

第5章 セメント回収型－完全リサイクルコンクリートの実証化

- 5.1 概説
- 5.2 成分調整不要型完全リサイクルコンクリート
- 5.3 完全リサイクルコンクリートの拡大利用に向けた材料調整法の検討
- 5.4 完全リサイクル住宅(S-PRH)への実施工と適用性評価
- 5.5 第5章のまとめ

5.1 概説

順工程生産システムに基づくコンクリート構造物から発生するコンクリート塊は、セメント原料として好ましくない成分を含む骨材を多用しているため[1-2]、再度セメント原料として使用することは基本的に困難である。逆工程付加型の順工程生産システムを実現する一方策となる高品質再生骨材の製造システムの場合に関しても、再生骨材を取り除いた後にセメント分を豊富に含有した微粉末が得られるにも関わらず、同様の理由でセメントとして使用することは困難となっている。また、それらの微粉末は、重量に占める高温下での石灰石脱炭酸化現象による二酸化炭素排出割合が大きい形で製造された再生材料として認められるため、エントロピーが増大し質的ポテンシャルが高まっているものと捉えられるにも関わらず、その品質低下を許容して土質改良材等に原料化する程度に用途が限られているため、二酸化炭素排出量に換算する物質価値は極めて低下する原材料になるといえる。このような問題は建築生産における、逆工程要因に含まれる生産工程（維持管理、解体処理、再資源化等）の重要性や価値を低く位置づける順工程生産システムに起因する問題であり、将来的には天然資源、廃棄物処分場の枯渇等の地球規模的問題に発展する性質を内在するシステムであるといえる。

本章ではこれらの問題を抜本的に解決することを目的とした検討を行った。

5.2の「成分調整不要型完全リサイクルコンクリート」における検討において、材料設計の段階で、コンクリートに石灰石骨材および産業廃棄物起源材料を中心とし、完全リサイクルコンクリートに使用可能な各種材料を適宜を取り込むことで、コンクリート自身がセメント用クリンカーと同等の化学組成を持つように予め調整し、再資源化段階でコンクリート全量がセメント原料となる成分調整不要型—完全リサイクルコンクリートを実証化した。

5.3の「完全リサイクルコンクリートの利用拡大に向けた材料調整手法の検討」では、国内の都市部を中心に汎用性に使用可能となる石灰石骨材を抽出して、実務的な使用を念頭においた汎用型完全リサイクルコンクリートを製造し、その基礎的な性質と、粒形改善石灰石砕砂を使用したコンクリートの品質改善性、そして、完全リサイクルコンクリートの一般的使用を容易にするための標準調査表を作成した。

最後に、5.4の「完全リサイクル住宅の実施工と適用性評価」では、これまでの検討で導出された完全リサイクルコンクリートに関する基礎的な性質、標準調査表を考慮して、セメント回収型—完全リサイクルコンクリートを実構造物に適用し、構造用コンクリートとしての適用可能性を改めて検証した。なお、ここで生産した完全リサイクル住宅は、我が国初の完全リサイクルコンクリートの適用事例となった。

5.2 成分調整不要型完全リサイクルコンクリート

5.2.1 背景と目的

本節では、材料設計の段階で、石灰石骨材および各種の産業廃棄物起源材料をコンクリート構成材料として適宜取り込むことで、コンクリート全量が一般的なセメント用クリンカー原料と同等の化学組成を持つようにし、全量がそのままセメント原料となるような成分調整不要型完全リサイクルコンクリートを実証化する。

最初に、5.2.2の「成分調整不要型完全リサイクルコンクリートに導入する産業廃棄物起源材料の抽出」において、現在ある産業廃棄物起源材料のうち、最終処分代替として再資源化が推進され、比較的発生量も安定しており、将来的にも継続的にその発生が見込まれるというような条件に該当する材料を抽出し、その基礎的性質とコンクリート構成材料としての適用性を評価する。

5.2.3の「成分調整不要完全リサイクルコンクリートの産業廃棄物起源材料の取り込み試算」に関しては、現在適用可能な産業廃棄物起源材料のコンクリートへの最大取り込み量を試算し、成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの製造量に比例して産業廃棄物削減効果が期待できる程度を評価する。

5.3.4の「成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの基礎的性質」に関しては、成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの実現可能性を検討するために、産業廃棄物起源材料を含む各種材料を使用した成分調整不要型完全リサイクルコンクリートを実際に製造し、その基礎的性質を評価する。

最後に、5.3.5の「成分調整不要型完全リサイクルコンクリートを起源とした再生セメントの基礎的性質」に関しては、コンクリート全量に対して、実際のセメント製造工程を模擬した破碎・粉砕・焼成処理を実施して再生セメントを製造し、その強度発現性に着目した基礎的性質を評価する。

以上により、成分調整不要型完全リサイクルコンクリートに関して、現状の産業廃棄物資材の市場性およびコンクリート製造に関わる技術的見地からその実現可能性を総合的に検証し、企画設計の段階において、ライフサイクル設計を適用し、順逆工程統合生産システム構築の基盤となるリサイクラブルコンクリートが製造可能であることを実証する。

5.2.2 コンクリートに導入する産業廃棄物起源材料の抽出

日本の原料産業を中心とした製造業部門における全エネルギー投入量の割合[3]は47%程度にも及ぶ。そして、海外からの輸入原料を元に加工品を製造・販売し利益を得るという仕組みは、日本の産業形態の一般的性質となっており、総資源投入量の28%を海外からの輸入資源に依存している。そのような世界規模的な資源循環の枠組みにおける生産システムの中で断続的に発生する廃棄物起源材料のうち、鉄やアルミニウムのように同一製造ルートの原料として再生できるものはごく僅かであり、一般的には夾雑物や異種成分と混合した状態で産業廃棄物として大量に発生する状況にある。その中で再利用用途が見いだせないものは多数存在し、基本的にそれらは国内で最終処分されるといえる。

表 5.1.1 に完全リサイクルコンクリートに使用できる材料を示す。石灰石骨材のみで構成される完全リサイクルコンクリートプロトタイプは、その全量をセメント原料として用いる場合には不足する SiO_2 源、 Al_2O_3 源あるいは Fe_2O_3 源を補う材料の添加が必要となる。逆に、骨材として石灰石を主要材料として単独で用いないコンクリートの場合は、セメントの主要成分である CaO が不足するため、再生セメントと

するためには石灰石を更に添加する必要性が発生して、結果的に過剰な量の再生セメントが製造される可能性がある。これは石灰石資源の節約と、セメント製品の市場における価格安定性という観点から望ましいことではないといえる。

成分調整不要型完全リサイクルコンクリートは上記問題の解消に加え、他産業分野で余剰となっている産業副産物を利用して、 SiO_2 、 Al_2O_3 および Fe_2O_3 の成分調整要素として取り込むことを想定している。原料は、金属精錬の工程で発生する高炉スラグ、銅スラグ、火力発電所の微粉炭の焼成工程で発生するフライアッシュなどが挙げられる。高炉スラグおよびフライアッシュなどは、従来からセメント用原料として積極的に使用されてきたように[5]、セメント原料として必要な SiO_2 、 Al_2O_3 および Fe_2O_3 を十分に含有している。従って、これらを予めコンクリートに取り込むことで、クリンカー原料として成分調整が不要となるような完全リサイクルコンクリートの製造が可能になるというものである。成分調整不要型完全リサイクルコンクリートとするために、産業副産物を積極的に取り込むことは、建設業以外で発生する産業副産物を有効利用するという観点に加え、コンクリート自身に必要となる天然資源を節約するという観点からも重要であるといえる。

成分調整不要完全リサイクルコンクリートの産業副産物系材料の取り込み試算に使用するコンクリート構成材料を表 5.2.1 より複数種選定する。なお完全リサイクルコンクリートプロトタイプ[6]では、セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は石灰石砕砂、そして粗骨材は石灰石砕石というセメント原料としての完全リサイクルを可能にする基礎材料を使用して製造し、コンクリートの基礎的性質に加え、粉碎処理後に SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 などの不足成分を薬品で補ない、全量を焼成した再生セメントについて、普通ポルトランドセメントと同等の品質が確保されることを確認している。成分調整不要型完全リサイクルコンクリートでは、完全リサイクルコンクリートプロトタイプで使用した、石灰石骨材の基本材料に加え、埋蔵量が豊富であり、地殻構成材料であるシリカを多分に含む珪酸質岩石、金属類精錬時に発生する副産物であり、比較的その発生量が安定しており、将来的な用途拡大の観点からも利用価値が高いと判断される高炉スラグ、銅スラグ、フェロニッケルスラグ、シリカヒューム、そして火力発電所の微粉炭の焼成工程で発生するフライアッシュを選定し、成分調整不要性を実証することとした。これらの産業副産物は国内で比較的容易に回収・採取が可能であるといえる。

表 5.2.2 に成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの産業副産物系材料の取り込み試算に使用する各種材料の性質を示す。文献から引用したデータ[7-9]および実測値に基づいて、生産量、セメント産業使用率、材料の主要な化学組成および化学的性質などを示した。この材料により成分調整不要型完全リサイクルコンクリートによる再生セメントの化学組成が決定される。

表 5.2.1 完全リサイクルコンクリートに使用できる材料

分類	名称
粉体	セメント、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカ質微粉末、シリカヒューム、石灰石微粉末
細骨材	石灰石砕砂、珪酸質岩石砕砂、珪砂、高炉スラグ細骨材、膨張頁岩系人工軽量骨材、フライアッシュ焼成細骨材、銅スラグ砕砂、フェロニッケルスラグ細骨材
粗骨材	石灰石砕石、珪酸質岩石の砕石または砂利、粘板岩の砕石または砂利、高炉スラグ粗骨材、膨張頁岩系人工軽量骨材、フライアッシュ焼成粗骨材、石炭灰人工軽量骨材

表 5.2.2 成分調整不要完全リサイクルコンクリートに使用する材料の特徴 [7-14 および実測値参照]

	市場性			基礎的物性						
				物理的特性				化学組成 (ig.loss を含む上位 3 成分)		
	生産量 (万 t/年)	セメント分野 利用率(%)	建設分野利 用率(%)	密度 (kg/L)	吸水率 (%)	単位容積重 量(kg/L)	実積率 (%)	1	2	3
石灰石	20000	49.3	77.2	2.7	0.33	---	---	CaO	Fe2O3	SiO2
	53.62	1.58	1.51	特徴： 石灰石は鉱物学的には方解石(カルサイト)からなる炭酸カルシウムの化学組成を持ち、理論的な酸化物組成は酸化カルシウム 56%、二酸化炭素 44%からなる岩石である。日本では良質なカルサイト系の石灰石が全国的に多く採掘でき、その量は全ての鉱石量の 64%程度にも及んでおり、セメント産業をはじめ、多産業分野で広く使用されている。色調は灰白色であり、組織は細粒均質で、不溶残分、シリカ質、アルミ分も少ないため、骨材として使用した場合でも炭酸塩に特有のアルカリ炭酸塩岩反応は起こりにくい。一方、カルサイトにMgを含んだドロマイト系石灰石は、アルカリに接触した際に起こる脱ドロマイト反応により、セメント中のCSHと反応しシリカゲルを生成し膨張する傾向があるが、日本ではドロマイト系石灰石の採掘割合は少ない。						
	---	---	---	2.64	1.07	---	---	SiO2	Al2O3	Fe2O3
珪酸質 岩石	---	---	---	2.64	1.07	---	---	98.02	0.72	0.3
	特徴： 珪酸質岩石は、主として石英からなる岩石の総称であり、コンクリート用骨材の場合は珪石、珪砂と称される。化学組成がSiO2のシリカ質によって主に構成されており、風化、劣化などによる変態が少ない安定な岩石である。セメントの強さ試験用モルタルに用いる骨材は天然けい砂であり、シリカ質で構成され、物理的性質における一定の適合性を有したものは標準砂と呼ばれ、標準試験用の検定砂として用いられる。									
	640	68	25	2.0-2.3	7.0-18.0	0.78-0.85	52-65	SiO2	Al2O3	CaO
フライ アッシュ	---	---	---	2.0-2.3	7.0-18.0	0.78-0.85	52-65	56.20	24.10	5.20
	特徴： 火力発電所のボイラーで微粉炭を燃焼する際に得られる微粉球状の石炭灰を指し、石炭に介在する粘土分が残留しているため、高温焼成によりガラス化し、ガラス中は部分的に石英等が形成される。現在は、セメント原料、混和材、軽量骨材などに多く使用されており、その球状な粒子特性により、ボールベアリング作用による単位水量の低減に起因するワーカビリティの改善効果、水和発熱量の低減などの効果が期待できる。また、ポゾラン反応によりコンクリート中の水酸化カルシウム量が消費されることで、低アルカリセメントと同様の状態が形成され、アルカリ骨材反応を抑制する効果などが期待できる。硬化後は、乾燥収縮抵抗性、耐熱性、化学抵抗性、水密性および長期強度の増進が期待できる一方、セメント置換率が増加した場合は、コンクリートの初期強度の低下、アルカリ性減少による中性化促進の影響もある。									
	2315	67.5	0.2	2.4-2.7	0.4-3.3	1.4-1.6	54-60	41.9	33.3	6.3
高炉 スラグ	---	---	---	2.4-2.7	0.4-3.3	1.4-1.6	54-60	41.9	33.3	6.3
	特徴： 高炉(溶鉱炉)で鉄銹を製造する際に生成する副産物であり、JIS A 5011-2 (コンクリート用スラグ骨材)で規格化がされている。セメント原料、混和材、粗骨材として製造されており、アルカリ刺激剤による潜在水硬性により、発熱速度低減によるコンクリート温度上昇の抑制効果、長期強度の増進、耐薬品性の向上などが期待できる。またセメントのアルカリ量に応じて適切な置換を行った場合、アルカリシリカ反応抑制効果も期待できる。また粉末度を大きくすることが可能であり、6000g/cm ² 程度以上の場合、ブリーディングが少なく、流動性にすぐれ、水密性、塩分遮蔽性に有効なコンクリートとすることができる。骨材として使用する場合は、表面の微細な気孔により、ペーストとの付着性が富む結果、ひび割れ、ポップアウトが起こりにくくなる。									
	200	49.9	10.6	3.4-3.7	0.2-1.0	1.9-2.5	57-71	44.9	32.6	4.68
銅スラグ	---	---	---	3.4-3.7	0.2-1.0	1.9-2.5	57-71	44.9	32.6	4.68
	特徴： 銅を製錬する過程で、精鉱中の鉄分と珪石が結合したものであり、冷却・水砕により固化して骨材として製造される。JIS A 5011-2(コンクリート用スラグ骨材)で規格化されている。骨材は、粒形が角張っているが、ガラス質の化学組成に近い性質をもつため、粒子表面は滑らかになっている。セメントペーストとの水和性に起因してコンクリート物性に影響を与える要因は特になく、密度が大きく、粗粒分で構成される結果、コンクリート骨材として使用するよりも、ケーソン等の中込みに使用される場合が多い。									
	200	0	27.9	2.8-3.1	0.3-1.3	1.7-1.9	59-62	53.6	36.64	9.25
フェロ ニッケル スラグ	---	---	---	2.8-3.1	0.3-1.3	1.7-1.9	59-62	53.6	36.64	9.25
	特徴： ニッケル鉱石からフェロニッケルを精錬採取する際の副産物であり、溶融スラグを徐冷もしくは水、空気などで急冷し、粒度調整して骨材として製造する。JIS A 5011-2 (コンクリート用スラグ骨材)で規格化されている。セメントペーストとの水和性に起因してコンクリート物性に影響を与える要因は特になく、コンクリート用スラグ骨材として一般化している。									
	7	---	---	---	---	---	---	93.77	0.83	0.45
シカ ヒューム	---	---	---	---	---	---	---	93.77	0.83	0.45
	特徴： アーク式電気炉により金属シリコンやフェロシリコン合金等を精錬する際の排気ガスに含まれる副産物である。主成分はその大部分が非晶質シリカである微粒分により構成されるため、水和活性がよく、セメントの水和により生成した水酸化カルシウムゲル溶液に対し速やかに溶解し、粒子表面にシリカ質ゲルを形成して緻密な組織となる。高性能減水剤との併用により、さらに高強度で透過性の小さい材料とすることが可能であるため、シリカヒュームを使用した高強度コンクリートは、長期強度が飛躍的に増進し、ブリーディングの減少、水和初期の発熱の低減効果などが期待できる。									

5.2.3 コンクリートへの産業廃棄物起源材料の取り込み試算

(1) 使用材料の条件

石灰石骨材を使用したセメント回収型-完全リサイクルコンクリートプロトタイプの基本調査に対し、産業廃棄物起源材料を導入して、成分調整不要型の完全リサイクルコンクリートにすることは、不足成分を補うことなく全量がセメント原料になるばかりでなく、産業副産物およびコンクリートに一般的に使用できる天然資源を有効利用するために重要となるとされた。ここでは、産業廃棄物起源材料を完全リサイクルコンクリートに一定量取り込むことで成分調整不要型となる取り込み試算を行ない、各種調査による成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの運用事例モデルを提示する。

表 5.2.3 に成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの構成材料の化学組成を示す。各種材料の化学組成は、文献[08-12]で紹介されている一般的なデータおよび実測データにより構成されたものであり、成分調整不要性の試算を行うのに適当な分析データが得られていると判断できる。

表 5.2.4 に再生セメントの鉱物組成、クリンカー鉱物組成およびクリンカー成分の特徴を示す。クリンカーに関しては、CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ および MgO の主要酸化物の構成割合により、最終的に製造される C₃S、C₂S、C₃A および C₄AF の鉱物組成が決定されるが、成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの場合、計画調査時における材料選定およびその使用量により目標値を予め設定する必要がある。

表 5.2.3 試算に用いたコンクリート構成材料の化学組成

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₃	ig.loss	合計	
骨材	石灰石	0.50	0.40	0.10	54.60	0.50	---	---	---	---	---	---	43.9	56.10
	珪酸岩砕砂	96.34	2.80	0.25	0.15	0.02	---	---	---	---	---	---	0.00	99.56
	フライアッシュ骨材	49.60	30.54	3.10	7.67	1.80	0.18	0.47	0.44	---	---	---	---	93.80
	高炉スラグ	32.90	14.70	0.22	42.00	7.80	0.75	0.23	0.33	0.74	0.25	0.00	0.34	99.92
	銅スラグ	31.40	---	59.01	1.38	---	---	---	---	---	0.01	---	---	91.80
	ニッケルスラグ	52.2	1.5	9.0	0.9	34	---	0.05	0.1	---	---	---	---	100.14
混和材	シリカヒューム	93.77	0.45	0.28	0.22	0.83	0.44	0.46	1.37	0.01	0.06	0.09	---	97.97

表 5.2.4 セメントの鉱物組成とクリンカー成分の特徴

主なセメント種類	鉱物組成			
	C ₃ S (3CaO・SiO ₂)	C ₂ S (2CaO・SiO ₂)	C ₃ A (3CaO・Al ₂ O ₃)	C ₄ AF (4CaO・Al ₂ O ₃ ・Fe ₂ O ₃)
普通ポルトランドセメント	45-52	24-29	8-11	8-10
早強ポルトランドセメント	53-68	10-20	7-10	7-9
中庸熱ポルトランドセメント	30-42	34-44	4-6	12-14
白色セメント	28-35	40-45	12-14	1-2
耐硫酸塩ポルトランドセメント	37-39	41-45	3-9	7-8
ビークライトセメント	20-50	30-90	2-10	8-13
主なクリンカー成分	内容			
CaO	石灰石骨材 (50%以上) および高炉スラグ (40%以上) に多く含有する。ig.lossを除いた CaO の含有量に換算した場合、高炉スラグの場合は、含有量に大きな変化はないが、石灰石は他の酸化物の鉱物成分が相対的に低いため、大部分の含有量が CaO により構成されるため、CaO 単身の供給源としての利用価値が大きい。また、国内においては、良質な石灰石の埋蔵量が豊富である。			
SiO ₂	珪砂 (98%)、シリカヒューム (94%)、フライアッシュ (56%) およびニッケルスラグ (52%) に多く含有する。珪砂は天然資源であること、ニッケルスラグおよびフライアッシュはシリカ分に加え、Al ₂ O ₃ および Fe ₂ O ₃ の含有量も高いこと、そして小粒径であるシリカヒュームは混和材としての使用に限定されること等により、各種材料の特徴を考慮した上で、目標とする再生セメントの鉱物組成に合わせ、適量利用することが可能である。			
Fe ₂ O ₃	銅スラグ (50%以上) に多く含有し、他の材料には微量しか含まれないため、Fe ₂ O ₃ の供給源は銅スラグに大きく傾倒する。Fe ₂ O ₃ を多く含有する高ビーライト系セメントは、セメントの水和による発熱を低減し、温度ひび割れを抑制する効果があるため、大型建造物のマスコンクリートなどに適用されるように、用途および使用方法に明確な特性があるといえる。			
Al ₂ O ₃	フライアッシュ (24%) および高炉スラグ (14%) に多く含有する。双方ともに、発生量が大きくかつ比較的安定しているため利用価値が高いといえるが、普通ポルトランドセメントで必要とする成分許容量が、CaO や SiO ₂ と比較すると大きくないために、使用量に制限があるといえる。			
MgO	ニッケルスラグ (30%程度) および高炉スラグ (6%程度) に多く含有する。上記のセメントクリンカーに必要な 4 酸化物とは異なり、セメントの水和を積極的に制御する酸化物ではない。JIS R 5210-1997 (ポルトランドセメント) では、MgO の含有割合に制限が加えられており、5%以下とする必要がある。			

(2) 試算方法

図 5.2.1 に成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの計画調合決定ダイアグラムを示す。コンクリートは、構造用コンクリートとすることを目標とするため、将来的に一定量を製造する場合には、呼び強度別の出荷量データを基に、ポルトランドセメントの種類や水セメント比別の出荷量を決定する必要がある。本試算では、コンクリートの平均水セメント比を 50%程度とし、高強度から普通強度までのコンクリートが製造可能であること、セメントは各水セメント比ごとに普通、早強および低熱セメントの 3 種類を製造することなどを条件とした。

コンクリートの計画調合表を試算プログラムにより作成する。製造目標とする各種コンクリートに対し、完全リサイクルコンクリートに使用可能な材料から材料を適宜選択し、それらの密度・化学組成等を入力し、使用材料条件を具体的に決定する。続いてコンクリートの単位水量、水粉体比、空気量、細骨材率等を入力し、コンクリートの基本条件を具体的に決定する。以上により、目標とする再生セメント（普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメント）の化学組成値を試算するための条件が整う。続いて、共役傾斜法による最適化処理により、目標とする再生セメントの化学組成に近づくようなコンクリートの構成材料比を決定するために、制約条件(セメント全 11 成分の目標値との誤差最小化等)を定め、目標とする再生セメントに限りなく近い化学組成を有する再生セメントを、さらにはその原料となる成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの計画調合を決定する。

図 5.2.2 に成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの試算画面を示す。アミ部分が入出力データであり、図 5.2.1 のダイアグラムで示される部分と同値となる。これにより、再生セメントの化学組成、コンクリート構成材料の質量割合、計画調合に必要な材料の質量が決定される。また、再生セメントの化学組成値から鉱物組成も求められるため、再生セメントの性質に起因するコンクリート種類の具体化も可能になる。

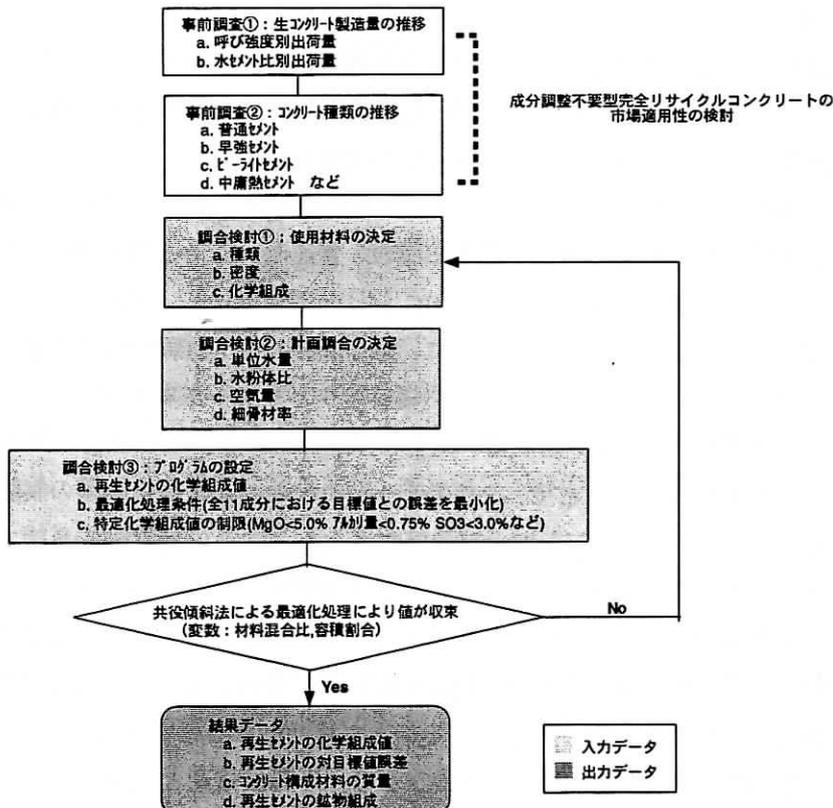


図 5.2.1 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの計画調合決定ダイアグラム

表 5.2.5 各種成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの試算結果

コンクリート 種類	成分	w/c	単位 水量 (kg/m ³)	普通 セメント (kg/m ³)	混和材 (kg/m ³)					粗骨材 (kg/m ³)	
					シリカ ヒューム	石灰石 砕砂	珪酸岩 砕砂	高炉 スラグ	ニッケル スラグ	銅 スラグ	石灰石 砕石
NC (普通 セメント用)	60	175	292	---	371	149	205	65	0	917	78
	50	180	360	---	564	120	39	0	0	763	215
	40	185	462	2	519	133	15	0	60	778	166
HC (早強 セメント用)	60	175	292	---	557	116	86	0	52	799	174
	50	180	360	---	539	111	66	8	39	794	195
	40	185	462	---	516	114	38	17	39	760	177
BC (低熱 セメント用)	60	175	292	---	503	136	57	13	41	752	210
	50	180	360	2	546	132	88	1	0	788	155
	40	185	462	---	495	122	78	0	37	734	152

表 5.2.6 再生セメントの化学組成とクリンカーの鉱物組成

成分	w/c	化学組成(%)											クリンカー-鉱物組成(%)				
		クリンカー主要成分					クリンカー生成補助成分						成分 合計	C3S	C2S	C3A	C4AF
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₃					
NC (普通 セメント用)	60	22.9	5.2	3.6	65.9	2.0	0.14	0.07	0.09	0.12	0.04	0.00	100.00	47.9	23.0	9.1	9.7
	50	22.3	7.0	2.9	66.4	1.2	0.06	0.10	0.09	0.02	0.01	0.00	100.00	49.1	26.4	13.5	8.8
	40	23.3	5.6	3.8	66.0	1.0	0.04	0.08	0.09	0.01	0.00	0.00	100.00	44.1	27.5	7.6	10.6
HC (早強 セメント用)	60	21.3	6.4	3.2	67.4	1.4	0.08	0.09	0.09	0.06	0.02	0.00	100.00	55.9	12.1	11.5	9.9
	50	21.6	6.7	2.7	67.0	1.6	0.08	0.09	0.10	0.04	0.01	0.00	100.00	60.3	17.7	13.5	8.5
	40	21.9	6.3	2.9	66.9	1.7	0.05	0.08	0.08	0.02	0.01	0.00	100.00	56.9	17.4	11.3	8.5
BC (低熱 セメント用)	60	24.5	7.1	3.0	63.5	1.7	0.07	0.10	0.10	0.04	0.01	0.00	100.00	19.8	53.7	13.4	8.8
	50	25.5	5.9	0.6	66.2	1.4	0.10	0.10	0.16	0.06	0.02	0.00	100.00	30.0	40.4	12.6	1.5
	40	25.4	6.0	2.5	64.2	1.4	0.10	0.10	0.14	0.06	0.02	0.00	100.00	21.8	43.6	10.4	7.0

たすように、共役傾斜法による最適化処理を行って算出した。コンクリート製造量による制約条件の内訳は、全てのコンクリートにおける平均水セメント比が50%程度となること、全く製造しないコンクリートが発生しないこととした。コンクリート構成材料による制約条件の内訳は、フライアッシュおよび銅スラグに関しては、用途部門が細分化され需要が不安定であるために、セメント原料としての使用量以外の残分を使用すること、高炉スラグに関しては、他部門用途は一定の需要があるため、再生砕石を含むコンクリート系材料の用途分として使用すること、ニッケルスラグに関しては、特有の化学組成を有しており、他分野での需要拡大が期待しにくいいため最終処分全量を使用すること、シリカヒュームに関しては、発生量が少量でありコンクリートに混入することで一定の効果が認められるため、発生量全量を使用することとした。

図 5.2.3 に成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの製造量を示す。水セメント比が50%、60%、40%の順に多く製造され、その平均水セメント比は51.2%であり、年間あたり2000万トンを越える生産量となることがわかる。これは土木建築を含む全コンクリートの年間生産量が4億トンとした場合の5%程度を占めることになり、製造した全量に関しては、成分調整不要のまま再生セメント化することが適当となる。

図 5.2.4 に成分調整不要型完全リサイクルコンクリートによる廃棄物削減効果を示す。コンクリート構成材料となった石炭灰、高炉スラグ、銅スラグ、シリカヒュームは、共に目標使用量の全量を成分調整不要型完全リサイクルコンクリートに投入可能であることが確認された。ニッケルスラグに関しては、特有の化学組成を持つために、最終処分物全量をコンクリートに導入するような調合は示されなかった。今後も発生量および用途が変動・変化することが想定されるため、用途拡大に向けた研究開発を行う余地があると思われる。

表 5.2.7 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの製造と廃棄物削減効果

	コンクリート種類									利用状況			内訳その他				
	NC 40	HC 40	BC 40	NC 50	HC 50	BC 50	NC 60	HC 60	BC 60	合計 (万t)	目標量 (万t)	使用 率(%)	発生量 (万t)	セメント以 外(万t)	コンクリート 用(万t)	最終処分 (万t)	コンクリート原料とする 理由
石灰石 (kg/m ³)	1297	1276	1229	1327	1333	1334	1288	1356	1255	2789	—	—	—	—	—	—	
珪石 (kg/m ³)	133	114	122	120	111	132	149	116	136	265	—	—	—	—	—	—	
石炭灰 (kg/m ³)	166	177	152	215	195	155	78	174	210	378	380	99.5	760	380	—	147	セメント原料外の用途が細分化され、需要が不安定であるため
高炉スラグ (kg/m ³)	14.5	37.8	78	39	66	88	205	86	57	152	152	100.0	2367	879	152	3	セメント原料外の用途における需要状況が安定しているため
銅スラグ (kg/m ³)	60.2	39.1	37	42	39	0	65	52	41	99	101	98.4	200	101	—	20.3	セメント原料外の用途が細分化され、需要が不安定であるため
ニッケルスラグ (kg/m ³)	0	16.7	0	0	8	1	0	0	13	6.6	45	14.8	200	—	—	45	特有の化学組成を持ち、他分野での需要構造が変化し難いため
シリカヒューム (kg/m ³)	17	0	0	0	0	64	0	0	0	7.0	7	100.0	7	—	—	—	発生量が少量で、コンクリート混入による効果が期待できるため
コンクリート 生産量 (万t)	300	2.8	110	514	514	29.8	263	205	189								
		413		1058			657										
				2127			(平均w/c=51.2%)										

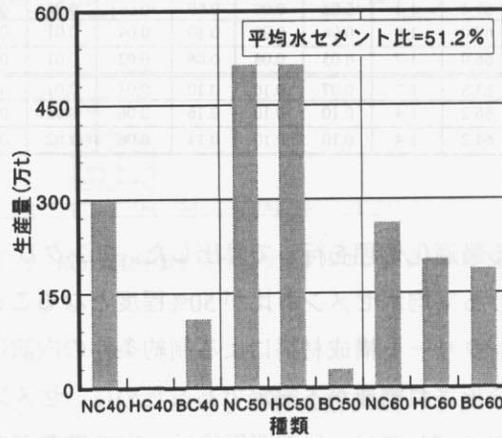


図 5.2.3 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの試算製造量

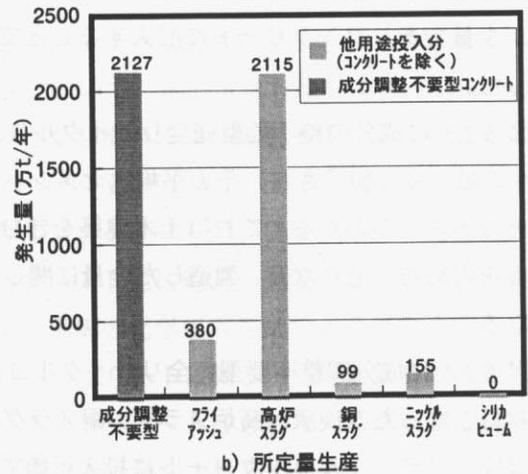
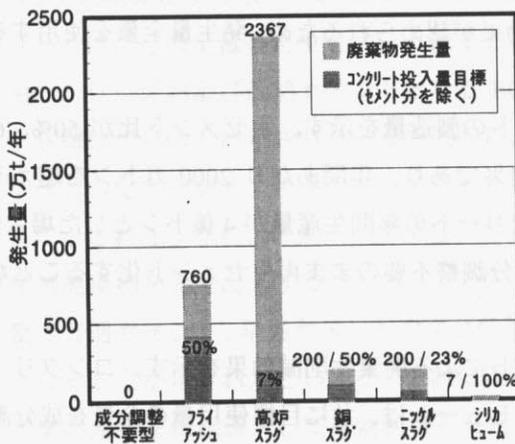


図 5.2.4 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの製造による廃棄物削減効果

5.2.4 コンクリートの基礎的性質

5.2.2 および 5.2.3 における検討により、成分調整不要型完全リサイクルコンクリートが産業廃棄物起源材料の有効利用およびコンクリート自身における天然資源使用量の削減が期待されるうえ、コンクリート全量が成分調整不要のままセメント原料になる可能性が確認された。5.2.4 では、実際に成分調整不要型完全リサイクルコンクリートを製造し、その基礎的性質を確認した上で、構造用コンクリートとしての妥当性を評価する。

(1) 使用材料および計画調合

表 5.2.8 に実験で使用する成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの構成材料を示す。前節である 5.2.3 における成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの試算に用いた構成材料を基本材料として選定した。

表 5.2.9 にコンクリートの調合条件を、表 5.2.10 にコンクリートの計画調合表を示す。成分調整不要型完全リサイクルコンクリートが構造用コンクリートとして一般的に使用可能であることを評価するために、設計基準強度にして普通強度および超高強度として位置づけられる試料を対象とした。NC は計画調合より算定される化学組成が標準的な普通ポルトランドセメント[10]と同等の組成になるように予め材料設計を行った試験体、HC は同様に早強ポルトランドセメント[10]と同等の組成となる試験体であり、石灰石骨材以外に高炉スラグ砂、珪砂、銅スラグ砂および石炭灰人工軽量骨材等を適量取り込んでいる。PT は NC および HC の物性比較用の石灰石骨材コンクリートであり、コンクリートおよび再生セメントとしての基礎的物性が評価済みである完全リサイクルコンクリートのプロトタイプ[6]とほぼ同一の調合とした。

(2) 実験方法

表 5.2.11 に実験項目および実験方法を示す。成分調整不要型完全リサイクルコンクリートとした NC および HC に関して、成分調整不要型とするために各種産業廃棄物起源材料を混入する影響を確認しつつ、基礎的物性（空気量、スランプ、ブリーディング、圧縮強度、静弾性係数）および耐久性（長さ変化率、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性）を PT と比較した上で検討することにより、構造用コンクリートとして使用可能であることを検証する。なお、基礎的物性および耐久性の評価に使用したコンクリートは、成分調整不要性を実証するための再生セメントの製造実験の試料とする。

表 5.2.8 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの構成材料

種類	記号	名称	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実績率 (%)	粗粒率 (%)	
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16	---	---	---	
細骨材	S	LS	石灰石砕砂	2.70	0.33	---	2.65
		SS	珪砂	2.64	1.07	---	2.76
		BS	高炉スラグ砂	2.68	2.05	---	3.14
		CS	銅スラグ砂	3.68	0.70	---	2.75
粗骨材	G	LS	石灰石砕石	2.71	0.24	62.6	6.30
		FA	石炭灰人工軽量骨材	1.76	2.14	65.3	6.44

表 5.2.9 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの調合条件

設定	高強度	普通強度
設計基準強度	60 N/mm ²	24 N/mm ²
水セメント比	0.32	0.62
単位セメント量	531	289
目標スランブ	21±1.5 cm	18±1.5 cm
目標空気量	2.0±1.5 %	4.0±1.5 %
単位粗骨材かさ容積	0.6 m ³ /m ³	0.62 m ³ /m ³

表 5.2.10 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの計画調合

記号	設計基準強度 (N/mm ²)	水セメント 比(%)	細骨 材率 (%)	単位質量 (kg/m ³)								化学混和剤 使用量(C×%)	
				単位 水量	セメント	細骨材				粗骨材		A1	A2
						LS	BS	SS	CS	LS	FA		
PT60	24	62	43.8	179	289	815	0	0	0	1051	0	0.2	0
PT30	60	32	41.4	170	531	718	0	0	0	1019	0	0	1.0
NC60	24	62	46.1	179	289	680	39	128	12	713	192	0.2	0
NC30	60	32	43.9	170	531	594	37	120	11	699	180	0	1.0
HC60	24	62	46.1	179	289	694	31	125	7	713	192	0.2	0
HC30	60	32	43.9	170	531	610	28	116	8	702	178	0	1.0

A1: AE 減水剤(リグニンスルホン酸系化合物) A2: 高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物)

表 5.2.11 実験項目および実験方法

試験項目	試験方法	備考
空気量試験	JIS A 1128	PT、NC、HC の全てについて実施
スランブ試験	JIS A 1101	
ブリーディング試験	JIS A 1123	
圧縮強度試験	JIS A 1108	PT、NC、HC の全てについて材齢 3,7,28 日(標準養生)で実施
静弾性係数試験	JIS 原案	PT、NC、HC の全てについて材齢 28 日で実施
長さ変化試験	JIS A 1129	PT、NC、HC の全てについて実施
促進中性化試験	建築学会耐久性指針	PT、NC、HC の全てについて材齢 7,28 日で実施 環境条件(温度 40℃、相対湿度 50%、CO ₂ 濃度 7%)
凍結融解試験	JIS A 6 204	PT、NC、HC の全てについて水中凍結融解試験方法(A 法)により 300 サイクルまで実施。温度変化+5℃~-18℃

(3)フレッシュ性状と力学特性

表 5.2.12 に成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの基礎的物性に関する実験結果を示す。水セメント比に関わらず、NC および HC のスランブ値および空気量は PT と同程度であり調合目標を満たしている。ブリーディング量は NC60 および HC60 は PT60 よりも 7~15%程度減少した。これは NC および HC が石灰石骨材の吸水率と比べてその値が大きい産業廃棄物起源材料を使用していることが影響したものと考えられる。しかしながらコンクリートのコンシステンシーに与える影響は小さく、各種材料の吸放水特性に起因するブリーディングなどの性質が微妙に変化するといえるが、構造用コンクリートのフレッシュ性状としての一定の性能を確保することは可能である。

図 5.2.5 に成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの圧縮強度とヤング係数に関する実験結果を示す。NC および HC の圧縮強度は、いずれも同一水セメント比および同一材齢において PT と同程度であり、28 日材齢における平均圧縮強度は調合強度[普通強度 31.3(N/mm²)、高強度 70.4(N/mm²)]を上まっているため、構造用コンクリートとして使用が可能であるといえる。

NC および HC のヤング係数は PT よりも若干小さい値を示し、普通シリーズに関しては 5.5~8.0%、高強度シリーズに関しては 4.2~4.9%程度値が低下した。これは NC および HC が粗骨材にヤング係数の小さい軟質な石炭灰人工軽量骨材[11]を使用したため、骨材全体のヤング係数が低下した結果、複合則に従

表 5.2.12 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの基礎的性質

記号	スラブ (cm)	空気量 (%)	単位容積質 量(kg/m ³)	温度 (°C)	ブリーディング量 (cm ³ /g)	圧縮強度(N/mm ²)			ヤング係数(kN/mm ²)
						3日	7日	28日	28日
PT60	18.5	4.0	2322	19.0	0.61	18.9	27.0	32.8	32.8
PT30	21.5	1.7	2444	21.0	0	52.3	62.6	71.2	43.5
NC60	16.5	4.9	2224	19.0	0.52	18.0	26.3	34.7	31.0
NC30	22.0	2.1	2346	21.0	0	55.6	64.4	73.8	41.2
HC60	19.0	5.3	2209	19.0	0.57	16.5	26.2	33.6	30.2
HC30	22.0	1.7	2349	21.0	0	53.7	66.7	76.6	41.4

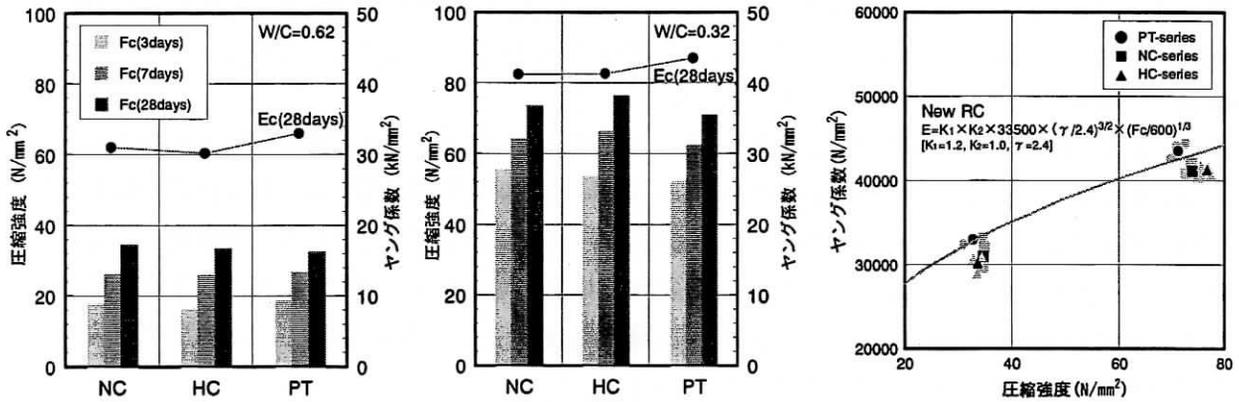


図 5.2.5 圧縮強度とヤング係数 (左: 普通強度 中: 高強度 右: New RC 式)

いコンクリート全体のヤング係数が若干低下したものと考えられる。

ヤング係数は、構造部材である曲げ材の断面算定に使用するヤング係数比を決定する重要な因子であり、従来は、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」[15]に示されるヤング係数推定式により推定していたが、昨今は圧縮強度 36MPa 以上の高強度域でも対応可能な New RC ヤング係数推定式[16]が有用されている。この New RC ヤング係数推定式に関して、評価パラメータである K_1 (粗骨材の種類により定まる係数)は、「その他の骨材」として位置づけられる骨材を基準に +20% から -5% 程度 ($K_1=1.2 \sim 0.95$) の変動が発生することを示している。本実験で使用した石灰石骨材は、ヤング係数が大きく発現する種類 ($K_1=1.2$) に分類されていることを考慮すると、成分調整不要とするために各種材料を導入した結果、ヤング係数が微少に低下することが確認されたが、構造用コンクリートの力学特性としては、一般的に要求される範囲の力学性能は確保される傾向にあり、成分調整不要型にする場合においても、石灰石骨材との併用が条件とされることが、構造用コンクリートとするために、逆に有利に作用することも考えられる。

以上より、成分調整不要型完全リサイクルコンクリートである NC および HC は完全リサイクルコンクリートのプロトタイプと同様である PT と比較して、同等の基礎的物性を保持可能なものと判断され、構造用コンクリートとして十分に使用が可能であると結論づけられる。

(4) 耐久性状

成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの耐久性として、長さ変化、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性について検討を行う。まずコンクリートの長さ変化について検討する。成分調整不要型完全リサイクルコンクリートは、プロトタイプコンクリートと比較して、吸水率の大きい産業廃棄物起源材料を積極的に導入しているため、骨材を介して導入される水分量が増加し、乾燥収縮による長さ変化が大きくなる部類のコンクリートとなる可能性がある[17]。それは、結果的にプロトタイプコンクリートにおいて不足成分

とされる SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ を多く含有する多孔質の産業副産物系材料を多く導入した場合に顕著になると想定される。

図 5.2.6 に成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの長さ変化試験による長さ変化率と質量減少率の実験結果を示す。長さ変化率に関しては、水セメント比に関わらず1年を経過した時点で 500 μ 程度の収縮が確認され、その傾向は成分調整不要型にした場合の方が若干顕著であり、PT に対して平均 10% 程度(12ヶ月時点)増大することが確認される。なお 12ヶ月以降の収束域は 800 μ 以下でおさまるものと考えられた。質量減少率に関しては、高強度シリーズは1年経過時において1%程度の質量減少を起こしたが、成分調整不要型とする影響は確認されない。普通強度シリーズは 2~3% 程度の質量減少を起こし、成分調整不要とした場合の質量減少率は PT と比較して 0.3% 程度大きくなっており、コンクリートの水分逸散が増大する傾向があることが確認された。

以上より、成分調整不要型とすることで、長さ変化率および質量変化率はわずかながら増大し、その傾向は、高水セメント比の場合に顕著になるといえるが、乾燥収縮量に直接反映される長さ変化率において、プロトタイプコンクリートに対する変化率の増加分が 10% 程度で緩慢化することを考慮すると、練り混ぜ時に成分調整不要型であることを考慮して、混和剤による単位水量調整等の実務的な手法と適用することで収縮量を低減することは十分に可能であり、産業廃棄物起源材料がひび割れ発生を引き起こす直接的な原因となることは回避できると考えられる。

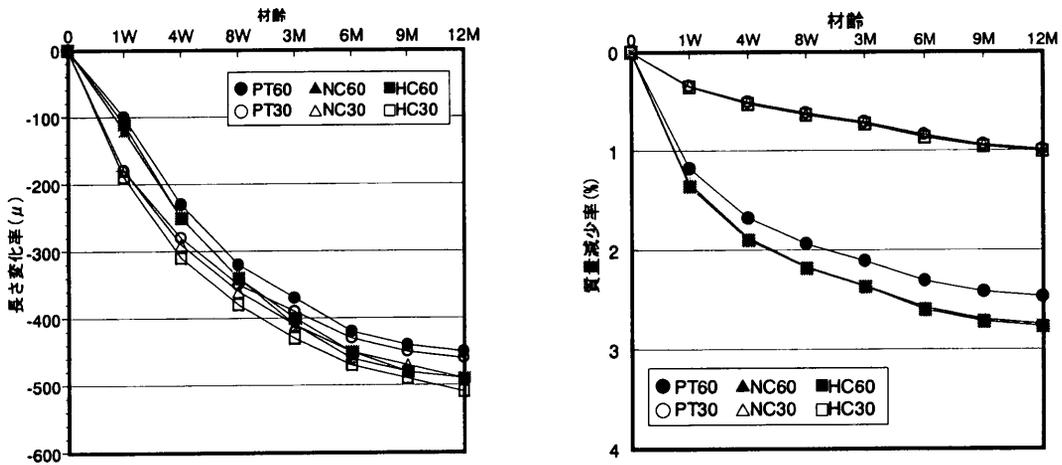


図 5.2.6 長さ変化試験 (左:長さ変化率 右:質量減少率)

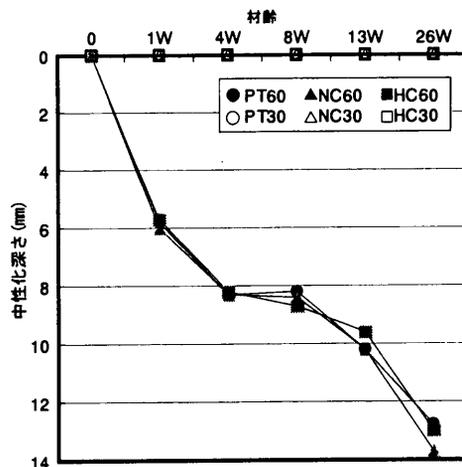


図 5.2.7 中性化抵抗性試験

続いて、コンクリートの中性化抵抗性について検討する。成分調整不要型完全リサイクルコンクリートは、プロトタイプコンクリートにおける石灰石骨材と比較して多孔質の産業廃棄物起源材料を導入しているため、その多孔質性および化学組成により、コンクリートの中性化抵抗性が低下する可能性が考えられる[18-19]。それは、長さ変化試験と同様に、結果的にプロトタイプにおいて不足成分とされる SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 を多く含有する多孔質の産業廃棄物起源材料を多く導入した場合に顕著になると想定される。図 5.2.7 に成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの中性化抵抗性に関する実験結果を示す。中性化深さは、所定の中性化促進環境に暴露した後に、所定の期間ごとに供試体を割裂し、フェノールフタレイン溶液を噴霧し、赤変しない部分の深さを一断面あたり 4ヶ所測定して求めた。その結果、水セメント比に関わらず、各シリーズの中性化抵抗性は同程度であるため、コンクリートを成分調整不要型とすることで、中性化程度に及ぼす影響はほとんどないことが確認された。成分調整不要型にするために導入される産業廃棄物起源材料の総量は、目標とするセメント成分により変化するものであるが、石灰石骨材よりも使用量が多くなることは想定し難く、本調合で示されている計画調合が一般的なものであることを考慮すると、成分調整不要型完全リサイクルコンクリートは、プロトタイプコンクリートと同等の中性化抵抗性を有するものであり、産業廃棄物起源材料を導入することによる品質低下はないものと結論づけられる。

続いて、コンクリートの凍結融解抵抗性について検討する。成分調整不要型完全リサイクルコンクリートは、吸水率の大きい産業副産物系材料を積極的に導入する結果、骨材を介して混入される水分量が増加し、凍結融解の繰り返しによる内部劣化に起因する組織の分離が発生し、凍結融解抵抗性が低下する部類のコンクリートとなる可能性が考えられる[20]。その状況は、プロトタイプにおいて不足成分となる SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 を多く含有する吸水率の大きい産業副産物系材料を多くした使用した場合に顕著になると想定できる。

図 5.2.8 に成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの凍結融解抵抗性に関する実験結果を示す。凍結融解抵抗性は、所定の凍結融解試験環境に暴露した後に、供試体の一次共鳴振動数より導かれる相対動弾性係数を材質劣化指標として、質量変化率を表層劣化指標として求め、その抵抗値として評価を行った。なお、国内において凍害に対する危険度が大きいとされる北海道地区の凍害危険度 3 の地域では、年間凍結回数を ASTM-A 法に相当する 6 回と仮定している[21]。これは、凍結融解回数を 300 サイクルに設定した場合、耐凍害性を約 50 年補償したことに相当するといえるが、成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの一般的な使用を想定している地域は、国内においては廃棄物の発生抑制および資源の有効利用が強く要求される関東・関西を中心とする都市圏であると考えられ、これらが凍害危険度の小さい地域であることを考慮すると、結果的に同サイクル数により得られた耐凍害性の評価は十分条件になるといえる。なお、日本建築学会においては、凍結融解回数 300 サイクル時点における耐久性指数が 60% 以下にならないようにするために適切な空気量を導入すること[22]を示しているが、再生骨材などの繰り返し利用された骨材を使用する場合には、水セメント比を小さくし、組織を緻密にすることで一定の抵抗性が確保されるという考え方[23]も一般化しているため、本実験における高強度シリーズは、水セメント比を小さくし、目標空気量 ($2.0 \pm 1.5\%$) を小さくして耐凍害性を確保するような条件とした。実験結果として、普通強度シリーズに関しては、空気量が適量導入された調合であったため、全体的には一定の耐凍害性を確保しているといえるが、成分調整不要型にした場合は、耐凍害性が若干低下する傾向にあるといえる。高強度シリーズに関しては、総じて普通強度シリーズよりも相対動弾性係数の低下が著しく、式 5.1 により求められる耐久性指数においても同様の性質を示す結果となった。コンクリートが高強度になるほど、粘性が高まりそれに伴いエントラップトエアが増加して耐凍害性が低下する現象[24]があるが、それと同様

の現象が発生していることが想定される。また質量減少率に関しては、サイクル数に比例した供試体質量の増加が確認される。これは、高強度コンクリートの場合、調合が低水セメント比であるため、耐凍害性の低下に従い、内部に水分が侵入し、セメントゲルの再水和に起因する質量増加の現象が発生しているものと考えられる。この現象は、高性能コンクリートを対象とした実験において確認されている[24]。なお逆に、成分調整不要型とした場合、相対動弾性係数の低下が緩和することが確認された。これは、産業廃棄物起源材料の影響であると考えられ、特に使用量が大きく微少な気泡分布により内部組織が均質で一般的な軽量骨材よりもその性能が優れる石炭灰人工軽量骨材[11]が応力緩和作用を引き起こしていると想定される。

以上より、成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの場合、コンクリートの空気量やセメントマトリックスの強度要因に加え、使用する個々の構成材料の特性(気泡分布など)が耐凍害性に大きく影響することが考えられるため、スラグ系に代表される高密度・低吸水性である材料以外の多孔質材料を大量に導入する場合に限り、練り混ぜ時において、適宜、骨材の吸水性状を考慮した調合方法を検討する必要があるといえる。

耐久性指数 $DF(\text{durability factor}) = PN / M$ …式(5.1)

ここに、P：凍結融解Nサイクルにおける相対動弾性係数(%)

N：Pが60%になった時点の凍結融解サイクル数、またはPが試験終了までに60%にならない場合はそのサイクル数

M：あらかじめ定める凍結融解サイクル数

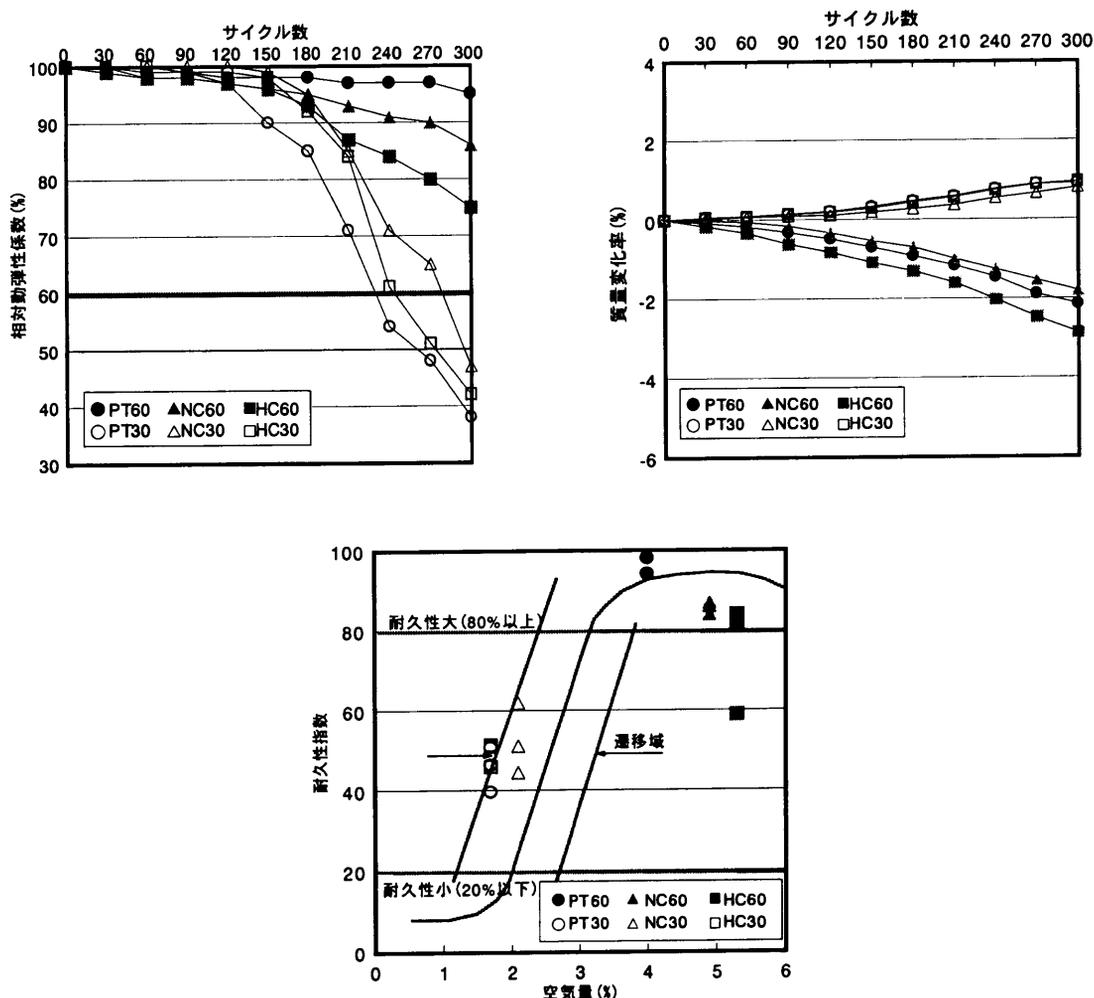


図 5.2.8 凍結融解抵抗性試験 (左：相対動弾性係数 右：質量減少率 下：耐久性指数)

5.2.5 再生セメントの基礎的性質

5.2.4 では、実際に産業副産物系材料を混入した成分調整不要型完全リサイクルコンクリートを製造し、その基礎的物性および耐久性を評価することで、構造用コンクリートとしての使用可能性を検討した。本節では、成分調整不要型完全リサイクルコンクリートで最も重要となる、コンクリートの全量が目標とするセメント原料として完全にリサイクルされる性質を検証するために、実際のコンクリート塊のみを原料として再生セメントを製造し、その物性を評価する。

(1)使用材料

表 5.2.13 に成分調整不要完全リサイクルコンクリートに使用した構成材料の化学組成を、表 5.2.14 に再生セメントとなる成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの調合を、表 5.2.15 に再生セメントとなる成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの基礎的物性を示す。

再生セメントの原料となる成分調整不要型完全リサイクルコンクリートは、5.2.3 で使用した水セメント比 62%の NC60 と HC60 であり、成分調整量を比較する試料としてプロトタイプコンクリートである PT60 を用いる。製造される再生セメントは、NC60 を原料とする普通セメント NCC、HC60 を原料とする早強セメント HCC および PT60 を原料とする比較用普通セメント PTC とする。なお実機におけるセメント製造は、セメントの品質の安定・生産合理性・環境配慮性などを始め、様々な環境側面を考慮しており、また製造システムは完全自動化されているために、一定容量以上の原料を必要とする。従って、本実験では、実験室レベルでの原料コンクリートの製造であり、容量的に実機での対応は困難であると考えられるため、セメントの製造工程に準じた試製セメント製造工程により再生セメントを製造する。

表 5.2.13 使用材料の化学組成値

種類	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	合計
C	21.5	5.2	2.9	63.8	1.6	2.0	0.3	0.48	0.31	0.13	0.13	98.35
S	LS	1.5	0.6	1.6	53.6	0.9	---	---	---	---	0.03	58.31
	SS	96.3	2.8	0.3	0.2	---	---	---	---	---	---	99.60
	BS	32.9	14.7	0.2	42.0	7.8	0.8	0.23	0.33	0.74	0.00	99.95
	CS	31.4	---	59.0	1.4	---	---	---	---	---	---	91.80
G	LS	1.5	0.6	1.6	53.6	0.9	---	---	---	---	0.03	58.31
	FA	56.2	24.1	4.9	5.2	1.9	0.4	1.4	1.7	1.1	0.03	97.43

表 5.2.14 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの計画調合

記号	品質基準強度 (N/mm ²)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位質量 (kg/m ³)								化学混和剤 使用量(C×%)	
				単位水量	セメント	細骨材				粗骨材		A ₁	A ₂
						LS	BS	SS	CS	LS	FA		
PT60	24	62	43.8	179	289	815	0	0	0	1051	0	0.2	0
NC60	24	62	46.1	179	289	680	39	128	12	713	192	0.2	0
HC60	24	62	46.1	179	289	694	31	125	7	713	192	0.2	0

A1 : AE 減水剤(リグニンスルホン酸系化合物) A2: 高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物)

表 5.2.15 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの基礎的物性

記号	スラブ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量(kg/m ³)	温度 (°C)	ブリーディング量 (cm ³ /g)	圧縮強度(N/mm ²)			ヤング係数(kN/mm ²)
						3日	7日	28日	28日
PT60	18.5	4.0	2322	19.0	0.61	18.9	27.0	32.8	32.8
NC60	16.5	4.9	2224	19.0	0.52	18.0	26.3	34.7	31.0
HC60	19.0	5.3	2209	19.0	0.57	16.5	26.2	33.6	30.2

表 5.2.16 実験項目および方法

試験項目	試験方法	備考
再生セメント製造	---	PT60,NC60,HC60の3種類について実機のセメント製造手順を考慮した試製セメント製造工程により製造
密度	JIS R 5201	NC60,HC60の2種類について実施
比表面積		
圧縮強さ・曲げ強さ		NC60,HC60の2種類について材齢3,7,28日で実施
蛍光X線分析	JIS R 5204	PT60,NC60,HC60の3種類について実施

(2) 実験方法

表 5.2.16 に実験項目および実験方法を示す。始めに成分調整不要型完全リサイクルコンクリートから再生セメントを製造し、セメント物理試験（JIS R 5201）に規定するセメント微粒分の密度・比表面積が規定値を満足するか評価し、続いて、再生セメントを使用したセメントモルタルを製造し、曲げ強さおよび圧縮強さが規定値を満足するかを評価する。また同時に、製造工程の段階ごとに蛍光 X 線装置を用いて粉体の化学組成を分析することで、各工程の処理方法に起因する成分変動の特性などを確認しながら、最終的に成分調整不要とする形で再生セメントが製造できることを実証する。

(3)再生セメントの製造

成分調整不要完全リサイクルコンクリートを原料とした再生セメントについて、製造時における成分調整が不要となり得るかを検討する。

成分調整不要とするためには、コンクリートの調合段階において、表5.2.13に示す使用材料の化学組成値と表5.2.14に示すコンクリートの計画調合のみを基にセメントクリンカーの化学組成値を推定する必要があることから、次の項目に起因する成分誤差が生ずると予想された。

- ① サンプリングする骨材の化学組成値分析方法
- ② サンプリングする骨材と骨材全数との化学組成値のばらつき
- ③ コンクリートの使用材料の計量方法
- ④ コンクリートの化学組成値分析方法
- ⑤ クリンカー製造までの工程におけるコンクリート粉体のハンドリング方法

従って目標とする化学組成値となる再生セメントを製造するために、若干の成分調整を行なう必要がある事も考慮して実験を行なった。

再生セメントとなるNCCおよびHCCは、ジョークラッシャーおよび改良型ジョークラッシャーを使用して最大粒形10mm以下になるように、続いてその全量を大型ボールミルにより最大粒形2.5mm以下になるように粉碎化し、得られた粉碎物を小型高速回転ボールミルにより微粉碎し、0.075mmふるいを全通するものをクリンカー原料とした。再生セメント原料は電気炉で1450℃で2時間焼成して再生クリンカーとし、これに二水石膏を粉体重量の2%添加し目標粉末度に粉碎して再生セメントを試製した。表5.1.15に再生セメント原料の化学組成値を、表5.2.18に再生セメント原料の成分調整量の結果を示す。ここで表5.1.15のa値は表5.1.11に示される使用材料の化学組成値を基に、表5.2.14のコンクリート計画調合における質量割合を乗じて計算した化学組成の推定値である。b値は実際にコンクリートを粉碎して得た再生セメント原料の蛍光X線分析値、c値はクリンカー製造管理に必要な水硬率、ケイ酸率、鉄率の特性値および上記①～⑤の問題を考慮して新たに設定した化学組成の目標値[25]、d値はc値の目標値に対し表5.1.16の成分調整を行って得られた蛍光X線分析値である。ここでNCCおよびHCCにおける化学組成の目標値であるc値と、最

最終的に得られた再生セメントの蛍光X線分析値であるd値の化学組成を比較すると、PTCではCaOが、NCCおよびHCCではFe₂O₃がわずかな差ではあるがそれぞれ増加している。これは、上記①～⑤の問題を中心に、実機の製造工程と相違する試製セメント製造工程に起因して発生した成分誤差、コンクリート粉の採取、分析精度などのハンドリングを中心とした問題の影響が考えられる。

ハンドリングに起因する化学組成の誤差発生を考慮し、コンクリートへの材料投入量に対する分析試料採取量の割合等により、成分誤差が大きくなると予想される主要3試料（C、LS、FA）の再分析を行なった上で、改めて成分調整不要性を検討した。表5.2.19に主要成分の化学組成値として示す。この表5.2.19の化学組成値と表5.2.13における化学組成値を基に、表5.2.14のコンクリート計画調査から推定される化学組成値であるa'値を用いて、コンクリートの調合表・成分調整量とのバランスを検討した結果を表5.2.20に示す。a'値に表5.2.18に示す成分調整を行なった結果、得られる計算組成であるe値は、再生セメントの組成値であるd値と目標組成のc値との中間程度の値となり、誤差要因が認められる過程で使用材料の成分調査の精度を高めることが、最終的な化学組成値の推定値に大きな影響を及ぼすことが確認された。

以上より、理論的にはコンクリート全量が目標とする化学組成値を満足する再生セメントとなるように調合することが可能であることが示された。またコンクリートを調合する段階でクリンカーの成分管理に必要となる使用材料の全成分を正確に把握した上で、目標とする化学組成値の再生セメントを製造することは若干の困難を伴うことなども確認された。

表 5.2.17 再生セメント原料の化学組成値(%) (ig.loss 補正後)

成分		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
NCC	a	22.5	5.4	3.2	65.8	1.7	0.5	0.25	0.32	0.22	0.12	0.04
	b	20.8	5.3	1.0	69.9	1.1	0.4	0.13	0.31	0.27	0.04	0.13
	c	21.6	5.2	2.9	65.1	1.4	2.0	0.35	0.47	0.26		0.11
	d	22.3	5.1	4.2	65.0	1.1	2.1	0.11	0.12	0.31	0.04	0.12
HCC	a	22.2	5.4	3.0	66.4	1.7	0.5	0.25	0.32	0.22	0.12	0.04
	b	20.8	5.3	0.8	70.3	1.1	0.4	0.12	0.31	0.27	0.04	0.13
	c	20.7	4.9	2.7	65.6	1.4	3.1	0.29	0.44	0.24		0.12
	d	20.5	4.7	4.0	66.2	1.1	3.2	0.10	0.07	0.29	0.03	0.11
PTC	a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	b	8.1	1.4	0.8	87.3	1.3	0.4	0.12	0.14	0.09	0.05	0.11
	c	21.6	5.2	2.9	65.1	1.4	2.0	0.35	0.47	0.26		0.11
	d	21.4	5.0	2.8	67.0	1.0	1.9	0.19	0.24	0.10	0.05	0.08

備考) NCC:普通セメント(NC60 原料) HCC:早強セメント(HC60 原料) PTC:比較用普通セメント(PT60 原料)
a:推定値(表 5.1.11 および 12 による計算値) b:蛍光 X 線分析値 (成分添加前のセメント原料)
c:目標値 (成分調整時に再設定した値) d:蛍光 X 線分析値 (成分添加後のセメント原料)

表 5.2.18 再生セメント原料の成分調整量 (全原料に対する重量%)

セメント原料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	合計
NCC	1.6	0.2	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	3.28
HCC	1.2	0	1.5	1.5	0	0	0	0	0	0	0	4.15
PTC	12.3	3.2	1.7	0	0	0.2	0.15	0.38	0	0	0	17.95

表 5.2.19 主要材料の化学組成値 (再分析値) (%)

主原料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	合計
C	21.0	4.5	2.9	64.9	1.2	1.9	0.28	0.47	0.22	0.12	0.17	97.76
LS	0.5	0.4	0.1	54.6	0.5	—	—	—	—	—	0.03	56.10
FA	49.6	30.5	3.1	7.7	1.8	0.2	0.47	0.44	0.0	0.0	0.0	93.81

表 5.2.20 再生セメント原料の化学組成値 (再評価値) (%) (ig. loss 補正後)

再生セメント		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
NCC	a'	21.2	6.0	1.6	69.1	1.2	0.4	0.13	0.16	0.06	0.03	0.06
	e	22.4	6.0	3.7	65.7	1.1	0.4	0.12	0.15	0.06	0.03	0.06
HCC	a'	20.8	6.0	1.4	69.8	1.2	0.4	0.13	0.16	0.06	0.03	0.06
	e	21.2	5.6	3.5	67.6	1.1	0.4	0.12	0.15	0.06	0.03	0.06

備考) a' : 推定値 (表 5.2.13,14,19 による成分添加前のセメント原料) e : 推定値 (表 5.2.13-14,18-19 による成分添加後のセメント原料)

(4)再生セメントの物性

成分調整不要型完全リサイクルコンクリートから製造したNCCおよびHCCの再生セメントについて、市販の普通および早強ポルトランドセメントを比較対象とし、その品質について評価する。

表 5.2.21 に NCC および HCC の再生セメントに関する化学組成値および物理的性質を、図 5.2.10 に再生セメントの物理試験 (左：曲げ強さ 右：圧縮強さ)について示す。

セメントの密度、比表面積に関しては、NCC および HCC とともに市販のポルトランドセメント[25]とほぼ同等の性質を保持しており、設定した原料の焼成・粉碎工程により、再生セメントとするための適当な物理的性質が確保されたといえる。

セメントの曲げ強さおよび圧縮強さは、セメント物理試験方法(JIS R 5201)に準じ、40×40×160mmのモルタルバーを作製し、所定材齢にて力学特性を評価した。普通セメントであるNCCに関しては、市販の普通ポルトランドセメントと比較した場合、初期の強度発現性が若干低下するが、長期強度発現性に関してはほぼ同等となった。JIS R 5210に定める普通ポルトランドセメントの品質規格は十分に満足しており、一般的な使用は十分に可能であると思われる。なお、初期の強度発現性が低下した原因としては、前述した成分誤差の問題が関与しており、クリンカー主要成分となるFe₂O₃の増加やアルカリ(Na₂OとK₂O量)の低下などの要因が、最終的に微妙な強度発現性に影響を及ぼしたものと考えられる。早強セメントであるHCCに関しては、市販の早強ポルトランドセメントとほぼ同等の強度発現性を示した。

以上より、成分調整不要型完全リサイクルコンクリートは、目標とする再生セメント原料の組成となるように調合することが理論的に可能であること、また再生したセメントの品質も標準的なポルトランドセメントとほぼ同等の性能となり得ることが示された。なおクリンカーの成分管理には、使用材料の成分を詳細に把握することが不可欠となることなどが課題として示された。

表 5.2.21 再生セメントの化学組成値および物理的性質

再生セメント	化学組成値(%)												鉱物組成値(%)			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
NCC	22.3	5.1	4.2	65.0	1.1	2.1	0.11	0.12	0.31	0.04	0.12	45.4	29.9	6.4	12.7	
HCC	20.5	4.7	4.0	66.2	1.1	3.2	0.10	0.07	0.29	0.03	0.11	63.7	10.9	5.7	12.1	

再生セメントおよび市販セメント	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	曲げ強さ(N/mm ²)				圧縮強さ(N/mm ²)			
			1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	28日
普通ポルトランドセメント	3.15	3,380	—	—	—	—	—	28.7	43.5	60.8
NCC	3.18	3,360	—	4.5	6.3	9.1	—	19.1	29.8	60.6
早強ポルトランドセメント	3.13	4,580	—	—	—	—	26.8	45.1	54.3	64.3
HCC	3.13	4,600	3.8	6.8	8.5	9.9	18.1	40.2	53.4	67.7

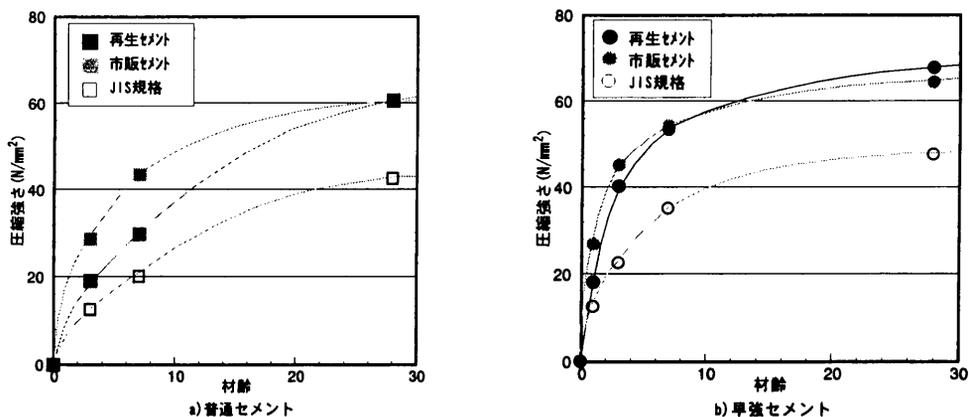


図 5.2.10 再生セメントの物理試験 (左：普通セメント 右：早強セメント)

5.2.6 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートによる資源投入量削減効果

成分調整不要型完全リサイクルコンクリートを導入する主な効果は、産業廃棄物起源材料の使用により、産業廃棄物最終処分量の低減に貢献できること、産業廃棄物起源材料の混入量に比例して石灰石骨材を中心とした天然骨材資源の使用量低減も期待できることなどが主な特徴であるといえる。

本節では、成分調整不要型完全リサイクルコンクリートによる資源投入量削減効果を評価するために、NC60 および HC60 について完全リサイクルコンクリートプロトタイプおよび従来型コンクリートを比較対象とし、それら全量をセメント原料に転換して再生セメントを新たに製造する場合におけるコンクリート1トンあたりの不足成分投入量を推計する。なお、新たに投入する炭酸カルシウムがある場合には、脱炭酸による二酸化炭素排出量についても同時に調べ、地球温暖化物質の排出可能性についても検討する。

図 5.2.11 に各種コンクリート1トン为原料として、再生セメントを製造する際における、不足成分投入量と石灰岩の脱炭酸化分 CO₂ の排出量を、図 5.2.12 に完全リサイクルコンクリートである PT60、NC60、HC60 に着目した場合のセメント原料転換時における不足成分投入量と石灰岩の脱炭酸化分 CO₂ の排出量を示す。成分調整不要型完全リサイクルコンクリートである NC60 および HC60 は、セメント原料の主要5成分となる材料の投入をほとんど要しない状態で再生セメントとすることが可能であることがわかる。完全リサイクルコンクリートプロトタイプである PT60 は、石灰石骨材による炭酸カルシウム分が過剰となることから、全量をセメント原料とするために主要5成分のうちの不足量を追加する必要があり、最終的な資源投入量は、コンクリート 1000kg を原料とした場合 180kg 程度必要になることがわかる。これらに対し従来型コンクリートの場合は、全量をセメント原料にすることが困難である。例えば、1トンのコンクリート全量がセメント1トンに転換されることを想定して、必要となる主要成分の投入量として示した場合、結果的に1.6トンを越える新たな資源投入の必要があり、その際、石灰石骨材の投入に伴う二酸化炭素発生量も大きく増加することが理解できる。

なお、従来型コンクリートを比較対象とし、成分調整不要型完全リサイクルコンクリートによる二酸化炭素排出量抑制効果を詳細に検討するためには、二酸化炭素排出に関連するインベントリー要因を詳細に分析した上で、産業廃棄物起源材料の使用による二酸化炭素削減効果、セメント原料として繰り返し再生した場合の二酸化炭素削減効果など、脱炭酸化する炭酸カルシウムの使用量削減に伴う二酸化炭素削減効果など明確にした上で評価する必要があることを示しておく。

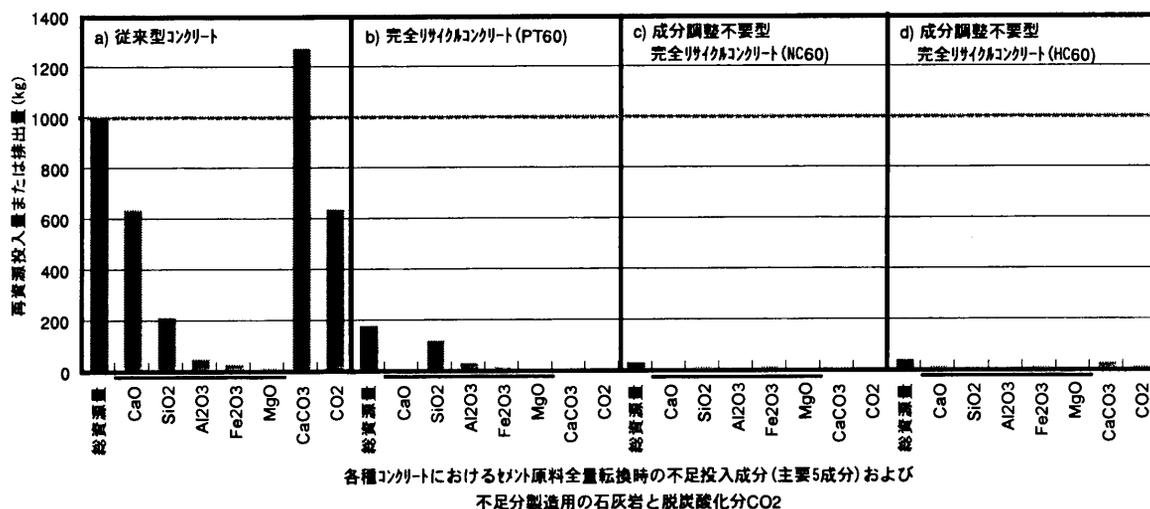


図 5.2.11 各種コンクリート1トンあたりのセメント原料転換時における不足成分投入量と石灰岩の脱炭酸化分 CO₂ の排出量

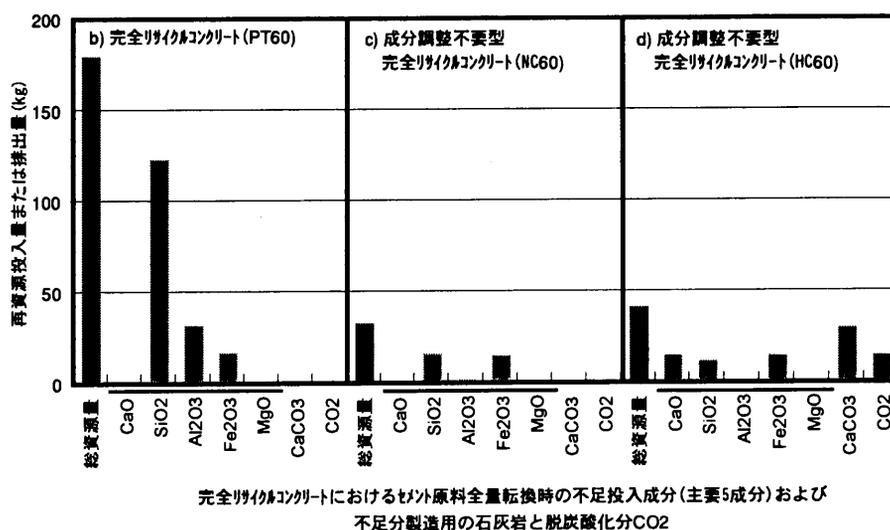


図 5.2.12 完全リサイクルコンクリート 1t あたりのセメント原料転換時における不足成分投入量と石灰岩の脱炭酸化合 CO₂ の排出量

5.2.7 まとめ

本節では、成分調整不要型完全リサイクルコンクリートについて検討した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 完全リサイクルコンクリートに対して、材料的価値に乏しく最終処分される傾向がある産業廃棄物起源材料をコンクリートに適宜導入することで、成分調整不要型完全リサイクルコンクリートとすることが可能になり、産業廃棄物起源材料の最終処分量を抑制することが可能になる。
- 2) 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートは、石灰石骨材のみを使用した完全リサイクルコンクリートプロトタイプと同等の基礎的物性を保持しており、耐久性も大きく低下することはないといえる。
- 3) 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートを原料とした再生セメントの品質は、標準的なポルトランドセメントと同程度の品質となる。なお本実験では、再生セメントを試製セメントとして製造したため、早期の強度発現性が若干小さくなる傾向があったが、成分調整不要性はほぼ実証されたといえる。
- 4) 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの全量を再生セメント化することで、セメント製造時に必要となるバージン材料の投入量および、セメント製造時に発生する二酸化炭素排出量の低減が期待できるため、セメント原料としてコンクリート中で材料保存する意義は大きい。

5.3 完全リサイクルコンクリートの利用拡大に向けた材料調整手法の検討

5.3.1 背景と目的

セメント回収型—完全リサイクルコンクリートは、完全リサイクルコンクリートプロトタイプのように、全骨材が石灰石骨材で構成され、セメント成分としての不足分を補うタイプと、コンクリート構成材料に産業廃棄物起源材料を積極導入し、成分調整が不要のままセメント原料となるタイプに大別され、その基礎的性質が明らかにされた。なお双方のセメント回収型—完全リサイクルコンクリートにより、セメント原料を構造物の中で貯蔵することが可能になり、建築物における材料・素材の本質的機能を満たすための材料保存性が確保されることになる。

本章では、これらのセメント回収型—完全リサイクルコンクリートの利用拡大に向けた材料調整手法に関する検討を行う。まず、5.3.2の「汎用型コンクリートと粒形改善型コンクリートの基礎的性質」において、建設工事において完全リサイクルコンクリートの一般的な使用を容易にするために、国内各地における一定の規模を有する石灰岩鉱山から製造される石灰石骨材の品質特性、需給体制等の諸条件を考慮して、将来的に関東地区を中心に一般的に使用することが比較的容易である石灰石骨材を選定する。そして、同骨材を汎用タイプ石灰石骨材と位置づけ、それを構成材料とした汎用型完全リサイクルコンクリートを製造する。汎用型完全リサイクルコンクリートの材料構成は、完全リサイクルコンクリートプロトタイプと同様であるとし、再生時に不足成分を補うことで全量がセメント原料となるタイプとして位置づける。

続いて、石灰石砕砂が現在一般的に使用されている堆積岩系の砕砂と比較して、粒形が悪く微粉量が多く発生するという傾向があるため、コンクリートは単位水量の増加に起因して品質低下を起こすことが予想される。従って、汎用型石灰石砕砂の製造工程に粒形改善工程を導入した製造フローにより得られる粒形改善石灰石砕砂を使用して、粒形改善型完全リサイクルコンクリートも製造し、それらの完全リサイクルコンクリートの基礎的物性について調査する。

最後に、5.3.3の「完全リサイクルコンクリート標準調合表の提案」においては、汎用型コンクリートと粒形改善型コンクリートに関する完全リサイクルコンクリートの標準調合表を作成し、建設時における一時的な使用を容易にするための方策として提示する。

5.3.2 汎用型コンクリートと粒形改善型コンクリートの基礎的性質

本節では、粗骨材として汎用型の石灰石砕石を一定とし、細骨材に汎用型石灰石砕砂を使用した汎用型コンクリート、および粒形改善石灰石砕砂を使用した粒形改善型コンクリートについて、陸砂を使用した石灰石骨材コンクリートを比較対象とした基礎的物性の調査を行う。同時に、細骨材の粒形改善効果について検討する。

(1) 使用材料

表 5.3.1 に使用材料の特性を、図 5.3.1 に 0.6mm～1.2mm 範囲における市販石灰石砕砂と粒形改善石灰石砕砂の顕微鏡写真を、図 5.3.2 に各種骨材の製造フローを、図 5.3.3 に各種骨材の粒度分布を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを、粗骨材には秩父横手産の汎用型石灰石砕石(L)を、細骨材に

は同じく秩父横手産の汎用型石灰石砕砂(L)、粒形改善型石灰石砕砂(Lr)および現在一般的に使用されている大井川産陸砂(N)の材料により構成される。汎用型石灰石砕砂は微粉量・粒形・粒度分布がコンクリート用細骨材として適当な品質を保持したものであり、単独使用が可能であるものと判断される[26-27]。粒形改善石灰石砕砂は汎用型石灰石砕砂の製造工程に、骨材の擦りもみ機構を有する処理工程を追加して製造したものであり、汎用型石灰石砕砂の角部分のみが擦り揉まれた結果、粒形判定実積率が大きく改善されており、57.0%から62.6%まで増加している。またそれは、0.6~2.5mmの全粒度を通じて粒形を改善するものであり、粒度分布、微粉発生量、製品回収率に関しても問題のない程度の処理機構により製造されている。なお、製造フローにおいて確認されるように、石灰石骨材の製造時に発生した石灰石微粉末は、セメント原料に使用可能であり、また鉄鋼産業、化学産業などを中心に十分な用途が確立しているため[28]、最終処分されることなく利用される。

表 5.3.1 使用材料の特性

種類	記号	種類	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実績率 (%)	粒形判定実績率 (%)	粗粒率	微粉量 (%)
細骨材	L	汎用型石灰石砕砂	2.70	0.33	1.82	67.6	57.0	2.65	10.4
	Lr	粒形改善石灰石砕砂	2.66	1.46	1.80	68.7	62.6	2.64	8.1
	N	陸砂	2.58	2.07	1.72	68.0	58.6	2.66	1.3
粗骨材	L	汎用型石灰石砕石	2.71	0.24	1.64	60.9	60.7	6.86	1.2

備考) 普通ポルトランドセメント 密度 3.16 (g/cm³)



図 5.3.1 汎用型石灰石砕砂と粒形改善型石灰石砕砂 (粒径 0.6-1.2mm)

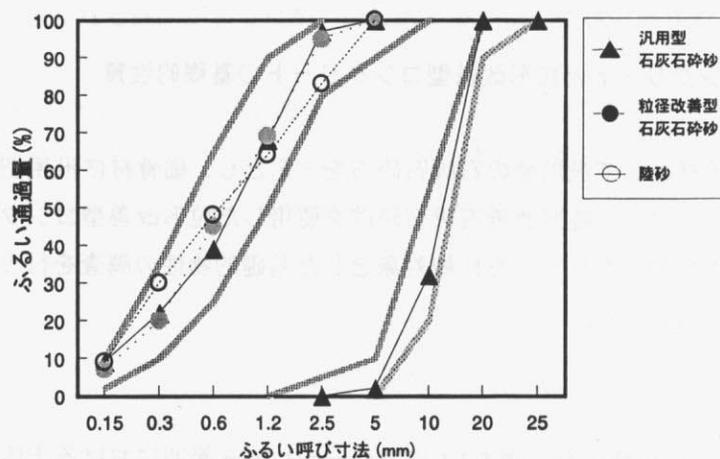


図 5.3.2 汎用型石灰石骨材と粒形改善型石灰石砕砂の粒度分布

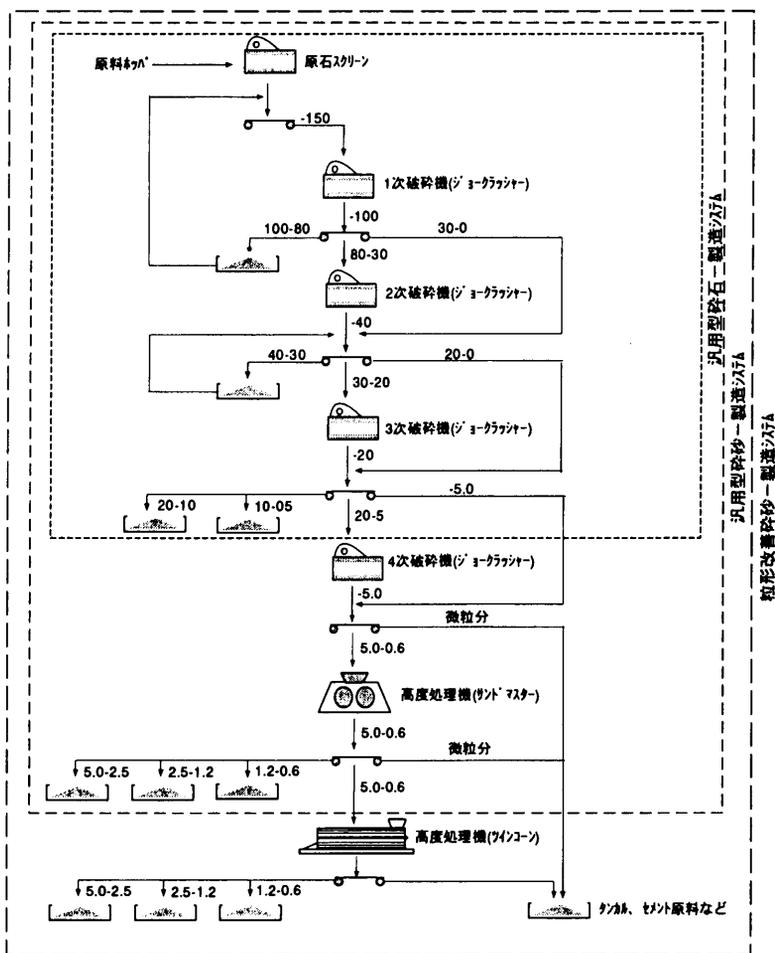


図 5.3.3 汎用型石灰石骨材と粒形改善型石灰石砕砂の製造フロー

(2)実験方法と計画調査

表 5.3.2 にフレッシュ性状用のコンクリート調合条件を、表 5.3.3 に力学特性用のコンクリート調合条件を、表 5.3.4 にコンクリートの計画調査表を、表 5.3.5 に実験項目と実験方法を示す。本節では、細骨材に汎用型石灰石砕砂 L を使用した LL、粒形改善型石灰石砕砂 L_r を使用した LR および比較用の陸砂 N を使用した LN の各種コンクリートについてフレッシュ性状(スランプ、空気量、ブリーディング)および力学特性(圧縮強度、ヤング係数、引張強度)を検討した。フレッシュ性状に関しては、LL、LR および LN における粗骨材が同一で、細骨材粒形が相違する場合の影響を検討するため、単位粗骨

表 5.3.2 コンクリート調合条件(フレッシュ性状)

設定	シリーズ I	シリーズ II
水セメント比	0.35	0.4、0.5、0.6
目標スランプ	21 ± 1.5 cm	12、15、18 ± 1.5 cm
目標空気量	2.0 ± 1.5 %	4.5 ± 1.5 %

表 5.3.3 コンクリート調合条件(力学特性)

設定	高強度	普通強度
水セメント比	0.3	0.6
目標スランプ	21 ± 1.5 cm	18 ± 1.5 cm
目標空気量	2.0 ± 1.5 %	4.0 ± 1.5 %

表 5.3.4 コンクリートの計画調合(力学特性)

コンクリート種類	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位容積 (l/m ³)			単位質量 (kg/m ³)			化学混和剤 使用量(C×%)		
			セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材	A1	A2	A3
LL30	43.2	160	163	284	373	516	767	1011	0.002	---	0.8
LL60	45.2	174	90	312	379	285	842	1028	0.002	0.1	--
LR30	44.4	160	163	292	365	516	777	989	0.002	---	0.5
LR60	48.1	158	82	344	371	259	915	1005	0.005	0.1	--

A1: 空気量調整剤 A2: AE 減水剤(リグニンスルホン酸系化合物) A3: 高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物)

表 5.3.5 実験項目および実験方法

試験項目	試験方法	備考
空気量試験	JIS A 1128	LL、LR、LN の全てについて実施
スランブ試験	JIS A 1101	
ブリーディング試験	JIS A 1123	
圧縮強度試験	JIS A 1108	LL、LR について材齢 7,28,91 日 (標準養生) で実施
静弾性係数試験	JIS 原案	LL、LR について材齢 28 日 (標準養生) で実施
割裂引張強度試験	IS A 1113	LL、LR について材齢 7,28,91 日 (標準養生) で実施

材かさ容積を一定とした上で、同一水セメント比で構成される水セメント比 0.35、0.4、0.5、0.6 のペーストに対し、一定量の細骨材を加えたモルタルのコンシステンシーが、各シリーズともに同程度となるように細骨材量の調整を図るという方法に基づいた調合設計を行った。力学特性に関しては、LL、LR における水セメント比 0.3 の高強度シリーズと、水セメント比 0.6 の普通強度シリーズに関して、細骨材種の違いがコンクリートの力学特性に及ぼす影響を調査した。

(3) フレッシュ性状と粒形改善効果

図 5.3.4 にコンクリートのスランブ値と単位水量の関係を、図 5.3.5 にコンクリートのブリーディング量を、図 5.3.6 に細骨材の粒形改善が化学混和剤使用量とスランブ値に及ぼす影響について示す。

単位水量に関しては、目標スランブを確保するための必要水量を、練り試験により決定しており、汎用型コンクリート、比較用コンクリート、粒形改善型コンクリートの順に減少することが確認された。特に粒形改善型コンクリート LR に関しては、汎用型コンクリート LL と比較して水セメント比 0.4~0.6 の範囲で、単位水量 15~20kg/m³ の低減が可能であり、細骨材の粒形改善が単位水量低減に及ぼす影響が大きいことが確認された。なおその割合は、粒形判定実積率の増加に反比例するといえる。なお汎用型コンクリート LL に関しても、大井川産陸砂を使用し、良好なフレッシュ状態を確保しやすい比較用コンクリート LN と同等のフレッシュ性状であったため、コンクリート工事において一般的な使用が十分に期待されるものであるといえる。

ブリーディング量に関しては、粒形改善型コンクリート LR は比較用陸砂コンクリート LN と比較して、終結時水量が 50%程度であり、汎用型コンクリート LL は比較用陸砂コンクリート LN よりも全種類を通じて水量が若干多く発生した。

粒形改善効果が化学混和剤使用量とスランブ値に及ぼす影響に関しては、水セメント比 0.35 の汎用型コンクリート LL と粒形改善型コンクリート LR について、双方がスランブ 21cm を確保するために要した化学混和剤の使用量を示すが、粒形改善型コンクリート LR の場合、セメント量の 0.3%程度減量させることが可能であり、汎用型コンクリート LL の 60%程度の使用量で同一スランブを確保することが可能であることが示された。また化学混和剤使用量をセメント量の 0.4%で一定とした場合、

汎用型コンクリート LL は、スランプ値が 8cm 程度であったのに対し、粒形改善型コンクリート LR は 13cm 程度大きい値となるスランプ 21cm を確保することが可能であり、細骨材の粒形改善がコンクリートのコンシステンシーを大きく向上させることが確認された。

比較用陸砂コンクリート LN は、粗骨材に石灰石砕石を用いており、現在も地域的には、一般的に使用されるコンクリートの調合事例となる。この調合を比較用として、各シリーズのフレッシュ性状を評価したが、汎用型および粒形改善型完全リサイクルコンクリート LL および LR は、総じて良好なフレッシュ性状を保持するコンクリートとなることが確認された。細骨材の粒形改善を行った場合は、単位水量およびブリーディング水を大きく低減することが可能となり、その性質は、結果として、セメント使用量、化学混和剤使用量の低減にも繋がるといえる。この特性は、コンクリートの基礎力学特性および耐久性の向上に寄与することが期待できる。

以上より、一般的な砕石骨材の製造工程に、粒形改善工程を導入することは、主に単位水量低減に起因するコンクリートの基礎的性質の向上を図ることができるため、細骨材の粒形改善効果は有用であるといえる。

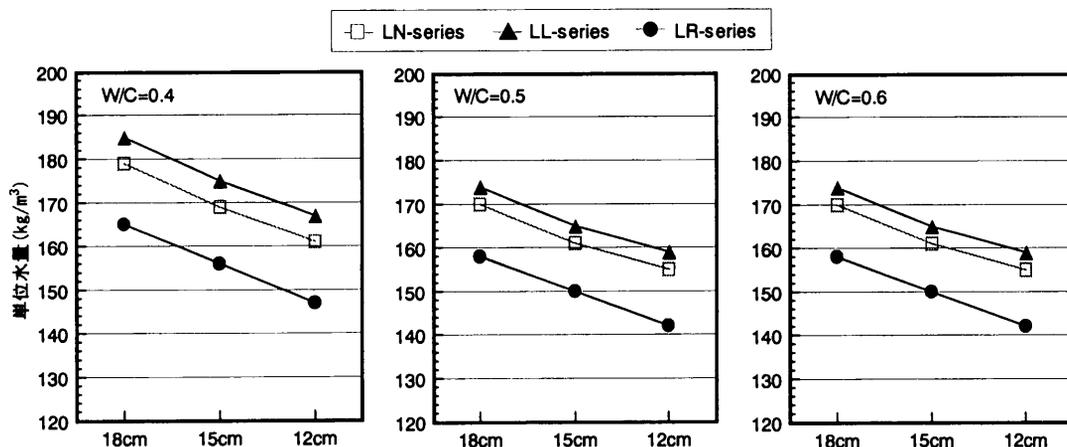


図 5.3.4 スランプ値と単位水量の関係

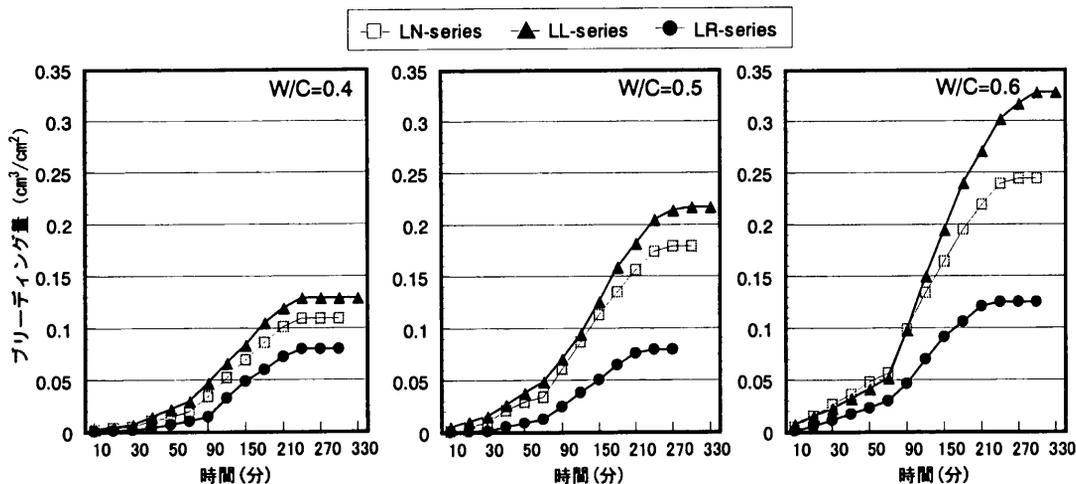


図 5.3.5 ブリーディング量の変化

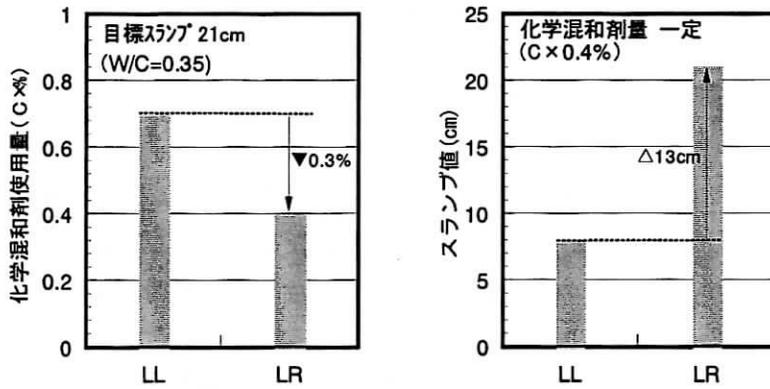


図 5.3.6 骨材の粒形改善が化学混和剤使用量とスランプ値に及ぼす影響

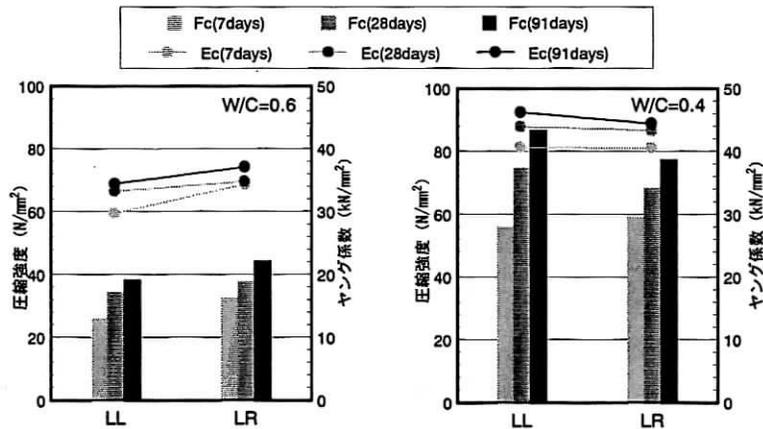


図 5.3.7 圧縮強度とヤング係数(左：普通強度 右：高強度)

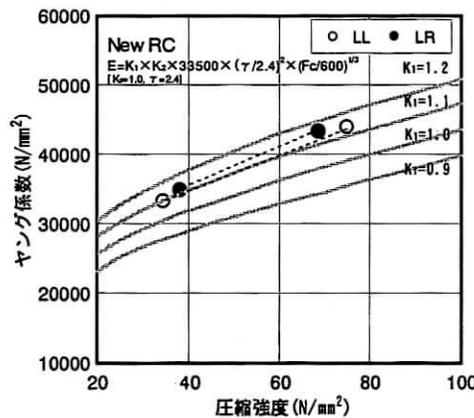


図 5.3.8 圧縮強度とヤング係数(New RC 式との相関)

(4)力学特性と粒形改善効果

図 5.3.7 にコンクリートの圧縮強度とヤング係数に関係を、図 5.3.8 に New RC 式との相関を評価するための圧縮強度とヤング係数の関係を示す。

圧縮強度は、高強度の汎用型コンクリートが粒形改善型コンクリートと比較して若干大きくなる。普通強度の場合には逆の傾向を示し、ヤング係数に関しても同様であった。New RC 式と示した圧縮強度とヤング係数の関係からは、粒形改善の有無に関わらず、ほぼ同様の強度増加履歴を示しており、細骨材の粒形が力学特性に及ぼす影響は殆どないといえる。以上、汎用型および粒形改善型コンクリートの力学特性はほぼ同等であり、一般的な構造用コンクリートとして十分に使用が可能である。

5.3.3 完全リサイクルコンクリート標準調合表の提案

コンクリート構造物に使用されるコンクリートの種類は数多く存在し、用途および設計強度に応じて適宜選定されているといえるが、コンクリート構造物に使用されてからの年数や歴史的経緯を鑑みると、今後も構造物に要求される性能を充足するために、コンクリートの製造技術は発展し続けるものと思われる。そして、新しく開発されたコンクリートを構造物に適用可能にし、一般的に使用される状態を確立するためには、技術的な課題を第1として、その他、導入する上で制度的な課題を解決するようないくつかの段階を経る必要があるといえるが、実際にコンクリートを製造する際に必要となる試験調合の基礎データとなる標準調合表を作成する方法は、普及を図る上での手法として評価することができると思われる。

本節では、汎用型コンクリート LL、粒形改善型コンクリート LR および比較用の陸砂コンクリート LN における水セメント比 0.35、0.4、0.5、0.6 のコンクリートに対し、日本建築学会コンクリート調合設計指針・同解説に示される参考調合表[29]を基に、骨材粒形に起因する必要単位水量の修正を加えた推定調合を試算し、得られた推定調合を参考に試し練り試験を実施し、最終的に完全リサイクルコンクリートにおける構成材料の特徴を反映した標準調合表を作成した。以上より、完全リサイクルコンクリートの実務的な使用を可能にするための石灰石骨材コンクリート、汎用型完全リサイクルコンクリート、粒形改善型完全リサイクルコンクリートの調合設計に関する基礎データの整備ができる。

(1)使用材料

使用材料は前節と同様とし、汎用型石灰石砕石を粗骨材として、汎用型石灰石砕砂、粒形改善型石灰石砕砂および陸砂の3種類を細骨材として使用する。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。表 5.3.6 に使用材料について示す。

(2)実験方法

表 5.3.7 に実験要因と水準を、表 5.3.8 にコンクリートの調合条件を、表 5.3.9 に実験項目および実験方法を示す。コンクリートは細骨材の種類で区別される3種類とし、水セメント比を4水準、スランプ値を4水準とした全23種類の標準調合表を作成する。なおスランプ値が21cmのシリーズに関しては、今後コンクリート構造物の高性能化・高強度化が進む現状を鑑みて、水セメント比0.35シリーズを設定して検討を行った。

図 5.3.9 に完全リサイクルコンクリートの標準調合作成の手順を示す。最初に、日本建築学会コンクリートの調合設計指針・同解説に示されるコンクリートの参考調合表の実測データを基に、比較用で陸砂を使用する石灰石骨材コンクリートとほぼ同様の組み合わせとなる砕石・川砂の参考調合を選定する。そして、骨材の粒形・粗粒率に起因する必要単位水量の修正を行った推定調合を算定し、そ

表 5.3.6 使用材料の特性

種類	記号	種類	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積 質量 (kg/l)	実績率 (%)	粒形判定 実績率 (%)	粗粒率	微粉量 (%)
細骨材	L	汎用型石灰石砕砂	2.70	0.33	1.82	67.6	57.0	2.65	10.4
	Lr	粒形改善石灰石砕砂	2.66	1.46	1.80	68.7	62.6	2.64	8.1
	N	陸砂	2.58	2.07	1.72	68.0	58.6	2.66	1.3
粗骨材	L	汎用型石灰石砕石	2.71	0.24	1.64	60.9	60.7	6.86	1.2

備考) 普通ポルトランドセメント 密度 3.16 (g/cm³)

れをもとに試し練りを実施し、目標スランプを満たす調合が得られた時点で石灰石骨材コンクリートの標準調合表として決定する。続いて、汎用型完全リサイクルコンクリートについては、石灰石骨材コンクリートと比較した場合、細骨材が相違する調合として位置づけられるため、細骨材特性の違いを反映することで推定調合を作成することが可能であるが、本研究では、石灰石骨材コンクリートの場合と同様に、日本建築学会の参考調合表を基にした推定調合を作成し、試し練りを実施して汎用型完全リサイクルコンクリートの標準調合として決定する。最後に、粒形改善型完全リサイクルコンクリートについては、汎用型完全リサイクルコンクリートにおける細骨材が粒形改善された場合の調合であるため、汎用型完全リサイクルコンクリートより細骨材品質の違いを反映した推定調合を作成し、試し練りを実施して粒形改善型完全リサイクルコンクリートの標準調合として決定する。

なお、試し練りによる計画調合の修正を行う場合、表 5.3.8 に示すコンクリートの調合条件に従うとした。具体的には、単位粗骨材かさ容積が一定であることから、コンクリートにおけるモルタル部分の調合割合を修正することで、目標スランプを確保する方法、つまり同一水セメント比のペーストに対し、細骨材を加えたモルタルのコンシステンシーが各シリーズとも同程度になるようにペースト量の割合を調整することにより、調合の修正を実施することを基本的な方針とする。

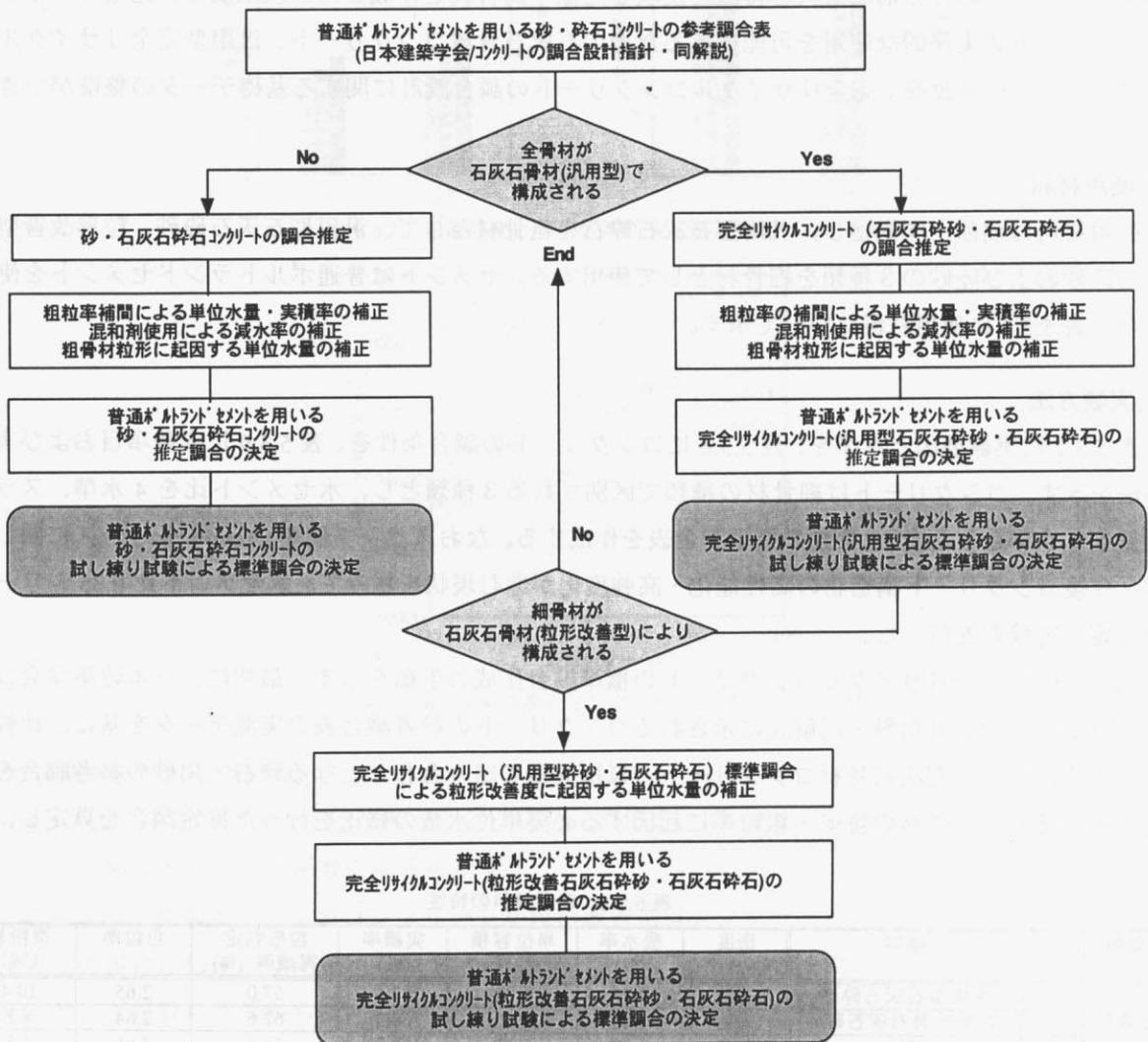


図 5.3.9 完全リサイクルコンクリートの標準調合作成の流れ

表 5.3.7 実験要因と水準

実験要因	水準
水セメント比	0.35、0.4、0.5、0.6
スランブ値	12、15、18、21
細骨材	陸砂(N)、汎用型石灰石砕砂(L)、粒形改善石灰石砕砂(Lr)
粗骨材	汎用型石灰石砕石(L)
コンクリート種類	比較用陸砂コンクリート(LN)、汎用型コンクリート(LL)、粒形改善型コンクリート(LR)

表 5.3.8 コンクリートの調合条件

設定	W/C =0.35	W/C =0.4, 0.5, 0.6
目標スランブ	21±1.5 cm	12、15、18 ±1.5 cm
目標空気量	2.0±1.5 %	4.5 ±1.5 %
粗骨材かさ容積	同一水セメント比、同一目標スランブ時において一定	
化学混和剤使用量	同一シリーズにおいて一定	

表 5.3.9 実験項目および実験方法

試験項目	試験方法	備考
空気量試験	JIS A 1128	LL、LR、LN の全てについて実施
スランブ試験	JIS A 1101	
ブリーディング試験	JIS A 1123	

(3)標準調合の作製

(3.1) 石灰石骨材コンクリート

表 5.3.10 に陸砂を使用した石灰石骨材コンクリートの推定調合表と標準調合表を示す。

推定調合表の作成に使用する細骨材が、川砂起源の陸砂で F.M.が 2.66 であることより、日本建築学会コンクリート調合設計指針・同解説で示す普通ポルトランドセメントを用いる砂・碎石コンクリートの参考調合表（碎石-川砂、F. M. 2.8 および 2.2、最大粒形 20mm）の 2 調合を選定する(段階①)。続いて、線形補間により F.M.2.66 に該当する単位粗骨材かさ容積と単位水量を決定する(段階②)。続いて、空気量調整剤により 1 %の連行空気(C×0.002%)を導入した場合、2.5%の減水効果が得られると仮定すると、プレーンコンクリートで 2 %前後の空気量が導入されるとした場合、目標空気量を満たすために空気量調整剤を C×0.003%使用すると、連行空気を導入することによる減水効果が 3.75%得られて単位水量が減量できる(段階③)。最後に、汎用石灰石砕石の粒形が日本建築学会参考調合における標準碎石と比較して良好であるため、石灰石骨材コンクリートは同一粗骨材かさ容積における粗骨材絶対容積が低下する結果、一定のコンシステンシーを得るための余剰モルタル量も減量でき、余剰モルタルに含有する割合分の単位水量を低減することが可能になる(段階④)。余剰モルタル中の含有水量の算定式を式 5.3.1 に示す。

以上の①から④の段階に基づく検討により、推定調合表を作成することが可能になる。

$$\Delta W = \frac{(1 - \Delta g) \cdot V_g}{1000 - V_g} \cdot 100 \quad \dots \text{式(5.3.1)}$$

ここに、 ΔW ：余剰モルタルに含有する単位水量低減率、 Δg ：汎用型石灰石砕石に対する標準碎石の実積率比、 V_g ：粗骨材の絶対容積

推定調合表を基に標準調合の作成を行う。推定調合表を基にした試し練りを行ない、練混ぜ時の流動性状および練り混ぜ直後および一定時間経過後の材料分離抵抗性の観察結果、スランブ値、空気量およ

びブリーディング量の実験結果に基づき単位水量を調整し、推定調合表に反映した。結果、単位粗骨材かさ容積を0.02、単位水量を6~13kg低下させることで、目標スランプおよび空気量を満たすことが可能となり、標準調合として位置づけることが可能となった。

以上のプロセスにより、石灰石骨材コンクリートの標準調合を作成した。なお、本実験で使用した汎用型石灰石砕石は、一般的に使用されている堆積岩系の硬質砂岩砕石や火成岩系の安山岩砕石と比較して、粒形、粒度が良好であると考えられる。結果、必要単位水量を低減することが可能になったともいえる。従って、本調合により得られる石灰石骨材コンクリートは、単位水量の低下に起因する基礎的性質の向上が期待できるといえる。

表 5.3.10 石灰石骨材コンクリートの推定調合表と標準調合表

①日本建築学会参考調合（砕石-川砂，F. M. 2.8 および 2.2，最大粒形 20mm）

W/C (%)	スランプ (cm)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位容積 (l/m ³)			単位質量 (kg/m ³)			粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	化学混和剤使用量 (C×%)	
				セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材		A1	A2
40	18	39.3	195	154	238	368	488	619	957	0.62	---	250
50	18	43.5	186	118	283	368	372	736	957	0.62	---	250
60	18	46	179	94	314	368	298	816	957	0.62	---	250
40	18	32.6	228	180	190	392	570	494	1019	0.66	---	250
50	18	38.4	217	137	244	392	434	634	1019	0.66	---	250
60	18	41.6	209	110	279	392	348	725	1019	0.66	---	250

②線形補間により、F.M.2.65におけるかさ容積と単位水量を補正

40	18	---	203	---	---	---	---	---	---	0.63	---	250
50	18	---	193	---	---	---	---	---	---	0.63	---	250
60	18	---	186	---	---	---	---	---	---	0.63	---	250

③空気量調整剤による減水効果を考慮した推定調合

40	18	36.6	195 (+16)	154	222	384	488	597	1036	0.63	0.003	250
50	18	41.1	186 (+16)	118	268	384	372	720	1036	0.63	0.003	250
60	18	43.7	179 (+9)	94	298	384	298	801	1036	0.63	0.003	250

④粗骨材粒形による減水効果を考慮した推定調合

40	18	37.2	192 (+13)	152	227	384	480	612	1036	0.63	0.003	250
50	18	41.5	183 (+13)	116	272	384	366	733	1036	0.63	0.003	250
60	18	44.1	176 (+6)	93	302	384	294	813	1036	0.63	0.003	250

○石灰石骨材コンクリートの参考調合（石灰石砕石-川砂，F. M. 2.65，最大粒形 20mm）

W/C (%)	スランプ (cm)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位容積 (l/m ³)			単位質量 (kg/m ³)			粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	化学混和剤使用量 (C×%)	
				セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材		A1	A2
40	18	41.5	179	142	263	371	448	679	1005	0.61	0.003	1.0
50	18	45.2	170	108	306	371	340	789	1005	0.61	0.003	1.0
60	18	46.6	170	90	324	371	283	836	1005	0.61	0.003	1.0

備考) A1: 空気量調整剤 A2: AE 減水剤

(3.2) 汎用砕砂型完全リサイクルコンクリート

表 5.3.11 に汎用型石灰石砕石および汎用型石灰石砕砂を使用した汎用型完全リサイクルコンクリートの標準調合表を示す。

推定調合表の作成を行う。使用する汎用型石灰石砕砂は実積率が陸砂とほぼ同等であり、F.M.が 2.65 であるため、日本建築学会コンクリート調合設計指針・同解説で示す普通ポルトランドセメントを用いる砂・砕石コンクリートの参考調合表（砕石-川砂、F.M. 2.8 および 2.2、最大粒形 20mm）の 2 調合を選定する(段階①)。続いて、線形補間により F.M.2.65 に該当する単位粗骨材かさ容積と単位水量を決定する(段階②)。続いて、空気量調整剤により 1%の連行空気(C×0.002%)を導入した場合、2.5%の減水効果が得られると仮定すると、プレーンコンクリートで 2%前後の空気量が導入されるとした場合、目標空気量を満たすために空気量調整剤を C×0.003%使用すると、連行空気を導入することによる減水効果が 3.75%得られて単位水量が減量できる(段階③)。最後に、汎用石灰石砕石の粒形が日本建築学会参考調合における標準砕石と比較して良好であるため、石灰石骨材コンクリートは同一粗骨材かさ容積における粗骨材絶対容積が低下する結果、一定のコンシステンシーを得るための余剰モルタル量も減量でき、余剰モルタルに含有する割合分の単位水量を低減することが可能になる(段階④)。余剰モルタル中の含有水量の算定式を式 5.3.2 に示す。

以上の①から④の段階に基づく検討により、推定調合表を作成することが可能になる。

$$\Delta W = \frac{(1 - \Delta g) \cdot V_g}{1000 - V_g} \cdot 100 \quad \dots \text{(式5.3.2)}$$

ここに、 ΔW ：余剰モルタルに含有する単位水量低減率、 Δg ：汎用型石灰石砕石に対する標準砕石の実積率比、 V_g ：粗骨材の絶対容積

推定調合表を基に標準調合の作成を行う。推定調合表を基にした試し練りを行ない、練混ぜ時の流動性状および練り混ぜ直後および一定時間経過後の材料分離抵抗性の観察結果、スランプ値、空気量およびブリーディング量の実験結果に基づき単位水量を調整し、推定調合表に反映した。結果、単位粗骨材かさ容積を 0.02、単位水量を 0~5kg 低下させることで、目標スランプおよび空気量を満たすことが可能となり、標準調合として位置づけることが可能となった。ここでは、推定調合と標準調合における単位水量がほぼ同等となる調合も存在し、その傾向は低水セメント比の場合に顕著であった。

以上、汎用型完全リサイクルコンクリートの標準調合は、日本建築学会コンクリート調合設計指針・同解説における砂・砕石コンクリートの参考調合よりも石灰石砕石の粒形が優れる性質などにより必要単位水量を大きく低減することが可能となる。従って、本調合表により製造されるコンクリートは、単位水量の低下に起因する基礎的性質の向上が大きく期待されるといえる。なお、本調合表はセメント回収型-完全リサイクルコンクリートをコンクリート構造物に適用することを目標に作成したものであり、将来的に骨材資源として使用される可能性の高い石灰石骨材を予め選定しているため、完全リサイクルコンクリートにおける標準調合のプロトタイプになり得るものである。

表 5.2.11 汎用砕砂型-完全リサイクルコンクリートの推定調合表と標準調合表

①日本建築学会参考調合 (砕石-川砂, F. M. 2.8 および 2.2, 最大粒径 20mm)

W/C (%)	スラブ (cm)	s/a (%)	単位水量 (kg/m³)	単位容積 (l/m³)			単位質量 (kg/m³)			粗骨材 かさ容積 (m³/m³)	化学混和剤使用量 (C×%)		
				セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材		A1	A2	A3
35	21	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.5
	12	---	176	---	---	---	---	---	0.67	---	250	---	---
	15	---	184	---	---	---	---	---	0.66	---	250	---	---
40	18	---	195	---	---	---	---	---	0.62	---	250	---	---
	12	---	168	---	---	---	---	---	0.67	---	250	---	---
	15	---	175	---	---	---	---	---	0.66	---	250	---	---
50	18	---	186	---	---	---	---	---	0.62	---	250	---	---
	12	---	163	---	---	---	---	---	0.67	---	250	---	---
	15	---	169	---	---	---	---	---	0.66	---	250	---	---
60	18	---	179	---	---	---	---	---	0.62	---	250	---	---
	12	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.5
	15	---	179	---	---	---	---	---	0.72	---	250	---	---
40	15	---	189	---	---	---	---	---	0.71	---	250	---	---
	18	---	198	---	---	---	---	---	0.67	---	250	---	---
	12	---	172	---	---	---	---	---	0.72	---	250	---	---
50	15	---	178	---	---	---	---	---	0.71	---	250	---	---
	18	---	189	---	---	---	---	---	0.67	---	250	---	---
	12	---	167	---	---	---	---	---	0.72	---	250	---	---
60	15	---	172	---	---	---	---	---	0.71	---	250	---	---
	18	---	182	---	---	---	---	---	0.67	---	250	---	---

②線形補間により、F.M.2.65におけるかさ容積と単位水量の補正

35	21	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.5
	12	---	177	---	---	---	---	---	0.68	---	250	---	---
	15	---	185	---	---	---	---	---	0.67	---	250	---	---
40	18	---	196	---	---	---	---	---	0.63	---	250	---	---
	12	---	169	---	---	---	---	---	0.68	---	250	---	---
	15	---	176	---	---	---	---	---	0.67	---	250	---	---
50	18	---	187	---	---	---	---	---	0.63	---	250	---	---
	12	---	164	---	---	---	---	---	0.68	---	250	---	---
	15	---	170	---	---	---	---	---	0.67	---	250	---	---
60	18	---	180	---	---	---	---	---	0.63	---	250	---	---

③空気量調整剤による減水効果を考慮した推定調合

35	21	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	12	36.4	170 (+3)	134	237	414	425	636	1118	0.68	0.003	250	---
	15	35.8	178 (+3)	141	228	408	445	613	1102	0.67	0.003	250	---
40	18	37.9	188 (+3)	149	234	384	470	630	1036	0.63	0.003	250	---
	12	40.0	162 (+3)	103	276	414	325	741	1118	0.68	0.003	250	---
	15	39.9	169 (+4)	107	271	408	338	729	1102	0.67	0.003	250	---
50	18	42.0	180 (+4)	114	278	384	359	748	1036	0.63	0.003	250	---
	12	42.0	158 (-1)	83	300	414	263	807	1118	0.68	0.003	250	---
	15	42.2	163 (-2)	86	298	408	272	801	1102	0.67	0.003	250	---
60	18	44.5	173 (-1)	91	307	384	288	827	1036	0.63	0.003	250	---

④粗骨材粒形による減水効果を考慮した推定調合

35	21	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	12	36.9	167 (0)	132	242	414	417	651	1118	0.68	0.003	250	---
	15	36.4	175 (0)	138	234	408	437	628	1102	0.67	0.003	250	---
40	18	38.4	185 (0)	147	240	384	463	645	1036	0.63	0.003	250	---
	12	40.4	160 (+1)	101	280	414	319	754	1118	0.68	0.003	250	---
	15	40.3	166 (+1)	105	276	408	332	742	1102	0.67	0.003	250	---
50	18	42.4	177 (+3)	112	283	384	353	761	1036	0.63	0.003	250	---
	12	42.4	155 (+4)	82	304	414	258	819	1118	0.68	0.003	250	---
	15	42.5	160 (+5)	85	302	408	267	813	1102	0.67	0.003	250	---
60	18	44.8	170 (+4)	90	312	384	283	838	1036	0.63	0.003	250	---

○汎用砕砂を使用した完全リサイクルコンクリートの参考調合 (石灰石砕石-汎用砕砂, F. M. 2.64, 最大粒径 20mm)

W/C (%)	スラブ (cm)	s/a (%)	単位水量 (kg/m³)	単位容積 (l/m³)			単位質量 (kg/m³)			粗骨材 かさ容積 (m³/m³)	化学混和剤使用量 (C×%)		
				セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材		A1	A2	A3
35	21	46	160	145	311	365	457	839	989	0.6	---	---	0.6
	12	38.7	167	132	254	402	418	686	1089	0.66	0.003	250	---
	15	38.2	175	137	245	396	438	662	1073	0.65	0.002	250	---
40	18	40.4	185	147	252	371	463	680	1005	0.61	0.002	250	---
	12	42.2	159	101	293	402	318	791	1089	0.66	0.003	---	---
	15	42.3	165	104	290	396	330	783	1073	0.65	0.003	250	---
50	18	44.7	174	110	300	371	348	810	1005	0.61	0.002	250	---
	12	43.5	159	84	310	402	265	837	1089	0.66	0.003	---	---
	15	44	165	87	307	391	275	829	1073	0.65	0.002	250	---
60	18	46.2	174	92	318	371	290	859	1005	0.61	0.002	250	---

備考) A1: 空気量調整剤 A2: AE 減水剤 A3: 高性能 AE 減水剤

(3.3) 粒形改善砕砂型－完全リサイクルコンクリート

表 5.3.12 に汎用型石灰石砕砂および粒形改善石灰石砕砂を使用した粒形改善型完全リサイクルコンクリートの標準調合表を示す。

推定調合表の作成を行う。粒形改善型完全リサイクルコンクリートは汎用型完全リサイクルコンクリートと比較して、細骨材である粒形改善型石灰石砕砂が汎用型石灰石砕砂よりも粒形が優れ実積率が大きいという性質以外は同等に扱うことができる。細骨材の粒形に起因する単位水量の低減方法を2通りの場合で検討する。

第1の方法は、同一細骨材かさ容積の場合、粒形改善型シリーズの細骨材絶対容積が低下することから余剰モルタル量を減量し、結果的に余剰ペーストに含有する割合分の単位水量を低減することが可能になる方法であり、前記の石灰石骨材コンクリートと汎用型完全リサイクルコンクリートの標準調合を作成する際に、粗骨材に対して適用した手法を細骨材に適用するものである(段階②)。余剰ペースト中の含有水量の算定式を式 5.3.3 に示す。以上より、第1の方法による推定調合表+が作成された。

$$\Delta W = \frac{(1 - \Delta g) \cdot V_s}{1000 - V_s - V_g} \cdot 100 \quad \dots (式5.3.3)$$

ここに、 ΔW ：余剰ペーストに含有する単位水量低減率、 Δg ：粒形改善石灰石砕砂に対する汎用型石灰石砕砂の実積率比、 V_g ：粗骨材の絶対容積、 V_s ：細骨材の絶対容積

第2の方法は、単位粗骨材かさ容積がコンクリートの流動特性の支配要因とされるように、2つの調合の粗骨材かさ容積が同一である場合は、最終的には細骨材のかさ容積によりモルタルの流動特性が決定されると考え、細骨材かさ容積を一定にする方法により推定調合を作成するものである。汎用型完全リサイクルコンクリート標準調合表における汎用型石灰石砕砂の絶対容積からかさ容積を逆算し、単位細骨材かさ容積を算定する。この単位細骨材かさ容積を用いて、粒形改善石灰石砕砂の実積率を乗じ、粒形改善砂の絶対容積を算定し、その他の具体的な材料容量についても算定し、推定調合表として作成した(段階③)。

以上の2つの推定調合表を基に、標準調合表の作成を行う。推定調合表を基にした試し練りを行ない、練混ぜ時の流動性状、練り混ぜ直後および一定時間経過後の材料分離抵抗性の観察結果、スランプ値、空気量およびブリーディング量の実験結果に基づき単位水量を調整し、推定調合表に反映した。第1の方法の場合、単位水量を0～9kg 減少させることで、目標スランプおよび目標空気量を得ることが可能となる。推定調合と標準調合における単位水量がほぼ同等となる調合も存在し、その傾向は高低水セメント比の場合に顕著であった。第2の方法の場合、高水セメント比域では単位水量0～4kg の増加、低水セメント比域では単位水量0～7kg の減少により、目標スランプおよび目標空気量を満たすことが可能となる。第1の方法よりも調合修正が少なく、推定精度が優れたといえる。

以上、粒形改善型完全リサイクルコンクリートの標準調合は、細骨材の粒形が優れる性質などにより、必要単位水量を大幅に低減することが可能である。本調合により製造されるコンクリートは、単位水量の低下に起因する基礎的性質の大幅な向上が期待される。なお、本調合表はセメント回収型－完全リサイクルコンクリートを高性能化し、長期耐久性を確保する必要のあるコンクリート構造物に適用することも考慮して作成されたものであり、将来的に汎用品となる可能性の高い石灰石骨材を予め選定していることを考慮すると、汎用型完全リサイクルコンクリートの高性能コンクリートの標準調合として提案することが可能になる。

表 5.3.12 粒形改善砕砂型-完全リサイクルコンクリートの推定調合表と標準調合表

① 汎用砕砂を使用した完全リサイクルコンクリートの参考調合(石灰石砕石-石灰石砕砂, F. M. 2.65, 最大粒形 20mm)

W/C (%)	スランプ (cm)	s/a (%)	単位水量 (kg/m³)	単位容積 (l/m³)			単位質量 (kg/m³)			粗骨材かさ容積 (m³/m³)	化学混和剤使用量 (C×%)		
				セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材		A1	A2	A3
35	21	46	160	145	311	365	457	839	989	0.6	---	---	0.6
	12	38.7	167	132	254	402	418	686	1089	0.66	0.003	250	---
40	15	38.2	175	137	245	396	438	662	1073	0.65	0.002	250	---
	18	40.4	185	147	252	371	463	680	1005	0.61	0.002	250	---
50	12	42.2	159	101	293	402	318	791	1089	0.66	0.003	---	---
	15	42.3	165	104	290	396	330	783	1073	0.65	0.003	250	---
60	12	43.5	159	84	310	402	265	837	1089	0.66	0.003	---	---
	15	44	165	87	307	391	275	829	1073	0.65	0.002	250	---
	18	46.2	174	92	318	371	290	859	1005	0.61	0.002	250	---

② 細骨材粒形に起因する単位水量低減率による補正調合

35	21					365				0.6			
	12	41	156 (+9)	123	274	402	390	736	1085	0.66	0.003	250	---
40	15	40	164 (+8)	130	265	396	411	712	1069	0.65	0.003	250	---
	18	42	174 (+9)	138	273	371	435	733	1002	0.61	0.003	250	---
50	12	44	145 (+3)	92	316	402	291	850	1085	0.66	0.003	250	---
	15	44	151 (+1)	96	312	396	303	839	1069	0.65	0.003	250	---
60	12	47	160 (+2)	101	323	371	319	869	1002	0.61	0.003	250	---
	15	46	150 (0)	79	334	402	239	898	1085	0.66	0.003	250	---
	18	48	158 (0)	83	343	371	263	922	1002	0.61	0.003	250	---

③ 細骨材絶対容積一定の場合の、ペースト量低減による単位水量低減による補正調合

35	21									0.6			
	12	41.0	153 (+6)	121	279	402	383	750	1085	0.66	0.003	250	---
40	15	40.5	162 (+6)	128	269	396	405	724	1069	0.65	0.003	250	---
	18	42.7	172 (+7)	136	277	371	429	744	1002	0.61	0.003	250	---
50	12	44.5	142 (0)	90	322	402	283	866	1085	0.66	0.003	250	---
	15	44.6	147 (-3)	93	318	396	295	857	1069	0.65	0.003	250	---
60	12	47.0	156 (-2)	99	329	371	312	886	1002	0.61	0.003	250	---
	15	45.9	139 (-3)	73	340	402	232	916	1085	0.66	0.003	250	---
	18	46.3	149 (-1)	78	337	391	248	907	1056	0.65	0.003	250	---
	18	48.5	154 (-4)	81	349	371	256	939	1002	0.61	0.003	250	---

○ 粒形改善砕砂を使用した完全リサイクルコンクリートの参考調合(石灰石砕石-粒形改善砕砂, F. M. 2.64, 最大粒形 20mm)

W/C (%)	スランプ (cm)	s/a (%)	単位水量 (kg/m³)	単位容積 (l/m³)			単位質量 (kg/m³)			粗骨材かさ容積 (m³/m³)	化学混和剤使用量 (C×%)		
				セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材		A1	A2	A3
35	21	45.9	160	145	310	365	457	828	989	0.60	---	---	0.4
	12	41.9	147	116	290	402	368	771	1089	0.66	0.005	1.0	---
40	15	41.4	156	123	280	397	390	745	1075	0.65	0.005	1.0	---
	18	43.7	165	131	288	371	413	766	1005	0.61	0.005	1.0	---
50	12	44.2	142	90	318	402	284	846	1089	0.66	0.005	1.0	---
	15	44.2	150	95	314	396	330	835	1073	0.65	0.005	1.0	---
60	12	46.8	158	100	321	371	316	867	1005	0.61	0.005	1.0	---
	15	45.4	150	79	330	396	250	878	1073	0.65	0.005	1.0	---
	18	48.0	158	83	343	371	263	912	1005	0.61	0.005	1.0	---

備考) A1: 空気量調整剤 A2: AE 減水剤 A3: 高性能 AE 減水剤

(3.4) 完全リサイクルコンクリート標準調合表

表 5.3.13 に石灰石骨材コンクリート、汎用型完全リサイクルコンクリートおよび粒形改善型完全リサイクルコンクリートの標準調合表をまとめて示す。

石灰石骨材コンクリートは、現在でも地域により、一般的に使用されている状況であり、特に骨材資源に乏しい関西以西の地域では多用されている。しかしながら、細骨材が石灰石砕砂ではないため、セメント原料としての材料保存性は確保されない。汎用型完全リサイクルコンクリートは、実務的に使用されることを前提としており、この標準調合表を利用して完全リサイクルコンクリートの使用が一般化することが合理的となる可能性がある。そして将来的に、砕砂を製造する際に粒形改善工程の導入が一般化した場合、粒形改善型完全リサイクルコンクリートによる標準調合表が有効に利用することが可能になるとと思われる。

表 5.3.13 完全リサイクルコンクリート標準調合表

○ 石灰石骨材コンクリート LN (石灰石砕石・川砂, F. M. 2.66, 最大粒形 20mm)

W/C (%)	スラブ (cm)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位容積 (l/m ³)			単位質量 (kg/m ³)			粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)	化学混和剤使用量 (C×%)	
				セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材		A1	A2
40	18	41.5	179	142	263	371	448	679	1005	0.61	0.003	1.0
50	18	45.2	170	108	306	371	340	789	1005	0.61	0.003	1.0
60	18	46.6	170	90	324	371	283	836	1005	0.61	0.003	1.0

○ 汎用砕砂型-完全リサイクルコンクリート LL (石灰石砕石・汎用型石灰石砕砂, F. M. 2.65, 最大粒形 20mm)

W/C (%)	スラブ (cm)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位容積 (l/m ³)			単位質量 (kg/m ³)			粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)	化学混和剤使用量 (C×%)		
				セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材		A1	A2	A3
35	21	46.0	160	145	311	365	457	839	989	0.60	---	---	0.6
	12	38.7	167	132	254	402	418	686	1089	0.66	0.003	1.0	---
40	15	38.2	175	137	245	396	438	662	1073	0.65	0.002	1.0	---
	18	40.4	185	147	252	371	463	680	1005	0.61	0.002	1.0	---
50	12	42.2	159	101	293	402	318	791	1089	0.66	0.003	---	---
	15	42.3	165	104	290	396	330	783	1073	0.65	0.003	1.0	---
60	18	44.7	174	110	300	371	348	810	1005	0.61	0.002	1.0	---
	12	43.5	159	84	310	402	265	837	1089	0.66	0.003	---	---
60	15	44.0	165	87	307	391	275	829	1073	0.65	0.002	1.0	---
	18	46.2	174	92	318	371	290	859	1005	0.61	0.002	1.0	---

○ 粒形改善砕砂型-完全リサイクルコンクリート LR (石灰石砕石・粒形改善石灰石砕砂, F. M. 2.64, 最大粒形 20mm)

W/C (%)	スラブ (cm)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位容積 (l/m ³)			単位質量 (kg/m ³)			粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)	化学混和剤使用量 (C×%)		
				セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材		A1	A2	A3
35	21	45.9	160	145	310	365	457	828	989	0.60	---	---	0.4
	12	41.9	147	116	290	402	368	771	1089	0.66	0.005	1.0	---
40	15	41.4	156	123	280	397	390	745	1075	0.65	0.005	1.0	---
	18	43.7	165	131	288	371	413	766	1005	0.61	0.005	1.0	---
50	12	44.2	142	90	318	402	284	846	1089	0.66	0.005	1.0	---
	15	44.2	150	95	314	396	330	835	1073	0.65	0.005	1.0	---
60	18	46.8	158	100	321	371	316	867	1005	0.61	0.005	1.0	---
	12	45.5	142	75	336	402	237	894	1089	0.66	0.005	1.0	---
60	15	45.4	150	79	330	396	250	878	1073	0.65	0.005	1.0	---
	18	48.0	158	83	343	371	263	912	1005	0.61	0.005	1.0	---

備考) A1: 空気量調整剤 A2: AE 減水剤 A3: 高性能 AE 減水剤

5.3.4 まとめ

本節では、完全リサイクルコンクリートの利用拡大に向けた材料調整手法の検討を行った。以下に得られた知見を示す。

1) 汎用型石灰石砕石・砕砂は、将来的に標準的な石灰石骨材として使用されることが期待される品質を有しており、粒形改善砂に関しては、川砂や陸砂と同等の粒形を有した細骨材である。これらの骨材を使用したコンクリートの基礎的物性は優れたものであり、構造用コンクリートとして実務的に使用が可能であると考えられる。

2) 細骨材の粒形改善効果により、コンクリートの単位水量は大幅に低減できるため、同一水セメント比におけるセメント使用量、化学混和剤使用量を削減することができる。この際、単位水量低減に起因するコンクリートの基礎的物性の向上が期待できるため、コンクリート構造物の長期耐久性の確保に有効な手法となることが想定される。

3) 完全リサイクルコンクリート標準調合表は、一般的な石灰石骨材の特徴を考慮して作成されたものであり、完全リサイクルコンクリートの普及を図るためのプロトタイプとの調合と位置づけられる。

5.4 完全リサイクル住宅(S-PRH)の実施工と適用性評価

5.4.1 背景と目的

完全リサイクルコンクリートに関する既往研究に加え、本研究における産業廃棄物起源材料を導入した成分調整不要型完全リサイクルコンクリートの検討、および完全リサイクルコンクリートの材料調整法の検討により、実構造物への適用を検討できる段階となった。

本章では、5.4.2の「完全リサイクルコンクリートの将来像」において、順工程生産システムによる既存のコンクリートが一般的に生産される状況において、完全リサイクルコンクリートが導入されることにより起こりうる変化・改善のあり方および、発生するマテリアルフローについて分析を行う。

続いて、5.4.3の「完全リサイクルコンクリートの実用化」において、日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業における「環境負荷の影響評価と軽減」研究推進委員会に設置された「低環境負荷・資源循環型居住システムの社会工学的実験研究」において実施された完全リサイクル住宅(S-PRH)[30]に対し、セメント回収型—完全リサイクルコンクリートを構造躯体に実施工した概要について示す。施工に際しては、敷地調査、構造物およびコンクリート構成材料の特性などに対する評価を通じて、コンクリートの調合目標を定め、続いて完全リサイクルコンクリート標準調合表を基に使用する骨材の特性を反映した推定調合表を作成し、実機での試し練り試験によりコンクリートの計画調合を決定、実施工を行う。そのコンクリートにおける一定期間養生後の材料特性を評価し、構造物用コンクリートとしての実用可能性を明確にする。

以上により、完全リサイクルコンクリートの実構造物への適用可能性を検証する。

5.4.2 完全リサイクルコンクリートの将来像

表 5.4.1 にコンクリートの抱える地球環境問題と完全リサイクルコンクリートによる改善・解決について示す。完全リサイクルコンクリートおよび再生完全リサイクルコンクリートへの転換により、廃棄物処分問題、二酸化炭素の排出問題、骨材資源の枯渇問題など、コンクリート材料の起源廃棄物に関わる環境問題は大幅に改善され、石灰石資源はセメント原料として構造物の形で材料保存されるようになり、石灰石資源の枯渇問題も解消されるとしている。

このように、完全リサイクルコンクリートの導入は根治療法的にコンクリートの抱える地球環境問題を解決できる可能性がある。理由は、現在顕在化している資源環境問題の多くは、資源循環を十分に考慮しない生産システムのあり方に起因するものであるのに対し、完全リサイクルコンクリートは、材料を循環させることを目的に、生産システム的大幅な変更をもたらす原理を内在しているためである。現在一般化している生産システムは、換言すれば地球環境問題を引き起こす原因を内在する生産システムであると説明でき、順工程生産システムとして認識可能であることを踏まえると、現在のコンクリートの抱える地球環境問題を対処療法的にではなく根治療法的に解決するためには、完全リサイクルコンクリートの導入により、コンクリート構造物の生産を順工程と逆工程とが首尾一貫させて、資源循環性を考慮した生産システムを構築することを具体的目標とすることが考えられる。

図 5.4.1 に従来型コンクリートと完全リサイクルコンクリートが混在するコンクリート塊のマテリアルフローを示す。左側の従来型コンクリートのマテリアルフローはオープンループの循環形態であり、

最終的にはコンクリート塊は最終処分される構図となる。右側の完全リサイクルコンクリートによるマテリアルフローは、クローズドループによる循環形態であり、コンクリート全量が同等製品の構成材料として繰り返し利用される構図となっている。そして双方のループを介在するものとして、コンクリート塊の高度処理によりレベルサイクルの更新形態を確保し、再びその大部分が同等製品の構成材料として利用されるループが存在する。つまり、このコンクリート塊のマテリアルフローが成立する背景には、順工程生産システム、逆工程付加型一順工程生産システムおよび順逆工程生産システムが基本的な生産システムとして存在しており、製品すべての資源循環フローは、結果的にこれらの生産システムにより制御されると考えられる。

将来におけるコンクリート塊の資源循環のあり方は、道路用路盤材としての一定の需要が期待できる数年後から数十年後までは、ダウンサイクルによる更新形態が有効であるため、図に示すような順工程生産システム、逆工程付加型一順工程生産システムに基づく更新形態が一般的になると思われるが、ダウンサイクルされた製品の需要が停滞するそれ以後の状況においては、順逆工程生産システムに基づく更新形態を導入する必要性が発生してくることが予想される。

以上より、従来型コンクリートと完全リサイクルコンクリートが混在するコンクリート塊のマテリアルフローは、コンクリート製品の生産システムの移行期に発生する過渡的なものもしくは、システム移行後の最終形に近いものであることが想定され、現在および将来におけるコンクリート塊のマテリアルフローのあり方を示唆しているものと思われる。

表 5.4.1 コンクリートの抱える地球環境問題と完全リサイクルコンクリートによる改善・解決

項目	問題点	完全リサイクルコンクリートによる改善・解決
廃棄処分	最終処分場の減少にもかかわらず、コンクリート塊の発生量は増加している。コンクリート塊の発生量(1997年 捕足値)は、年間 3600 万トンであり、路盤材等に 2400 万トンが利用され、残りは最終処分されている。その他、残土中のコンクリート塊が 3000 万トン以上であると予測される。	コンクリート塊はセメント製造用原料または再生骨材としてそのまま使用ができるため、最終処分されるコンクリートは完全になくなる。
再利用	現在のコンクリート廃材の主用途である路盤材としての潜在需要は、今後、道路建設工事が徐々に減少するため大きくは見込めない。また廃材発生現場と道路工事現場の遠方化により、流通コストに問題がある。建築構造部分に使用可能な高品質再生骨材の製造が可能になり、実際に運用され始めたが、特殊な破碎技術を要する点、エネルギー消費が過大である点等の問題を解決する必要がある。また従来から問題とされている再生骨材の価格上昇と再利用・廃棄処理が困難な微粉の大量発生に関わる問題がある。	コンクリート塊は解体現場近くのセメント工場・再生骨材製造工場に持ち込まれ、加工後、近くの生コン工場・工事現場に出荷されるので、流通コストの上昇は心配ない。再生骨材の製造時に大量発生する微粉は、セメント原料として使用できる。再生セメント・再生骨材を用いたコンクリートは、再びリサイクルすることができるので、コンクリートの永久的なりサイクルが可能となる。
骨材資源	今後、骨材資源不足と骨材採取による環境破壊の問題から、年間 9 億 5000 万トンにも上る骨材需要量に対して、良質な骨材を供給し続けられるかどうか懸念される。	環境保全の行いやすい石灰石の採掘により、小規模分散型の骨材採取による環境破壊から解放される。再生骨材の永久的なりサイクルにより、骨材資源問題から解放される。
石灰石資源	我が国の石灰石資源の確定可採粗鉱量は 98 億トンであり、毎年 2 億トンが採掘されるため、あと 50 年弱で新たな鉱床を確保する必要がある。	石灰石資源を構造物の形で永久に保存・蓄積するため、石灰石資源の枯渇問題は解消される。
CO ₂ 排出	石灰石を主原料とする限り、セメント 1 トンの製造で、約 0.7 トン(燃料分 0.23 トン、原料分 0.47 トン)の CO ₂ が排出され続ける。	一度焼成した石灰質原料をセメントの一部として用いるため、セメント製造時の CO ₂ 排出量が削減され、セメント焼成エネルギーも減少する。
産業廃棄物	高炉スラグ、フライアッシュなどの産業副産物も、一度は有効利用されるが、コンクリートの最終処分時には、結局、廃棄されることになる。	産業廃棄物の積極的利用が推進されるとともに、永久的なりサイクルが可能となる。

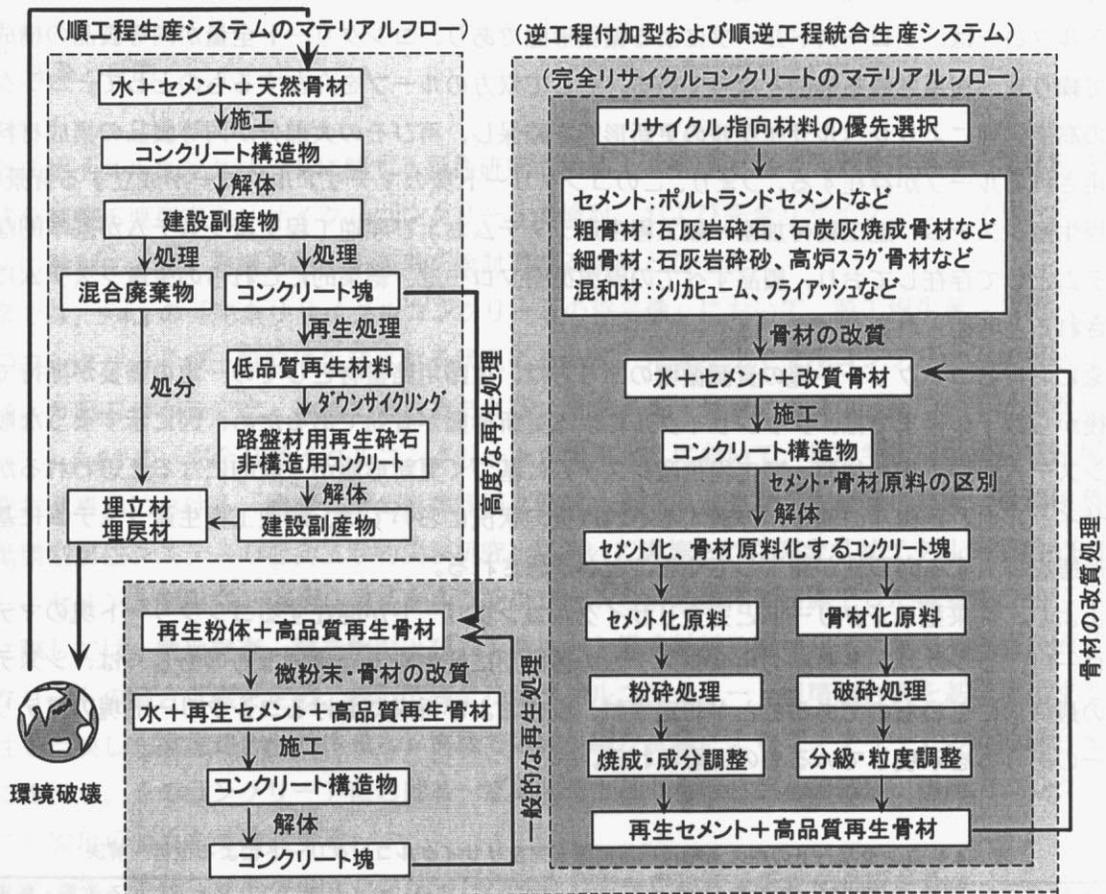


図 5.4.1 従来型コンクリートと完全リサイクルコンクリートが混在するマテリアルフロー

5.4.3 完全リサイクルコンクリートの実用化

完全リサイクルコンクリートを構造躯体に使用した完全リサイクル型住宅（S-PRH）が 2000 年秋に我が国初の竣工を果たした。完全リサイクル住宅は、その生産コンセプトとして、住宅建築を都市社会システムの構成原単位として位置づけ、住宅における構成材料の 80% 以上をリサイクルすることが可能な設計施工システムを具体化したものである。

(1) 構造物の概要

表 5.4.2 に構造物とコンクリート工事の概要を、図 5.4.2 に構造物および PC 独立基礎の構成を示す。構造物は、鉄骨造 PC 独立基礎により構成される地上 2 階建であり、家族向けの戸建住宅として生産される。PC 独立基礎とする理由は、構造物が一定期間供用後に構造躯体を解体分離し、その全量をリユースを基本とした再資源化を可能とするためである。なおこの場合、完全リサイクルコンクリートによる PC 基礎は、ライフサイクル設計に包含される個別設計要素のリユース設計において、レベルサイクルリユースの機能を、同じくリサイクル設計において、レベルサイクルリユースの機能を充足することが可能になる。

表 5.4.2 構造物とコンクリート工事の概要

工事概要		
建築工事名称	北九州 完全リサイクル住宅 S-PRH 新築工事	
コンクリート工事日	2000年8月	
工事場所	北九州市若松区大字塩屋 北九州学術・研究都市内	
構造規模	構造	鉄骨造 地上2階
	基礎形式	PC独立基礎
コンクリート工事規模	種類	完全リサイクルコンクリート
	基礎サイズ	1100×1100×632mm / 計10基(7.4m ³)
	養生方法	現場シート養生(散水による湿潤条件)

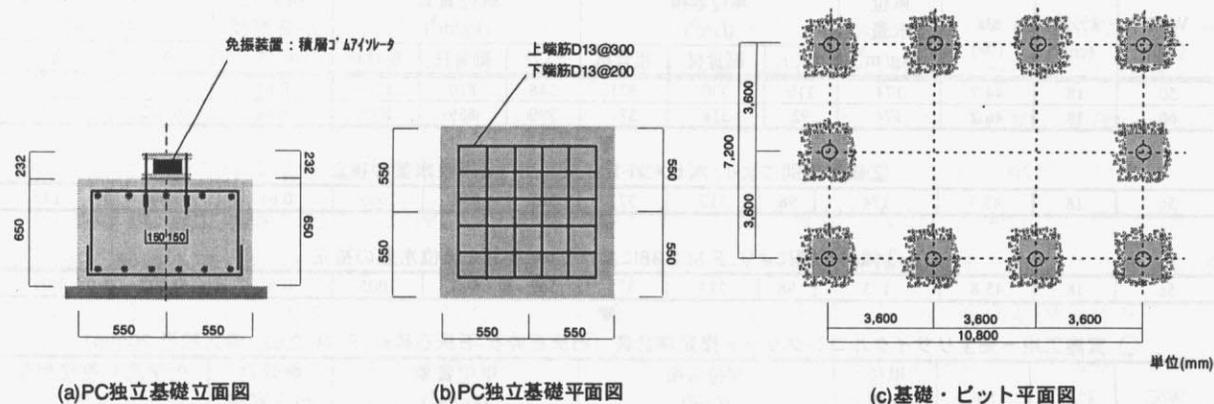


図 5.4.2 構造物および PC 独立基礎の構成

(2)使用材料

表 5.4.3 に完全リサイクルコンクリートの実施工に使用した材料を示す。採取地である平尾台周辺の石灰岩鉱石層は、中国地方西部からの鉱石層に続くものであり、カルサイト含有率が高いため表面の白濁度が高く、粒形が優れる良質の石灰石骨材であるといえる。これらの石灰石骨材を細骨材および粗骨材として全量を使用した。なお得られる調合は、完全リサイクルコンクリートプロトタイプと同様の材料構成となる。

(3)完全リサイクルコンクリート標準調合表を用いた調合推定

表 5.4.4 に実施工用—完全リサイクルコンクリートの推定調合表を示す。推定調合表の作成に必要な主な骨材要因は、設計基準強度に応じた水セメント比の決定、粗粒率による単位水量の補正などであるが、その他の影響因子としては、使用骨材が汎用型石灰石砕石および砕砂よりも若干粒形が優れるが、ほぼ同等の品質であること、細骨材の微粉量が汎用型石灰石砕砂よりも 4.8%少ない 5.6%程度であるため、石灰石微粉末によるマイクロフィーラー効果[31]が大きく期待できないことなども考えられた。これらの性質を汎用型完全リサイクルコンクリートの標準調合表に反映した上で推定調合表を作成した。

完全リサイクルコンクリートによる PC 基礎コンクリートの設計基準強度は 21N/mm^2 であり、使用セメントおよびセメント強度などの調合要因を考慮して水セメント比を 0.56 と定めた。汎用型完全リサイクルコンクリートにおける水セメント比 0.6 と 0.5 の調合から単位水量を読みとり(段階①)、補間により水セメント比 0.56 に対応する単位水量を決定する(段階②)。続いて、日本建築学会コンクリート調合設計指針・同解説で示す普通ポルトランドセメントを用いる砂・砕石コンクリートの参考調合表(砕石・川砂、F.M. 2.8 および 2.2、最大粒形 20mm)において、同一水セメント比で細骨材の F.M.2.82 であることを考慮することで 3kg の減水が可能になり、単位水量が決定する(段階③)。以上の①から③までの検討により推定調合表を作成した。

表 5.4.3 使用材料

種類	記号	骨材種類	産地	密度 (g/m ³)	吸水率 (%)	単位容積 質量(kg/l)	実積率 (%)	粗粒率	微粉量 (%)
細骨材	Ls	石灰石砕砂	平尾台	2.69	1.41	1.84	69.5	2.82	5.6
粗骨材	Lg	石灰石砕石		2.70	0.56	1.75	63.0	6.69	0.1

備考) 普通ポルトランドセメント 密度 3.16 (g/cm³)

表 5.4.4 コンクリートの調合

① 汎用砕砂型-完全リサイクルコンクリート標準調合表 (汎用型石灰石砕石-汎用型石灰石砕砂, F. M. 2.65, 最大粒形 20mm)

W/C (%)	スランプ (cm)	s/a (%)	単位 水量 (kg/m ³)	単位容積 (l/m ³)			単位質量 (kg/m ³)			粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)	化学混和剤使用量 (C×%)	
				セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材		A1	A2
50	18	44.7	174	110	300	371	348	810	1005	0.61	0.002	1.0
60	18	46.2	174	92	318	371	290	859	1005	0.61	0.002	1.0

② 線形補間により、水セメント比0.56における単位水量の補正

56	18	45.7	174	98	312	371	311	838	1005	0.61	0.002	1.0
----	----	------	-----	----	-----	-----	-----	-----	------	------	-------	-----

③ 線形補間により、F.M.2.88におけるかさ容積と単位水量の補正

56	18	45.8	173	98	313	371	309	842	1005	0.61	0.002	1.0v
----	----	------	-----	----	-----	-----	-----	-----	------	------	-------	------

○ 実施工用-完全リサイクルコンクリート推定調合表 (石灰石砕石-石灰石砕砂, F. M. 2.82, 最大粒形 20mm)

W/C (%)	スランプ (cm)	s/a (%)	単位 水量 (kg/m ³)	単位容積 (l/m ³)			単位質量 (kg/m ³)			粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)	化学混和剤使用量 (C×%)	
				セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材		A1	A2
56	18	45.8	173	98	313	371	309	842	1005	0.61	0.002	1.0

備考) A1: 空気量調整剤 A2: AE 減水剤

(4) 完全リサイクルコンクリートの実施工

(4.1) 基礎支持面コンクリートの施工

PC 独立基礎用-完全リサイクルコンクリートの打設を検討する前に、PC 独立基礎と調合目標を同一とする基礎地盤面への捨てコンクリートの施工を目的とした調合検討を行った。調合は、設計基準強度を満足し、プラント出荷実績のある標準的な調合に対し、推定調合表で得られた調合特性を反映した表 5.4.5 に示す調合とした。プラントにおける実機での練り性状を評価することを目的に、約 2.0m³ のコンクリートをプラントミキサーで製造し、その後アジテーター車でコンクリートを受けて、45 分後のフレッシュ性状を確認するプラント試験を実施した。結果、表 5.4.5 に示すように、予定される所要運搬時間である 45 分後の荷卸時においてスランプロスが 3cm 程度であり、状態変化が若干早い調合であることが確認された。また打設時期が夏期であることを考慮して、PC 独立基礎コンクリートの調合は、単位水量を 2kg/m³ 増大するとした。また空気量が若干大きくなることが確認されたが、輸送時の振動により空気量は低下することが想定されるため、化学混和剤量は同一量で調整するとした。

(4.2) PC 独立基礎コンクリートへの施工

表 5.4.6 に PC 独立基礎用コンクリートの計画調合を、表 5.4.7 に PC 独立基礎用コンクリートの荷卸時状態と基礎的性質を、図 5.4.3 に PC 独立基礎コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係を示す。

コンクリートの計画調合は、捨てコンクリートによる現場適用性の結果を反映し、単位水量を 177kg に設定した。この計画調合は、汎用型完全リサイクルコンクリートの標準調合表で示される調合とはほぼ同等の材料構成であり、単位水量を 3kg 程度増加させたものとなっている。従って、提案された汎用型完全リサイクルコンクリートの標準調合表を基に、骨材粒形、実積率、粗粒率などの物理的特徴

用型完全リサイクルコンクリートの標準調合表を基に、骨材粒形、実積率、粗粒率などの物理的特徴を調合修正要因として実行することで、さまざまな石灰石骨材を使用した完全リサイクルコンクリートの計画調合を導出することが可能になる。

PC独立基礎用コンクリートは、工場での実機練り込み後のフレッシュコンクリートについて、練り混ぜ直後および現地荷卸直後(アジテータ車運搬時間 60分程度)の品質を確認した。結果、スランプおよび空気量ともに、目標値を満足するものとなり、捨てコンクリートでの施工で確認されたスランプロス現象も現れず、良好なコンクリートを準備することが可能になった。続いて PC 独立基礎型枠へのコンクリート打設を行った。アジテータ車のコンクリートをポンプ車を介して型枠内に投入し、棒状バイブレータを使用して、PC独立基礎上部に設置する免震設備用型枠が移動しないように注意しながら打設・締め固めを行った。1基の打設時間は、約5分程度であった。なお、PC独立基礎打設時の作業人員は、筒先作業員2名、作業員2名、ポンプオペレータ1名、左官工2名で構成された。

10基のPC独立基礎部材の打設後、ブリージングの発生状態を確認しながら表面仕上げを行ない、その後、型枠上面を密封するシート養生を実施した。打設後2日間は水和熱に伴うコンクリートの蓄熱防止を目的に型枠散水を定期的に行ない、その後、打設後4日目まではPC独立基礎全体をシートで覆い、コンクリート表面温度の急激な低下による温度ひび割れが発生しないように保温養生を実施した。全4日間にわたる所定の養生を施した後に、コンクリート表面を傷つけないように脱型し、PC独立基礎の表面状態が極めて良好であることを確認してコンクリートの実施工を完了した。

表 5.4.5 捨てコンクリート用の計画調合および結果

種類	W/C	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位容積 (L/m ³)			単位質量 (kg/m ³)			化学混和剤 使用量(%)	
				セメント	石灰石 砕砂	石灰石 砕石	セメント	石灰石 砕砂	石灰石 砕石	A1	A2
LL56	0.56	47	175	99	320	361	312	861	975	6A	0.3
				スランプ (cm)		空気量(%)		コンクリート温度			
				混練直後		18.5		6.1		29.0	
				45分経過後*		15.5		6.6		28.5	
				経時変化		-3.0		+0.5		---	

表 5.4.6 PC独立基礎用コンクリートの計画調合

種類	W/C	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位容積 (L/m ³)			単位質量 (kg/m ³)			化学混和剤	
				セメント	石灰石 砕砂	石灰石 砕石	セメント	石灰石 砕砂	石灰石 砕石	AE 減水剤	AE 助剤
完全リサイクル コンクリート	0.56	47	177	100	319	359	316	858	969	0.3%	6A

表 5.4.7 PC独立基礎用コンクリートの荷卸時状態と基礎的性質

コンクリート荷卸時の状態					
段階	スランプ (cm)	空気量(%)	塩分量(kg/m ³)	コンクリート温度	
混練直後	20.0	5.5	---	30.0	
荷卸時(1台目)	19.0	6.0	0.06	30.2	
荷卸時(2台目)	19.5	5.0	0.06	30.0	
コンクリートの基礎的性質					
設計基準強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積 質量(kg/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
21	19.0	6.0	2320	22.3	24400

備考) 力学特性は現場封緘養生の試験体により評価

力学特性に関しては、材齢 28 日における現場封かん養生での圧縮強度用供試体 3 試料の平均圧縮強度を測定した。その値は、構造体の設計基準強度を満足するものであり、日本建築学会 RC 構造計算規準関係式に示した圧縮強度とヤング係数に関しても、コンクリートの密度に最も近い $\gamma=2.3$ における曲線履歴よりもヤング係数が若干大きいコンクリートとして評価されたが、構造用コンクリートとして適当な物性を備えていると評価できる。

写真 5.4.1、5.4.2 および 5.4.3 にコンクリートの練り込み状況から打設状況および PC 独立基礎と完全リサイクル住宅の完成状況に関する状況写真を示す。

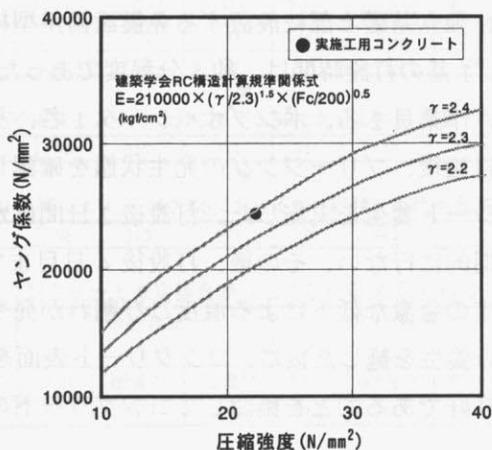


図 5.4.3 PC 独立基礎用コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係



写真 5.4.1 出荷時コンクリートの測定結果 / 出荷後コンクリートの測定結果(1 台目) / 出荷後コンクリートの測定結果(2 台目)

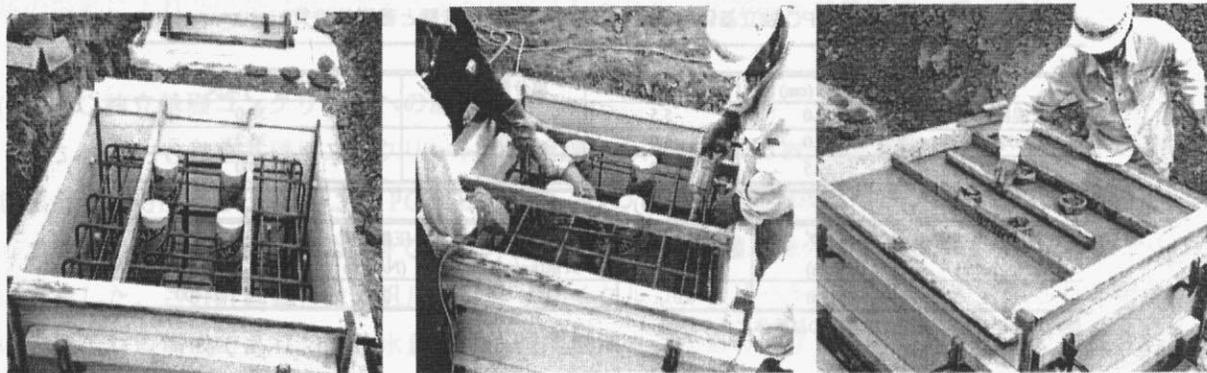


写真 5.4.2 PC 独立基礎型枠の状態 / 打設・締固め状況 / 表面仕上げ状態



写真 5.4.3 仕上げ後 PC 独立基礎群／脱型後の PC 独立基礎／完全リサイクル住宅の全景

5.4.4 まとめ

本節では、完全リサイクル住宅への完全リサイクルコンクリートの実施工と適用評価の検討を行った。以下に得られた知見を示す。

1) 順工程生産システムにおいて従来型コンクリートを生産する枠組みの中に完全リサイクルコンクリートを導入する場合、再利用の仕組みに関する問題、骨材資源枯渇問題、二酸化炭素排出問題、産業廃棄物処理問題に関する改善・解決の方向性が明確に示される。

2) 順工程生産システムにおいて従来型コンクリートを生産する枠組みの中に完全リサイクルコンクリートを導入する場合、発生するマテリアルフローは、順工程生産システム、逆工程付加型－順工程生産システム、および順逆工程統合生産システムが混在した形になる。この状態は、資源循環型社会に適合するマテリアルフローを構成するための過渡的な状態を示す可能性がある。

3) 完全リサイクルコンクリート標準調合表を基にした実施工用コンクリートの推定調合は、試し練り結果との相関が良いことが確認されたため、完全リサイクルコンクリート標準調合表は、実務におけるコンクリートの計画調合を決定する際の基礎資料となりうる。

4) 完全リサイクル住宅に適用された完全リサイクルコンクリートは、一般的な構造用コンクリートとして実用に耐えうる品質・性能を保持したものであり、コンクリート構造物へ国内初の実施工を果たしたといえる。

5.4 第5章のまとめ

本章では、成分調整不要型完全リサイクルコンクリート、完全リサイクルコンクリートの拡大利用に向けた材料調整法、および完全リサイクル住宅への実施工と適用性評価の検討を通じて、セメント回収型－完全リサイクルコンクリートの実証化を検討した。結果、以下に示す知見が得られた。

- 1) 成分調整不要型完全リサイクルコンクリートは、プロトタイプでの検討要因であった再生セメント製造時における成分調整不要性を実現するとともに、材料的価値に乏しく最終処分の可能性がある産業廃棄物起源材料をコンクリートに適宜導入することで廃棄物起源材料の最終処分量を低減し、かつセメント製造時に必要となるバージン材料の投入量およびセメント製造時に発生する二酸化炭素排出量の低減が期待できるためセメント原料としてコンクリート中で材料保存する意義は大きいといえる。
- 2) 完全リサイクルコンクリート標準調合表のモデルコンクリートに使用した汎用型石灰石砕砂および粒形改善石灰石砕砂は、将来的に標準的なコンクリート用石灰石砕砂として使用することが可能となる品質を有しており、コンクリートの基礎的物性に関しても、構造用コンクリートとして実務的な使用に耐えうるような十分な品質・性能を有している。
- 3) 完全リサイクルコンクリート標準調合表は、一般的な石灰石砕砂の持つ特性を考慮して作成されたものであるため、完全リサイクルコンクリートの普及を図るためのプロトタイプ的な調合となり得る。また、標準調合表を基に作成した推定調合は、試し練り試験との良い相関を示すことが確認されたため、実務的にコンクリートの計画調合を決定する際に使用することが可能である。
- 4) 順工程生産システムの枠組みの中に完全リサイクルコンクリートを導入して発生するマテリアルフローは、順工程生産システム、逆工程付加型－順工程生産システムおよび順逆工程統合生産システムが混在した状態になる。この状態は、資源循環型社会に適合するマテリアルフローを構築するための過渡的な状態を示す可能性がある。
- 5) セメント回収型－完全リサイクルコンクリートは、完全リサイクル住宅の基礎として国内初の実施工を果たした。これは、コンクリート建造物のライフサイクル設計に包含されるレベルサイクルによるリサイクル設計が実務的に適用されたことを意味する。

第5章の参考文献

- [1] 社団法人セメント協会：建設副産物利用促進専門委員会報告ーコンクリート塊から発生する微粉末の有効利用ー,pp.39-40,1996
- [2] 飯田一彦,佐伯竜彦,長滝重義:セメントを含めたコンクリートのリサイクル,コンクリート工学論文集,Vol.11, No.3, pp.139-144, 2000
- [3] エネルギー・経済統計要覧,(財)日本エネルギー経済研究所,2000
- [4] 通商産業省環境立地極再資源化対策室編:クリーンジャパン,(財)クリーン・ジャパンセンター,1994
- [5] V.M.Malhotra and A.A. Ramezaniapour: Flyash in Concrete, CANNET MSL 94-45, 1994
- [6] 友澤史紀,野口貴文他:完全リサイクルコンクリート(エココンクリート)の研究,日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1,pp.341-342, 1994
- [7] Cement & Concrete エンサイクロペディア,社団法人セメント協会,pp.87-93,1999
- [8] 鉄鋼スラグ協会,セメント用水砕スラグ品質実態調査報告書,1988
- [9] 内川浩:セメントコンクリート No.488, pp.33-48, 1987
- [10] 社団法人セメント協会:セメントの常識,pp.13-14,1997
- [11] 榮井建二他:石灰灰を原料とした新人工軽量骨材を用いたコンクリートの流動性と強度特性,コンクリート工学学年次論文報告集第17巻第1号,pp.411-416,1995
- [12] 通産省砕石資源統計,1997
- [13] 無機マテリアル学会,セメント・セッコウ・石灰ハンドブック,技報堂出版,pp.123,1995
- [14] 通産省生活産業局窯業建材課推計,1990
- [15] 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説,1999
- [16] 野口貴文:高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する研究,東京大学博士学位論文,1995
- [17] 岡本享久,石川雄康ほか:高性能軽量コンクリート,コンクリート工学 vol.37,No.4,p.12-18,1999
- [18] 小山明男,菊池雅史,榎本浩士,多田克彦:高強度・高流動性・軽量コンクリートの基礎的性質に関する検討 その3.耐久性,日本建築学会学術講演梗概集,pp.555-556,1992
- [19] 阿部道彦,榊田佳寛,田中斉,柳啓,和泉意登志,友澤史紀:コンクリートの促進中性化試験方法の評価に関する研究,日本建築学会構造系論文集,第409号,pp.1-10,1990
- [20] Powers,T.C.:A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete, ACI Journal, Vol.41, pp.245-272, 1945
- [21] 洪悦郎ほか:コンクリートの耐凍害性におよぼす環境条件の影響,日本建築学会北海道支部研究報告書,No.62,pp.13-16,1989
- [22] 日本建築学会,建築工事標準仕様書・同解説,JASS5 鉄筋コンクリート工事,1999
- [23] 鎌田英治:コンクリートの凍害とはーその現象とメカニズムについてー,日本建築学会材料施工委員会 コンクリート構造物の凍害とその対策シンポジウム
- [24] 佐藤文則,上田洋,出頭圭三,牛島栄:超高性能コンクリートの長期凍結融解抵抗性,コンクリート工学学年次論文宝庫句集,Vol.21 No.2,pp.385-390,1999
- [25] 社団法人セメント協会:セメントの常識,pp.13-14,1997
- [26] 野口貴文,友澤史紀,大塩明,五十畑達夫,村田芳樹:完全リサイクルコンクリートの実用化に関する研究 その2:石灰石砕砂の実用化,日本建築学会大会学術講演梗概集A-1,pp.395-396,1996
- [27] 村田芳樹,岡本享久,五十畑達夫:完全リサイクルコンクリートの実用化に関する研究 その3:石灰石砕砂の微粉量の影響,日本建築学会大会学術講演梗概集A-1 pp.1061-1062,1997
- [28] 石灰石鉱業協会編:石灰石の用途と特性,1980
- [29] 日本建築学会:コンクリートの調合設計指針・同解説,pp.191-227,1999
- [30] 尾島俊雄監修:完全リサイクル型住宅Ⅱ,未来開拓学術研究推進事業として(鉄骨造編),早稲田大学理工総研シリーズ 10,2001
- [31] 星野新一,大場陽子,坂井悦郎,大門正機:石灰石粉末添加によるセメントペーストのレオロジー特性変化の解析,セメント・コンクリート論文集,No.49,pp.414-419,1995

