

曲げ強度試験による評価について

1. 目的

天井レンガ損傷の原因究明として天井レンガの強度評価を行うため、天井レンガと同一材料であるAZ-GSに対して曲げ強度試験を実施した。

本結果を、同じく原因究明として実施している天井レンガの熱応力解析結果と照らし合わせ、天井レンガ損傷に関する評価を実施する。

2. 試験内容・手順

各試験の内容及び手順を以下に示す。

(1) 使用機器等

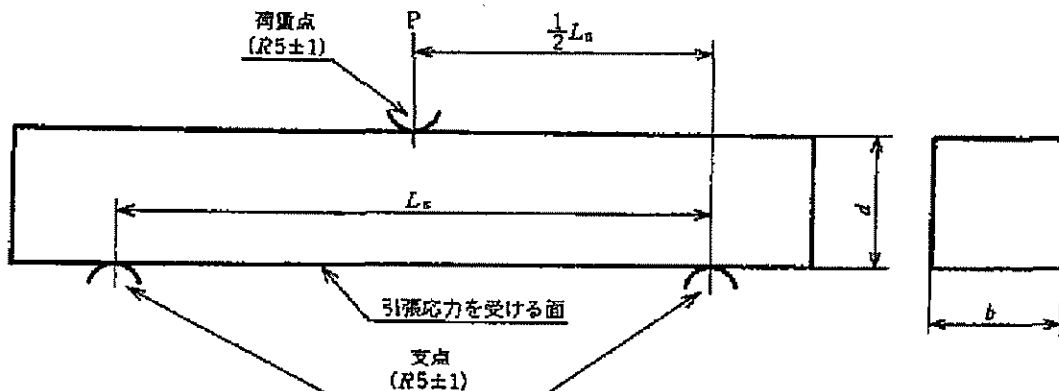
- ・ AZ-GS レンガ片(25mm×25mm×120mm)
- ・ 熱間曲げ試験装置

(2) 試験条件

- ・ 試験温度 600℃ (熱応力解析における応力発生箇所の温度とした)
- ・ 試験点数 70点

(3) 試験方法

- i) 試験用のAZ-GSレンガ片を曲げ試験装置を有する電気炉内に入れ、試験条件温度になるよう加熱する。
- ii) 加熱したレンガ片に対して荷重をかけ、レンガ片が破壊するまでに示した最大荷重を記録する。(図1参照)



- L_s : 支点間距離 125±2 mm又は $L_s \geq 4d$ を満たす所要寸法
- R : 支点及び荷重点の先端の曲率半径 5±1 mm
- d : 試験片の厚さ寸法 25±1 mm又は $d \leq b$ を満たす所要寸法
- b : 試験片の幅寸法(mm)
- L_s : 試験片の全長 $L_s \geq 1.2 L_s$ (mm)

図1 曲げ試験イメージ図

3. 試験結果

曲げ強度試験の結果、図2に示すとおり、9.00MPa未滿の曲げ荷重で破損に至るレンガは確認されなかった。なお、曲げ強度の平均値は12.5MPaであった。また、曲げ強度の平均(12.5MPa)よりも離れた9.00MPaという応力でも破損が発生するものが存在することがわかった。(バラツキが大きい)

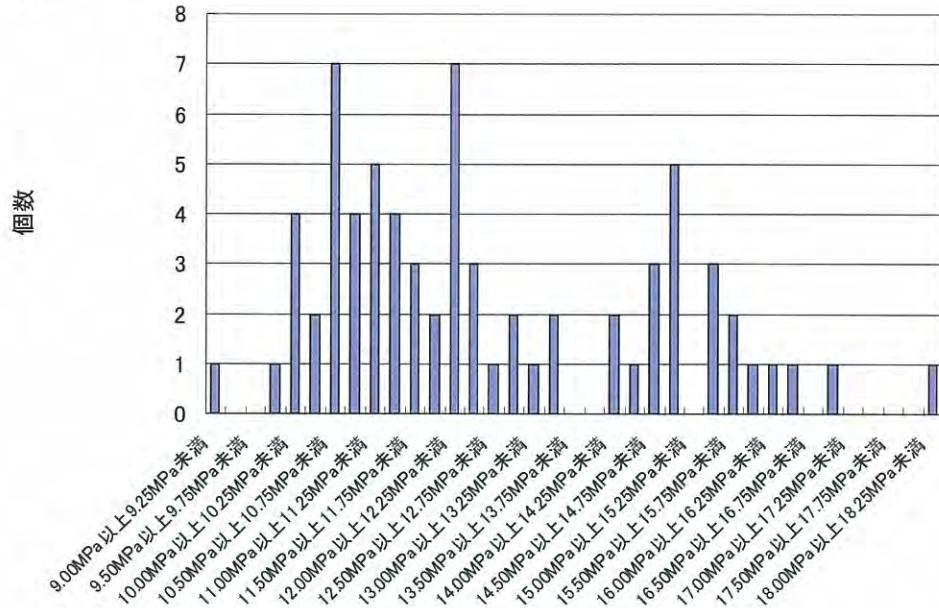


図2 AZ-GSの曲げ強度試験結果

4. 曲げ強度試験結果と熱応力解析結果との比較

運転実績の条件を用いて行った熱応力解析の結果、アンカレンガに発生する応力は図3のとおりであった。

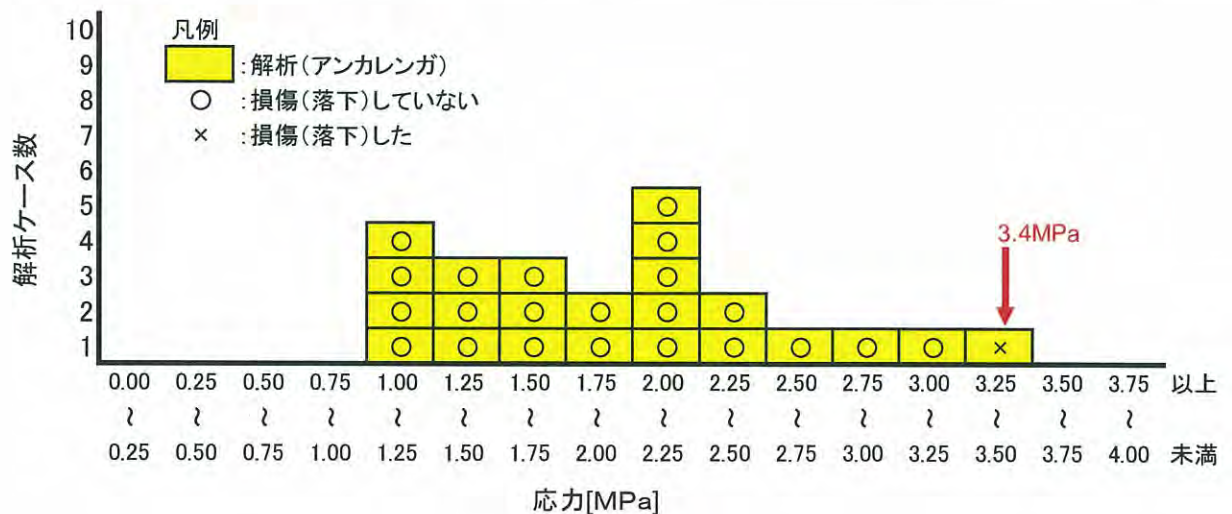


図3 熱応力解析結果

今回損傷が確認されたアンカレンガに発生した応力 3.4MPa は、当該アンカレンガに対しては最も大きい値であるが、曲げ強度試験では損傷が確認されていない応力の領域である。

曲げ強度試験の結果において、最も低い曲げ強度であったサンプルが1点しかなく、また他のサンプルに対して離れていることから、解析結果との関係を以下のとおり評価する。

5. 統計処理による評価

耐火物などの脆性材料の試験データは金属材料に比べてバラツキが大きく、これらの変動を考慮に入れる必要がある。評価手法としては、(1) 非心 t 分布による評価、及び (2) ワイブル分布による評価を用いて、試験データを統計処理する。

(1) 非心 t 分布による評価

非心 t 分布は、臨界安全ハンドブックに記載された「推定臨界下限増倍率」という値の推定にも使用されている。(推定臨界下限増倍率とは、計算誤差 (計算結果のばらつき) を考慮しても未臨界と判断してよい臨界計算結果の上限値をいう。)

なお、熱応力解析の結果、ダボ部に確認された最大応力は引張応力であったが、AZ-GS レンガなどの耐火物に対する引張強度試験の実施は困難であるため、非心 t 分布では、曲げ強度試験の結果を換算して評価を行うこととする。換算にあたっては、一般的に耐火物に対する曲げ強度と引張強度の比が 2:1¹⁾ ²⁾ とされていることから、上記曲げ強度の試験結果の 1/2 を引張強度として評価を実施した。

また、破断された試験片の破壊原因は表 1 に示すような原因に分類されることが分かった。このうちエッジ亀裂は試験片特有の原因と考えられること、表面亀裂はサンプル数が十分でないことから、エッジ亀裂、表面亀裂を打ち切りデータとみなし、内部亀裂のデータについて曲げ強度を引張強度に換算した結果を図 4 に示す。

表 1 破壊原因とその試験片数

破壊原因	試験片数
内部亀裂	39
エッジ亀裂	15
表面亀裂	5
原因不明	11

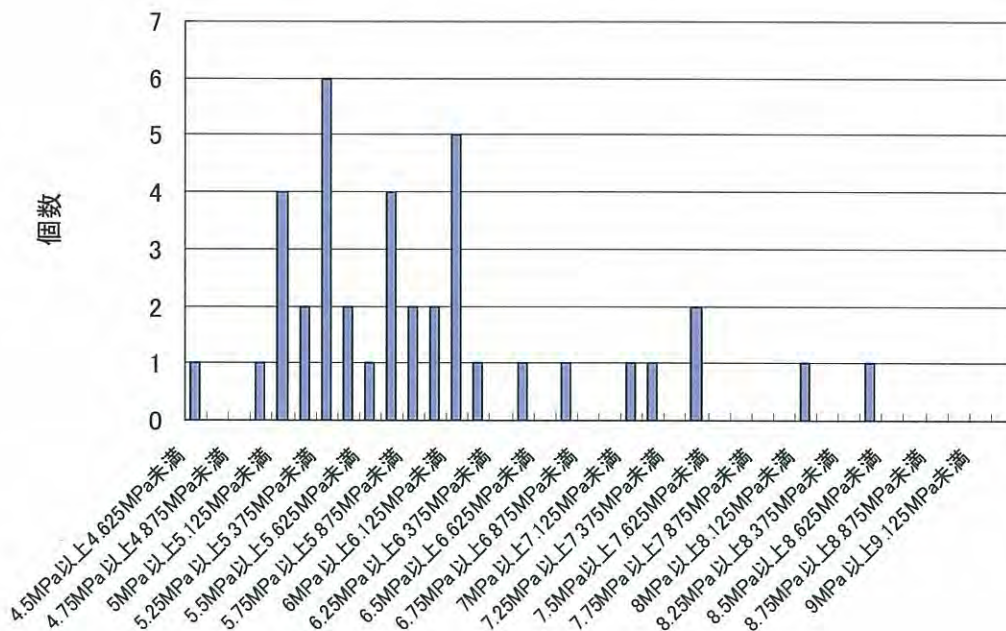


図 4 引張強度への換算

1) 「セラミックスの機械的性質」(社団法人 窯業協会 編)
 2) 「耐火物手帳 '99」(耐火物技術協会 編)

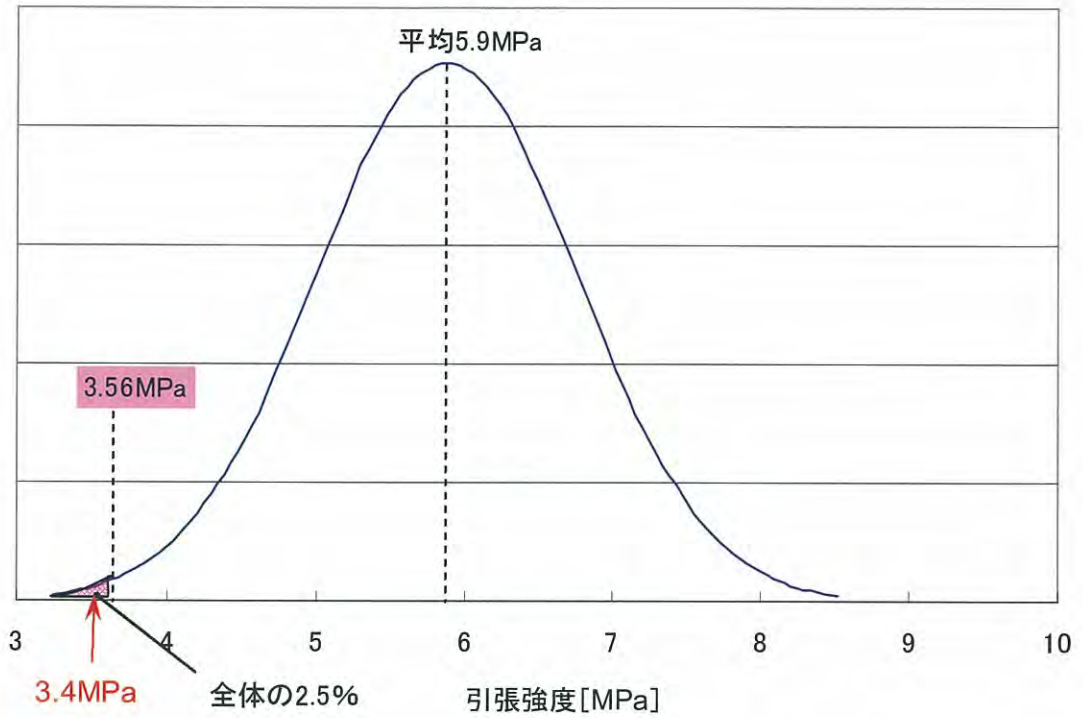


図5 非心 t 分布による引張強度評価 (分布はイメージ図)

計算の結果、信頼度 97.5%の非心 t 分布において、2.5%のレンガの引張強度が 3.56MPa 以下となることが分かった。

非心 t 分布による統計処理を行った場合は、今回の損傷アンカレンガに発生した応力 3.4MPa は、全体の 2.5%の領域にあることになり、小さい値であるが、分布上は当該応力により損傷に至る可能性があることが分かった。

(2) ワイブル分布による評価

次に、耐火物などの脆性材料の強度や寿命評価として一般的に使用される統計処理方法であるワイブル分布を使用した評価を行った。これは、耐火物などの破壊は材料中に存在する欠陥や空隙を起点として発生し、強度値が材料の平均的な性質ではなく材料中に含まれる最大欠陥に支配されるという考え方である。

ここでは、曲げ強度試験の結果をもとにワイブル分布を作成し、レンガの破壊確率について評価した。

なお、耐火物に対するワイブル分布による解析手法について特に定められた規格はないため、ファインセラミックスに対する規格（JIS R1625「ファインセラミックスの強さデータのワイブル統計解析法」）を用いることとした。

a. 曲げ強度試験データ

曲げ強度試験データをワイブルプロットした結果を図6に示す。なお、破断された試験片の破壊原因は表2に示すような原因に分類されることが分かった。このうちエッジ亀裂は試験片特有の原因と考えられること、表面亀裂はサンプル数が十分でないことから、エッジ亀裂、表面亀裂を打ち切りデータとみなし、内部亀裂について多重モードワイブル分布という方法にてワイブルプロットを作成した。内部亀裂データから算出されるワイブル係数 m の値は、5.31であった。

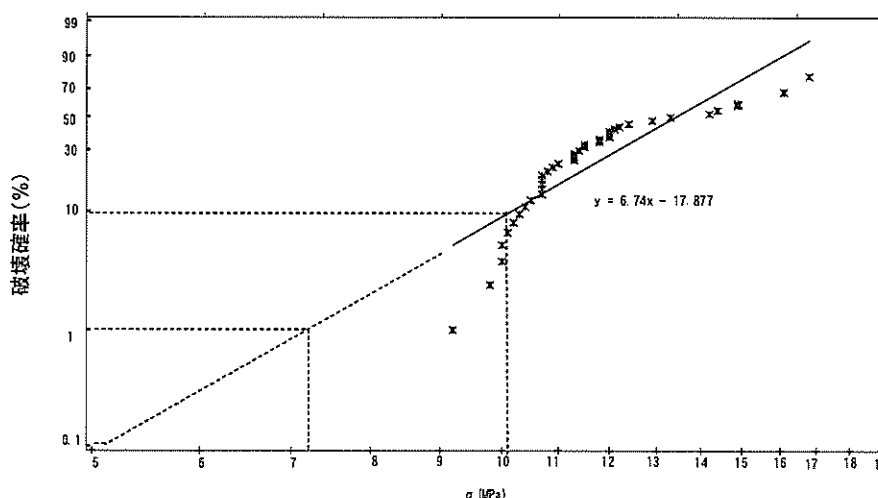


図6 内部亀裂試験データのワイブルプロット（600℃の曲げ強さ、多重モードワイブル分布）

表2 破壊原因とその試験片数

破壊原因	試験片数
内部亀裂	39
エッジ亀裂	15
表面亀裂	5
原因不明	11

b. 曲げ強度結果から評価対象部位の強度への換算

- 耐火物の場合、一様な引張荷重を負荷する試験が難しいため、曲げ試験により強度を測定するが内部の応力状態は場所により異なること、また、実際の評価対象と JIS に基づく試験片の寸法の違いを考慮する必要がある。
- 耐火物やセラミックスの強度については、有効体積という概念を用いて寸法効果の影響を評価する手法が用いられている。

- ・ 曲げ試験とアンカレンガの評価対象部位の有効体積を求め（表3参照）、寸法効果の算出を行った。曲げ強度から引張強度に換算するため、内部亀裂の曲げ試験結果に寸法効果の影響を考慮した想定ワイブルプロット図（計算値）を図7に示す。
- ・ その結果、アンカレンガダボ部の破壊確率は、4.2MPaで10%、2.9MPaで1%、2.1MPaで0.1%となる。

表3 有効体積の評価方法^[1, 2, 3]

	アンカレンガモデル図	有効体積算出部位
評価対象部位の有効体積の算出		
曲げ試験片の有効体積の算出	試験片のモデル図 (支点間距離は100mm)	曲げ試験における寸法

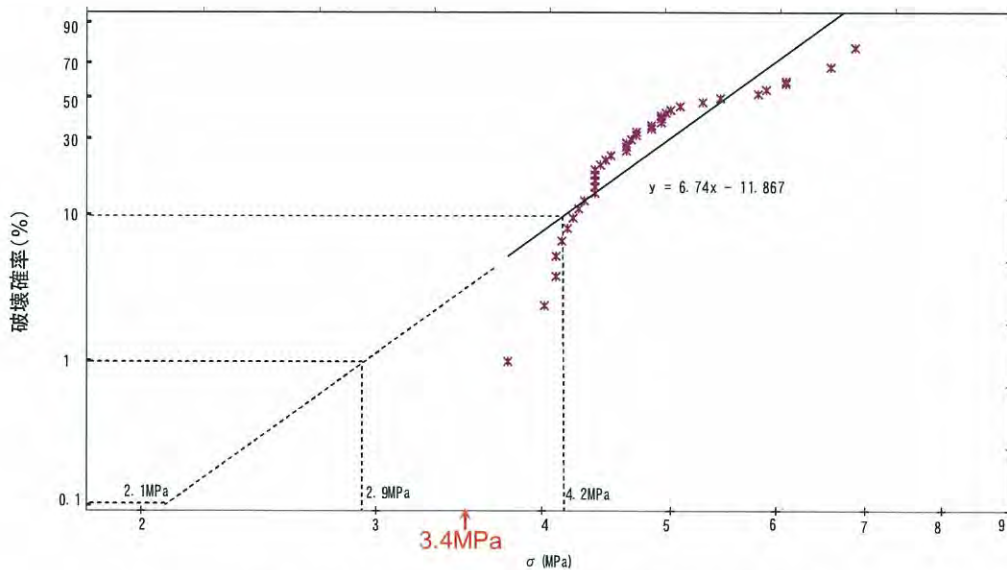


図7 アンカレンガに対するワイブルプロット

- 1 R.W.ダヴィジ（鈴木弘茂，井関孝善共訳），“セラミックスの強度と破壊”，共立出版
- 2 鈴木章彦，“セラミックの強度評価”，圧力技術，第29巻，4号，218-229，（1991）。
- 3 西田俊彦，安田栄一，“セラミックスの力学的特性評価”，日刊工業新聞社

c. ワイブル分布による評価のまとめ

熱応力解析の結果、損傷したアンカレンガのダボ部に最も高い応力が発生した間接加熱装置の温度降温ケース (3.4MPa) について、アンカレンガに対するワイブルプロット (図7) に基づくと、破壊確率 2.9%となり、間接加熱装置が急に降温することでアンカレンガに亀裂が発生することは起こり得ると考えられる。

6. 強度試験結果による評価のまとめ

今回、天井レンガの損傷に対して、70点の曲げ強度試験結果を行ったところ、9.00MPa以下の曲げ荷重 (4.50MPa以下の引張荷重) で損傷に至るレンガは確認されなかった。

曲げ強度試験の結果をふまえて、(1) 非心 t 分布による評価、及び (2) ワイブル分布により、レンガが損傷に至る可能性について評価を実施した。

いずれによる評価においても、熱応力解析の結果損傷アンカレンガに対して発生したと推定される応力 (3.4MPa) は小さいものであり、当該応力での損傷確率は小さいものであったと推定される。しかしながら、耐火材のような脆性材料の強度にはばらつきが大きいため、低い確率ではあるが、当該応力により損傷に至ったものと推定される。

以 上