

特集 「火災に強い都市をめざして」

火災工学実験棟の紹介

丹羽 博 則 村 岡 宏
高 橋 晃一郎 堀 長 生

Introduction to Fire Protection Laboratory

Hironori Niwa Ko Muraoka
Koichiro Takahashi Nagao Hori

Abstract

The Fire Protection Laboratory was established in 2005, and has high-performance fire testing facilities for ensuring comprehensive safety against fire for buildings and civil engineering structures. The laboratory's multipurpose fire resistance test furnace is capable of performing standard fire tests on full-scale columns, beams, slabs, walls and other elements of construction in accordance with most international test standards. It can also perform practical conditions under which construction members can be loaded vertically and horizontally during heating using a 20MN hydraulic jack. Test results have been used to develop new fireproof constructions, to advance our performance-based fire safety design techniques, to improve fire safety in deep underground spaces, etc.

概 要

大林組では、火災安全工学に資する実験設備の拡充を図り、建築・土木分野における火災安全性に関する技術開発を推進することを目的に「火災工学実験棟」を新設した。本稿では、同実験棟に新規導入した防耐火実験装置の概要および特長を紹介する。「汎用耐火炉」は、ISO834標準加熱やRABT等の急速加熱が可能な加熱装置と、20MNの大容量載荷装置を併せ持つ耐火実験装置であり、構造部材の耐火性能を実大規模で検証することが可能である。「小型壁用耐火炉」では外壁や防火区画壁、防火設備の耐火性能および延焼防止性能を検証することができ、「火災実験装置」では家具や什器、内装仕上げ材料等の燃焼性状に関する工学的データを得ることが可能である。大林組では今後これらの実験装置を活用し、火災安全技術の更なる高度化を図る所存である。

1. はじめに

大林組では、建築・土木分野における火災安全性に関する技術開発の更なる飛躍を期し、2005年に「火災工学実験棟」を建設した。同実験棟には、構造部材の耐火性能を実大規模で検証可能な耐火実験装置や、家具や内装仕上げ材などの燃焼特性を定量的に測定可能な実験装置などを導入している。

本稿では、火災工学実験棟の建設目的と新たに導入された各種実験装置の概要について紹介する。

2. 火災工学実験棟の建設目的

2000年6月に施行された改正建築基準法により、防耐火分野においても所定の要求性能を満足することを要件にした「性能設計」が導入された。これを一つの契機として、建築物を構成する各種建築材料や構造部材、構工法の防耐火性能ならびに可燃物の燃焼性を実験的に検証・評価することの重要性が増すとともに、実物件へ展開・活用する機会が増加している。

また近年の耐火実験は、構造部材に実使用状態で作用す

る荷重を与えた上で加熱を行う「載荷加熱実験」が一般的となっており、特に耐火実験ではスケール効果（試験体の熱容量等）が結果に及ぼす影響が大きいと考えられるため、実大レベルの大型試験体を加熱・載荷することが可能な大容量の耐火実験装置が求められていた。

さらに土木分野においても、トンネル内での車両事故等により発生する非常に急速かつ高温に至る火災に対する構造安全性を、実験的に検証・照査することが求められる機会が増加している。

一方、大林組は2003年に「優良企業構想」を社内外に発表し、その実現に向けて全社が一丸となって邁進している。この優良企業構想を受け、技術研究所では様々な分野において最先端で独自性の高い技術力を保有・維持することを目指し、鋭意技術開発に取り組んでいる。とりわけ近年では、地震や津波などの自然災害ならびに火災やテロなどの人為的災害に備えたハード技術や、被災前のリスク評価および被災後の事業継続計画を支援するソフト技術の開発に注力している。

以上の背景のもと、防耐火分野における実験設備の拡充を図り、技術開発のスピード化および性能設計力の強化を目指すとともに、火災安全に関する独自技術の開発を推進

することを目的として、火災工学実験棟を新設した。

3. 火災工学実験棟の概要

火災工学実験棟は、建築面積 813m²、延べ面積989m²、地上2階建ての鉄骨造建物であり、建物の1階部分にメインとなる耐火実験ヤードを配している。建物の外観および耐火実験ヤードの内観写真をPhoto 1 とPhoto 2 に示す。

耐火実験ヤードには、汎用耐火炉、小型壁用耐火炉、火災実験装置などの各種実験装置が設置されており、また2階建ての諸室には、コーンカロリー計試験機など防火材料等を対象とした材料試験装置が設置されるなど、本実験棟内に防耐火分野における実験装置が総合的に配備されている。以下では、これら実験装置の概要および特長を紹介する。

4. 汎用耐火炉

汎用耐火炉は、半地下設置方式とした加熱装置 (Photo 3, 4) と20MN荷重装置 (Photo 5) を備えた国内最大級の多目的な耐火実験装置であり、建物火災やトンネル火災を想

定した急速加熱を与えることが可能であると同時に、実構造物に作用する荷重を載荷することが可能である。本実験装置を用いることにより、今までは装置能力の制限により実施が難しかった高強度材料を使用した構造部材や実大規模の構造部材の耐火性能を確認・評価することが可能である。

4.1 加熱装置の特長

汎用耐火炉は、炉壁に設置された高出力ガスバーナーを使用して、実大規模の柱・梁・床・壁などの建築部材やトンネルセグメントなどの土木構造物 (部材) を加熱することが可能である。その昇温能力は、ISO 834標準加熱¹⁾の他に、RABT²⁾ (ドイツ) やRWS³⁾ (オランダ) などのトンネル火災を想定した急速加熱を含む、世界各国の耐火試験規格に定められた加熱曲線 (Fig. 1 参照) に基づく加熱実験が可能なものとなっている。汎用耐火炉の仕様をTable 1 に示す。

各ガスバーナーには、光学式火災検出器 (紫外線光電管) を設置して、万一の失火時にも対応できるよう常時監視を行っている。また、バーナーへ供給する空気およびガス配管に圧力スイッチを設置して、圧力異常時には電磁弁



Photo 1 火災工学実験棟の外観
External Appearance of Laboratory



Photo 2 耐火実験ヤードの内観
Inside of Laboratory



Photo 3 汎用耐火炉 (1F床レベルより俯瞰)
Multipurpose Fire Resistance Test Furnace



Photo 4 汎用耐火炉 (地下ピット内)
Multipurpose Fire Resistance Test Furnace

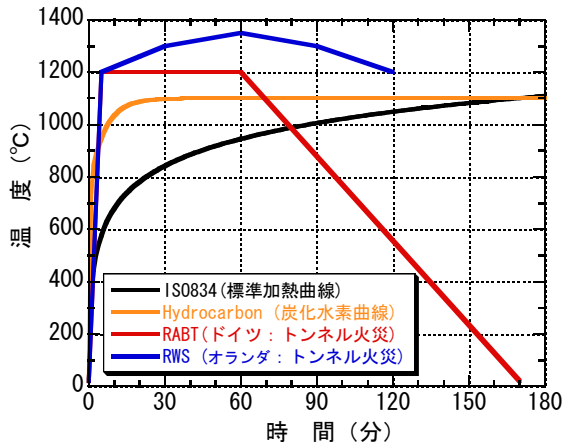


Fig. 1 建築・土木分野における加熱曲線の例
Heating Curves of Fire Resistance Test

Table 1 汎用耐火炉の仕様
Specifications of Multipurpose Test Furnace

項目	仕様
炉内寸法	W 3,200 × L 5,000 × H 4,000 mm ※炉内に仕切り材を設置して炉内容積を縮小することも可能
炉体構造	鉄骨フレーム／鋼板ケーシング構造 (炉壁上面の耐荷重は、圧縮 1,000 kN)
耐火断熱材	セラミックファイバーブロックおよび耐火キャストブルにて内張り 炉床は、耐火煉瓦・断熱煉瓦にて築造
試験体最大寸法 (有効加熱長)	柱: □-1,000 × 1,000 mm, H 4,000 mm 梁: B 700 × D 1,000, L 5,000 mm 床: W 3,200 × L 5,000 mm 壁: W 5,000 × H 4,000 mm
加熱源	ガスバーナー (燃料: 都市ガス 13A)
加熱能力	世界各国の耐火試験規格に定められた急速加熱が可能 (Fig. 1 参照)
最大発熱量	17.7 MW (15,200,000 kcal/h)
最長加熱時間	6 時間
炉内温度制御	自動制御 (上下 5 ゾーン独立制御) 手動制御も可能
炉内圧力制御	自動制御 (1 点定置)
耐熱ビデオカメラ	CCDカメラ (41万画素), 3倍電子ズーム 水冷・エアページ機構により耐熱 1,400 °C

および緊急遮断弁を作動させて燃焼を緊急停止するシステムを組み込むなど、安全管理体制にも十分配慮している。

また、従来の耐火実験装置では、加熱される試験体の状況を観察するには、炉壁に設けられた小型観察窓からの目視によるしかなかったが、本耐火炉では炉内挿入型の高温耐熱ビデオカメラを設置しており、加熱中を通じて継続的かつ安全に試験体の状況変化をデジタル録画することが可能である。



Photo 5 20MN 載荷装置
Loading Apparatus (Loading Capacity: 20MN)



Photo 6 計測室
Control and Measurement Room

なお、これら汎用耐火炉の運転制御や耐熱カメラのモニター、ならびに後述する載荷装置の加力制御や試験体の温度・変位データの測定については、耐火実験ヤードに面した計測室 (Photo 6) 内にて遠隔操作および一元管理を行うことが可能である。

4.2 載荷装置の特長

汎用耐火炉には、国内で最大級となる 20MN (2,000tf) の圧縮軸力が載荷可能な加力装置を併設しており、実大規模の構造部材や高強度材料を使用した部材を対象とした載荷加熱実験を行うことが可能である。

試験体は、汎用耐火炉の底部に設けた幅 1.4m × 長さ 5.0m の試験体固定床を利用して、試験体脚部を直接または球座

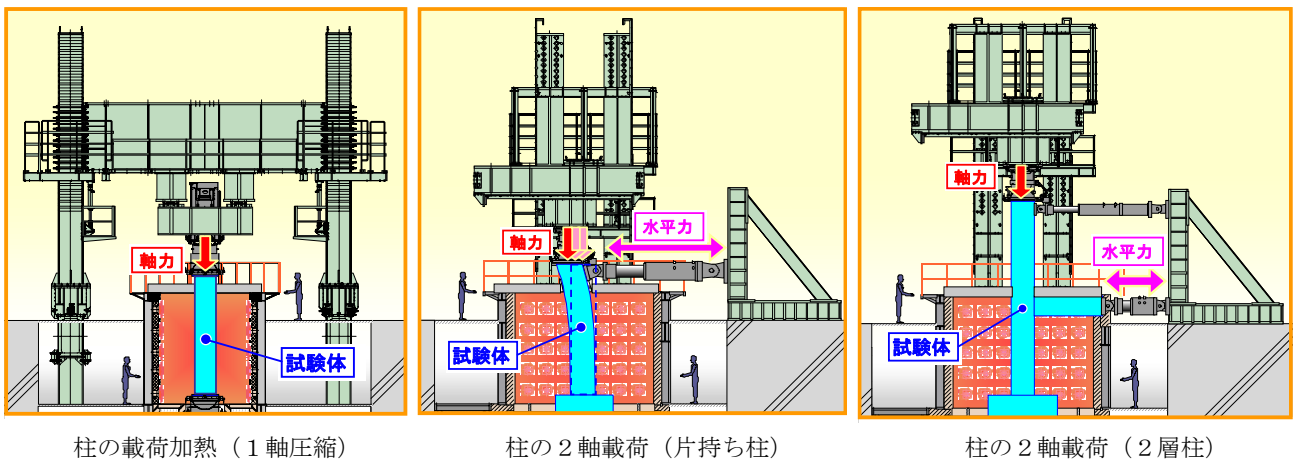


Fig. 2 汎用耐火炉による柱部材の荷重加熱実験の概念図
Example of Fire Resistance Test for Column

を介して緊結・固定することが可能であり、また炉壁頂部でも試験体を直接支持することが可能となっている。20MN油圧ジャッキを支持する上部反力ビームは、垂直方向に4m昇降可能であり、最長で7.5mの試験体に軸力を載荷することが可能である。なお、本載荷装置は、加熱を行わない常温下での構造実験用の加力装置としても使用可能である。

また、実験準備等の作業性にも配慮し、加力フレームの地上部分は、耐火実験ヤードの1階床面上に配された鋼製レール上を6m水平移動して炉外にて待避できるようになっており、試験体のセッティング時における揚重作業等の合理化を図っている。

さらに、本載荷装置の周囲に配された耐火実験ヤードの反力床を利用して、鉛直力と同時に水平力を与える2軸載荷が可能であり、火災時における実際の建造物の状況を再現した荷重加熱実験を行うことが可能である。この2軸載荷に対応するため、20MN油圧ジャッキは反力ビーム下で直動ベアリングにより支持されており、試験体に20MNの軸力を与えた状態で最大±500mmの水平変形を与えることが可能である。汎用耐火炉による柱部材の荷重加熱実験の例をFig. 2に、また梁試験体を対象とした荷重加熱実験の例をFig. 3に示す。

20MN加力用の油圧装置には、最大圧力70MPa、定格出力15kWのインバータモーター駆動油圧ポンプを2基搭載しており、稼働台数の選択・制御を行うことにより、幅広い油吐出量制御が可能である。また、試験体の熱膨張や収縮変形に伴う負荷の変動に対して、油圧シリンダ内で自重バランスをとる回路を組み込んでいるため、従来の加力装置に比べて低荷重領域における荷重制御精度の向上が図られている。

なお、載荷軸力が小さい試験体に対しては、別途2MN鉛直載荷用ジャッキを設置することにより、高精度な荷重制御を維持することを可能としており、その際にも20MN油圧システムを兼用できるように配慮されている。

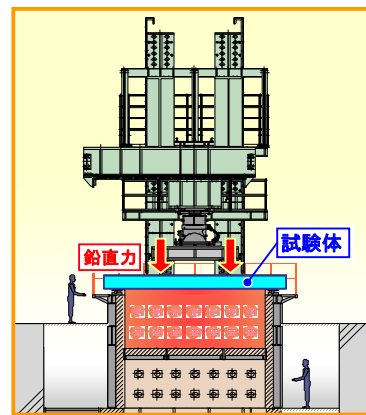


Fig. 3 汎用耐火炉による梁の荷重加熱実験の概念図
Example of Fire Resistance Test for Girder

その他の実験バリエーションとして、汎用耐火炉の上に別途、加力フレームや油圧ジャッキを設置して加力することも可能であり、様々な加力形式の実験に対応することが可能である。

4.3 耐火実験の事例紹介

本節では、合成スラブ試験体を対象として実施した、汎用耐火炉による荷重加熱実験の事例を紹介する。

4.3.1 試験体 試験体は、溝広タイプのデッキプレート（板厚1.2mm、デッキ高さ75mm）を用いた2スパン連続支持の合成スラブである。本スラブには、鋼繊維補強コンクリートを使用し、通常の合成スラブで必要となる溶接金網は省略している。試験体の寸法は、幅1,800、長さ5,150mmであり、デッキ山上のコンクリート厚さは80mmとした。コンクリートの設計基準強度は21 N/mm²、デッキプレートの鋼種はSDP1Tとし、デッキプレートの下面には耐火被覆を施していない。

4.3.2 載荷条件 本実験では、汎用耐火炉の上部に別途製作した加力フレームを設置して試験体を加力した。試

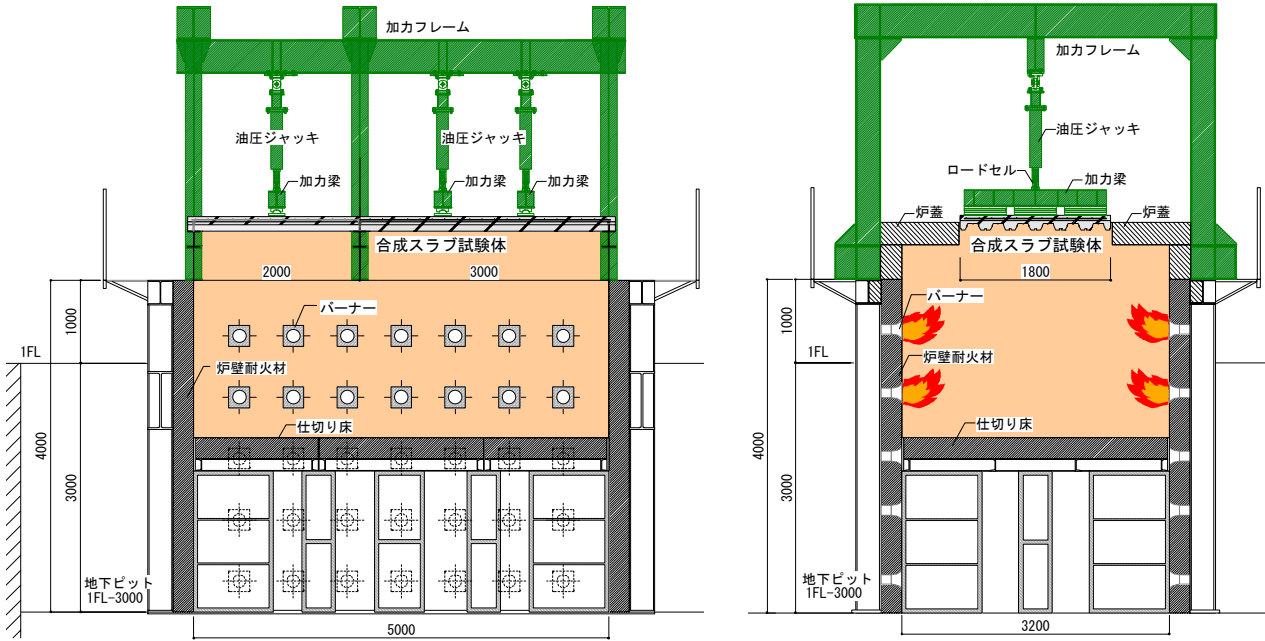


Fig. 4 汎用耐火炉による合成スラブの荷重加熱実験
Setup of Fire Resistance Test for Steel-Deck Concrete Composite Slab

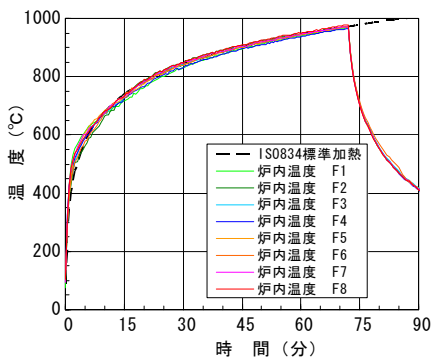


Fig. 5 炉内温度の測定結果
Heating Temperature

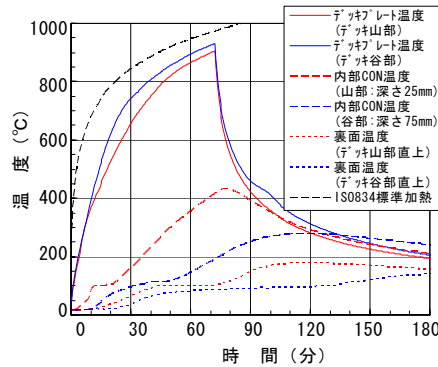


Fig. 6 試験体各部の温度測定結果
Temperature of Specimen

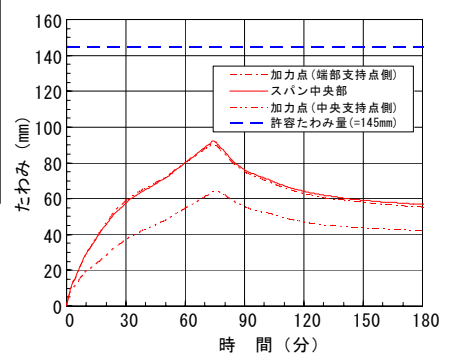


Fig. 7 たわみ測定結果
Vertical Displacement

験体のセット状況をFig. 4に示す。支持条件は、試験体の両端部および中央部で3点支持(3.0m+2.0mの不均衡2スパン連続支持)とし、油圧ジャッキにより長期設計荷重に相当する鉛直荷重を与え、実験中は一定荷重を保持するものとした。なお、ジャッキの荷重は、試験体の中央支持梁上に生じる負曲げモーメントの大きさが、均等スパン(3.0m×2スパン)で支持された場合と等しくなるよう調整し、試験体のスパン3.0m側の区間を評価対象範囲とした。

4.3.3 加熱条件 加熱条件は、ISO834標準加熱温度曲線 (Fig. 5参照) に従うものとし、1時間耐火の性能確認を目的として、要求耐火時間の1.2倍の時間 (=72分) 荷重加熱を行った。なお、汎用耐火炉の内部には仕切り床を設置し、炉内の容積を縮小した状態で上部2段のバーナーのみを使用して加熱制御を行った。

4.3.4 測定項目 測定項目は、炉内温度および合成スラブ試験体のデッキプレート温度、裏面温度(スラブ上面



Photo 7 合成スラブの荷重加熱実験の状況
Heating State of Slab Specimen



Photo 8 小型壁用耐火炉
Wall Test Furnace

側の表面温度), 内部コンクリート温度ならびに試験体のたわみ変形量とした。

4.3.5 実験結果 炉内温度の測定結果を Fig. 5に示す。炉内温度は、ISO834標準加熱曲線とほぼ一致しており、加熱温度の制御は良好に行われた。試験体各部の温度は、Fig. 6に示すように、加熱表面から裏面側へ向かうに従って低くなっている。コンクリート温度は、含有水の蒸発潜熱の影響により100℃で温度上昇が一旦停滞しており、その停滞時間は加熱表面からコンクリート内部に向かうに従って長くなる傾向を示している。スラブ表面より水蒸気が放散されている状況をPhoto 7に示す。裏面温度は、コンクリート厚が薄いデッキ山部の直上部の方がデッキ谷部直上よりも高い傾向を示しているが、両者ともに耐火試験における許容値(平均160℃, 最高200℃)を下回っている。

試験体のたわみ変形は、Fig. 7に示す通り、加熱の開始とともに増大する傾向を示している。スパン中央部および端部側の加力点における変形量が最も大きいが、加熱終了時においても耐火試験における許容値145mm ($=L^2/400d$, L :スパン長, d :スラブ厚)を十分に下回っている。

以上の実験結果より、本合成スラブは非損傷性(荷重支持能力)および遮熱性ともに、1時間の耐火性能を有していることが確認された。

5. 小型壁用耐火炉

小型壁用耐火炉(Photo 8)は、小型の平板状試験体を加熱することを主目的とした耐火実験装置であり、外壁(カーテンウォール)や防火区画壁、防火設備(防火戸・スチールシャッター・クロススクリーン・耐火ガラス)などの耐火性能ならびに延焼防止性能を検証することが可能である。小型壁用耐火炉の仕様をTable 2に、また本炉を用い

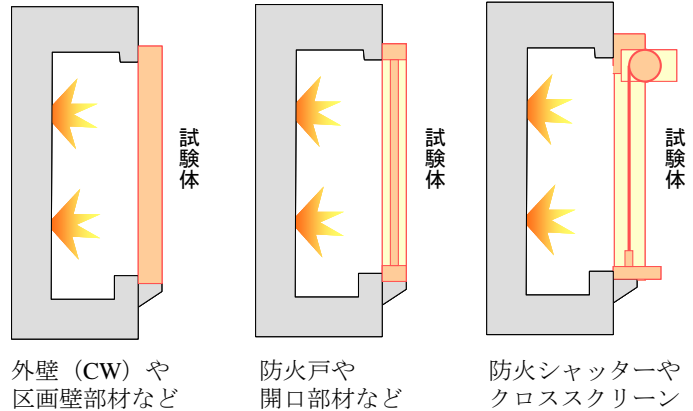


Fig. 8 小型壁用耐火炉による実験概念図
Example of Fire Test for Walls
and Fire Preventive Equipments

Table 2 小型壁用耐火炉の仕様
Specifications of Wall Test Furnace

項目	仕様
炉内寸法	W 1,500 × H 1,500 mm
炉体構造	鉄骨フレーム/鋼板ケーシング構造
耐火断熱材	セラミックファイバーブロックおよび耐火キャストブルにて内張り 炉床は、耐火煉瓦・断熱煉瓦にて築造
試験体最大寸法 (有効加熱長)	壁・防火設備などの平板状試験体 W 1,500 × H 1,500 mm
加熱源	ガスバーナー (燃料: 都市ガス 13A)
加熱能力	世界各国の耐火試験規格に定められた 急速加熱が可能 (Fig. 1 参照)
最大発熱量	1.2 MW (1,000,000 kcal/h)
最長加熱時間	3時間
炉内温度制御	自動制御 (上下2ゾーン独立制御) 手動制御も可能
炉内圧力制御	自動制御 (1点定置)

た実験概念図をFig. 8 に示す。

加熱は、炉内に据え付けられた4台のガスバーナーで行ない、その昇温能力は汎用耐火炉と同じく、ISO 834標準加熱の他にRABT(ドイツ)やRWS(オランダ)などのトンネル火災を想定した急速加熱も可能なものとなっている。加熱を受ける試験体の状況は、炉の側壁に設けられた観察窓より目視観察することが可能である。

本炉は小型であるが故に、これに用いる試験体も小型かつ経済的に済み、実大試験体による実験へ進む前の予備実験に適したものとなっている。

6. 火災実験装置

火災実験装置(Photo 9)は、集煙フードの下で家具や什



[ロールスクリーン全開時]



[ロールスクリーン半閉時]

Photo 9 火災実験装置
Combustion Test Apparatus

Table 3 火災実験装置の仕様
Specifications of Combustion Test Apparatus

項目	仕様
集煙フード寸法	W 4,000 × L 4,000 × H 3,500 mm ※四周のロールスクリーンを下ろすことにより、集煙容積を調節可能
ガス分析計	O ₂ 測定レンジ 0~25%, 16~21% (2レンジ) CO 測定レンジ 0~2% CO ₂ 測定レンジ 0~10%
測定可能発熱速度	最大 3 MW
試験体の重量測定	最大秤量 200 kg
計測用ダクト	φ 600 × 10,000 mm
排気風量	インバータ制御で無段階に調節可能
風量測定	定置式複合ピトー管センサー

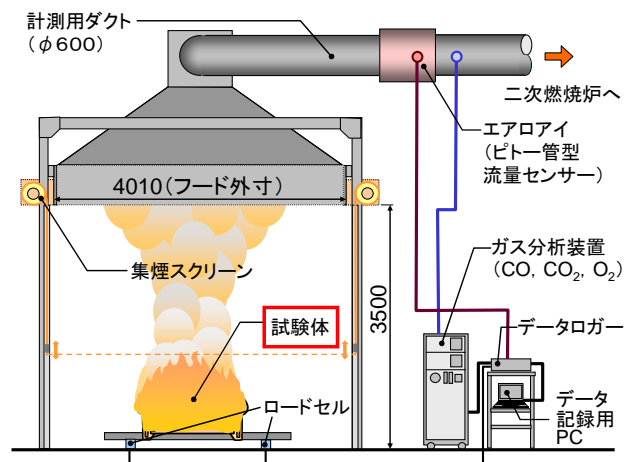


Fig. 9 火災実験装置による実験概念図
Fire Test and Measurement System

器、内装仕上げ材等の各種可燃物を燃焼させ、燃焼生成ガス中のO₂、CO、CO₂濃度およびガス流量を測定するものである。これらのデータに基づき、酸素消費法を用いて試験体の発熱速度や総発熱量を算出することにより、可燃物の燃焼性状を工学的なデータとして把握・検証することが可能である。また、試験体をロードセル上で燃焼させることにより、重量減少率から発熱速度を換算することも可能である。火災実験装置の仕様をTable 3に、本装置を用いた実験概念図をFig. 9に示す。

また、火災実験装置の集煙フード上部の四周には、シリカクロス製ロールスクリーンを設置しており、スクリーン高さを調節することにより、試験体の燃焼ガス発生量に応じた集煙容積を確保することが可能となっている。

なお、排気ガスは、屋外に設置された二次燃焼炉によっ

て再燃焼（約800℃）させ、煤煙等を除去した後に大気中に排出するなど、環境に配慮した設備も併せ備えている。

7. コーンカロリー計試験機

コーンカロリー計試験機 (Photo 10) は、材料の燃焼性状を評価するための試験方法・装置の世界標準 (ISO 5660) であり、当社では国内建設業界の先駆けとなり1996年に導入している。今般の火災工学実験棟の完成に伴い、防耐火分野にかかわる各種実験装置を集約し、火災安全に関する実験研究を総合的に推進するため、既設のコーンカロリー計試験機やISO基材加熱炉等を本実験棟内に移設している。コーンカロリー計試験機の仕様をTable 4に示す。コーンカロリー計試験機では、100mm角の小さな平板状



Photo 10 コーンカロリー計試験機
Cone Calorimeter

に切り出した試験体の一面に、円錐（コーン）型の電気ヒーターで一定の輻射熱を与えることにより、スパーク式着火装置（外部着火源）による着火の有無および着火後の発熱速度や総発熱量、煙濃度、CO、CO₂発生量の経時変化など、材料の燃焼性状に関する様々な工学的データを得ることができる。得られたデータは、建築材料の防火性能評価（不燃材料、準不燃材料、難燃材料）や防災計画、性能設計のための基礎データとして幅広く利用されている。

8. まとめ

大林組では、火災工学実験棟に新設された最新の実験装置を活用することにより、建築・土木分野における火災安全技術の更なる高度化を図り、火災に強い建築物の構築ならびに人々が安全に安心して生活できる社会の創出に貢献できるよう、技術開発業務に鋭意取り組んでゆく所存である。

Table 4 コーンカロリー計試験機の仕様
Specifications of Cone Calorimeter

項目	仕様
試験・装置規格	ISO 5660, ASTM E 1354, NFPA 264A
コーンヒーター	外部加熱強度範囲：0～100 kW/m ² (連続可変) 試験方法：水平加熱・垂直加熱が可能
試験体寸法	幅 100 × 長さ 100 mm 試験体厚さは最大 50 mmまで可能
測定可能発熱速度	最大約 5,000 kW/m ²
ガス分析計	O ₂ 測定レンジ 0～25% (再現性100ppm以下) CO 測定レンジ 0～1% (再現性±2%/FS) CO ₂ 測定レンジ 0～10% (再現性±2%/FS)
煙濃度測定	光源：1.0 mW He-Neレーザー (632.8nm) ノイズ：≦0.5% (30Hz～30MHz)
質量減少測定	測定器：ロードセル 分解能：0.1 g 最大秤量：1.0 kg
測定・演算項目	着火時間、発熱速度(最高・平均) 発熱量、有効減光面積、質量減少率など

参考文献

- 1) ISO 834-1: Fire-resistance tests -- Elements of building construction -- Part 1: General requirements, (1999)
- 2) ZTV-TUNNEL, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien fuer den Bau von Strassentunneln, Teil 1: Geschlossene Bauweise (Spritzbetonbauweise), (1995)
- 3) C. Both, P. van de Haar, TNO Center for Fire Reserch, G. Tan & G. Wolsink, Ministry of Public Works, The Netherlands: Evaluation of Passive Fire Protection Measures for Concrete Tunnel Lining.