

論文 高温加熱後のコンクリートの強度回復と塩分浸透深さの関係

染谷 勇貴*1・佐藤 明恵*2・栗原 哲彦*3

要旨: コンクリートは高温加熱を受けると劣化し、加熱温度が 500℃以内であれば、一度低下した圧縮強度が日数を経ることによって回復するとの指摘がある。そこで本研究は、強度回復のメカニズムを検討する資料を得る目的で、加熱後の圧縮強度と塩分浸透性の関係を実験的に検討した。普通強度コンクリートを 500℃加熱した後、気中・水中養生と養生期間を変更させ塩分浸透試験を行った。結果、強度回復に伴い、コンクリートの外部物質の浸透に対する抵抗性も回復することが明らかとなった。

キーワード: 高温加熱, 強度回復, 塩分浸透深さ

1. はじめに

一般的に耐火性に優れていると言われているコンクリートは、加熱を受けた温度により被害の程度は異なるが、爆裂や強度低下といった現象が起こる。

土木分野におけるコンクリート構造物の火災は、トンネルや高架橋といった限定された空間で発生した大規模なものが多数を占め、その多くの要因となるのが車輛や多くの可燃物などの積載物を有するトラックなどの事故である。国内の道路トンネル内で発生した交通事故件数は年間約 3000 件程度にまでのぼり、その中でも火災に至るのは毎年 12~30 件程度となっている¹⁾。最近の土木構造物の火災事故としては、平成 20 年 8 月 3 日に首都高速道路 5 号池袋線下り熊野町ジャンクションにてタンクローリーが横転・炎上する事故²⁾、平成 23 年 5 月 27 日には石勝線の第 1 ニュートンネル内にて脱線炎上事故³⁾が発生している。

このような火災事故が起きた際、コンクリート構造物は熱にさらされることになる。そうすると、前述に示した通りコンクリートは熱により細孔構造や化学組成が変化し強度が低下するとされている^{4), 5)}。しかし、一度強度低下したコンクリートは加熱温度が 500℃以下であれば加熱後から約 1 年で加熱前の 9 割程度まで回復することが既往の研究⁶⁾で明らかになっている。

例えば、日本コンクリート工学会のコンクリート構造物の火災安全研究委員会報告書⁶⁾において、水セメント比 60~70%の比較的低強度コンクリートの加熱後の強度回復が報告されている。一方、一瀬ら⁷⁾は高強度コンクリートは加熱後に水分があると圧縮強度やヤング係数の回復が期待できると報告している。加熱によるコンクリートの強度低下の要因には、自由水の蒸発や水酸化カルシウムの分解、熱応力によるひび割れなどが挙げられるが、強度回復の詳しいメカニズムについては未だ解明されていないのが現状である。

そこで、このメカニズムを議論するために、著者らは圧縮強度と外部物質浸透性の関係に着目した。つまり、加熱後のコンクリートの強度回復は内部の細孔構造の変化に起因しており、さらに細孔構造の変化は外部物質浸透性に影響を与えると考えた。したがって、外部物質浸透性を調査することで強度回復のメカニズムを検討できる。

以上より、本研究は強度回復のメカニズムを検討するための基礎資料を得る目的で、加熱後の圧縮強度と塩分浸透性の関係を実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 実験の流れ

本研究の試験の流れを図-1 に示す。図に示すように作製したコンクリート（詳細は後述）を対象に加熱試験を行い、その後の養生方法・期間の違いに伴い、塩分浸透深さがどのように変化するかを実験により測定した。

作製したコンクリートは、加熱試験まで水中養生と

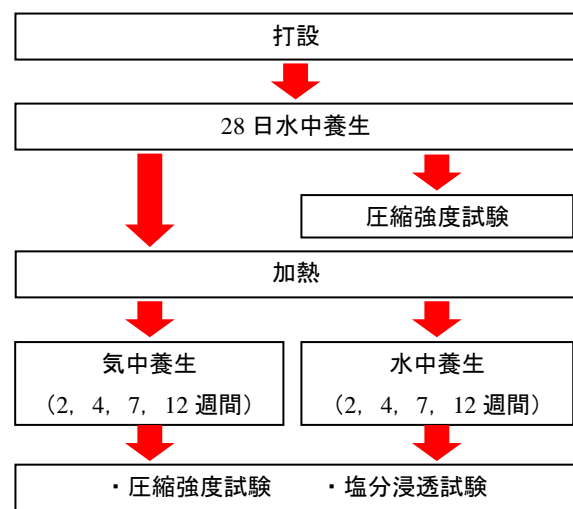


図-1 試験の流れ

*1 東京都市大学大学院 工学研究科 都市工学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 東京都市大学 工学部 都市工学科 学部生 (非会員)

*3 東京都市大学 工学部 准教授・博士 (工学) (正会員)

し、その期間は 28 日間とした。28 日間の養生終了後、加熱試験を実施した。加熱試験後の養生方法は気中・水中養生の 2 種類とし、各養生期間（気中養生では 2, 4, 8, 12 週間、水中養生では 2, 4, 8, 12 週間）を経たのち、圧縮強度試験、塩分浸透試験を行った。加熱後の養生方法および期間を変化させたのは、強度回復過程と細孔構造の変化により変動する外部物質浸透性の変化を確認するためである。

2.2 試験体概要

本研究で対象としたコンクリートは、表-1 に示す示方配合に基づいて作製した。このコンクリートにより円柱供試体（φ100×200mm）を作製した。圧縮強度試験では円柱供試体をそのまま使用し、塩分浸透試験では加熱試験前に円柱供試体を湿式コンクリートカッターにて切断し、寸法φ100×50mm に成型した。各供試体寸法をまとめると図-2 となる。なお、後述の各試験は供試体 3 体ずつ実施し、本報告ではその平均値を示す。

2.3 加熱試験

供試体の加熱には、写真-1 に示す高温電気炉（制御可能な温度範囲：500～1500℃、炉内寸法：200×200×250mm）を使用した。加熱は 28 日間の水中養生終了後、供試体表面を自然乾燥させた後に実施した。なお、供試体爆裂による高温電気炉破損を防ぐため、供試体をあらかじめ金属製のカゴ（写真-2、寸法：130×150×220mm）に入れ、加熱試験を行った。加熱温度は加熱後の回復が見込める最高温度と考えられる 500℃とした。昇温勾配は約 30℃/分とし、15分で 500℃まで昇温したのち 2 時間温度を維持した。その後、炉内にて自然冷却を行い、炉内の温度が 100℃を下回った後に供試体を取り出した。なお、加熱曲線には JIS や ISO などの定められたものがあるが、加熱による損傷度を大きくするために、本研究では使用した高温電気炉の性能の範囲内で、昇温勾配を JIS や ISO の加熱曲線に比べ高くした。さらに、供試体内の温度むらを極力少なくするために、500℃で 2 時間保持させた。加熱時の加熱曲線の一例を図-3 に示す。

2.4 圧縮強度試験

加熱前後の供試体に対して、JIS A 1108⁸⁾に基づいて圧縮強度を測定した。同時に変位を測定しヤング係数も算出した。加熱前後の圧縮強度とヤング係数から残存比を求めた。なお、圧縮強度試験は加熱前では 28 日間の水中養生後に行い、加熱後では加熱直後ならびに加熱後養生期間終了後にそれぞれの期間経過後に行った。

2.5 塩分浸透深さ試験

本研究で採用した塩化物イオンを浸透させる方法は、JSCE-G 571-2003⁹⁾に定められている直流定電圧を用い

た電気泳動方式とした。塩分浸透深さ試験は以下の手順にて実施した。

まず、浸透面を限定するために加熱後の供試体側面をエポキシ樹脂系接着剤で被覆した。被覆した供試体を写真-3a) に示す。その後、電気泳動ユニットのゴム装置に供試体を埋め込み、溶液の漏れを防ぐため供試体とゴム装置の接触面をシリコンで覆った。処理後の

表-1 示方配合

W/C (%)	単位量(kg/m ³)					
	W	C	S	G	Ad ₁	Ad ₂
55	174	316	811	974	0.79	0.032

セメント C：早強ポルトランドセメント、密度 3.14g/cm³
 細骨材 S：相模川水系産川砂、密度 2.61g/cm³
 粗骨材 G：八王子産砕石、最大寸法 20mm、密度 2.67g/cm³
 混和剤 Ad₁：AE 減水剤
 混和剤 Ad₂：補助 AE 剤

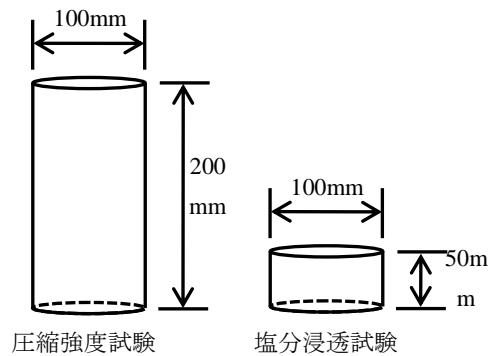


図-2 供試体寸法



写真-1 高温電気炉



写真-2 金属製のカゴ

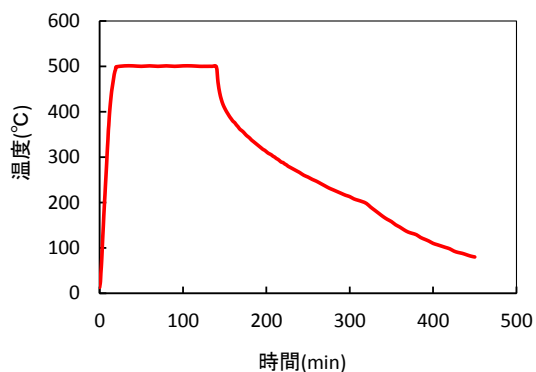


図-3 加熱曲線



写真-4 電気泳動セル

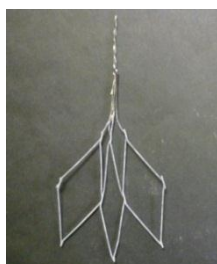


写真-5 電極

供試体を写真-3b)に示す。この両側に溶液を設置し、写真-4に示すような電気泳動セルが組みあがる。使用した溶液は 0.3mol/l (12g/リットル) の水酸化ナトリウム (NaOH) 水溶液と 0.5mol/l (29g/リットル) の塩化ナトリウム (NaCl) 水溶液である。水酸化ナトリウム水溶液側を陽極、塩化ナトリウム水溶液側を陰極とし、直流定電圧 15V を電極間へ印加した。電極にはチタン製の針金状の電極 (写真-5) を用いた。印加時間は 24 時間とした。

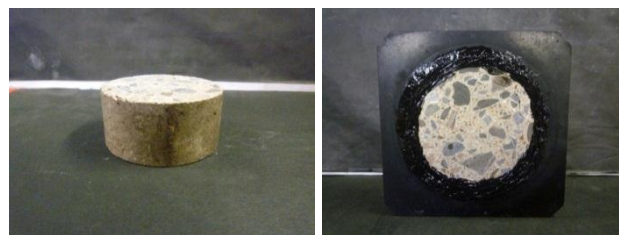
印加時間を 24 時間と短くしたのは、これ以上の印加は塩化物イオンが供試体を貫通する可能性が高くなり、塩分浸透深さの変化を測定できなくなるためである。

試験終了後、供試体を取り出し割裂した。割裂断面に 17g/リットルの硝酸銀 (AgNO₃) 水溶液を噴霧し、白く変色した部分を塩分浸透深さとして測定した。写真-6に示すように 1 断面につき 20mm 間隔 5 箇所をノギスで測定し、その平均値を塩分浸透深さとした。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

水中養生終了後の非加熱状態のコンクリートおよび加熱後所定期間養生されたコンクリートの圧縮強度を表-2に示す。また、非加熱時のコンクリートの圧縮強度を基準に、圧縮強度の残存比を算出した。ただし、加熱後の養生期間によってコンクリート作製時のバッチが異なるため、加熱後の養生期間ごとに非加熱用のコンクリートも作製し、そのコンクリートを使用して非加熱時の圧縮強度を測定している。この非加熱時の



a) エポキシ樹脂塗布 b) シリコン被覆

写真-3 試験前処理

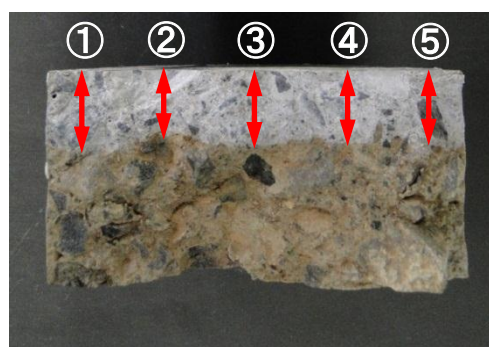


写真-6 塩分浸透深さ測定方法

表-2 圧縮強度結果

シリーズ名	養生期間	加熱前	加熱後
		圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)
気中養生			
非加熱	-	43.9	28.4
加熱直後	-	43.9	28.4
2-A	2週間	43.9	25.2
4-A	4週間	39.6	23.1
7-A	7週間	41.2	23.6
12-A	12週間	36.6	23.2
水中養生			
2-W	2週間	43.9	31.7
4-W	4週間	41.2	33.4
7-W	7週間	41.2	30.7
12-W	12週間	37.5	31.6

圧縮強度 (表-2 中の加熱前圧縮強度) を用いて残存比を算出している。したがって、表-2 に示すように非加熱時の圧縮強度は加熱後の養生期間ごとに算出されており、同じ示方配合であってもわずかな差異が認められる。

加熱後の圧縮強度およびその残存比の経時変化を図-4, 5 に示す。図-4 から加熱後の養生が気中養生の場合、非加熱時の圧縮強度に比べ加熱後は急激に圧縮強度が減少し、その後、養生期間を経ても明確な強度回復は認められなかった。残存比で見た場合、基準となる非加熱時の圧縮強度に多少のバラツキがあるため、加熱後の養生 4 週間までは低下し、非加熱時の 0.560 となったが、それ以降わずかな残存比の回復が認めら

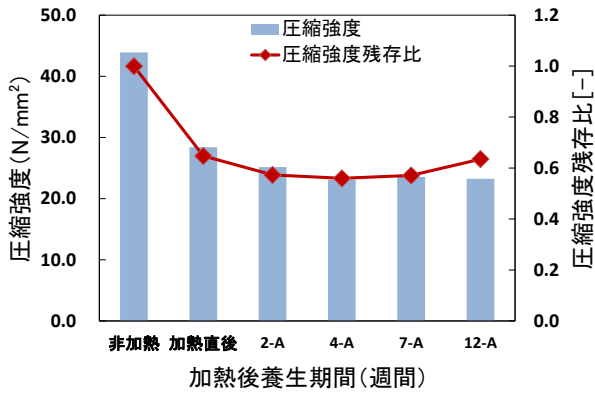


図-4 圧縮強度と残存比の経時変化（気中養生）

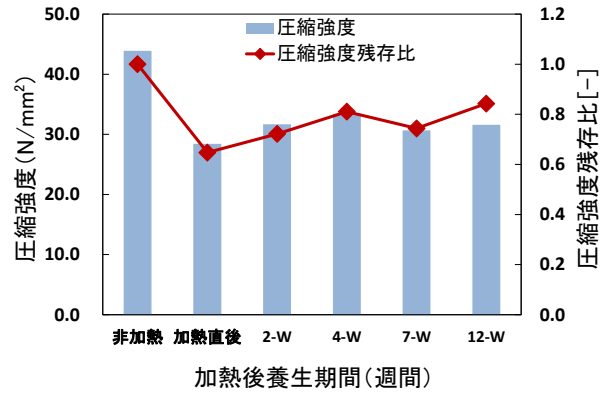


図-6 圧縮強度と残存比の経時変化（水中養生）

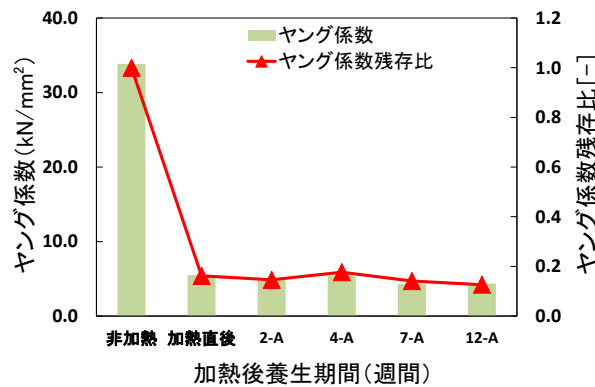


図-5 ヤング係数と残存比の経時変化（気中養生）

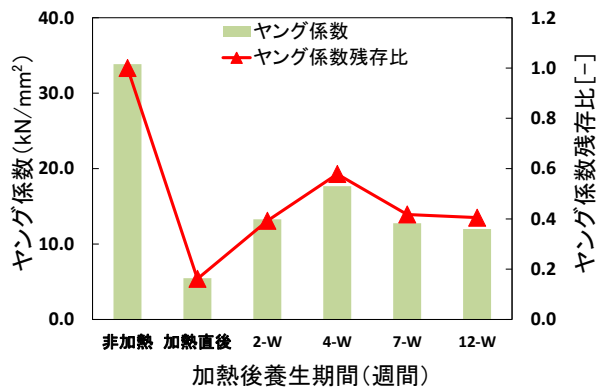


図-7 ヤング係数と残存比の経時変化（水中養生）

れ、加熱後の養生12週間で非加熱時の0.635となった。加熱後4週間以降で圧縮強度残存比が回復することは日本コンクリート工学会の委員会報告書⁶⁾でも記されている。

これに対して、加熱後の養生が水中養生の場合、水中養生期間を経るに伴い圧縮強度の回復が認められた。残存比においても同様の結果となり、養生2週間ですでに回復の傾向が見られ、12週間水中養生を経た後は、非加熱時の0.840まで圧縮強度が回復した。

以上から、加熱後一定の養生期間を経ることで圧縮強度が回復することが明らかとなり、それは加熱後の水中養生で顕著であった。

3.2 ヤング係数

圧縮強度と同時に測定したヤング係数を表-3に示す。圧縮強度と同様、加熱後のヤング係数とその残存比の経時変化を図-6, 7に示す。図より圧縮強度同様に、加熱により大幅なヤング係数の低下が生じた。気中養生では、加熱直後のヤング係数の残存比が非加熱時の0.16となり、その後、12週間を経た後も残存比は0.13であった。

これに対して水中養生の場合、加熱直後のヤング係数の残存比が0.16であったものが、12週間を経た後は0.40まで回復している。しかし、図-7に示すように4

表-3 ヤング係数結果

シリーズ名	養生期間	加熱前	加熱後
		ヤング係数 (kN/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
気中養生			
非加熱	-	33.9	
加熱直後	-	33.9	5.5
2-A	2週間	33.9	4.9
4-A	4週間	30.5	5.4
7-A	7週間	30.5	4.3
12-A	12週間	34.3	4.3
水中養生			
2-W	2週間	33.9	13.3
4-W	4週間	30.5	17.7
7-W	7週間	30.5	12.8
12-W	12週間	29.6	12.0

週間経たものに比べ、7および12週間経たヤング係数が小さくなっている。目視による破壊状況の確認では他との差異は認められなかったため、この理由については不明である。再実験等を実施し、検討する必要があると考える。しかし、いずれの養生方法においても非加熱に近い値までの回復は認められなかった。

3.3 塩分浸透深さ

塩分浸透深さの測定結果を表-4に示す。また、写真-7に塩分浸透深さを測定するために割裂面に硝酸銀を噴霧した様子を示す。表-4から非加熱で16.6mmであった塩分浸透深さが加熱直後では22.4mmとなり、加熱によりコンクリート組織がダメージを受け、塩化物イオンが浸透しやすくなったことが分かる。その後、気中養生下に静置した場合、塩分浸透深さは低下せず、気中12週間後で22.9mmであった。一方、加熱後水中養生下に静置した場合、養生期間の経過に伴い、塩分浸透深さが減少しているのが分かる。加熱直後では22.4mmであった塩分浸透深さが水中12週間後では20.0mmとなった。

塩分浸透深さと圧縮強度残存比との関係を図-8、9に示す。加熱後気中養生した場合、前述のように養生4週以降でわずかな圧縮強度残存比の回復が認められたが、これに伴う塩分浸透深さの明確な減少は認められなかった。これに対して、水中養生の場合は圧縮強度残存比の増加に伴い、塩分浸透深さの減少が明確に認められた。これにより強度回復に伴いコンクリートの外部物質の浸透に対する抵抗性も回復することが明らかとなった。以上の結果から、加熱後の強度回復のメカニズムは、日本コンクリート工学会のセメント系材料の自己治癒技術の体系化研究専門委員会で検討されたコンクリートの自己治癒力¹⁰⁾の一種の発揮によるものと推測することができる。つまり、加熱によりコンクリートの組織は損傷する(組織・物質の分解、微細なひび割れの発生等)が、そこに水分が供給されると未水和セメントの水和反応を生じさせ、損傷箇所の治癒・ひび割れの閉塞が起こる。これにより、コンクリート内部の細孔構造に変化が生じ、結果、塩化物イオンの浸透が妨げられたと考えられる。同時に、損傷箇所の治癒・ひび割れの閉塞により荷重負担域が増加し、結果、強度の回復につながったと考えられる。再度、本研究の結果を見た場合、加熱後の水中養生では外部より水分供給があるため、未水和セメント分の水和反応が生じやすく、気中養生では外部からの水分供給がないため、未水和セメント分の水和反応がほとんど生じない。そのため、水中養生した場合に強度回復が明確に観察されたと考えられる。しかし、気中養生した場合においても加熱後4週間以降で若干の強度回復が確認されている。理由は不明であるが、内部水分の移動や湿度などより詳細な水分移動を観察する必要がある。さらに、本研究の結果だけからは強度回復や塩分浸透深さが減少した理由が自己治癒力の効果であるとは明言できないため、今後も強度回復のメカニズムについて検討していく必要がある。

表-4 塩分浸透深さ結果

シリーズ名	養生期間	塩分浸透深さ (mm)	
		気中養生	
非加熱	-	16.6	
加熱直後	-	22.4	
2-A	2週間	23.5	
4-A	4週間	23.7	
7-A	7週間	23.8	
12-A	12週間	22.9	
		水中養生	
2-W	2週間	21.4	
4-W	4週間	18.6	
7-W	7週間	19.1	
12-W	12週間	20.0	

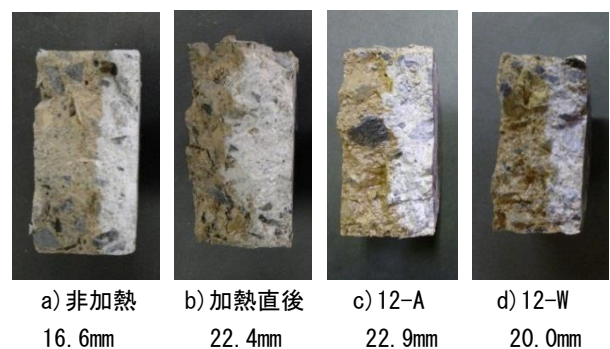


写真-7 塩分浸透深さの割裂面の様子

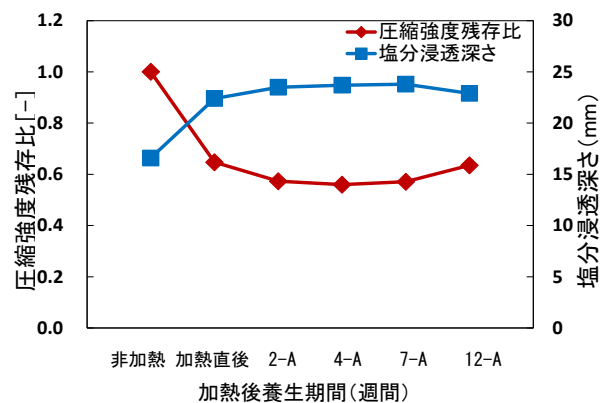


図-8 塩分浸透深さと残存比の経時変化 (気中養生)

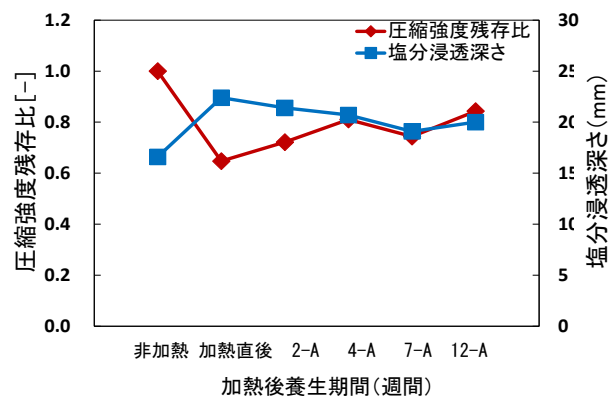


図-9 塩分浸透深さと残存比の経時変化 (水中養生)

4. まとめ

本研究は、加熱後の圧縮強度の強度回復過程とそれに伴う塩分浸透深さとの関係を実験的に検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 加熱後の圧縮強度残存比について、加熱後の気中養生 4 週間までは圧縮強度残存比の減少が確認でき、それ以降わずかであるが回復傾向にあった。これに対して水中養生では 2 週間以降に強度回復が認められ、その回復傾向は気中養生より顕著であった。
- 2) 加熱後のヤング係数は圧縮強度同様、加熱により大幅な低下が生じた。気中養生では 12 週間経た後も残存比に変化は見られなかった。これに対して水中養生では非加熱までは回復しないものの気中養生より回復が認められた。
- 3) 加熱後の塩分浸透深さは、気中養生下では変化しなかったが、水中養生下では養生期間の経過に伴い塩分浸透深さが徐々に減少するのが確認できた。
- 4) 塩分浸透深さと圧縮強度残存比では、加熱後気中養生した場合、養生 4 週間以降でわずかな圧縮強度残存比の回復が認められたが、これに伴う塩分浸透深さの明確な減少は認められなかった。これに対して、水中養生の場合は圧縮強度残存比の増加に伴い、塩分浸透深さの減少が明確に認められた。これにより強度回復に伴いコンクリートの塩化物イオンの浸透に対する抵抗性も回復することが明らかとなった。

参考文献

- 1) 社団法人 土木学会：コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集，コンクリート技術シリーズ No.63, pp.3-12, 2004.10.28
- 2) 首都高速株式会社：<http://www.shutoko.jp/>
- 3) 東京新聞：<http://www.tokyo-np.co.jp/>, 2011.5.28
- 4) 一瀬賢一，長尾覚博：高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学的性質に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 541 号，pp.23-30, 2001
- 5) 細谷多慶，森脇拓也，綾野克紀，阪田憲次：コンクリート中の微細ひび割れが塩分浸透性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp.1011-1016, 2004
- 6) 公益社団法人 日本コンクリート工学会：コンクリート構造物の火災安全研究委員会 報告書，2002.6
- 7) 一瀬賢一，川口徹，長尾覚博，川辺伸二：高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度回復，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp.353-358, 2003
- 8) 日本工業規格：コンクリートの圧縮強度試験方法
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書[規準編]土木学会規準および関連規準，電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法（案），pp.277-284, 2007
- 10) 日本コンクリート工学協会：セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法研究専門委員会 報告書，2009.3