

CEMENT & CONCRETE

セメント・ コンクリート

令和4年6月15日発行 ISSN0371-0718

2022
No.904

6

一般社団法人セメント協会
JAPAN CEMENT ASSOCIATION



ケミカルで社会インフラの発展を支える

KaO

きれいを ところに 未来に

粉塵量を大幅削減
ビスコトップ UT



加振時の流動性向上
マイティ 21V-SG



花王株式会社 ケミカル事業部門

東京 〒131-8501 東京都墨田区文花2-1-3
大阪 〒550-0012 大阪市西区立売堀1-4-1
URL <https://chemical.kao.com/jp/>
E-mail chemical_eif@kao.com

セメント協会の出版物

クリップボードの コンクリート化学編 出ました。



ブルーのカバー

e3 (シースリー)
クリップボード

コンクリート化学編

A4判・123頁・3,080円



グリーンのカバー

e3 (シースリー)
クリップボード

セメント化学編

A4判・134頁・3,080円

月刊セメント・コンクリート誌に長期連載した人気シリーズが単行本になりました。コンクリートの気になるキーワード全47項目をそれぞれ2～3ページで簡潔に解説。既刊の[セメント化学編]とともにお役に立つこと間違いなしです。

4つのカテゴリーに分類 ● [フレッシュコンクリートの物性](#) [硬化コンクリート](#) [耐久性](#) [いろいろなコンクリート](#)

お求め・お問い合わせは…一般社団法人セメント協会 図書販売係 まで

東京都中央区新富二丁目15番5号 RBM築地ビル2階
TEL 03-5540-6173 FAX 03-5540-6181

AE減水剤
(高機能タイプ) ヤマソー 02NL

収縮低減剤 ヤマソー DS100

AE減水剤(高機能タイプ・ブリーディング低減型) ヤマソー 16NB

AE剤 ヴィンソル

高性能AE減水剤 ヤマソー V1S

AE減水剤
(高機能タイプ) ヤマソー 09NL

AE減水剤
(耐寒促進剤タイプ) ヤマソー ウィン

高性能AE減水剤(収縮低減タイプ) ヤマソー V1-DS

硬化促進剤 ヤマソー ウィンS

高流動コンクリート用分離低減剤 ヤマソー ビスコン

減水剤(遅延形) ヤマソー R

AE減水剤 ヤマソー 90SE

スランプ保持剤 ヤマソー 2020

あした
明日へ繋げる

コンクリートという無機質の中から
人々が理想とする安心・安全・快適さを実感できる、
より良い街づくりのお手伝いをします。

山宗化学株式会社
YAMASO CHEMICAL CO., LTD.

本社 ●〒104-0032 東京都中央区八丁堀2-25-5 ☎03-3552-1341 (代)
東京営業部 ●☎03-3552-1261
支店 ●大阪/☎06-6353-6051 福岡/☎092-483-8567 札幌/☎011-662-5552
所 ●広島/☎082-237-3083 仙台/☎022-224-0321 北陸/☎0776-28-2566
営業所 ●静岡/☎054-202-5111 高松/☎087-863-7565
出張所 ●平塚/☎0463-23-5536

<https://www.yamaso-chem.co.jp/>

コンクリート専門 コンサルタント

●フレッシュコンクリート
配調合選定試験 試験体作製
RCD・CSGダムコンクリート
繊維補強コンクリートの評価

●硬化コンクリート
強度・耐久性試験 熱特性試験
打継ぎ部の一面せん断 橋梁・トンネル関連試験

●コンクリート材料・建設材料
骨材・セメントの物理試験 補修材の性能評価
鉄筋・繊維補強材の物性試験

コンクリート
試験

構造物
調査診断

化学分析

●一般建築構造物
採取コアによる試験 非破壊検査

●ダム・河川・橋梁・上下水道
劣化度調査 耐久性調査

●トンネル・洞道
ひび割れ調査 空洞調査

●原子力施設
健全性評価 現地調査 室内試験

●化学分析
配合推定 塩化物イオン量 アルカリ量
アルカリ骨材反応性試験 有害鉱物判定
粉末 X線回折 走査型電子顕微鏡
細孔径分布

High
Technology
and
Creative
Challenge

建設コンサルタント

HCC 株式会社 八洋コンサルタント

本社 〒101-0041 東京都千代田区神田須田町1丁目7番8号 秋葉原シグマビル10階
電話 03 (5577) 5826 (代表) FAX 03 (5577) 5829
技術センター 〒253-0071 神奈川県茅ヶ崎市萩園 2722 番地
電話 0467 (87) 3451 (代表) FAX 0467 (57) 0618
URL <http://www.hachiyo.co.jp>

ハイブリッド混和剤

目指したのは「丈夫で長持ち」。

乾燥収縮の低減でひび割れを抑制、耐久性を向上。

過度なブリーディングを抑え、より緻密な組織へ。

高い減水性能で扱いやすく、施工不良のリスクも低減。

高品質なコンクリートは建設廃材を減少させ、環境にも貢献。



高性能AE減水剤（増粘剤一液タイプ）

チューポールHP-70

AE減水剤（高機能・ブリーディング低減タイプ）

チューポールEX60LB

高性能AE減水剤（収縮低減タイプ）

チューポールSR

AE減水剤（高機能・収縮低減タイプ）

チューポールLS



TAKEMOTO

もくじ

2	JCA Report 2021年度セメント需給と今後の展望	… (一社)セメント協会 調査・企画部門
5	JCA Report 2021-OCセメント共同試験 結果と最近10年間の推移	… (一社)セメント協会 研究所 技術情報グループ
11	環境配慮型コンクリートにおける炭酸カルシウムの位置付け	… 坂田 昇ほか
17	地上式LNGタンクのコンクリート施工における温度ひび割れ防止と 暑中コンクリート対策—沖縄電力株式会社 牧港ガスエンジン発電所新設工事—	… 宜野座 剛ほか
25	解説／日本建築学会「溶融亜鉛めっき鉄筋を用いた 鉄筋コンクリート造の設計・施工指針・同解説」の概要	… 兼松 学
33	ずいそう ペット万歳!	… 宇野 洋志城
35	日本コンクリート工学会「3Dプリンティングによる コンクリート構造物構築に関する研究委員会」成果報告	… 石田 哲也ほか
45	ICタグを埋設したモルタルスパーサ「iコンスパーサ®」の概要と活用事例	… 江里口 玲
51	シリーズ セメントコンクリートを「科学」する 放射線・原子力分野での活用 その1 放射線の遮蔽	… 蔵重 勲

10	「2022-OCセメント共同試験」参加募集
31・43	HOT NEWS
57	EVENT GUIDE
59	外国雑誌の記事情報
61	セメント・データファイル
63	主要建設工事・資材統計
65	7月号予告



今月の表紙

新しい暑中コンクリート「サンワーク®」を適用した地上式LNGタンクの施工
[沖縄県／提供：沖縄電力(株)・(株)大林組]

2021年度セメント需給と今後の展望

(一社)セメント協会 調査・企画部門

1. 2021年度の回顧

1-1. 概況

2021年度のわが国経済は、長引く新型コロナウィルス感染症の影響下にありますが、2021年9月末の緊急事態宣言及びまん延防止等重点措置の解除以降は、徐々に緩和されており、持ち直しの動きがみられました。しかし、その後のオミクロン株を含めた新型コロナウィルス感染症による再びのまん延防止等重点措置が2022年1月から3月まで延長され、内外経済への影響、さらに2022年2月下旬に勃発したロシアのウクライナ侵攻により、原材料価格の上昇や金融資本市場の変動、供給面での制約等、先行きの成長下振れ懸念が強まっています。

こうした中、政府は、新型コロナウィルス感染症の拡大防止、「ウイズコロナ」下での社会経済活動の再開となる危機への備え、未来社会を切り拓く「新しい資本主義」の起動、防災・減災、国土強靱化の推進など安全・安心の確保を柱とする「コロナ克服・新時代開拓のための経済対策」を策定し、2021年度補正予算を編成しました。こうした下で実質成長率は2.1%となりました。セメント関連項目をみると、公共投資は伸び率▲9.3%、民間住宅投資は同▲1.6%、民間設備投資は同1.3%となりました(内閣府2022年5月18日公表)。

1-2. セメント需給(図1, 表1)

(1) 国内需要

2021年度のセメント国内需要は3,788万t、前年と比較すると79万t減、前年比98.0%となり、3年連続マイナスとなりました。前年プラスとなった地区は、関東一区、東海、九州です。コロナ禍からの回復の動きも見られ、概して都市再開発事業や道路整備事業などが寄与しました。一方、他の地区では工期の長期化、建設労働者の人手不足など弱含みで推移したことから、前年マイナスとなりました。このうち輸入は1万t、前年比52.0%、シェア0.0%となりました。全量韓国からのものです。

全体的な背景として、官需についてはマイナスとなりました。2021年度国の公共事業当初予算は、2020年度補正予算と合わせて金額ベースでは確保されたものの、資材価格、労務コスト上昇等による入札不調・不落や用地買収の遅れによりマイナスとなりました。一方、民需は増加しました。設備投資は停滞していた投資再開の動きが見られ、都心部の再開も本格化してきたものの、コロナ禍からの持ち直しの動きが弱い。住宅投資は、コロナ禍からの回復に加え、政府の住宅取得支援策の一部延長により、コロナ禍前の水準には届かないものの新設住宅着工の総戸数は増加しました。

(2) 輸出

2021年度の輸出は1,148万t、前年比103.3%となりました。1,000万t台を7年連続で維持しました。仕向地はアジア向けが790万t、同100.7%と全体の68.8%を占めました。主要な輸出先であるシンガポ

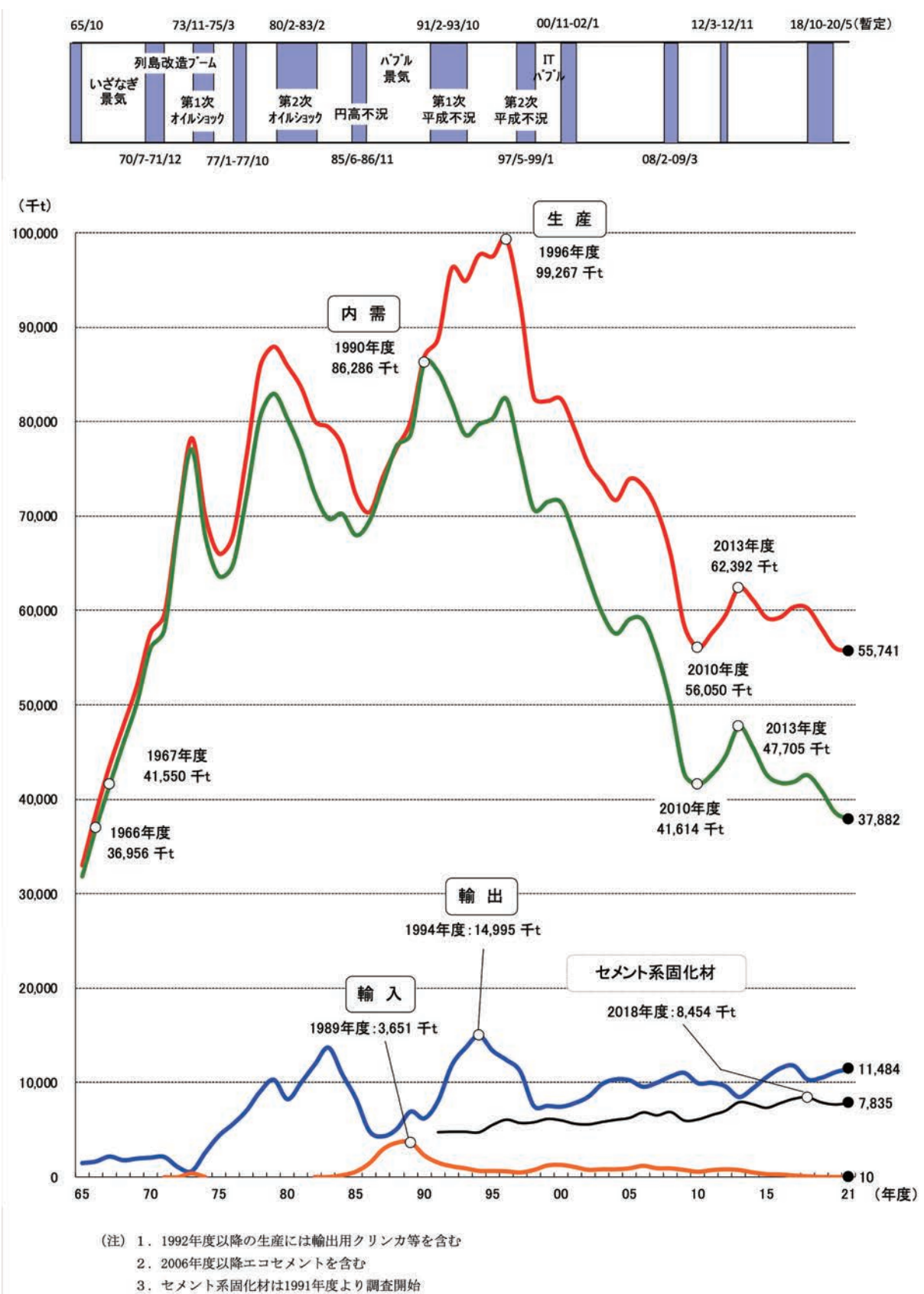


図1 セメント需給の推移

表1 地区別販売

(単位: t, %)

項目		2021年度		2020年度		前年比
地区		(A)	構成比	(B)	構成比	(A/B)
北 海 道		1,789,888	4.7	1,911,980	4.9	93.6
東 北		3,074,893	8.1	3,388,277	8.8	90.8
関 東	一区	9,022,704	23.8	8,903,595	23.0	101.3
	二区	3,500,393	9.2	3,529,149	9.1	99.2
	計	12,523,097	33.1	12,432,744	32.2	100.7
北 陸		1,684,232	4.4	1,879,869	4.9	89.6
東 海		4,446,301	11.7	4,424,257	11.4	100.5
近 畿		5,353,973	14.1	5,411,687	14.0	98.9
四 国		1,341,157	3.5	1,444,867	3.7	92.8
中 国		2,313,437	6.1	2,402,592	6.2	96.3
九 州		4,576,996	12.1	4,467,778	11.6	102.4
沖 縄		767,874	2.0	886,017	2.3	86.7
国 内 計		37,871,848	100.0 (76.7)	38,650,068	100.0 (77.7)	98.0
(内 需)		37,882,316		38,670,181		98.0
輸 出		11,483,777	(23.3)	11,112,881	(22.3)	103.3
合 計		49,355,625	(100.0)	49,762,949	(100.0)	99.2

ルは、新型コロナウイルス感染症で外国人作業員が
入国制限され、建設工事が停滞していた前年より、
状況が改善していることから、267万t、同164.0%と
前年プラスとなりました。中国は168万t、同51.5%、
香港は164万t、同109.4%、とプラスとなりました。オー
ストラリアは186万t、同110.7%とプラスとなりました。

2. 今後の展望

(1) 2022年度セメント需要見通し

2022年度の国内需要は3,800万t、前年比100.3%
と見通しました。官需については、国の公共事業予算
は2021年度に対して下回る水準で、入札不調や用地
買収遅れによる予算執行率の低下、人手不足等によ
る工事の長期化も継続すると想定されます。民需につ
いては、住宅投資において新設住宅着工戸数は減少
すると予想されます。設備投資は事務所や店舗、倉
庫が増加することや、都市部の再開発工事が本格化
することから、2021年を上回ると想定されます。

同輸出は1,160万t、前年比101.0%と見通しました。
エネルギー価格高騰、フレートの上昇等、厳しい輸出
環境にあるものの、アジア諸国およびオセアニアを中心
に依然根強い引き合いが期待されることから、前年並
みに推移するものと想定されます。

(2) 中期的なセメント需要見通し

新型コロナウイルスの収束の見通しは立ちませんが、
都市開発事業、地方での防災、減災対策などが
継続されることや、2025年大阪万博開催の関連工事、
リニア中央新幹線工事の沿線地域での直接・間接投
資が期待されることから、中期的には一定水準の需要
は維持するものと期待されます。

お知らせ

複写についてお願い

セメント協会は下記協会に複写に関する権利委託をしております。本誌に掲載された著作物を複写したい方は、同協会より許諾を受けて複写して下さい。ただし(公社)日本複製権センター(同協会より権利を再委託)と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません(社外頒布用の複写は許諾が必要です)。なお、著作物の転載・翻訳などの複写以外の許諾は、直接セメント協会広報部門(☎03-5540-6175/出版担当)へご連絡下さい。

連絡先：(一社)学術著作権協会 ☎170-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル
TEL 03-3475-5618 FAX 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

2021-OCセメント共同試験 結果と最近10年間の推移

(一社)セメント協会 研究所 技術情報グループ

1. はじめに

セメント協会は、セメント試験技術の維持・向上を目的として、全国のセメントおよびコンクリート関係の試験所・研究所を対象に、共通試料によるセメント共同試験を毎年実施している。この共同試験は10月に行うことからOC(October)共同試験と称しており、1948年から2021年まで72回実施した。

本稿では、2021年10月に実施した「2021-OCセメント共同試験」の結果を紹介する。

2. セメント共同試験の概要

参加した試験所は、セメント協会の会員(セメントメーカー関連の試験所・研究所)36試験所、セメント協会の会員外(生コンクリート工業組合、民間企業、海外の試験所など)54試験所の計90試験所であった。最近10年間の参加試験所数の推移を表1に示す。

試験に使用した試料は、普通ポルトランドセメント1試料である。実施した試験項目は次の通りである。

表1 参加試験所数の推移

種別		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
会 員		30	30	37	37	37	37	36	38	37	36
会員外	国内	67	62	57	57	50	52	51	49	48	48
	国外	3	9	5	6	8	5	6	5	8	6
計		70	71	62	63	58	57	57	54	56	54
合計		100	101	99	100	95	94	93	92	93	90

表2 化学分析結果(規格本体)

項 目		会 員						会員外					
		平均	最大	最小	標準 偏差	変動係数	試験 所数	平均	最大	最小	標準 偏差	変動係数	試験 所数
						(%)						(%)	
強熱減量 (ig.loss)	(%)	2.93	3.10	2.83	0.077	2.6	24	3.02	3.72	2.82	0.194	6.4	18
不溶残分 (insol.)		0.14	0.18	0.08	0.024	17.1	17	0.17	0.27	0.10	0.061	35.9	9
二酸化けい素 (SiO ₂)		20.13	20.32	20.00	0.074	0.4	14	20.03	20.23	19.90	0.135	0.7	8
酸化アルミニウム (Al ₂ O ₃)		5.35	5.40	5.30	0.027	0.5	13	5.45	5.56	5.34	0.090	1.7	6
酸化鉄(III) (Fe ₂ O ₃)		2.96	3.00	2.88	0.036	1.2	12	2.93	3.01	2.86	0.060	2.0	7
酸化カルシウム (CaO)		64.49	64.76	64.24	0.148	0.2	14	64.35	64.76	63.98	0.282	0.4	8
酸化マグネシウム (MgO)		0.91	0.96	0.84	0.028	3.1	12	1.03	1.34	0.90	0.147	14.3	8
三酸化硫黄 (SO ₂)		1.85	1.89	1.81	0.020	1.1	18	1.83	2.01	1.74	0.070	3.8	11
酸化ナトリウム (Na ₂ O)		0.17	0.19	0.16	0.009	5.3	12	0.17	0.19	0.13	0.017	10.0	8
酸化カリウム (K ₂ O)		0.38	0.40	0.36	0.010	2.6	12	0.38	0.40	0.34	0.023	6.1	8
酸化チタン(IV) (TiO ₂)		0.29	0.30	0.28	0.006	2.1	14	0.29	0.30	0.28	0.010	3.4	5
酸化りん(V) (P ₂ O ₅)		0.15	0.16	0.14	0.006	4.0	14	0.16	0.18	0.16	0.009	5.6	5
酸化マンガン(II) (MnO)		0.08	0.09	0.07	0.006	7.5	12	0.08	0.08	0.08	0.000	0.0	3
塩素 (Cl)		0.02	0.025	0.022	0.0008	3.5	18	0.025	0.026	0.021	0.0021	8.4	5

表3 最近10年間の化学分析結果(規格本体)の標準偏差の推移

項 目		種別	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
強熱減量 (ig.loss)	(%)	会 員	0.038	0.042	0.037	0.046	0.031	0.046	0.035	0.053	0.044	0.077
		会員外	0.062	0.053	0.127	0.124	0.073	0.079	0.060	0.145	0.196	0.194
不溶残分 (insol.)		会 員	0.029	0.028	0.033	0.030	0.033	0.038	0.033	0.031	0.030	0.024
		会員外	0.038	0.041	0.038	0.042	0.032	0.040	0.086	0.027	0.031	0.061
二酸化けい素 (SiO ₂)		会 員	0.059	0.062	0.087	0.054	0.072	0.067	0.071	0.152	0.087	0.074
		会員外	0.103	0.117	0.329	0.279	0.347	0.127	0.233	0.336	0.289	0.135
酸化アルミニウム (Al ₂ O ₃)		会 員	0.057	0.061	0.048	0.050	0.044	0.074	0.043	0.050	0.062	0.027
		会員外	0.114	0.196	0.103	0.332	0.138	0.093	0.179	0.155	0.226	0.090
酸化鉄(Ⅲ) (Fe ₂ O ₃)		会 員	0.027	0.029	0.021	0.030	0.023	0.035	0.041	0.028	0.065	0.036
		会員外	0.025	0.222	0.045	0.078	0.046	0.048	0.097	0.053	0.070	0.060
酸化カルシウム (CaO)		会 員	0.138	0.178	0.115	0.109	0.131	0.159	0.146	0.135	0.263	0.148
		会員外	0.641	0.241	0.173	1.268	0.226	0.345	0.259	0.139	0.397	0.282
酸化マグネシウム (MgO)		会 員	0.031	0.028	0.020	0.026	0.023	0.024	0.032	0.037	0.055	0.028
		会員外	0.061	0.177	0.110	0.304	0.083	0.063	0.056	0.096	0.166	0.147
三酸化硫黄 (SO ₃)		会 員	0.028	0.022	0.026	0.033	0.025	0.021	0.032	0.019	0.028	0.020
		会員外	0.043	0.061	0.106	0.045	0.032	0.057	0.056	0.226	0.082	0.070
酸化ナトリウム (Na ₂ O)		会 員	0.012	0.012	0.011	0.009	0.007	0.013	0.011	0.016	0.007	0.009
		会員外	0.014	0.021	0.015	0.025	0.014	0.032	0.013	0.013	0.025	0.017
酸化カリウム (K ₂ O)		会 員	0.023	0.013	0.012	0.012	0.016	0.030	0.017	0.016	0.013	0.010
		会員外	0.20	0.023	0.021	0.051	0.016	0.034	0.016	0.030	0.020	0.023
酸化チタン(Ⅳ) (TiO ₂)		会 員	0.10	0.012	0.008	0.008	0.011	0.015	0.007	0.007	0.007	0.006
		会員外	0.20	0.053	0.038	0.052	0.011	0.014	0.022	0.000	0.046	0.010
酸化りん(Ⅴ) (P ₂ O ₅)		会 員	0.007	0.012	0.007	0.008	0.009	0.012	0.020	0.006	0.010	0.006
		会員外	0.007	0.010	0.015	0.039	0.006	0.010	0.016	0.021	0.061	0.009
酸化マンガン(Ⅱ) (MnO)		会 員	0.005	0.006	0.005	0.005	0.006	0.003	0.006	0.005	0.003	0.006
		会員外	0.004	0.003	0.012	0.025	0.008	0.005	0.013	-	0.000	0.000
塩素 (Cl)		会 員	0.0011	0.0008	0.0010	0.0009	0.0007	0.0011	0.0011	0.0021	0.0008	0.0008
		会員外	0.0011	0.0030	0.0031	0.0024	0.0012	0.0023	0.0018	0.0021	0.0011	0.0021

- (1) 日本産業規格(JIS)に規定された化学分析、物理試験、水和熱試験
- (2) セメント協会標準試験方法(JCAS)に規定された45 μ m網ふるいによる粉末度、エア・ジェット式ふるい装置による粉末度、遊離酸化カルシウムの定量
- (3) 米国試験ASTMに規定された凝結、安定性、圧縮強さ
- 本稿では(1)および(2)の試験結果の概要について報告する。

3. 日本産業規格(JIS)による 試験結果の概要

- (1) JIS R 5202による化学分析結果
- 参加試験所は42試験所(会員24、会員外18)

であった。化学分析結果(規格本体)を表2に、最近10年間の化学分析結果(規格本体)の標準偏差の推移を表3に示す。

- (2) JIS R 5201による物理試験結果

参加試験所は78試験所(会員33、会員外45)であった。物理試験結果(規格本体)を表4に、最近10年間の物理試験結果(規格本体)の標準偏差の推移を表5に示す。材齢28日の圧縮強さの分布を図1に示す。

- (3) JIS R 5203による水和熱試験結果

参加試験所は14試験所(全て会員)であった。水和熱試験結果を表6に、最近10年間の水和熱試験結果の標準偏差の推移を表7に示す。

- (4) JIS R 5204による蛍光X線分析結果

参加試験所は28試験所(会員26、会員外2)であった。蛍光X線分析結果を表8に示す。

項 目			会 員						会員外						
			平均	最大	最小	標準 偏差	変動係数	試験 所数	平均	最大	最小	標準 偏差	変動係数	試験 所数	
							(%)						(%)		
粉末度凝結	密 度		(g/cm ³)	3.13	3.15	3.12	0.009	0.3	24	3.13	3.15	3.12	0.008	0.3	18
	比表面積		(cm ² /g)	3130	3250	2970	53	1.7	30	3142	3260	3030	56	1.8	17
	標準網ふるい 90μm残分		(%)	0.9	1.1	0.5	0.12	13.3	24	0.6	0.9	0.2	0.28	46.7	6
	水 量		(%)	27.5	28.2	26.8	0.34	1.2	33	27.7	30.0	25.0	0.8	2.9	26
	始 発		(h-min)	2-17	2-45	1-35	0-12.8	9.3	33	2-25	3-5	2-5	0-11.3	7.8	26
強 さ	終 結		(h-min)	3-27	4-11	2-45	0-14.6	7.0	33	3-32	4-25	3-10	0-19.2	9.0	26
	圧縮 強さ	3日	(N/mm ²)	30.7	34.2	29.3	1.11	3.6	26	30	31.8	27.5	0.98	3.3	45
		7日		47.0	49.4	45.2	1.11	2.4	26	45.8	48.8	42.0	1.49	3.3	45
		28日		63.1	66.1	60.4	1.22	1.9	26	61.8	65.5	57.1	1.63	2.6	45
	曲げ 強さ	3日	(N/mm ²)	6.2	6.6	5.7	0.29	4.7	20	6.2	7.2	5.7	0.31	5.0	33
7日		7.9		8.5	7.4	0.31	3.9	20	7.9	8.9	7.1	0.34	4.3	33	
28日		9.2		9.8	8.1	0.39	4.2	20	9.3	10.5	8.3	0.46	4.9	33	
フ ロ ー			(mm)	200	217	184	12.3	6.2	7	186	197	171	10.5	5.6	5

表 5 最近 10 年間の物理試験結果(規格本体)の標準偏差の推移

項 目			種別	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
密 度		(g/cm ³)	会 員	0.008	0.011	0.010	0.007	0.007	0.006	0.007	0.008	0.012	0.009	
			会員外	0.011	0.009	0.008	0.008	0.007	0.007	0.011	0.009	0.011	0.008	
粉 末 度	比表面積	(cm ² /g)	会 員	35	28	37	34	35	35	27	40	42	53	
			会員外	75	82	112	62	105	48	72	106	59	56	
標準網ふるい 90 μ m残分		(%)	会 員	0.14	0.29	0.132	0.10	0.10	0.16	0.08	0.19	0.38	0.12	
			会員外	0.14	0.38	0.238	0.20	0.22	0.19	0.19	0.43	0.60	0.28	
凝 結	水 量	(%)	会 員	0.54	0.36	0.382	0.43	0.38	0.47	0.40	0.41	0.45	0.34	
			会員外	0.87	0.65	0.392	0.68	0.30	0.59	0.78	0.30	0.82	0.80	
	始 発	(h-min)	会 員	0-9.2	0-8.8	0-8.4	0-13.9	0-7.7	0-9.9	0-12.0	0-9.3	0-11.9	0-12.8	
			会員外	0-8.6	0-10.4	0-9.9	0-14.2	0-7.7	0-10.4	0-14.1	0-11.9	0-12.4	0-11.3	
終 結	(h-min)	会 員	0-12.2	0-15.0	0-10.5	0-11.9	0-12.1	0-12.1	0-20.3	0-11.1	0-15.9	0-14.6		
		会員外	0-16.4	0-14.0	0-16.7	0-15.6	0-12.3	0-17.3	0-19.6	0-15.6	0-17.1	0-19.2		
強 さ	圧縮 強さ	3日	(N/mm ²)	会 員	0.90	0.96	0.61	0.68	0.88	0.79	0.93	0.55	0.99	1.11
				会員外	1.21	0.79	1.04	1.23	0.94	0.83	0.96	1.35	1.15	0.98
				会 員	1.43	1.33	0.86	1.16	0.96	0.83	0.98	0.82	0.99	1.11
				会員外	1.7	1.42	0.98	1.75	1.07	0.98	1.21	1.40	1.33	1.49
				会 員	1.34	1.88	0.79	1.41	1.19	1.04	1.17	1.03	1.06	1.22
				会員外	1.75	1.89	1.71	2.64	1.62	1.36	1.61	1.63	1.58	1.63
	曲げ 強さ	3日	(N/mm ²)	会 員	0.29	0.33	0.26	0.24	0.26	0.25	0.31	0.32	0.35	0.29
				会員外	0.40	0.39	0.27	0.30	0.28	0.37	0.33	0.37	0.31	0.31
				会 員	0.38	0.21	0.35	0.34	0.37	0.36	0.34	0.32	0.49	0.31
				会員外	0.41	0.42	0.36	0.42	0.45	0.37	0.42	0.38	0.41	0.34
				会 員	0.42	0.29	0.40	0.29	0.31	0.31	0.33	0.45	0.41	0.39
				会員外	0.57	0.68	0.48	0.52	0.47	0.51	0.38	0.41	0.46	0.46
フ ロ ー		(mm)	会 員	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12.3	
			会員外	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.5

表 6 水和熱試験結果

項 目		会 員						会員外					
		平均	最大	最小	標準 偏差	変動係数 (%)	試験 所数	平均	最大	最小	標準 偏差	変動係数 (%)	試験 所数
熱 容 量		(J/K)	1713	1738	1697	12.5	0.7	14	-	-	-	-	0
未水和セメントの溶解熱		(J/g)	2532	2541	2502	9.3	0.4	14	-	-	-	-	0
水 和 熱	7日	(J/g)	324	330	319	3.8	1.2	14	-	-	-	-	0
	28日		381	389	377	3.7	1.0	14	-	-	-	-	0

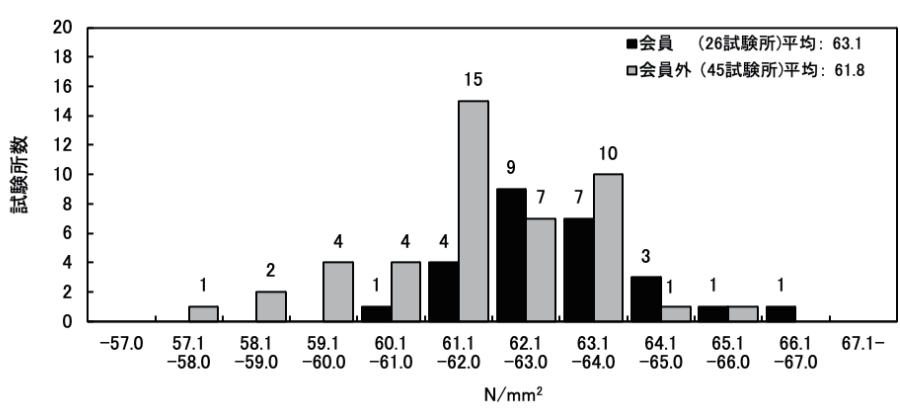


図 1 材齢28日の圧縮強さの分布

表 7 最近 10 年間の水和熱試験結果の標準偏差の推移

項 目		種別	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
水 和 熱	7日	会 員	8.5	3.7	4.8	5.6	3.7	4.9	4.5	3.9	4.0	3.8
		会員外	5.4	4.0	-	-	-	-	-	-	-	-
	28日	会 員	4.6	2.4	5.0	4.5	2.3	5.5	4.4	4.8	3.7	3.7
		会員外	18.5	6.3	-	-	-	-	-	-	-	-

表 8 蛍光X線分析結果

項 目		会 員						会員外					
		平均	最大	最小	標準 偏差	変動係数 (%)	試験 所数	平均	最大	最小	標準 偏差	変動係数 (%)	試験 所数
強熱減量	(ig.loss)	2.94	3.08	2.83	0.083	2.8	25	3.09	-	-	-	-	1
二酸化けい素	(SiO ₂)	20.11	20.27	19.99	0.074	0.4	26	20.02	20.24	19.79	-	-	2
酸化アルミニウム	(Al ₂ O ₃)	5.36	5.39	5.30	0.023	0.4	26	5.74	6.13	5.35	-	-	2
酸化鉄(Ⅲ)	(Fe ₂ O ₃)	2.97	3.00	2.95	0.014	0.5	26	2.98	2.99	2.97	-	-	2
酸化カルシウム	(CaO)	64.69	64.99	64.40	0.144	0.2	26	66.17	67.71	64.62	-	-	2
酸化マグネシウム	(MgO)	0.92	0.96	0.86	0.024	2.6	26	0.68	0.95	0.41	-	-	2
三酸化硫黄	(SO ₃)	1.86	2.00	1.80	0.037	2.0	26	1.93	2.04	1.82	-	-	2
酸化ナトリウム	(Na ₂ O)	0.17	0.18	0.16	0.007	4.1	26	0.17	0.19	0.15	-	-	2
酸化カリウム	(K ₂ O)	0.37	0.39	0.34	0.012	3.2	26	0.39	0.39	0.38	-	-	2
酸化チタン(Ⅳ)	(TiO ₂)	0.29	0.30	0.27	0.008	2.8	26	0.29	0.29	0.29	-	-	2
酸化りん(V)	(P ₂ O ₅)	0.16	0.17	0.12	0.009	5.6	26	0.15	-	-	-	-	1
酸化マンガン(Ⅱ)	(MnO)	0.08	0.08	0.07	0.004	5.0	26	0.07	0.10	0.04	-	-	2
酸化ストロンチウム	(SrO)	0.04	0.05	0.03	0.008	20.0	11	-	-	-	-	-	0
塩素	ガラスビード法	0.021	0.024	0.015	0.0030	14.3	6	-	-	-	-	-	0
	ブリケット法	0.025	0.026	0.023	0.0010	4.0	8	-	-	-	-	-	0

4. セメント協会標準試験方法(JCAS)による試験結果の概要

参加試験所は、JCAS K-03による「エア・ジェット式ふるい装置による粉末度」が12試験所(全て会員), JCAS K-02による「45μm 網ふるいによる粉末度」が14 試験所(会員12,会員外2), JCAS I-01による「遊

離酸化カルシウムの定量」は、A 法(エチレングリコール法)が15 試験所(会員12, 会員外3),B 法(グリセリン-アルコール法)が20 試験所(全て会員)であった。エア・ジェット式ふるい装置および45μm 網ふるいによる粉末度を表9に、遊離酸化カルシウムの分析結果を表10に、また最近10年間のB法による遊離酸化カルシウムの標準偏差の推移を表11に示す。

表9 エア・ジェット式ふるい装置および45μm網ふるいによる粉末度														
項 目			会 員						会員外					
			平均	最大	最小	標準 偏差	変動係数	試験 所数	平均	最大	最小	標準 偏差	変動係数	試験 所数
							(%)						(%)	
エア・ジェット式ふるい装置による粉末度残分	10μm	(%)	71.8	72.4	71.4	0.40	0.6	5	-	-	-	-	-	0
	16μm		53.4	54.9	52.9	0.76	1.4	6	-	-	-	-	-	0
	20μm		42.9	43.6	41.3	0.85	2.0	6	-	-	-	-	-	0
	32μm		20.9	24.5	20.2	1.14	5.5	12	-	-	-	-	-	0
網ふるい残分	45μm		9.4	10.2	8.2	0.60	6.4	12	9.6	9.8	9.4	-	-	2

表10 遊離酸化カルシウムの分析結果														
項 目			会 員						会員外					
			平均	最大	最小	標準 偏差	変動係数	試験 所数	平均	最大	最小	標準 偏差	変動係数	試験 所数
							(%)						(%)	
遊離酸化カルシウム	A法	(%)	0.8	0.9	0.7	0.07	8.8	12	1.0	1.1	0.8	0.15	15.0	3
	B法		0.8	1.0	0.6	0.09	11.3	20	-	-	-	-	-	0

表11 最近10年間のB法による遊離酸化カルシウムの標準偏差の推移													
項 目			種別	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
遊離酸化カルシウム	B法	(%)	会 員	0.17	0.09	0.10	0.09	0.08	0.09	0.09	0.12	0.16	0.09
			会員外	0.19	0.13	-	-	-	-	-	-	-	-

5. おわりに

正しい試験結果を得るためには、当該試験の規格や解説書をもとに定められた試験条件の遵守、試験機器の整備、試験技量の習得が重要である。

試験結果の確認には、当協会で販売しているセメント強さ試験用標準砂をはじめ、装置の校正用標準物質、試験の技能確認用標準物質、蛍光X線の検量線作成に用いる標準物質、検量線の検定に用いる認証標準

物質をご参考にして頂きたい。

共通試料による共同試験への参加は、自己の試験操作や試験結果等を客観的に比較・考察できる貴重な機会である。本試験が各試験所の試験技術向上の一助となれば幸いである。

今年も10月に「2022-OCセメント共同試験」の実施を予定している。参加募集についての詳細は本誌10ページ、またはセメント協会ホームページをご覧ください。

セメント規格がわかる本

2015年3月20日にJIS R 5201およびJIS R 5203が改正されたことに伴い、これら試験方法規格に関する「セメント規格がわかる本」を改訂しました。今回の規格改正において変更や追加された点について詳しく解説するとともに、試験を行う上で不可欠な知識やノウハウを理解しやすい内容となっています。

JIS R 5203：2015「セメントの水和熱測定方法（溶解熱方法）」編 A4版・60ページ・3740円（税込） ・送料実費	JIS R 5201：2015「セメントの物理試験方法」編 A4版・135ページ・5500円（税込） ・送料実費
--	---



お求め・お問い合わせは… 一般社団法人セメント協会 図書販売係 まで
東京都中央区新富二丁目15番5号 RBM築地ビル2階 TEL 03-5540-6173 FAX 03-5540-6181

お知らせ

「2022-OCセメント共同試験」参加募集

セメント協会は、セメント試験技術の維持・向上のため、1948年より「共通試料によるセメント共同試験」を実施しております。昨年は国内外のセメント・コンクリート関係90ヶ所の試験所・研究所よりご参加をいただきました。

今年も10月に、日本産業規格(JIS)、セメント協会標準試験方法(JCAS)、米国試験(ASTM)による共同試験を実施いたしますので、ふるってご参加ください。詳細はセメント協会ホームページをご覧ください。

・名 称 2022-OCセメント共同試験

・参加申込み 下記の[OCセメント共同試験]の参加申込より「申込み」をクリックし、必要事項をご入力ください。入力が完了しましたらご登録頂いたメールアドレスに入力情報が送信されますので内容をご確認ください。

セメント協会ホームページ
<https://www.jcassoc.or.jp>
 [トップページ]>[イベント・募集]>[OCセメント共同試験]

・参 加 料 金 一般 11,000円(参加料10,000円+税1,000円)
 ※セメント協会会員会社は6,600円(参加料6,000円+税600円)

・問 合 せ 先 一般社団法人 セメント協会
 研究所 技術情報グループ OCセメント共同試験 担当
 〒114-0003 東京都北区豊島4丁目17番33号
 TEL 03-3914-2692 E-mail jca_event@jcassoc.or.jp

・試 験 日 程 申込み締切日 2022年 7月 1日(金)
 参加料金振込期限 2022年 8月26日(金)
 試験開始予定日 2022年10月 3日(月)
 試験結果の報告期限 2022年12月 1日(木)
 報告書送付 2023年 3月下旬

環境配慮型コンクリートにおける 炭酸カルシウムの位置付け

Effective Application of CCU calcium carbonate powder in achieving carbon negative/neutral concrete

坂田 昇 田淵 浩記

1. はじめに

セメントの製造時に多量のCO₂が排出されることから、そのセメントを使用するコンクリートは、造れば造るほど地球環境に負荷を与えることになり、この観点からは悪者扱いとなっている。一方、2050年カーボンニュートラル社会の実現に向けて、今年度から政府が主導するグリーンイノベーション基金による研究開発が開始され、セメント分野およびコンクリート分野もその対象となっている。これにより、環境への負荷を低減する環境配慮型コンクリートの開発が加速するものと考えられる。

今後、環境配慮型コンクリートの開発にあたって、炭酸塩である炭酸カルシウムは、コンクリートによるCO₂削減のキーとなる最も重要な材料である。本稿では、環境配慮型コンクリートの全体像について説明するとともに、最近の環境配慮型コンクリートの様々な技術から、なぜ炭酸カルシウムがキーマテリアルであるかについて説明し、今後の展開について言及する。

2. 環境配慮型コンクリートの全体像

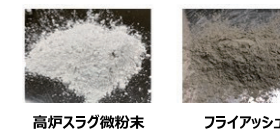
久田ら¹⁾は、環境配慮型コンクリートを、CO₂を削減する方法の違いによって、①セメントを置換する材料技術、②骨材や粉体にCO₂を固定化する技術、③コンクリートにCO₂を吸収させる技術の3つに分類している。この観点から筆者らが整理した、現状の環境配慮型コンクリート技術を図1に示す。

①のセメントを置換する材料技術は、セメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュに置換する方法である^{2~4)}。図2に通常のコンクリートの配合例を示すように、コンクリートは計量するため重量表記されることが多いが、体積表記にすると、おおよそ、水が15%、セメントが10%、細骨材が30%、粗骨材が40%である。このようにセメントはコンクリート体積の10%程度に過ぎないが、水や骨材はコンクリートの使用材料としての加工に要するエネルギーが比較的小さいことから、コンクリートのCO₂排出量のほとんどはセメントによってもたらされる。セメント製造時にCO₂が排出されるメカニズムは、図3に示すように、石灰石(CaCO₃)を主材料に粘土や鉄などを加えて、1400℃程度で焼成することで、セメントの主成分となる酸化カルシウム化合物(CaO)と二酸化炭素(CO₂)ができ、大気中にCO₂が放出されるものである。したがって、コンクリート中のセメント量を減らせば、計算上はCO₂排出量を削減することができる。

②の骨材や粉体にCO₂を固定化する技術は、CO₂

① セメントを置換する材料技術

セメントの一部または全部を、産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュに置き換えることで、計算上のCO₂排出量を低減したコンクリート



高炉スラグ微粉末

フライアッシュ

② 骨材や粉体にCO₂を固定化する技術 (CCU材料技術)

廃コンクリート等の廃棄物由来のCaにCO₂を反応・吸収させて、炭酸カルシウム(CaCO₃)の微粉末や骨材を製造し、それらを材料として練り混ぜることでCO₂を固定化したコンクリート



CCU骨材

CCU粉体

CCU : Carbon Capture and Utilization

③ コンクリートにCO₂を吸収させる技術

CO₂と反応する材料を配合して炭酸化養生を行うことで、実際にコンクリート中にCO₂を吸収し、炭酸カルシウム(CaCO₃)として固定化することができるコンクリート



CO₂と反応して硬化する特殊な粉体 yC₂S

図1 環境配慮型コンクリートの全体像

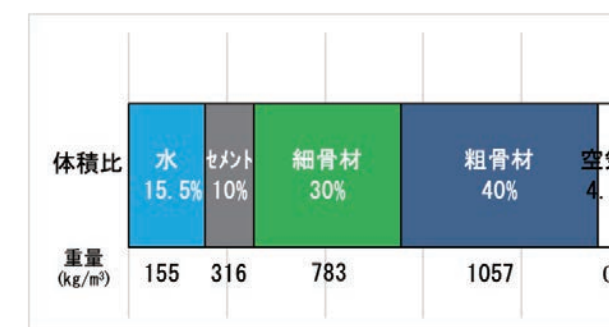


図2 通常のコンクリート配合

を吸収、固定化した微粉末^{5,6)}や粒状の材料(CCU材料)をコンクリートの使用材料として用いる方法である。これらの材料を混和材や骨材として用いれば、比較的容易にコンクリートの中にCO₂を取り込んで固定化することができ、効果的なCO₂の削減に繋がる。

③のコンクリートにCO₂を吸収させる技術は、コンクリートに大気中よりも高濃度のCO₂を与えて強制的に吸収させる方法であり、練混ぜ時の一般的な配合のコンクリートにCO₂を与えるもの⁷⁾と、特殊な混和材を混和したうえで練り混ぜて成型したコンクリートにCO₂を与えるもの⁸⁾がある。方法によってCO₂の吸収・固定量は異なり、後者の方が多くのCO₂を固定化できるが、いずれも直接的にコンクリートのCO₂を取り込み、CO₂削減を実現する技術である。

ここで、重要なポイントが2つある。1つは、①がコンクリート中のセメントの使用量を減らすことにより、計

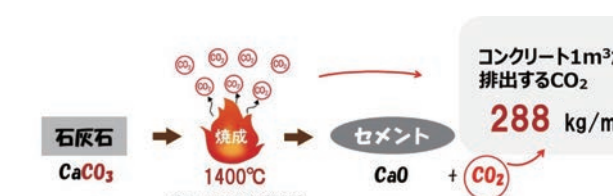


図3 セメント製造のイメージ

算上CO₂を削減するものであるのに対して、②はCO₂を吸収させた微粉末や骨材などをコンクリートに混入することで間接的にコンクリートにCO₂を固定化するものであり、③は直接的にコンクリート中にCO₂を取り込んで固定化するものであるという点である。①の方法では、CO₂排出量を削減することはできるが、CO₂排出量をゼロ以下にする「カーボンネガティブ」にすることは不可能である。それを実現する可能性があるのが②と③の方法である。

また、セメントが基幹的な建設資材であることは言うまでもないが、日本ではセメント製造が廃棄物処理の受け皿として重要な役割を担っていることを鑑みれば、闇雲にセメントを減らせばよいというものではないことは明白である。近年では、セメントを全く使わないコンクリートも開発、実用化されている⁴⁾。これはCO₂を削減する選択肢の1つではあるものの、こうした方向に全面的に移行することは考えにくい。CO₂排出量が少なくなるようなセメント製造方法の改良が進むことを期待する一方



さかた のぼる / SAKATA Noboru
鹿島建設(株) 執行役員
土木管理本部土木技術部長 博士(工学) 博士(農学)



たぶち こうき / TABUCHI Kouki
デンカ(株) 常務執行役員
エラストマー・インフレーション部門長

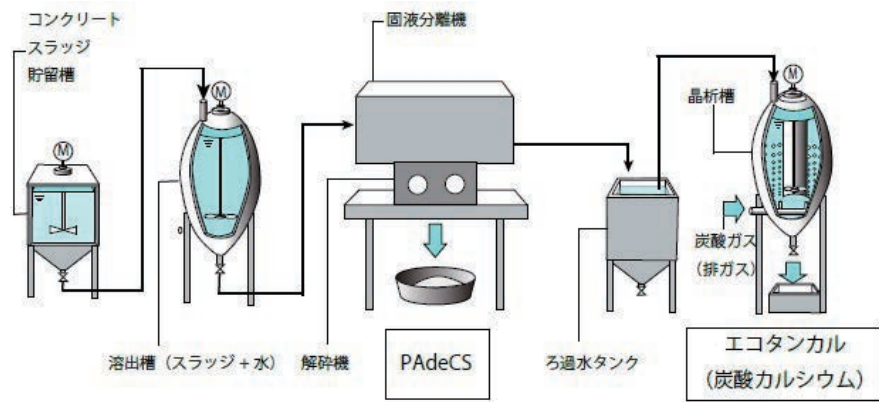


図4 コンクリートスラッジを用いたエコタンカル等の製造フロー

で、②および③の方法の技術開発、実用化を強力に推進することが肝要と考えられる。

もう1つのポイントは、②および③の方法で、コンクリート中にCO₂を取り込んで固定化する役割を果たすのが炭酸カルシウムであるということである。これについて、以下に詳しく説明する。

3. 炭酸カルシウムの位置付け

炭酸カルシウムは、化学的に極めて安定しており、高温で加熱などしない限り、石灰石のように半永久的にCaCO₃の化合物として存在する。その炭酸カルシウムを高温で焼成することでセメントが作られるが、環境配慮型コンクリートとして久田らが示す②のCO₂を吸収、固定化した炭酸カルシウムの微粉末や骨材をコンクリートの材料として使用する方法と、③のコンクリートにCO₂を吸収させる方法によって炭酸カルシウムに戻すことで、CO₂を削減するという循環のメカニズムを構成することができる。また、製造したコンクリートをカーボンニュートラル、さらにはカーボンネガティブにすることが可能となる。ここでは、②および③について、それぞれその詳細について述べる。

3-1. CCU材料をコンクリートに使用する方法

コンクリートの硬化では、水和物としてエトリンガイトやモノサルフェートなども生成されるが、主なものは、水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)と珪酸カルシウム水和物

(nCaO・SiO₂・mH₂O、以後C-S-Hと表記)である。このCa(OH)₂とC-S-Hは、高いアルカリ性を呈して、コンクリートのフレッシュ時や若材齢ではCO₂との反応性も高い。このことを利用して、CO₂から製造した炭酸カルシウム微粉末がエコタンカル^{5,6)}である。エコタンカルは、プレキャストコンクリート製品の製造時に発生するコンクリートスラッジと、ボイラーなどから排出されるCO₂を反応させて製造されるCCU材料(CCU: Carbon Capture and Utilization)である。その製造フローを図4に示す。

一方、コンクリートは、練り混ぜた際に、セメントと水がペースト状になり、そのペーストが細骨材や粗骨材を包み込んだ状態で、フレッシュコンクリートとなる。このペーストの流動性や粘性で、コンクリートのスランプや材料分離抵抗性が決まる。筆者らは、高流動コンクリートの材料分離抵抗性を高めるために、骨材の一部に大量の炭酸カルシウム微粉末を混入する技術⁹⁾を30年前に開発している。この技術を用い、エコタンカルのようなCO₂から製造した炭酸カルシウム微粉末を材料として高流動コンクリートを製造すれば、容易にCO₂の削減が可能となる。

その他にも、前述のようにコンクリート中の骨材は7割を占めるため、一般的な骨材の代わりとして、CO₂を吸収させた炭酸カルシウムの粉体や骨材を用いることができれば、大幅なCO₂の削減が可能となる。その実現に向けて、残コンなどからだけでなく、コンクリート廃材などからもCO₂を吸収させて炭酸カルシウムを生成す

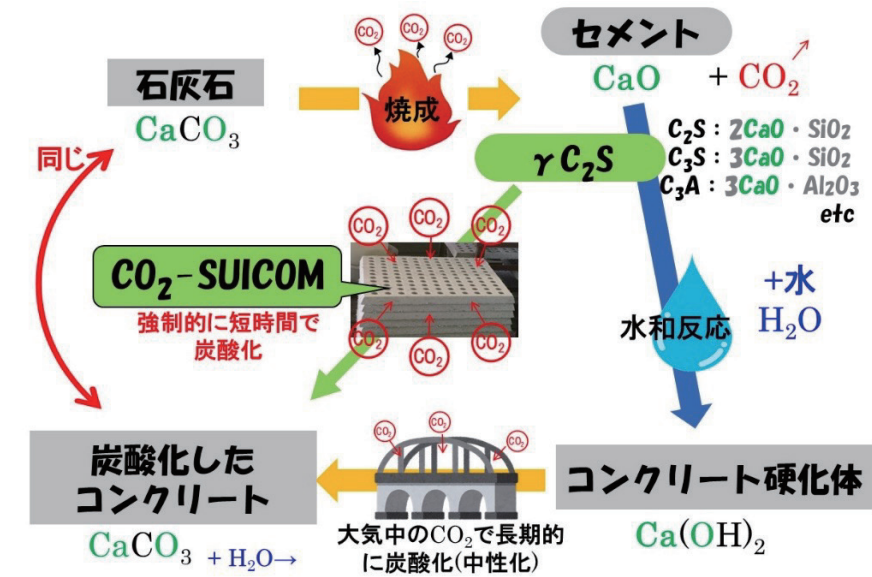


図5 石灰石からセメントが製造されて、さらに炭酸化されたコンクリートになるまでの流れ

るCCU材料の製造技術^{10~13)}の開発が様々な機関で実施されつつある。

3-2. コンクリートにCO₂を吸収させる方法

ここでは、CO₂吸収・固定量の多い、CO₂と反応する特殊な混和材を用いたタイプのCO₂吸収コンクリート「CO₂-SUICOM」^{14,15)}について説明する。

前述のとおり、セメントは石灰石を主な材料として粘土や鉄と一緒に焼いて製造される。この際に、石灰石CaCO₃がセメント(CaO化合物)とCO₂に分離される。このように製造されたセメントは、CaO化合物として、珪酸二カルシウム(2CaO・SiO₂)、珪酸三カルシウム(3CaO・SiO₂)、アルミン酸三カルシウム(3CaO・Al₂O₃)、鉄アルミン酸四カルシウム(4CaO・Al₂O₃・Fe₂O₃)から構成される。図5の右側の下向きの青の矢印のように、セメントの主成分であるCaO化合物は化学的に不安定で水H₂Oとの反応性が高く、水和反応によって水酸化カルシウムCa(OH)₂が生成されて硬いコンクリートとなる。厳密には、水和反応による硬化物として珪酸カルシウム化合物C-S-Hも生成されるがここでは説明上割愛する。硬化したコンクリート(水酸化カルシウムCa(OH)₂)は高いアルカリ性をもち、図5の下側の左向きの黄色の矢印のように、大気中のCO₂

と反応して、コンクリート表面から徐々に炭酸化され、炭酸カルシウムCaCO₃に戻る。ただし、大気中のCO₂濃度は0.04%と極めて薄いため、その炭酸化の速度は極めて遅く、通常のコンクリートの場合、数十年でコンクリート表面から数センチの深さまで炭酸化する程度である。この現象が中性化であり、長い年月をかけて炭酸化することから、コンクリートの溶脱などとも相まってコンクリートの組織がポーラス化し、かつアルカリ性を失うことで鉄筋が錆びやすくなるのが一般的である。なお、大気中のCO₂濃度は0.04%と極めて薄いですが、数十年前から0.01%程度増えており、この程度の濃度の増加であっても地球の温暖化をもたらしている。

一方、CO₂吸収コンクリートに用いる特殊な混和材は、水と反応せず、CO₂と反応して硬化するという特徴を持つ。この特殊な混和材は、具体的にはγ型の珪酸二カルシウム(C₂S)である。C₂Sには、主にβ型とγ型が存在する。通常のセメントの成分はβ型C₂Sであり、水と反応して水酸化カルシウムを生成し、硬化する。それに対して、CO₂吸収コンクリートに用いる特殊な混和材γ型のC₂S、γ-C₂S^{16,17)}は、水とは反応せず、CO₂と反応して硬化して炭酸カルシウムになるのである。図5の中央の斜左下向きの緑色の矢印のように、コンクリート中にγ-C₂Sを混入して、それを数10%~80%程



図6 火力発電所の排ガスによる炭酸化養生



島根県 境界ブロック



広島県 舗装コンクリートブロック



山口県 太陽光発電パネルの基礎



東京都 バルコニーの天井



東京都 プレキャスト埋設型枠

図7 CO₂-SUICOMの実構造物への適用事例

度のCO₂濃度の雰囲気下で養生することで、強制的に短期間で炭酸化され、緻密な炭酸カルシウムCaCO₃の硬化体が製造できるのである。コンクリート硬化体は、図5に示すように、石灰石と同じ炭酸カルシウムとなる。図6に示すように、CO₂-SUICOMでは、実用化にあたって火力発電所の排ガスを用いて炭酸化養生を行った。よって、CO₂-SUICOMは、CO₂から製造すると言っても過言ではなく、二酸化炭素を資源として循環させ、それを材料として工業製品を生み出す、まさに活性炭素技術であり、カーボンニュートラル、

さらにはカーボンネガティブに寄与する技術である。なお、作り出される炭酸カルシウムは、先述のとおり化学的に安定しており、セメントを製造するように高熱を与えない限り、CO₂を放出することはほとんどなく、CO₂を確実に固定化していると言える。今までに、境界ブロック、舗装コンクリートブロック、コンクリート基礎、建築構造物の天井パネル(鉄筋コンクリート)、プレキャスト型枠などに使われている。図7に、様々な部位に適用されているCO₂-SUICOMの事例を示す。

4. おわりに

セメントは炭酸カルシウムから作られて多くのCO₂を排出するが、残コンやコンクリートガラなどにCO₂を吸収させて炭酸カルシウムを製造することや、コンクリートにCO₂を吸い込ませてコンクリート中の特殊混和材と反応させ、炭酸カルシウムを含んだコンクリートとすることで、CO₂を削減することが可能である。特に、骨材にこれらの炭酸カルシウムを利用することができれば、大幅なCO₂の削減が可能となり、コンクリートは造れば造るほどCO₂を吸収する植物のような存在にもなり得る。このように、炭酸カルシウムに還元することがCO₂削減のためには極めて重要であり、その技術開発が今後ますます求められる。

【参考文献】

- 1) 久田真, 宮里心一／カーボンネガティブコンクリートの社会実装に向けて-CO₂の受け皿となるコンクリートを目指す-, 土木施工, Vol.62, No.11, pp.22~25, 2021.11
- 2) 米澤敏男他／エネルギー CO₂ミニマム(ECM)セメント・コンクリートシステム, コンクリート工学, Vol.48, No.9, pp.69~73, 2010.9
- 3) 小林利充他／低炭素型のコンクリート「クリーンクリート」, 大林組技術研究報, No.80, 2016

- 4) 大脇英司／混和材を大量に使用したコンクリートと事例, コンクリート工学, Vol.57, No.1, 2019.1
- 5) 佐々木猛, 八木利之／エコタンカル®(軽質炭酸カルシウム)とその可能性, セメント・コンクリート, No.900, pp.58~62, 2022.2
- 6) 佐々木猛, 八木和之／エコタンカル CO₂を原料とした環境にやさしい軽質炭酸カルシウム, 土木施工, Vol.62, No.11, pp.87~90, 2021.11
- 7) S. Monkman et al / The impacts of in-situ carbonate seeding on the early hydration of tricalcium silicate, Cement and Concrete Research 136 pp.1~11, 2020
- 8) 取達剛他 / CO₂排出量ゼロ以下の環境配慮型コンクリート CO₂-SUICOM, セメント・コンクリート, Vol.786, 2012
- 9) 坂田昇他 / 高流動コンクリートの充填性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, 1990
- 10) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構／海外カーボンリサイクル技術実現可能性調査, 2020
<https://www.jogmec.go.jp/content/300368454.pdf> (2022.3.1確認)
- 11) 竹中工務店 / セメント系廃材を活用したCO₂固定プロセス及び副産物の建設分野への利用技術の研究,
<https://www.nedo.go.jp/content/100920409.pdf> (2022.3.1確認)
- 12) 出光興産他 / 廃コンクリートなど産業廃棄物中のカルシウム等を用いた加速炭酸化プロセスの研究開発,
<https://www.nedo.go.jp/content/100920409.pdf> (2022.3.1確認)
- 13) 野口貴文 / NEDO ムーンショット型研究開発「C'S研究開発プロジェクト」の現状と展望, セメント・コンクリート, No.900, pp.40~45, 2022.2
- 14) 取達剛, 森泰一郎, 河内友一 / CO₂吸収型コンクリート CO₂-SUICOM, 土木施工, VOL.62, No.11, 2021.11
- 15) 取達剛他 / CO₂固定型カーボンネガティブコンクリート CO₂-SUICOMの開発と今後の展望, セメント・コンクリート, Vol.900, 2022.2
- 16) 庄司慎他 / 副生水酸化カルシウムを用いたC₂Sの製造とCO₂排出削減, セメント・コンクリート論文集, No.67, pp.553~558, 2013.
- 17) 渡邊賢三他 / γ-2CaO・SiO₂および各種ポルトランドセメントを添加した硬化体の炭酸反応による空隙充てん機構, 土木学会論文集E2, Vol.68, No.1, 2012

改良地盤の震災・適用調査報告書 無料ダウンロードできます。

お知らせ

- ①東日本大震災におけるセメント系固化材を用いた地盤改良に関する調査報告書
- ②大規模災害に対してセメント系固化材による地盤改良が果たす役割
- ③防災・減災、国土強靱化に資するセメント系固化材による地盤改良
- ④セメント系固化材の拡がる用途と役割



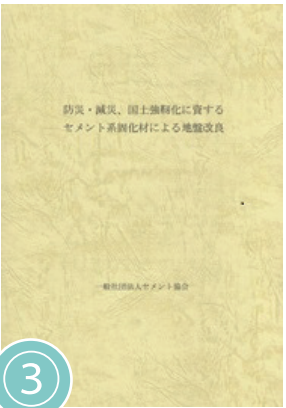
1

東日本大震災におけるセメント系固化材を用いた地盤改良に関する調査報告書



2

大規模災害に対してセメント系固化材による地盤改良が果たす役割



3

防災・減災、国土強靱化に資するセメント系固化材による地盤改良



4

セメント系固化材の拡がる用途と役割

弊会ホームページ(<https://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/kokazaihoukoku01.html>)から、無料ダウンロードできます。
是非ご利用下さい。

一般社団法人セメント協会普及部門 E-mail fukyu@jcassoc.or.jp

地上式LNGタンクのコンクリート施工における 温度ひび割れ防止と暑中コンクリート対策 —沖縄電力株式会社 牧港ガスエンジン発電所新設工事—

Prevention of thermal cracks and hot weather concreting countermeasure
in concrete construction of aboveground LNG storage tank
-Okinawa Electric Power Company, Makiminato gas-engine power plant construction-

宜野座 剛 新垣 和人 石川 智啓 諸石 鉄二 篠田 康人 桜井 邦昭

1. はじめに

沖縄電力では、電力供給の信頼度向上や環境への配慮を目的に、沖縄県浦添市にある牧港発電所構内の老朽化した牧港ガスタービン1号機(燃料：石油)の代替として、発電出力45,000kWの牧港ガスエンジン発電所(燃料：液化天然ガス)の建設を進めている(図1)。

このうち、液化天然ガス(LNG)を貯留するための

燃料タンクとして地上式LNGタンク(容量2,000t)を構築する。地上式LNGタンクの概要を図2に示す。基礎版コンクリートは、外径22.9m、厚さ0.9m(中央部)、1.5m(外周部)の円形のスラブ部材であり、数量500m³を一括で施工した。PC防液堤コンクリートは、外径21.5m、厚さ0.45m、高さ19.31mの円筒形の壁部材であり、1回の施工高さを1.2~3.71mとして6回に分けて施工した。



図1 発電所のイメージ図



ぎのざ たけし / GINOZA Takeshi
沖縄電力(株) 発電本部 発電部 発電企画グループ マネージャー



しながき かずと / SHINGAKI Kazuto
同上 発電企画グループ 係長



いしかわ ともひろ / ISHIKAWA Tomohiro
同上 発電企画グループ



もろいし てつじ / MOROISHI Tetsuji
(株)大林組 九州支店
沖縄牧港GE発電所工事事務所 副所長



しのだ やすと / SHINODA Yasuto
同上 沖縄牧港GE発電所工事事務所



さくらい くにあき / SAKURAI Kuniaki
同上 技術研究所 生産技術研究部
主任研究員 博士(工学)

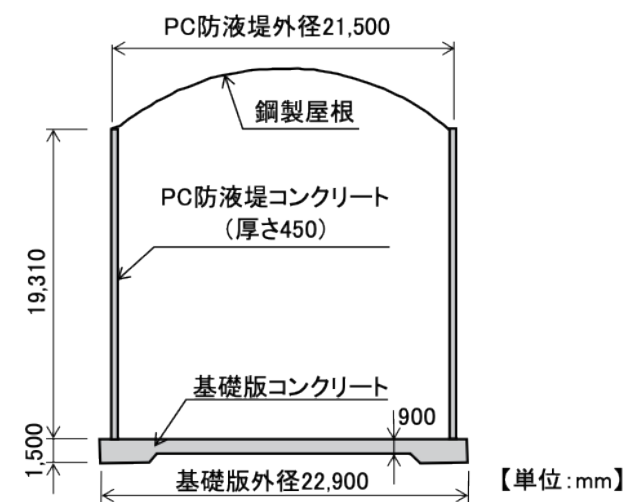


図2 地上式LNGタンクの概要図

本工事のコンクリート施工では、PC防液堤コンクリートの液密性確保のための温度ひび割れの防止と、大半のコンクリート施工が暑中期になることによる暑中コンクリート対策が課題であった。

本稿では、基礎版およびPC防液堤のコンクリート施工で実施した温度ひび割れ防止対策と暑中コンクリート対策、ならびにコンクリート施工の概要について報告する。

2. 温度ひび割れの防止対策

2-1. 温度ひび割れ対策の概要

本工事の地上式LNGタンクは、実際にLNGを貯留する金属二重殻貯槽(内槽)とその外周に構築するPC防液堤から構成されている。PC防液堤は、万が一、内槽からLNGが漏洩した際に外部への流出を防止する役割を果たす部材である。このため、高い液密性が必要であり、本工事の設計図書でも、ひび割れ指数1.85以上(コンクリート標準示方書・設計編における「ひび割れを防止したい場合」のひび割れ指数)が要求されている。そこで、本工事では、以下の対策を講じた。

① 材料・配合に関する対策

沖縄県内での材料供給の容易さを踏まえ、セメントにはフライアッシュセメントB種を用いた。そして、フライアッシュの長期的な強度増進効果を見込んで管理材齢は



写真1 1ロットの型枠組立とラス金網設置状況

56日に設定した。また、凍結融解作用を受けない地域であること、および単位セメント量をできるだけ低減する観点から空気量は2%とした。加えて、設計基準強度が40N/mm²と高く、上記の対策を講じてもひび割れ指数1.85を満足できない部位(PC防液堤1および2ロット)には膨張材を用いた。

② 基礎版コンクリートとPC防液堤コンクリート1ロットの同日打設

PC防液堤コンクリートの下端である1ロットは、基礎版コンクリートの外部拘束による影響を強く受けるため温度ひび割れが生じやすい個所である。上記の材料・配合面の対策を講じた条件で温度応力解析を行ったところ、1ロットでは温度ひび割れを防止できない結果が得られた。このため、1ロットは基礎版コンクリートと同日に打設することとした。

この場合、1ロットは浮き型枠となり、基礎版コンクリートとの接合個所に沈みひび割れが生じるリスクが懸念される。そこで、1ロットの施工高さを1.2mと低くして、型枠内でのコンクリートの充填状態が目視で容易に確認できる高さにするとともに、接合部にはラス金網を配置して、沈みひび割れの発生を防止することにした(写真1)。

2-2. 温度応力解析による検証

前節で示した対策を講じた条件で温度応力解析を行った。コンクリート配合は事前に試験練りを行い、所要のフレッシュコンクリート品質および圧縮強度が満足で

表1 温度応力解析結果

施工部位		施工高さ (m)	コンクリートの種類	設計基準強度 (N/mm ²)	セメント種類	施工日	単位量 (kg/m ³)		打込み温度 (℃)	温度解析結果			応力解析結果			照査結果 (≥ 1.85: OK)
							C	EX		最高温度 (℃)	材齢 (日)	引張応力 (N/mm ²)	材齢 (日)	最小ひび割れ指数		
PC 防液堤	6ロット	3.71	30-18-20FB	30	フライ アッシュ セメント B種	2月上旬	309	0	22.3	38.7	0.9	0.87	5.3	2.61	OK	
	5ロット	3.6				12月上旬			24.6	41.6	0.9	0.91	5.3	2.55	OK	
	4ロット	3.6				11月上旬			28.0	46.2	0.8	0.97	5.3	2.43	OK	
	3ロット	3.6				10月中旬			30.7	49.9	0.8	1.04	4.7	2.32	OK	
	2ロット	3.6	40-18-20FB(EX)			40	9月下旬	338	20	32.8	57.0	0.8	0.62	5.3	5.02	OK
	1ロット	1.2	40-12-20FB(EX)				8月中旬	338	20	34.1	59.7	0.8	0.69	2.0	3.98	OK
	基礎版		1.5 (外周部)			30-12-20FB	30	8月中旬	311	0	34.1	70.3	1.5	1.28	247	2.56

きる配合を選定し解析に用いた。なお、スランブは配筋条件や締固め作業高さを考慮し、基礎版およびPC防液堤1ロットは12cm、2ロット以降は18cmとした。また、圧縮強度の変動係数は10%(割増し係数1.2)とし、配合強度を設定した。

選定した配合について断熱温度上昇試験、各材齢での強度試験、自己収縮ひずみの測定等を行い、温度応力解析における入力値に用いた。また、打設日は施工スケジュールを踏まえて設定し、打込み温度は現場近郊の過去の日平均気温データに5℃加えた値とした。

解析結果を表1に示す。いずれの部位でも、目標とするひび割れ指数を満足できており、施工に伴う温度ひび割れの発生を防止できると推測された。

3. 暑中コンクリート対策

表1に示すように、本工事では、大半のコンクリート施工が打込み温度25℃以上となる暑中期に計画されていた。特に、基礎版コンクリートおよびPC防液堤1ロットは8月中旬、PC防液堤2ロットは9月下旬であり、場合によっては日中のコンクリート温度が35℃を超えることも想定された。暑中期ではコンクリートの流動性の低下が生じやすく、圧送時の閉塞、充填不良およびコールドジョイントの発生が懸念される。そこで、暑中期の施工では、新たに開発した特殊混和剤を生コン工場で製造する普通コンクリートに添加するだけで、流動性を長時間保持できる新しい暑中コンクリート「サンワーク®」¹⁾を適用した。

表2 使用材料

種類	記号	物理的性質など
セメント	C	フライアッシュセメントB種、密度2.98g/cm ³
混和材	EX	膨張材、密度3.16g/cm ³
細骨材	S1	海砂、表乾密度2.60g/cm ³ 、粗粒率2.30
	S2	石灰砕砂、表乾密度2.65g/cm ³ 、粗粒率2.90
粗骨材	G	石灰砕石2005、表乾密度2.70g/cm ³ 、実積率59.0%
混和剤	WR	AE減水剤 標準形(20℃実験)、遅延形(36℃実験)
	SP	高性能AE減水剤 標準形(20℃実験)、遅延形(36℃実験)
	AE	空気量調整剤
	HT	暑中コンクリート用の特殊混和剤

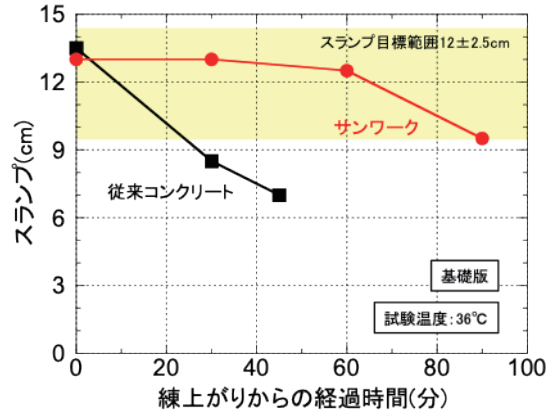


図3 スランブ経時変化(室内試験)

適用に際しては、事前に暑中環境下を模擬した室内試験および施工直前に実機試験を行い、効果を検証した。以下にそれぞれの概要を示す。

3-1. 室内試験

使用材料を表2、試験を行った配合を表3に示す。実際に施工に供した材料および配合である。なお、PC防液堤は2ロットに用いる配合を示している。室内温度は36℃とし、特殊混和剤の有無で試験した。比較のた

表3 コンクリート配合

No.	適用 部位	試験 温度 (℃)	コンク リート 種類	設計基 準強度 (N/mm ²)	目標 スラン プ (cm)	目標 空気 量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m3)					混和剤			試験結果			
									W	B		S		G	減水剤		AE剤 (B×%)	特殊 混和剤 (B×%)	スラン プ (cm)	空気 量 (%)
										C	EX	S1	S2		種類	添加量 (B×%)				
1	基礎版	20	従来コン	30	12	2.0	55.0	50.1	171	311	0	461	461	948	WR	1.0	0.005	－	12.0	2.1
2		36	従来コン															－	13.0	2.6
4		サンワーク	0.3															12.0	2.7	
5	PC 防液堤	20	従来コン	40	18	2.0	47.5	53.1	170	338	20	286	679	875	SP	0.5	0.015	－	19.5	1.8
6		36	従来コン															－	19.0	1.7
8		サンワーク	0.3															19.5	1.8	

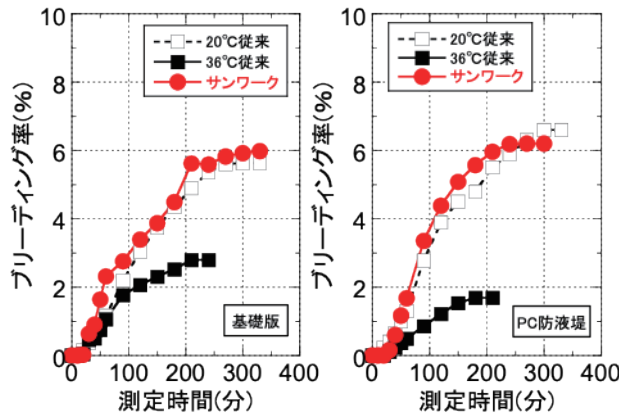


図4 ブリーディング(室内試験)

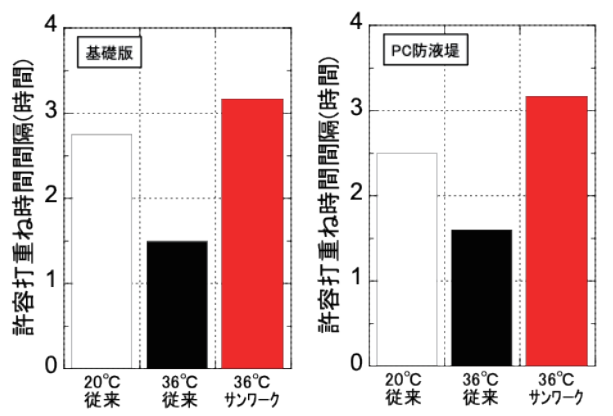


図5 許容打重ね時間間隔(室内試験)

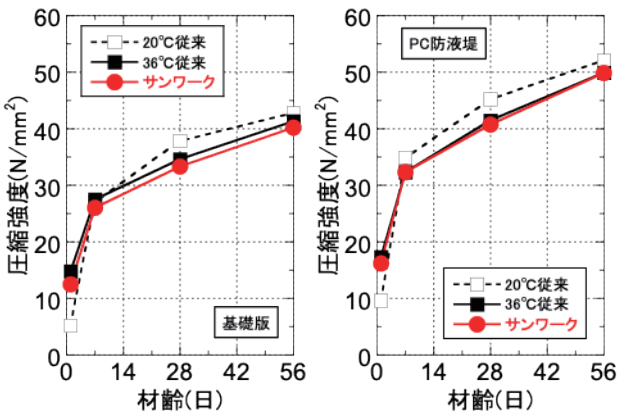


図6 圧縮強度(室内試験)

め、特殊混和剤を用いない場合（以下、従来コンクリートという）は20℃でも試験した。

図3に示すように、特殊混和剤を用いたサンワークは、36℃の高温下でも流動性を長時間保持できることを確認した。また、20℃環境における従来コンクリートと同様のブリーディング特性を有すること、許容打重ね時間間隔を確保できること、圧縮強度は同等であることを確認した(図4～6)。

3-2. 実機試験

基礎版コンクリートを対象に施工直前に実機試験を行った(写真2)。実機試験は7月下旬に行い、外気温は37℃、コンクリート温度は34℃であった。なお、特殊混和剤は生コン工場でのコンクリート製造時に他の材料と同時に添加した。

サンワークは、練上がりから150分間にわたり所要の流動性を保持できること、打重ね時間間隔を3時間以上確保できること等を確認した(図7,8)。また、暑中期



写真2 実機試験状況

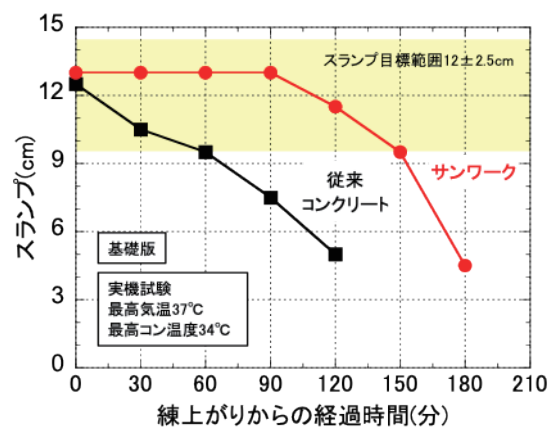


図7 スランプの経時変化(実機試験)

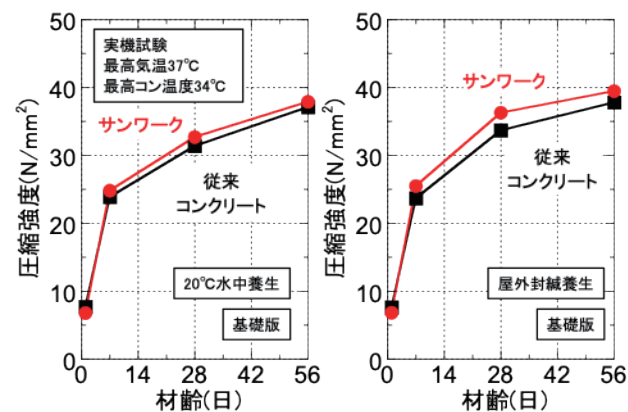


図9 圧縮強度(実機試験)

の屋外にて封緘養生した場合および20℃水中で養生した場合とも特殊混和剤の有無による圧縮強度の違いが生じないことも確認した(図9)。

これらの結果を踏まえると、サンワークを用いることで、暑中期の施工においても、流動性の低下に伴う初期欠陥の発生を防止できると推測された。

4. コンクリート施工の概要

4-1. 基礎版コンクリート

基礎版コンクリートの打設は8月中旬に行った。施工状況を写真3に示す。コンクリートの施工は、一班当たりの担当範囲を扇型の120°とした3班編成とし、中央から外周に向かって打ち込む方法とした。1班当たりに作業員6名、棒状パイプレータ3台を配置した。コンクリートポンプ車も3台配置した。また、仕上がり上面の均し作業専用の作業員も別途配置した。

コンクリートの1層当たりの打込み高さは、パイプレー

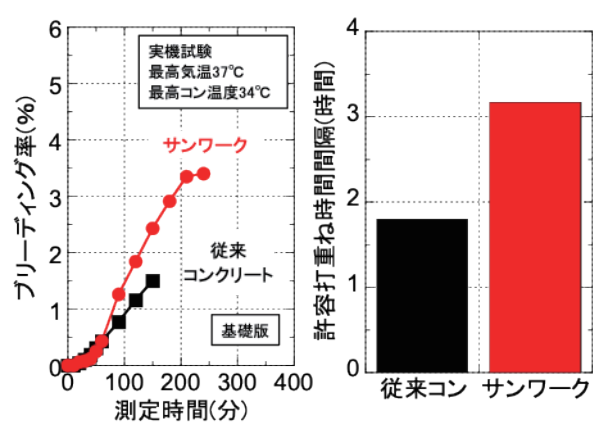


図8 ブリーディングと許容打重ね時間間隔(実機試験)

タにより十分に締固めが行え、また下層コンクリートと一体化できるように約50cmとし、中央部は2層、外周部は3層に分けて打ち込んだ。また、突発的なトラブルが生じて、許容打重ね時間間隔(約3時間)以内に打重ねできるように、打重ね時間間隔は最大2時間で計画した。施工時の日中の最高気温は35℃、荷卸し時のコンクリート温度は33℃であった。

施工時の品質試験結果を表4に示す。いずれの試験項目とも目標とする範囲を満足できており、安定した品質のコンクリートが供給できていた。また、施工に合わせて、打重ね時間間隔をなし(一体で製作)と3時間とした供試体を採取し、材齢56日で圧縮強度試験を行った。一体で製作した供試体の圧縮強度は35.5N/mm²、3時間で打重ねを行った供試体も35.5N/mm²であり、3時間以内に打ち重ねることで一体化したコンクリート部材が構築できることを確認した。施工は特段のトラブルもなく順調に進捗し、約6時間で打込みを完了した。また、打重ね時間間隔の最大値は約2時間であった。

基礎版コンクリートの打設後に、続けてPC防液堤1ロットを打設した。先述のように、基礎版コンクリートとの接合個所に沈みひび割れが生じないようにラス金網を設置した。また、あらかじめ基礎版コンクリートは天端面まで打ち込み、締固めを行った後に1ロットを打設した。そして、パイプレータによる締固めを十分に行い、浮き型枠の下端からコンクリートが吹き上がるのを目視で確認した。その後、吹き上がった余分なコンクリートを取



写真3 基礎版コンクリートの施工状況

表4 荷卸し時の品質試験結果(基礎版)

試験項目	単位	目標値	試験結果		
			回数	平均値	標準偏差
スランプ	cm	12±2.5	11	12.5	0.6
空気量	%	2±1.5	11	2.5	0.2
圧縮強度(材齢56日)	N/mm ²	30以上	11	39.6	1.3

り除き、再度基礎版コンクリートの上面を仕上げた。

基礎版コンクリートおよび1ロットとの接合個所の脱型後の状況を写真4に示す。充填不良、コールドジョイントおよび沈みひび割れは認められず、良好な仕上がりであった。

4-2. PC防液堤コンクリート

2ロットの施工状況を写真5に示す。施工は9月下旬に行い、施工時の気温は33℃、荷卸し時のコンクリート温度は34℃であった。

コンクリートの打込みは、配管(150A)を防液堤の形状に合わせて円周状に配置し、片側端部にコンクリートポンプのブームを接続して打ち込む方法とした。配管には3m間隔でシャッターバルブと打込みホースを設け、順次打込み個所を移動させることで均等に打ち上がるよう



写真4 基礎版と1ロットの接合箇所の仕上がり

にした。1層当たりの打込み高さは約50cmとし、8層で打ち上げた。暑中環境であったが、サンワークの使用により、圧送時の閉塞等のトラブルを生じることなく、約7時間で打込みを完了した。脱型後に側面を確認したところ、充填不良やコールドジョイントは認められず、良好な仕上がりであった。

事前の温度応力解析により、最も温度ひび割れが生じる可能性が高い(ひび割れ指数が最も小さい)と推測された3ロット施工時に、部材中心部に温度計を埋設しコンクリート温度の推移を計測した。計測結果を事前の温度応力解析におけるコンクリート温度の解析値とともに図10に示す。コンクリート温度の計測値の推移は、事前の解析値とほぼ一致していた。また、



写真5 PC防液堤コンクリートの施工状況

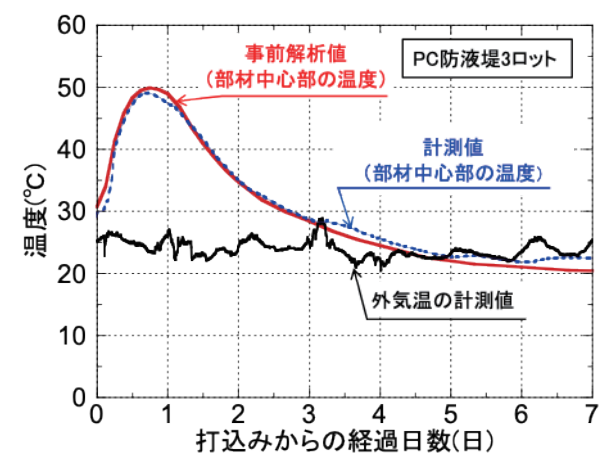


図10 部材中心部のコンクリート温度測定結果
[PC防液堤3ロット]

脱型後の側面を確認したところ温度ひび割れは認められなかった。

5. おわりに

本稿では、地上式LNGタンクのコンクリート施工で実施した温度ひび割れ防止対策と暑中コンクリート対策の概要を報告した。2022年2月時点でPC防液堤コンクリートの構築までを完了している(写真6)。引き続き、安全に留意しつつ、高品質な地上式LNGタンクが構築できるよう作業を進めていく所存である。本稿が類似工事の



写真6 地上式LNGタンクの構築状況

参考になれば幸いである。

最後に、本工事のコンクリートの配合選定および施工に際しては、生コン工場(琉球生コン、てだこ建材)、セメントメーカー(琉球セメント)および混和剤メーカー(竹本油脂)の方々に多大なるご協力をいただきました。記してお礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 桜井邦昭, 伊佐治優, 齊藤和秀, 大石卓哉/暑中期のコンクリート工事の施工性を改善できる新しい暑中コンクリート「サンワーク」の開発, セメント・コンクリート, No.892, pp.28~33, 2021.6

お知らせ

2022 年度コンクリート技士・コンクリート主任技士試験のご案内

- 日時・方法： 技士試験〔筆記試験(四肢択一式)〕
2022 年11 月27 日(日)午後1 時30 分～ 午後3 時30 分
主任技士試験〔筆記試験(四肢択一式および記述式)〕
2022 年11 月27 日(日)午後1 時30 分～ 午後4 時30 分
- 合 否 通 知： 2023 年1 月中旬(予定)
- 試 験 地： 札幌, 仙台, 東京, 名古屋, 大阪, 広島, 高松, 福岡, 沖縄
- 受 験 願 書： 1)販売期間：2022 年7 月1 日(金)～8 月22 日(月)消印有効
2)代金：技士・主任技士とも1 部1,000 円(消費税および送料込み)
3)提出期間：2022 年8 月1 日(月)～9 月2 日(金)厳守(消印有効)
※いずれも郵送のみでの受付け。別途受験料が必要です。
4)請求および提出先：東京都千代田区麹町1-7 相互半蔵門ビル12 F
(公社)日本コンクリート工学会「コンクリート技士試験担当」
詳細は日本コンクリート工学会ホームページの受験案内にてご確認ください。
<https://www.jci-net.or.jp/j/exam/gishi/index.html>

パンフレット・セメントの底力 セメントはわが国の防災インフラ整備を支えています

セメント協会は未曾有の被害をもたらした東日本大震災をはじめ、頻発するゲリラ豪雨や竜巻などの自然災害の脅威から、国民の命や生活を守るために必要な措置を施すことが何よりも重要な課題と捉え、防災インフラ整備の重要性を訴えるパンフレット(A4判・16ページ)を作成しました。様々な自然災害時に対し、強固な躯体を持つコンクリート構造物やセメント系固化材が果たした役割や有用性を、①豪雨・濁水に備えるセメント、②津波・高潮に備えるセメント、③土砂災害に備えるセメント、④災害復旧・復興を支えるセメントの項目にわけ、各種の事例を写真と図版でわかりやすく解説しています。このパンフレットにより人々の命や暮らしを守るセメント・コンクリートの力、これから必要となる公共事業についてご理解いただき、より一層安全への意識を高めるための一助としていただきたく作成しました。ご希望の方には無料でお届けいたします。申込みは部数と送付先を明記の上、下記までファクスでお申込み下さい。



一般社団法人セメント協会 広報部門 FAX 03-5540-6181

解説／日本建築学会 「溶融亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造 の設計・施工指針・同解説」の概要

An outline of AIJ Guide lines for design and construction of reinforced concrete buildings using hot-dipped galvanized rebars

兼松 学

1. 制定の経緯

2022年3月に、日本建築学会より「溶融亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針」¹⁾(以下、亜鉛めっき指針と略)が発刊された。本稿ではその制定の経緯と概要について紹介する。

本指針に先立つこと40年、日本建築学会は1979年に「亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造の設計施工指針(案)」(委員長：岸谷孝一)を発表している。当時は、河川砂の枯渇問題が顕在化する中で海砂の利用拡大が進んできており、塩分が含まれる細骨材への対策として溶融亜鉛めっき鉄筋(以下、亜鉛めっき鉄筋と称する)の利用が模索されていた。前後して竣工した三井金属鉱業の広島県竹原製煉所高煙突(1977年竣工、**写真1**)には、亜鉛めっき鉄筋がおおよそ300t使用されたが、学会メンバーも関わるなど、利用に前向きであった当時の雰囲気が伺える。間を置かず1980年代になると、懸念されていた海砂に起因する塩分問題が顕在化し、いわゆるコンクリートクライシスと呼ばれる社会問題にまで発展した。そのため、海砂の除塩が義務付けられ、さらにコンクリートの塩分総量規制が導入された。いわゆる内在塩分対策が



写真1 竹原製煉所高煙突(2017年撮影)

取られるに至り、事態は沈静化に向かう一方で、塩害問題は外来塩分問題へと収斂していった。そのような中で、1992年には沖縄海洋博公園内のマナティ館に亜鉛めっき鉄筋が採用されるなどしたが、依然として国内における建築物への適用は一部の地域に限定されていた。

2000年代に入り、脱炭素化社会および資源循環型社会の構築の動きが加速する中で、建築物の長寿命化の重要性はますます高まっており、中でも鉄筋コンクリートの物理的寿命(経年劣化によって構造安全性・使用性に支障を来す状態)を決定する鉄筋の腐食を

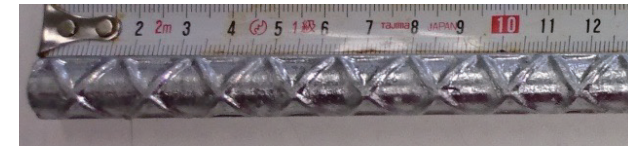


写真2 溶融亜鉛めっき鉄筋の例

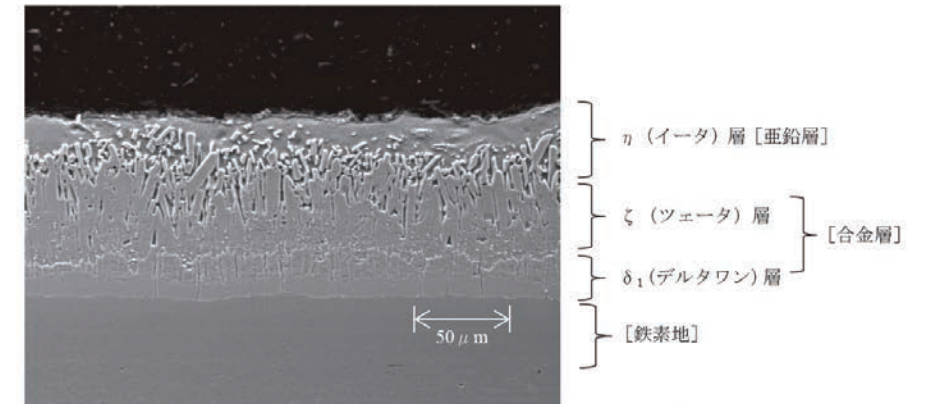


図1 亜鉛めっき皮膜の断面組織のSEM画像¹⁾

抑制するための一方策として、亜鉛めっき鉄筋の利用が期待されるようになってきた。

このような背景を受けて、日本建築学会では2016年から「亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造の設計施工指針(案)」の改定作業を開始し、2022年の発刊に至った。検討開始から発刊まで6年の月日を要したのはコロナ禍の影響もあるが、むしろ、当初から課題として挙げられていた、亜鉛めっき鉄筋の付着性能の評価と構造耐力への影響の把握、それらの知見に基づく構造設計法の構築、亜鉛めっき層の腐食速度予測を加味した耐久設計手法の構築、加工時・施工時に生じる欠陥の検査方法・補修方法の規定などの吟味に時間を要したためである。委員会メンバーを中心に、理論的・実験的な検討が行われ、十分な議論が尽くされたうえでの発刊となった。

2. 亜鉛めっき鉄筋について

溶融亜鉛めっき鉄筋(**写真2**)は、鉄筋の表面に純亜鉛層と合金層からなる亜鉛めっき皮膜を形成させた鉄筋のことで、一般に亜鉛めっき鉄筋あるいはめっき鉄筋などと称されている。亜鉛めっき加工には電気めっき法と溶融亜鉛めっき法があるが、亜鉛めっき鉄

筋に用いられるのは后者である。一般的な亜鉛めっき鉄筋の製造工程では、調達・受入した鉄筋に対して前処理・めっき工程が施され、検査・仕上を経て出荷されるが、その工程は、JIS H 8641:2021(溶融亜鉛めっき)およびJIS H 0401:2021(溶融亜鉛めっき試験方法)によって品質が確保されている。一方、亜鉛めっき鉄筋としての品質は、国際的にはISO 14657(Zinc-coated steel for reinforced concrete:2005)で標準化され、アメリカやオーストラリア、欧州各国などでもすでに規格化されているが、わが国のJISとしては未整備である。そのため、本指針では、亜鉛めっき鉄筋の品質確保に関する技術情報は十分に整備されているとしたうえで、加えて(一社)日本溶融亜鉛鍍金協会「亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造の設計施工マニュアル2016」の外観判定基準およびJIS H 8641:2021(溶融亜鉛めっき)箇条7.2(外観)を参考とした外観判定基準を規定しており、これらに従うことで十分かつ確実な品質確保を行うことが可能であるとしている。

亜鉛めっき鉄筋は、いうまでもなく鉄筋を腐食から護るいわゆる防食鉄筋に位置づけられ、塩害対策を中心とした耐久性向上を意図して用いられる。母材である鉄筋を護る亜鉛めっき皮膜は、**図1**に示すように純亜



かねまつ まなぶ / KANEMATSU Manabu
東京理科大学 理工学部 建築学科 教授 博士(工学)

表 1 亜鉛めっき指針の構成	
1 章	総則
2 章	設計
3 章	コンクリートの種類・品質・材料・調合および工事
4 章	鉄筋工事
5 章	品質管理・検査
付 1	JASS5M-801：2022 溶融亜鉛めっき鉄筋補修用高濃度亜鉛末塗料の品質基準
付 2	溶融亜鉛めっき鉄筋に係る規格の比較について
付 3	国内の溶融亜鉛めっき鉄筋の施工実績
付 4	海外における溶融亜鉛めっき鉄筋の使用事例
付 5	溶融亜鉛めっき鉄筋の鉄筋コンクリート造への応用に関する技術の現状

鉛層(η [イータ]層)と合金層(ζ [ツェータ]層, $\delta 1$ [デルタワン]層)から構成される。亜鉛めっき鉄筋の防食効果は、このち密な亜鉛めっき皮膜による劣化因子の遮断効果に加え、鉄筋が腐食環境に置かれたさいに母材の腐食に先立ち純亜鉛層が腐食する犠牲防食効果によると考えられている。そのため、亜鉛めっき皮膜厚さの確保が重要であることは言うまでもない。本指針では上述したJISなどに従った場合の一般値として77 μm から166 μm の厚さが示されている。

一方、亜鉛めっき鉄筋を用いる際の懸念のひとつとして、亜鉛は両性金属であるため、コンクリート中などアルカリ環境下においてめっき層が比較的早期に消失してしまう可能性があることが挙げられていた。しかしながら、これまでの研究では、硬化前のコンクリート内でこそアルカリ環境でOH⁻イオンと反応し、pH が高いほど反応速度が速くなるが、その減少量も約5～10 μm 程度にとどまることが明らかとなっている。また、硬化後はセメント中のCa²⁺イオンが亜鉛と反応し、H₂OおよびOH⁻との化合物としてCa(Zn(OH)₃)₂・2H₂O (Calcium HydroxyZincate：CaHZn)と呼ばれる不動態皮膜を形成し、反応速度は顕著に低下し安定する。加えて、冒頭で紹介した竹原製煉所大煙突の耐久性調査においても、40年にわたりアルカリ性が維持された環境下においても亜鉛めっき鉄筋は健全で、長期供用下において亜鉛めっき皮膜がアルカリ環境によって損傷を受けないことが確認されている。以上よ

表 2 亜鉛めっき鉄筋指針改定小委員会	
主査	野口貴文
幹事	鹿毛忠継，兼松学
委員	小野里憲一，親本俊憲，齊藤亮介，酒井正樹，陣内浩，仲松庸一郎，濱崎仁，福山智子，松下哲郎，向井智久，山田義智，渡会竹志
協力委員	村上慶弘，崔烘福，平川剛

り、アルカリ環境下における使用が実用上問題ないと判断した。

3. 亜鉛めっき指針の特徴

2022年版亜鉛めっき指針の構成を表1に、担当した「亜鉛めっき鉄筋指針」改定小委員会のメンバーを表2に示す。

亜鉛めっき指針の特徴のひとつは、1979年版の当初より指針の範疇に設計、特に構造設計が含まれていることで、日本建築学会の材料施工委員会が所掌する指針類の中では珍しい構成となっている。今回改定にも2章において「設計」が規定され、構造設計および耐久設計のふたつの設計法について定められている。これは、たかだか百数十 μm とはいえ、鉄筋表面に別組織を付着させた亜鉛めっき鉄筋について、付着特性などの力学特性が普通鉄筋と相違ないか疑われるのは当然のこととて、1979年版の亜鉛めっき指針のさいにもわざわざ設計の章を設けてその機械的性質の変わらないこと、許容応力度や許容付着応力度に差異はないことについて触れていた。今回改定においても、改めてその構造的な性能に及ぼす影響を確認し、耐久設計とならんで構造設計の項が定められている点が特徴である。

4. 亜鉛めっき指針の概略

本章では、亜鉛めっき指針の各章で重要と考える点について概説する。

4-1. 設計・施工上の留意事項

1章1.3では、亜鉛めっき鉄筋の設計・施工上の留

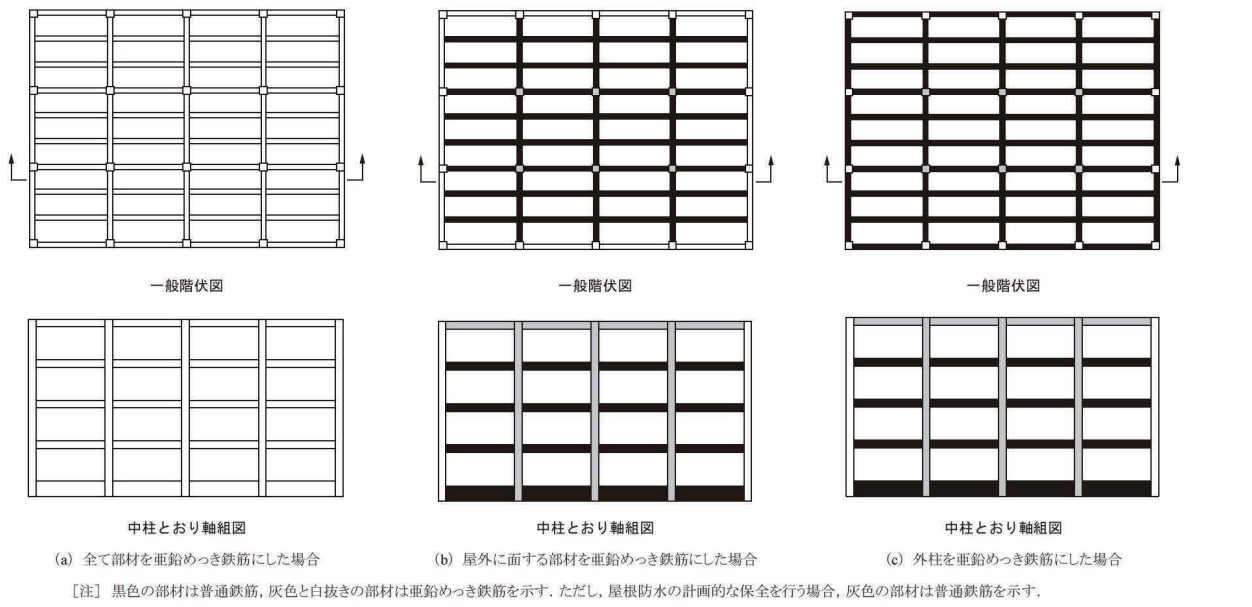


図2 亜鉛めっき鉄筋と普通鉄筋を用いる柱張り部材の配置計画の例¹⁾

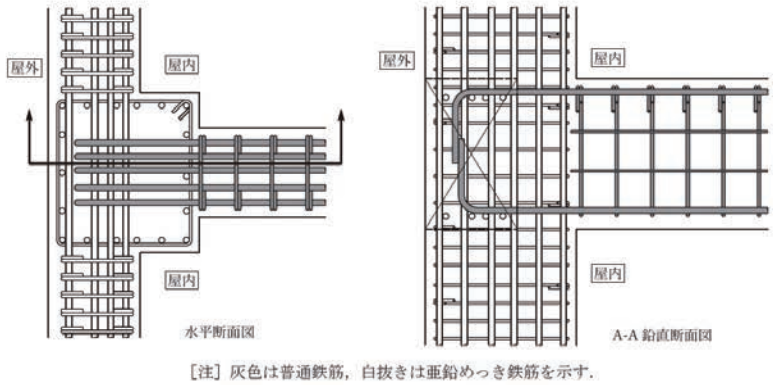


図3 図2(c)の側柱の配筋詳細図¹⁾

意事項について規定している。その中でも、制定の直前までに議論になったのが、異種金属との接触をどのように考えるかであった。異種金属と亜鉛めっき鉄筋が接触した場合、亜鉛めっきが先行して腐食し、思った性能が発揮できなくなることが懸念されるためである。そのため、本指針では異種金属との直接の接触は原則避けることを規定した。実際の鉄筋コンクリート造建築物では、例えば金属製の各種配管やボックス、埋め込み金具など、他の金属類が埋設される場合が想定されるため、上記原則に従いこれらとの接触の可能性のある部位には、絶縁または亜鉛めっき加工するとしている。

その一方で、建築物への亜鉛めっき鉄筋の適用を考えた場合、現実的には特に腐食環境の厳しい部位にの

み亜鉛めっき鉄筋を適用し、その他を普通鉄筋とする方法が合理的な場合が想定される。そのため、普通鉄筋との接触が想定される場合には、付着に影響を与えないことを前提に、絶縁するかまたは隙間をあけることとした。ただし、部材の接合部などで接触が避けられないような部位においても、部材表面から100mm以内に接触部位を設けないこととしている。具体的には、図2に示すような配置計画を想定したうえで、亜鉛めっき鉄筋を用いた部材は本指針に従って耐久設計する一方で、普通鉄筋を用いた部位や普通鉄筋と混用した部位には、従来の普通鉄筋を想定した耐久設計手法²⁾を適用することを規定している。さらに、具体的な配筋例を示すなどして、混用する際の留意事項を詳細に規定している(例えば図3)。

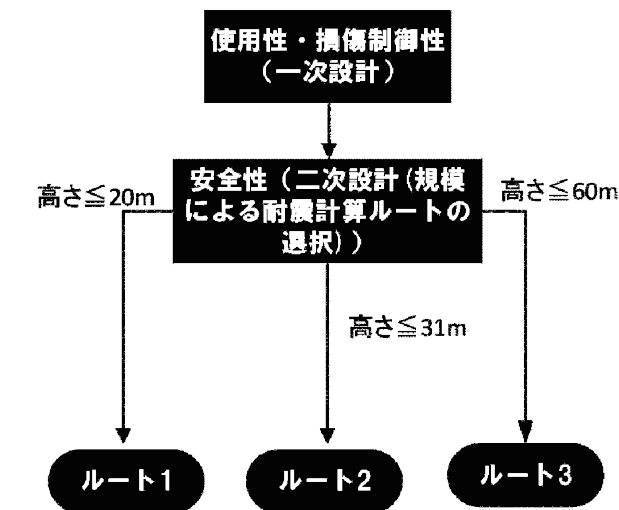


図4 鉄筋コンクリート造建築物の耐震設計に関する計算フロー¹⁾

4-2. 構造設計

2章2.2では、亜鉛めっき鉄筋を用いた場合の構造設計について規定している。

一般的な構造設計は、一次設計と二次設計にわけられる(図4)。一次設計は、全ての建築物に適用されるもので、建築物に常時作用する、および供用期間中に数回程度遭遇する可能性のある荷重・外力に対して、使用性、損傷制御を確保する目的で行われる。二次設計は主として大地震に対して安全性の確保を目的として建築物の規模に応じて適用するものであり、高さに応じて3つのルートが設けられている。なかでも亜鉛めっき鉄筋の利用は、ルート1・2が想定されており、主として壁量が多い中低層の鉄筋コンクリート造建築物を対象としていることから、鉛直部材の断面積に基づき耐震強度を検討し、所要の耐震性能を確保することが求められる。

本指針では「建築物の構造安全性確保のための検討において、原則として本会RC規準等を用いて確認する。大地震において構造部材の付着割裂のおそれがないことが明らかな場合を除き、通し配筋された溶融亜鉛めっき鉄筋を有する構造部材の付着割裂の検討は別途行うものとする。」としており、従来の普通鉄筋と同様に運用できることを示している。しかしながら、通し配筋された通常のRC造の柱や梁部材の付

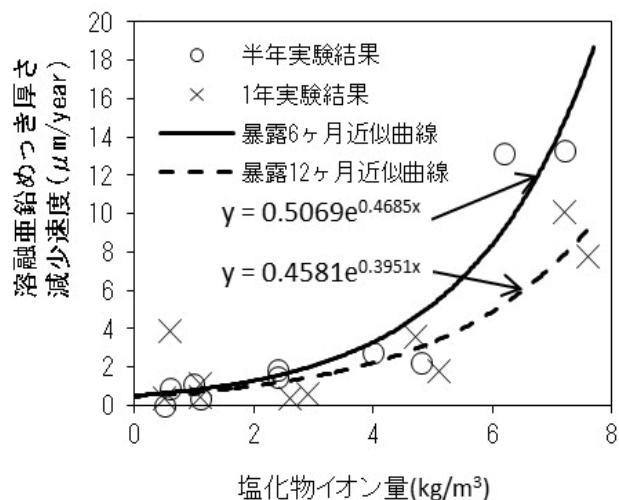


図5 亜鉛めっき厚さ減少速度と塩化物イオン量の関係¹⁾

着割裂の検討は、普通鉄筋ではせん断に対する終局強度の検討を行うことによって省略できるが、「溶融亜鉛めっき鉄筋を用いた構造部材においては、上記の検討を行ったとしても付着割裂の検討を省略できない実験結果が確認されている」として検討事例を紹介したうえで、コンクリートの圧縮強度を大きくする、2段配筋としつつ主筋径を小さくすることにより付着信頼強度を確保するといった対策が示されている。実際のコンクリート強度を想定した場合、前者はほぼ満たされていると考えられており、今後の実証的な検討を積み重ねることで技術情報の確度を高めていくことが望まれる。

4-3. 耐久設計

2章2.3では、耐久設計について規定している。ここでは一般環境および塩害環境の両者を扱っているが、その根底には、日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計・施工指針・同解説」²⁾の考え方が採用されている。一般環境下における耐用年数は、耐久設計基準強度を24N/mm²以上としたうえで、100年以上を標準とすると規定している。その一方で、塩害地域では65年以上を標準とし、対応する耐久設計基準強度を定めている。ここで、亜鉛めっき鉄筋の設計限界状態は、母材の腐食状態を基準に定義することとしている。すなわち、亜鉛めっき

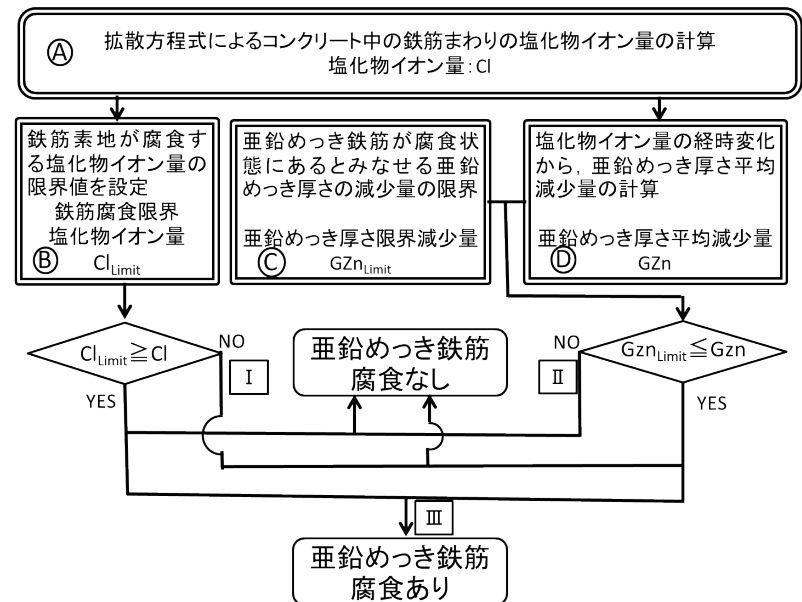


図6 亜鉛めっき厚さ減少速度と塩化物イオン量の関係¹⁾

表3 重塩害環境、塩害環境、準塩害環境の各環境下における設計かぶり厚さの最小値(単位：mm)

セメントの種類	耐久設計 基準強度 N/mm ²	重塩害環境下の 設計かぶり厚さの最小値	塩害環境下の 設計かぶり厚さの最小値	準塩害環境下の 設計かぶり厚さの最小値
普通ポルトランドセメント	39	70	60	40
	36	-	70	50
	33	-	-	50
	27	-	-	60
	24	-	-	70
高炉セメント B種担当	39	50	40	40(30)
	36	50	40	40(30)
	33	60	50	40
	27	70	60	40
	24	-	-	50
フライアッシュセメント B種相当	39	70	60	40
	36	-	60	50
	33	-	70	50
	27	-	-	60
	24	-	-	60

※()は非構造部材の設計かぶり厚さの最小値

皮膜が一定量酸化して消失し、普通鉄筋と同様にむき出しとなった母材が、全体の20%を超えて腐食状態に達した時点を設計限界状態とすることとしている点がポイントである。この亜鉛めっきの減耗程度の評価にあたっては、実環境下において実測された塩化物イオン量と亜鉛めっき鉄筋の腐食速度の関係(図5)を用いるとともに、実際の亜鉛めっき厚さのばらつきを考慮して、信頼性設計に基づき耐用年数を求めている。

図6に亜鉛めっき鉄筋の腐食予測方法のフローチャートを示す。

その結果、亜鉛めっき鉄筋を用いた建築物において、設計耐用年数が65年の場合の屋外側の腐食環境にある部位・部材の設計かぶり厚さを、重塩害環境、塩害環境、準塩害環境の環境区分に応じて、表3のとおりに定めている。これらは、日本建築学会のJASS 5などの標準仕様書などではフォローできなかった

た強度範囲とかぶり厚さの範囲であり、既存技術を補完する提案となっている。

4-4. 鉄筋工事および品質管理・検査

4章では鉄筋工事、5章では品質管理・検査を規定している。

いずれも、JASS 5によることを基本としており、亜鉛めっき鉄筋が普通鉄筋を用いたコンクリート工事と同様に運用できることを示している。ただし、鉄筋の加工や組み立て時には、鉄筋の径や曲げ半径などの加工条件により損傷が生じる場合があることが知られている。そのため、このようにやむを得ず生じてしまう損傷に対する補修方法として、高濃度亜鉛末塗料を用いた補修方法を規定した。ただし、高濃度亜鉛末塗料の品質については、JISなど既存の規定がないことから、改めて「JASS5M-801：2022 溶融亜鉛めっき鉄筋補修用高濃度亜鉛末塗料の品質基準」を学会規定として定め、付録として収録している。

5. まとめ

本稿では、日本建築学会の亜鉛めっき指針の制定の経緯と概要について紹介させていただいた。

40年ぶりの改定となったが、その内容は計画的・構造的な内容までを網羅するとともに、既存のJASS5や耐久設計の枠組みと調和した実務的な内容となっている。近年、低炭素化社会を見据えてさまざまなコンクリートが開発される中で、腐食に対する抵抗性を高めることのできる亜鉛めっき鉄筋が、実務範囲において選択肢に加わることは非常に意義深く、本指針がわが国の鉄筋コンクリート造建築物の一層の高耐久化に資することが期待される。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会／溶融亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造の設計・施工指針・同解説、2022.3
- 2) 日本建築学会／鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計・施工指針・同解説、2016.7

打設効率の向上(樫川ダム本体建設工事)(香川県河川砂防課、大成・飛島・村上特定建設工事共同企業体) 他13件

同 IIグループ

常磐自動車道4車線化事業の完成(東日本高速道路(株)東北支社、同仙台工事事務所、同いわき工事事務所、同いわき管理事務所)

復興道路・復興支援道路(東日本大震災からの復興のリーディングプロジェクト)(国土交通省東北地方整備局道路部、青森河川国道事務所、岩手河川国道事務所、三陸国道事務所、南三陸沿岸国道事務所、仙台河川国道事務所、福島河川国道事務所、磐城

国道事務所) 他10件

環境賞 Iグループ

現場打設型ジオポリマーコンクリートの開発((株)大林組、ポゾリスソリューション(株)、日本製鉄(株)) 他4件
同 IIグループ

石炭灰造粒物による沿岸域の水底質環境改善プロジェクト(中国電力(株)、中国高圧コンクリート工業(株)、広島大学) 他1件

論文賞

ハーフプレキャストRC構造の接合面における接合鉄筋のせん断力-ずれ変位関係(高橋良輔、島 弘、松岡智、土屋智史) 他7件

論文奨励賞

完全非破壊によるコンクリート内部鉄筋の腐食速度評価法の提案(金光俊徳) 他7件

吉田賞 研究業績部門

武若耕司／(一社)構造物診断技術研究会、鹿児島大学名誉教授「コンクリート構造物の耐久性評価ならびに維持管理システムの構築」

横田 弘／(一財)沿岸技術研究センター「港湾・海岸コンクリート構造物のライフサイクルマネジメントに関する研究」

同 論文部門

炭酸化したセメント系材料におけるCO₂固定量の評価手法および物性変化に関する研究(取違 剛、横関康祐、吉岡一郎、盛岡 実)

曲げひび割れが生じた鉄筋コンクリート内のアンカーの地震時履歴特性に関する実験的研究(永田聖二、松尾豊史、両角浩典、大友敬三)

屋外における環境作用がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する共通暴露試験と数値解析による検討(蓑輪圭祐、下村 匠、川端雄一郎、藤井隆史、富山 潤)

同 吉田研究奨励賞

横山勇氣／京都大学「水分浸透抵抗性に対する養生効果の持続性と炭酸化の進行の停滞現象の解明」

五十嵐 豪／東京大学「セメント系材料の再吸水時の

膨潤挙動に関する基礎的研究」

中山一秀／東京工業大学「電気化学的補修と表面保護工法の併用による鉄筋コンクリート構造物の補修効果の評価手法」

田中賞 業績部門

丸山久一／長岡技術科学大学名誉教授「コンクリート橋の耐震設計・耐震補強と新素材(FRP)による補強に関する研究」 他4件

同 論文部門

定着部付近におけるケーブル破断がPC箱桁橋の耐荷性能に及ぼす影響(吉田英二((国研)土木研究所)、大島義信((株)ナカノフドー建設)、石田雅博((国研)土木研究所)、山本貴士(京都大学)、服部篤史(京都大学)、高橋良和(京都大学)) 他2件

同 作品部門 改築

蓼野第二橋(下り線)の床版取替(企業者：西日本高速道路(株)、設計者：三井住友建設(株)、施工者：三井住友建設(株)、(株)日本ピーエス共同企業体) 他1件

同 技術

防水層にUFCを用いたプレキャストPC床版(UFC複合床版)(開発者：東日本高速道路(株)、(株)大林組
代表的な構造物：初適用 東北道宮城白石川橋上り線(宮城県・2020年)、適用事例数 東北道塩川橋下り線、大平橋下り線、斉川橋上下線など5例

技術開発賞

トンネル覆工コンクリート自動施工ロボットシステムの開発(山本将(清水建設(株))、谷村浩輔(清水建設(株))、久保田潤(西日本高速道路(株))、山中慎也(西日本高速道路(株))、大久保常秀(岐阜工業(株))、プレート定着型鉄筋を用いたプレキャスト床版接合構造(Head-bar ジョイント®)の開発(川口哲生(大成建設(株))、武田均(大成建設(株))、島崎利孝(大成建設(株))、高嶋光俊(大成建設(株))、趙唯堅(浙江大学)) 他5件

なお、授賞式は6月10日に開催された定時総会の席で行われた。

ペット 万歳！

宇野 洋志城

今から20年ほど前、私が岡山県苫田郡のダム現場へ赴任を機に淋しさを紛らわすために岡山市のペットショップでミシシッピーアカミガメ（縁日で売っている通称ミドリガメ）を買ったのがすべての始まりでした。自分の幼い頃は実家の犬と相性が悪く、ペットを飼う人の気持ちがわかりませんでしたが、岡山の奥地で気持ち良さに泳ぐカメを見て心安らいた瞬間、私のペット魂に火が付きまして。犬猫よりもヌルヌルツルツルした爬虫類や両生類が好きだった私にとって最高の癒しとなり、ダム現場から技術研究所に異動する時にはカメ2匹の他にポリプテルス（ドジョウもどき）2匹が仲間に加わりました。ポリプテルスは短命でしたが、カメは甲長20cmを余裕で超えて令和まで生き続けました。

その後、カメでは飽き足らず、メキシコサラマンダー（通称ウーパールーパー）、スッポンモドキ（別名ブタバナガメ）、チョウザメ（海のサメとは別系統）、レッドテールキャットフィッシュ（アマゾンのナマズ）と個体が大きくなり続けたのですが、水棲生物が巨大化すると当然のことながら水の汚れが激しく手入れも簡単に済まなくなりました。そんな時期にペットショップで出会ったの

がグリーンイグアナでした。最初のお目当てだったリクガメは動きがイマイチ、それに比べてグリーンイグアナが好印象だったので、即決でわが家にグリーンイグアナがやって来たのです。南米エクアドル出身ということもあり、プロレス好きの家内と相談して強くて大きくなるように『アントニオ』と命名しました。初めは胡瓜と同じ長さで細さでしたが、どんどん大きくなって体重は5kg、体長は尻尾を含めて2m近くになりました。

ところで、皆さんはグリーンイグアナの絵を描けますか？コモドオオカゲやカメレオンと混同している方が多いようで、大概似ていません。外見の特徴は頭から尻尾にかけて生えているクレストと呼ばれるたてがみ状の鱗と顎下にあるデュラップと呼ばれる皮膚のたるみです。舌はヘビのようにチロチロと動く割れ舌ではなく、カメレオンのようにビョーンと伸びません。勘違いされている方が多いのですが、食事は完全草食で餌は小松菜、チンゲン菜、モロヘイヤなどの青物野菜が好物（冷凍ネズミやワームといった気持ち悪い生餌ではありません）です。鉄分の多いホウレン草は駄目ですが、キャベツやレタスも人が捨てる外側の部分を食べてくれます。

私のことを餌やり係と認識しているのか、私にしか餌を要求しないのが妙に嬉しかったです。

ところが、面白いことに庭のシロツメクサを貪り食うようになってからは餌代がかからない代わりに餌やり係の特権も失われてしまいました（残念!）。食事を終わると勝手にケージに戻る時もありましたので、本当に良い子でした。「癒しというのはコレかぁ」と家内に言って呆れられるのが常でした。唯一の欠点は、爪が鋭いことでした。私の身体に登り降りする際に爪が食い込み、興奮気味になる春先など少し暴れるので物凄い引っ掻き傷が絶えない時期もありました。ですが、そんな彼も2018年6月1日に永眠してしま

いました。15～20年生きると言われていましたが、残念ながら11年でお別れでした。カメから始まった水棲生物とのお別れにはなかったベトロスを初めて経験しました。

年齢を考えて、グリーンイグアナを飼うのは諦めましたが、心にポッカー開いた穴を埋めるには再びペットを飼うしかないと決めて次に選んだのがイモリでした。再び水棲生物に戻りましたが、個体が小さいので水替えが簡単に済んで助かります。予期せぬ産卵にも巡り合い、小さな卵から生まれた幼体に足が生え始め、徐々に鰓（エラ）がなくなって成体に変化する様子を観察



できました。最終的に成体まで成長したのは1匹だけでしたが、現在は単身赴任先でアカハライモリ3匹とシリケンイモリ2匹と同居しています。ちなみに、食いちぎられて前足が根元から無くなったイモリは骨から再生する!というビックリ能力を目の当たりにしました。人間もこれくらいの再生力が欲しいなぁと思う今日この頃です。

ペット万歳！

[うの よしき／
佐藤工業(株) 技術センター SOU 副センター長]

日本コンクリート工学会

「3D プリンティングによるコンクリート構造物構築に関する研究委員会」成果報告

Progress report, “Technical Committee on construction of concrete structures based on 3D printing technologies with cementitious materials” in Japan Concrete Institute

石田 哲也 木ノ村 幸士 石関 嘉一 小川 洋二 齋藤 賢 国枝 稔

1. はじめに

3D プリンティング技術を建設分野に応用し、コンクリート構造物の建設生産システムに革新をもたらす技術開発が海外で精力的に進められている。本技術は型枠不要で様々な形状を直接製作できることから、省力化や工期短縮等の生産性向上のみならず、構造最適化による設計の合理化や軽量化、多様なニーズに応える高付加価値な技術やサービスの提供に発展する可能性を秘めている。

海外ではRILEM、ACIなどの学会活動が活発で、研究開発も様々に進められており、すでに実構造物に適用した事例も多数見られるようになってきた。このような状況に対し、わが国の取組みは出遅れが懸念されてきた。そこで、建築、土木、材料分野の知見を統合し、効率的かつ体系的な技術発展と水平展開を図ることを目的に、2018年度に本研究委員会の前身となる「3Dプ

リンティングのコンクリート構造物への適用に関するFS委員会(委員長：丸屋剛)」が設置された¹⁾。1年間のFeasibility Studyの後、その成果を引き継ぐ形で本研究委員会が発足し、より発展的な活動を展開した。委員構成を表1に、活動概要を図1に示す²⁾。

各WG活動を中心として実用化の足掛かりとなる技術基盤の整備を進めるとともに、従来のコンクリート工学の枠にとらわれない新たな可能性を創造し、次世代コンクリート技術としての情報発信や動機付けを提供することを目的として、講演会やワークショップを開催するなどの試みを行ってきた。昨年11月には最終成果として研究委員会報告書³⁾を発刊し、オンラインによる報告会を開催した。報告会には約150名の参加があり、成果報告に加え、国内外の著名有識者による講演、最後に総括として参加者を交えた双方向の自由討議を行った。本稿では、本研究委員会の活動および成果概要を報告する。

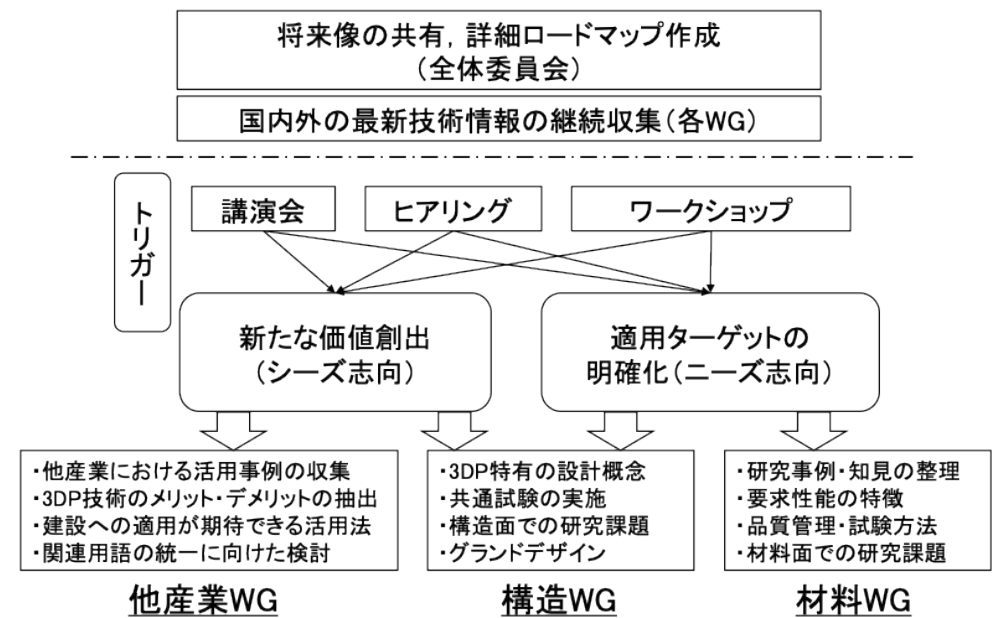


図1 活動概要(活動期間：2019.4～2021.6)

表1 委員構成

委員長	石田 哲也 (東京大学)	幹事長	木ノ村 幸士 (大成建設)
顧問	丸屋 剛 (大成建設)		
【他産業WG】 ○ WG幹事			
○ 石関 嘉一 (大林組)	兼松 学 (東京理科大学)		
寺本 篤史 (広島大学)	高林 弘樹 (アットロボティクス)		
絹村 剛士 (前田建設工業)	田原 和人 (デンカ)		
養宮 芳和 (ホゾリスソリューションズ)	田中 浩也 (慶応義塾大学)		
【材料WG】			
○ 小川 洋二 (太平洋セメント)	○ 齋藤 賢 (日本シーカ)		
古賀 裕久 (土木研究所)	寺西 浩司 (名城大学)		
桐山 宏和 (宇部興産)	小林 聖 (鹿島建設)		
【構造WG】			
○ 国枝 稔 (岐阜大学)	大野 元寛 (東京大学)		
小倉 大季 (清水建設)	田邊 裕介 (竹中工務店)		
東 大智 (會澤高圧コンクリート)	松沢 晃一 (建築研究所)		

2. 3D プリンティング技術の概要

Additive manufacturing(付加製造)は、材料を付加することで所定の形状を製造する方法であり、本研究委員会のテーマであるセメント系材料を用いた3Dプリンティング(以下、3DCP：3D Concrete Printing)はここに含まれる。以下に、建設用途で開発が進む付加製造について方式ごとに概要を示す。

2-1. 材料押出方式(Material extrusion)

材料を押出しながらノズル位置や速度を正確にデジタル制御し、一層ずつ積層を繰り返して造形する方式で、3DCPの大部分がこの方式を採用している。積層中や積層後に作用する上部自重に対し速やかに抵抗しなければならないが、層間がコールドジョイントとならないよう水和の進行を制御する必要がある。本方式は、比較的速い速度で自由な形状を作ることができ、工法的にも



いしだ てつや / ISHIDA Tetsuya
東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 教授 博士(工学)



きのむら こうじ / KINOMURA Koji
大成建設(株) 技術センター 博士(工学)



いしぜき よしかず / ISHIZEKI Yoshikazu
(株)大林組 技術本部技術研究所 博士(工学)



おがわ ようじ / OGAWA Yoji
太平洋セメント(株) 知的財産部 博士(工学)



さいとう かなめ / SAITO Kaname
日本シーカ(株) 技術研究所 博士(工学)



くにえだ みのる / KUNIEDA Minoru
岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 博士(工学)

オンサイトへ適用しやすい。一方で、積層と同時に鉄筋補強することは難しく、従来の鉄筋補強に代わる引張補強技術を組み合わせる必要がある。

2-2. 粉末床結合方式(Particle-bed binding)

薄層状にセメント系材料を敷き詰め上部から水もしくは結合剤を噴射(注入)し、選択的に固化させる方式、あるいは、薄層状に砂等の骨材を敷き詰めセメントペーストを注入する方式などがある。他の方式に比べ、解像度が高くより微細な造形が可能であること、また、未固結の粉末(対象物を製作する上で選択的に固化させない部分)が上層のサポート材の役割を果たすことで、中空形状や狭隘で複雑な形状を製作することができる。一方で、プリントに多大な時間を要すること、プリント後には未固結の粉体を取り除く手間が必要となることから、規模が大きくなるほど経済性の観点から不利となる。

2-3. 吹付方式(Material jetting)

ロボットアームの先端に吹付システムを搭載した3DCPの開発も進んでいる。利点としては、スピードが速く、様々な形状や用途に対応できること、また、加圧して吹き付けるため、材料押出方式の積層に比べ密度が高く、圧縮強度や曲げ強度が向上すること、積層方向と載荷方向の関係による曲げ強度の異方性が小さく実用的であることが挙げられる。一方で、品質を確保するには、吹付の移動速度、対象物との距離や角度、吹付流量等のプロセス管理に加え、材料のレオロジーコントロールを細かく適切に行う必要があり、これらの制御管理が非常に難しい。

3. 他産業における3Dプリンティングの活用と状況分析

3-1. 活用事例

他産業において、3Dプリンタの活用事例が拡大している。その範囲は多岐にわたり、使用材料も多種多様

である。そこで、本研究委員会では、以下の13の分野(1:自動車, 2:鉄鋼・硝子, 3:電力・エネルギー, 4:軍事, 5:造船, 6:通信・鉄道, 7:医療, 8:食品, 9:衣料・スポーツ, 10:農林水産, 11:航空機, 12:宇宙, 13:ホビー・アート)を対象に、3Dプリンティングの活用状況について文献調査を行った。ここでは誌面も限られるため、医療、および航空機分野について代表的な活用事例を示す。

(1) 医療

3Dプリンティングは、ごく少量の多品種製品を比較的低コストで造形できるため、個々の身体的特徴に考慮が必要な医療分野への活用に適している。現状、医療分野への適用事例は幾つかの階層に分類できる。

手術計画のための模型の製作は、すでに幅広く実施されている。X線CTやMRIなどの検査画像から3Dプリンティングにより臓器や血管・腫瘍の位置が正確な臓器モデルを作製し、手術計画の事前検討や医療従事者の手技の向上などに活用されている。

また、患者の身体に直接取り付けるという活用方法としては、義手・義足、インプラントなどがある。これらの製品には、高い成型性が求められると同時に強度や触感、重量などが重要な指標となる。

身体内に埋め込まれることを想定した用途としては、眼内レンズや人工骨、あるいは骨の自己再生を促す胚(はい)などがありこれらの一部も実用化されている。人工臓器についても開発が進められており、そのうち人工血管については移植の実施事例がある。

製薬の分野では、複数の医薬品有効成分を組み合わせた錠剤形態の医薬品をプリントする技術が実用化されている。これにより、複数の薬品を個々の患者に適した1つの錠剤にまとめることができ、複雑な処方管理の簡略化につながっている。

(2) 航空機

航空機分野では、3Dプリンタを用いて製造された部品が航空機に搭載されている事例が複数存在する。

例えば、その特徴的な事例として、新型航空機エンジンの燃料ノズルの開発が挙げられる。航空機に最も求

められる性能は燃費の良さであり、エンジンの燃料ノズルは低燃費を実現する鍵となる。従来、燃料ノズルは複数の金属部品を溶接やロウ付けして製造されるが、常に高温に曝され振動する過酷な環境下で高い耐久性を満たす設計を求めると、重量の増加や燃料効率の低下は避けられなかった。この課題に対し、複雑な形状でも一体造形できるレーザー式金属3Dプリンタを活用した。従来は20個だったパーツを一体として同一材料で構成することで、耐久性を大幅に向上した。また、溶着個所が大幅に減ることで、強度が従来の5倍となった。さらに、必要以上の強度や厚みを持つ部分を薄肉・軽量化し、燃料や空気流路を自由に変更することで燃料効率も大幅に向上した。結果、部品点数の大幅削減による3割の製造コストの削減、さらには軽量化と燃料効率向上によって1機あたり年間160万ドルの燃料費の削減を達成している。

一方、航空機業界で3Dプリンタの積層部品の適用が進んだ背景として、積層造形の品質保証に関する取り組みが挙げられる。製品の品質保証とは製品の機能保証であり、部品においては寸法精度、強度などの規格に落とし込まれている。航空機に関連する3Dプリンティング部品の製造や適用申請、許認可を積極的に後押しするため、積層造形材料(素材)の環境試験結果や設計諸元を満たすための造形プロセスがデータベース化されWeb上で公開されている。このような事業者および許認可機関での基盤データの共有や許認可プロセスの構築により、航空機における3Dプリンティング部品の実用化が進んでいる。

3-2. 3Dプリンティングの活用によるメリット・デメリットおよび活用法

3Dプリンティングの活用のメリットとして、例えば、自動車や鉄鋼、エネルギーなど使用する部品点数の多い産業では、金型製作の縮減や省略により、コスト削減や製造時間の短縮、生産性向上に寄与している。また、開発期間の削減や部品点数の減少などもあり在庫管理等も削減されている。航空機、宇宙、医療など多品種

で個々の製造点数が少ない産業では、部材を一体造形することで、接合部の破損リスクの低減や耐久性の向上、軽量化に寄与している。また、多品種少量生産に柔軟に対応できるその特徴から、コスト削減にも寄与している。

一方、デメリットとしては、初期投資や人材教育の必要性、またデータや実績が少ないことから、製造時の品質管理や検査手法、安全性や耐久性の検証が、実適用に向けた障壁になると考えられる。

3Dプリンティングを建設産業に適用する場合、従来金型を使用するプレキャストコンクリート等の工場生産される部材生産に適していると考えられ、中でも多品種少量生産において導入メリットが大きい。また通常の施工現場においても、工程短縮によるコスト削減が可能と考えられる。これまで構造物を構築する場合、一定のスキルをもった技術者が必要であったが、3DCPを活用することにより、製造・構築プロセスが民主化され、より多くの人材が建設産業に従事することが可能になると考えられる。

4. セメント系プリント材料に関する文献調査と知見の整理

4-1. 主な研究事例

3DCPに求められる特有の性能とそれに必要な材料、調配合、評価方法、基準等の情報を、既往の文献より収集・整理し、将来の設計指針の基礎資料にすべく取りまとめた。文献調査は、直近の10年を対象とし、キーワードは、「3D」、「Printing」で一次検索をかけ、さらに、「Mortar」、「Concrete」の条件で絞り込み、131件の文献を対象として調査した。

調査結果の詳細は報告書³⁾を参照いただきたいが、強度に関する文献が最も多く、次いで、3DCPに求められる特有な性能であるRheology、Extrusion、Buildabilityに関する文献が多い結果となった。一方で、耐久性や収縮、クリープに関する文献は、現状で

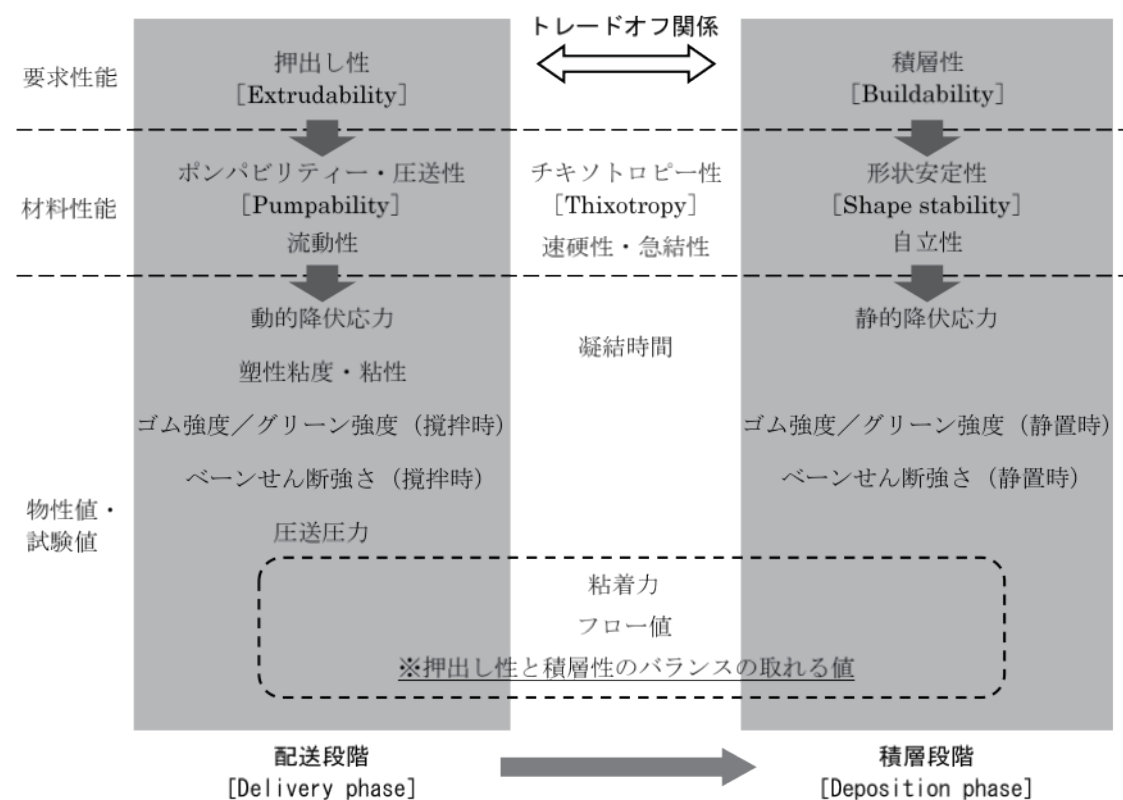


図2 押出式3Dプリンティング材料に要求されるフレッシュ性能

はごく少数に限られることがわかった。

4-2. 特定項目に関する知見の整理

(1) フレッシュ性状とBuildability

図2に、3DCP材料に要求される主要なフレッシュ性能を体系的に示す。3DCPの一般的な工程は、押出し方式の場合、ホッパー内に貯蔵されたプリンティング材料が輸送管内をノズルまで圧送される「配送段階 (Delivery phase)」と、ノズルから吐出されたプリンティング材料が造形物に積層される「積層段階 (Deposition phase)」の2つの段階から成る。配送段階で「押出し性 (Extrudability)」が要求される一方で、積層段階では積層された層の「積層性 (Buildability)」が要求される。また、これら2つの要求性能のうちの押出し性は、プリンティング材料の「ポンパビリティ (Pumpability)・圧送性」や「流動性」をプリンティングの各種条件に応じて適切に設定することにより確保される。一方で、積層性は、プリンティング材料の「形状安定性 (Shape stability)」や「自立性」に依存する。

押出し性と積層性は、原則としてトレードオフの関係にあり、両性能を材料レベルで両立させるためには、材料に高いチキソトロピー性を付与することが一つの手段となる。配送段階では、圧送に伴うせん断応力により凝集が解消されてモルタルが軟化した状態で管内流動し、積層段階では、せん断応力の消失により再び凝集して積層された層が自立するような性質を与える材料設計とすることが有効となる。

(2) 材料・調配合の特徴と、強度等の要求性能との関係

a) 強度に関する物性値

圧縮強度、曲げ強度および引張強度試験は、3DCPで作製された供試体と打込み作製された供試体とを比較することで、積層することが強度に及ぼす影響と、積層方向に対して載荷方向を変化させて強度の異方性を確認している。

圧縮強度は、配合や使用しているセメントおよび混和材 (剤) により異なり、25MPa～100MPa程度と様々である。曲げ強度および引張強度は例が少ないが、曲

げ強度は9MPa程度、引張強度は5MPa程度という報告がある。層間付着は打重ね時間に左右され、一般的に打重ね時間が長くなれば層間付着強度が低下する。層間付着を確保するために、層間にペーストを塗布する検討も行われている。

b) 材料・調配合と要求性能の関係

いずれの検討もジオポリマーを除けば類似する材料を使用しているが、粘性や自立性の付与方法は、増粘剤や繊維、早強性のセメントや早強剤と多岐にわたり、研究者がコンセプトに応じて選択している。また、使用するミキサやポンプ、3Dプリンタ、ノズル形状等が異なるため、装置に合わせた配合にする必要があり、使用する材料が類似する場合でも、配合が異なっていると考えられる。

なお、現状は強度に対する要求性能から配合が決まっているわけではなく、各自の3Dプリンタによってフレッシュ性状の要求性能が異なり、そこに合わせて配合が決められ、結果として強度が得られているという流れになっている。

(3) 品質管理・試験方法と評価基準の関係

3DCPに要求される品質や性能について、現時点で明確に規定されたものはほとんどない。

文献調査では、実験室レベルでのレオロジー試験からプリント時の積層体の品質を評価するものがほとんどであった。しかし、レオロジー試験を施工現場に適用することは困難であると考えられる。一方で、モルタルのフロー試験時におけるスランプ値を簡易的なPumpabilityやBuildabilityの指標として検討した例はあるが、材料の品質試験方法として確立されているとは言い難い。

これらを受けて、本研究委員会の報告書³⁾では、3Dプリンティングにおける品質管理の検査項目とその確認方法 (案) および、品質管理における課題について、表形式にまとめて提示している。

4-3. セメント系プリント材料に関する研究課題

積層前に関する研究課題としては、ノズルから押し出された積層材料が均質であるか、また性状が3DCP

に適しているかどうかを確認する試験方法や品質管理手法について、体系化する必要がある。ただし、3DCPに求められる要求性能は、装置や環境条件によっても大きく異なる可能性があると考えられることから、各構成材料、製作プロセス、環境条件等の各要因が物性に及ぼす影響について、データを蓄積していくことが重要である。

一方、積層後に関する研究課題としては、強度異方性や異方性を考慮した設計手法、収縮特性やクリープ特性のデータの蓄積、層間の強度や耐久性の検証などが挙げられる。

このように3DCP材料は開発段階であるのが現状であり、材料試験、品質管理、強度、耐久性のいずれにおいても、課題は山積している。

5. 構造設計に関する文献調査と概念検討

5-1. 主な研究事例

3DCPにより造形された構造体およびその設計方法について、既往の研究事例を取りまとめた。文献調査は、まず3D printing, additive manufacturing, concrete, cement, application, reviewというキーワードで検索し、約18,800編の検索結果から、引用数の多い論文を中心として17編のレビュー論文を選定して進めた。また、構造・設計・適用例に焦点を当てたレビュー論文や、他とは異なる着眼点をまとめた特徴的なレビュー論文も対象に含め、各レビュー論文の中で構造・設計・適用例に関して引用された個別の論文にも調査を広げた。なお、調査結果は、報告書³⁾を参照いただきたい。

5-2. 3DCPならではの設計概念・構造性能予測

(1) 設計概念

3DCPを採用した構造物を設計するにあたって、使用するプリンティングの方式に関わらず、Design for Additive Manufacturing (DfAM) は不可欠な存在といえる。DfAMは、3Dプリンティングのメリットを最大限

に活かすための、3Dプリンティングの特性に合わせた設計概念のことを指す。

例えば、構造計画で施工する構造物の形状を決め、それを3Dプリンティングする際は、積層造形できる形状かどうかの検討が必ず必要である。3DCPを使えば、自由な形状をなんでも作れるわけではなく、一筆書きやオーバーハング(張出し)角度という制約などを考慮して形を決めていき、積層造形に最適化された形を設計していく必要がある。すなわち、構造計画とDfAMを繰り返して、構造物・部材の形を決めていく必要がある。

また、3DCPで製作した構造物は、通常のコンクリート構造物と異なり、積層の界面(積層面)が存在し、この積層面の付着強度が母材より低下することがあるため、力学的異方性の考慮が必要となる。また積層面が十分に一体化していない場合は、耐久性にも影響を与える可能性もある。さらに、積層方向によって表面テクスチャが変化するため、意匠性に対しても影響を与える。よって、積層パスは安全性・耐久性の要求性能において、また意匠設計においても考慮すべき項目といえ、あらかじめこれらを踏まえて計画・設計を行う必要がある。

(2) 構造性能予測

3DCPを用いた構造物の性能照査は、通常のコンクリートと同様に、耐久性、安全性、使用性、および耐震性に対して限界状態を設定し、構造物あるいは構造部材が限界状態に至らないことを確認することは同様であるが、3DCPならではの特徴を考慮しなければならない部分も多い。

例えば、安全性における照査においては、積層パスや異方性に対して留意が必要である。積層面の特性が母材とは異なるため、同一形状でも積層パスが異なれば構造性能が変化する可能性があるためである。照査にあたっては、あらかじめ積層面の付着強度を測定し、異方性をモデルに組み込むなどの方法が考えられるが、具体的なモデル化の方法は今後の課題である。

複雑な形状、最適化を取り込んだ形状の構造部材の

場合、構造性能予測には3次元の数値解析手法(FEM解析など)の適用が前提になる。予測の高度化のためには、収縮やクリープ特性などのデータがあると良い。また、照査段階のモデル化においては、プリンティングの精度を考慮して、形状のばらつきをあらかじめ考慮することも重要である。なお、検査にあたっては、3Dスキャナ等を用いてプリンティング構造物・部材が設計図どおり製造できているかを調べ、形状初期不整を定量化することも重要である。形状誤差を含めたモデリングでFEM解析などを行えば、構造性能を事後評価することもできる。

5-3. 共通試験の概要

3DCPの普及を目指すにあたり、設計に用いる設計用値を材料側から設計へ引き渡す必要がある。3DCPで構築した部材の各種強度を測定する場合の、例えば、供試体の作製方法、コア抜き方法などについての考え方を整理するにあたっての共通試験を実施した。対象とする強度は、圧縮、曲げ、割裂引張および層間付着強度とし、積層した構造体からコア抜きした円柱供試体から求めた強度と、モールドに材料を打ち込んだ供試体の強度とを比較した。参加機関は9機関であった。以下に結果の概要を示す。

圧縮強度に関しては、プリント供試体とモールド供試体での強度差は比較的小さく、コア抜きの方向の影響がわずかに認められた。曲げ強度に関しては、モールド供試体に比べてプリント供試体の強度がやや低下する傾向にあり、特に積層方向と載荷方向の影響が出る場合があった。一方、短繊維を混和することにより射出時に繊維が1次元的に配向することで、プリント供試体の曲げ強度が向上する場合も認められた。割裂引張強度に関しては、プリント供試体とモールド供試体の強度差について一定の傾向は認められなかった。層間付着強度に関しては、割裂引張強度(モールド供試体)に比べて低下する結果が多く、特に短繊維を混和している配合の場合に、その低下率が大きくなった。なお、試験結果の詳細は、報告書³⁾を参照いただきたい。

表2 設計値・設計クライテリア

設計諸元	検討必要事項
剛性	ヤング係数、ポアソン比、ひび割れ後剛性
強度	圧縮強度、引張強度、せん断強度、付着強度、層間強度、ねじれ強度
耐久性	収縮量、クリープ、中性化、凍結融解性、水密性
耐火性	熱容量、線膨張係数
安全率	施工・品質のばらつき

5-4. 構造設計に関する研究課題

(1) 設計値・設計クライテリアに関する研究課題
構造物を設計するには、設計値・設計クライテリアを設定する必要がある、そのためのデータの充実が必要である。**表2**に課題の一例を示す。

特に積層方向によって、各項目がどのようになるかを把握し、異方性を設計的にどう取り扱うかに課題がある。また、3Dプリンティングによる施工に起因する品質のばらつきも従来のコンクリートの場合と異なると考えられ、設計に見込む安全余裕度についても、工学的な判断が必要になる。

(2) 3Dプリンティングによる構造物の構造上の特徴と研究課題

3Dプリンティングによる構造物には、その造形法により従来の構造物とは異なる特徴があり、その特徴に対応した設計的な研究課題がある。

表3に課題の一例を示す。3Dプリンティングによる構造物では、3Dプリンタを使って打ち込み型枠を製作し、内部にコンクリートを充填する工法がある。メーソンリーやハーフPCaなど従来の工法の延長と考えられる部分と、拡張して考える必要がある部分とがある。現状では、内部のコンクリートのみを構造体として要求を満たすように設計していることも多いと思われるが、将来的には複合材として合理的に評価、設計されることが望まれる。

現時点で補強材を設置することが難しいため、効果的な補強方法およびその評価法が課題として挙げられる。また複雑な形状や、最適化を取り入れた形状では、3次元FEM解析を積極的に取り入れた設計が

表3 3Dプリンタ構造物に特徴的な設計的課題

特徴	設計的検討項目
型枠打ち込み	組積造、ハーフPCa、等価剛性、一体性
複雑形状、最適化	FEM解析
補強	鉄筋、繊維補強、プレストレス
接合部	打ち継ぎ、部材接合
材料、配筋	法的取り扱い

必須となる。弾性領域でのFEM解析だけでなく、複合材料としての評価、非線形領域も考慮した設計法の高度化が望まれる。

3Dプリンティングにおいて一筆書きで作れない場所、硬化後の打ち継ぎ施工、造形した部材同士の接合など、接合部に関しても課題がある。

最後に、建築分野では建築基準法(建築指定材料、配筋の仕様規定)など、法的な取り扱いに関しても検討する必要がある。

6. 技術開発ロードマップの概要

前身であるFS委員会において、3DCPがもたらす未来像についてワークショップを開催し、社会ニーズの変化と本技術のポテンシャルに基づき、概略の技術開発ロードマップを作成した。それから2年が経過し、社会を取り巻く環境やニーズにも変化が見られ、急激なデジタル技術の進歩により新たに利用可能な技術も登場している。そこで、こうした新たな情勢やニーズ、技術を取り込んで、上述の概略ロードマップを改訂した。誌面の関係上、本稿では掲載を割愛するが、ロードマップでは、まず技術開発について、フェーズ1から4に分け、各技術開発フェーズで実施される開発内容について取りまとめた。次に、各技術開発フェーズが完了後、順次実施フェーズに移ると考え、各実施フェーズで施工される部材および構造物について取りまとめている。なお、詳細については、報告書³⁾を参照いただきたい。

さらに同報告書では、3DCPの実適用に向けて想定される障壁について4つの観点から考察を加えている。また、3DCPがもたらす未来の可能性と期待についても事例を交え紹介している。

7. さいごに

本研究委員会にて様々な検討や調査を進める中で、3DCPに関する研究の多くは、未だ手探り状態にあることを認識した。従来型の設計施工技術と比べて、大きな利点や可能性が指摘されているものの、現時点ではデファクトスタンダードとなり得る有望な技術や手法が絞り切れていない。逆に言えば、画期的かつ革新的な3Dプリンティング技術が、これから新たに生まれる可能性がある。

建設分野における3Dプリンティング技術の開発は、コンクリート工学の領域に留まらず、ロボティクスや情報技術など、他分野と連携が必要不可欠である。今後は、具体的なプロジェクトへの適用を通じた技術開発の推進や、スモールスタートやアジャイル開発といったように、まずはリスクを減らしつつ、試行錯誤を繰り返しながら、技術開発に果敢にチャレンジしていくことが求められる。また、これまでに無いものを生み出そうとする姿勢や、人をあっと驚かせる気持ち、さらに面白いも

のを実現しようとする遊び心を大事にすることも重要であろう。

3Dプリンティング技術を適用することによって、コンクリート構造物の作り方がどのように変わるのか、またどういったものが作れるようになるのかといった議論を重ねてきた。これらに加えて、今後、コンクリート構造物を誰が作るのか、あるいは誰が作れるようになるのか、という点についても、大きな変化が起こる可能性がある。誰もが気軽に投稿できるSNSや動画共有サイトを通じて、自分自身の考えや特技を広く発信し、世界から注目を集めることができるようになったように、3Dプリンティング技術によって、コンクリート工学に携わる専門家以外から、全く新しい概念が生み出されるようになるかもしれない。デジタル技術の進歩によって、このようなコンクリート工学の「民主化」が進む先を、チャンスと捉えるか、脅威と捉えるか、コンクリート工学にかかわる研究者や技術者が、真摯に考えるべきタイミングが来ているように思える。

【参考文献】

- 1) 丸屋剛／産官学によるオールジャパン体制を、セメント新聞社、月刊コンクリートテクノ、2019年8月号、Vol.38、No.8、pp.8～10
- 2) 石田哲也ら／3Dプリンティングによるコンクリート構造物構築に関する研究委員会、コンクリート工学年次論文集Vol.43、No.1、pp.17～26、2021年6月
- 3) 日本コンクリート工学会／3Dプリンティングによるコンクリート構造物構築に関する研究委員会報告書、2021年11月

大学名誉教授)の3名がそれぞれ受賞した。

また主な各賞受賞者および団体は以下の通り(順不同・敬称略)。

日本建築学会賞(論文)

高強度・高性能コンクリートの性能評価と品質管理方法に関する一連の研究(陣内 浩／東京工芸大学教授)
積雪寒冷地域における高断熱化が建築環境にもたらす影響に関する一連の研究(森 太郎／北海道大学教授) 他7件

同(作品)

太田市美術館・図書館(平田晃久／平田晃久建築設計事務所)
長野県立美術館(宮崎 浩／(株)プランツアソシエーツ代表) 他1件

奨励賞

平面骨組における鉄筋コンクリート造長柱の火災時挙動
鉄筋コンクリート造長柱の耐火性能に関する研究 その4(加藤雅樹／大成建設(株))
中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮したRC造建築物の耐久性評価に関する研究(その1)：高炉セメントB種を用いてかぶり厚さが異なる試験体における実験結果(酒井正樹／(株)大林組) 他13件

文化賞

建築陶器(タイル・テラコッタ)の収集展示による建築文化の向上と書籍出版による文化的価値の公知に関する功績(伊奈輝三／(株)LIXIL名誉顧問) 他1件
なお、大賞および各学会賞の贈呈式は5月31日にオンライン上で開催された通常総会後に行われた。

日本コンクリート工学会賞決まる

日本コンクリート工学会(二羽淳一郎会長)は、このほど2022年日本コンクリート工学会賞の各賞を発表した。主な受賞者は以下の通り(順不同・敬称略)。

論文賞

セメント系材料を用いた建設用3Dプリンティング技術の開発と適用実証(総合題目)(木ノ村幸士／大成建設(株))
Meso-Scale Modelling of the Mechanical Properties of Concrete Affected by Radiation-Induced Aggregate Expansion(篠野 宏／Ove Arup&Partners Japan Ltd 他5名)

MOSAIC：AnEffective FFT-based Numerical Method to Assess Aging Properties of Concrete (ChristaE.Torrence／Texas A&M University 他6名)
Structural Performance Evaluation and Monitoring of Reinforced Concrete Shear Walls Affectedby Alkali Silica Reactions(澤田祥平／鹿島建設(株) 他4名)
都市ごみ焼却灰を使用したジオポリマーコンクリートおよびその環境安全性に関する研究(総合題目)(李柱国／山口大学他2名)

技術賞

建設用3Dプリンティング技術の開発と実用化(総合題目)(小倉大季／清水建設(株) 他3名)
加圧履歴に基づいたコンクリートの圧送性の室内評価試験方法に関する研究(梁俊／大成建設(株) 他3名)

作品賞

早稲田大学本庄高等学院体育館、栃木県総合運動公園陸上競技場、リバーホールディングス両国、国立競技場、龍谷大学深草キャンパス成就館

功労賞

石川嘉崇、今本啓一、鍵本広之、掛川 勝、金久保利之、河野 進、河野政典、佐藤靖彦、瀬古繁喜、谷村 充、名倉健二、服部篤史、原田修輔、丸田 誠、盛岡 実、渡邊弘子

日本建築学会賞決まる

4月19日、日本建築学会(田辺新一会長)は、2022年日本建築学会賞の各賞を発表した。大賞には「建築物の長寿命化に資する建築防水技術の体系化、および建築防水に関わる研究・教育・産業領域への社会貢献」により田中亨二氏(東京工業大学名誉教授)、「全

国土の都市と農村の住宅供給を捉えるマルチ・ハウジング論研究にもとづく現代ハウジング論史の多角統合的編纂による学術的貢献」により住田昌二氏(大阪市立大学名誉教授、福山市立女子短期大学名誉教授)、「建築火災安全工学の体系化および研究・教育・国際化活動に関する一連の功績」により若松孝旺氏(東京理科

ICタグを埋設したモルタルスパーサ 「iコンスパーサ®」の概要と活用事例

Overview and Application Examples of "i-CON Spacer" Mortar Spacer with built-in RFID Tag

江里口 玲

1. はじめに

ICタグをコンクリートに活用する研究開発は、過去、トレーサビリティを目的に国土技術総合政策研究所や広島大学、宇都宮大学が実施した事例¹⁾があり、その他には、生コンクリートの製造時の材料計量値を記録したICタグを混合することで瑕疵保証を付加した生コンクリートを出荷する仕組み²⁾が試行されてきた。それらの検討において、ICタグの活用については一定のメリットは理解されつつも、実用技術の普及までには至っていない。

一方、最近ではi-Constructionの推進という背景もあり、建設分野に対するICT技術の積極活用やBIM／CIMといった取組みが盛んで、コンクリート分野にもデジタル技術の活用が積極的に求められている。ICタグにもその活路が改めて見直されており、土木学会のコンクリート標準示方書[維持管理編]や、高炉スラグ細骨材を用いたプレキャストコンクリート製品の設計・製造・施工指針(案)、プレキャストコンクリートを用いた構造物の構造計画・設計・製造・施工・維持管理指針(案)に情報記録媒体としての有効性に期待する記述がみられる。



えりぐち あきら / ERIGUCHI Akira
太平洋セメント(株) 中央研究所 研究開発推進部 部長



写真1 衣料品のタグに内蔵されているICタグ

本稿では、コンクリート構造物でICタグを簡便に利用できる、ICタグを内蔵したモルタルスパーサ「iコンスパーサ®」と、それをを用いた各種のアプリケーションについて概説する。

2. ICタグの汎用的な活用事例

ICタグはバーコードやQRコードと同じく個体識別技術として広く活用されており、一番身近な例としては電子マネーとしてのICカードの事例である。また、最近では写真1に示すように、ICタグを内蔵した商品タグが大手衣料品店の自動レジにも活用されており、将来的にはコンビニエンスストアの全商品にICタグをつける計画も提案されている。ICタグには電池を内蔵していないパッシブタイプと電池を内蔵しているアクティブタイプがあるが、電子マネーをはじめとして活用事例の多くはパッシブ型ICタグを採用している。



写真2 各種のリーダーライタ

表1 iコンスパーサに内蔵されているICタグの特性

	HF帯	UHF帯
通信周波数	13.56MHz	920MHz
通信規格	ISO15693	EPC Class1 Gen2
メモリ容量	110byte	64byte
動作温度	-25～85℃	-20～85℃

ICタグを活用するためには、電波の受発信を行うリーダーライタによりICタグとの通信を確保することとなる。リーダーライタは写真2に示すとおり、電子マネー用のカードリーダーやハンディタイプ、据え置きタイプ等、電波の受発信を行うアンテナの指向性や電波の出力レベル、防水・防塵等の耐環境性に合わせた仕様を選択できるように多種多様な種類が存在する。

さらに、ICタグとリーダーライタの通信を行う通信周波数もLF帯(135KHz以下)、HF帯(13.56MHz)、UHF帯(860MHz～960MHz)、マイクロ波帯(2.45GHz)が実用化されており、使用環境や求められる通信距離によって選定されている。

3. コンクリートへICタグを設置する方法と課題

ICタグをコンクリートに設置する事例では、表面に貼付する方法として、プレキャスト製品を対象として三井住友建設社がPATRACシステム³⁾という生産管理システムを運用している。

コンクリートに埋設するシステムとしては、先述したとおり、過去の検討事例が複数報告されている。いずれ

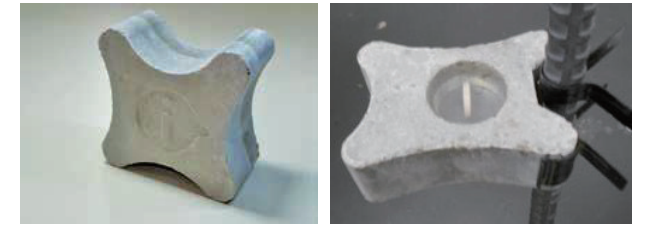


写真3 iコンスパーサの外観(左)ICタグの埋設状態(右)



写真4 iコンスパーサの破壊強度試験

表2 iコンスパーサの破壊強度

試験項目	市販スパーサ	ICタグ埋設スパーサ
縦方向破壊時荷重 (n=3平均)	10.2kN	10.9kN
横方向破壊時荷重 (n=2平均)スパン40mm	2.2kN	2.1kN

の手法も、いくつかの課題があり表面に貼付する方法では、コンクリート製品を運搬する際にICタグを破損させてしまうことや、屋外で風雨や直射日光にさらされることからICタグの耐久性が損なわれる懸念がある。

ICタグを埋設する場合においては、コイン状やシール状のICタグをどのように設置・固定するかに加え、内部に埋設することによるコンクリート構造物へ与える悪影響が懸念される。また、ICタグの設置方法によっては、内部鉄筋と近づくことでリーダーライタとの通信性能が低下することが懸念されている。

4. iコンスパーサの概要

iコンスパーサは、ICタグをコンクリートに埋設する方法の一つであり、コンクリート構造物の施工に広く利用されるモルタルスパーサにICタグを内蔵した製品である。表1に示すとおりHF帯とUHF帯2種類の通信周波数が用意されており、後述するアプリケーションの種類やシステム要件(リーダーライタと連携するPCのOS等)によって、種類を選択する。



図1 点検情報の記録画面



図2 コンクリート製品の情報登録画面

外観は写真3に示すとおり、モルタルスペーサの中心部にICタグを内蔵している。そのため、ICタグの埋設位置は鉄筋から一定の距離を保ち、鉄筋の影響による通信性能の低下を抑制できる。

また、写真4および表2に示すとおり、モルタルスペーサにICタグを内蔵して製造した時点で十分な強度と耐久性を確認していることから、ICタグを埋設することで懸念される構造物への影響もなく、安全に適用できる。

iコンスペーサ内部のICタグは通信用のアンテナを有しており、iコンスペーサ自体の方向が変化することで通信指向性が変化するため、専用のクリップで鉄筋に固定できる形状としている。

5. iコンスペーサの各種アプリケーション

5-1. コンクリート構造物点検結果記録システム

iコンスペーサ内部のICタグは、バーコードやQRコードと異なり書き換え可能な内部メモリを有する。内部メモリに記録する情報を取捨選択することによって、様々なアプリケーションを構築することが可能となる。その一例として、コンクリート構造物の近接目視結果を記録するアプリケーションを紹介する。

現在、重要構造物は5年に一回の近接目視点検が義務付けられている。近接目視点検の結果は、点検台帳や各種のデータベースに保存される運用がされているが、実際の構造物に記録が残るわけではない。ま



図3 iコンスペーサを活用したかぶり厚検査

た、実際に近接して点検を行ったか否かについても、構造物管理者が過去の点検記録と比較評価をしないと正しく確認することは出来ない。

図1に示すとおり、このアプリケーションは、構造物に埋設したiコンスペーサのメモリに点検項目である、ひび割れ、浮き、はく落、錆汁、鉄筋露出、エフロレッセンス、すりへり、ポップアウト、漏水の有無や程度を記録することができ、構造物自身に点検結果が保存される。さらに、点検結果をリーダーライタでiコンスペーサに書き込む際には、近接しなければならないため、実際に近接した証拠として取り扱うことが可能となり点検記録の履歴を永続的に保存できる。

2020年12月に大型カルバート等の点検調書の日付を改ざんして報告を行ったという事案⁴⁾が発生しているが、このアプリケーションを使うことで、そのような不正を確実に防止できる。

5-2. コンクリート製品製造・施工情報管理システム

工場で製造されるプレキャスト製品は、工場内で完成品となるため現場打ちコンクリートと比較して、材料や製造に関わる諸情報を管理しやすい。また、製品単位で品質管理が行われるため、品質情報の記録・管理が極めて重要である。

このアプリケーションは、プレキャスト製品に関わる各種の情報をiコンスペーサのメモリやiコンスペーサの個体識別IDに紐づけてクラウドサーバーで管理するアプリケーションである。

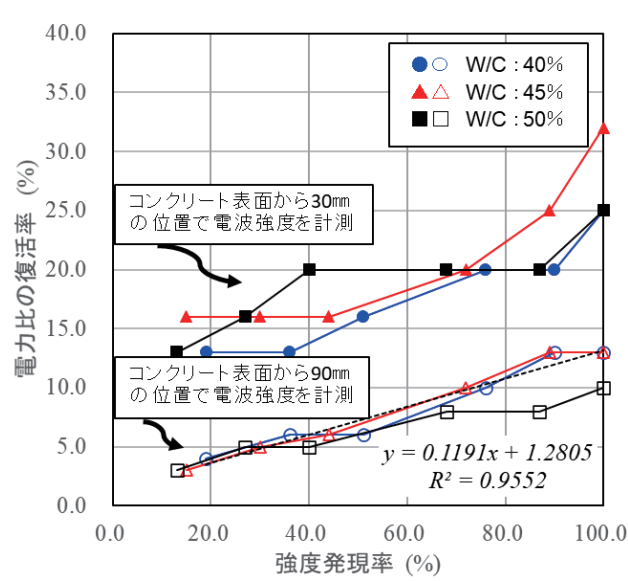


図4 コンクリート中に埋設したICタグの電力比の復活率とコンクリート強度発現率の関係

図2に示すとおりiコンスペーサのメモリには、コンクリートの品質情報や鉄筋、PC鋼線等の情報に加え、製品の検査情報、出荷、現場受け入れ日時等の物流に関わる情報まで網羅して保存できる。

また、個体識別IDや製造番号のように、iコンスペーサに記録されたユニークな情報とサーバーやクラウドに保存された情報を紐づけて連携させることで、写真やCADデータのような大容量データの参照が簡単に可能となる。リーダーライタと連携したタブレットPC等を入力端末として活用することで、製品の情報だけでなく、施工時の図面確認や、現場確認写真を連携して参照できることになる。このアプリケーションは大型プレストレス製品を中心に多くの現場で採用されており、製品単位や現場単位で記録する情報が異なるため、ユーザー自身が設定ファイルを変更することで、ある程度のカスタマイズが可能なシステムとしている。

6. ICタグの通信特性を活用したアプリケーションとその可能性

iコンスペーサは本稿で紹介したメモリを活用するアプリケーション以外にも無線通信の各種特性を利用したアプリケーションを提供している。

6-1. かぶり検査システム

ICタグのコンクリート内部における通信性能として、杉山らは、鉄筋との位置関係や、ICタグの向きや傾きにおける通信性能を詳しく解析している⁵⁾。この研究結果のとおり、ICタグはリーダーライタとの相対的な向きや位置によって通信性能が変化し、一定の指向性を持っている。

iコンスペーサは前述したとおり、通常のモルタルスペーサと同等の形状である。モルタルスペーサの設置目的は、型枠と鉄筋間のかぶり厚を適切に確保するために設置するものであり、その目的が適切に得られているかICタグの通信指向性を利用して確認するアプリケーション⁶⁾を提供している。

図3に示すとおり、型枠と鉄筋間に設置されたiコンスペーサは適切に設置されている状態で通信可能となり、傾いた状態では通信できない。これはiコンスペーサ内部に埋設するICタグの通信指向性を利用した機能で、iコンスペーサ自体が適切な設置状態であるか否か、すなわち、スペーサの設置目的であるかぶり厚が適切に確保されているか否かを確認できることとなる。

iコンスペーサは木製や樹脂製型枠であれば型枠表面からも通信が可能であり、型枠設置時～脱型時までの工程においてもかぶりの検査が可能となる。

また、検査した日時をICタグのメモリに記録することで、検査したことのエビデンスと結果を構造物自身に記録することとなり半永久的にトレーサビリティを実現できる。

6-2. 強度発現予測への活用

ICタグがリーダーライタへ送信する電波強度の変化を捉え、ICタグの位置を探索するソリューションが物流分野で提案されている。ICタグの電波強度が弱ければリーダーライタから遠くの場所にICタグが存在し、電波強度が強ければ、ICタグの場所が近くに位置するという仕組みである。

一方、電波強度が変化する要因には、物理的な距

離だけではなく、電波を障害する水分や金属がICタグに接近することも影響する。そこで、著者らはコンクリートの硬化発現に伴い変化する水分とICタグの発信する電波強度の変化の相関を捉え、コンクリートの強度発現を把握する手法を検討している⁷⁾。

図4は、ICタグを埋設したコンクリート供試体表面から一定の位置にリーダーライトを設置し、コンクリート打込み～28日材齢までの期間、ICタグの電波強度をリーダーライトで計測し、電波強度より算出した電力比の変化を示している。

コンクリートの28日強度を100とした際の、強度発現率と電力比の復活率は直線的に比例し、コンクリートの強度の発現とともに電力比が復活している。なお、電力比の復活率はコンクリート打込み前(空気中)の電波強度より算出した値を100としている。

この結果は、ICタグを埋設してリーダーライトにより電波強度の変化を把握することで、コンクリートの強度発現を把握できる可能性を示唆している。

7. おわりに

本稿で紹介した事例の各種システムを活用することで、プレキャスト製品の生産・品質情報や施工情報、維持管理に関わる情報を一元的に管理することが可能となる。また、ICタグの無線機能を活用することで、センサのような応用も期待できる。

国土交通省の進めるi-ConstructionではBIM／CIMの積極的な活用が推進されている、BIM／CIMの取組みにおいては、3Dで設計したCADデータを、PLATEAU(プラトー)⁸⁾といった国土交通省の主導する3D都市モデルのプラットフォームへ活用することで、サイバー空間上における都市計画立案の高度化や、シミュレーションへ応用する取組みが期待されている。一方、それらのデータ連携は、あくまでもサイバー空間における情報連携であり、フィジカル空間に実在する構造物と正確に照合する仕組みはない。サイバー空間のデータに高い信頼性を求めるのであれば、実際のフィ

ジカル空間とサイバー空間を紐づける仕組みは必須といえる。

iコンスペーサを実際の構造物に埋設して、iコンスペーサの個体識別IDやメモリ情報とBIM／CIMデータを連携できれば、サイバー空間とフィジカル空間を確実に紐づけることが可能となる。サイバー空間とフィジカル空間が正確に紐づけられることで、サイバー空間のデータが高い信頼性を確保し、更なるデータ活用の可能性が拡がると考えている。

iコンスペーサは、モルタルスペーサにICタグを内蔵した単純な製品ではあるが、今後のデータドリブン社会を支えるツールとして発展的な活用が期待できる。

【参考文献】

- 1) 国土技術政策総合研究所 住宅研究部住宅生産研究室ホームページ、ICタグを活用したコンクリートのトレーサビリティ確保に関する研究-ICタグを活用したコンクリート製造過程におけるトレーサビリティ確保技術に関する共同研究の成果概要表- <http://www.nilim.go.jp/lab/idg/>,
- 2) コンクシッドシステム(株)ホームページ <http://conquid-system.co.jp/>
- 3) 三井住友建設ニュースリリース、IoTを活用した次世代PCa生産管理システム「PATRAC」の開発に着手、
<https://www.smcon.co.jp/topics/2018/12181300/>, 2018
- 4) 四国地方整備局記者発表資料、
<https://www.skr.mlit.go.jp/send/shimei/R2/20201216.pdf>
- 5) 杉山央、藤本郷史、飯島玲／ICタグを活用したコンクリートのトレーサビリティ確保技術-鉄筋コンクリート床部材中に投入したICタグの通信可能確率-、日本建築学会構造系論文集、第82巻、第731号、pp.11～21、2017
- 6) 江里口玲、早野博幸、井坂幸俊／ICタグを埋設したスペーサを用いたかぶり厚検査システムの開発、第5回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム、pp.133～138、2015
- 7) 江里口玲、中西博、井坂幸俊／ICタグの受信電波強度を利用したコンクリート硬化状態の把握に関する基礎的検討、土木学会第76回年次学術講演会講演概要集、2021、
- 8) 国土交通省「プラトー」、<https://www.mlit.go.jp/plateau/>

*

*

*

英文パンフレット

“CEMENT IN JAPAN 2021”をお頒けします

セメント協会は海外向けにわが国セメント産業をダイジェストしたパンフレットを発行しました(A4版・16ページ)。需要と供給・分野別販売先・輸出と輸入・物流関連・建設投資状況・エネルギー・世界のセメント情報などを図表で紹介。海外の方に日本のセメント産業を理解いただくためのツールとしてご活用下さい。

ご希望の方には無料でお届けいたします。

申込みは部数と送付先を明記の上、下記までファクスでお申込み下さい。

(一社)セメント協会 広報部門 FAX 03-5540-6181

【主な内容】

1.JCA MEMBER COMPANIES 2.DEMAND AND SUPPLY 3.CEMENT SALES BY CUSTOMER 4.IMPORT AND EXPORT 5.CEMENT DELIVERY FLOW 6.CONSTRUCTION INVESTMENT 7.ENERGY CONSUMPTION, RAW MATERIALS 8.CEMENT PLANTS LOCATION

A4判・8ページ

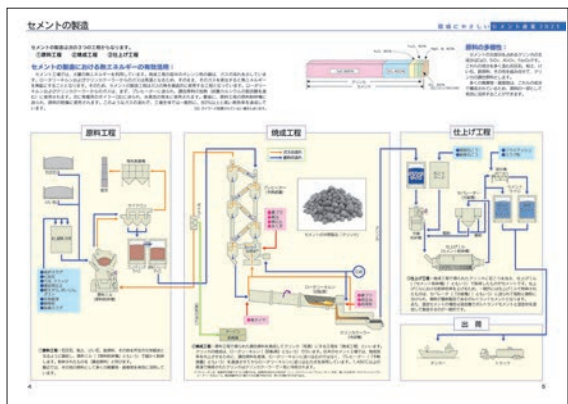
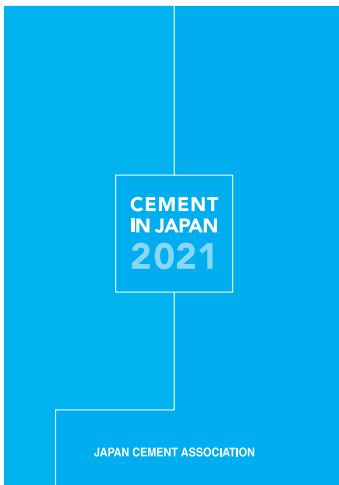
環境にやさしいセメント産業 2021

セメント協会では、わが国セメント産業のダイジェストを紹介したパンフレットを発行しています。このほど最新の2021年版を発行、図表を多用した分かりやすい内容です。

ご希望の方には無料でお届けいたします。申込みは部数と送付先を明記の上、下記までファクスでお申込み下さい。

(一社)セメント協会 広報部門 FAX 03-5540-6181

【主な内容】セメント産業の現状、セメントの製造、脱炭素社会を目指すセメント産業の長期ビジョン、カーボンニュートラル行動計画



放射線・原子力分野での活用 その1 放射線の遮蔽

Cement and Concrete, Essential Materials for
Utilization of Radiation and Nuclear Energy
Part 1: Concrete for Radiation Shielding
(by KURASHIGE Isao)

蔵重 勲

1. はじめに

コンクリートは、物量的・経済的に入手しやすい材料である上に、構造物の形状・寸法や各種性能の設計自由度が大きく、さらにその高い圧縮強度や耐久性から汎用的な建設材料として広範に普及している。原子力関連施設や放射光研究施設、あるいは医療施設などでも構造材料としてコンクリートが多く用いられるが、そこでは放射線に対する遮蔽性がコンクリートに要求される部材もある。また、原子力発電で発生する放射性廃棄物の処理等ではセメントを用いた固型化が行われ、放射性廃棄物の埋設処分では長期的な放射性核種の漏洩対策としてセメント系人工バリアが活用されるなど、これらの場合、一般的なコンクリート構造物・建物とは異なった目的の機能が要求される。

本稿シリーズでは、このような放射線に対する遮蔽性や放射性核種の漏洩等に対するバリア性能といった若干特殊なセメント・コンクリートの特性に視点を当て、その内容を概説する。まず、「その1」では、放射線遮蔽に用いられるコンクリートを対象に、放射線の基礎知識とコンクリートが活用される理由を解説する。次稿「その2」では、放射性廃棄物の処理・処分などに活用されるセメント系材料を取り上げ解説するととも

に、近年益々拡大・発展するセメント・コンクリート分野の知見・技術を活かした、関連分野へのさらなる貢献の可能性を展望する。

2. 放射性物質および放射線について

2-1. 放射性物質の種類と用途

原子力や放射線は、発電、産業、医療、研究など幅広い分野で利用され、その便益を我々は享受している。一方で、放射性物質(放射性核種を含み放射線を放出する物質)や放射線は、自然界にも広く存在するが、その量や程度によっては人や環境に対する潜在的风险と捉えられ、有害な影響から防護する安全対策を講じることが必要となる。

天然に存在する放射性核種の代表的なものとして、⁴⁰K(カリウム40、半減期約12.5億年)、⁸⁷Rb(ルビジウム87、半減期約492億年)、²³⁵U(ウラン235、半減期約7.04億年)、²³⁸U(ウラン238、半減期約44.7億年)などがあるが、これらは地球形成時から存在するものである。このうち、²³⁵Uは原子力発電の燃料として利用されるが、超新星爆発によって生成したものが放射性崩壊によって現在の同位体比(約0.7%、残りのほとんどは²³⁸U)まで減衰している。また、⁴⁰Kは、微量ではあるが(天然カリウム中の約0.012%)海水や土壌中に普遍的に存在しており、食品の摂取によって人体に取り込まれる代表的な放射性核種である。

一方、人工的に製造された放射性核種としては、⁶⁰Co(コバルト60、半減期約5.27年)、¹⁹²Ir(イリジウム192、同約73.8日)、^{99m}Tc(テクネチウム99m、同約6.01時間)、²⁵²Cf(カリホルニウム252、同約2.65年)などが科学研究目的や産業・医療用途として利用されている。また、原子力発電でのウラン燃焼により生成する放射性核種としては、¹³⁴Cs(セシウム134、半減期約2.06年)、¹³⁷Cs(セシウム137、同約30.1年)、¹³¹I(ヨウ素131、同約8.02日)、⁹⁰Sr(ストロンチウム90、同約28.8年)、²³⁹Pu(プルトニウム239、同約2.41万年)などが挙げられる。

表1 代表的な放射性崩壊のモードと放出される放射線の種類

崩壊のモード	崩壊現象の概要と放出される放射線の種類	放射性核種の例
アルファ崩壊	原子核から ⁴ He原子核(α 線)を放出し、原子番号と中性子数が2つ減る核種に変化する	²³⁵ U, ²³⁸ U, ²³⁹ Pu
ベータ崩壊	原子核中の中性子が陽子に変化し、電子(β 線)を放出し、原子番号が1つ増える核種に変化する	⁴⁰ K, ⁸⁷ Rb, ⁶⁰ Co, ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs, ¹³¹ I, ⁹⁰ Sr
自発核分裂	質量数が非常に大きな核種に見られ、自発的に原子核が分裂し中性子線を放出する	²⁵² Cf

2-2. 放射線の発生原理

放射性核種は、量子力学的に不安定な状態から放射線という形でエネルギーを放出し、より安定な核種に変化するという放射性崩壊を起こす。**表1**に代表的な放射性崩壊のモードと放出される放射線の種類を示す。例えば、²³⁸Uは、アルファ崩壊により⁴He原子核(α 線)を放出し、原子番号と中性子数がそれぞれ2つ減った²³⁴Th(トリウム234)に変化する。¹³⁷Csは、ベータ崩壊により原子核中の中性子が陽子に変化する過程で電子(β 線)を放出し、原子番号が1つ増えた^{137m}Ba(バリウム137m)に変化する。また、²⁵²Cfは約97%がアルファ崩壊を起こすが、3%程度の割合で自発核分裂し、一崩壊当たり約3.8個の中性子線を放出する。この他、アルファ崩壊やベータ崩壊などでは多くの場合、核種の変化は伴わないが、崩壊によって励起された原子核がより低いエネルギー準位に遷移する際に、原子核内から γ 線(電磁波の一種)を放出する(ガンマ崩壊)。

これに対しX線は、 γ 線と同じ電磁波であるが、原子核外の電子からエネルギーの一部が電磁波として放出される点で異なる。X線は、古くからレントゲン撮影や結晶構造解析などに利用されてきたが、近年では加速器によって得られた様々なエネルギー領域の高輝度X線を学術・産業研究に活用する例も増えている(わが国では、大型放射光施設SPring-8など)。また、X線は、 β 線の遮蔽においても制動放射によって二次的に発生する。

以上が、自然発生的に起こる放射性崩壊と放出される放射線の概要であるが(X線については人工的に発生させたものも含めて概説)、放射性崩壊を起こす性

質(能力)を表す尺度として放射能があり、その程度を1秒間に放射性崩壊を起こす原子核の数(単位Bq、ベクレル)として定義されている。

一方、人工的に核分裂反応を引き起こし、放射線を得る技術が20世紀に発明された。その大きなものが原子爆弾と原子力発電である。半減期が非常に長く自然発生的には崩壊しにくいが外部からの作用によって核分裂しやすい²³⁵Uや²³⁹Puの核種に熱中性子(運動エネルギーの低い中性子)を衝突させ、核分裂の際に放出される新たな中性子によって連鎖的に反応が進む現象機構を利用し、膨大なエネルギーの中性子線を得ようとするものである。

原子爆弾は連鎖反応を制御することなく爆発的なエネルギーを放出することを目的としたものであり、原子力発電ではこの連鎖反応を制御することで安定した中性子線を得て、これを熱エネルギー、電気エネルギーに変換している。他方、核兵器として水素爆弾も追って開発されたが、これは連鎖的な核融合反応を利用したものであり、この反応においても中性子線が放出される。さらに発展した中性子爆弾は、水素爆弾と同様な原理ではあるが、透過力が高く人体への即効性が高い中性子線の威力を高めた核兵器である。

この他にも、原子炉から取り出した中性子を利用した研究施設(わが国では、日本原子力研究開発機構JRR-3など)や、大型加速器で作り出した強力な陽子ビームを金属ベリリウムなどのターゲット物質に照射し、核破碎反応によって放出される中性子線を研究開発に利用するといった活用も広がっている(わが国では、大強度陽子加速器施設物質・生命科学実験

表2 放射線加重係数 W_R (ICRP 2007年勧告)	
放射線の種類	放射線加重係数 W_R
α 線	20
β 線, γ 線, X線	1
中性子線	2.5~21 エネルギー値の関数として 与えられ, 1MeVで最大値

施設J-PARC MLFや理化学研究所小型中性子源システムRANSなど）。

3. 放射線の遮蔽に活用されるコンクリート

3-1. 放射線の性質と被曝線量の評価

放射線とは、広義には紫外線、可視光線、赤外線、電波なども含められるが、一般には電離作用(放射線により物質中の電子を原子からたたき出す作用)を有する放射線を指す。前述した α 線、 β 線、中性子線は、それぞれ ^4He 原子核、電子、中性子の粒子線からなる電離放射線であり、 γ 線、X線は電磁波として放出される(間接的な作用も含めると)電離放射線の一種である。これらは、放射線の種類やそのエネルギーに応じて、人体への有意な影響が及ばないよう適切な防護対策が求められる。 α 線や中性子線は、他の放射線よりも著しく大きな電離作用を有し、DNA損傷等に対する影響が比較的高いと考えられている。具体的には、放射線の種類によって生物学的な影響が異なるため、国際放射線防護委員会(ICRP)が勧告する放射線加重係数 W_R (**表2**)を吸収線量 D (Gy, = J/kg)に乗じた式(1)により等価線量 H (Sv)に換算して放射線の影響を評価している。

$$H=W_R\cdot D \cdots\cdots\cdots(1)$$
さらに、放射線の影響が人体の組織・臓器により異なることから、同じくICRPから示されている組織加重係数 W_T (**表3**)をそれぞれ組織・臓器ごとの等価線量 H_T に乗じて総和をとる式(2)によって実効線量 E (Sv)に換算し、被曝線量を評価している。

$$E=\sum_T(W_T\cdot H_T) \cdots\cdots\cdots(2)$$

表3 組織加重係数 W_T (ICRP 2007年勧告)	
組織・臓器の種類	組織加重係数 W_T
赤色骨髓、肺、胃、乳房、結腸	0.12
生殖腺	0.08
膀胱、肝臓、食道、甲状腺	0.04
皮膚、骨表面、脳、唾液腺	0.01
残りの組織・臓器すべてに対し	0.12

このような被曝線量評価は、放射線に対する防護および管理の観点によるものであり、ICRPの2007年勧告¹⁾では、通常時の被曝線量限度として、一般の人で1mSv/年間、放射線作業従事者で100mSv/5年間(ただし1年間で50mSvを超えない)といった値が示されている。

3-2. 放射線の遮蔽

(1) α 線や β 線の遮蔽

前節で概説した放射線の被曝線量評価は、人間活動における被曝リスクの評価とその対策管理として大切ではあるが、体内に取り込まれる放射性物質を抑制するとともに(内部被曝リスクの低減)、人間活動に有意な影響が及ばないよう放射性を遮蔽するといった対策(外部被曝リスクの低減)を事前に講じることが肝要である。

表4のとおり、 α 線は、+2の電荷を帯びた ^4He 原子核の荷電粒子線であり、その強い電離作用から遮蔽物中の原子の持つクーロン場との相互作用から、紙一枚程度の物体で遮蔽できる。 β 線も、-1の電荷を持つ微小な電子の荷電粒子線であり、 α 線よりは透過性が高いがプラスチックや金属の板で比較的容易に遮蔽が可能である。ただ、 β 線の遮蔽では、前述のとおり二次的にX線が発生するため、X線の遮蔽に対しても留意が必要となる。

(2) γ 線やX線の遮蔽

電磁波である γ 線やX線は、原子中の“電子”との相互作用である①光電効果(電子が電磁波のエネルギーを吸収し、軌道を飛び出してしまう現象)、②コンプトン散乱(電磁波が電子による非弾性散乱によってエ

表4 放射線の分類と透過性の対比			
放射線の分類		主な放射線の種類	透過性の対比
粒子線	荷電粒子線 (直接電離放射線)	α 線 (^4He 原子核)	1枚の紙で止めることができる
		β 線 (電子)	1cmのプラスチック板やより薄い金属板で止めることができる
	非荷電粒子線 (間接電離放射線)	中性子線 (中性子)	水素を多く含む水やコンクリート、炭化水素系高分子、またはホウ素を含む化合物などで弱めることができる
電磁波 (間接電離放射線)		γ 線	厚い鉛や鉄の板などで効率的に弱めることができる
		X線	

ネルギーを失い弾き飛ばされる現象)、③電子対生成(原子核に入った電磁波が運動エネルギーを失うとともに電子と陽電子のペアを生成する現象)によって減衰する。それぞれ、電磁波のエネルギーがX線や低エネルギー γ 線といった低い場合(数100keV以下)では光電効果が、それよりも高いエネルギーの γ 線(1MeV程度)ではコンプトン散乱が、さらに高いエネルギー領域の γ 線(数MeV以上)では電子対生成が支配的な現象となる。

これらの相互作用による減衰効果は、物質の原子番号Zのそれぞれ順に4~5乗、1乗、2乗に比例することが明らかになっており、質量密度(≒電子密度)の高い材料が γ 線やX線の遮蔽に有効であることから、鉛(密度11.3g/cm³)や鉄(密度7.87g/cm³)のような高密度材料がよく用いられる。大規模な遮蔽体が必要とされる条件では、構造体としての性能や経済性等の観点からコンクリートがよく用いられ、重量骨材を用いて絶乾単位容積重量を3.5t/m³以上に高めた重量コンクリートの適用実績が古くから見られる^{例えば2,3)}。

実際の遮蔽計算では、非衝突によって透過する γ 線やX線の線量 I と入射線量 I_0 の比率(透過率)は、式(3)のように遮蔽体の厚さ t (cm) と線減衰係数 μ (cm⁻¹) の指数関数として表される(遮蔽計算の詳細は、文献4~6)などが参考となる)。

$$I/I_0=e^{-\mu t} \cdots\cdots\cdots(3)$$
各種遮蔽物質の線減衰係数 μ は、その密度 ρ (g/cm³) で除した質量減衰係数 μ/ρ (cm²/g) でデータが示されており、その値は入射する γ 線やX線のエネルギーが高いほど一般に小さくなる(減衰が弱くな

る)。この他にも、遮蔽物質との衝突(相互作用)により散乱された γ 線やX線も透過線量として評価する必要がある、入射エネルギーや遮蔽体厚さによって異なるその影響が見積もられたビルドアップ係数 B が遮蔽物質ごとに示されている。このビルドアップ係数 B を式(3)から計算される非散乱透過線量に乗じることで、非衝突によるもの、および散乱によるものを合算した透過線量を算出し、評価が行われる。

前述のとおり、 γ 線やX線の遮蔽では、遮蔽物質との相互作用により β 線(電子線)が二次的に発生することから、遮蔽対策ではその点にも注意が必要である。また、高エネルギーの γ 線が原子核に照射される場合では、光核反応により中性子や陽子などの核子が放出されることがあり、同様に留意が求められる。

(3) 中性子線の遮蔽

中性子線は、その名のとおり電荷を持たない微小な中性子の粒子線であるため、原子核周囲にある電子の影響をほとんど受けない。そのため、中性子線は、原子中の“原子核”との相互作用を利用して遮蔽されるが、原子内で原子核が占めるサイズは非常に小さく、金属等の高密度材料(質量数の大きい元素)を用いても遮蔽効果は大きくならない。したがって、**表4**で示したように、中性子線が透過性の最も強い放射線となっている。ただ、中性子と同程度の質量を持つような軽い原子核との相互作用によって効率的にそのエネルギーを減衰させることができる。このような理由から、中性子の遮蔽材として水や水合物を多く含むコンクリート、炭化水素系の化合物などがよく用いられている。

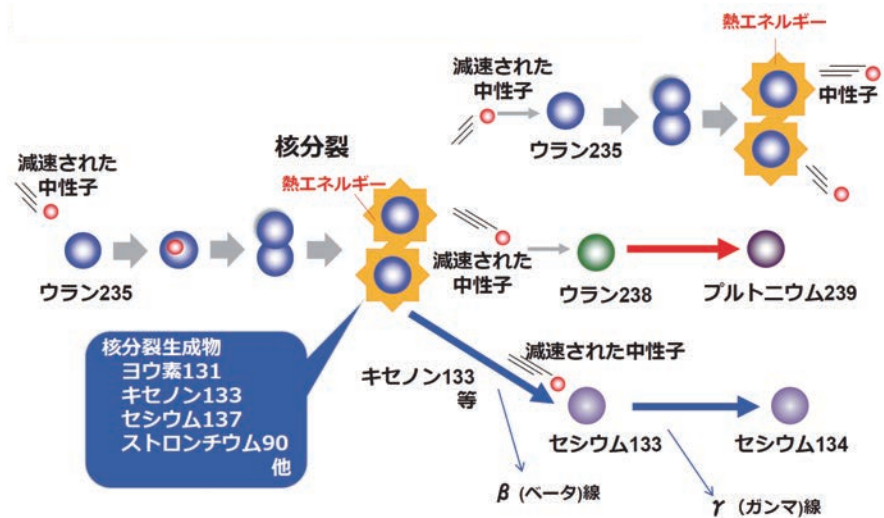


図1 軽水炉における核分裂反応と発生する放射線⁸⁾

厳密には、中性子線の遮蔽はかなり複雑な原理・現象に基づくため、前述の γ 線やX線の遮蔽よりもより複合的な対策が必要となる。中性子と原子核の相互作用には、中性子の散乱反応と吸収反応があり、さらにそれぞれ弾性散乱反応と非弾性散乱反応、ならびに中性子捕獲反応などに分類され、異なった原理で生じる。

弾性散乱反応は、衝突する中性子と標的となる原子核の運動エネルギーの和が保存され、原子核の種類を問わない散乱現象である。この時、衝突後の中性子の運動エネルギーが失われやすいのは、ビリヤードで突いたボールが同じ質量のボールと正面衝突すると停止するように、中性子と同程度の質量を有する軽い原子核との衝突になる（質量が大きな原子核との衝突では跳ね返りが大きい）。すなわち、質量数が最も小さな ^1H （水素1）を多く含む物質が、弾性散乱反応による中性子線（エネルギーの低い熱中性子まで）の減衰に有効な遮蔽材となる。このようなことから、原子炉の多くに軽水が中性子線の減速材として用いられている（炉心から熱を取り出す冷却材としての機能も兼ねている）。

ただし、弾性散乱反応は、中性子線のエネルギーが低いほど起こりやすい現象であり、原子炉中の核分裂反応などによって生じた高速中性子のエネルギーをまずある程度まで低減させることが求められる。その

際に係わるのが非弾性散乱であり、これは中性子と原子核の衝突において運動エネルギーの和が保存されず、エネルギーの一部が衝突された原子核の励起に消費され低減する現象であり、結果的として γ 線が放出される。非弾性散乱は、高いエネルギー領域の中性子線において質量数が大きな元素ほど起こりやすく、鉄などが遮蔽材としてよく用いられる。

散乱反応は、中性子線のエネルギーを効率的に減衰させることへの寄与は大きいが、中性子線を消滅させるまでの効果は期待できない。したがって、水などの減速材によってエネルギーを低減させた熱中性子を、さらに中性子捕獲反応によって吸収する対策が取られる。これは、中性子が原子核に捕獲される反応であるが、中性子線のエネルギーが低いほど起こりやすく、励起状態となった複合核が基底状態に戻る際に二次的な γ 線の放出を伴う。中性子捕獲反応はいずれの原子核においても起こり得るが、その反応性は大きく異なり、 ^{10}B （ホウ素10）が高い捕獲反応性がある元素としてよく用いられ、コンクリートを用いた中性子線の遮蔽ではホウ素化合物が混合される場合がある^{例えは7)}。

この他の吸収反応として核分裂反応があるが、これは ^{235}U や ^{239}Pu などの重い原子核に熱中性子が吸収され、核が二つに分裂するとともに大量のエネルギーと2、3個の中性子を放出する反応である。この

放出される中性子によって引き起こされる連鎖的な核分裂反応を利用したものが、原子力発電や原子爆弾である。

3-3. 遮蔽材として活用されるコンクリート

図1に概略を示すように、軽水炉における反応では、 ^{235}U に熱中性子が照射され核分裂によって生じた熱エネルギーを取り出して利用するが、その際に中性子線が放出されるとともにさまざまな核分裂生成物も発生し、それらの放射性崩壊によってさらに γ 線や β 線が放出される。

このような放射線の遮蔽では、ここまで概説したとおり、その透過性から特に γ 線や中性子線に対する評価と対策が重要となる。また、放射線の種類やエネルギーによって原子（原子核や電子）との相互作用が異なり、遮蔽に効果的な物質も共通しないなど複雑なメカニズムの理解も求められる。さらに、放射線の遮蔽においては、二次的に放射線が発生することから、遮蔽設計ではこれらを総合的に評価して対策を講じることが肝要である⁹⁾。

コンクリートは、 γ 線や中性子線に対して突出した遮蔽性能を有するわけではないが、中性子線の散乱反応による減衰に有効な軽水を多く含み、 γ 線やX線の減衰に効果的な鉄等の重い元素もある程度含有した材料である。さらに、中性子線の吸収に有効なホウ素化合物や、 γ 線等の減衰に有効な重量骨材などを混合するなどして、遮蔽性能を高めることが可能な複合材料である。このような理由から、放射線の遮蔽機能と構造安定機能を兼ね備えた構造体として、また、最も自由度が高く経済的な設計や施工が可能な材料として、コンクリートが多く活用されている。わが国初、世界でも4番目の原子力船「むつ」の遮蔽体に蛇紋岩使用コンクリートや重量コンクリートが用いられたことは有名である¹⁰⁾。船内空間が限られる中、重く厚いコンクリートが採用された事実は、放射線の遮蔽対策の重要性和コンクリートが有する遮蔽性能も含めた総合的なポテンシャルの高さを示している。

4. おわりに

本稿では、放射性物質や放射線の基本的性質に触れ、放射線遮蔽の必要性や被曝線量評価の考え方について解説した。また、放射線の種類ごとに、遮蔽において考慮すべき各種の現象を示し、遮蔽対策の概要を示した。原子力関連施設、放射性廃棄物処分施設、放射光研究施設、医療施設などにおける放射線遮蔽にコンクリートが活用されるようになって長いが、遮蔽体寸法の更なる縮小化とより経済的な設計・施工に向けた遮蔽性能の向上には技術開発の余地もあり、今後の研究発展が望まれる。近い将来には、月や火星における人間活動も想定される。その地に降り注ぐ宇宙線に対して、現地の素材を活用して構築される遮蔽・構造体の開発設計¹¹⁾にも、セメント・コンクリート分野の知見や技術が大いに活用されるものと期待される。

【くらしげ いさお／

（一財）電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部
主任研究員 博士(工学)】

【参考文献】

- 1) ICRP／ICRP Publication 103, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103> (2022年4月14日確認)
- 2) 佐治健治郎／放射線遮蔽用コンクリート骨材, セメント・コンクリート, No.129, pp.131～139, 1957
- 3) 鈴木武, 馬場隆雄, 阿部研一／超重量コンクリートを使用した放射線遮へい壁の施工, セメント・コンクリート, No.389, pp.38～45, 1979
- 4) 小佐古敏荘, 笹本宜雄編著／放射線遮蔽, オーム社, 2010
- 5) 日本原子力学会／放射線遮蔽ハンドブック-基礎編-, 2015
- 6) 日本原子力学会／放射線遮蔽ハンドブック-応用編-, 2020
- 7) 奥野功一, 川合将義, 山田人司／コンクリートと中性子の遮蔽-中性子遮蔽コンクリートの研究開発と展開-, セメント・コンクリート, No.759, pp.15～20, 2010
- 8) 環境省／放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料（令和2年度版）, p.30, 2020, <http://www.env.go.jp/chemi/rhm/r2kisosshiryo/r2kisosshiryoht-m1.html> (2022年4月14日確認)
- 9) 大石晃嗣／原子炉施設の遮蔽材料, コンクリート工学, Vol.31, No.11, pp.49～53, 1993
- 10) 長瀬哲夫, 中島忠夫, 奥村忠彦, 斉藤鉄夫／原子力船「むつ」の原子炉遮蔽用コンクリートの施工, セメント・コンクリート, No.436, pp.36～45, 1983
- 11) 畑中葉穂子／ルナコンクリートの実現に向けて, コンクリート工学, Vol.55, No.1, pp.111～116, 2017



ポリプロピレン(PP)繊維と鋼繊維を用いた超高性能コンクリート(UHPC)の高温状態における挙動の調査検討
Francesca Sciarretta, Stefano Fava, ほか
Construction and Building Materials
304. 論文NO, 124608(2021)

高強度コンクリートよりもさらに優れる力学的性能を有する超高性能コンクリート(UHPC)では、高温環境下で爆裂を引き起こしやすい問題がある。

本研究では、ポリプロピレン(PP)繊維と鋼繊維を併用したUHPCに対して高温履歴を与えて強度試験を行い、既往の研究とも比較する形で検討した。UHPCは、圧縮強度レベルが150・180N/mm²の2配合を用意した。PP繊維の使用量は体積に対して0.27%に固定した一方で、鋼繊維の使用量は0～1.92%の範囲とし、鋼繊維量の影響を検討した。試験体はマッフル炉内にて200℃で約6時間加熱し、圧縮強度試験を加熱前、200℃高温状態(炉取出し直後)および室温冷却後に行った。

高温状態の圧縮強度は、強度レベル150N/mm²では鋼繊維の有無に関わらず加熱前と同程度となった。これに対して強度レベル180N/mm²では、鋼繊維を使用しない場合には高温状態の強度は加熱前より低下する傾向を示した。また、冷却後の圧縮強度は、強度レベルによらず加熱前よりも向上し、加熱前と比較した強度増加率は鋼繊維量1.25%では18%増加、鋼繊維量1.92%では27%増加となった。

既往の研究では、400℃以上の高温環境下に

UHPCが晒されると加熱後の圧縮強度は低下するものの、PP繊維を2%程度と比較的多量に使用することで加熱による強度低下を抑制できることが報告されている。しかしながらPP繊維量が過大になるとそれによる圧縮強度の低下が懸念されるため、今後はPP繊維量が多い場合について検討する必要があると著者らは指摘している。

NO_x対策の基本
Tom Lowes, ほか
International Cement Review
[8]35～38(2021)

セメント工場におけるNO_x排出の低減方法として、選択的無触媒還元法(SNCR)の導入が挙げられるが、高コストであり、NH₃の排出量増加に繋がる可能性もある。一方、NO_xの発生やその再燃焼／多段燃焼の基礎知識を応用することで、より低コストにNO_x低減を図ることもできる。著者らは仮焼炉におけるNO_x低減として、キルンガスを高温域で再燃焼させる考えを提言しており、仮焼炉燃料を噴射後、キルンガスが原料によって冷却される前に1300℃まで昇温し、その後、三次空気との接触までの滞留時間を0.5秒以上維持することが必要であることを示している。しかし、使用する燃料や設備の制約によっては、この考えを適用するだけではNO_x規制を満たせない場合もあり、燃料噴射装置の設計や三次空気等の位置関係の最適化を加える事によってNO_x低減を図った事例もある。

LafargeHolcim社のBarroso工場は増産のための改造の一環で仮焼炉に独立した燃焼室を設けたことで、代替燃料の燃焼や上記のNO_x低減法の適用に制約があることが課題となっていた。そこで、TRIE社の開発した数値流体解析コード(TSF)を駆使し

て、代替燃料の投入箇所や再燃焼位置の最適化を行った結果、代替燃料による熱代替率が最大30%向上し、かつNO_x排出量が20%低減することを確認し、SNCRを利用しなくともNO_xの排出規制を満たすことを実証した。

低CO₂型合成鉱物質混和材
Sada Sahu, ほか
International Cement Review
[9]68～70(2021)

鉱物質混和材(SCMs)は普通ポルトランドセメント(OPC)の部分的な代替用途等でコンクリートに添加され、硬化特性の向上に寄与する。SCMsとしては主にフライアッシュや高炉スラグ、シリカフェームといった産業副産物が使用されているが、これら従来のSCMsは品質の安定性が保証されておらず、また石炭火力の減少などに伴って供給量が減少しつつある。そのため、安定した品質と従来SCMs同等の機能を有する代替品が必要とされている。

ソリディア社の開発した合成SCMsは、セメント工場からの排ガス等を利用し、自社で製造するソリディアセメントのスラリーとCO₂を直接反応させることで生成する。ソリディアセメントは従来のOPCの製造と比較してキルンでのCO₂排出量を30%削減できることが既の実証されており、さらに後続の炭酸固定過程を経て得られた合成SCMをコンクリートに適用することでCO₂排出量を大幅に削減できることが期待される。また、世界中のセメント工場において安定した品質で生産でき、従来のSCMsの供給不足を補填出来る可能性も有している。

ソリディア社では合成SCMの性能評価に取り組んでおり、OPCの20%を合成SCMで置換したモルタルについて強度発現性の指標である活性度指数を測定し、規格要求値を満たす結果を得ている。現在は性

能評価だけでなく、そのCO₂の削減範囲についても調査を進めている。

人工ニューラルネットワークを用いた超高性能コンクリートの強度予測モデル
Joaquín Abellán-García.
ACI Materials Journal
118[4]3～14(2021)

フライアッシュや高炉スラグなど、種々のセメント系材料を使用した超高性能コンクリート(UHPC)は、材料が多岐にわたり且つ材料同士の相互作用が不明瞭であるため、従来技術でその圧縮強度を予測することは困難である。人工ニューラルネットワーク(ANN)は、機械学習の一手法として多くの分野で活用されているが、UHPCに適用された例は少ない。そこで著者らは、種々のセメント系材料を使用したUHPCの28日圧縮強度を予測するANNモデルの構築を試みた。

解析には、UHPCの28日圧縮強度を含むデータセット927個から、外れ値(クックの距離などから判断)を除き正規化した797個のデータセットを用いた。その内、無作為に選択した597個のデータセットを学習データ、残りの200個のデータセットをモデルの妥当性を確認するためのテストデータとして用いた。尚、ANNの学習は弾性逆伝播学習法でK分割交差検証(K=10)のもと実施し、隠れ層は1層でノード数は7つとした。説明変数はUHPCに使用した材料の体積比(13種類)及びUHPCの特性(4種類)を使用した。解析の結果、学習データ及びテストデータに対する二乗平均平方根誤差(RMSE)は10.051及び8.924となり、過学習なく良好な精度で予測可能なANNモデルが構築された。また、シナプス荷重から、28日圧縮強度に最も影響を与える説明変数は充填密度を表す変数であると評価された。

生 産

(単位：千 t, %)					
種類	項目	22年		22年	
		2月	前年比	3月	前年比
ポルトランドセメント	普通	2,711	112.8	2,850	99.9
	早強・超早強	312	99.4	322	92.2
	中庸熱	71	108.3	92	130.6
	低熱	10	51.5	20	98.5
	耐硫酸塩	0	-	0	-
	その他	1	-	0	-
	小計	3,105	110.8	3,283	99.7
	その他のセメント	8	110.2	16	94.4
混合セメント	高炉	845	101.9	898	96.8
	シリカ	0	-	0	-
	フライアッシュ	2	47.2	4	92.7
	その他	108	83.8	124	110.1
	小計	955	99.3	1,026	98.2
計		4,068	107.9	4,325	99.3
輸出用クリンカ等		468	83.7	551	113.3
合計		4,536	104.8	4,876	100.7

販 売

(単位：千 t, %)						
地区	22年	22年			22年	
	2月	前年比	構成比	3月	前年比	構成比
北海道	89	92.5	3.0	96	86.0	2.9
東北	193	84.8	6.6	223	85.8	6.7
関東一	713	103.5	24.3	818	99.8	24.7
関東二	294	103.3	10.1	342	107.7	10.3
北陸	106	88.4	3.6	134	92.5	4.1
東海	353	94.1	12.1	384	95.2	11.6
近畿	430	94.3	14.7	477	91.2	14.4
四国	116	99.7	4.0	115	95.6	3.5
中国	183	97.3	6.2	218	102.8	6.6
九州	388	106.3	13.3	427	104.2	12.9
沖縄	63	98.8	2.2	74	99.6	2.2
計	2,928	98.2	100.0	3,309	97.4	100.0

※単位は千 t 以下四捨五入したため、かならずしも統計に合致しない

輸 出

(単位：千 t, %)			
地域・仕向地	項目	22年	22年
		2月	3月
アジア	韓国	38	67
	中国	35	142
	台湾	28	45
	香港	100	158
	フィリピン	50	152
	シンガポール	275	279
	小計	526	843
	大洋州	231	246
その他	中南米	170	50
	小計	401	296
	合計	927	1,139

需 給

項 目		生 産		販 売						期末在庫		輸 入		内 需		固化材 原料他
				国 内	前年比	輸 出	前年比	合 計	前年比		前年比					
会 計 年 度	2012	59,488	103.3	43,754	104.4	9,632	96.3	53,387	102.8	4,140	98.3	822	111.4	44,577	104.5	6,173
	2013	62,392	104.9	46,953	107.3	8,503	88.3	55,455	103.9	4,412	106.6	752	91.4	47,705	107.0	6,665
	2014	61,139	98.0	45,048	95.9	9,421	110.8	54,469	98.2	4,580	103.8	503	66.8	45,551	95.5	6,502
	2015	59,238	96.9	42,347	94.0	10,583	112.3	52,930	97.2	4,684	102.3	320	63.7	42,668	93.7	6,204
	2016	59,271	100.1	41,497	98.0	11,529	108.9	53,027	100.2	4,393	93.8	280	87.4	41,777	97.9	6,536
	2017	60,360	101.8	41,701	100.5	11,808	102.4	53,508	100.9	4,189	95.4	175	62.6	41,876	100.2	7,056
	2018	60,230	99.8	42,499	101.9	10,371	87.8	52,870	98.8	4,446	106.1	91	51.8	42,589	101.7	7,103
	2019	58,135	96.5	40,948	96.4	10,532	101.6	51,480	97.4	4,492	101.0	22	24.6	40,970	96.2	6,609
	2020	56,053	96.4	38,650	94.4	11,113	105.5	49,763	96.7	4,332	96.4	20	90.0	38,670	94.4	6,450
2021	55,741	99.4	37,872	98.0	11,484	103.3	49,356	99.2	4,347	100.3	10	52.0	37,882	98.0	6,371	
暦 年 度	2012	59,257	105.2	43,486	93.0	9,726	67.6	53,212	87.0	3,813	103.3	807	116.7	44,293	105.3	5,922
	2013	61,694	104.1	46,177	106.2	8,763	90.1	54,940	103.2	3,872	101.5	789	97.7	46,966	106.0	6,695
	2014	61,916	100.4	45,854	99.3	9,108	103.9	54,962	100.0	4,401	113.7	567	71.8	46,421	98.8	6,425
	2015	59,465	96.0	43,034	93.8	10,142	111.3	53,176	96.7	4,358	99.0	348	61.4	43,382	93.5	6,333
	2016	58,978	99.2	41,324	96.0	11,536	113.8	52,860	99.4	3,927	90.1	281	80.7	41,605	95.9	6,549
	2017	60,788	103.1	41,985	101.6	11,911	103.2	53,896	102.0	3,902	99.4	228	81.2	42,213	101.5	6,917
	2018	60,093	98.9	42,178	100.5	10,658	89.5	52,836	98.0	4,005	102.6	115	50.4	42,293	100.2	7,154
	2019	58,335	97.1	41,389	98.1	10,323	96.9	51,712	97.9	3,938	98.3	17	14.9	41,406	97.9	6,689
	2020	57,083	97.9	39,236	94.8	10,979	106.4	50,214	97.1	4,412	112.0	16	90.8	39,251	94.8	6,395
2021	55,580	97.4	38,019	96.9	11,460	104.4	49,479	98.5	4,086	92.6	20	131.1	38,039	96.9	6,426	
半 期	2019年度下	29,905	97.5	20,595	94.5	5,515	107.9	26,111	97.0	4,492	101.0	11	45.1	20,606	94.4	3,349
	2020年度上	27,095	96.0	19,045	93.6	5,259	104.8	24,304	95.8	4,131	102.1	5	45.5	19,051	93.6	3,152
		28,958	96.8	19,605	95.2	5,854	106.1	25,459	97.5	4,332	96.4	15	137.0	19,620	95.2	3,297
	2021年度上	27,343	100.9	18,690	98.1	5,705	108.5	24,395	100.4	4,117	99.7	5	100.4	18,696	98.1	3,162
	28,398	98.1	19,181	97.8	5,779	98.7	24,960	98.0	4,347	100.3	5	35.1	19,187	97.8	3,208	
四 半 期	2019年度Ⅳ	14,413	98.6	9,631	95.6	2,756	108.2	12,387	98.2	4,492	101.0	5	-	9,636	95.7	1,472
	2020年度Ⅰ	13,061	94.4	9,398	93.7	2,391	102.6	11,789	95.4	4,144	96.5	0	-	9,398	93.7	1,621
	Ⅱ	14,034	97.5	9,648	93.5	2,868	106.7	12,516	96.2	4,131	102.1	5	90.8	9,653	93.4	1,531
	Ⅲ	15,575	100.5	10,559	96.3	2,963	107.4	13,523	98.5	4,412	112.0	5	89.6	10,564	96.3	1,771
	Ⅳ	13,383	92.9	9,045	93.9	2,891	104.9	11,936	96.4	4,332	96.4	10	187.5	9,055	94.0	1,526
	2021年度Ⅰ	13,466	103.1	9,224	98.2	2,859	119.6	12,083	102.5	4,069	98.2	0	-	9,224	98.2	1,646
	Ⅱ	13,877	98.9	9,466	98.1	2,846	99.2	12,312	98.4	4,117	99.7	5	100.4	9,472	98.1	1,516
	Ⅲ	14,854	95.4	10,283	97.4	2,865	96.7	13,148	97.2	4,086	92.6	5	103.9	10,288	97.4	1,737
Ⅳ	13,544	101.2	8,899	98.4	2,914	100.8	11,813	99.0	4,347	100.3	0	-	8,899	98.3	1,471	
月 度	2020年3月	5,114	95.1	3,359	93.7	1,137	112.6	4,496	97.9	4,492	101.0	5	-	3,364	93.8	547
	4月	4,220	96.9	3,191	92.7	810	118.0	4,001	96.9	4,077	99.5	0	-	3,191	92.7	634
	5月	4,314	90.2	2,844	89.5	811	81.0	3,655	87.5	4,339	103.2	0	-	2,844	89.5	397
	6月	4,527	96.4	3,362	98.7	769	120.0	4,132	102.1	4,144	96.5	0	-	3,362	98.5	590
	7月	4,740	94.8	3,323	88.6	968	112.8	4,291	93.1	4,064	100.2	5	-	3,328	88.7	529
	8月	4,917	105.6	2,974	97.4	1,023	108.1	3,997	99.9	4,525	105.4	0	-	2,974	97.2	459
	9月	4,377	92.2	3,350	95.3	877	99.3	4,228	96.1	4,131	102.1	0	-	3,350	95.3	543
	10月	5,123	100.9	3,742	101.1	964	102.8	4,706	101.5	3,816	98.0	5	-	3,747	101.3	731
	11月	5,145	98.9	3,407	91.1	875	101.6	4,281	93.1	4,113	107.5	0	-	3,407	91.1	568
	12月	5,307	101.8	3,410	96.7	1,125	117.1	4,535	101.1	4,412	112.0	0	-	3,410	96.6	473
	2021年1月	4,213	92.8	2,666	90.4	937	116.6	3,604	96.0	4,605	106.0	4	-	2,670	90.5	416
	2月	4,330	91.0	2,981	89.7	922	113.1	3,904	94.4	4,505	101.9	0	-	2,981	89.7	525
	3月	4,840	94.6	3,398	101.1	1,031	90.7	4,428	98.5	4,332	96.4	6	110.5	3,403	101.2	585
	4月	4,266	101.1	3,171	99.4	753	92.9	3,924	98.1	4,182	102.6	0	-	3,171	99.4	493
	5月	4,806	111.4	2,746	96.6	1,229	151.5	3,976	108.8	4,515	104.1	0	-	2,746	96.6	496
	6月	4,394	97.1	3,306	98.3	877	114.0	4,183	101.2	4,069	98.2	0	-	3,306	98.3	657
	7月	4,568	96.4	3,305	99.5	852	88.0	4,157	96.9	4,016	98.8	0	-	3,305	99.3	464
	8月	4,529	92.1	2,811	94.5	1,000	97.8	3,812	95.4	4,388	97.0	0	-	2,811	94.5	345
	9月	4,780	109.2	3,350	100.0	994	113.3	4,343	102.7	4,117	99.7	5	-	3,355	100.1	708
	10月	5,101	99.6	3,488	93.2	1,077	111.8	4,565	97.0	4,044	106.0	0	-	3,488	93.1	610
	11月	4,660	90.6	3,447	101.2	802	91.6	4,249	99.2	3,840	93.4	0	-	3,447	101.2	615
	12月	5,093	96.0	3,348	98.2	986	87.7	4,334	95.6	4,086	92.6	5	-	3,353	98.3	513
	2022年1月	4,132	98.1	2,661	99.8	848	90.5	3,509	97.4	4,173	90.6	0	-	2,661	99.7	536
2月	4,536	104.8	2,928	98.2	927	100.5	3,856	98.8	4,457	98.9	0	-	2,928	98.2	397	
3月	4,876	100.7	3,309	97.4	1,139	110.5	4,448	100.4	4,347	100.3	0	-	3,309	97.2	538	
累 計	2021年4月～	55,741	99.4	37,872	98.0	11,484	103.3	49,356	99.2	4,347	100.3	10	52.0	37,882	98.0	6,371
	2022年1月～	13,544	101.2	8,899	98.4	2,914	100.8	11,813	99.0	4,347	100.3	0	-	8,899	98.3	1,471

年月	建設工事受注動態統計（出典：国土交通省）							（単位：億円）
	総数	国	独立行政法人	政府企業	都道府県	市区町村	その他	
令和2年度	213,794	46,422	6,039	26,182	56,847	60,006	5,490	
3	200,576	37,859	4,863	27,757	55,153	55,820	5,717	
3年3月	35,302	12,094	1,283	4,936	9,359	5,590	426	
4	13,508	2,782	509	2,789	3,255	2,882	349	
5	13,874	2,397	167	2,837	2,782	4,510	669	
6	21,581	3,246	442	2,626	4,285	8,910	469	
7	19,058	2,731	573	1,622	4,882	7,341	572	
8	16,066	2,192	358	1,950	4,670	4,673	651	
9	20,200	3,315	509	2,494	6,211	5,845	386	
10	15,410	2,288	273	1,669	5,368	4,471	238	
11	12,176	1,630	285	1,498	3,505	3,738	579	
12	12,910	1,721	269	2,200	3,803	3,674	456	
4年1月	9,739	1,976	235	1,905	2,970	1,838	141	
2	11,513	3,388	253	1,744	2,934	2,048	552	
3	34,541	10,188	989	4,423	10,489	5,890	655	

年月	建築着工（出典：国土交通省）									（単位：万㎡）
	統計	構造別						用途別		
		木造	鉄骨鉄筋コン クリート造	鉄筋コンク リート造	鉄骨造	コンクリート ブロック造	その他	居住用	非居住用	
令和2年度	11,430	4,978	189	2,157	4,027	6	73	6,938	4,492	
3	12,246	5,280	197	2,129	4,558	6	78	7,440	4,806	
3年3月	1,043	418	58	237	377	0.4	6	616	427	
4	1,053	443	12	205	388	0.4	6	633	421	
5	1,042	438	11	200	388	0.5	6	614	428	
6	1,085	486	18	161	412	0.5	7	657	428	
7	1,066	477	11	202	370	0.4	6	658	408	
8	954	462	7	153	326	0.4	8	641	313	
9	995	466	18	162	343	0.5	6	625	370	
10	1,209	488	22	162	531	0.4	6	676	533	
11	1,012	467	14	175	346	0.7	9	638	374	
12	1,066	430	36	163	427	0.5	3	591	475	
4年1月	862	349	14	127	348	0.3	4	538	324	
2	922	370	23	192	331	0.5	5	551	371	
3	979	403	10	206	351	0.5	7	616	363	

※単位は万㎡以下四捨五入したため、かならずしも統計に合致しない

年月	建設工事受注動態統計（大手50社）（出典：国土交通省）								（単位：億円）
	統計	民間		公共機関		建築	土木	大規模工事	未消化工事高 （月末）
		計	製造業	計	国の機関				
令和2年度	148,811	100,964	19,924	39,055	27,079	96,084	52,727	90,630	191,713
3	150,979	109,267	24,237	33,500	21,885	103,889	47,090	100,146	-
3年3月	36,395	26,029	3,932	8,640	6,502	24,517	11,878	23,559	191,713
4	7,252	4,965	1,141	1,711	1,044	4,238	3,034	4,130	188,230
5	7,470	4,666	940	2,440	1,674	4,576	2,894	4,477	186,330
6	13,631	9,020	1,807	3,611	2,036	9,074	4,557	8,590	187,713
7	8,925	6,244	2,042	2,324	1,373	6,069	2,855	5,598	188,502
8	8,766	6,304	2,156	2,059	1,370	6,285	2,481	5,517	187,949
9	15,826	12,450	1,699	2,780	1,935	11,984	3,842	11,695	190,553
10	9,753	7,135	2,003	2,202	1,555	6,806	2,947	6,243	190,874
11	10,676	7,495	2,213	2,269	1,498	6,782	3,894	6,496	191,232
12	16,210	12,570	2,335	2,840	1,718	12,316	3,892	9,003	192,900
4年1月	11,660	7,955	1,408	2,892	1,952	8,014	3,641	8,180	194,534
2	12,152	9,464	2,400	2,280	1,700	8,766	3,387	8,875	193,576
3	28,665	21,001	4,095	6,090	4,030	18,978	9,687	21,341	-

※受注高10億く円以上の国内工事のみを対象

年月	企業物価指数（日本銀行調べ）							（平成27年平均＝100）				
	総平均	建設用 材料	セメント	生コンク リート	コンク リート製	製材	砂利・ 碎石	普通鋼鋼材		金属製品	建設・ 鉱山機械	
令和元年平均（C.Y.）	101.5	105.5	104	109	105.2	104.6	102.8	107.9	114.1	124.4	106.8	101.9
2	100.3	104.6	104.3	112.5	109.8	103.8	106.2	111.8	106.3	116.7	108.9	102.4
令和元年度平均（F.Y.）	101.6	105.5	104.3	110.4	106.7	104.8	101.2	107.8	113	123.4	107.7	101.9
2	100.3	104.7	104.4	112.9	110.3	104.1	101.2	112	107.1	117.5	108.9	102.8
3年3月	102.3	106.4	104.8	114	110.8	108.2	108.1	117.5	115.6	127.1	108.7	103.4
4	103.2	107.8	104.8	114	110.5	114.5	108.1	120.6	119.4	130.3	109	103
5	103.9	109.4	104.8	114.1	111.4	127.8	108.1	123.5	121.6	134.8	108.9	101.6
6	104.8	112	104.8	114.2	112.4	147	108.2	131.1	129	139.1	109	102.1
7	106	115.2	104.8	114.6	111.2	161.5	108.2	135.3	132.2	143.6	110.5	102.6
8	106.2	117.3	104.8	115.1	111.7	167.2	108.5	139	136.6	147.5	110.9	102.7
9	106.6	120.2	104.8	115.4	111.2	172.4	108.5	141.2	138.6	149.6	111.3	101.4
10	108.1	122.8	104.8	115.5	111.4	173.4	108.5	145.7	140.9	152	112.4	102.1
11	108.9	123.7	104.8	115.9	112.8	173.1	108.5	150.9	145.3	156.1	113.4	101.9
12	109.1	123.9	104.8	116.2	110.9	172.4	108.5	156.3	146.4	159.4	113.8	102
4年1月	110.1	124.7	104.8	116.9	112.1	168	108.5	159.3	147.7	161.1	115	104.2
2	111.2	125.6	104.8	117.4	115.9	167.4	108.5	160	148.4	163.4	115.6	104.7
3	112.2	126.7	106	117.6	114.8	167.6	108.5	162	151	169.7	116.2	104.3
4	113.5	128.5	106	117.6	117	167.9	108.5	166.5	157.5	174.2	117.1	103.6

※企業物価指数が27年基準に変更

年月	品目	主要セメント製品出荷高Ⅰ（経済産業省調べ）				
		遠心力鉄筋コンクリート製品			空洞コンクリート ブロック（千個）	護岸用コンクリート ブロック（t）
		管 （t）	ボール （t）	パイル （t）		
30年12月		15,684	38,275	94,444	5,777	62,336
元年12月		13,338	38,389	92,699	5,748	56,943
2年12月		12,208	37,450	118,215	5,922	60,604
3年3月		10,568	36,209	129,166	5,919	47,709
4		8,771	36,053	130,227	6,324	39,889
5		7,419	34,256	115,640	5,215	30,549
c		9,699	39,098	137,448	5,699	31,022
7		9,551	38,510	106,324	5,198	32,456
8		8,048	34,922	81,217	4,646	29,695
9		10,623	38,849	106,581	5,247	34,553
10		11,770	39,770	112,008	5,755	42,042
11		12,691	42,554	108,094	5,708	47,180
12		9,887	37,243	104,406	5,351	54,364
4年1月		11,706	34,446	98,983	4,091	55,355
2		10,378	31,936	123,327	5,000	59,450
3		10,307	33,000	149,572	5,431	47,976

年月	品目	主要セメント製品出荷高Ⅱ（経済産業省調べ）			
		P C製品		木毛・木片・ セメント板（千枚）	気泡コンクリート 製品（㎡）
		はり・けた （t）	その他 （t）		
30年12月		8,796	45,558	2,207	142,204
元年12月		16,472	42,837	2,337	127,687
2年12月		72,899	55,845	2,740	110,898
3年3月		16,053	56,330	2,734	103,003
4		12,884	41,403	2,646	95,735
5		7,358	34,817	2,249	81,549
6		10,439	36,530	2,675	97,276
7		9,869	37,805	2,655	106,963
8		7,888	27,448	2,429	93,426
9		10,495	38,030	2,742	109,780
10		11,778	50,928	2,745	117,155
11		14,667	45,639	2,847	115,458
12		15,948	54,642	2,595	118,751
4年1月		8,771	46,513	2,315	96,860
2		15,218	47,744	2,474	91,643
3		20,647	61,261	2,758	103,188

セメント・コンクリート編集委員会

顧問

長瀧 重義 東京工業大学 名誉教授

委員長

小堺 規行 住友大阪セメント(株) 執行役員 セメント・コンクリート研究所長

委員

石橋 忠良	J R 東日本コンサルタンツ(株) 技術統括
伊藤 康司	全国生コンクリート工業組合連合会 中央技術研究所 所長
内田 俊一郎	太平洋セメント(株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 副部長
上村 豊	デンカ(株) エラストマー・インフラソリューション部門 セメント部技術課長
河村 直彦	(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会((株)ピーエス三菱)
岸 利治	東京大学 生産技術研究所 教授
黒岩 秀介	大成建設(株) 技術センター 都市基盤技術研究部 部長(研究担当)
黒田 泰弘	清水建設(株) 技術研究所 構造・生産技術センター 主席研究員
古賀 裕久	(国研)土木研究所 先端材料資源研究センター 上席研究員
小西 正芳	住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 技術参与
小林 竜平	竹本油脂(株) 第三事業部 研究開発部 コンクリートグループ マネージャー
坂井 悦郎	東京工業大学 名誉教授
坂井 吾郎	鹿島建設(株) 技術研究所 主席研究員
棚野 博之	(国研)建築研究所 材料研究グループ シニアフェロー
野口 貴文	東京大学 大学院 工学系研究科 教授
平田 隆祥	(株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 上級主席技術師
平本 真也	日鉄高炉セメント(株) 技術開発センター 技術開発グループ グループリーダー
前田 禎夫	麻生セメント(株) 品質技術部 部長
森川 嘉之	(国研)港湾空港技術研究所 地盤研究領域長
山路 徹	(国研)港湾空港技術研究所 構造研究領域長
弓削 祐夫	UBE三菱セメント(株) 技術戦略部 部長
窪木 康雄	(一社)セメント協会 セメント系固材普及専門委員会 委員長
野崎 隆人	(一社)セメント協会 セメント系固材技術専門委員会 委員長
大石 英男	(一社)セメント協会 生産・環境幹事会 幹事
中山 英明	(一社)セメント協会 研究所長

編集委員会の動き

本誌の編集企画にご尽力いただいた、編集委員の塚田哲也氏(敦賀セメント(株))、二戸信和氏((株)デイ・シイ)、宮川美穂氏(GCPケミカルズ(株))、市原克彦氏((一社)セメント協会)は5月号をもって退任されました。ここにこれまでのご協力・ご支援に対し感謝の意を表します。

なお、本号より上村 豊氏、小林竜平氏、平本真也氏、大石英男氏が就任されました。

一般社団法人 セメント協会加盟会社

八 戸 セ メ ン ト (株)	敦 賀 セ メ ン ト (株)
日 鉄 高 炉 セ メ ン ト (株)	(株) デ イ ・ シ イ
日 鉄 セ メ ン ト (株)	デ ン カ (株)
東 ソ ー (株)	麻 生 セ メ ン ト (株)
(株) ト ク ヤ マ	U B E 三 菱 セ メ ン ト (株)
琉 球 セ メ ン ト (株)	明 星 セ メ ン ト (株)
荻 田 セ メ ン ト (株)	日 立 セ メ ン ト (株)
太 平 洋 セ メ ン ト (株)	住 友 大 阪 セ メ ン ト (株)

2022 No.905 CEMENT & CONCRETE

7月号 予告 セメント・コンクリート

- CO₂を削減しつつ、残コン・戻りコンをゼロにする新たな方策
- 異なる試験条件(材料、暴露環境、試験方法)による塩化物イオン拡散性状の比較(海外と国内の比較例)
- 透過による固化処理土の強制的な変質促進への取組み
- 社会環境材料としてのセメント系材料の使命と脱炭素社会構築に向けた動向
- セメント産業の廃棄物受入れが最終処分場の残余年数に及ぼす影響
- 調査診断事例報告書データベースの構築と整備活用
- シリーズ/セメントコンクリートを「科学」する 放射線・原子力分野での活用 その2
- 2021年度のセメント生産および操業の概況
- ずいそう(魚本健人) ほか



ダム再開発工事における洪水吐および減勢工コンクリートの改造
《浜田川総合開発事業浜田ダム再開発工事》

セメント・コンクリート No.904 6月号
2022(令和4)年6月15日発行

定価1100円 本体1000円 ⑩

発行者 乾 敏一
編集者 藤原 恵美/古屋 祐介
発行所 一般社団法人 セメント協会
〒104-0041 東京都中央区新富2-15-5
RBM築地ビル2階
電話 03-5540-6171 (代表)
03-5540-6175 (広報部門/出版担当)
03-5540-6173 (図書販売)
FAX 03-5540-6181
研究所 〒114-0003 東京都北区豊島4-17-33
電話 03-3914-2691 (代表)
FAX 03-3914-2690

- 予約購読のご案内/予約購読をご希望の方は1年分 11,000円(税込/送料当協会負担)を「振替」または「現金書留」で直接当協会にお申込み下さい。
- 本誌への広告申込みはセメント協会広報部門/出版担当 ☎ 03-5540-6175へ
- セメント協会加盟会社の購読料は会費に含まれます。

本誌へのご意見、ご感想、ご要望、送付先の変更などは、セメント協会ホームページまたは出版担当直通までEメールでお寄せください。

メールアドレス (出版担当)
cemecon@jcassoc.or.jp

ホームページ
https://www.jcassoc.or.jp

セメント協会ホームページ





CO₂-SUICOM[®]

CO₂ 吸収型 コンクリート

植物のようにCO₂を
吸い込むコンクリート。

※写真の白子川橋では、通常のコンクリートが使用されています。