- 4) 大川 裕：高性能AE減水剤の特徴・種類および性能，コンクリート工学，Vol.37，No.6，pp.15-20，1999.6
- 5) 土木学会 コンクリート委員会：コンクリートライブラリー96 資源有効利用の現状と課題，(社)土木学会，pp.110-111，1999.10