

論文 副産微粉を混和したコンクリートの災害時を含む品質保証と力学特性への影響

田村 雅紀*1・依田 和久*2・大島 正記*3・斉藤 順一*4

要旨：東日本大震災を契機に、災害時を含めた構造物全般の品質保証のあり方が見直されつつ、災害廃棄物を含めた資源環境の保全性を確保する必要性が強く問われている。本研究では、災害時を含むコンクリート構造物の品質保証の考え方を具体的に示すとともに、建設活動における資源循環の仕組みの中で大量に発生する副産微粉を積極的に使用した上で、副産微粉と同一種類・産地型の骨材を用いて得られる各種ファミリー型コンクリートを製造し、災害時を含めた品質評価の視点から力学特性への影響を実験的に評価した。

キーワード：広義の品質, 狭義の品質, 副産微粉, 力学特性, 破壊臨界ひずみ

1. はじめに

現在国内では、都市や基幹交通の基盤となるコンクリート構造物の老朽化対策を中心に、国土全般のインフラ整備のあり方を再考する時期となっている。また、巨大地震や地球温暖化に関わる予防保全的な防・減災対策の実施が強く求められている。コンクリート構造物は、高度なインフラを形成する社会的責務を永らく果たしてきたが、今後は甚大な災害が生じた際にも、急速な環境変化に対応可能で、構造物としての長期的な品質保証を実現する仕組みを再構築する必要に迫られている。

そのような状況下で、東日本大震災では、復旧・復興活動を通じて、がれき等の災害廃棄物に大量に含まれたコンクリートや、廃木材などの処理問題が顕在化した。一方で、それらの災害がれきを用いて、コンクリート用材料を含む再生材として積極活用することで、がれき残渣の保管場所、最終処分量・新規資材量の縮減など、土地利用と資源循環の双方に関係する間接的な環境インパクトが軽減される新たな役割も示されたといえよう。

一方で、既存ストックから発生するコンクリート系解体材は1億t弱であり、2055年前後には4億t程度の排出が想定されている¹⁾。再生骨材等のJIS規格化等による利用促進が期待されるが、建設需要や最終処分場確保の問題等により、都市圏を中心にコンクリート系解体材の再利用のあり方は引き続き緊要な課題となっている。

さらに、コンクリートの最大需要地である都市圏では、骨材採取地が偏在しており²⁾、カーボンニュートラルを推進する建設活動の要求により、輸送負荷の低減を図ることや、完全循環型の材料選定手法の適用³⁾や、副産微粉等の利用促進^{4),5)}など、総合的な建設資材の利用のあり方についても同時に模索する必要がある。

以上を踏まえ、本研究では、平常時・災害時の双方に対応するコンクリート構造物の品質保証の考え方を整理

する。その上で、災害時を含むコンクリートの品質と資源環境保全の確保を目的に、資源循環の仕組みの中で大量に発生する砕石粉や再生骨材微粉などの副産微粉を積極利用し、その副産微粉と同一種類・産地型（以下、ファミリー型とする）の骨材を用いて得られる各種コンクリートを製造する。そして、フレッシュ性状に関わる検討⁶⁾を踏まえ、力学特性に関する実験的検討を行い、災害時を含む品質保証と環境保全性の確保に資するコンクリート材料の発展的利用のあり方を考察する。

2. 災害時を含めたコンクリート構造物の品質保証

2.1 品質保証の考え方の整理

図-1 に災害時対応を含めたコンクリート構造物の品質保証の考え方(上: 3RV 事例, 下: 品質保証)を示す。

図-1 下の品質保証に関しては、コンクリート構造物の作り手・使い手の双方の要求事項に対する健全性を保つために、構造物とその構成材料の機能・性能および外観による「狭義の品質」の確保に加え、使用状態に影響を

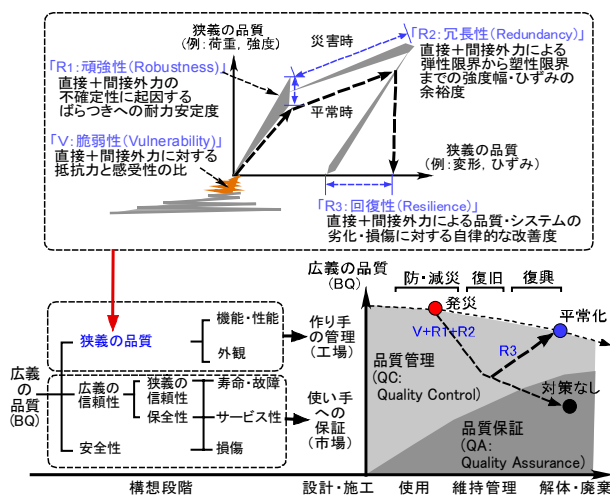


図-1 災害時対応を含めたコンクリート構造物の品質保証の考え方(上: 3RV 事例, 下: 品質保証)

*1 工学院大学 建築学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所建築生産グループ 上席研究員 博士(工学) (正会員)

*3 BASF ジャパン(株) 建設化学品事業部 (正会員)

*4 (株)八洋コンサルタント 技術センター 所長 (非会員)

与える「広義の信頼性（保全性，寿命，故障率等の信頼性指標）」ならびに「安全性」の適切な管理が必要となる。そして，この3項目で構成される「広義の品質」が，少なくとも設計耐用期間を通じ，使い手への品質保証項目に対する要求水準を下回ることなく，使用者立場に立脚した社会的便益⁷⁾を供与し続けることが，品質保証の本質として求められるといえよう。

2.2 災害時を含む品質評価と実験的検討

図-1上の3RVの事例に関しては，本稿では材料・構造体レベルを想定した「頑強性（Robustness）」、「冗長性（Redundancy）」、「回復性（Resilience）」ならびに「脆弱性（Vulnerability）」（以下，3RVとする）に着眼した。3RVは，災害時を想定した材料・部材・構造体・構造物等の要求機能・性能の保全に深く関係する性質といえ，定量的な評価方法と設計手法の開発が進捗しつつある⁸⁾。実際に，地震・自然災害への対応を含め，インフラを長期的に利用するためには，「場の条件（地域，都市，海外）」，「生産条件（製造，施工，使用，処理等）」，「人材条件（所有者，設計・施工者，使用者等）」を踏まえ，災害時を含めた構造物の安全性や信頼性の影響^{9),10)}を把握した上で，最終的に構造物の狭義の品質（性能・機能等）に反映することが重要となる。また近年は，サステナビリティの観点¹¹⁾からも，災害時における環境保全性に資する要件を，広義の品質要求に含めて考えるのが適切である。

そこで本実験では，副産微粉を積極混和したコンクリートの災害時を含めた力学特性を評価するために，「頑強性」に関しては，「外力に抵抗する強度や剛性のばらつきを踏まえた耐力の安定度」，「冗長性」に関しては，「外力に抵抗する弾性限界から塑性限界までの強度幅・変形能力の余裕度」として位置づけ，この2要素を中心に，評価基準とした試料に対する圧縮強度，ヤング係数，破壊臨界ひずみなどの物性値を比較し，副産微粉の混和による各種試料の相対的な性能改善度を評価尺度とする。なお，平常時と比較して災害時の想定外力は不確実性が増大するため，その不確実性の幅を実験条件として取扱い評価する方法もあり得るが，本実験では，各試料の相対的な性能比較の観点から災害時の劣化・損傷に対する抵抗性を分析し，最終的に頑強性や冗長性の評価を行う。

その他，「回復性」に関しては，「外力による品質・システムの劣化・損傷に対する自律的な改善度」，「脆弱性」に関しては，「外力に対する抵抗力と感受性（構造体以外の地盤特性の影響など）の比」として位置づけるが，一般にその性質には物理的要因以外の人的行為や意志決定能力が深く関与し，現在は構造物や都市レベルにおける地震リスク評価での指標化が進んでいる¹²⁾。従って，本研究の材料・構造体レベルでの評価では今後の課題として位置づけ，詳細な評価は行わない。

表-1 使用材料

材料	記号	種類	内容
セメント	OPC	万イカツセメント B種同等品	OPC：FA=85：15混合，密度3.04g/cm ³
a) 微粒分	B	陸砂微粉	密度2.58g/cm ³
	L	石灰石微粉	密度2.71g/cm ³ ，比表面積3370cm ² /g
	N		密度2.72g/cm ³ ，比表面積3410cm ² /g
	R	再生微粉	密度2.50g/cm ³
b) 細骨材	B	陸砂	表密2.58，吸水率2.21%，微粒分量1.3%
	L	石灰石砕砂	表密2.66，吸水率1.13%，微粒分量2.9%
	N		表密2.66，吸水率1.33%，微粒分量3.7%
	R	再生砕砂M	表密2.52，吸水率4.20%，微粒分量0.7%
c) 粗骨材	B	砂岩砕石	表密2.67，実積率62.9%，微粒分量0.1%
	L	石灰石砕石	表密2.70，実積率60.5%，微粒分量0.3%
	N		表密2.71，実積率59.9%，微粒分量0.3%
	R	再生砕石M	表密2.59，実積率61.5%，微粒分量0.1%

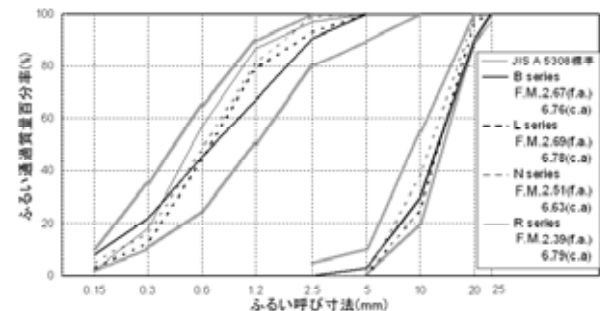
備考) FA：フライアッシュ，表密：表乾密度(g/cm³)，粗粒率 F.M.：図c)記載，砂岩系 B 微粉：骨材付着分のみ，石灰石系骨材 L・N：各々は別産地品，再生骨材 R：JIS A 5202(Mクラス)



a) 微粉(R再生微粉，L石灰石微粉，N石灰石微粉)



b) 骨材 (B 陸砂，B 砂岩砕石，L 石灰石砕石，R 再生粗骨材)



c) 骨材の粒度分布曲線および粗粒率

表-2 実験要因と水準

要因	水準
水セメント比	0.55 一定
単位水量(kg/m ³)	170(S)，175(M)，185(L)
単位粗骨材かさ容積	0.55 一定
微粒分量 ^{*1}	1.3, 6.9 (%)
細骨材洗浄 ^{*2}	有(L3MW)，無(L3M)
化学混和剤量 ^{*3}	C×0~2.0%

*1 微粒分量は，各ファミリー(B, L+N, R)=(1%, 3~9%, 3~9%)に設定
石灰ファミリーはLを基準試料とし，Nは比較対象とする

*2 微粉分量3%の石灰石砕砂Lを対象とし，洗浄の有無の影響を比較

*3 AE減水剤を使用。空気量調整剤は目標空気量に合わせて調整

表-3 実験項目と方法

対象	試験項目	方法ほか
全試料	蛍光X線分析	I _β 比分散型，酸化物組成定量分析
微粒分	密度・比表面積	定容積膨脹法 / BET比表面積
骨材	密度・吸水率	JIS A 1109, JIS A 1110
	微粒分量試験	JIS A 1103
	単位容積質量・実積率	JIS A 1104
コンクリート	スラブ・圧入試験	JIS A 1101, JIS A 1150
	空気量	JIS A 1128
	圧縮強度	JIS A 1108
	静弾性係数	JIS A 1149
	破壊臨界ひずみ	JIS K 7162 参照 コブレンツとヤングによる縦・横ひずみを計測し評価
	ポアソン比	

3. 実験概要

3.1 副産微粉を混和したコンクリートのフレッシュ性状

現在、JIS 規格等におけるコンクリートに混和可能な微粒分量は、細骨材の重量比に対して 10%程度混和する方向にあり⁶⁾、JIS A 5005:2009 の改正では、微粒分量の最大値は砕石 3.0%、砕砂 9.0%とし、砕石で粒形判定実績率が 58%以上の場合は 5.0%とされている。JCI 規準「コンクリート用石灰石微粉末品質規格(案)」では、微粉混和により、石灰石微粉とカルシウムアルミネートの反応による初期水和の促進効果や、温度ひび割れ低減に向けた結合材代替使用、吹付材におけるはね返り防止のため粘性付与効果等⁴⁾が明示されており、近年はコンクリートの乾燥収縮低減効果、完全循環型の材料選定によるセメント原料化³⁾など長所を活かす取組が推進されている。

一般にコンクリート需要量は膨大なため、これらの技術によりコンクリートの物性に大きな影響がない範囲で微粉を混和する環境保全上の効果は大きいといえる。

本研究の既往の検討⁶⁾により、ファミリー型コンクリートの微粉混和によるフレッシュ性状への影響に関して、細骨材微粒分量を 9%まで増加させることで、余剰ペースト量の流動効果によりフローの改善が図られること、各ファミリー骨材の物理化学的な特性に起因するブリーディング量への影響が確認され、微粉の混和によりフレッシュ性状が改善する可能性が示されている。

3.2 副産微粉を混和したコンクリートの力学特性

(1) 使用材料および実験方法

表 - 1 に使用材料、表 - 2 に実験要因と水準、表 - 3 に実験項目と方法、表 - 4 にコンクリートの計画調合を示す。使用材料は災害時を含めた資源環境保全性に配慮して、同一産地・種類型で構成されるファミリー型の材料選定とした。セメントは普通ポルトランドセメント(OPC)に副産微粉のフライアッシュ(FA)を質量比で 15%混和したFB 種同等品とし、物性評価上の標準とする硬質砂岩系材料(B ファミリー)を始め、石灰石系材料(L・N ファミリー)および再生系(R ファミリー)の 4 種類を扱う。ファミリーの特徴を評価するために水セメント比 55%一定で、粗骨材かさ容積を一定(0.55)、単位水量 170~185kg/m³を 3 水準(S,M,L)、細骨材質量比に対する微粒分を 4 水準等(P1:1.0~P9:9.0%)を設け、計 12 種類の供試体を作製した。

また、既往の検討⁶⁾により、エネルギー分散型蛍光 X 線分析による各種試料の化学組成を定量分析し、調査後のコンクリート全体の組成を推計したところ、砂岩系 B ファミリーは砂岩系骨材で構成されるため SiO₂ (81.2%)、CaO(11.1%)が多く、石灰系 L ファミリーは CaO(56.3%)と ig.loss (37.5%-CO₂)が多く、全量が再生セメント原料となる完全リサイクルコンクリートとして扱うことが可能となる。再生系 R ファミリーは SiO₂ (75.9%)とセメ

ント硬化体による CaO(19.2%)が多く、原コンクリートの組成および再資源化の破碎程度が影響した性質を有する。

(2) コンクリートの圧縮強度とヤング係数

図 - 2 に全ファミリー(B,L,N,R)の圧縮強度とヤング係数(材齢 28・91 日)を示す。全体の傾向として、B ファミリーに対し、再生 R ファミリーは同程度、石灰系 N・L ファミリーは相対的に高い力学性能を有することが確認された。調査上の相対的な違いは、微粒分を含めた骨材

表 - 4 コンクリートの計画調合

種類	W/C (%)	微粒分量 (%)	s/a (%)	質量(kg/m ³)				
				水	セメント	微粉	細骨材	粗骨材
砂岩系 (B)	55.0	1.0	49.3	S:170 (高級)	S:309	P:1% (9.1)	825	B:924
石灰系 (L,N)		3.0	~	M:175 (標準)	M:318	~	~	L:899
再生系 (R)		6.0	51.7	L:185 (一般)	L:336	P:9% (84.5)	910	N:892
		9.0						R:875

(備考) 空気量 4.5 ± 1.5%、スランプ値 18 ± 2.5cm、単位水量 3 水準 (S 高級, M 標準, L 一般)、単位粗骨材かさ容積 0.55 一定、FA 含有量 C × 15.0%、粗骨材微粉は微小なため骨材重量に含める、単位水量の影響は L ファミリーで詳細評価

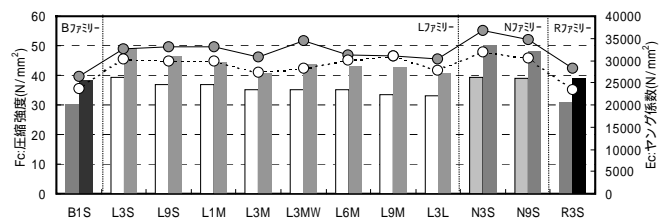
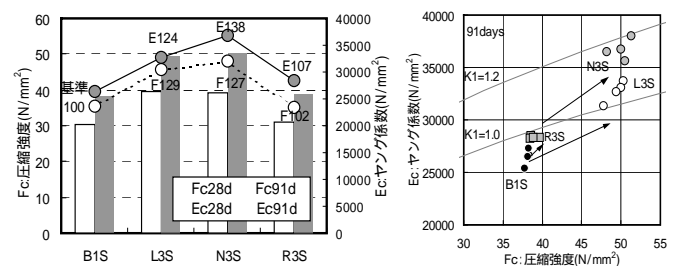


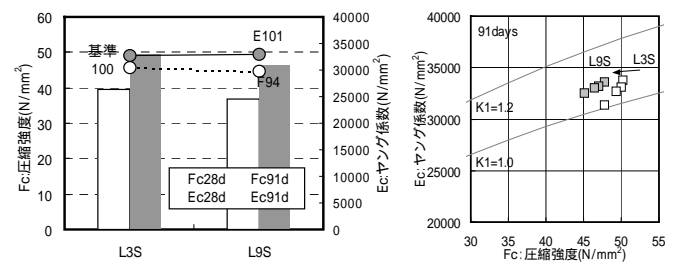
図 - 2 全ファミリー(B,L,N,R)の圧縮強度とヤング係数の関係



a) 圧縮強度とヤング係数

b) RC 構造規準式の関係

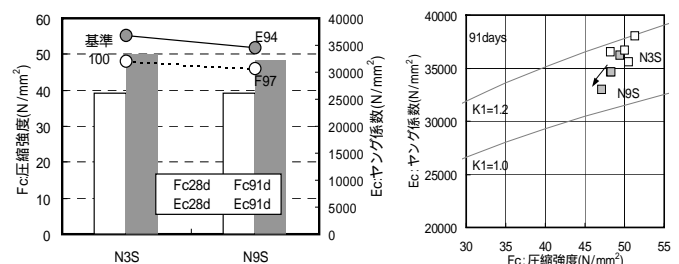
図 - 3 骨材種類の影響 (B,R,N,L ファミリー: S 高級)



a) 圧縮強度とヤング係数

b) RC 構造規準式の関係

図 - 4 標準的な微粒分混和の影響 (L ファミリー: S 高級)



a) 圧縮強度とヤング係数

b) RC 構造規準式の関係

図 - 5 標準的な微粒分混和の影響 (N ファミリー: S 高級)

種類に限られるため、充填材料の物理化学的性質の影響が生じていると考えられる。従って、以降より a) 圧縮強度とヤング係数, b) 日本建築学会・鉄筋コンクリート構造計算規準式(以下, RC 規準式)の関係から力学特性を詳細に分析した。なお, a)の図内の数字は, 材齢 91 日の各種基準試験体における圧縮強度(F)・ヤング係数(E)を 100 とした場合の相対的な性能比較値となり, 主に副産微粉の混和による基準試料に対する弾塑性変形領域における耐力の安定度を示すことから, 外力を受けたコンクリートにおける頑強性への影響として考察することができる。

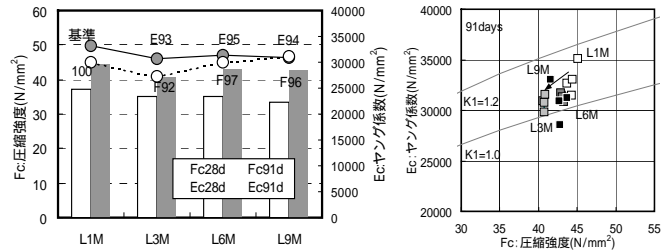
図 - 3 に骨材種類の影響(B・R・N・Lファミリー：S高級 170kg/m³)を示す。微粒分量を低減(各 1 ~ 3%)しており, B・R ファミリーは同程度で, 再生微粉の影響も確認されず一般的な力学特性を有する。L・Nファミリーは骨材産地を問わず値が高く, 石灰石骨材の使用により, 基準 B に対して 120%以上の高い力学特性を保持し, 外力が生じた際の頑強性の保持も期待できる。

図 - 4 および図 - 5 に標準的な微粒分混和の影響(L・Nファミリー：S高級 W=170kg/m³)を示す。骨材産地を問わず, 微粒分増加(3% ~ 9%)により, 圧縮強度とヤング係数が若干低下するが, 一般的な力学特性を有し, 外力が生じた際の頑強性も期待できるとともに, 副産微粉の有効利用に伴う資源環境保全性にも寄与できる。

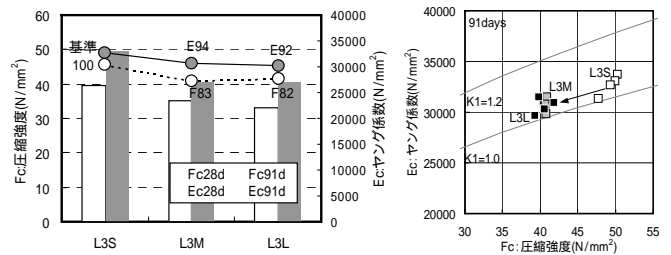
図 - 6 に積極的な微粒分混和の影響(Lファミリー：M標準 W=175kg/m³)を示す。水セメント比および単位粗骨材一定の条件下で, S高級よりも単位水量を増加し, 細骨材の影響が若干生じ難くしても, 微粒分の増加(1 ~ 3 ~ 6 ~ 9%)による大幅な力学的性質の低下は生じておらず, Lファミリー(M)の B・Rファミリー(S)に対する相対的な力学特性ならびに頑強性の利点は単位水量が 5kg 増加した状態でも保持されている。

図 - 7 に単位水量の影響(Lファミリー：S高級, M標準, L一般)を示す。微粒分を低減(3%一定)した状態で, 単位水量が増加(170kg ~ 175kg ~ 180kg)すると, 圧縮強度は最大 18%, ヤング係数は最大 8%低下している。微粒分が少ない場合, 力学特性への水セメント比依存性が顕著に現れるため, 適切な微粒分混和によりコンクリートの頑強性や資源環境保全性に貢献できる可能性がある。

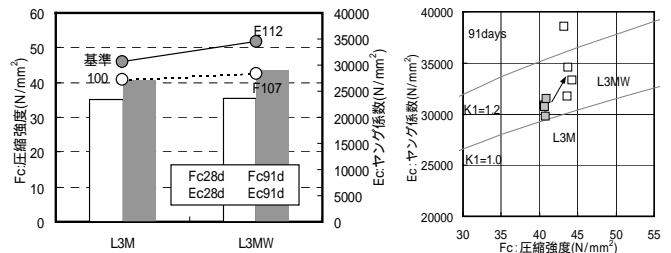
図 - 8 に細骨材洗浄の影響(Lファミリー：M標準)を示す。通常, 石灰石骨材はすりへり抵抗性の問題から微粒分管理の問題が生じやすい。ここでは, 石灰石砕砂 L を洗浄して微粒分を除去し, 細骨材重量比 3%の微粒分を後添加して製造したコンクリート L3MW との物性を比較したところ, 圧縮強度とヤング係数は 10%前後改善した。これは単に骨材周囲の微粒分を増大させるのではなく, モルタル中に均質分散させることでコンクリートの力学特性が積極的に改善される可能性を示している。



a) 圧縮強度とヤング係数 b) RC 構造規準式の関係
図 - 6 積極的な微粒分混和の影響 (Lファミリー：M標準)



a) 圧縮強度とヤング係数 b) RC 構造規準式の関係
図 - 7 単位水量の影響(Lファミリー：S高級, M標準, L一般)



a) 圧縮強度とヤング係数 b) RC 構造規準式の関係
図 - 8 細骨材洗浄の影響 (Lファミリー：M標準)

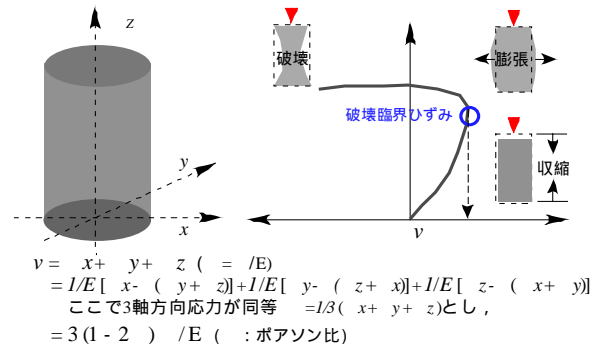


図 - 9 ポアソン比と体積ひずみによる破壊臨界ひずみの評価

(3) コンクリートの破壊臨界ひずみとポアソン比

図 - 9 にポアソン比と体積ひずみによる破壊臨界ひずみの評価を示す。前節までのコンクリートの頑強性に関する内容から, コンクリートの弾性域を越えて塑性化が進行し, 破壊の進展と体積変化に対する抵抗力の余裕度を表す冗長性に関する内容について検討する。

コンクリートの破壊臨界ひずみは, 圧縮力により供試体が縮小し始める際, 骨材とペースト界面におけるひび割れの進展に伴い生じる連結ひび割れが, 載荷方向に進展する巨視的ひび割れに成長した後, 縦ひずみの縮小と横ひずみの増大が生じ, 体積的膨張に転じる際の臨界ひずみであり, 不安定な破壊伝播を引き起こす開始点とい

える。破壊臨界ひずみは、一般にコンクリートの軸方向ひずみの計測から求められるヤング係数が示す弾性限界範囲を越えて、塑性限界に至る間の荷重変形抵抗範囲に存在する。従って、弾性限界以後の変形範囲の余裕度として捉えられ、値が小さいほど弾性限界後のひずみ進展が小さい段階で塑性限界となり、脆性的破壊を引き起こす可能性がある。この場合、冗長性は小さいと評価できる。なお冗長性の確保は、材料・構造体レベルでは構造安全性に貢献するといえるが、過大な付与は建物全体の設計法やコスト等にも影響を与えるため、目的に応じた適切な設計法の確立が必要と考えられる。

本実験では、各種ファミリーの 10×20cm 円柱供試体に加わる圧縮荷重と垂直・水平ひずみをデータロガーにより多点同時サンプリングする。続いて、式(1)に示す体積ひずみ v を算出し、体積膨張を起こす変局点を観察し、副産微分の混和によるコンクリートの冗長性への影響を考察する。なお、以後の図では傾向が確認しやすい種類における平均的な試料の結果に着目した分析を行う。

また、ヤング係数算定時の縦ひずみに対する横ひずみの比であるポアソン比は通常 0.2 程度であり、一般に変形に対する抵抗性を示す剛性が高まることで値は小さくなる。ファミリーの種類・微粒分の影響を踏まえ、弾性範囲を越えて塑性限界に至るまでの圧縮応力とポアソン比の関係も併せて評価をする。

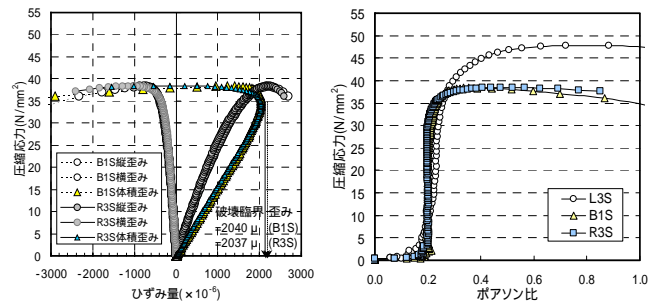
$$v = 3(1 - 2) / E \quad (1)$$

ここに、 v ：体積ひずみ、 μ ：ポアソン比を表す。

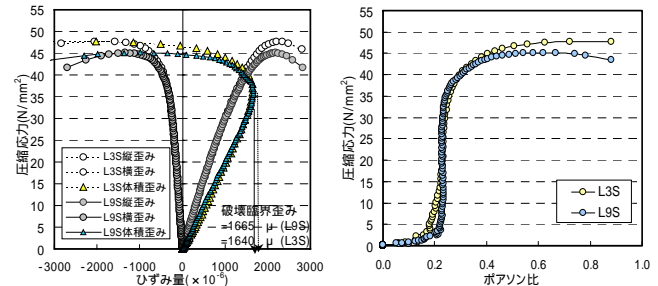
図 - 10 に骨材種類と破壊特性 (B,R,L ファミリー：S 高級) の関係を示す。a)より、B・R ファミリーは同程度の破壊臨界ひずみを有し、圧縮強度とヤング係数が増大した L ファミリー (図 - 12 参照) よりも 2 割程ひずみが増大する範囲まで破壊伝播の開始が遅くなる。b)からは、B・R・L ファミリーのポアソン比は、圧縮応力が 35N/mm² までは同程度であるものの、以後は R・B・L の順で横ひずみが増大し、体積膨張が生じて塑性限界に向かう。最終的な破壊に至るまでの変形抵抗性に違いが生じる可能性があり、外力が作用した際の冗長性にも影響する。

図 - 11 に標準的な微粒分混和と破壊特性 (L ファミリー：S 高級) の関係を示す。a)より、微粒分増加(3% - 9%)による破壊伝播の開始点は微粒分量を増加させても大きくは影響しない。b)からも、ポアソン比は圧縮応力の変化に応じて同程度の値で推移し、横ひずみが卓越して体積膨張が生じて塑性限界に向かう状況も同等である。最終的な破壊状態に至るまでの変形抵抗性に大きな違いはなく、外力が作用した際の冗長性にも大きく影響しない。これは産地の違う N ファミリー (S 高級) についてもほぼ同様の結果となった。

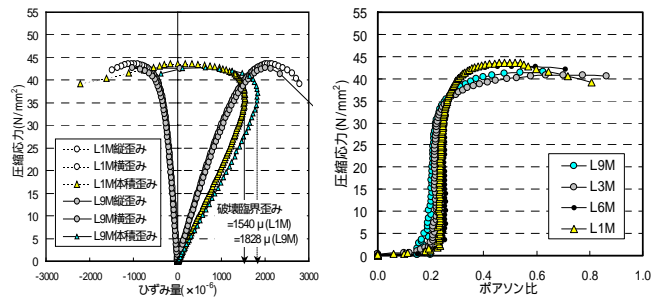
図 - 12 に積極的な微粒分混和と破壊特性 (L ファミリー



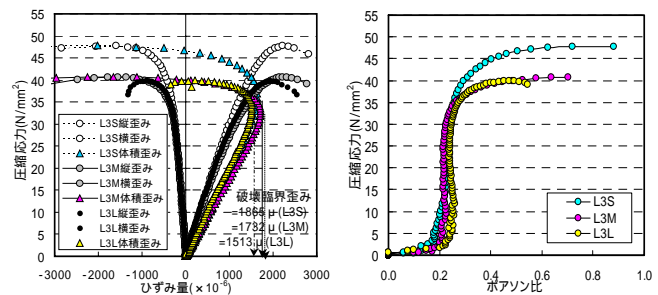
a)体積ひずみ - 破壊臨界点 b) 圧縮強度 - ポアソン比
図 - 10 骨材種類と破壊特性 (B,R,Lファミリー：S高級)



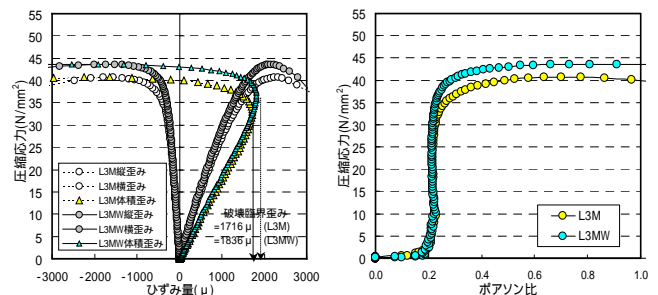
a)体積ひずみ - 破壊臨界点 b) 圧縮強度 - ポアソン比
図 - 11 標準的な微粒分混和と破壊特性 (Lファミリー：S高級)



a)体積ひずみ - 破壊臨界点 b) 圧縮強度 - ポアソン比
図 - 12 積極的な微粒分混和と破壊特性 (Lファミリー：M標準)



a)体積ひずみ - 破壊臨界点 b) 圧縮強度 - ポアソン比
図 - 13 単位水量と破壊特性 (Lファミリー：S高級, M標準, L一般)



a)体積ひずみ - 破壊臨界点 b) 圧縮強度 - ポアソン比
図 - 14 細骨材洗浄と破壊特性 (Lファミリー：M標準)

: M標準) の関係を示す。a)より、微粒分の増加(1 3 6 9%)に伴う破壊伝播の開始点の違いは大きくはない。b)からも、ポアソン比は圧縮応力の変化に応じてほぼ同等の値で推移することが確認できるが、横ひずみが卓越し体積膨張が生じて塑性限界に向かう段階では、微粒分量に比例して若干顕著になることが確認され、外力が作用した際の冗長性にわずかに影響するといえる。

図 - 13 に単位水量と破壊特性(L ファミリー: S 高級, M標準, L一般)の影響を示す。a)より、単位水量が増加(170kg 175kg 180kg)すると、破壊伝播の開始点は低強度の種類から段階的に生じている。b)からも、ポアソン比は圧縮応力の変化に応じて同程度であるが、横ひずみが卓越して体積膨張が生じて塑性限界に向かう状況は、低強度の種類から進展する傾向にある。

図 - 14 に細骨材洗浄と破壊特性(L ファミリー: M標準)の影響を示す。a)より、細骨材を洗浄した場合でも破壊伝播の開始点の違いは生じにくく、b)からもポアソン比は圧縮応力の変化に応じて同等の値で推移するが、横ひずみが卓越して体積膨張が生じて塑性限界に向かう段階では、細骨材洗浄により限界耐力が改善され、冗長性の確保に寄与する可能性がある。

図 - 15 に破壊臨界ひずみの比較(B,L,N,R ファミリー)を示す。各種ファミリー間の特徴が確認でき、B・R ファミリーはLファミリーより破壊伝播の開始が全体として遅くなる傾向にある。全骨材が石灰石であるLファミリーは、骨材とペースト間の機械的かみ合わせ力と化学的付着力に起因する物理化学的作用の影響が複雑に関係することが考えられ、微細界面における破壊進展の影響に関する検討が必要になる。なおLファミリーの微粒分量増加に伴い破壊臨界ひずみが増大する特徴は、外力が作用し、最終的な塑性限界に至る変形抵抗性の増大と冗長性の確保に寄与する可能性がある。

4. まとめ

本研究により、以下の知見が得られた。

- 1) 平常時・災害時の双方を含むコンクリート構造物の品質保証システムを構築するために、頑強性、冗長性、回復性、脆弱性の性質を狭義の品質項目として導入し、使用者立場に立脚した広義の品質の保証を行う考え方を具体的に示した。
- 2) 頑強性を外力に抵抗する強度や剛性のばらつきを踏まえた耐力の安定度、冗長性を外力に抵抗する弾性限界から塑性限界までの強度幅・変形能力の余裕度として捉え、副産微粉を含む同一種類・産地型の原料で製造された各種ファミリー型のコンクリートに関する力学特性を、災害時対応を図る品質特性として評価した。

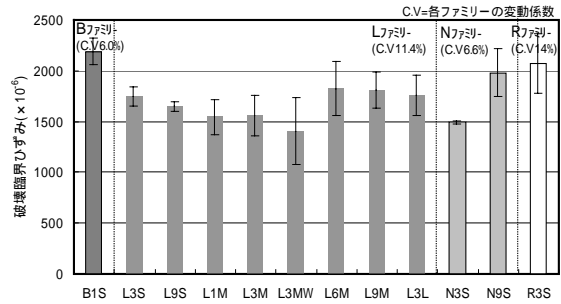


図 - 15 破壊臨界ひずみの比較 (B,L,N,R ファミリー)

- 3) 同一種類・産地型の原料で製造した石灰ファミリー型のコンクリートは、副産微粉の混和により、圧縮強度とヤング係数の改善と、破壊臨界ひずみの増大による変形抵抗性の改善が確認され、災害時におけるコンクリートの頑強性と冗長性に寄与する可能性がある。

謝辞

本研究の実施にあたり、竹本油脂原田健二氏より助力を得た。また本研究は、工学院大学 UDM 研究、H25 年度科研費(若手 A:23680681 田村雅紀)の一部である。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 環境配慮施工指針(案)・同解説, p.18, 2008
- 2) 田村雅紀, 阿部道彦: 首都圏に流入するコンクリート用骨材の需給動向調査と輸送時環境負荷評価, 日本建築学会技術報告集, pp.631-636, 第 31 号, 2009.9
- 3) 田村雅紀, 野口貴文, 友澤史紀: セメント回収型完全リサイクルコンクリートの完全リサイクル住宅への実施工検討, 日本建築学会技術報告集, pp.27-32, 第 21 号, 2005.6
- 4) JCI 規準: コンクリート用石灰石微粉末品質規格(案), 1998
- 5) セメント協会: コンクリート塊から発生する微粉末の有効利用(建設副産物利用促進専門委員会報告), 1996
- 6) 田村雅紀, 依田和久, 大島正記, 斉藤順一: 二次副産材を混和したコンクリートの資源環境保全貢献性とフレッシュ性状への影響, コンクリート工学年次論文集, pp.1927-1932, Vol.35, No.1, 2013.6
- 7) 日本コンクリート工学会: 微破壊試験を活用したコンクリート構造物の健全性診断手法委員会報告書, 2012.6
- 8) 日本建築学会: 建築構造設計における冗長性とロバスト性, 応用力学シリーズ 12, pp.25-30, 2013.6
- 9) ISO2394, 構造物の信頼性に関する一般原則, 1998
- 10) ISO13824, 構造物のリスク評価における一般原則, 2009
- 11) ISO13315, コンクリートおよびコンクリート構造物の環境マネジメント, その 1 一般原則, 2012
- 12) 日本建築学会: 地震リスク評価とリスクコミュニケーション, pp.67-70, 2011.6