

火災加熱を受ける中空プレキャストプレストレストコンクリートスラブの解析

著：Venkatesh K. R. Kodur and Anuj M. Shakya
 訳：高津比呂人

本報では、中空プレキャストプレストレストコンクリート（以下、PCaPC）スラブの耐火性能を評価するための3次元有限要素モデルの開発について示す。中空PCaPCスラブの、熱伝導解析と構造解析を連成させた非線形有限要素解析を汎用ソフトを用いて実施した。この解析では、材料非線形（コンクリートや鉄筋、PC鋼材の高温時の特性）および幾何学的非線形を考慮した。断面の温度やたわみ等の応答値を用いてスラブの破壊を判定した。解析による応答の予測値と火災加熱実験結果を比較したところ、両者は精度良く一致したことから、今回提案したモデルが火災と荷重を同時に受ける中空PCaPCスラブの耐火性能を予測できることがわかった。

キーワード：耐火性、中空PCaPCスラブ、数値解析モデル

1. はじめに

中空PCaPCスラブは、仕上りの良さ、施工性の良さ、空間利用の効率性、柔軟な適用性、などの理由で近年広く使用されている。建物においては、構造上の火災安全性がもっとも留意すべき事項であり、このため建築規準において中空PCaPCスラブの耐火性に関する規定を設けている。現行の中空PCaPCスラブの耐火性を評価する方法は、主に標準火災実験によるものであり、現在の規定では、中空PCaPCスラブの標準火災実験結果に基づき、耐火性をコンクリートのかぶり厚さとスラブの厚さから算定するものとなっている。この規定は、建物内で発生するであろう実際の火災の状況を考慮していないため、実火災における中空PCaPCスラブの耐火性を反映しているとはいえない。さらに、この規定では適用可能なパラメータにかぎりがあ

る。一般的にコンクリートは鋼材よりも高い耐火性を示す。よって火災加熱を受ける状況下では、PC鋼材の温度上昇が中空PCaPCスラブの耐火性を支配する場合がある。中空PCaPCスラブでは、中央のボイドがスラブ全体の熱慣性（訳者註：物質の温度変化に対する抵抗の度合いを示す尺度）に影響を与えるので、スラブの断面内の温度伝達に影響を及ぼす。火災によるスラブ内への熱伝達は、輻射（訳者註：電磁波による伝熱）と対流（訳者註：流体（空気）の循環による伝熱）によるものであるのに対し、スラブ内からの熱伝達は、固体コンクリートの熱伝導（訳者註：固体中での伝熱）と対流と中空コアからの輻射である。かぶりコンクリートのはく落や鋼材のすべり、せん断破壊などが中空PCaPCスラブの過去の火災加熱実験では観察されたと報告されており、さらに中空PCaPCスラブの耐火性状は、火災加熱の種類や荷重条件、拘束条件、コンクリートのかぶり厚さや骨材の種類による影響も受ける。正確に中空PCaPCスラブの耐火性能を評価するためには、これらのパラメータの影響を

適切に評価する必要がある。

火災加熱実験によって耐火性を評価する従来の手法では、費用と時間がかかり、パラメータもかぎられる。火災加熱実験に代わるものが、数値解析により中空PCaPCスラブの耐火性を評価する手法である。数値解析によれば、種々のパラメータを効率的に、低コストで取り込むことが可能となる。中空PCaPCスラブの耐火性を評価するための数値解析法を確立するために、3次元有限要素モデルを開発したので、本報では有限要素モデルの詳細を、材料構成則および破壊判定基準とともに示す。

2. 既往の研究

2.1 実験的研究

中空PCaPCスラブの火災加熱実験は多くの研究者により実施されてきた。いずれも、標準火災条件のもと供用時荷重を載荷して実施された。ほとんどの場合で、PC鋼材の温度が上限値に達し、スラブが破壊したと判定された。実験パラメータは、スラブ厚、鉄筋までのコンクリートかぶり厚さ、コンクリート強度、載荷荷重である。耐火性を評価することに加えて、一部の研究者は火災加熱下でのスラブの破壊メカニズムについても検討している。火災に起因する中空PCaPCスラブの表面のはく離の度合いを研究した研究者もいた。

これらの火災加熱実験のほとんどが標準火災条件のもとで実施されており、実験を実施した中空PCaPCスラブの耐火認定を得るため、あるいは類似の構成の中空PCaPCスラブの耐火性状を推定するために用いられた。これらの実験から、表面のはく離、補強材の付着すべり、圧壊が中空PCaPCの破壊に影響することが確認された。

しかし、耐火性に対するこれらの因子の影響は十分に定量化されておらず、中空PCaPCスラブの破壊メカニズムも解明されてはいない。またこれらの火災加熱実験は、実際の火災状況や荷重載荷の範囲、拘束条件といった重要なパラメータの影響を考慮しておらず、中空PCaPCス

ラブの実建物での火災時の状況については十分に研究されていない。

2.2 数値解析

火災加熱時の中空 PCaPC スラブについての数値解析も一部の研究者により実施されている。基本的に、有限要素法による数値解析が行われており、スラブは線要素、平面要素、立体要素に離散化されている。中空 PCaPC スラブの耐火性能を評価するための解析では、基本的には破壊が生じるまで以下のステップを繰り返す。

- ・火災温度の計算
- ・断面内の温度の計算
- ・火災時のたわみと強度の計算
- ・破壊判定基準に基づく耐火性の評価

これらの数値解析の研究では、スラブの構成やかぶり厚さ、支持条件、荷重条件などの中空 PCaPC スラブの耐火性に影響を及ぼすパラメータについても検討されている。しかし、実際の状況を表すパラメータ、すなわち火災の状況やコンクリート強度、火災により生じる拘束、プレストレス力については検討されていない。また、これらのモデルではかぶりコンクリートのはく離や補強材の付着すべりや圧壊といった実際の中空 PCaPC スラブの実験で観察された現象を予測することができない。さらに、提案された数値モデルでは検証が不足しているので、適用については限界がある。

3. 耐火に関する規定

耐火設計のための仕様は、建築規準と標準規格において規定されている。これらの規定のほとんどが実際は規範的なものであり、標準加熱試験から定められたものである。そこで表形式でまとめられたスラブの耐火性能は、主に PC 鋼材のかぶり厚さと最小のスラブのせいによって決まる。

米国では、コンクリート構造物は ACI 規準 (ACI318-11) に則って設計され、プレストレストコンクリート (以下、PC) 構造物は PCI デザインハンドブックに従って設計される。PCI デザインハンドブックでは、PC 造床や屋根スラブの耐火性能の評価が鉄筋までのコンクリートのかぶり厚さに基づく表にまとめられている。さらに、PCI デザインハンドブックでは、PCaPC スラブの耐火性能を評価するため、PC 鋼材の高温による耐力劣化に基づく合理的な設計手法も提供している。

ACI の耐火に関する規準 (ACI216.1-07) では、ASTM 規格 (ASTM E119) による火災加熱実験に基づいて、コンクリート造と組石造の耐火性能が定められている。ここで定められている PCaPC スラブの耐火性能の値は PCI デザインハンドブックや国際建築規準の規定と類似しており、スラブ厚と PC 鋼材までのかぶり厚さを規定している。中空 PCaPC スラブでは、断面積をスラブの幅で割って算出したものがスラブの有効厚さとされている。また、PCI デザインハンドブックと ACI 規準では、端部処理条件と使用骨材に応じた耐火性能を規定している。

Eurocode2 では、PCaPC スラブの耐火性を決定する方

法として、表で計算する方法、簡易法、精査法の3つの方法がある。表で計算する方法は標準火災加熱試験に基づくもので、もっとも簡便に耐火性能を算出できる。この表では、最小スラブ厚 (床仕上げを除く) と表面から鉄筋中心までの距離 (コンクリートのかぶり厚さと同意)、およびスラブの構成 (単純支持・連続支持・平坦・リブ付) により耐火性能を算出する。

簡易法では、ある火災加熱時間におけるスラブの曲げ性能の低下とその耐火性を評価するため、温度に起因する強度低減係数を使う。この方法は、床スラブが均等な火災加熱にさらされ、均等な荷重を受ける場合に適用可能である。Eurocode2 では、熱伝達と構造力学の原則を用いて、コンクリートの、熱および構造の応答を評価する精査法による手法も提供している。この方法では、実験データにより数値計算結果を検証する必要がある。この方法は耐火性能の正確な推定につながる可能性もあるが、PC 構造物の火災時応答を評価するための検証データが不足している。2011 年には中空 PCaPC スラブの火災時のせん断強度と定着強度を計算する新しい式が Eurocode2 の付属書 G に導入された。

他の設計規準、オーストラリア (AS3600) やニュージーランド (NZS3101)、カナダ建築規準も、PCI デザインハンドブックや ACI 規準と同様の条項となっている。

4. 数値解析モデル

中空 PCaPC スラブの火災時応答を追跡するための数値解析モデルは、汎用有限要素解析ソフトを使って開発された。このモデルでは、幾何学および材料非線形を扱うことができ、コンクリート・鉄筋・PC 鋼材の温度に依存する熱的・機械的特性も考慮できる。中空 PCaPC スラブの耐火解析は、炎の発生からスラブの破壊までの時刻歴解析により行われる。このモデルの特徴である、離散化の詳細・高温特性・境界条件・破壊判定基準について以下に示す。

4.1 離散化の詳細

耐火解析では、中空 PCaPC スラブは各要素に離散化される。このモデルでは、熱伝導解析と構造解析を実行するための2組の要素が必要となる。熱伝導解析と構造解析の両方で、それぞれ3つの要素を使用する。

火源からスラブ底面に直接作用する熱の輻射をシミュレーションするために、スラブの火にさらされる面に表面要素を貼り付ける。3次元熱伝導要素を、スラブ表面から内部コンクリートへの伝熱をシミュレーションするために用いる。この要素は、8節点要素で各節点で温度に関する1自由度をもち、3次元解析、定常状態の解析、過渡熱解析に適用可能である。また節点間での熱伝導を考慮できる、各節点で温度に関する1自由度を持つ一軸要素を用いた。この熱伝導を扱う線要素は、定常状態または過渡熱応答をシミュレーションできる。

解析は2段階で行われるので、熱伝導解析が完了すると、伝熱要素が構造要素に切り替わる。有限要素解析ソフトでは、要素の切り替え時に熱伝導解析の結果を直接

構造解析に反映することができる。

変換は次の手順で行う。

- 3次元ソリッド伝熱要素を3次元ソリッドコンクリート要素に変換する
- 伝熱線要素をPC鋼材線要素に変換する
- 伝熱表面要素を構造表面要素に変換する

構造解析では、コンクリートは3次元ソリッド要素を用いる。この要素は引張時のひび割れ（直交3方向）、圧壊、塑性変形、クリープをシミュレーションすることができる。この要素は8節点で構成され、各節点で3自由度をもつ（並進x, y, z方向）。PC鋼材には3次元円柱要素を使う。この要素は一軸の引張と圧縮を追跡でき、各節点で3自由度をもつ（並進x, y, z方向）。PC鋼材の塑性変形、クリープ、回転、大ひずみ変形をこの要素でシミュレーションすることができる。構造要素に変換した伝熱表面要素は、構造解析では機能しない。図-1に、典型的な中空PCaPCスラブの、各要素に離散化されたモデルを示す。

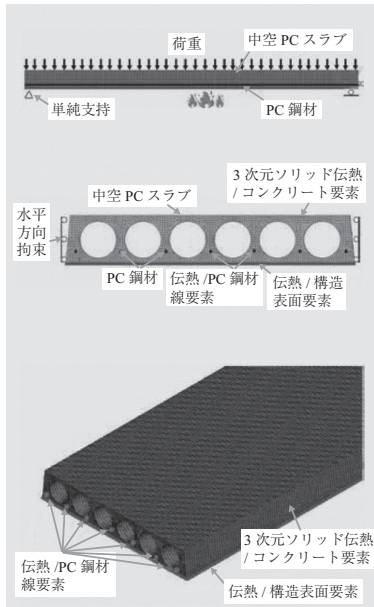


図-1 中空PCaPCスラブの解析モデル

4.2 高温時の材料特性

中空PCaPCスラブが火災加熱を受けるとき、コンクリート・鉄筋・PC鋼材は温度の上昇に従って強度が低下する。実際の火災時の挙動を評価するためには、さまざまな温度における材料特性を考慮する必要がある。したがって、有限要素解析においては、温度に依存する熱特性と機械的特性を入力データとして準備する必要がある。熱特性には、熱伝導率・比熱・放射率を含み、機械的特性には、密度・弾性係数・ポアソン比・応力ひずみ関係・熱膨張を含む。これらの特性と温度の関係はEurocode2に定義されている（図-2～11）。

有限要素解析ソフトでは、コンクリートの塑性挙動はWilliam-Warnkeの構成モデルで定義されている。このモデルではコンクリートの引張側と圧縮側の両方の挙動を

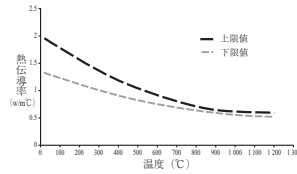


図-2 コンクリートの熱伝導率

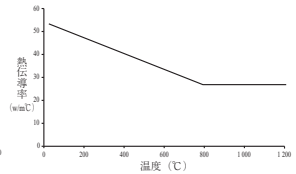


図-7 鋼材の熱伝導率

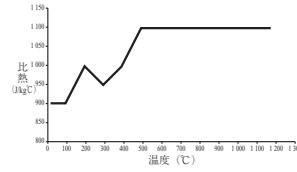


図-3 コンクリートの比熱

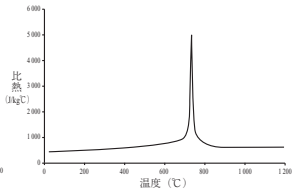


図-8 鋼材の比熱

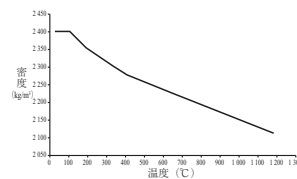


図-4 コンクリートの密度

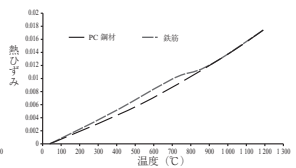


図-9 鋼材の熱ひずみ

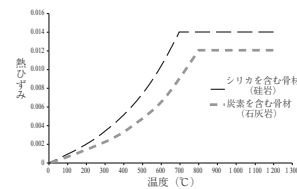


図-5 コンクリートの熱ひずみ

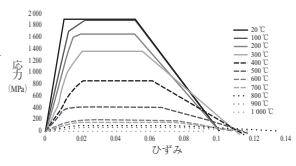


図-10 PC鋼材の応力ひずみ関係

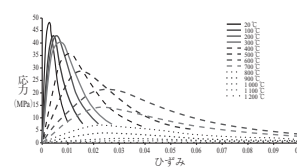


図-6 コンクリートの応力ひずみ関係

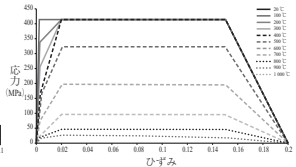


図-11 鉄筋の応力ひずみ関係

扱える。荷重載荷時には、スラブの上縁が圧縮となり、下縁は引張となるので、コンクリートの圧縮側と引張側の挙動を定義する必要がある。圧縮側の塑性挙動は等方性で、温度によって変わる応力とひずみの骨格曲線で定義されるのに対して、引張側の挙動はコンクリートの損傷指標という形で表される。有限要素解析ソフトでは、コンクリートの損傷はひび割れの開閉という指標で定義される。これらのパラメータはひび割れ間のせん断伝達係数で定義され、開いているときは $\beta_t = 0.2$ とし、閉じているときは $\beta_c = 0.7$ とする。せん断伝達係数は、0の時にせん断伝達が無く（平滑なひび割れ）、1の時にはせん断力を完全に伝達する（表面が粗いひび割れ）。

鉄筋とPC鋼材の温度に依存する熱特性はEurocode2のものを採用し（図-7～9）、温度の違いによる応力ひずみ関係の変化もEurocode2に基づいている（図-10、11）。

4.3 荷重条件と境界条件

火災加熱を受ける中空 PCaPC スラブは、熱荷重と力学的な荷重の両方を受ける。実際の火災時の状況をシミュレーションする場合、解析はスラブへの荷重の載荷から始まる。この荷重は通常スラブの耐荷力の何パーセントという形で表される。初期の変形が安定したのち、スラブが火災加熱を受ける（温度荷重の載荷）。力学的な荷重と温度荷重の両方がスラブが破壊に至るまで載荷され続ける。スラブには、時間温度曲線に応じた温度を入力することで、あらゆるスラブへの火災状態を再現することができる。これは、標準加熱曲線（ASTM E119 や ISO834 による）や、加熱と冷却期から成る特定の火災とすることができる。

建物の一部を切り出した中空 PCaPC スラブでは、隣接するスラブの効果を考慮するために、軸方向の端面は水平方向に拘束されているとし、鉛直方向の変形に対してはフリーとする。この条件は、横方向に他のスラブがある状況を再現しており、端部のスラブよりも厳しい条件であると考えられる。このモデルではこの状況をシミュレーションすることが可能である。図 - 1 には、中空 PCaPC スラブの荷重条件と境界条件を示している。

4.4 破壊判定基準と収束条件

耐火性を評価する従来の方法は、ASTM E119 に規定されている温度と強度の限界状態に基づいたものである。したがって、中空 PC スラブの高温時の限界状態は、以下の事象が発生した時に起こるといえる。

- 火災にさらされていないスラブ表面の平均温度が9点で139℃を超えるか、あるいは一点でも181℃を超える
- PC 鋼材の温度が臨界温度（PC 鋼材では通常、強度が約半分になる 427℃）を超える

構造上の破壊は、載荷荷重を支えられなくなった時に起こる。これは、通常スラブ中央の曲げ耐力が、載荷荷重によるモーメントを下回ったときに生じる。

これらの限界状態に加えて、たわみとたわみ速度が火災を受ける梁やスラブの挙動にとって重要である。スラブや梁の破壊を定義するために適用されるたわみ基準は、実際の火災を受ける PC スラブの破壊を定義するためにも適用できる。たわみとたわみ速度は、高温での部材剛性の劣化と高温クリープのため、通常の室温状態のものより大きくなると予想される。たわみとたわみ速度の限界状態は、英国規格（BS476）で定められており、中空 PCaPC スラブの限界状態の評価にも適用できる。BS476 では、PC スラブの破壊が、スラブの最大たわみが $L/20$ (L : スラブのスパン長) を超えた時、あるいはたわみ速度が $L/9000d$ (d : スラブの有効せい) を超えた時に生じるとしている。

有限要素解析プログラムでは、ニュートン・ラフソン法により収束判定を行っている。温度解析においては、各節点での温度の変動が $0.5℃$ を超えると解が発散する可能性がある。構造解析では、力の誤差が $10%$ を超えると発散する可能性がある。

5. モデルの検証

火災加熱実験と有限要素解析で得られるデータ（温度、たわみ、破壊までの時間）を比較することによりモデルの検証を行う。この検証では、2つの中空 PCaPC スラブの発火から破壊までの実験データを使用する。火災加熱実験の温度と構造の応答値を解析のものと比較する。

5.1 スラブの仕様

検証のために選択した2つの中空 PCaPC スラブ（スラブ1とスラブ2）は、6つの中空コアと7本のストランドを有する同じ形状である（図 - 12）。スラブは長さ 4 m、幅 1.2 m、厚さ 200 mm。中空コアは直径 150 mm で底面から中空コアまでのコンクリート厚さは 25 mm である。スラブコンクリートの圧縮強度は 48 MPa で、密度は 1900 kg/m^3 。PC 鋼材は直径 9.5 mm の低リラクセーションタイプのストランドで、降伏強度は 1860 MPa。PC 鋼材のかぶり厚さは 44 mm。試験体中には数か所に熱電対を埋め込んでいるが、検証に用いたものは図 - 12 中の TC7, TC2, TC23, TC13（それぞれ、ストランド、ウェブ中央、中空コアの下部、中空コアの上部）である。表 - 1 に試験体の詳細を示す。

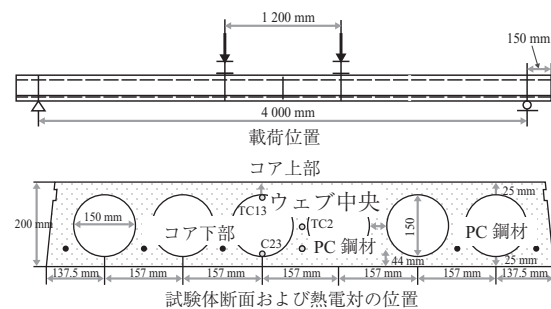


図 - 12 試験体詳細

表 - 1 試験体詳細

	スラブ1	スラブ2
寸法（長さ、幅、厚さ）	4.3 × 1.2 × 0.2 m	
中空コア直径	150 mm（6 か所）	
コンクリート圧縮強度	48 MPa（直方体）	
PC 鋼材	9.5 mm（7 本） 降伏強度 1860 MPa 低リラクセーションタイプ	
火災加熱曲線	ISO834	

火災加熱前のスラブには、単純支持の4点曲げ荷重を載荷した。この載荷では、中央部に供用時荷重の60%に相当する曲げモーメントを与えた。具体的には、中央部に 33.7 kN・m の曲げモーメントが発生するように、合計 40 kN の荷重を与えた。実験では、スラブ底面から ISO834 に規定される火災加熱を行った。この ISO834 による火災加熱曲線は、ASTM E119 のものとほぼ等しい（図 - 13）。火災加熱実験中は、温度とたわみの進展を観測した。表 - 2 に、各規準で計算したこの中空 PCaPC スラブの耐火性能値を示す。耐火性能値はコンクリートのかぶり厚さと、スラブのせいに基づく合理的な設計手法によるため、PCI, ACI216.1-07, Eurocode2 ですべて 90 分と計算された。

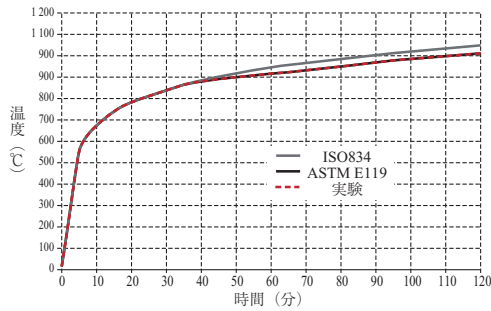


図 - 13 標準加熱曲線と実験での加熱曲線の比較

表 - 2 中空 PCaPC スラブの各破壊判定基準による耐火性能および規準との比較

破壊の判定基準	耐火性能 (分)		
	解析	スラブ 1	スラブ 2
火災を直接受けない面の温度	>120	-	-
たわみ	100	76	90
曲げ耐力	95	-	-
PC 鋼材の温度 (かぶり厚さ)	PCI	90	-
	ACI	90	-
	Eurocode2	90	-

5.2 解析の詳細

対象とする中空 PCaPC スラブは、離散化の詳細の部分で述べたとおりにモデル化した。温度と構造の連成解析を、スラブの破壊まで 5 分間隔で実施した。解析では実験と同様にスラブは火災荷重と構造荷重を同時に受ける。解析から得られる断面内の温度、たわみ、破壊までの時間の結果を検証に用いる。解析では静的荷重を与えることから始めた。静的荷重を与えて定常状態に到達したのち、ISO834 火災曲線（実験火災、図 - 13）に一致する過度温度荷重を与える。スラブは、曲げ耐力（モーメント保持能力）、たわみ、たわみ速度が許容値を超えたときに破壊するものとする。PC 鋼材の温度が限界値を超えた時も破壊と判定する。

5.3 温度の応答値

有限要素解析による温度（ストランド、ウェブ中央、中空コアの上部と下部）の予測値と実験データの比較を図 - 14 に示す。スラブ内での温度の進展は、火源に近いスラブ底面の方が温度が高く、時間がたつにつれて徐々に上昇するといった事前に予測された傾向が捉えられた。火源に近い層の温度上昇は、火源から遠いものに比べて大きい。底面から 44 mm の位置にある PC 鋼材は、火災加熱開始後 10 分間は温度の上昇が無い。スラブ内部の温度上昇の遅れは、コンクリートの高い熱容量に起因するものである。

解析モデルでは、加熱開始 10 分後から PC 鋼材の温度が線形的に上昇し、60 分で 239℃ に達し、120 分で 415℃ に達した。高い熱容量のため、コンクリートの上面とスラブの露出されていない面（中央）では温度上昇が小さく、それぞれ加熱開始後 120 分で 54℃ と 45℃ にしか達しなかった。図 - 15 に解析で得られた加熱開始後 60 分と 120 分の温度分布図を示す。

図 - 14 を詳細にみると、解析と実験の温度の推移は、

中空コアの部分を除くと良く一致している。このコア部分の相違は、中空 PCaPC スラブの製造時の特にコア部分に熱電対を正しく配置することが難しかったためだと考えられる。また実験の報告書では、火災によりかぶりコンクリートの剥離が一部生じたため、中央コアの熱電対で異常値が計測された可能性が示されている。この剥離を解析では考慮できてなかった。

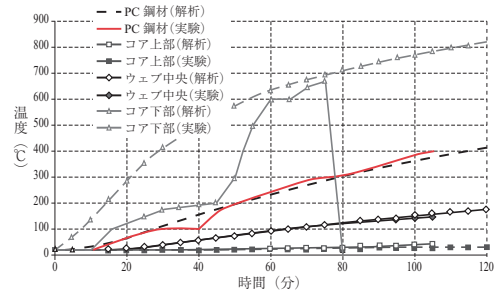


図 - 14 中空 PCaPC スラブの実験と解析での温度の比較

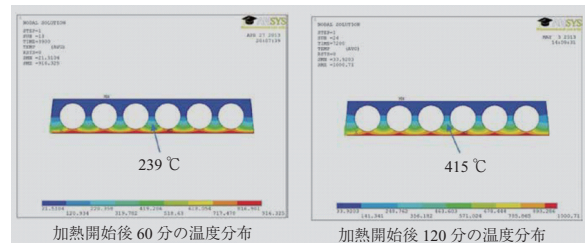


図 - 15 中空 PCaPC スラブの温度分布（解析）

5.4 構造の応答値

検証では、解析と実験のスパン中央のたわみを比較した（図 - 16）。標準大気状態では、中空 PCaPC スラブはプレストレスにより上反りが生じる。この中空 PCaPC スラブの反り量は解析では 9 mm と計算され、実験の報告と一致する。たわみは、火災加熱が始まると増加する（図 - 16）。すぐにたわみが増加するのは、コンクリートの熱膨張によるものである。中空 PCaPC スラブは底面からのみ火災加熱を受けるので、大きな熱勾配とそれによる熱ひずみはスラブ下面に発生する。主に熱ひずみにより生じるたわみはスラブ内部の温度上昇が始まる 15 分で安定する。15 分から 30 分の間、PC 鋼材および上部コンクリートの温度が 100℃ 以下であるため剛性の低下がほとんどないので、たわみの増加は小さい。30 分経過すると、コンクリートと PC 鋼材が高温のために強度と剛性が低下し、たわみが大きく増加する。火災加熱開始から 100 分後までたわみは徐々に増加し、それを超えるとスラブのたわみは急速に増加して、構造的に不安定な状態となる。図 - 16 から、解析と実験のたわみはほぼ一致しているといえる。図 - 17 に中空 PCaPC スラブの火災加熱前と加熱開始後 100 分の変形図を示す。

5.5 破壊モードと耐火性

実験ではスラブ 1 が 76 分でせん断破壊により破壊し、スラブ 2 が 90 分でたわみの制限値を超えたため破壊したと報告されている。実験で違いが生じた原因として、

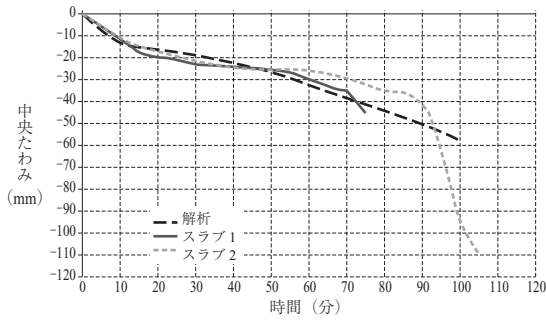


図 - 16 実験と解析での中央たわみの比較

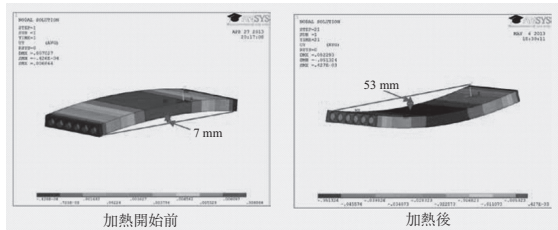


図 - 17 中空 PCaPC スラブの加熱前と加熱後の変形図 (解析)

スラブ1では早い時期にかぶりコンクリートのはく離が生じたために、より大きなたわみが発生したことが考えられる。スラブ1でせん断破壊が生じたのは、かぶりコンクリートがはく落し、鉛直方向に貫通孔が生じたためであると報告されている。一方、スラブ2ではかぶりコンクリートのはく離は生じていないが、たわみの制限値を超えたため実験を終了している。スラブ2ではく落が生じなかったのは、実験までより長い養生期間があったため、試験体の含水率が小さかったことが影響したと考えられる。

有限要素解析により得られた結果から、中空 PCaPC スラブの耐火性を通常と異なる破壊基準を用いて評価した。有限要素解析では、加熱開始後 100 分でスラブが不安定な状態となる、収束値が得られない状況が発生した。これは、高温によるコンクリートと PC 鋼材の高温による著しい剛性の低下が原因である。加熱開始後 100 分では、PC 鋼材は約 400℃に達し、コンクリートは下面で 800℃に達するためスラブは急激にたわみが増加し破壊に至る。図 - 18 は、中空 PCaPC スラブの曲げ耐力と火災加熱時間との関係を示した図である。最初の 25 分間は曲げ耐力の低下は無いが、これはコンクリートの下面温度が 400℃程度で、PC 鋼材の温度が 100℃程度のためである (図 - 14)。PC 鋼材は 100℃を超えると強度が低下するので、曲げ耐力も低下し始める。

火災加熱を受けない面の温度は、加熱開始後 120 分でも 45℃にしかならないので、120 分後でもスラブは破壊に達しないことになる。しかし、スラブの曲げ耐力の観点からみると、中空 PCaPC スラブの曲げ耐力が載荷荷重による曲げモーメントを下回る加熱開始後 95 分で破壊したと判定できる。スラブの温度が上昇することで、温度の関数である PC 鋼材の剛性と強度が低下し、破壊が

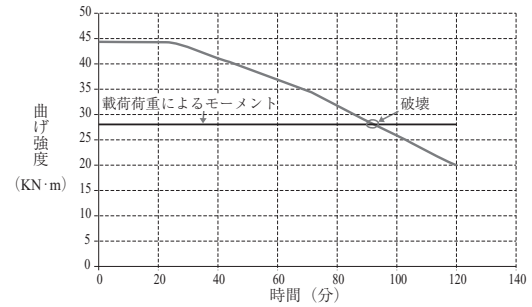


図 - 18 火災加熱開始後の中空 PCaPC スラブの曲げ耐力の推移 (解析)

生じる。このスラブの耐火性能は、PCI, ACI, Eurocode 2 の規格で、コンクリートのかぶり厚さとスラブのせいで評価され、それによると 90 分と算定される。表 - 2 は数値解析と実験、各規格による耐火性能を示したものである。

解析結果からは、通常の中空 PCaPC スラブが温度の制限値で破壊する前に、構造的に破壊することが示された。コンクリートのかぶり厚さに基づき PC 鋼材の温度上昇を規定する方法は、あるスラブの構成と他のものでは異なる可能性がある。このように中空 PCaPC スラブでの PC 鋼材の温度上昇を規定する方法は、実際の耐火性を示していない可能性がある。

6. まとめ

本報に示された結果より、以下の結論が得られた。

- ここに示した有限要素解析プログラムは、PC 中空 PCaPC スラブが火災加熱を受ける際の、温度と構造の応答を火災発生前から破壊までシミュレーションすることができた。
- 本報で示したものと同等の中空 PCaPC スラブは 95 分の耐火性能を有する。
- 中空 PCaPC スラブの耐火性能は、荷重、コンクリートのかぶり厚さ、中空コアの大きさの影響を受ける。本報に示された数値解析モデルで火災加熱を受ける中空 PCaPC スラブのパラメトリックスタディをできる可能性がある。
- 火災加熱を受ける中空 PCaPC スラブの破壊は、曲げ耐力の低下か、たわみの増加、もしくは火災加熱を受けない面の温度が制限値に達することにより生じる。これらのパラメータは、スラブ内の温度上昇と、それによって生じる PC 鋼材の強度と剛性の低下の影響を受ける。よって、実際の火災の状況 (温度 - 時間曲線) が中空 PCaPC スラブの耐火性能に大きな影響を与える。

原典

Venkatesh K. R. Kodur and Anuj M. Shakya : Modeling the response of precast, prestressed concrete hollow-core slabs exposed to fire, PCI Journal, vol.59, No.3, pp.78-94, 2014

【2015年3月31日受付】