# JCI 規準

# コンクリートの爆裂試験方法

## JCI-S-014-2024

# Test Method for Spalling of Concrete under High Temperature Exposure

## 1. 適用範囲

この規準は、火災加熱を受けるコンクリートの爆裂に対する抵抗性を試験する方法として、リング 拘束供試体法と一軸拘束供試体法について規定する。

**注記** この試験方法は、使用材料、配(調)合などの異なるコンクリートの爆裂に対する抵抗性 を相互に比較するためのものであって、コンクリート構造物における爆裂に対する抵抗性 を直接的に評価するためのものではない。

#### 2. 引用規格等

次に掲げる規格は、本規準に引用されることによって、この規準の規定の一部を構成する。こ れらの引用規格は、その最新版(追補を含む)を適用する。

- JISA0203 コンクリート用語
- JISA 1132 コンクリートの強度試験用供試体の作り方
- JISA 1476 建築材料の含水率測定方法
- JISA1108 コンクリートの圧縮強度試験方法
- JISA 1304 建築構造部分の耐火試験方法
- JISG 3445 機械構造用炭素鋼鋼管

## 3. 試験方法の種類

試験方法の種類は,**表1**に示す2種類とする。それぞれの試験方法に用いる供試体の概要を図 1および図2に示す。

IC I ARECOM	
試験方法の種類	記号
リング拘束供試体法	A 法
一軸拘束供試体法	B 法

= 1	
70	《井 숙우 특히 특별 /가 가는(/ ) 사망 소법
2	



図1 リング拘束供試体の形状・寸法



[mm]

#### 4. 用語の定義

この規格で用いる主な用語および定義は、JISA 0203 によるほか、次による。

4.1 爆裂 加熱によってコンクリートの表層がはく離・飛散し断面欠損する現象。

**4.2 爆裂試験** コンクリートの爆裂抵抗性を,標準的な加熱条件下におけるコンクリートの爆裂 の性状により把握するための試験。

**4.3 爆裂規模** 爆裂深さおよび爆裂面積率,必要に応じて爆裂容積率などにより表される爆裂の 程度。

4.4 **爆裂深さ** 爆裂によって欠損したコンクリートの非爆裂面からの欠損深さ。

4.5 爆裂面積 爆裂によって欠損が生じたコンクリートの面積。

4.6 爆裂容積 爆裂によって失われたコンクリートの容積。

4.7 爆裂面積率 爆裂面積をコンクリートの加熱される表面の面積で除して表される面積割合。

4.8 爆裂容積率 爆裂容積を加熱前のコンクリートの容積で除して表される容積割合。

4.9 爆裂発生時間 爆裂が観察された時の加熱開始からの経過時間。

4.10 爆裂開始時間 最初の爆裂が観察された時の加熱開始からの経過時間。

4.11 爆裂終了時間 最後の爆裂が観察された時の加熱開始からの経過時間。

#### 5. 爆裂試験法

#### 5.1 供試体の作製

供試体は,JISA1132(コンクリートの強度試験用供試体の作り方)に準拠してコンクリート を打ち込み,供試体を2個以上作製する。温度が制御されている試験室以外でコンクリートを採 取する場合は,打込み時の温度を記録する。コンクリートの打込みを行い上面ならしが終わった 後に、コンクリートからの水分逸散を防ぐために、水密性のある蓋又はプラスチックフィルムに より供試体の上面を密閉する。

#### 5.2 養生

すべての供試体は、試験実施までは、打込み後に水分逸散を防止した状態で JISA 1132 に従っ て養生する。

**注記**本規準によらず,別途定めた方法・条件で養生する場合は,その条件を記録するとともに,報告書に記載する。

#### 5.3 コンクリートの含水率

コンクリートの含水率測定用の供試体を爆裂試験用の供試体と同じコンクリートを用いて同時 に作製し、爆裂試験用の供試体と同じ条件で養生されたコンクリートの含水率測定用の供試体を 用いて、JISA 1476(建築材料の含水率測定方法)に従って、質量基準質量含水率を測定する。 含水率測定用の供試体は、直径 100mm×高さ 200mm の円柱形状とする。数量は、材料を代表 するように選定する。

#### 5.4 コンクリートの圧縮強度

コンクリートの圧縮強度試験用の供試体を爆裂試験用の供試体と同じコンクリートを用いて同時に作製し、標準養生を材齢28日まで実施したコンクリートの圧縮強度試験用の供試体と、爆裂試験用の供試体と同じ条件で養生されたコンクリートの圧縮強度試験用の供試体を用いて、JISA1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)に従ってコンクリートの圧縮強度を測定する。 圧縮強度試験用の供試体数は各3個とし、材齢は加熱試験と同様に91日とする。

#### 5.5 加熱試験

#### 5.5.1 試験材齢

試験時における供試体の材齢は、91日とする。91日以外とする場合には、試験材齢を記録し、 報告書に記載する。

#### 5.5.2 加熱曲線

- a) 加熱曲線は、図3に示す加熱曲線1(JISA 1304に規定される標準加熱曲線A)または加熱 曲線2(加熱開始後5分間で常温から1200℃まで昇温し、その後1200℃を所定の時間保持 する加熱曲線)によるものとし、加熱時間は30分とする。加熱後は加熱位置で自然放冷と する。
- b) 加熱曲線1の場合,加熱温度測定装置,加熱温度,炉内圧力およびその許容差は,JISA 1304に従う。
- c) 加熱曲線2の場合,炉内温度の測定には、JISA1304記載のシース熱電対を用いる。測定 位置は、シース熱電対の測温接点が代表するものとする。その代表点が供試体の加熱され るコンクリートの表面から100±50mm離れた位置になるように配置し、炉内の温度分布 が確認出来るように、加熱炉の大きさに応じて必要な数のシース熱電対を設置する。
  - 注記 加熱曲線1は、建築物内部の火災を想定した加熱曲線であり、加熱曲線2は交通 トンネル内部の火災を想定した加熱曲線である。対象とする構造物やその用途に 応じて、加熱曲線を選定する。また、試験の目的に応じて、温度降下曲線を含ん だ加熱曲線を採用することも考えられるが、その場合には適用した加熱曲線を必 要に応じて報告書に記載する。



#### 5.5.3 加熱炉

加熱炉は、次による。

- a) 加熱炉は、5.5.2 に示す温度の時間的変化を、供試体の加熱面の全面にほぼ一様に与えられる ものとする。
- b) 加熱炉の熱源は、都市ガス、プロパン、重油、その他適切な燃料とする。

#### 5.6 爆裂規模と爆裂発生時間の測定

5.6.1 概要

コンクリートの爆裂の性状の指標として、爆裂規模と爆裂発生時間を測定する。爆裂規模は、 最大爆裂深さ、平均爆裂深さ、爆裂面積率および爆裂容積率(A 法の場合)によって測定する。

5.6.2 爆裂規模

冷却後に、測定箇所について、供試体の加熱面の欠損深さを爆裂深さとして 1mm 以上の精度で 測定する。測定箇所は、加熱した範囲を 20mm 以下のメッシュで分割した各メッシュの交点とする。 爆裂深さの測定結果から次の項目を算出する。なお、加熱終了後から 48 時間以内に実施するこ ととし、48 時間以内に実施できない場合は、吸湿を防止する保管方法をとることとする。

- a) 最大爆裂深さ 加熱面ごとに測定した全データの中で最も大きい爆裂深さを最大爆裂深さと する。
- b) 平均爆裂深さ 加熱面ごとに式(1)によって算定される, 測定した爆裂深さの合計を全測定点 数で除した値を平均爆裂深さとする。平均爆裂深さは, 四捨五入によって 1mm 単位に丸め て表示する。

ここに, *D*<sub>av</sub> : 平均爆裂深さ(mm)

 $\Sigma D_i$ :爆裂深さの合計(mm)

- N : 全測定点数
- c) 爆裂面積率 加熱面ごとに式(2)によって算定される, 測定した爆裂深さが0より大である測

定点数を全測定点数で除した値を爆裂面積率とする。爆裂面積率は、四捨五入によって整数 に丸めて表示する。

 $A_{sp} = n / N \times 100 \cdots (2)$ 

ここに, A<sub>sp</sub>:爆裂面積率(%)

- n : 爆裂深さが0より大である測定点数
- N : 全測定点数
- d) 爆裂容積率(A法の場合) 式(3)によって算定される,平均爆裂深さを供試体高さで除したものを爆裂容積率とする。爆裂容積率は,四捨五入によって整数に丸めて表示する。

 $V_{sp} = D_{av} / H \times 100 \cdots (3)$ 

- ここに、 V<sub>sp</sub> : 爆裂容積率(%)
  - $D_{av}$  : 平均爆裂深さ (mm)
  - *H* :供試体高さ(mm)
- **注記** 爆裂規模の測定の際,加熱後の供試体が触れると剥落するような損傷状態の場合 は,簡単に剥落するものは落した状態で測定することとする。

#### 5.6.3 爆裂発生時間

爆裂発生音や観察窓からの観察により、次の爆裂発生時間(分)を可能な範囲で記録し、参考 情報とする。

#### a)爆裂開始時間

- b) 爆裂終了時間
- c) 特徴的な(規模の大きい)爆裂が発生した時間
  - 注記 「可能な範囲で記録する」とした理由は、使用する加熱炉の構造等によって爆裂 発生音の確認や観察窓からの観察ができない場合があることや、一回の試験で複 数の一軸拘束供試体を同時加熱した場合には、個々の供試体の爆裂発生時間を判 別することが困難であるためである。

#### 6. A法:リング拘束供試体を用いた爆裂試験

A法による場合の爆裂試験は、次による。

## 6.1 リング拘束供試体

6.1.1 リング拘束供試体の形状・寸法

リング拘束供試体は、3章の試験方法の種類で図1に示したとおり、外径が公称寸法300mmの円形断面を有し、高さ100mmの円柱形とする。リング拘束供試体は底面から加熱された場合のコンクリートの熱膨張を拘束するため、外周部に拘束リングを配するものとする。底板は鋼製 又は樹脂製のものを用いることとし、セメントペーストや水漏れがないように鋼管と底板の隙間 をシリコン樹脂でシールする。

## 6.1.2 拘束リング

A法に用いる拘束冶具は、次による。

- a) 拘束リングは上下面ともに解放されている鋼管を用いる。
- b) 鋼管は、JISG 3445(機械構造用炭素鋼鋼管)に規定されるものを用いるものとし、鋼管内 面にはコンクリートとの付着を阻害するはく離剤などを塗らないものとする。
- c) 鋼管の外径,厚さ,高さは、図1に示すものを用いるものとする。なお、外径ならびに厚み

は公称寸法であり、実寸法はJISG 3445の規定による。

#### 6.1.3 試験手順

試験手順は、次のとおりとする。

- a) 養生環境から取り出した供試体は、加熱試験開始まで乾燥しないようにする。
- b) リング拘束供試体の鋼管部分が炉の加熱に直接曝されることを防ぐため、図4に示すように 加熱面(底面)の鋼管面が露出しないように鋼管に接するコンクリート底面の15±5mmの 範囲を耐熱性断熱材で被覆する。耐熱性断熱材には、厚さ25mm、耐熱温度1200℃以上の 無機質繊維(アルカリアースシリケート(AES)ウールなど)ブランケットまたはこれと同 等以上の性能を有するものを使用する。
- c) リング拘束供試体を図4に示すように底面より1面加熱されるように加熱炉に設置する。
- d) 試験の開始以降,加熱温度の測定および爆裂発生時間,爆裂開始時間,爆裂終了時間の観察 など必要に応じた測定および観察を行う。
  - 注記 A 法の特徴は、1 方向から加熱される実部材の爆裂性状に近い状態を再現することを意図した試験法であり、コンクリート内部に熱電対や水蒸気圧測定治具ならびに鋼管の外周側面にひずみゲージと熱電対を設置して測定を行うことで、爆裂発生状況と影響因子の関係を考察することが可能である。爆裂発生状況と影響因子の関係を測定し考察する方法については、附属書Aに示した。



図4 加熱炉へのリング拘束供試体設置概略図

#### 7. B法:一軸拘束供試体を用いた爆裂試験

B法による場合の爆裂試験は、次による。

#### 7.1 一軸拘束供試体

#### 7.1.1 一軸拘束供試体の形状・寸法

- a) 一軸拘束供試体は、一辺の長さが 100mm の正方形断面を有し、長さ 400mm の角柱とする。
- b) 一軸拘束供試体の形状・寸法の許容差は、JISA1132(コンクリートの強度試験用供試体の 作り方)の箇条6に従う。
- c) 一軸拘束供試体の高さ方向の中心軸には,一軸拘束供試体が周辺から加熱された場合の熱膨 張を拘束するため,JISG3112(鉄筋コンクリート用棒鋼)に従った異形棒鋼を配し,かつ 一軸拘束供試体端部には拘束板を取り付ける。
  - 注記 B法の特徴は、曲げ強度試験に類似の寸法であり、簡便に供試体を作製できること、 供試体の取り扱いも容易であることに加え、炉内に適切に配置することで一度に複数の供試体の試験が可能である。そのため、異なる配(調)合の供試体を一度に試験して、爆裂の性状を比較・検討することができる。

#### 7.1.2 拘束治具

B法に用いる拘束冶具は、次による。

- a) 加熱時に一軸拘束供試体のコンクリートに熱応力(圧縮応力)が発生するように,一軸拘束 供試体の熱膨張を拘束する。
- b) 拘束は一軸拘束供試体の長辺方向で行う。
- c) 拘束治具は, 異形棒鋼と拘束板によって構成され, 次の d), e)および f)に従って製作したものを使用する。
- d) 拘束板は、厚さ 6mm、一辺の長さ 100mm の正方形断面を有する鋼板(材質: SS400)とする。幅 100mm 奥行 100mm 高さ 400mm の鋼製型枠を使用する場合、拘束板の一辺の長さは 99mm 以上 100mm 未満とする。
- e) 異形棒鋼は、D19(鋼種:SD345)とする。
- 1 製作・組立ては、異形棒鋼の両端に拘束板を取り付ける。異形棒鋼の軸芯と拘束板の面の中心 とが一致するように、異形棒鋼の両端に拘束板を取り付ける。取り付けは、コンクリートの 打込み側において拘束板と異形棒鋼を4箇所以上点付け溶接する。当該拘束治具の全長は、 幅100mm 奥行100mm 高さ400mmの鋼製型枠を使用する場合、399mm 以上400mm 未 満とする。

#### 7.1.3 試験手順

試験手順は、次のとおりとする。

- a) 養生環境から取り出した一軸拘束供試体は、加熱試験開始まで乾燥しないようにする。
- b) 一軸拘束供試体の両端に設置されている拘束板が炉の加熱に直接曝されることを防ぐため、 両端面および端部から 50±5mm の範囲の供試体側面を耐熱性断熱材で被覆する。耐熱性断 熱材には、厚さ25mm、耐熱温度1200℃以上の無機質繊維(アルカリアースシリケート(AES) ウールなど)ブランケットまたはこれと同等以上の性能を有するものを使用する。
  - 注記 異形棒鋼と拘束板によって構成される拘束治具が意図せぬ加熱に曝された場合, 拘束力が弱まり試験結果に影響を及ぼすことが懸念される。そのため,一軸拘束 供試体両端部の拘束治具の断熱対策は特に重要である。図5に示すように一軸拘 束供試体の長辺方向を縦にして加熱炉に設置した場合において,加熱炉の特性上,

ー軸拘束供試体の上面に対する加熱が厳しくなると考えられる場合は,必要に応じて上面の耐熱性断熱材の厚さを増しても良い。

- c) 一軸拘束供試体の4面が加熱されるように図5に示すように加熱炉内に供試体を設置する。 ただし,試験の目的によって,加熱面数を4面以外とした場合は,報告書に記載する。
  - 注記 使用する加熱炉によって一軸拘束供試体の4面を均等に加熱できない場合や、版形の部材を想定して試験を行う場合には1面加熱、矩形断面部材の隅角部を想定して試験を行う場合には2面加熱(隣り合う2面)で行う場合も考えられる。供試体の設置は、加熱面数や加熱炉の仕様に応じて、縦置きまたは水平置きとする。例として、一軸拘束供試体の1面を加熱する場合の加熱炉への供試体の設置例を図6に示す。



図5 加熱炉への一軸拘束供試体の設置概略図(4面加熱の場合)



図6 加熱炉への一軸拘束供試体の設置概略図(1面加熱の場合)

d) 試験の開始以降,加熱温度の測定および爆裂発生時間,爆裂開始時間,爆裂終了時間の観察 など必要に応じた測定および観察を行う。

#### 8. 報告

報告書には次の事項のうち必要なものを記載する。

- a) 試験方法の種類
- b) 試験実施日,試験場所および試験実施者
- c) 拘束冶具
  - 1) 鋼管の材質および寸法(外径,内径,厚み,高さ)(A法の場合)
  - 2) 拘束治具の材質および寸法(B法の場合)
- d) コンクリートの使用材料の種類および品質,骨材の原石の種類
- e) コンクリートの配(調)合
- f) 供試体作製時のコンクリートのフレッシュ性状,雰囲気温度および相対湿度
- g) 供試体の養生方法
- h) 加熱試験時のコンクリートの材齢
- i) 加熱試験時のコンクリートの含水率
- j) 含水率測定用の供試体の形状と寸法
- k) コンクリートの圧縮強度(標準養生,供試体と同養生)
- 供試体数
- m)供試体の加熱に用いた加熱炉の諸元および供試体の設置方法(縦置き・横置き,炉内での配置)
- **n)** 加熱曲線
- **o**) 加熱温度測定結果
- p) 爆裂規模(最大爆裂深さ,平均爆裂深さ,爆裂面積率,爆裂容積率(A法の場合))
- q) 爆裂発生時間(参考情報) (開始時間,終了時間)
- **r)** その他

A 法においてリング拘束供試体に用いる拘束リングを水平方向に分割したものを用いた場合 は、段数などの仕様を報告する。

## 附属書 A

## (参考)

## コンクリートの爆裂試験 A法(リング拘束供試体法)における各種測定方法

#### A.1 一般原則

この附属書は、コンクリートの爆裂試験 A法(リング拘束供試体法)における拘束応力測定方法、水蒸気圧測定方法、引張ひずみ破壊指数を用いた爆裂深さの推定を行う場合の、標準的な方法を示したもので、規定の一部ではない。

#### A.2 拘束応力測定方法

本項では、コンクリートの爆裂試験 A 法(リング拘束供試体法)において供試体コンクリートに 生じる拘束応力を測定する場合のひずみゲージ、ひずみゲージの設置、拘束応力の算出、および 結果の報告事項の標準を示す。

#### A.2.1 ひずみゲージ

ひずみゲージは、自己温度補償型ひずみゲージを用いるとともに、出力値の温度変化に伴う零 点移動も補正データを用いて補正するものとする。

#### A.2.2 ひずみゲージの設置

ひずみゲージは、次の事項を参照して設置するものとする。図A.1にひずみゲージの設置例を 示す。

- a) ひずみゲージはコンクリート成形や養生時による破損を防止するため、加熱試験を行う前に設置することを標準とする。
- b) ひずみゲージは拘束リングの円周方向ひずみを測定するため、円周方向に平行に設置するもの とする。
- c) 拘束応力を測定したい高さ(加熱面からの垂直方向高さ)の向かい合う2箇所に設置すること を標準とする。
- d) 温度補正を実施するため、温度計測用の熱電対もあわせて設置するものとする。



図 A.1 ひずみゲージの設置例

#### A.2.3 拘束応力の算出

拘束応力は、次の式(1)によって算出し、結果は N/mm<sup>2</sup> 単位として、四捨五入によって小数点 以下1けたに丸める。計算に用いるひずみは、測定高さの2箇所の測定データの平均値を用いる こととする。また、使用したひずみゲージの許容温度範囲のデータを計算に用いることとする。

$\sigma_{restrain} = \varepsilon_{\theta} \cdot E_s \cdot \frac{t}{R}  \dots \tag{1}$					
ここに,	Orestrain	: コンクリートに生じる拘束応力(N/mm²)			
	$\mathcal{E} heta$	:リング材の円周方向ひずみ			
	t	:リング材の厚み(mm)			
	$E_s$	:リング材の弾性係数(N/mm²)			
	R	: リング内半径(mm)			

## A.2.4 拘束応力の測定結果の報告

各測定高さの経過時間と拘束応力の関係を報告する。

#### A.3 水蒸気圧測定方法

本項では、コンクリートの爆裂試験 A 法(リング拘束体試験法)において供試体コンクリートに 生じる水蒸気圧を測定する場合の圧力測定方法、および結果の報告事項の標準を示す。

#### A.3.1 圧力伝達パイプの設置

圧力伝達パイプは、次の事項を参照して設置するものとする。**図 A.2** に圧力伝達パイプの設置 方法の例を示す。

a) 圧力伝達パイプは、外径 5mm、内径 2mm のステンレス製のものを用いることを標準とする。

b) 圧力伝達パイプは、水蒸気圧を測定したい高さ(加熱面からの垂直方向高さ)の中心部にパイ プの先端が配置されるように設置する。また、コンクリート内部の温度勾配の影響を考慮して、 加熱面に平行に設置するものとする。

- c) 圧力伝達パイプは、拘束リングを貫通して拘束リングの外側にパイプのもう一つの先端を突出 させて、圧力センサーを接続できるように設置して固定する。
- d) 水蒸気圧とコンクリート温度の関係が把握できるように圧力伝達パイプの先端位置に、温度測定用の熱電対を設置することを標準とする。なお、熱電対は水蒸気圧の逃げ道にならないように設置方法に注意が必要である。



図 A.2 圧力伝達パイプの設置方法の例

#### A.3.2 コンクリートの成形

圧力伝達パイプを設置した後にコンクリートを打ち込む。この際,パイプ中にセメントペース トなどが充填されないように保護するものとする。

#### A.3.3 測定準備

水蒸気圧の測定準備は、次の事項を参照して実施するものとする。

- a) 水蒸気圧の測定準備は、コンクリート成形や養生時による破損を防止するため、加熱試験を行う直前に実施することとする。
- b) 圧力伝達パイプに空気が残らないように、注射器などを用いて圧力伝達媒体を充填する。また、 圧力センターとの接続部、および圧力センサーの圧力感知部にも空気が残らないように圧力伝 達媒体を充填する。この際、空気抜きが不十分な場合は、正しく測定されないので注意する。
- c) 圧力伝達媒体には、シリコンオイルを用いることを標準とする。

#### A.3.4 水蒸気圧の測定

リング拘束供試体の加熱開始に合わせて、水蒸気圧の測定を実施する。

#### A.3.5 水蒸気圧の測定結果の報告

各測定高さの経過時間と水蒸気圧、およびコンクリート温度の関係を報告する。

#### A.4 引張ひずみ破壊指数を用いた爆裂深さ推定方法

本項では,A.2 に基づき測定した拘束応力から引張ひずみ破壊指数を算出する方法,爆裂深さの推定方法,および結果の報告事項の標準を示す。

#### A.4.1 引張ひずみ破壊指数の算定

引張ひずみ破壊指数は、次の事項を参照して算出するものとする。

- a) 引張ひずみ破壊指数は、次の式(2)から式(5)を用いて算出する。平面応力状態を仮定する。
- **b**) 計算に用いる拘束応力(*σ<sub>re</sub>*)は、A.2 に基づき測定した拘束応力を用いることとする。
- c) 拘束応力を測定した高さ(加熱面からの垂直方向高さ)ごとの経過時間と引張ひずみ破壊指数の関係を求めるものとする。
- **d**) コンクリートの引張破壊ひずみ ( $\varepsilon_{tf}$ ),加熱の伴う残存弾性係数 ( $E_c(T)$ ),および見掛けのポア ソン比 ( $v_c$ ) は必要に応じて温度依存性を考慮する。

 $\sigma_{re} = \sigma_x = \sigma_y \quad (2)$   $\tau_{xy} = 0 \quad (3)$   $\varepsilon_z = \nu_c \left(\sigma_x + \sigma_y\right) / E_c(T) \quad (4)$   $I_{\varepsilon f} = \varepsilon_z / \varepsilon_{rf} \quad (5)$ 

ここに, *ore* : 拘束応力(N/mm<sup>2</sup>)

 $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ :X方向とY方向の拘束応力(N/mm<sup>2</sup>)

- *τxy* : せん断応力
- *ε*<sub>z</sub>: 面外直ひずみ(引張)
- *ε*<sub>t-f</sub> : 引張破壊ひずみ
- *E<sub>c</sub>(T)*:加熱時の残存弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)
- *v<sub>c</sub>* : コンクリートの見掛けのポアソン比
- *I*<sub>ε-f</sub> : 引張ひずみ破壊指数

#### A.4.2 爆裂深さの推定

爆裂深さの推定は、次の事項を参照して算出するものとする。

- a) 引張ひずみ破壊指数が1以上となった経過時間と測定高さを爆裂発生点とし、1未満の場合は 爆裂の発生無しとすることとする。
- b) 拘束応力を測定した各々の爆裂発生点を求め、経過時間と爆裂深さの関係を推定する。
- c) 合成繊維の添加や強制乾燥などによる水蒸気圧抑制対策を実施したコンクリートの場合には、 引張ひずみ破壊指数による爆裂深さ推定結果が実際の爆裂深さより大きくなることがあることに留意する必要がある。

#### A.4.3 引張ひずみ破壊指数を用いた爆裂深さ推定結果の報告

各測定高さの経過時間と引張ひずみ破壊指数の関係,および経過時間と爆裂深さの関係を報告 する。

#### 附属書 B

#### (参考)

# コンクリートの爆裂試験 B法(一軸拘束供試体法)における異形棒鋼の 温度測定方法

#### B.1 一般原則

この附属書は、コンクリートの爆裂試験 B法(一軸拘束供試体法)において、供試体の拘束に 用いる異形棒鋼の温度測定を行う場合の標準的な方法を示したものであり、規定の一部ではな い。

#### B.2 温度測定方法

本項では、コンクリートの爆裂試験 B法(一軸拘束供試体法)において、供試体の拘束に用いる 異形棒鋼の温度測定を行う場合の熱電対の設置位置および結果の報告事項の標準を示す。

#### B.2.1 熱電対

異形棒鋼の温度の測定には、JISC1602「熱電対」に規定される K 熱電対(クラス2,素線径 0.65mm)または当該熱電対と同等以上の性能を有する熱電対を用いる。

#### B.2.2 熱電対の設置

熱電対は,次の事項を参照して設置するものとする。図 B.1 に熱電対の設置例を示す。

- a) 異形棒鋼の長さ方向の中央に熱電対を設置することを基本とする。必要に応じて、熱電対の設置位置および本数を追加しても良い。ただし、熱電対の本数が多くなると爆裂性状や付着に及ぼす影響が大きくなる可能性が考えられることから、最大設置本数は3本までとする。
- b) 異形棒鋼の温度測定箇所に直径 2.0~3.0mm の金属用ドリルビットを用いて深さ 3mm の孔を開け、当該孔に熱電対の測温接点を差し込む。差し込んだ熱電対が外れないように、異形棒鋼表面の孔の縁端をポンチなどの工具を用いてかしめる。
- c) 熱電対の導線は異形棒鋼の長さ方向に沿わせて配線し、供試体端部で供試体外部に引き出すものとする。
- d) コンクリートの打込み・成形時および養生時に熱電対を損傷させないように十分に注意する。

#### B.2.3 試験時の留意点

ー軸供試体を加熱炉内に設置して熱電対の導線部を加熱炉外に引き出すにあたり,導線部が炉 内に露出する範囲がある場合は当該範囲を耐熱性断熱材で保護する。

#### B.3 異形棒鋼温度の測定

異形棒鋼温度の測定は1分以内ごとに行う。

#### B.4 異形棒鋼温度の測定結果の報告

加熱炉内温度および異形棒鋼温度と経過時間の関係を報告する。また,供試体の状況に応じて, 爆裂発生時の異形棒鋼温度を報告する。



解説

# コンクリートの爆裂試験方法

この解説は、規準に規定・記載した事柄を説明するもので、規定の一部ではない。

この解説は、公益社団法人日本コンクリート工学会が編集・発行するものであり、これに関す る問い合わせ先は公益社団法人日本コンクリート工学会である。

#### 1. 制定の経緯と趣旨

鉄筋コンクリート構造物(以下, RC構造物)が火災を受けると,表層部が爆発的にはく離・剥 落するいわゆる爆裂現象が生じることがある。コンクリートが剥落すると内部鉄筋は露出し高温 により,品質は大きく低下する。その結果, RC構造物の耐荷性能が損なわれる危険性がある。ま た,鎮火後の構造物の復旧に際しても,費用の増大は避けることができず,社会的な損失は大き なものとなる。そのため,各学会においてコンクリート構造物の耐火設計の基準が定められてい る。日本建築学会 建築工事標準仕様書 コンクリート工事 JASS 5 [1]では,実強度が 90~ 100N/mm<sup>2</sup>を超えるような高強度コンクリートについては,爆裂の程度が大きく,部材耐力を損 なうおそれがあるため,火災時の健全性の評価が必要であるとしており,建築基準法で要求され る3時間の耐火性能(非損傷性)に対して爆裂対策の効果を実部材レベルの耐火試験で確認する ことが行われている。一方,土木学会[2]においても,高強度コンクリート(60N/mm<sup>2</sup>以上)に おいて,爆裂対策が必要であるとしている。

既往の研究では、爆裂は熱応力説[3]と蒸気圧応力説[4]およびその複合作用によって生じるとさ れており、未だ現象が解明されているとはいえない。コンクリートの爆裂は種々の影響を受ける が、含水率が高いほど、爆裂を発生する確率が高くなると言われている。また、材齢の影響も受 けるため注意が必要である。一方、爆裂の抑制方法としては、蒸気圧低減効果を期待して合成繊 維であるポリプロピレン繊維 (PP 繊維)を混入する方法が一般的に用いられている。しかしなが ら、爆裂のメカニズムあるいは爆裂抑制のメカニズムが十分明らかになっていない状況において は、コンクリートの爆裂可能性や爆裂対策の評価は容易では無く、高温環境下におけるセメント 系材料の爆裂判定手法の標準化は未だになされていない。このことは、新しいコンクリートが開 発されても (例えば、高靱性セメント複合材料、超高強度繊維補強コンクリートなど)、耐火性能 を評価する方法がないことを意味し、開発者が独自の基準で材料の耐火性能を評価せざるを得な い状況であり、コンクリートの爆裂に対する抵抗性を試験する手法の開発が望まれていた。

このような背景のもと、国内外においてコンクリートの耐火性に関わる検討活動が活発化して いる。例えば海外では、2014年から RILEM Technical Committee 256-SPF SPalling of Concrete due to Fire: testing and modelling (SPF)が設置され、コンクリートの爆裂試験法について議 論がなされている。一方、国内では日本コンクリート工学会が 2009 年に「コンクリートの高温 特性とコンクリートの耐火性能研究委員会」が設置され、調査・研究がなされた[5]。2012年には 土木学会においても「コンクリートトンネル構造物の耐火技術研究小委員会 (207)」が設置され、 トンネル耐火工の設計施工指針(案)を取りまとめた[6]。これらを踏まえ、2015年から日本コン クリート工学会に「高温環境下におけるコンクリートの性能評価に関する研究委員会」(JCI-TC154A)が設置され、「コンクリートの爆裂試験方法-リング拘束供試体編(試案)」および「コ ンクリートの爆裂試験方法-角柱試験体編(試案)」が提案された[7]。これらの手法は、コンクリ ートの配(調)合レベルにおいて耐爆裂性を判断するスクリーニング試験として提案されており、 本規準の原型となった。

#### 2. 適用範囲および試験方法の種類(箇条1および3)

本規準は、火災加熱を受けるコンクリートの爆裂に対する抵抗性を把握するために、コンクリート供試体を加熱することによって、爆裂の性状の確認と爆裂規模の測定を行う試験方法について規定するもので、「3. 試験方法の種類」にリング拘束供試体法(A法)と一軸拘束供試体法(B法)の2種類の試験方法を定義した。

A 法の特徴は、1 方向から加熱される実部材の爆裂性状に近い状態を再現することを意図した 試験法であり、コンクリート内部に熱電対や水蒸気圧測定治具ならびに鋼管の外周側面にひずみ ゲージと熱電対を設置して測定を行うことで、爆裂発生状況と影響因子の関係を考察することが 可能である。加熱曲線1と加熱曲線2が適用可能である。なお、爆裂発生状況と影響因子の関係 を考察する方法については、附属書Aに示した。

B法は、曲げ強度試験に類似の寸法であり簡便に供試体を作製できることに加え、炉内に適切 に配置することで一度に複数の供試体を実施可能である点が利点である。加熱曲線1と加熱曲線 2が適用可能であり、適切に断熱処理することで版形の部材を想定して試験を行う場合には1面 加熱、矩形断面部材の隅角部を想定して試験を行う場合には2面加熱で行うことが出来る。だた し、加熱曲線2では一軸拘束供試体を2~3面加熱すると供試体内部の異形棒鋼の温度も急速に 上昇し、十分な拘束力が得られない可能性がある。そのため、B法において加熱曲線2を適用す る場合には1面加熱が推奨される、

**解図1**に本規準を利用して行う耐火性能を有するコンクリート部材の開発における耐火性能評価フローの一例を示す。フロー図では、材料レベルでの爆裂性状評価からコンクリート部材の耐火性能の評価まで一連の流れを表しているが、本試験法(リング拘束供試体と一軸拘束供試体)の位置付けは、コンクリートの爆裂に対する抵抗性を比較的小規模な試験により把握することを目的としたスクリーニング試験に該当する。すなわち、本規準は、コンクリートの材料レベルでの爆裂に対する抵抗性を試験するために用いられるものである。**解図1**は本規準の適用方法の一例を示したものであり、必ずしも本フローに則ってコンクリート部材の耐火性能評価を行う必要はない。なお、本フローの「部材としての耐火性能評価」の要求性能には、与えられた火災外力に対して「爆裂しないこと」、「鉄筋温度が○○℃以下であること」、「冷却後も荷重支持能力を有していること」など、様々な要求性能が満足されていれば良いとする評価もあり得る。



解図1 耐火性を有するコンクリート部材の開発における耐火性能評価フローの一例

3. 用語の定義(箇条 4)

爆裂の定義を定めるにあたっては、爆裂の分類について調査を行った。Bailey[8]らの提案する 爆裂の分類を、**解表1**に示す。コンクリートの爆裂は、4 つに分類することができるとし、それ ぞれの性状について説明している。すなわち、1) 骨材のはく離、2) 隅角部のはく離、3) 表層の はく離、4) 爆発的なはく離である。それぞれを明確に区分けすることは難しいが、1)、3)、4)は 火災の初期に生じ、2)は火災後しばらくしてから生じるとされている。

これらの分類を踏まえ、爆裂について「加熱によってコンクリートの表層がはく離・飛散し断 面欠損する現象」として定義した。加えて、関連する爆裂に関わる用語群について定義した。

現象	加熱からの時間	爆裂の特徴	爆裂音	影響度合	影響因子
1) 骨材のはく離 (Aggregate spalling)	7-30分	骨材の割裂	ポップア ウト	表面の破壊	H, A, S, D, W
2) 隅角部のはく離 (Corner spalling)	30-90 分	激しくない	/	甚大な損傷に なる可能性あり	T, A, ft, R
3) 表層のはく離 (Surface spalling)	7-30分	激しい	クラッキ ング	甚大な損傷に なる可能性あり	H, W, P, ft
4) 爆発的なはく離 (Explosive spalling)	7-30分	激しい	大きな 衝撃音	甚大な損傷	H, A, S, fs, G, L, O, P, Q, R, S, W, Z

解表1 爆裂の分類 [8]

影響因子:A:骨材の熱膨張,D:骨材の熱拡散,fs:コンクリートのせん断強度,ft:コンクリート の引張強度,G:コンクリートの材齢,H:加熱速度,L:荷重,拘束,O:加熱特性,P:通気性, Q:部材の断面形状,R:鉄筋,S:骨材の寸法,T:最高温度,W:含水率,Z:部材の断面寸法,

#### 4. **爆裂試験法**(箇条 5)

#### 4.1 供試体の作製および養生(5.1 および 5.2)

本規準「5.2 養生」では、養生は JISA 1132 に則ることとしている。ただし、対象とするコ ンクリートが、プレキャストコンクリート部材のように蒸気養生されるコンクリートの場合も考 えられるため、養生条件に汎用性を持たせる必要がないかが議論された。すなわち、水分の条件 や養生温度を対象とするコンクリートの実状に合せた方が良い場合もあり得る。そこで、本規準 によらず、別途定めた方法・条件で養生する場合は、その条件を記録するとともに、報告書に記 載する。

本規準「5.2 養生」および「5.1 供試体の作製」で言う「打込み後に水分逸散を防止した状態」は、具体的にどのようにすれば実現できるのかについても議論された。一般的に推奨される 方法は、型枠の上面に気密性の高いシートで封緘して、型枠内に供試体を存置する方法である。 その他の方法としては、以下のものがある。

・水蒸気が飽和状態にある環境の室内で養生する方法(相対湿度>98%)

- ・相対湿度100%を維持できるような十分な水を蓄えたプラスチック製バッグ内で養生する方法
- ・自己粘着性のアルミニウムシースと気密性の高いシートで封緘して水中(水酸化カルシウムが 飽和状態にある水が望ましい)で養生する方法

#### 4.2 試験材齢(5.5.1)

本規準「5.5.1 試験材齢」では、試験材齢 91 日を標準としたが、試験の迅速性を増すために 試験材齢を 28 日とする要望も強かった。コンクリートの種類によっては強度の発現性状が異な るが、91 日の養生期間を確保すれば大半のコンクリートで所定の圧縮強度が発現すると判断し、 本規準では試験材齢を 91 日とした。

一方で、コンクリートの含水率が高いほど、爆裂を発生する確率が高くなるとも言われており [9]、封かん養生であっても、材齢 91 日よりも材齢 28 日の方が含水率は高いと考えられるため、 材齢 28 日で試験を実施した場合には、安全側の評価になると考えられる。このことに留意した 上で、試験材齢を早めることを選択する場合には、参考までに材齢 91 日での試験を行うことが 推奨される。これにより、材齢の影響に関するデータが蓄積されれば、本規準の改定時に有用な 資料になると言える。なお、試験材齢を 91 日以外とした場合には、試験材齢を記録するととも に、報告書に記載する。

#### 4.3 加熱曲線(5.5.2)

爆裂試験を標準化するにあたり、加熱曲線をどのようにするかは特に重要である。**解図2**に本 指針が引用している元となる加熱曲線を示す。

建築火災を想定する場合,一般に ISO834-1 [10]の加熱曲線が用いられる。一方で、トンネル 内の車両火災を想定する場合は ZTV-TUNNEL [11]に規定される RABT 加熱曲線 (RABT30 (車 火災を想定), RABT60 (列車火災を想定))が適用される。本規準の加熱曲線 1 は JIS A 1304 の 標準加熱曲線 A は ISO834-1 に規定されている加熱曲線を参照したものである。加熱曲線 2 は, RABT 加熱曲線を参照した。RABT 加熱曲線はトンネル構造物の設計要領 (シールド工法編) [12] などでも引用されている。

本規準「5.5.2 加熱曲線」では、加熱曲線 1 または加熱曲線 2 (温度降下曲線を考慮しない RABT30)による 30 分加熱を規定している。これは、コンクリートの爆裂は、加熱後 30 分以内 におおかたの爆裂が終了する場合が多いこと、および長時間加熱によって供試体のコンクリート の劣化が進み、爆裂規模の測定が行えなくなることを避けるためである。A 法・B 法いずれも加 熱曲線 1 と 2 に対応可能であるが、1.で述べたように、B 法において加熱曲線 2 を採用する場合、 一軸拘束供試体を複数面から加熱すると供試体内部の異形棒鋼の温度も急速に上昇し、十分な拘 束力が得られない可能性がある。今後の情報蓄積が望まれるが、加熱曲線 2 を適用する場合には 1 面加熱が推奨される、

なお,加熱曲線1については,JIS A 1304の加熱曲線A を参照していることから,加熱温度 測定装置,加熱温度,炉内圧力およびその許容誤差が定められている。一方,加熱曲線2につい ては,許容誤差が定められていないことから,試験にあたっては,誤差が極力小さくなるように 炉内温度を制御する必要がある。加熱曲線2における許容誤差の制定は今後の課題である。

また, ISO834-1 では温度下降曲線を定めていないことから情報量も少なく,本規準において も温度下降曲線を定めないこととした。しかしながら,試験の目的に応じては,温度降下曲線を 含んだ例えば RABT30 や RABT60 などによる加熱曲線を採用することも考えられるため,その 場合には適用した加熱曲線を必要に応じて報告書に記載することとした。



# 5. A法:リング拘束供試体を用いた爆裂試験およびB法:一軸拘束供試体を用いた爆裂試験(箇条6および箇条7)

#### 5.1 供試体の形状・寸法(6.1.1 および 7.1.1)

A法では鋼製の拘束リングを使用した。この目的は、拘束条件下におけるコンクリートの爆裂

の性状を把握するためである。拘束リングの分割数について既往の研究[13]では、拘束応力の算 出に用いるひずみ計測値の温度勾配の影響をより小さくするために、水平方向に2分割した拘束 リングを用いた実験が採用されている。2分割でも爆裂性状の把握は十分に実施可能であるが、 一方で加熱試験中にリングの境目でせん断破壊を生じるケースもあると報告がなされている。よ って、本規準では、リング作製の簡便性と試験の安全性を考慮しリングは1段のものを標準とし た。なお、附属書 A(参考)「コンクリートの爆裂試験 A 法(リング拘束供試体法)における各種測 定方法」に定める「A.2拘束応力測定方法」において、拘束リングのひずみ計測値を用いた拘束 応力の測定方法を示しているが、1段と2段でリングのひずみ値に対する影響が異なるため、注 意が必要である。なお、同附属書「A.3 水蒸気圧測定方法」、「A.4 コンクリートの爆裂試験にお ける引張ひずみ破壊指数を用いた爆裂深さ推定方法」を供試体に適用することでさらに詳細で正 確な爆裂性状を推定することが可能となる。

B法では、加熱を受けるコンクリートの熱膨張を拘束するために、異形棒鋼のD19を供試体内 に配置している。なお、この鉄筋に熱電対を取り付けて、鉄筋温度を測定することも一案として 考えられる。一辺の長さが40mmの正方形断面の中心にD19を配筋すると、かぶり厚さが概ね 40mmとなり、建築構造物における鉄筋コンクリート造部材の一般的なかぶり厚さに近い。供試 体に対して1面加熱、あるいは90°の角度を成して隣り合う2面加熱を行った場合、前者は鉄 筋コンクリート部材の側面部に配筋された鉄筋の温度条件に近く、後者は鉄筋コンクリート部材 の隅角部に配筋された鉄筋の温度条件に近いことから、火災時の鉄筋温度を知る上での参考にな る。ただし、供試体に対して4面加熱を行う場合には、加熱条件が一般的な部材よりも厳しくな ることから、鉄筋温度の参考と言うよりも、爆裂による断面欠損が、加熱中に鉄筋位置までに及 んだか否かの判断材料の一つとして参考になると考えられる。

#### 6. コンクリートの爆裂試験 A法(リング拘束供試体法)における各種測定方法(附属書 A)

附属書 A では、リング拘束供試体法(A 法)においてより詳細な爆裂の性状の把握を目的として、拘束応力の測定方法、水蒸気圧の測定方法、引張ひずみ破壊指数を用いた爆裂深さ推定方法を定めた。

#### 6.1 拘束応力測定方法 (A.2)

拘束応力は、爆裂現象に大きな影響を及ぼすだけでなく、本規準で採用している小規模な供試体と実構造物とでは拘束状態が異なることから、拘束応力や水蒸気圧などを測定することでより 詳細な爆裂の性状の分析が可能となる。観察された爆裂現象や温度ならびに水蒸気圧の測定結果 と拘束応力を比較することで、爆裂現象への拘束応力の影響を確認することができる。

拘束リングの側面に、加熱表面からの深さを変えた位置にひずみゲージを設置し、薄肉円筒理 論に基づき拘束応力を算定する手法を採用した。さらに、深さごとの円周方向ひずみを測定する ことで内部コンクリートに生じる各深さの拘束応力を算出することができる。

拘束応力の算出結果の一例を**解図3**に示す。最大で20 N/mm<sup>2</sup>程度の拘束応力が発生している ことが確認できる。なお,経過時間が13分から29分の間に爆裂が発生しており,爆裂による断 面欠損の影響を受けて, 5mm,10mm位置の拘束応力の増減が確認でき,爆裂の性状のより詳 細な分析に用いることが可能である。

なお、本試験では、許容温度 80℃の常温用のひずみゲージを使用しているため、測定可能時間 が 30 分程度までとなっているが、高温用のひずみゲージを適用することで更に長時間の測定が

21

可能となる。



#### 6.2 水蒸気圧測定方法(A.3)

水蒸気圧は、拘束応力と同様に爆裂現象に大きな影響を及ぼすことから、これらを測定すること でより詳細な爆裂の性状の分析が可能となる。観察された爆裂現象や温度ならびに水蒸気圧の測 定結果と拘束応力を比較することで、爆裂現象への拘束応力の影響を確認することができる。

本附属書に従い測定した水蒸気圧の経時変化と爆裂深さの経時変化を比較した一例を**解図4**に 示す。水蒸気圧の開放点と爆裂点が一致する傾向を示し、爆裂発生時に水蒸気圧が一気に解放さ れている現象が推察できる。



解図4 水蒸気圧と爆裂深さの経時変化の比較結果の一例

#### 6.3 引張ひずみ破壊指数を用いた爆裂深さ推定方法(A.4)

平面応力状態を仮定し、リング拘束供試体を1面加熱すると、加熱面に平行な多軸の拘束応力 σ<sub>re</sub>に起因して面外方向への引張ひずみ(面外直ひずみ:ε<sub>z</sub>)が発生する。リング拘束供試体にお ける爆裂現象は、この面外方向へのひずみ増加による破壊が起点となり、加えて水蒸気圧の影響 を受けて破壊片が面外方向へ飛び出す現象と説明されている。この爆裂発生のメカニズムは、高 強度コンクリートの一般的な爆裂に共通するメカニズムと考えられる。この爆裂メカニズムに基 づき、**解図5**に示す引張ひずみ破壊指数と爆裂破壊指数の2つの指数にて評価される爆裂発生指 標[14]が提案されている。すなわち、本附属書で算定される引張ひずみ破壊指数と爆裂破壊指数 がともに条件を満たした際に爆裂が発生するとした指標である。二つ目の指標である爆裂破壊指 数の具体的な定義は今後の課題である。



水蒸気圧などに起因する爆裂破壊指数が爆裂発生条件を満たしていると仮定すれば、引張ひず み破壊指数が1を超えた位置と時間を爆裂発生点として捉え、この爆裂発生点をつなぎ合せて爆 裂深さの経時変化を推察することができる。さらには、この爆裂深さの経時変化と実際に温度測 定結果および観察状況から求めた爆裂深さの経時変化を比較することで拘束応力が起点となる引 張ひずみ破壊と水蒸気圧の複合作用による爆裂現象を確認することができる。

爆裂破壊指数が爆裂発生条件を満たしていると仮定し、本規準に従い求めた引張ひずみ破壊指数を用いて推定した爆裂深さの経時変化と、検証用に別途測定した深さ毎の温度データおよび観察状況から求めた爆裂深さの経時変化を比較した事例を**解図6**に示す。引張ひずみ破壊指数を用いることで、爆裂が発生した供試体の表層部からの爆裂深さの経時変化を精度よく推定できていることがわかる。



# 7. コンクリートの爆裂試験 B 法(一軸拘束供試体法)における異形棒鋼の温度測定方法(附属書 B)

付属書 B では、爆裂の影響が異形棒鋼に及ぶまでの時間を確認したい場合に、異形棒鋼の温度 を測定する手法を定めた。ただし、供試体の熱容量が小さいことから、爆裂の影響が明瞭に温度 履歴に現れない場合もあることに留意が必要である。

#### 8. 審議中に特に問題となった事項

日本コンクリート工学会「JCI-TC154A 高温環境下におけるコンクリートの性能評価に関する 研究委員会」での審議内容を含め、本規準制定にあたって特に問題となった主な事項は、次の通 りである。

#### 8.1 爆裂規模の評価指標

本規準では、配(調)合のスクリーニングを目的としてコンクリートの爆裂に対する抵抗性を 試験する方法を提案し、爆裂規模や爆裂発生時間の測定方法を定義したが、その総合的な評価指 標を定めるには至らなかった。しかしながら、爆裂規模の評価指標については特に要望が強く、 上記委員会で審議された爆裂規模のグレーディング指標について以下に紹介する。

提案された爆裂規模のグレーディング指標を,**解表2**に示す,最大爆裂深さ(指標1),爆裂面 積率(指標2)および爆裂容積率(指標3)などを用いてグレーディングを行う。A法は1面加 熱であるため,指標1から3で評価が可能である。B法は,4面加熱とした場合,指標1,2で 評価が可能である。

	指標1:最大爆裂深さ	指標2:爆裂面積率	指標3:爆裂容積率
Α	爆裂なし、ひび割れ無し	爆裂なし、ひび割れ無し	爆裂なし、ひび割れ無し
в	爆裂は無いが,	爆裂は無いが,	爆裂は無いが,
Б	亀甲状のひび割れあり	亀甲状のひび割れあり	亀甲状のひび割れあり
С	10mm 未満	総面積の10%未満	総容積の 10%未満
D	10~30mm 未満	総面積の 10~50%未満	総容積の 10~20%未満
Е	30mm 以上	総面積の 50%以上	総容積の 20%以上

解表2 爆裂規模のグレーディング指標

※ 最大爆裂深さ:加熱面に発生した爆裂の最大欠損深さ

※ 爆裂面積率:爆裂発生面積を加熱面積にて除したもの

※ 爆裂容積率:爆裂容積を供試体容積にて除したもの

例として、同じ配(調)合のコンクリートについて、リング拘束供試体法(A法)および一軸 拘束供試体法(B法)によった試験体と、既往の研究事例[15]、[16]から引用した RC 造柱の載 荷加熱試験体ついて、解表2に従いグレーディングした例を解表3に示す。参考として加熱後の 試験体の状況を解図7に示す。なお、共通試験に用いたコンクリートは、3か月の実強度が108 N/mm<sup>2</sup>で、既往の研究と比較するために加熱曲線はISO 834の60分加熱としている。リング拘 束供試体は、下面からの1面加熱条件とし、一軸拘束供試体は上下端部から50mmを断熱材で保 護して炉内に配置し4面加熱としている。A法は指標1から3において、評価がEとなりRC造 柱の評価と類似の結果となった。B法は指標1,2において評価がDとなった。

	爆裂状況		グレード			
No.	最大爆裂深 さ(mm)	爆裂面積率 (%)	爆裂容積率 (%)	指標1	指標 2	指標 3
A 法	54	88	24	Ε	Ε	Ε
B 法	25	12	—	D	D	_
RC 造柱	40	100 (推定)	32 (推定)	Е	Е	Е

解表3 爆裂規模のグレーディング実施例



解図7 爆裂状況

#### 9. 懸案事項

RABT 加熱曲線は土木分野を中心に近年適用が増えている加熱曲線であるが, ISO, JIS レベルでの規定が無かったため本規準であらためて加熱曲線 2(温度降下曲線を考慮しない RABT30)を定めた。しかしながら温度下降域のコントロールや,制御温度の許容差などの規定には至らなかったため,今後の懸案課題となった。

## 参考文献

- [1] 日本建築学会:建築工事標準仕様書 JASS 5, 2022.
- [2] 土木学会:コンクリート標準示方書(施工編), 2012.
- [3] Bazant ZP., Proc.of the Int. Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, Gaithersburg, Maryland; 1997, p.155-164.
- [4] Anderberg Y., Proc.of the Int.Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, Gaithersburg, Maryland; 1997, p. 69-73.
- [5] 日本コンクリート工学会:コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能研究委員会」報告書, 2012.
- [6] トンネル構造物のコンクリートに対する耐火工設計施工指針(案)土木学会,2014.

- [7] 日本コンクリート工学会:高温環境下におけるコンクリートの性能評価に関する研究委員会, 日本コンクリート工学会, 2017.9
- [8] C.Bailey,G.A.Khoury: Performance of Concrete Structures in Fire, cement and concrete industry publication, MPA-The Concrete Centre, 2011
- [9] 日本建築学会:構造材料の耐火性ハンドブック, 2017
- [10] ISO834-1: 1999 Fire-resistance tests -- Elements of building construction Part 1: General requirements
- [11] BUNDESMINISTERIUM FUER VERKEHR Abteilung Strassenbau : ZTV-TUNNEL Zusaetzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien fuer den Bau von Strassentunneln Teil 1 Geschlossene Bauweise, Bundesministerium fuer Verkehr, 1995.
- [12] 首都高速道路株式会社:トンネル構造物設計要領(シールド工法編), 2008
- [13] 谷辺徹, 兼松学, 小澤満津雄, 森田武:高強度コンクリートの爆裂性評価に及ぼす供試体種類の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1087-1092, 2017
- [14] 谷辺徹:高温下におけるコンクリートの爆裂発生指標とリング拘束試験方法,岐阜大学,2014, 博士論文
- [15] 森田武,片山行雄,西田朗,高橋圭一,香田伸次,菅野光寿,西田浩和:高強度鉄筋コンク リート柱の耐火性に関する実験的検討,平成26年度日本火災学会研究発表会概要集,pp.118-119,2014.5
- [16] 森田武,西田朗,片山行雄,菅野光寿:石灰岩砕石を粗骨材として使用した高強度鉄筋コン クリート造柱の耐火性に関する検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.38, No.1, pp.1281-1286, 2016

# 作成者一覧

(JCI-TC154A 高温環境下におけるコンクリートの性能評価に関する研究委員会)

(2015.4~2017.3)

	委員	長	兼松 学	東京理科大学
	副委員	長	小澤 満津雄	群馬大学大学院
	WG1	主査,幹事	森田 武	清水建設株式会社
	WG2	主査	内田 慎哉	立命館大学
	幹	事	谷辺 徹	太平洋マテリアル株式会社
	幹	事	古市 耕輔	鹿島建設株式会社
	委	員	新 大軌	島根大学
			飯束 義夫	元 東日本高速道路株式会社
			池田 憲一	東京理科大学
			岩波 光保	東京工業大学大学院
			岩野 聡史	リック株式会社
			上田 洋	公益財団法人鉄道総合技術研究所
			大野 健太郎	首都大学東京大学院
			金 圭庸	Chung-nam National University
			小林 利充	株式会社大林組
			迫井 裕樹	八戸工業大学
			澤口 啓希	川崎地質株式会社
			辻 大二郎	株式会社竹中工務店
			寺澤 広基	大阪大学大学院
			土橋 浩	首都高速道路株式会社
			馬場 重彰	大成建設株式会社
			春畑 仁一	一般財団法人日本建築総合試験所
			藤原 規雄	株式会社国際建設技術研究所
			裵 晟哲	元 東京理科大学,現 Hanyang University
			Michael HENRY	北海道大学大学院
			吉岡 英樹	国土交通省国土技術政策総合研究所
			吉田 夏樹	一般財団法人日本建築総合試験所
	顧	問	野口 貴文	東京大学大学院
	事 務	局	高田 和法	公益社団法人日本コンクリート工学会
(規準	・指針	管理委員会)	(2018 年制定時)	
	委員	長	河野 広隆	京都大学
	副委員	長	桜本 文敏	鹿島建設株式会社
	委	員	上野 敦	首都大学東京

渡辺 博志 国立研究開発法人土木研究所

(技術・普及部門担当副会長)(2018年制定時)

入矢桂史郎 株式会社大林組

(規準・指針管理委員会)(2024年改正時)

委員長	内田 裕市	岐阜大学
副委員長	濱 幸雄	室蘭工業大学
委員	上野 敦	東京都立大学
	鹿毛 忠継	国立研究開発法人建築研究所
	兼松 学	東京理科大学
	黒岩 秀介	大成建設株式会社
	古賀 裕久	国立研究開発法人土木研究所
	泉田 裕介	一般財団法人建材試験センター
	濱田 秀則	九州大学

(技術・普及部門担当副会長)(2024年改正時)

黒岩 秀介 大成建設株式会社