

強度の高いセメントは良いセメントか

Is the High-Strength Cement Rated among the Best Cement for Concrete

山 岸 千 丈

Chitake YAMAGISHI

要 旨: 明治時代のコンクリート構造物が現存している一方で、コンクリートの耐久性が問題になっている。コンクリートの耐久性には粉体量の確保が大事であり、欧州では、日本で流通していない強さクラス 32.5 の低強度セメントが最も多く使われている。本報文では日欧のセメント及び 32.5 クラスの試製セメントの試験データから、汎用コンクリート用としては単位セメント量の多くなる強さクラス 32.5 の低強度セメントの方が、我が国で多用されている普通ポルトランドセメント(欧州規格では強さクラス 52.5 に相当)より優れていることを述べた。

Abstract: Despite the fact that there remain sound concrete structures of the Meiji era, the durability of the concrete is challenged even now. The amount of powder in concrete mixture exerts a great influence on the durability of product. The most widely used cement in Europe is the strength class 32.5 cement which is not circulated in Japan. This paper points out that the cement of the strength class 32.5 is more suitable as the multi-purpose concrete than the Japanese common Portland cement which is classified into strength class 52.5 in European EN-Standard.

キーワード: コンクリート、耐久性、32.5 クラス、材料分離、EN 規格

Keywords: concrete, durability, strength class 32.5, segregation, EN-Standard

1. はじめに

誰もがコンクリートは半永久的にもつ材料と潜在的に思っている。それは過去にコンクリートが天然石の代替材であったためなのか、それとも後述するように健全な昔のコンクリート構造物が現存しているためなのか、多分その両方からそう思い込んでいるのであろう。しかし、これまでに何度かその思い込みを覆す事件があった。

1984年にコンクリート構造物の塩害やアルカリ骨材反応について、NHKが「コンクリート・クライシス」として取り上げ、鉄筋コンクリート構造物が20～30年で劣化し始めている現状を紹介し、コンクリートの耐久性・信頼性が社会問題となった。そして、コンクリート中の塩化物総量規制、低アルカリセメントの規格制定、使用骨材の試験法制定などがなされた。

その後1999年の福岡トンネル、北九州トンネルと続いた山陽新幹線でのコンクリート落下事故、それ以前から続いていた山陽新幹線高架橋のコンクリート片の剥離落下もあり、またもやコンクリートに対する信頼性が揺らいだ。いずれもコンクリートの施工不良や塩分の残った海砂の使用が原因で、セメントが原因とはされなかった。

しかし、同じ1999年に「コンクリートが危ない」という新書¹⁾が上梓され、その中に省エネ大量生産方式(SPキルンやNSPキルン^{*注1})の採用で、高アルカリセメントや高SO₃の異常凝結セメントなど欠陥セメントが生産されていたと



図1 110年前に制作されたコンクリート方塊

の記述があった。このために、著者らは当時、セメントに対する信頼性も揺らぐのではないかと心配した。SPキルンやNSPキルンの採用により燃料中の硫黄分に由来するSO₂の捕捉率が上がり、従来より若干SO₃は増加したが、それが異常凝結を起こすとは考えられず、物質収支から考えても省エネ大量生産方式だからといって高アルカリセメントが生産されるはずはないため、これらは断片的情報による誤解と言える。

しかし、それではコンクリートの耐久性を考えた場合にセメントメーカーに全く責はないのだろうか。もしあるとすれば、普通ポルトランドセメントの強度を上げ過ぎたことではないかと我々は考えた。本報文では、既往の文献データおよびその他事実を基に、強度の高いセメントは必ずしも良いセメントとは言い切れないという著者の観点を提示する。

2. 現在も健在の明治・大正時代のコンクリート構造物

江東区清澄二丁目の本邦セメント発祥の地に今から113年前に制作されたコンクリート方塊が展示されている(図1)。明治27年(1894年)に製造、横浜港築港工事で海中に沈設され防波堤基礎に使われていたコンクリート塊で、昭和6年(1931年)の同港改築の折に引き上げられたものである。明治27年8月26日の日付とNo.2727の番号、製作者のサインが入っており、いかに丁寧に作成(施工)

*注1) SPキルンとはサスペンションプレヒーター付キルンの略称で、サスペンションプレヒーター(SP)といわれる4段のサイクロンからなる原料予熱装置のついたキルンのことで、熱効率がよく、キルン容積当りの生産性が高く、工程安定性にも優れているセメント焼成炉である。

NSPキルンはニューサスペンションプレヒーター付キルンの略称で、SPキルンのプレヒーターと回転窯との間に気流式仮焼炉を設けたキルンで、日本で開発された。原料中の石灰石の脱炭酸反応の約90%を終わらせた後に原料をキルンに投入するので、その焼成能力は同一サイズのSPキルンの2～2.5倍ある。日本ではSPキルン、NSPキルン以外のキルンは稼働しておらず、ほとんどがNSPキルンとなっていて、セメント製造のエネルギー原単位は世界一小さい。

されたか窺い知れる。この横浜港防波堤(本牧沖)や 100 年試験で有名な小樽港北防波堤(1897 年起工、1908 年完工)は今なお健在である。

鉄筋コンクリートで現存する最古の構造物は 1903 年に京都市山科区日ノ岡の琵琶湖疎水にかけられた本邦初のコンクリート橋(橋長 7.3m、幅 1.5m、コンクリート厚さ約 30cm のアーチ型橋)で、日本で 2 番目に古いと言われる同じ琵琶湖疎水にかかる西ノ谷橋と共に現在でも使用されている。JR 内房線の江見・太海間にある山生(やもめ)橋梁(1920 年)(図 2 (a))は海辺にある 9m スパン×16 桁の桁梁構造の鉄道橋で塩害にも侵されず現在も供用されている²⁾。また、旧国鉄土幌線の第三音更川橋梁(国指定登録有形文化財)は凍結融解にも耐え現存している。建築物では日本初の全鉄筋 コンクリート造の三井物産横浜支店ビル(1911 年)が現存している(図 2(b))³⁾。

図 3 に示したように当時のセメントは現在の半分程度の強度しかなかったが、これらコンクリート構造物が現在も健在であることは、コンクリートの耐久性には必ずしもセメントの強度が高いことが必須でないことを示している。

3. 欧州のセメントと日本のセメント

セメントの欧州規格(EN197-1:2000)では、セメントの品質を表 1 に示す強さレベルの区分と、表 2 に示すセメントの成分による区分でマトリックス化して表示している⁵⁾。

強さ区分では表 1 のように 28 日材齢の強さで 32.5、42.5、52.5 の 3 クラスに分け、さらに 2 日材齢の強さによって早強型(R)と普通型(N)に区分している。

強さクラスが 32.5(以下では単に 32.5 と略称、他も同様に以下表記)は 28 日圧縮強さが 32.5~52.5MPa の範囲、42.5 は 28 日圧縮強さが 42.5~62.5MPa の範囲にあるセメントで、52.5 は 28 日圧縮強さが 52.5MPa 以上のセメントである。

セメントの成分では表 2 に示されているように、CEM I は 95%以上がクリンカであるポルトランドセメント、CEM II は所定の混合材を 6~35%の範



(a) 山生橋梁²⁾



(b) 三井物産横浜支店ビル³⁾

図 2 コンクリートの長期耐久性を実証する建物

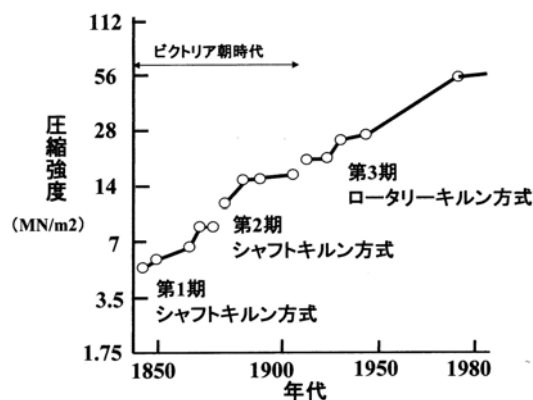


図3 セメント強度の推移⁴⁾ (28日材齢モルタル強度)

囲で混合したセメントで、混合材の名称(〇〇)を間に入れてポルトランド〇〇セメントと呼ばれる。CEMⅢは高炉スラグを 36~95%の範囲で混合したセメント、CEMⅣはポゾラン活性を有する材料を 11~55%混合したポゾランセメント、CEMⅤは

表 1 EN197-1:2000 での強さに基づく分類⁵⁾

強さ クラス	圧縮強さ(Mpa)			
	初期強さ		標準強さ	
	2 日	7 日	28 日	
32.5N	-	≥16.0	≥32.5	≤52.5
32.5R	≥10.0	-	≥32.5	≤52.5
42.5N	≥10.0	-	≥42.5	≤62.5
42.5R	≥20.0	-	≥42.5	≤62.5
52.5N	≥20.0	-	≥52.5	
52.5R	≥30.0	-		

特定の混合材を組み合わせ 36～80%混合した複合セメントである。

表 3 には EU 15 カ国でのセメント種類別生産量(1996 年)を示したが、強度クラス別で最も多く生産されているのは 32.5 のセメントで生産量の 55.6%を占め、ついで 42.5 の 36.5%で、高強度の 52.5 のセメントは 7.9%を占めるにすぎない。また、セメントの種類別では混合材を加えた CEM II が 45.5%で最も多く、日本で 7 割強を占めている普通ポルトランドセメントに相当する CEM I の 52.5 は 7%を占めるにすぎない。

JIS では 2 日材齢の強度が規定されていないの

表 2 EN197-1:2000 でのセメントの成分による分類⁵⁾

セメントの種類			組成 [mass%]		
区分	名 称	記 号	主成分		少量添加成分
			クリンカ	混合材	
CEM I	ポルトランドセメント	CEM I	95～100	-	0～5
CEM II	ポルトランド〇〇セメント*	CEM II /A-△	80～94	6～20	0～5
		CEM II /B-△	65～79	21～35	0～5
CEM III	高炉セメント	CEM III /A	35～64	36～65	0～5
		CEM III /B	20～34	66～80	0～5
		CEM III /C	8～19	81～95	0～5
CEM IV	ポゾランセメント	CEM IV /A	65～89	11～35	0～5
		CEM IV /B	45～64	36～55	0～5
CEM V	複合セメント	CEM V /A	40～64	各 18～30	0～5
		CEM V /B	20～38	各 31～50	0～5

* 〇〇はスラグ(S)、シリカヒューム(D)、天然(P)または工業(Q)ポゾラン、けい酸質(V)または石灰質(W)フライアッシュ、焼成頁岩(T)、石灰石(L,LL)などの混合材名を示し、記号の△は()に示した混合材記号を示す

表 3 EU15 ヶ国でのセメント種類別生産量
[10³ t]

強度クラス		32.5	42.5	52.5	比率
セ メ ン ト の 種 類	CEM I	16,274	34,012	10,598	40.3%
	CEM II	51,386	16,012	1,359	45.5%
	CEM III	6,152	4,702	8	7.2%
	CEM IV	9,509	366		6.5%
	CEM V	701			0.5%
合計		83,995	55,092	11,965	
比率		55.6%	36.5%	7.9%	100%

で、日本で現在市販されているセメントを試験し EN 規格で区分した結果を表 4 に示した。普通ポルトランドセメント(NPC)の一部は材齢 2 日強度の不足で 42.5 に分類されるものがあるが、ほとんどは 52.5N に相当し、早強ポルトランドセメント(HPC) は 52.5R に相当している。

B 種高炉セメント(BB)は 42.5N に相当するが、28 日強度が 62.5MPa を上回り EN 規格からは外れるものが一部ある。

表 5 には JIS 規格の代表的セメントの生産比と、

表4 日本で市販されているセメントのEN規格による区分⁵⁾

セメント の 種類*	サンプ ル数 N	圧縮強さ [MPa]									EN167-1:2000 に基づく 規格区分	
		2 日			7 日			28 日				
		最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大		
NPC	19	16.8	21.5	28.2	39.5	43.7	48.3	55.2	61.3	66.1	CEM I	52.5N**
HPC	11	36.8	39.4	42.2	53.8	56.0	58.4	65.8	67.2	70.8	CEM I	52.5R
BB	13	13.8	15.6	19.9	31.1	34.9	40.2	56.7	60.0	65.6	CEMⅢ	42.5N

* NPC : 普通ポルトランドセメント、HPC : 早強ポルトランドセメント、BB : B種高炉セメント

** 一部2日強度で42.5Nに分類されるものがある。

そのセメントが欧州規格で何に相当するかを示した。日本では欧州で最も使われている32.5に相当するセメントは流通しておらず、欧州では7.9%しか生産されていない52.5のセメント(普通セメントと早強セメント)が76.7%を占めている。したがって、日本の汎用セメントは強度クラス52.5といえ、欧州の汎用セメントが強度クラス32.5であるのに比べ極端に高強度セメント型となっている。

4. 鉄筋コンクリートの劣化

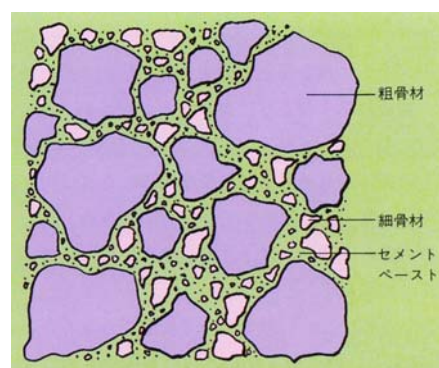
セメントは、生コンクリートとして7割、工場でコンクリート製品にされるものが1割、左官材料と地盤改良材原料に2割が使われている。したがってセメントの8割はコンクリートとして使われている。

コンクリートはセメントと粗骨材(砂利)、細骨材(砂)と水、それに少量の混和剤を混合したものである。単にセメントを水で練った物はセメントペーストと呼ばれ、セメントと細骨材(砂)を水で練ったものはモルタルと呼ばれる。図4にコンクリートの概念図を示したが、セメントはセメントペーストとして粗骨材と細骨材を繋ぐ接着材でもあるが、粗骨材と細骨材で埋めきれない空隙を埋める粉体分の役割もしている。したがって強度の高い接着剤(セメント)を使えば少量で目的のコンクリート強度が得られるが、粗骨材・細骨材間の空隙は完全に埋められない。このようなコンクリートは空気や水の透過性があり、コンクリートの劣化を助長し易くコンクリートの耐久性は落ちることになる。

表5 日本のセメントの位置づけ

JIS 規格 品種*	生産比率 (2006 年)	相当 EN197-1 規格	
		品種	強度 クラス
普通セメント	72.3%	CEM I	52.5
早強セメント	4.4%	CEM I	52.5R
中庸熱セメント	—	CEM I	42.5
低熱セメント	—	CEM I	42.5, 32.5
B 種高炉セメント	21.0%	CEM III	42.5
C 種高炉セメント	—	CEM III	32.5
A 種フライアッシュセメント	0.2%	CEM II	52.5

* 普通、早強、中庸熱、低熱セメントでポルトランドの語を省いている。

図4 コンクリートの概念図⁵⁾

コンクリートの強度は水量とセメント量との比(水セメント比、W/C)で決まり、その逆数のセメント水比(C/W)と強度は直線関係を示し、図5はこの関係を示したものである。

セメントとその水和に使われる水(セメント量のおよそ28%⁸⁾)は接着剤の役をするが、それ以上の

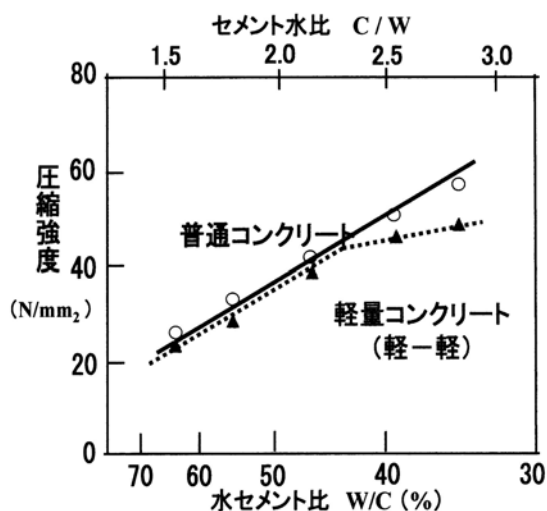


図5 コンクリートの強度⁷⁾

表6 コンクリート本体の劣化

分 類	原 因	結果(劣化現象)
物理的劣化	乾燥収縮	ひび割れ
	温度変化	ひび割れ
	荷重繰返し	ひび割れ
	凍結融解繰返し	剥落、ひび割れ
	擦減り	侵食
化学変化	キャビテーション	侵食
	硫酸塩侵食	ひび割れ
	酸侵食	溶解・溶出
生物化学的变化	アルカリ骨材反応	ひび割れ
	バクテリア、菌類	侵食

水は空隙を形成しコンクリートの強度には寄与しないから、当然、水セメント比(W/C)が大きくなれば空隙は多くなり強度は低くなる。また、空隙の多いコンクリートは一般的には空気や水の透過性も大きいので、水セメント比(W/C)が大きいことはコンクリートの耐久性には好ましくない。

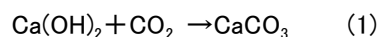
コンクリートは圧縮強度は大きいが引張強度は小さい。そのためにコンクリート単独で使われることは少なく、一般にはコンクリートと鉄筋を組み合わせた鉄筋コンクリートとして使われるのが普通で、鉄筋コンクリートをコンクリートと呼んでいることが多い。鉄筋コンクリートの劣化につ

いて考えるには、コンクリート自体の劣化と鉄筋の劣化(発錆)に分けると理解しやすい。

コンクリート本体の劣化には表6のように物理的劣化と化学的劣化、生物化学的劣化がある。物理的劣化の乾燥収縮によるひび割れと、化学的劣化のアルカリ骨材反応によるひび割れが通常最も問題になっている。アルカリ骨材反応とはシリカ質の反応性鉱物(クリストバライト、トリジマイト、オパールなど)を含有する骨材がコンクリート中のアルカリ(Na_2O と K_2O)と反応し、アルカリシリカゲルを生成し吸水膨張することによって、コンクリートにひび割れを生じさせることをいう。

乾燥収縮は空隙の多いコンクリートほど起きやすく、アルカリ骨材反応によるひび割れも空隙の多いコンクリートほど水が浸透しやすいので起こり易くなる。

図6に示すように、コンクリート中の鉄筋は、セメントの水和反応で生じた $\text{Ca}(\text{OH})_2$ によるアルカリ性の中では鉄筋の表面に不動態皮膜を生成するためにさびることがなく、このことが鉄筋コンクリートを理想的な複合材料としている。しかし、コンクリートは空気中の CO_2 の浸透により、



で表される炭酸化反応により表面から中性化していく。

中性化域が鉄筋に達すると鉄筋はさびて膨張しコンクリートにひび割れを生じ、かぶりの剥落、激しくなるとコンクリート断面の欠損に至りコンクリートの耐力低下を招く(表7参照)。したがって鉄筋コンクリートではコンクリート表面から鉄筋までのコンクリート厚み(かぶり)が規定され、これが保たれるように施工される。空隙の多いコンクリートは気体の透過性が良い他に水の浸透性もよい。水の浸透があるとコンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は表面に溶けだしてくるので中性化は一層促進される。

コンクリート中に塩化物イオンが存在すると鉄筋の不動態皮膜は不安定になり、錆が発生しやすくなる。錆が発生すると中性化と同様に錆による

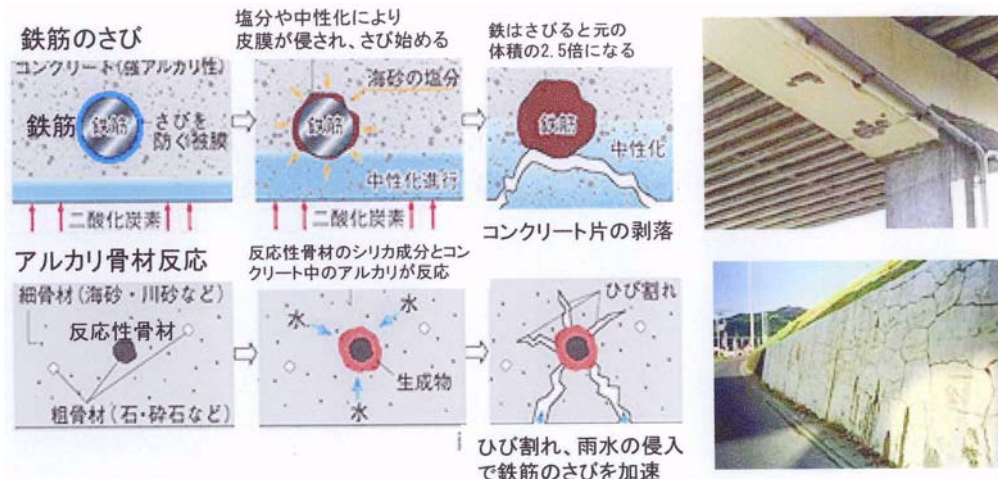


図6 主なコンクリート劣化の仕組^{12,13)}

膨張でひび割れを生じ、かぶりの剥落、コンクリート断面の欠損、耐力低下に至る。表7に示すようにこのことを「塩害」と呼んでいる。塩化物イオンは、よく水洗されていない海砂を使うことでコンクリート打設時に持ち込まれたり(山陽新幹線の例)、台風などで海水の飛沫が海辺にあるコンクリート構造物に飛来し塩分がコンクリートに浸透することで持ち込まれる。後者では空隙の多いコンクリートは塩分が浸透しやすいので、鉄筋はよりさびやすくなる。

表8は所要強度のコンクリートに対して、仏セメント協会が推奨しているセメントの種類と単位セメント量(太字)を示している。例えば保証強度25MPaのコンクリートを作成するには52.5クラスの高強度セメントを280kg/m³配合して造るより、32.5クラスの低強度セメントを360 kg/m³配合してコンクリートを造ることを推奨している。すなわち、空隙の少ない耐久性のあるコンクリートを造るには粉体量を確保する必要を認識し、単位セメント量の多い配合を推奨しているわけである。

5. 欧州のセメントと日本のセメントのコンクリート評価

ドイツのハイデルベルグ社とフランスのラファージュ社の52.5、42.5、32.5クラスのセメントを試験した結果を日本のセメント(太平洋セメント社

表7 鉄筋の発錆に起因する劣化

分類	原因	結果(劣化現象)
中性化	CO ₂ の浸透(炭酸化) 水の浸透	鉄筋の発錆⇒ ひび割れ、かぶり剥落、断面欠損、耐力低下
塩害	海砂の使用 海水飛沫の浸透	

表8 コンクリート強度とセメント配合量¹⁰⁾
(太字斜体が推奨範囲； 仏セメント協会)

コンクリート保証強度 [MPa]		20	25	30	35	40
セメントの種類	モルタル強度 [MPa]	単位セメント量 [kg/m ³]				
32.5	40~45	320	360	400	440	490
42.5	50~55	280	310	350	380	420
52.5	60~65	250	280	310	340	370

製)と対比して表9に示した⁸⁾。ドイツのセメントは全てCEM Iで主としてセメントの細かさ(比表面積)で強度を制御しており強さクラスごとにブレン比表面積が大きく異なっている。一方フランスのセメントの52.5クラスのセメントは比表面積は高くなく水硬率を高くする(化学組成を変える)ことで高い強度を実現している。また、フランスの42.5クラスは高炉セメント、32.5クラスは石

表9 欧州のセメントと日本のセメントの特性⁸⁾

セメントの種類		組成・強さ	密度	ブレン	凝結 [h-mm]		モルタル強度 [MPa]					
					始発	終結	1d	2d	3d	7d	28d	91d
ドイツ	52.5R	CEM I 52.5R	3.12	6080	2-00	2-50	37.1	49.5	51.6	56.6	63.4	64.8
	42.5R	CEM I 42.5R	3.14	4260	2-20	2-50	24.6	36.7	41.5	46.4	53.2	60.2
	32.5R	CEM I 32.5R	3.10	3070	2-15	3-10	14.3	25.6	31.6	38.2	45.6	50.6
フランス	52.5N	CEM I 52.5N	3.15	3060	2-30	3-30	15.8	26.0	31.4	41.6	59.8	72.1
	42.5N	CEM III 42.5N	3.00	4210	3-25	4-25	5.6	15.0	23.3	39.7	56.1	66.3
	32.5R	CEM II 32.5R	2.99	4160	2-05	2-45	9.9	17.5	22.0	31.2	44.3	52.1
日本	NPC*	CEM I 52.5N	3.15	3540	2-20	3-10	—	—	26.6	42.0	60.4	68.8
	HPC**	CEM I 52.5R	3.13	4510	1-35	2-35	27.8	—	47.0	54.6	64.8	
	BB***	CEM III 42.5N	3.03	3970	2-50	4-05	—	—	21.4	34.9	60.0	81.5

*NPC：普通ポルトランドセメント、 **HPC：早強ポルトランドセメント、 ***BB：B種高炉セメント

灰石粉末混合セメントで、混合材で強度をコントロールしている。これらの欧州セメントおよび日本の普通ポルトランドセメント(NPC)と早強ポルトランドセメント(HPC)、B種高炉セメント(BB)について同一強度レベルのコンクリートによって耐久性試験を含めた総合評価を試みた。耐久性試験を行うに当たり、生コンで使用量の多い呼び強度が21~24 MPaのコンクリートで比較を試みようとしたが、実験室条件では一部のセメントで強度が出過ぎ、水セメント比が75%を超えコンクリートとして適正な配合ができなかった。そのため、コンクリートの呼び強度は30 MPa、配合強度は36 MPaとし目標スランプは12±1.5 cmとした。試し練りによりC/W-σ直線を作成し、材齢28日のコンクリート圧縮強度が36 MPaになるように配合を決定した。

コンクリートの評価試験法は、凝結試験はJIS A 6204の付属書1、ブリーディング試験はJIS A 1123、

材料分離試験はB.P.Hughesの落下分離試験方法(図7参照)に準じて分離係数を求め、圧縮強度試験はJIS A 1108、中性化試験は建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)付1.コンクリートの促進中性化試験方法(案)」で行っている。塩分浸透は(財)高速道路技術センターの「高性能コンクリートの研究」の試験法に準じて行い、凍結融解は土木学会基準JSCE-G501「コンクリートの凍結融解試験方法」に準じ耐久性指数を測定した。透水試験はDIN 1048のインプット法に準じて行い、乾燥収縮はJIS A 1129「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法」で試験している。

得られた試験結果⁸⁾を以下に述べる判定基準で、○(3点)、△(2点)、×(0点)で表10に表示し、その合計点をもって総合評価とした。判定基準はおよそそのコンクリート特性が比較できればよいと考えたので、かなり大まかなもので必ずしも理論的根拠があるものではない。単位水量とセメント量は

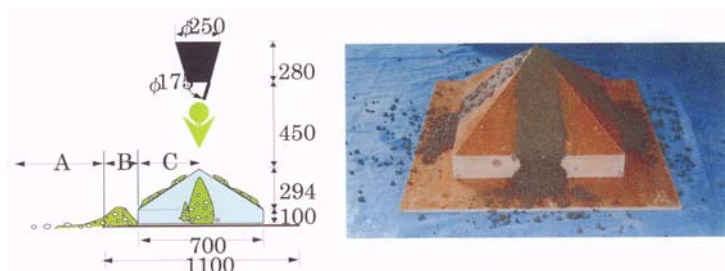
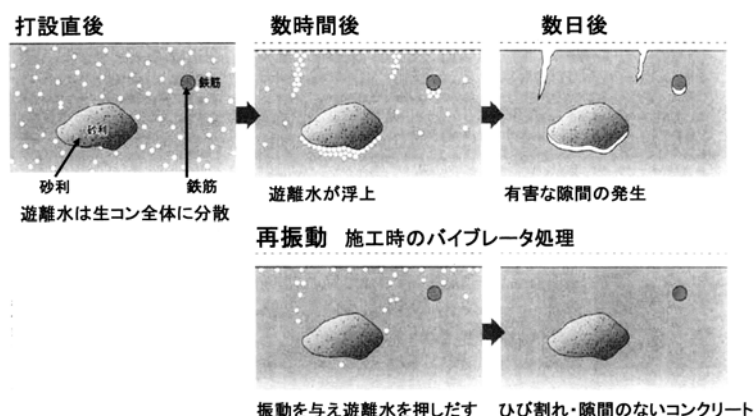


図7 分離係数の試験方法

表 10 呼び強度 30MPa とした配合による総合評価

セメントの種類	単位水量	セメント量	凝結	打設時の材料分離		初期強度	長期強度	耐久性試験					総合評価
				ブリーディング	分離係数			中性化	塩分浸透	凍結融解	透水	乾燥収縮	
独 52.5R	×	×	△	○	△	○	×	×	×	×	×	×	10
独 42.5R	△	△	○	△	○	○	△	△	△	×	△	△	25
独 32.5R	△	○	△	○	○	○	△	○	△	○	△	△	30
仏 52.5	○	△	△	×	△	△	○	○	×	×	△	△	21
仏 42.5	○	△	△	×	△	×	○	×	○	×	○	○	21
仏 32.5R	○	○	○	○	○	△	△	△	△	○	△	△	30
日NPC*	○	△	○	×	△	△	△	○	△	△	△	△	23
日HPC**	△	×	○	○	△	○	×	△	△	×	△	△	21
日BB***	○	×	△	△	×	×	○	×	○	×	△	△	17

*NPC：普通ポルトランドセメント、**HPC：早強ポルトランドセメント、***BB：B種高炉セメント



図中の白丸は生コン全体に分散している遊離水を模式化したものである。

図 8 ブリーディング¹²⁾

建築学会の基準を参考に、前者は 175kg/m^3 以下を○、 185kg/m^3 以上を×とし、後者は 290kg/m^3 以上を○、 260kg/m^3 以下を×とし、間を△とした。凝結は土木学会の基準を参考にして、始発と終結が夫々5h～7h、6h～10hから外れるものを△とした。ブリーディングは建築学会の高耐久性鉄筋コンクリートの品質目標とする $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下を○、 $0.4\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以上を×とした。分離係数は普通ポルトランドセメント(NPC)使用のコンクリートと比較し、それより小さければ○、大きければ×とした。初期強度は2日材齢の値、長期強度は91日材齢と28日材齢の強度比で、これもNPC使用コンクリー

トと比較して良ければ○、悪ければ×とした。中性化は182日材齢での中性化深さが20mm以下を○、建築学会の高耐久性鉄筋コンクリートの基準25mmを超えたものを×とした。塩分浸透は26サイクルでの浸透深さが10mm以下を○、18mm以上を×とした。凍結融解は耐久性指数70%以上を○、50%以下を×とした。透水性は透水係数がNPC使用コンクリートより著しく大きいものを×、著しく小さいものを○とした。乾燥収縮は182日材齢で0.05%以下を○、建築学会の基準の0.07を超えたものを×とした。

図7には分離係数の試験方法を示し、図8には

ブリーディングによる欠陥発生の機構とその防止は施工時のバイブレータ処理で行われていることを示した。ブリーディング、分離係数は共に施工時の材料分離のし易さの目安となり、いずれも小さいほど施工しやすく欠陥が生じにくい。したがってこれら両項目が○となっているドイツ・フランスの強度クラス 32.5 のセメントは施工しやすく欠陥の生じにくいセメントと言える。

耐久性試験項目では欧州の 52.5 セメントは論理的に予測されるように明らかに 32.5 セメントより悪いが、NPC は日本で汎用セメントになっているだけあって凍結融解を除いてそれほど悪い結果となっていない。しかし、32.5 クラスの低強度セメントを使用したコンクリートは総合評価で 30 点と高得点を得ており、欧州の 42.5 や 52.5 クラスセメント、日本の普通ポルトランドセメント(NPC)、早強ポルトランドセメント(HPC)、B 種高炉セメント(BB)などの高強度セメントよりも総合評価は高く、フランスのセメント協会が保証強度(設計基準強度) 30MPa のコンクリートにも 32.5 クラスのセメントを推奨していることにうなずけるものがある。

6. 試製 32.5 クラスセメントの コンクリート評価

強度クラス 32.5 のセメントを 2 種類を試製した。その一つは普通ポルトランドセメント 65 mass% に石灰石粉末 20 mass%、スラグ粉末 15 mass%を混合したもので 32.5BL と呼称し、もう一つは普通ポルトランドセメント 70 mass%に石灰石粉末だけを 30 mass%を混合したもので 32.5LS と呼ぶことにした。

これら 2 種類の低強度セメントと普通ポルトランドセメント(以下 NPC と略称)および B 種高炉セメント(以下 BB と略称)を使用し、呼び強度 24、30、36 のコンクリートを配合しコンクリートの特性を評価した。

評価方法はおおむね前節と同じだが、中性化試験のみは 91 日材齢で評価し中性化深さが 15mm 以下を○、20mm を超えたものを×とした。

評価結果を表 11 に示したが、試製した 2 種類の

32.5 クラスセメント(32.5BL と 32.5LS)は、ブリーディング、分離係数とも呼び強度 24~36 のコンクリートでいずれも○で、NPC、BB に比べて優れ、施工しやすく欠陥の生じにくいセメントと言える。石灰石粉末のみを混合した 32.5LS は初期強度が○で NPC(△)より初期強度が高いコンクリートになるが、長期強度は×(NPC は△)で強度の伸びがないことを示している。一方、石灰石粉末とスラグ粉末を混合した 32.5BL は初期強度は△で 32.5LS より劣るが NPC 並みであり、長期強度は○で NPC より優れている。中性化では 32.5 クラスのセメントは Ca(OH)_2 を供給するセメント中のクリンカー成分が減っているため NPC と同等で差が出なかったが、透水性や塩分浸透では NPC より良い結果を示した。32.5 クラスのセメントは両者とも、呼び強度 24~30 のコンクリートの総合評価点で NPC や BB より高得点をとり、NPC や BB に比べ総合的に優れている。NPC、BB 共にコンクリート総合評価はコンクリートの呼び強度が上がるほど高得点になり、呼び強度 36 のコンクリートでやっと 30 点台になり 32.5 クラスセメントと同等になる。汎用のコンクリートは呼び強度で 21~24 程度であるから、32.5 クラスのセメントは NPC より汎用コンクリート用として優れていることがわかる。

7. まとめ

材料分離や耐久性などを考えたコンクリートの総合評価で、汎用のコンクリートには高強度セメントより欧州規格でいう 32.5 クラスの低強度セメントの方が優れていることを示した。日本では高強度のセメントが良いとされ、欧州規格でいう 52.5 クラスの高強度セメント(普通ポルトランドセメント)が汎用セメントとして流通している。コンクリートに施工性や耐久性の視点をいれると必ずしもこのような高強度セメントが良いわけではない。高強度セメントを同一強度コンクリートに使用すると、単位セメント量が減少し、水セメント比が増大する。一般論としてその結果コンクリートの中性化が生じやすく、乾燥収縮が増大しひび

表 11 試製 32.5 クラスセメントのコンクリートの総合評価

セメントの種類	単位水量	セメント量	凝結	打設時の材料分離		初期強度	長期強度	耐久性試験					総合評価
				ブリーディング	分離係数			中性化	塩分浸透	凍結融解	透水	乾燥収縮	
呼び強度 24													
32.5BL	○	△	△	○	○	△	○	×	△	○	○	○	29
32.5LS	○	○	○	○	○	○	×	×	△	○	△	△	27
NPC	△	×	○	×	△	△	△	×	△	○	△	○	21
BB	○	×	△	△	△	×	○	×	○	○	○	△	23
呼び強度 30													
32.5BL	○	○	○	○	○	△	○	△	○	○	○	○	34
32.5LS	○	○	○	○	○	○	×	△	△	○	○	○	31
NPC	○	△	○	△	△	△	△	△	△	○	△	○	28
BB	○	×	△	○	△	×	○	×	○	○	○	△	24
呼び強度 36													
32.5BL	○	○	○	○	○	△	△	○	○	○	○	○	34
32.5LS	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	△	○	31
NPC	○	○	○	○	△	△	△	○	○	○	△	○	32
BB	○	○	△	○	△	×	○	○	○	○	○	○	31

注) 32.5BL と 32.5LS は試製した強度クラス 32.5 のセメント
NPC : 普通ポルトランドセメント、BB : B 種高炉セメント

割れが生じやすく、凍結融解や透水性でも好ましくなく、コンクリートの耐久性を落とすことになる。また、粉体量の少ないコンクリートは流動性が悪く、分離しやすいので施工欠陥が生じやすい。コンクリートを強度だけの視点から見ると高強度のセメントは良いセメントということになるが、強度と耐久性の視点で見ると高強度のセメントは必ずしも良いセメントとはいえず(図 9 参照)、特に汎用コンクリートでは低強度セメントの使用が好ましい。しかし、残念ながら日本ではこのような低強度のセメントは市場に流通していない。

8. おわりに

本論文は引用文献に示した太平洋セメント(株)の富田六郎氏、山田一夫氏、岩手大学建設環境工学科の羽原俊祐氏(元太平洋セメント)らのデータと

2つの特性で考えると、セメントに必要な強度レベルは変わってくる

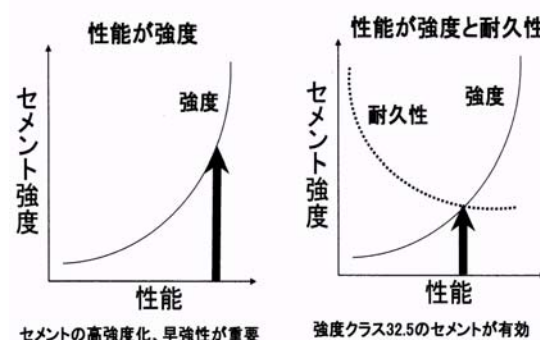


図 9 コンクリート性能から考えたセメント強度

羽原俊祐氏にいただいたデータを基にまとめたもので、ここに各位に感謝の意を表します。

引用文献・参考文献

- 1) 小林一輔; コンクリートが危ない, pp.77-79, 160-164, 岩波新書, 岩波書店, 東京 (1999)
- 2) 千葉県立現代産業科学館; 千葉県立現代産業科学館ホームページ,
<http://www.chiba-muse.or.jp/SCIENCE/roman/2koutu.html>
- 3) Tanabe,H.;横浜の近代建築案内-H.Tanabe's Page-,
<http://www4.cds.ne.jp/~tanabe/detail.cgi?mitsui:office1>
- 4) Bleazard, R.G.; Lea's Chemistry of cement and concrete, pp.1-19 Arnold, London (1988)
- 5) 後藤孝治, 羽原俊祐; セメント規格の国際化,セメントコンクリート, 631, Sep., pp.1-8 (1999)
- 6) セメント協会編; セメントの常識, セメント協会, 東京 (2000)
- 7) 日本コンクリート工学協会編,コンクリート便覧(第2版), 技報堂出版, 東京 (1996)
- 8) D.I.W. Czernin; Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1980); 訳本, チェルニン(徳根吉郎訳); 建設技術者のためのセメント・コンクリート化学, 技報堂出版, 東京 (1979)
- 9) 羽原俊祐, 山田一夫; もう一度セメントを見つめ直してみよう-21世紀に必要とされる汎用セメントの姿-, コンクリートテクノ, 20(9), pp.70-78, (2001)
- 10) 羽原俊祐, 山田一夫; 混合セメントに対する時代の流れ - 21世紀の日本の汎用セメントの姿-, 電力土木, 298, pp. 3-10 (2002)
- 11) 山田一夫, 富田六郎; 耐久的なコンクリート構造物に適するセメントの開発, コンクリート工学, 41(2), pp.10-17 (2003)
- 12) 岩瀬文夫; ひび割れのないコンクリートのつくり方, 日経 BP 社, 東京 (2003)
- 13) 中国新聞; 中国新聞ホームページ,
http://www.chugoku-np.co.jp/News/JR_West/horaku.html