

6. RC 集合住宅の火災事例に基づく劣化度調査・診断および補修

Diagnosis and Repair Method of based on Example of Fire-Damaged Reinforced Concrete Apartment

山崎 順二^{*1} 河合 智寛^{*2} 宇井 衛^{*2} 寄廣 茂樹^{*3}

要 旨

当社が 26 年前に施工した鉄筋コンクリート (RC) 造集合住宅の一室から火災が発生し、火災後の構造体の劣化度の調査を、日本建築学会「建物の火災診断および補修・補強方法指針・同解説」に示される火災調査の手法、診断および補修方法の選定までの一連の流れに基づいて実施した。

コア採取および中性化深さなどの二次調査の結果、一部の梁下部に浮きが認められた以外は構造体コンクリートの強度低下や中性化の進行は認められず、構造安全性や耐久性に影響を及ぼす程度の劣化や損傷は受けていないことが明らかとなり、適切な補修を施すことによって今後も十分に供用できると判断した。

キーワード：火害／受熱温度／リバウンドハンマー／中性化深さ／コア強度／調査・診断・補修

1. はじめに

鉄筋コンクリート造構造物が火災を受けると、まずかぶりコンクリートが被害を受ける。表層のかぶりコンクリートが火災により 570℃以上の高温履歴を受けると、その部分のコンクリートが中性化し、表面の変色（ピンク色）が生じ、さらに、消火のための放水の影響もあり微細なひび割れが生じる場合がある。受熱時間が長くかつ高温になると、コンクリート表面が灰白色に変色するとともに、断面内部の鉄筋も熱影響を受け、表層コンクリートの品質や耐久性だけでなく、引張強度や降伏値が低下する。

今回、当社が 26 年前に施工した RC 造集合住宅の一室から火災が発生し、当社が火害の調査・診断を行うこととなった。

本報は、建物供用後の火害調査および診断手法について、実際の RC 構造物の火災事例を用いて解説するとともに、今後、同様の案件が生じた際の参考となるべき資料としてまとめたものである。

なお、本報に示す火害診断の手法および手順は、日本建築学会編「建物の火災診断および補修・補強方法指針・同解説」¹⁾を参考に実施したものである。

2. 火害診断の概要

標準的な火害調査、火害診断および補修計画立案までの手順の概略を図-1に示す。

調査対象である火害を受けた RC 構造体については、一

次調査としての目視調査、ひび割れ調査、打音検査およびリバウンドハンマーによる表面硬度の測定を実施し、

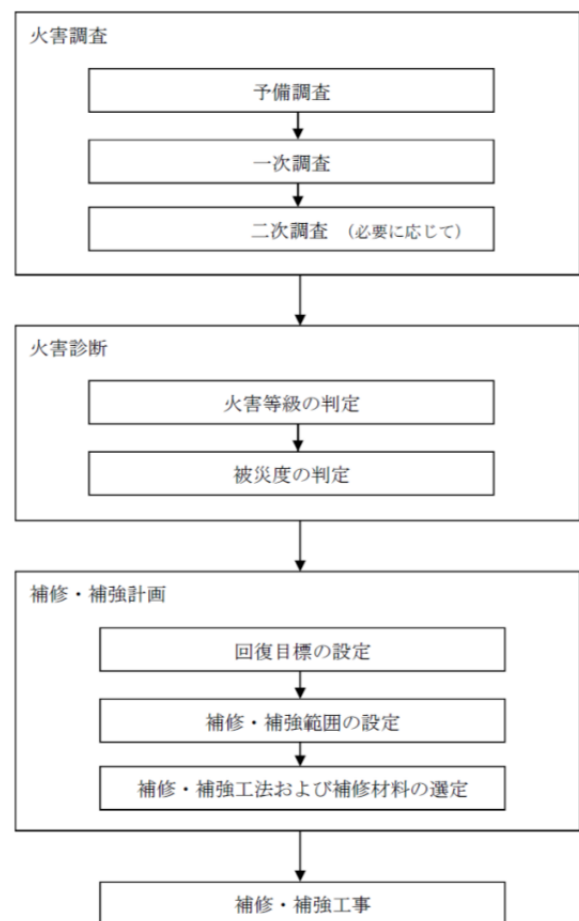


図-1 RC 造の火害診断の手順の概要¹⁾

^{*1} 技術研究所 兼 大阪本店建築部品質管理室 ^{*2} 技術研究所 ^{*3} 大阪本店建築部

さらに、二次調査（詳細調査）としてのコア採取による構造体コンクリート強度推定および中性化深さの測定を実施した。

火害調査の結果から、火害診断として各部材の受熱温度を推定し、後述する火害等級（Ⅰ級～Ⅴ級）および被災度（A・B・C）の判定を行った。その後、構造安全性および耐久性の確保を目的として、所有者が想定する予定供用期間に応じた耐久性の回復目標を設定し、火害等級を考慮した補修計画を立案した。

3. 火害調査のおよび診断結果

3.1 火災の状況

火災が生じた建物は、RC造5階建ての集合住宅の一室である。1階の住居から火災が発生し、主に同室の居間および食堂が延焼した。コンクリートの種類は、設計図書およびコア供試体から、碎石を使用した呼び強度 210kgf/cm^2 （現在の呼び強度21に相当する）普通コンクリートであった。

3.2 一次調査の結果および考察

3.2.1 目視による表層コンクリートの調査

居室内およびバルコニーにおいて、煤の付着状況やコ

ンクリート表面の変状について、目視にて調査を行った。

図-2に、室内壁および天井面のコンクリート表面状況のトレース図を示す。調査結果から、台所または食堂からの出火が想定され、玄関側の洋室(1)および洋室(2)には火災の影響はなく、構造体への煤の付着はほぼ認められなかった。火災発生後からの延焼経路としては、火災は食堂から居間を通りバルコニー側に流れ、フラッシュオーバーを生じたものと考えられる。

一方、中央部の和室の天井（2階スラブ）の下には、居室内に天井があったために火が直接2階の床スラブ下面のコンクリートに当たっておらず、煤のみが付着していた。同様に、食堂および居間においてもスラブ下面のコンクリート表面に煤が付着していた。また写真-1に示すように、食堂の天井スラブ下面および梁下に煤が消失し灰白色に変化している部分が認められた。

ここで、目視検査においては、コンクリート表層部の変色状況と煤の付着状況から、コンクリートの受熱温度が概ね推定できる。図-2から、付着している部位は 300°C 以下の温度履歴しか受けていない部位である。この部位については火害による圧縮強度の低下や中性化の促進はほぼ生じてないと判断できる。コンクリートの受熱

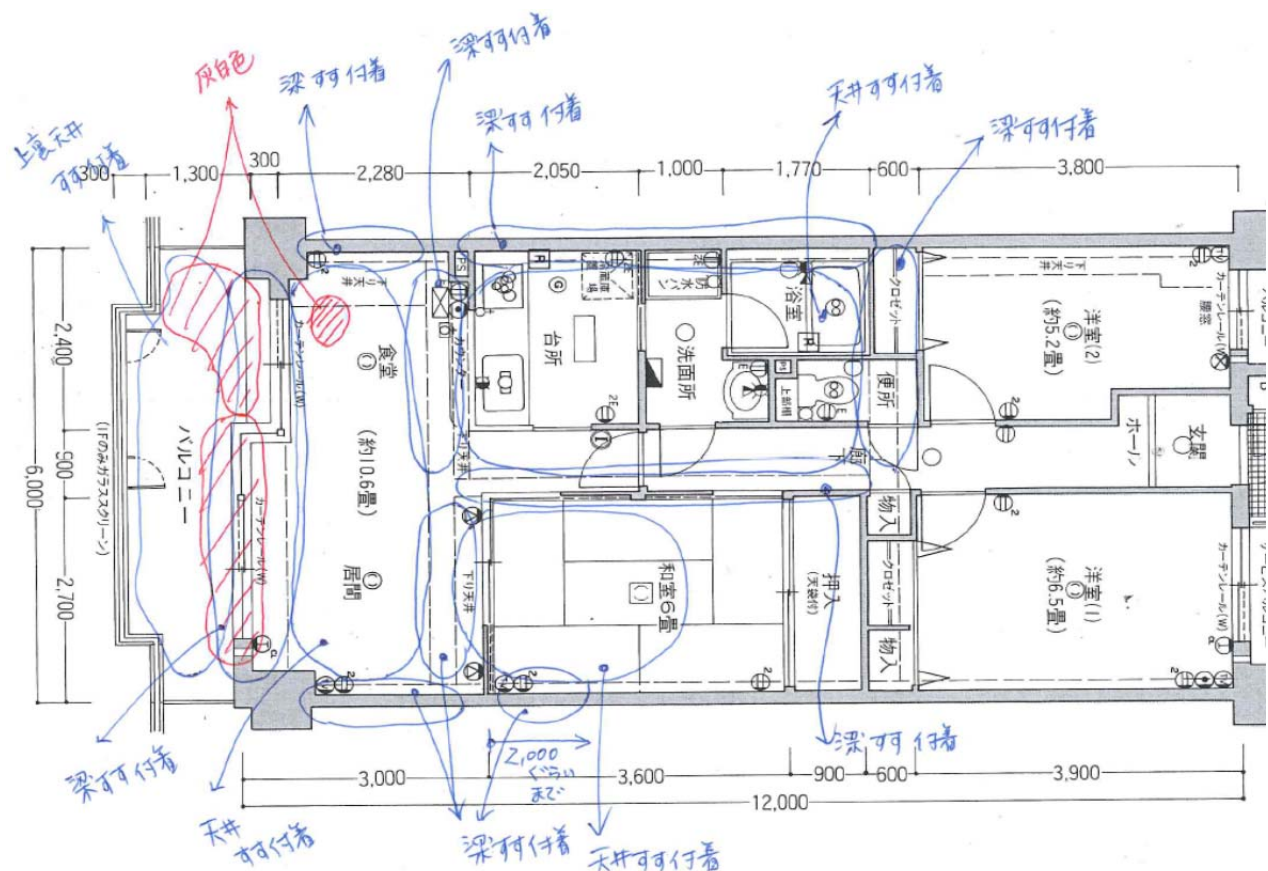


図-2 室内壁および天井面のコンクリート表面の状況のトレース図



写真-1 火災による亀甲状の微細ひび割れ

表-1 コンクリートの状態と受熱温度¹⁾

状 態	温度 (℃)
煤の付着	300 以下
煤の焼失	500 以上
ピンク色	300～600
灰白色	600～950
淡黄色	950 以上
熔融	1200 以上
亀甲状の亀裂	580 以上
フェノールフタレインで呈色	500 以下

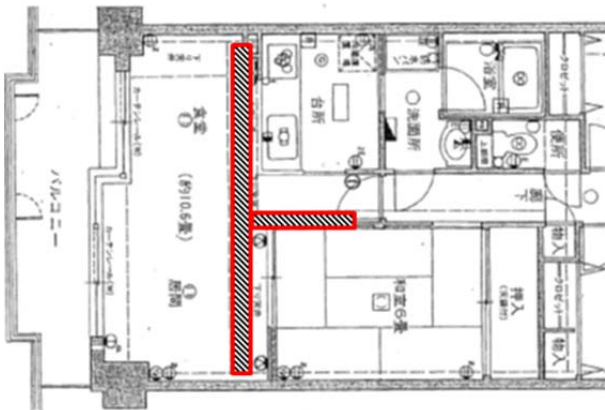


写真-2 600℃以上の高温履歴を受けた梁底の状態



温度と変色の状況を表-1に示す。

一方、バルコニーと居間の間の梁および食堂の天井スラブコンクリート下面において煤が消失して灰白色に変

化している部分については、仕上材が一部残存している部位もあることから短時間であったことは想定されるが、一時的にでもコンクリート表面が 600℃を超える高温履歴を受けた可能性がある。このことは、バルコニー側のアルミサッシが軟化・変形もしくは一部溶融（アルミは 400～650℃で軟化・変形）している状況からも把握できる。これらの部位については、後述する二次調査において中性化の進行状況と圧縮強度の確認を行うこととする。

3.2.2 打診棒による打音検査

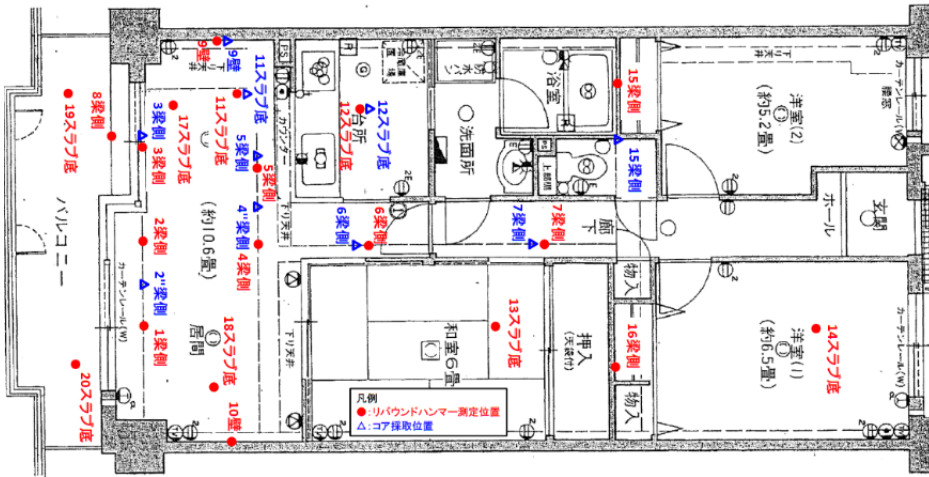
室内側のコンクリート全面について、打診棒を用いた打音検査を行った。その結果、図-3に示した赤枠の部分の梁において、梁下面のかぶりコンクリートに浮きが生じていることが判明した。この部位は、写真-2に示すように、梁下面のみが 600℃以上の高温履歴を受けていることが煤の付着状況（煤が消失していること）からも推定できる。また、コンクリート表面には、放水によりごく表層のコンクリートが急冷されたことによると推察される、0.2mm以下の微細なひび割れが発生していた。この梁下に浮きが生じている部分については補修の対象範囲とする。

3.2.3 リバウンドハンマーによる反発度測定

リバウンドハンマーによる反発度を測定することによって表層コンクリートの健全性を非破壊試験にて評価した。測定は、JIS A 1155:2012「コンクリートの反発度の測定方法」に準じて行った。測定位置は、煤が付着していない健全部を含め、図-4に示す 20 カ所（赤字●印の No.1～No.20）とした。図の凡例に梁側もしくはスラブ底と記しているのは、各測定点の打撃面を表している。リバウンドハンマーによる反発度の測定状況を写真-3に、測定結果を図-5に示す。梁側の測定点 No.15 および No.16、スラブ底の測定点 No.13 および No.14 は被害を受けていないと判断される健全部である。反発度 R は、JIS に従い測定点ごとに 9 回打撃した平均値を採用した。なお、スラブ底への打撃については測定機の特性による上向き打撃の際の補正值として平均値 R から 3 を減じた値 ($R_0 = R - 3$) を反発度 R_0 とした。

反発度 R_0 は、コンクリート表面の状態によってやや変動しているが、健全部の反発度と比較して大きな差異はなく、表層コンクリートは、火災によって構造安全性に影響する程度の大きな劣化や損傷は受けていないと考えられる。

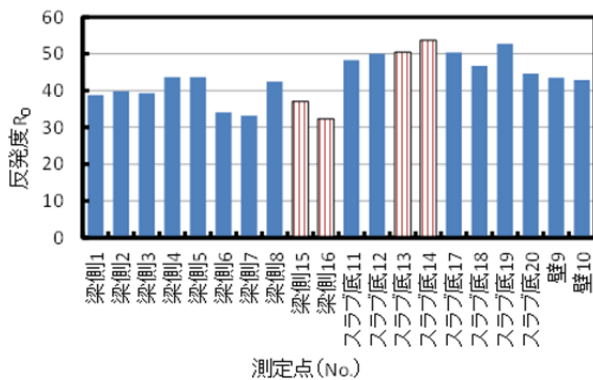
また、リバウンドハンマーによる反発度の測定値から、日本建築学会「コンクリート強度推定のための非破壊検査試験方法マニュアル」に準じて圧縮強度の推定を行う。



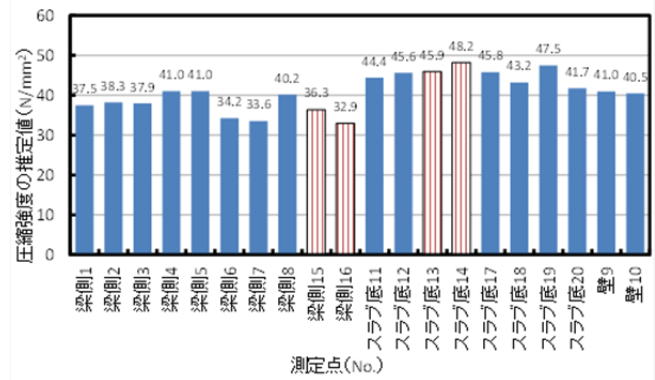
図－４ リバウンドハンマーによる反発度の測定位置



写真－３ 測定状況



図－５ リバウンドハンマーによる反発度の測定結果



図－６ 反発度による構造体コンクリートの推定強度

強度推定式は、(1)式の通りとする。

$$F = \{ 7.3R_o - 100 \} \times 0.0980665 \quad (1)$$

ここに、

F : 圧縮強度の推定値 (N/mm²)

R_o : リバウンドハンマーによる反発度

反発度による構造体コンクリートの圧縮強度の推定結果を図－６に示す。非破壊検査としてのリバウンドハンマーによる圧縮強度の推定値は、設計基準強度である210kgf/cm² (21N/mm²) を全て上回っており、構造安全性は確保されていると判断できる。

3.3 二次調査の結果および考察

3.3.1 コア供試体による構造体強度の推定

一次調査において実施したリバウンドハンマーによる反発度を測定した位置とほぼ同位置において、構造体10カ所からコアを採取し、コンクリート強度の推定を行っ

た。

コア採取位置は、図－４に示す青字の位置とした。凡例に「」を付してある位置のコアは、部材内部の配筋の影響などの影響により非破壊試験の位置と若干異なっている。採取したコアの径は、部材厚さと採取するコア長さに配慮し、梁および壁については外径φ75mm (内径φ68.5mm)、スラブ(床)については外径φ65mm (内径φ58.4mm)とした。

コア強度の測定結果を図－７に示す。図に示すコア強度は、直径と高さの比により強度補正を行った後の数値である。No.4”梁側、No.5梁側およびNo.11スラブ底については、その他の部位よりもやや高い温度履歴を受けている可能性がある部位から採取したコア供試体であるが、コア強度(残存強度)は30N/mm²～38N/mm²の範囲であり、設計基準強度210kgf/cm² (約21N/mm²) を十分に上回っていることが分かる。

また図－７には、図－６に示した非破壊試験による推

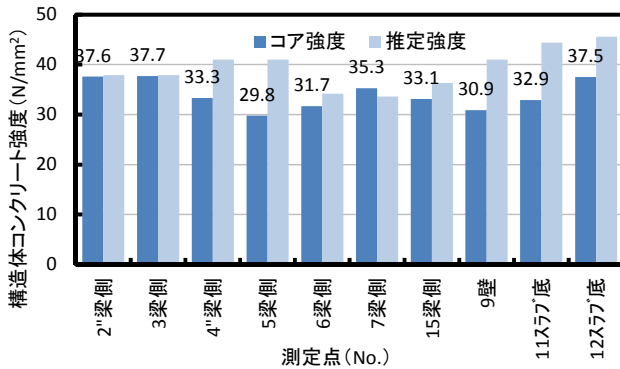


図-7 コア強度

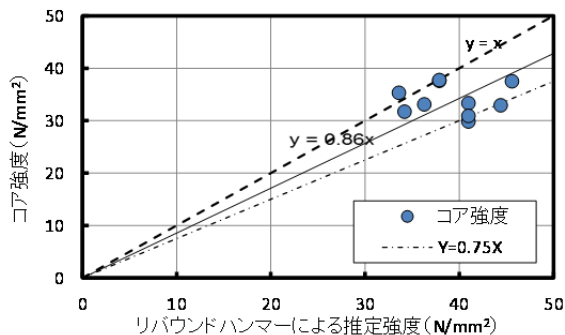


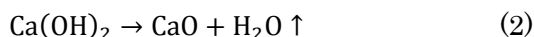
図-8 コア強度と推定強度の関係

定強度も併せて示しているが、推定強度の方がやや高い傾向にある。

図-8にコア強度と推定強度の関係を示す。図から、推定強度に対するコア強度は、推定値の75%程度となる可能となる可能性がある。の関係をを用いて図-6の全ての推定強度を安全側に補正した場合でも 22.5N/mm²以上が確保されていることになり、火災後の構造体は全ての部位で設計基準強度を満足していることが確認できた。

3.3.2 中性化深さの測定

コンクリートは、500～580℃の高温環境に暴露されると、(2)式に示す化学反応を起こし、コンクリート中の遊離アルカリである水酸化カルシウムが熱分解され、コンクリートが中性化する。中性化が鉄筋位置よりも深くまで進行すると、水と酸素の介在によって鉄筋腐食に対する抵抗性が低下しやすくなり、耐久性の低下に繋がる。



そこで、強度推定用に採取したコア供試体の側面を利用して、各部位のコンクリートの中性化深さを測定した。

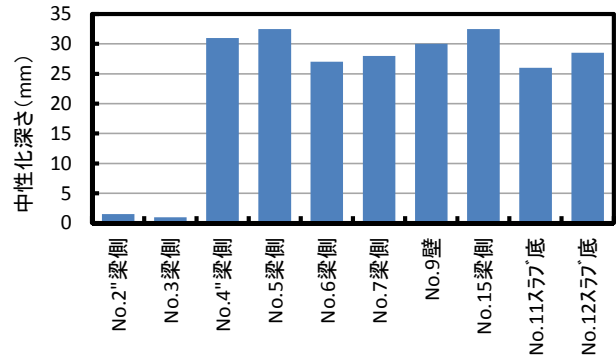


図-9 コンクリートの中性化深さの測定結果

試験は、JISA 1152:2011「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準じて行った。ただしコア側面での測定のため、円周方向に8分割した点で測定し、それら8点の平均を中性化深さとして評価することとした。

構造体コンクリートの中性化深さの測定結果を図-9に示す。No.2"梁側およびNo.3梁側については、断熱材としての発泡ポリウレタンが梁側面およびバルコニーに接するスラブ下面に施工中から吹き付けされていたため、中性化は進行していない。また、高温履歴を受けたことが想定される居間周囲のNo.4"梁側、No.5梁側およびNo.11スラブ底においては、その他の部位とほぼ同程度の中性化深さ(28mm～33mm)であった。このことから、構造体コンクリートの中性化は、今回の火災の影響によって促進されていないと考えられる。

ここで、「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説」²⁾に基づき経年による構造体コンクリートの中性化深さを推定する。

中性化深さの予測式(岸谷式)を(3)式に示す。

$$t = \frac{7.2}{R^2(4.6x-1.76)^2} C^2 \quad (3)$$

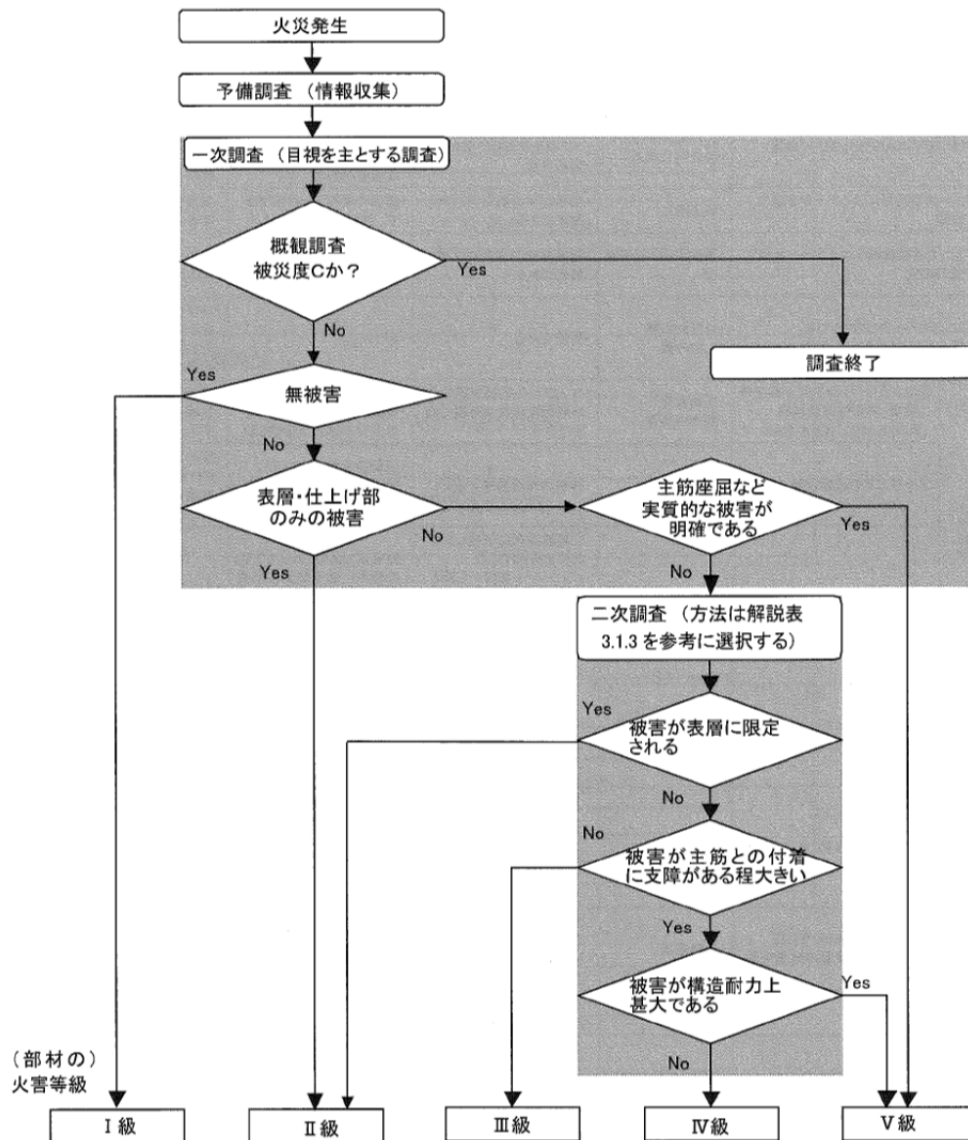
ここに、

t: 期間(経過年数)

C: 期間tにおける中性化深さ

R: 1.7 (室内)

x: 水セメント比 W/C(%)



被災度	定 義	火害調査における被災度の判定方法 (部材の火害等級との関係)
A	構造体に火災の影響がない場合	すべての部材がⅡ級以下の場合
B	構造体が火災の影響を受け、補修・補強により再使用が可能な場合	被災度 A、C 以外の場合
C	倒壊の危険性があり、再使用が困難な場合	V 級の柱部材の割合が火災階の総柱本数の 20% 以上の場合、もしくは解説表 3.3.1 の判定表で被災度 C と判断される場合

火害等級	所有者による予定供用期間 (回復目標)		
	10 年未満	10～20 年	20 年以上
I 相当	補修不要	補修不要	補修不要 (定期的なひび割れ調査を実施)
Ⅱ～Ⅲ相当	基本的には補修不要 (場合によっては補修必要)	基本的には補修不要 (場合によっては補修必要、 定期的なひび割れ調査を実施)	補修必要
Ⅲ～Ⅳ相当	基本的には補修必要 (場合によっては補修不要)	補修必要	補修必要 (部材の撤去・再施工)

本建物の構造体コンクリートの設計基準強度が 210kgf/cm^2 であることから、コンクリートの水セメント比は 60～65%程度と想定される。このコンクリートの材齢 26 年での中性化深さの推定値は概ね 32～35mm となり、推定値が実測値と概ね一致している。

このことから、構造体コンクリートの中性化深さは、火害による影響を受けていないと判断できる。

4. 火害等級および被災度の判定

火害調査の結果から、その後の補修計画を立案するため、火害診断としての火害等級および被災度を判定する。

図-10 に示すフロー¹⁾により、図-3 に示した表層コンクリートに浮きおよび微細なひび割れが生じている梁部材については、やや過大ではあるが構造安全性に配慮し「火害等級Ⅲ」と判定する。

それ以外の部位については、構造耐力上の影響はないが高温履歴を受けた居間の天井部（スラブ下面）については若干の表面劣化が生じている可能性があるため、煤が付着している部位を含めて「火害等級Ⅱ」と判定する。

次に、表-3¹⁾に基づき、建物の被災度を判定する。被災度は、構造体が火災の影響を受けている部材があるが、軽微な補修により再使用が十分に可能と判断できるため、「被災度 B」と判定する。

以上のことから、火害等級Ⅲの部材については、何らかの補修を施すことによって建物全体の構造安全性が確保できると考えられる。また、煤が付着している部位など火害等級Ⅱの部位については、主として美観性確保のための処置などを施すことで十分と判断できる。

5. 補修計画および方法

5.1 補修の方針

火害調査および火害診断の結果、主として火害等級Ⅲの梁部材についての補修を計画する。併せて、火害等級Ⅱとしている居間のスラブ下面についても高温履歴を受けた可能性があるため、表面処理などの補修を計画すべきと考える。

補修計画の立案にあたり、本建物の予定供用期間を今後 20 年以上と設定すると、表-4 により火害等級ⅡまたはⅢの部材については補修が必要となる。ここで、予定供用期間とは構造体コンクリートの耐久性回復目標と同意である。

5.2 補修範囲の設定

構造体コンクリートの補修範囲は、これまでの調査・診断結果から、図-3 に示した範囲の火害等級Ⅲと判定

した(1)梁下面のかぶりコンクリートと、その梁に付随する(2)居間および食堂側の天井スラブ下面全面とする。

5.3 補修工法の選定

上記の(1)および(2)について、以下に示す方法で構造体コンクリートの補修を行うこととした。

- (1) 梁下面に浮きが生じている部位については、かぶりコンクリートを鉄筋に傷をつけないように注意しながらはつり取り、耐火性を有する樹脂モルタルにより断面修復を行う。
- (2) 短時間でも 600℃程度の高温履歴を受けた可能性がある想定される居間のスラブ下面については、表層コンクリートを(1)と同等の材料を用いて表面塗布を行う。

6. まとめ

実際の火災事例に対する火災後の調査・診断から補修計画立案までの一連の流れについて述べた。

以下に、調査および診断の結果をまとめる。

- (1) 食堂および居間周囲火災により食堂および居間周囲の構造体コンクリートの一部は 600℃を超える高温履歴を受けていると想定される。
- (2) コア強度および中性化深さの測定結果から、火害による構造体コンクリートの劣化は、火害等級Ⅲと判定した部位を除いて認められない。

以上のことから、構造体コンクリートは、構造安全性や耐久性に大きな影響を及ぼす程度の劣化や損傷は受けておらず、補修計画に示した補修を施すことによって、建物の構造安全性およびコンクリートの耐久性が確保され、今後も十分に供用できるものと判断できた。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：建物の火害診断および補修・補強方法指針・同解説、2015. 2.
- 2) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説、pp. 103-104、1991.