

災害時に使用可能な多種混合セメントによる都市建築ストックのレジリエンス対策

材料施工、レジリエンス、多種混合セメント
コンクリート工事、品質保証

伊藤顕紀^{*1}
田村雅紀^{*2}

1. はじめに

日本では地震や津波などの自然災害での被害を軽減し、被災地のよりはやく復興が求められる。日本は過去の統計から大きな自然災害は10年間に約3～4回ほど発生している。近年では東日本大震災により、より人々の自然災害への関心が高まっている。日本政府は大きな自然災害が発生するたびに様々な政策をしているが、我々一般人、民間企業が自然災害発生時のことを予測し、対策を練り、準備をしておかなければ被害の軽減を望むのは難しい。また、被害が出た際の回復力、復元力を強化するため我々1人1人が真剣に考え、周りの人々との協力が必要不可欠となる。また、東日本大震災の復興の際、セメント業界では中庸熟ポルトランドセメントが不足するといった問題が発生した。このような問題が発生した理由は、通常時中庸熟ポルトランドセメントの使用頻度が低く、被災した工場のみで製造されていたためである。このような事態を今後防ぐ1つの方法としてセメントの多種混合調合である。現在JIS規格にあるセメントを混合し、JIS規格にあるセメントの代替にすることである。図1で本研究の流れを示し、表1で研究内容を示す。また、表2,3,4で実験要因と水準・使用材料・試験内容を示す。

2. 研究概要

2.1 自然災害に対するレジリエンスの調査（研究1）

表5で政府のレジリエンス・建設業のレジリエンスの取り組みを示す。調査の結果から政府・建設業共に災害時に備え平常時のエネルギーの削減、災害時のBCP対策を考慮していく必要があるという結果を得た。政府は、災害時に備え、「ナショナル・レジリエンスに向けた政策、ナショナル・レジリエンスに対する国民の適切な理解を深めるため、積極的に広報活動を行っている。また、建設業では、各企業が耐震や防災性に高い関心を示しており、安全・安心な物件をクライアントに販売しやすい傾向が見受けられ、建設業の技術の向上、品

2.2 セメント需給調査（研究1）

表4 試験内容（研究2）

試験種類	内容
圧縮試験	JIS R 5201(40mm×40mm×40mm 角柱)
曲げ試験	JIS R 5201(40mm×40mm×160mm 角柱)
凝結試験	JIS R 5201 ビカー針装置により測定
安定性試験	JIS R 5201 パッド法によりひび割れ・膨張を確認
簡易断熱温度上昇試験	JCI 簡易断熱温度上昇試験参照 簡易断熱温度上昇試験装置より7日間測定

表1 研究内容

研究名	概要	研究の種類	内容
研究1	自然災害に対するレジリエンス調査 セメント需給調査	政府・建設業のレジリエンス調査(2.1) セメント生産量の調査(2.2.1) 2013年6月29日国内セメントメーカーヒアリング調査(表6)	・日本という国単位でのレジリエンス的な取り組み、目標調査 ・建設業界のレジリエンス的な取り組み、今後の展望調査 ・日本経済の流れとセメント生産量の流れを比較 ・セメント種類別生産量過去10年分 ・セメント生産から出荷経路、価格、保存に関する項目別ヒアリング調査
研究2	セメント成分調整・モルタル試験	ポルトランドセメント成分調査・計画調合(2.3) JIS規格試験(2.5)	・セメント種類別クリンカ主要化合物含有率調査、混合調合 ・圧縮強度試験、曲げ強度試験、安定性試験、凝結試験、簡易断熱温度上昇試験

質の向上が見込める結果を得た。

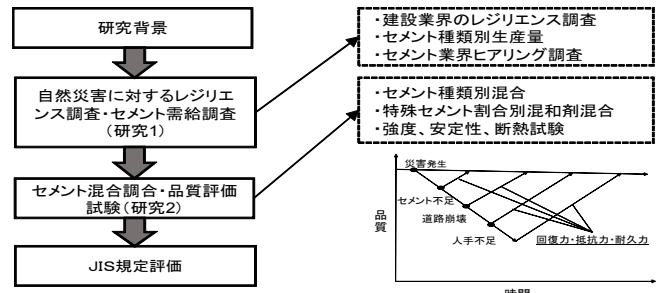


表2 実験要因と水準（研究2）

要因	水準
水セメント比(%)	50
セメント種類	普通Pc(N)、中庸熟Pc(M)、低熟(L)、超早強Pc(UHL)
材齢	3日、7日、28日
養生方法	封かん養生・水中養生

表3 使用材料

記号	材料	内容
W	水	水道水
S	細骨材	大井川産、粗粒率:2.77、実積率:66.8%、密度:2.59(g/cm ³)、吸水率:1.83%
N	普通Pc	3.15(g/cm ³)
L	低熟Pc	3.22(g/cm ³)
M	中庸熟Pc	3.21(g/cm ³)
UHL	超早強Pc	3.01(g/cm ³)
NL ₈₀₂₀	普通Pc+低熟Pc(80%:20%)	3.16(g/cm ³)
NL ₈₅₁₅	普通Pc+低熟Pc(85%:15%)	3.22(g/cm ³)
NUHL ₅₀₅₀	普通Pc+UHL(50%:50%)	3.08(g/cm ³)
NUHL ₈₀₂₀	普通Pc+UHL(80%:20%)	3.12(g/cm ³)

備考)Pc：ポルトランドセメント

図1 研究の流れ

表5 政府・建設業のレジリエンス的な取り組み

政府	資材	従来の事業・施策の枠組みでは十分な対応が困難であると思われる低頻度大規模災害によるリスクを前提に、国民生活、国民経済への影響が大きいと考えられる分野を対象として、現在の政府の取組、地域の現状における脆弱性を評価。
	政策	国民生活・経済に関する必要不可欠な機能を維持するという観点から重要な関係機関における組織・人材・運営面での課題を調査。
	政策	2013年5月末までに「国土の強靱化(ナショナル・レジリエンス(防災・減災)に向けた当面の対応)」を取りまとめる。また、短期的・長期的な発想で取り組むべき方策について明示。
	資金	物2の「当面の対応」は、各府省においてレジリエンスに関する施策・事業を検討する上で基本となるものであり、対応が必要となる施策・事業については、平成26年度予算編成過程等を通じて具体化するし、その際に既存の社会資本の有効活用や効率的な維持管理等によるトータルコストの削減、民間資金の積極的な活用を実施。
	人	国土の強靱化(防災・減災)に関する国民の適切な理解を深めるため、積極的な広報活動を行う。
建設業	施策	メンテナンス部分で新しい技術の集約や情報交換をしていかなければいけない。日本という国単位でもレジリエンスは重要。
	資材	震災復興や防災・減災対策の公共事業を始めとする大規模な補正予算案の編成が進んでいる。執行に際して、迅速な施工に万全を期さなければならない。全国的な防災・減災対策、インフラの維持管理・更新など真に必要な社会資本整備に貢献。
	エコ	企業の事業継続と生活の継続のために、災害に対して安全安心な施設、エネルギーの自立確保等のBCP対策、平常時には省エネルギーとCO ₂ 削減、電力需給逼迫時における確実な節電「ECO対策」が必要。
	傾向	2012年東京23区オフィスニーズに関する調査の結果、新規賃借を予定する企業が23%と4年連続で2割割の水準を維持。賃借予定面積の拡大を望む企業も54%と2003年の調査開始以来最大となり、オフィス移転に向けて前向きな結果となった。新規賃借理由では、「耐震性の優れたビル」が「賃料の安いビル」を抜いてトップに浮上。BCPニーズに適した耐震性の高いビルを選ぶ傾向あり。

*1 工学院大学工学部建築学科 4 年

*2 工学院大学建築学部建築学科 准教授 博士（工学）

2.2.1 セメント生産量調査

図2 a)で過去50年分の全種類セメント生産量の動向⁶⁾、b), c)で近年の種類別セメント生産量を示す。2011年度のセメント国内需要（輸入を含む）は、42,650千t、前年比102.5%となり、6年ぶりに前年度を上回った。セメント輸出は、10,006千t、前年比100.4%となり、10,000千t台を回復した。2011年度は、57,579千t、前年比102.7%である。セメントの国内需要はバブル経済終盤の1990年度に86,286

千tとなりピークを記録し、その後は長期にわたり縮小傾向が続いている。2011年度の国内需要は反転したとはいえ、ピーク時から半減のレベルである。種類別生産量では、Nが全セメント生産量の70%以上を占めている。Nは全セメントの中で最も汎用性が高く、一般的な建築、土木工事に使用されるからである。しかし、用途によっては、様々な特性のセメントが必要となるが、特殊なセメントほど生産できる工場は限られ、それに比例し生産量も減少するという結果を得た。

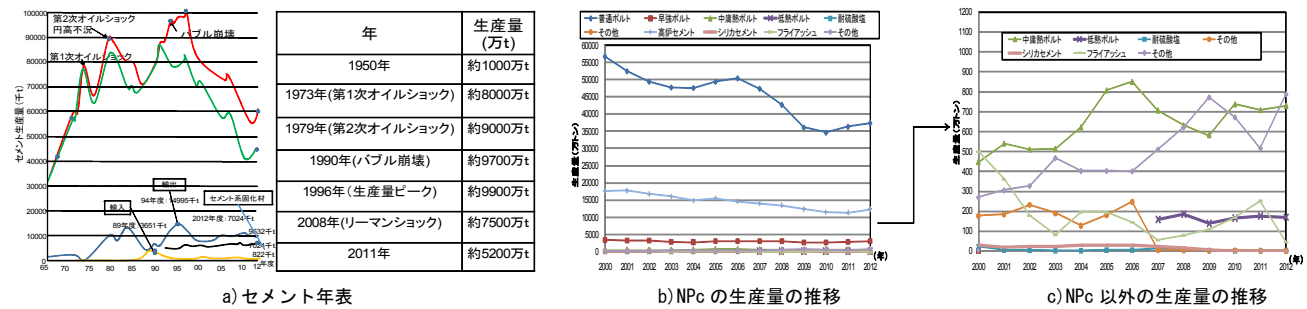


図2 全セメント生産量の推移

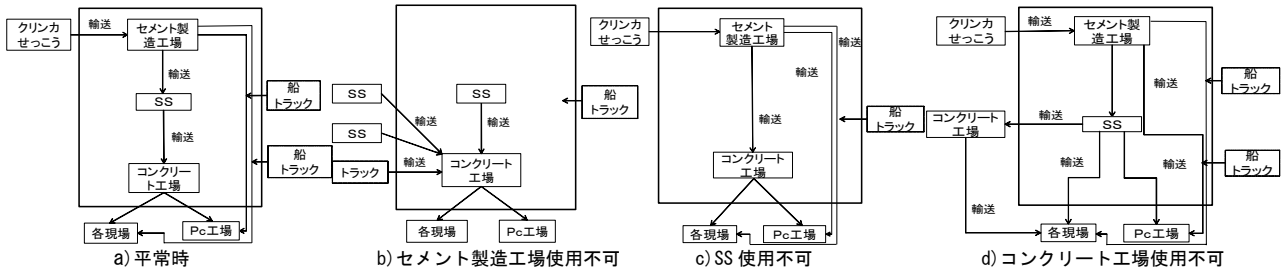


図3 災害時を想定したセメント流通システム

表6 セメント生産から出荷経路及び貯蔵方法に関するヒアリング調査

質問項目		平常時結果	災害時結果
セメントの運搬	セメント生産工場からSSまで運搬するのは主にどんな手段を用いているか。また、災害時の運搬手段	海路や陸路で主に運搬している。SSは、首都圏や地方都市の近くにある。そして、SSは24時間セメントの搬入、搬出が可能	基本的に平常時と変わらない。
	セメント製造工場→SS→生コン工場までの運搬時の期間	最短2、3日で生コン工場に届く。	災害の被害の度合いによるが、出来る限り早急に運搬する。
	必ずしも、セメント生産工場→SS→生コン工場までの経路で、現場やPC工場、工業製品工場にセメントが搬出されるのか	もしセメント生産工場からPC工場や工業製品工場が近く、セメントの状態がよいのなら、セメント生産工場から直接PC工場などに搬出される可能性あり。	災害時は、SSに保管してあるセメントを早急にコンクリート工場などに搬出。
	セメント運搬の際、1度にどれくらいの数量まで可能か	バラから何十トン単位まで運搬可。運搬費用をセメントの値段に組み入れることはできない。そのためSSという機関が設けられている。	基本的に平常時と変わらない。
	SSへのセメントの搬入や搬出はどのように手段であるか。	SSのセメント貯蔵タンクの上からセメントを搬入し、タンクの下からセメントを搬出する	基本的に平常時と変わらない。
保存・貯蔵	SSでのセメントの保存方法、また保存期間	SSではセメントを外気に触れないよう保存している。(千トン～1万トン) 保存期間の取決めはないが、最長約6ヶ月。	基本的に平常時と変わらない。
	ジェットセメントは十分量貯蔵しているか。また、真空保存は可能であるか。	UHLは災害時しか使用されないため貯蔵していない。UHLは特殊なセメントのため、製造可能な工場が限られている。真空保存は難しい。	基本的には平常時と変わらないが、特殊セメントの生産が減っているため、長期間の保存方法を考える必要がある。
	生コン工場でも品質検査は行っているか。	生コン工場では社内規格で品質検査をしている。セメントに限らず骨材や混合剤の品質検査も行っている。SSは、保管所のため品質検査は行われていない。	基本的に平常時と変わらないが、災害時は特殊セメントを使用するので、特殊セメントの品質検査を行っている。
製造	セメントの種類別で製造場所を変えているのか。また、東日本大震災でコンクリート工場が使用不可になったが、今後コンクリート工場が使用不可になった際のBCP対策は作成しているのか	普通ポルトランドセメントと高炉セメントの打ち継ぎはありえる。	コンクリート工場に限らず、セメント生産工場・SSが使用不可になる場合の対策も必要。
	なぜセメント製造工場がゴミを受け入れているのか	ゴミを原料にしてセメントの原料のクリンカを焼却しているため。	—
	近年、セメントの生産は少しずつ増加しているが、それはこれからも継続していくと思うか。また、災害時、中熟ポルトランドセメントが不足した原因	東日本大震災の復興事業でセメントの生産量は一時的に増加しているが、復興事業が一段落した際、生産量の増加の継続は何かきっかけを作らないと難しい。	特殊なセメントを主に地の工場で製造していたため。改善案として他工場でも中熟ポルトランドセメントを製造可能。
価格	セメントの値段は各会社はほぼ同一価格であるか	組合に入っている会社は、同一価格。注) 地区などの組合によって値段が異なる組合に入っていない会社は価格が変動する	組合に加入している会社は同一価格だが、非加入の会社は、値段が高くなる可能性が高い。(理由: 災害時運搬が困難になるため)
	SSは全国に何ヶ所くらいあるのか	全国20～30ヶ所。首都圏には、2、3ヶ所	—
	セメント製造工場→SS→生コン工場の流通経路で生コン会社がSSからいくらでセメントを購入するのか。また、どのくらいの数量から購入可能であるか。	都道府県ごとにセメントの値段が異なる。(都道府県ごとの工組、協組で基準の値段が決定する) また、組合に入っていない工場もあるため一定の値段のものはない。数量はどのくらいからでも購入可能。	—
生コン工場	セメント業界のレジリエンスとは	SSにセメントを長期間保存できるようにする。セメント生産工場にも出来る限りセメントを貯蔵する。災害などの緊急時の際にメーカーを超えて支援しあう。	混合するセメントの物性評価をする。混合させるセメントの割合を一定にすることにより、品質を一定のものとする。
	異なる種類のセメントを混合した場合、品質保証はされるのか	混合したセメント、コンクリートの物性を確認する必要性あり。メーカーや生コン工場でも品質保証ができない可能性大。	NとLを混合することにより、災害時Mが生産不可になった場合に対応でき、Nより品質がよいものができる。
	NとLを混合することによって災害時以外にどのようなことに利用される可能性があるか。	混合することによって供給面以外にどのようなメリットがあるか明確示す必要あり。	コストの高いLやアウイン系の混合する割合を最大限抑える。また、近年では、多少費用がかかっても安全を第1に考える傾向がある。

2.2.2 セメント生産から出荷経路に関するヒアリング調査

表6に2013年6月29日に某セメント会社にセメントを生産し現場に供給するまでの流通状態や東日本大震災での対応や改善点、また生コンクリート製造会社へのヒアリング結果を示す。図3に緊急時を想定したセメント流通システムを示し、各機関が災害により使用不可になった際の流通システム（セメント生産工場とSSそしてコンクリート工場がグループ会社ということが前提）をヒアリング調査から作成した。

2.3 セメント成分調整（研究2）

表7にPcの種類別特徴を示す。混合するセメントの特性、成分を文献⁽²⁾を元に調査した結果、セメントの特性を左右するのは、C₃S、C₂S、C₃A、C₄AFであり、本研究ではこれらの主要化合物成分調整により混合Pcを製造する。図5にPcクリンカ成分比較表を示す。既往の研究を踏まえ、クリンカ成分の一般値を元に、NPcとLPcを80%：20%の割合で混合し、中庸熟Pcの主要化合物の含有量に近づいた。また、コスト面を考慮しNPcとLPcを85%：15%の割合での混合も行い、NPcとUHLを混合することによりUHLの硬化時間の調整が可能かということも同時に行う。よって今回は、NPcとLPcを混合し、混合中庸熟Pcを製造すると同時にUHLの硬化時間をNPcを混合することで調整可能か実証する。

表7 ポルトランドセメントの種類別特徴

セメント種類	特徴
普通 ポルトランド セメント	コンクリート工事用として広く使用されているセメントであり、「万能セメント」とでも呼ぶセメント。典型的な鉱物組成としてC ₃ S（51%）、C ₂ S（25%）、C ₃ A（9%）、C ₄ AF（9%）、CaSO ₄ （4%）が例示され、ブレン比表面積は3300cm ² /g前後。
早強 ポルトランド セメント	普通ポルトランドセメントの材令3日圧縮強さを1日で発揮する早強型のセメントである。C ₃ S含有率を65%付近まで高め、ブレン比表面積4000～4600cm ² /gに微粉砕して、初期強度を高めている。
超早強 ポルトランド セメント	普通ポルトランドセメントの材令7日圧縮強さを1日で発揮。水和反応が急速に進み発熱速度が大きいので、寒中コンクリートに適するが、一般のコンクリート工事では温度ひび割れに注意する必要がある。C ₃ S含有率を約70%に高め、ブレン比表面積約6000cm ² /gに微粉砕したもの。
中庸熟 ポルトランド セメント	初期水和過程の発熱速度を小さくするため、水和反応速度と反応熱が大きいC ₃ A含有率と水和反応速度が大きいC ₃ S含有率を低くし、C ₃ A（4%）C ₃ S（45%）前後としたセメントである。強度発現速度は小さいが、1年以上の長期強度は他のポルトランドセメントを上回る。綿密な硬化体組織が得られる。化学抵抗性が強いなどの特性を持つ。
低熟ポルト ランドセメント	中庸熟ポルトランドセメントより水和熱が低いセメント。C ₂ Sの含有率が40%以上の規定がある。

表8 ポルトランドセメントの品質

品質	種類	普通ポルトランドセメント JIS R5210 JIS規格値	低熟ポルトランドセメント JIS R5210 JIS規格値	中庸熟ポルトランドセメント JIS R5210 JIS規格値
密度(g/cm ³)		—	—	—
比例面積(cm ² /g)		2500以上	2500以上	2500以上
安定性	始発 h:min	60min以上	60min以上	60min以上
	終結 h:min	10h以下	10h以下	10h以下
	パット法	良	良	良
圧縮強さ (N/mm ²)	1d	—	—	—
	3d	—	7.5以上	10.0以上
	7d	7.5以上	15.0以上	20.0以上
	28d	22.5以上	32.5以上	40.0以上
	91d	42.5以上	—	—
水和熱 (J/g)	7d	250以下	290以下	—
	28d	290以下	340以下	—
	MgO	5.0以下	5.0以下	5.0以下
化学成分 (%)	SO ₃	3.5以下	3.0以下	3.0以下
	強熱減量	3.0以下	3.0以下	3.0以下
	全アルカリ	0.75以下	0.75以下	0.75以下
	Cl ⁻	0.02以下	0.02以下	0.02以下
	C ₃ S	—	50以下	—
鉱物組成 (%)	C ₂ S	40以上	—	—
	C ₃ A	6以下	8以下	4以下

2.4 セメント JIS R 5201 に対する規準評価

2.4.1 セメント規格調査

NPcとLPcを8：2の割合で混合中庸熟Pcを製造するにあたり、表8に明記する条件を満たすことを前提に試験を実施する。

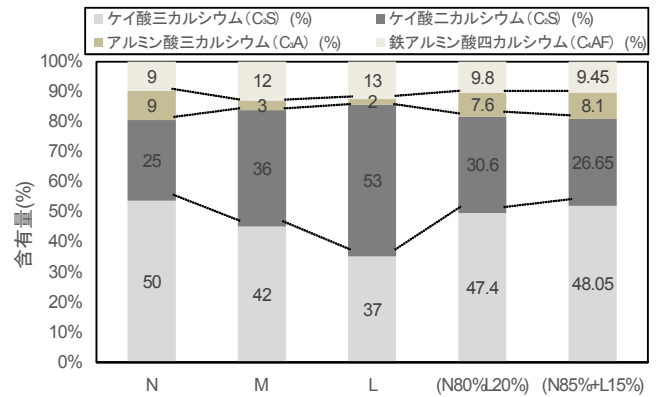
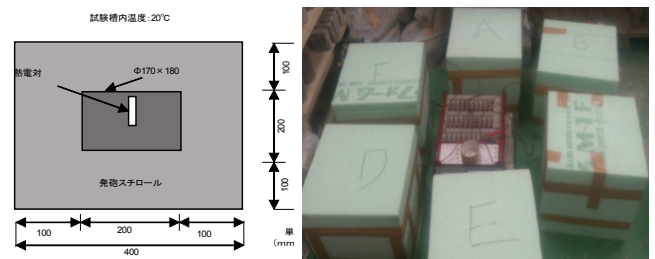
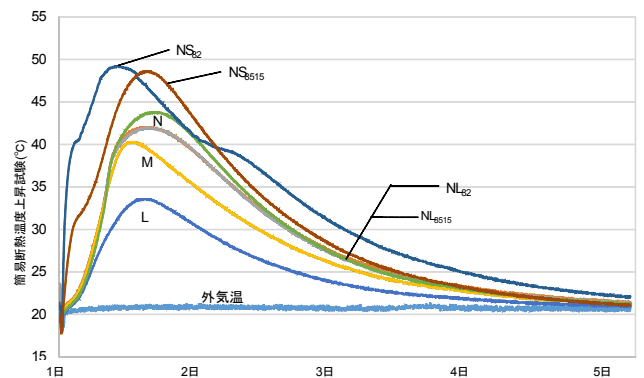


図4 ポルトランドセメント(Pc)クリンカ成分比較表



a) 簡易断熱温度上昇試験機 b) 簡易断熱温度上昇試験の様子



c) 簡易断熱温度上昇試験の結果
図5 簡易断熱温度上昇試験

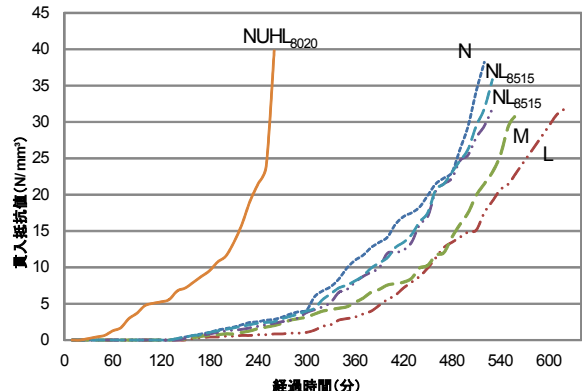


図6 凝結試験

2.4.2 JIS 規格水準多種混合セメント^(3,4)

セメントを混合するにあたり、JIS 規格水準で実用性を図るため、法律的にセメントの多種混合が可能か調査した。JIS A 5308 ではセメントは JISR5210、JISR5211、JISR5212、JISR5213 JISR5214 のいずれかに適合するセメントを用いる。と定めているので、セメントを混合しても上記のいずれかに適合すれば法律的にもセメント合成は可能である。

2.5 JIS 規格における試験方法及び試験結果(研究2)

2.5.1 凝結試験の概要

多種混合したセメント凝結時間を測定し、硬化時間がどれだけ MPc に近づくか検証した。凝結試験の試験体容器寸法は 75mm×85mm×40mm に JIS 規格に沿って練ったセメントペーストを流し入れビガー針装置で10分間隔でそれぞれ測定した。

2.5.2 凝結試験結果

図6に凝結試験結果を示す。混合中熟熱 Pc の硬化時間は、NPc に硬化時間が近づくことが図6によって判断できる。

2.5.3 安定性試験

セメント 200g に水を適量入れ練り混ぜ、セメントペーストを作り、セメントペーストを 130 mm² のガラス板上にとり、へらで軽く撫でて直径約 100 mm の円形とし、中心の厚さが約 15 mm で周辺に向かって薄くなるように作製し、その後湿気箱に入れ、24 時間放置する。24 時間湿空養生したパッドを煮沸容器内の水中に沈め、徐々に加熱して 90 分間沸騰させ、自然に冷却した後、膨張性のひび割れ又は、反りの有無を確認。安定性試験の結果すべての種類のセメント「良」という結果を得た。この結果により、セメントを混合してもひび割れや、反りなどの異常変化が発生しないことがわかる。

2.5.4 簡易断熱温度上昇試験

水セメント比 50% のモルタルを φ170×180 の円形の型枠に流し入れ、厚さ 100mm の断熱材を 400mm×400mm ボックスにし、その中に円形の型枠ごとに入れ、20℃の室温の部屋で7日間データロガーの熱伝対で5分間隔で計測する⁽¹⁾。図7で計測結果を示す。この結果により、混合中熟熱 Pc は混合している割合が N が L に比べ約4倍多いのでその影響により M より発熱したと考えられる。

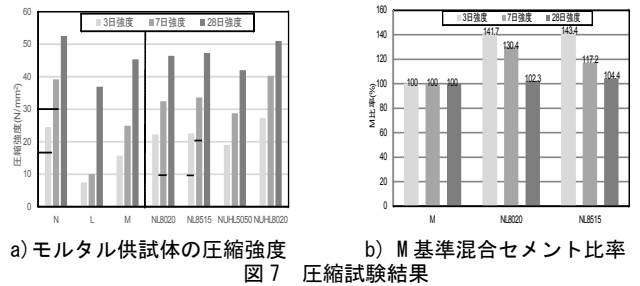
2.5.5 JIS 規定による圧縮試験

図7のa)に圧縮試験の結果を示す。圧縮試験は、試験室内温度 20℃に保たれた試験室で行い、セメント 450g、標準砂 1350g、水 225g のモルタルを内部寸法長さ 160mm、幅 40mm、深さ 40.1mm の3つの角柱供試体が同時に成形できる成形用型に流し込み、24 時間湿気箱に貯蔵し、24 時間後脱型し、水温 20℃に保たれた水中に水中貯蔵する。そして 3 日、7 日、28 日ごとに圧縮試験を行う。また、M を基準とし比較した結果を図7のb)に示す。この結果から混合中熟熱ポルトランドセメントは N の影響を大きく受け、3 日、7 日強度は M よりも強

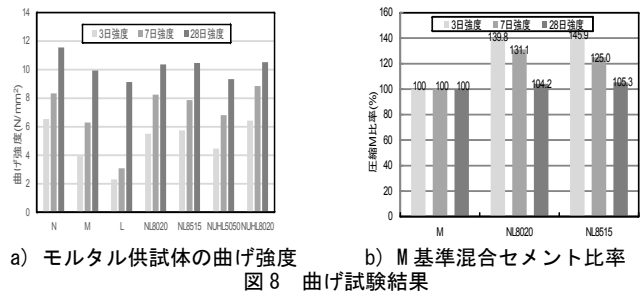
度が大きい、28 日強度ではほぼ同じ値になった。

2.5.6 JIS 規定による曲げ試験

図8のa)に曲げ試験の結果を示す。曲げ試験は圧縮試験を行う試験体と同一物で行う。また、M を基準とし比較した結果を図8のb)に示す。この結果から圧縮試験と同様の傾向であった。



a) モルタル供試体の圧縮強度 b) M 基準混合セメント比率
図7 圧縮試験結果



a) モルタル供試体の曲げ強度 b) M 基準混合セメント比率
図8 曲げ試験結果

3. まとめ

本研究により以下の知見が得られた。

- 1) ヒアリングにより、平常時は JIS の基準に従うが、災害時は、メーカーが、品質保証を満たす方法が具体化されれば、多種混合セメントレジリエンスでの対策の余地がある。
- 2) 凝結試験は、N と L の 8:2 混合では、始発は、大きな差はないが、終結時に、M に近づく傾向が見られた。
- 3) セメント強度は、N と L の 8:2 混合セメントは M の特性に近づく結果となる。
- 4) 簡易断熱温度上昇において、NL 8:2 混合セメントは、N と同程度の熱量であった。
- 5) すべての物性評価試験から、複数の N と L の混合セメントは M の JIS 規格を満たすことが確認された。

参考文献

- 1) 鉄筋コンクリート造建築物の品質管理及び維持管理のための試験方法 日本建築学会 2007.3
- 2) エンサイクロペディア セメント協会 2003,3
- 3) JIS ハンドブック 建築 I, 材料 2005,
- 4) JIS ハンドブック 建築 II 試験・設備 2005
- 5) セメント協会 公式 HP 2014,

謝辞

本研究の実施にあたり、株式会社太平洋セメント、株式会社櫛形生コン、セメント協会の関係各位より多くの助力を賜り感謝いたします。なお本研究の一部は工学院大学 UDM 研究、H25 年度科学研究費（若手 A:23680681 田村雅紀）による