論文 火害を受けたコンクリートの劣化診断手法の検討

春畑 仁一*1·阪口 明弘*1·山根 政夫*2·皿井 剛典*3

要旨:火害を受けたコンクリートの劣化を的確に判断することは、合理的な補修・補強方法を検討する上で 重要である。本研究では、火害を受けたコンクリートの劣化診断の手法を提案することを目的として、加熱 後のコンクリートを対象に、火害調査に適用可能な非破壊・微破壊試験を実施した。本稿では、反発度法、 引っかき傷法、またその比較として、圧縮強度および静弾性係数の結果を得た。その結果、反発度法と引っ かき傷法を用いることにより、水セメント比および放水の有無に関らず、コンクリート表面の受熱温度が 500℃以上のコンクリート表面の劣化を把握できることがわかった。

キーワード:火害,非破壊・微破壊試験,反発度,引っかき傷

1. はじめに

コンクリートは火害を受けると,セメント硬化体と骨 材とがそれぞれ異なった膨張収縮挙動を示し,それによ って組織は緩み,端部の拘束などにより生じた熱応力に よってひび割れが生じて圧縮強度や耐久性が低下する。

火害を受けたコンクリート構造物のコンクリートの 劣化を的確に診断することは、合理的な補修・補強方法 を決定する上で重要である。さらに火害に遭った構造物 は、早期に補修・補強を行いたいという要求がある場合 が多く、非破壊・微破壊試験など簡易に診断できる方法 が望まれている。

日本建築学会「建物の火害診断および補修・補強方法 指針(案)・同解説」¹⁾(以下,「指針(案)」と称す)では, 火害を受けたコンクリート部材を調査・診断して補修・ 補強方法を決定する基準が示されている。ただし,指針 (案)で紹介されている非破壊・微破壊試験方法は,コン クリート表面の定性的な劣化状態の把握に留まっており, 表面受熱温度の定量的な推定が実施できる方法や表面か らの劣化深さを把握できる方法は示されていない。

本研究の目的は、火害を受けた コンクリートの劣化を、非破 壊・微破壊試験を用いて定量 的に把握することにより、コ ンクリートの表面に対して、 補修や補強範囲の決定に利用 できる劣化診断手法を提案す ることである。筆者らはこれ まで、水セメント比が同一で 受熱温度が異なるコンクリー ト試験体において、非破壊・ 微破壊試験を実施して試験体 表面の物性の変化を捉えることが可能であることを確認 してきた^{2),3)}。本実験では,水セメント比の異なるコン クリート試験体を用いて,加熱温度ならびに冷却方法の 異なる加熱実験を行った後,**表-1**に示す非破壊・微破 壊試験ならびに破壊試験を実施し,それぞれの傾向を示 した。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの加熱実験

(1) 試験体

試験体は、図-1に示すように長さ1000×幅500×厚 さ200mmの直方体の型枠に、かぶり厚さを50mmとし て異形棒鋼(呼び名:D10)を縦横200mmピッチで配置し、

▲ 一 武鞅項日											
	試験項目	測定方法									
非破壊	反発度法	JIS A 1155									
微破壊	引っかき傷法	2.3(2)に示す									
破壞	圧縮強度 静弾性係数	JIS A 1107 JIS A 1149									

=+⊯ 태국 다 다

 <



*2 (株)構造総研 技術開発室 (正会員)

*3 川崎地質(株)事業本部保全・エネルギー部 (正会員)

レディーミクストコンクリートを打設したものである。 コンクリートの材料の詳細を表-2に示す。

コンクリートの調合は、水セメント比 63%、50%およ び38%の3水準(以下, W/C:63%, 50%, 38%と称す) とした。コンクリートの調合を表-3 に示す。試験体は 打設から7日後に脱型し、その後、表-3に示す期間、 室内空中に静置した。また、コンクリート表面および内 部の温度を測定するために、コンクリート打設前に、図 -1に示す12ヶ所にSK熱電対を埋設した。

(2) 加熱方法および冷却方法

材料

セメント

(C)

細骨材

(S)

粗骨材

(G)

混和剤

(L L L)

試験は天井スラブの加熱を想定し、試験体の長さ1000 ×幅500mmの1面(有効加熱寸法:長さ750×幅500mm) が下向きになるようにガス加熱炉に設置した。

加熱方法は、都市ガス(46090kJ/m³)を熱源とし、ISO834 に規定する標準加熱曲線に沿って炉内温度を上昇させ, コンクリート加熱面の温度(図-1a~c点 熱電対①の 平均値)が, 300, 500, 750, 950℃になった時点で終了

表-2 コンクリートの使用材料

普通ポルトランドセメント

(密度:3.16g/cm³)

京都府亀岡市産砕石

物性

佐賀県小川島産海砂,京都府亀岡市産砕砂混合

古州北 A E 湖北刘 博潍形 I 铦

(表乾密度:2.56g/cm3, 混合比 70:30)

(表乾密度:2.67g/cm³, 実績率:58.0%)

W/C63%:AE 減水剤 標準形 I 種

した。炉内温度は加熱面中央部から 10cm 離れた位置に 設置した SK 熱電対を用いて計測した。ガス加熱炉内の 状況を写真-1に、加熱状況を写真-2に示す。また、一 例として、経過時間とコンクリート表面の受熱温度との 関係を図-2に示す。

加熱後の冷却方法は、火災においては消火時に放水す ることを想定し,室温まで気中で徐冷した場合(以下, 「放水なし」と称す)と、放水した後室温まで気中で徐 冷した場合(以下、「放水あり」と称す)の2種類とした。 なお, 放水量は 16.2 ℓ/min として, 加熱面に均等に 3 分 間放水し続けた。

2.2 コンクリートの圧縮強度試験および静弾性係数試験 加熱後の試験体からコアを採取して、圧縮強度および 静弾性係数の測定を実施した。

コンクリートコアの採取および圧縮強度試験は、JISA 1107「コンクリートからのコアの採取方法および圧縮強 度試験方法」により,各試験体の加熱側のコンクリート



	(Add.)	w/C30,2	W/C30,38%.同性胞 AL 國 小利 標準形 1 裡				図-	-2 加熱試	加熱試験の炉内温度					
コンクリート表面温度測定結果 表-3 コンクリートの調合と試験体静置期間														
W/C (%)	W/C	S/2	单位量(kg/m ³)			実測値			静置					
	(%)	セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 <i>Add</i> .	スランプ [。] (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 ^{注)} (N/mm ²)	期間 (日)				
-	63.0	45.4	292	184	556	991	2.920	15.0	3.9	29.7	94			
	50.0	48.3	360	180	823	913	2.916	19.0	4.8	35.5	94			
	38.0	44.2	474	180	712	932	3 792	18.5	4.2	54.2	95			

注)28日間標準養生した試験体の圧縮強度を示す。



写真-1 ガス加熱炉内の状況



写真-2 加熱状況

面から直径 100mm,長さ 200mmのコアを1本ずつ採取 して試験した。なお、圧縮強度試験の際に JISA 1149「コ ンクリートの静弾性係数試験方法」により、静弾性係数 を求めた。

2.3 コンクリートの非破壊・微破壊試験

非破壊試験である反発度法および微破壊試験である引 っかき傷法の測定方法を示す。

(1) 反発度法

反発度法は、リバウンドハンマーを用いて、JISA1155 「コンクリートの反発度の測定方法」により、コンクリ ート加熱面の反発度を9箇所ずつ測定し、その平均値で 示した。

(2) 引っかき傷法

引っかき傷法は、日本塗り床工業会の認定品である引 っかき試験器を用いて、コンクリート表面に一定の荷重 (9.8N)をかけて引っかき傷を加えた後、ルーペ及びクラ ックスケールを用いて測定した引っかき傷幅からコンク リートの圧縮強度を推定する方法⁴⁾である(以下、「直 読法」と称す、**写真-3**参照)。なお、引っかき傷幅は各 5箇所ずつ測定し、その平均値で示した。

直読法は、コンクリート表面を引っかく際の突起部に かかる力の安定度によるばらつきや測定時のスケールの 読み取り時のばらつきが考えられる。そこで、より確実 に一定の力で引っかき傷を加えることが可能で、精度よ く測定を実施できるK社考案の引っかき傷試験器(機械 式でハンドルを回し、秒速1~1.2cmで引っかき傷をつけ ることが可能)および光学測定器(CCDカメラで撮影し、 画像処理により0.02mm単位で引っかき傷幅の測定が可



写真-3 引っかき傷法(直読法)の 試験状況と引っかき試験器





写真-4 引っかき傷法(光学測定法)の測定状況

能)を使用して,引っかき傷幅の測定⁵⁾(以下,「光学測 定法」と称す,**写真-4**参照)を実施し,W/C:50%およ び38%の直読法と比較した。

3. 実験結果と考察

3.1 コンクリートの圧縮強度結果

コンクリート表面が加熱中に受けた最高温度(以下, 「コンクリート表面の受熱温度」と称す)と圧縮強度と の関係を図-3に示す。なお、コンクリート表面の受熱 温度は、試験体のa~c部に取り付けた熱電対①の平均 値であり、コンクリートの圧縮強度は、加熱後の試験体 から採取したコアの圧縮強度を未加熱のコンクリートか ら採取したコアの圧縮強度で除した圧縮強度比として示 した。また、各水セメント比について、受熱温度と圧縮 強度比を近似した二次曲線を図中に示す。

圧縮強度比は、コンクリート表面の受熱温度の上昇に 伴って低下した。W/C:63%では、コンクリート表面の受 熱温度が500℃で約0.7,950℃で0.4となり、300℃~950℃ まで 100℃上昇するごとに約 6%ずつ低下した。一方、 W/C:38%では、コンクリート表面の受熱温度が500℃で 0.9、950 で0.4 となり、500℃以下では100℃上昇するご とに約 5%、500℃以上では100℃上昇するごとに約 12% ずつ低下し、その傾向は各水セメント比のコンクリート 表面の受熱温度により異なった。



圧縮強度比に対する冷却方法の違いによる放水あり・なしの影響を図-4 に示す。圧縮強度比は、いずれの水 セメント比においても、放水の影響は認められなかった。 次に、静弾性係数比と圧縮強度比との関係を図-5 に 示す。なお、コンクリートの静弾性係数は、加熱後の試 験体から採取したコアの静弾性係数を未加熱のコンクリ ートから採取したコアの静弾性係数で除した静弾性係数 比として示した。

静弾性係数比は,圧縮強度比と同様にコンクリート表 面の受熱温度の上昇に伴って低下した。



図-5 静弾性係数比と圧縮強度比との関係

3.2 コンクリートの非破壊・微破壊試験結果

(1) 反発度

コンクリート表面の受熱温度とコンクリートの反発度 との関係を図-6 に示す。なお、コンクリートの反発度 は、加熱後の反発度を未加熱のコンクリートの反発度で 除した反発度比として示した。また、各水セメント比に ついて、受熱温度と反発比を近似した二次曲線を図中に 示す

反発度比は、コンクリート表面の受熱温度の上昇に伴って低下した。その傾向は水セメント比により異なった。 W/C:63%では受熱温度が300℃までは低下せず、500℃から低下が始まり、950℃では0.7となった。W/C:50%では 受熱温度が300℃で低下が始まり、950℃で0.4となった。 W/C:38%では受熱温度が300℃で低下が始まり、950℃で0.3となった。

この結果から, W/C:63%では, コンクリート表面の受 熱温度が 500℃以上, W/C:50%および W/C:38%では, 受 熱温度が 300℃以上において, 反発度比を用いて火害の 影響を判断できる可能性がある。ただし, W/C:63%の場 合, 圧縮強度比と反発度比をコンクリートの受熱温度ご とに比較すると, 受熱温度 300℃では反発度比の低下に 対し, 圧縮強度比の低下が大きい。よって, 受熱温度が 500℃以下では、反発度のみでは火害の影響を判断することが難しいと考えられる。

反発度比に対する冷却方法の違いによる放水あり・な しの影響を図-7 に示す。反発度比は、いずれの水セメ ント比においても、放水の影響は認められなかった。



図-6 コンクリート表面の受熱温度と 反発度比との関係



(2) 引っかき傷幅

加熱後のコンクリートの引っかき傷幅とコンクリート 表面の受熱温度の関係を図-8 に示す。なお、各水セメ ント比のコンクリートの引っかき傷幅は、加熱後の引っ かき傷幅を未加熱のコンクリートの引っかき傷幅で除し た引っかき傷幅比として示した。また、各水セメント比 について、受熱温度と引っかき傷幅比を近似した二次曲 線を図中に示す

引っかき傷幅比は、コンクリート表面の受熱温度の上 昇に伴って増大し、その傾向は水セント比によって異な った。W/C:63%では、受熱温度が 300℃から引っかき傷 幅比が増大し、950℃では 6.5 となった。W/C:50%および 38%では、受熱温度が 500℃から増大し、950℃で 6.0~ 6.5 となった。

この結果から, W/C:63%ではコンクリート表面の受熱 温度が 300℃以上, W/C:50%および W/C:38%では 500℃ 以上において、引っかき傷幅比を用いて火害の影響を判断できる可能性がある。ただし、引っかき傷幅比と圧縮 強度比をコンクリートの受熱温度ごとに比較すると、 W/C:50%および38%の場合、受熱温度300℃では、引っ かき傷比の低下に対し、圧縮強度比の低下が大きい。よ って、受熱温度500℃以下では、引っかき傷比のみでは 火害の影響を判断することが難しいと考えられる。



引っかき傷幅比に対する冷却方法の違いによる放水 あり・なしの影響を図-9 に示す。引っかき傷幅比は, いずれの水セメント比においても,放水の影響は認めら れなかった。



引っかき傷幅比において、測定法の違いを比較するため、直読法と光学測定法との関係を図-10に示す。

光学測定法は、W/C:50%では直読法の約 1.2 倍, W/C:38%では直読法の約 0.3 倍の結果であった。このこ とから、同一の引っかき傷幅においても、光学測定法と 直読法ではそれぞれ異なった結果を示すことがわかった。

3.3 コンクリート表面の受熱温度の推定

本実験で得られた,各水セメント比の反発度比と直読

法の引っかき傷幅比から,重回帰分析により受熱温度を 推定を試みた。ただし、コンクリート表面の受熱温度が 300℃の反発度比と引っかき傷幅比では、明瞭な低下がみ られない結果であったことから、受熱温度の推定には除 外した。表-4に水セメント比(W/C)、反発度比(Rr)およ び直読法による引っかき傷幅比(Sr)を説明変数としたコ ンクリート表面の受熱温度(T)の回帰式および相関係数 (重相関係数)を示す。また、図-11にコンクリート表 面の受熱温度と推定受熱温度の関係を示す。

コンクリート表面の受熱温度を推定した結果,水セメ ント比,放水の有無に関らず,受熱温度が 500℃以上の 場合,本実験で得られたデータについては,概ね±1 割 の誤差で推定が可能であることがわかった。



図-10 直読法と光学測定法との関係

 幅比とコンクリート表面の受熱温度との関係式

 回帰式:T=aW/C+bRr+cSr+d (重相関係数:0.972)

 説明変数
 a
 b
 c
 d

 -3.5
 -441.7
 55.3
 832.3

表-4 各水セメント比の反発度比および引っかき傷



推定受熱温度との関係

4. まとめ

火害を受けたコンクリートの劣化の程度を定量的に把 握することを目的に,水セメント比の異なるコンクリー ト試験体を用いて,加熱温度ならびに冷却方法の異なる 加熱実験を行った後,反発度法および引っかき傷法なら びに採取したコアの圧縮強度,静弾性係数の試験を実施 した。本実験により得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 圧縮強度比および静弾性係数比はコンクリートが火 害を受けると低下した。圧縮強度比の低下傾向は水 セメント比によって異なる。また、放水の影響は明 確にはみられなかった。
- (2) 反発度比はコンクリート表面が火害を受けると低下 する。その低下傾向は水セメント比によって異なる が,水セメント比,放水の有無に関らず,概ね受熱 温度が 500℃以上であれば,反発度比によって火害の 影響を判断できる。
- (3) 引っかき傷幅比は、コンクリート表面が火害を受けると増大した。その傾向は水セメント比によって異なるが、水セメント比、放水の有無に関らず、概ね受熱温度が500℃以上であれば、引っかき傷幅比によって火害の影響を判断できる。
- (4) 引っかき傷法は、直読法と光学測定法では異なる測 定結果を示した。今後はさらにデータを蓄積し、その傾向を明らかにしたい。
- (5) 反発度比および引っかき傷幅比から、コンクリート 表面の受熱温度の推定が可能か試みた。その結果、 本実験で得られたデータについては、受熱温度が 500℃以上の場合、水セメント比、放水の有無に関ら ず、受熱温度の概ね±1割程度の誤差で推定が可能で あった。

参考文献

- 日本建築学会編「建物の火害診断および補修・補強 方法 指針(案)・同解説」2010年2月
- 2) 春畑仁一,阪口明弘,皿井剛典:火害を受けたコン クリート構造物の劣化診断手法の検討 その2 コン クリート表面の非破壊・微破壊試験結果,日本建築 学会大会学術講演梗概集(東海),pp,235-236, 2012.9
- 3) 春畑仁一,阪口明弘,皿井剛典:火害を受けたコン クリートの劣化診断手法の検討 その2コンクリー ト表面の非破壊・微破壊試験および破壊試験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp,125-126,2013.8
- 4) 湯浅昇,笠井芳夫,松井勇,篠崎幸代:引っかき傷 によるコンクリートの圧縮強度試験方法の提案,日 本非破壊検査協会シンポジウム「コンクリート構造 物の非破壊検査への期待」論文集, Vol.1, pp.115-122, 2003.8
- 5) 辻奈津子,山根政夫,谷川恭雄,鈴木計夫:各種非 破壊試験法による低強度コンクリートの強度推定方 法に関する研究 その4 垂直コンクリート面に対す る引っかき傷法の適用性,日本建築学会大会学術講 演梗概集,材料施工 pp,233-234, 2010.9