

論文 耐火コンクリートを用いたプレキャストセグメントの実験的諸検討

本田 智昭^{*1}・古市 耕輔^{*1}・鈴木 義信^{*2}・佐久間 靖^{*3}

要旨：有機繊維補強コンクリートを用いたプレキャストセグメントの耐火性能を確認するため、複数の実大供試体を用いて RABT 曲線による耐火試験や、残存耐力を把握するための曲げ試験を行った。その結果、加熱による損傷状況や加熱面からの距離による温度履歴の確認、および耐火試験後の残存耐力の評価が可能であることを確認した。

キーワード：耐火コンクリート，耐火試験，プレキャストコンクリート，セグメント

1. はじめに

近年、二次覆工を省略した RC 製シールドセグメントにおいて、工期短縮・コスト削減を目的として、耐火性能を付与する検討がなされている。この評価に用いられる加熱曲線は、建築部材の耐火試験で用いられている ISO834 の標準加熱曲線ではなく、より厳しいドイツの「道路トンネルの設備と運用に関する指針(RABT)」に定められる加熱曲線(以下、RABT 曲線)によることが多い¹⁾。

一般的に高強度のコンクリートそのものの耐火性能を向上させるには、有機系短繊維が効果的であるとされている²⁾。しかし、耐火性能は短繊維の添加率や種類以外にも、コンクリートの圧縮強度や、コンクリートの含水率、また使用骨材の種類等によっても、大きく影響を受けるため、統一された性能評価は出来ておらず、実験的な検討を積み重ねざるを得ない状況である。

今回、筆者らは既に剥落防止用として実績のあるポリプロピレン繊維を、シールドセグメントの耐火性能向上のために用いることを検討した。ポリプロピレン短繊維を混入したコンクリ

ートを用いて、実大シールドセグメントを模擬した一般部および継手部の試験体を製作し、加熱による温度上昇や爆裂の有無、埋込物への影響、および加熱後の残存耐力を確認した。また、一般部については、加熱後に補修を行った試験体についても耐火試験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1, 2 に使用材料と配合表を示す。この配合は、設計基準強度 54N/mm^2 とし、本試験に先行して実施した予備試験および要素試験の結果から決定した。有機繊維は、繊維径 $64\mu\text{m}$ 、長

表-1 使用材料

使用材料	種類	摘要
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm^3
混和材	高炉スラグ微粉末	比表面積 $4000\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	砕砂	密度 $=2.63$, 粗粒率 $=2.71$ 吸水率 $=1.13\%$
粗骨材	碎石	密度 $=2.68$, 粗粒率 $=6.72$ 吸水率 $=0.79\%$
混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物
繊維	ポリプロピレン繊維	繊維径 $64\mu\text{m}$, 長さ 12mm

表-2 配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m^3)						
					水 W	セメント C	スラグ Sg	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	有機繊維 PP
20	3 ± 1.5	1.5 ± 1.5	34	46	152	223	223	827	989	2.9	1.82

*1 鹿島建設(株) 技術研究所土木構造・材料グループ 工修 (正会員)

*2 鹿島建設(株) 土木設計本部プロジェクト設計部

*3 ジオスター(株) セグメント営業部

さ 12mm のポリプロピレン繊維を使用した。養生条件は、実セグメントに合わせ、40℃8時間の蒸気養生後、徐冷して21時間後に脱型し、7日間水中養生を行った。その後、気中にて養生した試験前の含水率は約4.5%であった。

また補修材には、耐火性が確認されているアルミナセメント系補修材を用いた。

耐火試験時の試験体の材齢は28日とした。なお、2回目の加熱は約90日、補修後耐火試験は、補修材を施工してから約28日後に試験を実施した。

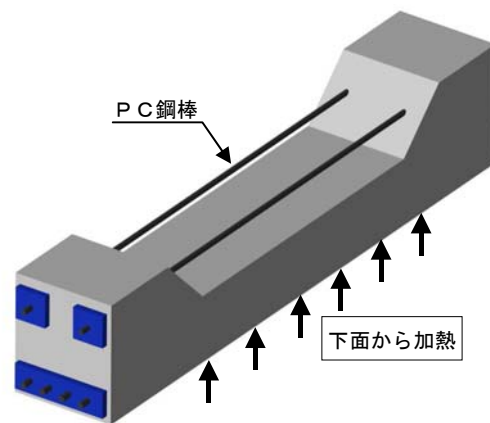


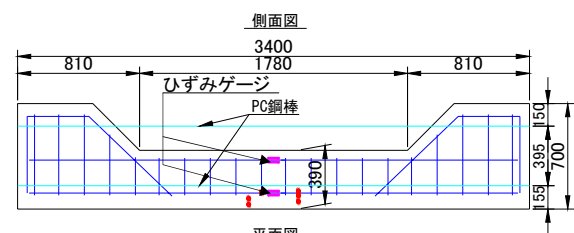
図-1 PC鋼材配置

2.2 試験水準および試験体

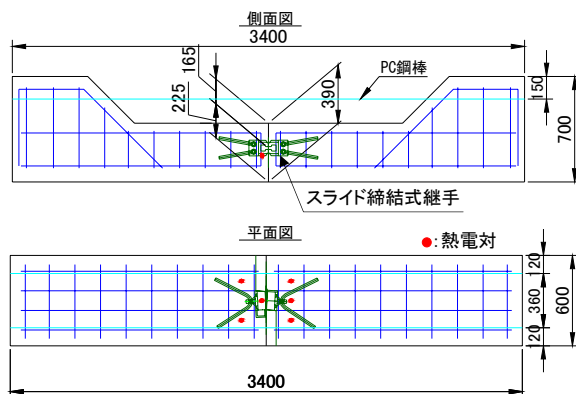
表-3に試験水準を、図-1および図-2にPC緊張材の配置状況および試験体の形状図を示す。

試験の対象部分は3水準とし、NC-1~4およびNT-1はセグメントの一般部、JT-1は継手部、JD-1はシール部および埋込物付近とした。

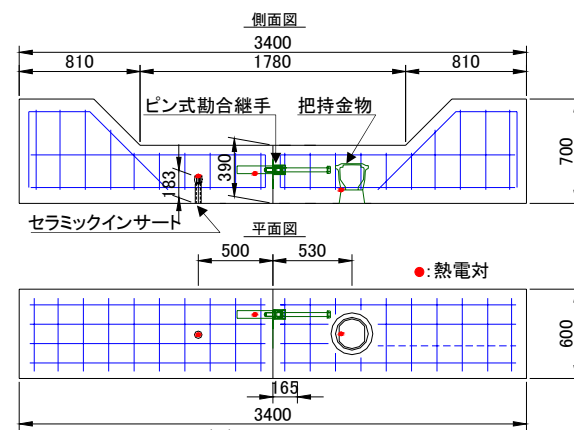
NC-1~4は、トンネルのスプリングライン付近を想定し、試験体下段に4本配置したPC鋼棒により加熱面側に設計上の許容曲げ応力



(a) NC-1~4, NT-1



(b) JT-1



(c) JD-1

図-2 試験体形状

表-3 試験水準

No.	ケース名	対象	目的	応力状態 (加熱側の応力)	試験内容
1	NC-1	一般部	・負曲げ作用時の耐火性能の確認 ・加熱後の残存耐力の確認	負曲げ (曲げ圧縮)	PC導入→加熱→曲げ载荷
2	NC-2	一般部	・負曲げ作用時の耐火性能の確認	負曲げ (曲げ圧縮)	PC導入→加熱
3	NC-3	一般部	・負曲げ作用時の2回の加熱への性能確認	外力無し	加熱→加熱→曲げ载荷
4	NC-4	一般部	・かぶり60mm(他の試験体は80mm)の場合での、負曲げ作用時の耐火性能の確認	負曲げ (曲げ圧縮)	PC導入→加熱
5	NT-1	一般部	・正曲げ作用時の耐火性能の確認 ・補修材の耐火性能の確認	正曲げ (曲げ引張)	PC導入→加熱→補修→加熱
6	JT-1	継手部	・継手部の正曲げ作用時の耐火性能の確認 ・加熱後の残存耐力の確認	正曲げ (曲げ引張)	PC導入→加熱
7	JD-1	シール部	・リング継手、把持金物、セラミックインサート等による耐火性能への影響の確認	外力無し	目開き量調整→加熱

18N/mm²を作用させた。NT-1 はトンネルのクラウン部を想定し、試験体上段に 2 本配置した PC 鋼棒により、設計上、許容ひび割れ幅が発生する時の主筋の応力 120N/mm²を作用させた。また JT-1 は継手部を想定し、試験体上段に配置した PC 鋼棒 2 本により、継手金物のアンカー筋の引張応力度に達するよう緊張力を導入した。JD-1 は、シール部および埋込物の影響を把握する目的で、図-2 に示すように把持金物、セラミックインサート、ピン式嵌合継手を試験体に埋設した。なお、耐火試験時は、供用時で最も厳しい状態を想定し、継手下縁の開きが 3mm となるよう治具で固定した状態にした。

試験体の形状は、実セグメントを模擬し、桁幅 600×桁高 390mm の RC 構造とした。主筋は D25-SD345 を 4 本、配力筋は D13-SD345 を約 170mm 間隔で配置した。加熱側の最小鉄筋かぶりは、かぶりによる影響を確認する目的で、NC-4 のみ 60mm とし、それ以外は全て 80mm とした。

2.3 試験方法および計測項目

(1) 耐火試験

耐火実験は、耐火炉(内空断面 3 m×3 m×3m)の天井に試験体を設置し、RABT 曲線(図-3)に準じた加熱を行った。

図-4 および表-4 に、JD-1 以外のケースにおける計測位置および項目を示す。ケース JD-1 に

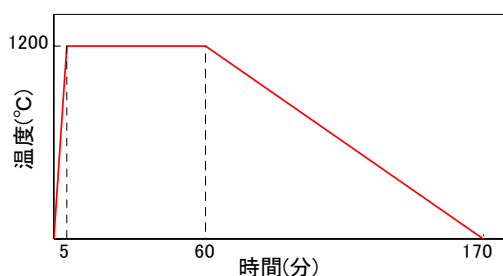


図-3 RABT 曲線

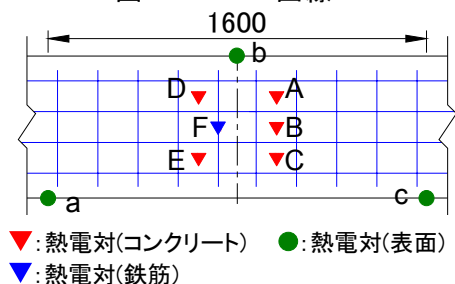


図-4 計測位置(試験体平面図)

については、図-2 に示した各埋込物の位置やシール溝の位置で温度を計測した。

(2) 加熱後供試体の曲げ耐力確認実験

耐火試験後の NC-1, NC-3 の試験体を用いて、残存耐力を確認する目的で、加熱面を圧縮側とした 2 点荷重試験を実施した。

図-5 に荷重条件および計測位置を示す。試験体中央および荷重点での変位に加え、試験体側面のコンクリートひずみを試験体の厚さ方向に裏表 5 点ずつ計測し、ひずみ分布を計測した。

3. 試験結果

3.1 耐火試験結果

(1) 各試験体の損傷状況

表-5 に耐火試験後の損傷状況一覧を、写真-1 に例として NC-1 の耐火試験後の写真を示す。各ケースともに爆裂は発生せず、NT-1 の補修後

表-4 計測項目

計測項目	使用機器	計測位置 (加熱面からの距離)
試験体表面温度		a,b,c 0mm
コンクリート温度	K熱電対	A 30mm
		B 50mm
		C 70mm
		D 90mm
		E 110mm
鉄筋温度		F 加熱面側主筋位置

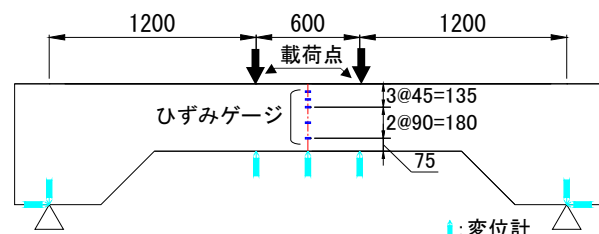


図-5 曲げ試験荷重条件・計測位置

表-5 損傷状況(耐火試験)

ケース名	爆裂状況	ポップアウトの最大深さ
負曲げ	NC-1	4.9mm
	NC-2	3.65mm
	NC-3 (1回目)	2.90mm
	NC-3 (2回目)	2.30mm
	NC-4	3.70mm
正曲げ	NT-1	4.20mm
継手部	JT-1	5.45mm
シール部	JD-1	14.35mm
補修	NT-1 (補修後)	爆裂, ポップアウト共に無し

のケース以外では2～15mm程度のポップアウトが発生したのみであった。NT-1の補修後のケースでは、補修材表面にひび割れが生じた以外の変化は見られなかった。

(2) 負曲げ状態と正曲げ状態の比較

図-6にNC-1、図-7にNT-1の温度と時間の関係を示す。NC-1(負曲げ)に比べ、NT-1(正曲げ)は、加熱面から30mmの位置では最高温度が約120℃高くなっているが(図中の表参照)、加熱面から50mm以上の位置ではほとんど変わらなかった。これについては、NT-1は、加熱面にひび割れを発生させた状態で試験を行っている影響と考えられる。

一般的に圧縮を受けたコンクリートは爆裂しやすいと言われているが、今回の試験では、負曲げ、正曲げで損傷状況は特に変わらなかった。

(3) 2回の加熱による影響(NC-3)

NC-3の1回目と2回目の耐火試験では、共に深さ約2.5mm程度のポップアウトが発生した。

それぞれの深さごとの最高温度については、ほとんど変わらないが、または2回目の耐火試験の方が低くなる傾向となった。これは、1回目の耐火試験により、加熱側表層のコンクリートがポーラスで乾燥した状態となり、断熱性が向上したためと考えられる。

(4) かぶりの違いによる影響(NC-4)

図-8にNC-4の温度と時間の関係を示す。NC-1と比較すると、鉄筋の位置が20mm加熱面に近いたため、鉄筋位置における最高温度が約50℃高くなったが、コンクリートについては、有意な差はほとんど無く、鉄筋による内部への熱伝導の影響は見られなかった。

(5) 継手部および埋込物の影響(JT-1,JD-1)

表-6にJT-1およびJD-1の耐火試験中の各位置での最高温度を示す。

リング間継手を模擬したJT-1については、深さごとの温度分布については、継手の無いNC-1～4やNT-1とほとんど変わらなかった。

またJT-1およびJD-1において、各継手物や把持金物等の埋込物、および継手部のシール溝で



写真-1 試験終了後(NC-1)

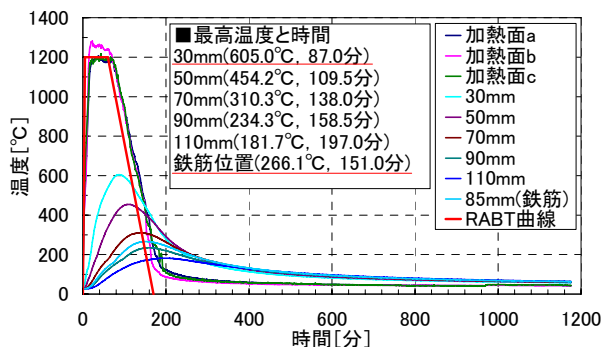


図-6 温度と時間の関係(NC-1)

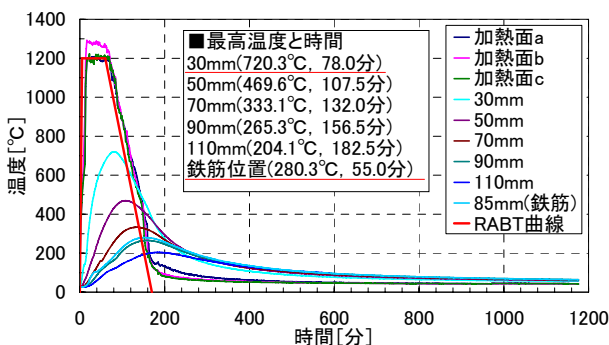


図-7 温度と時間の関係(NT-1)

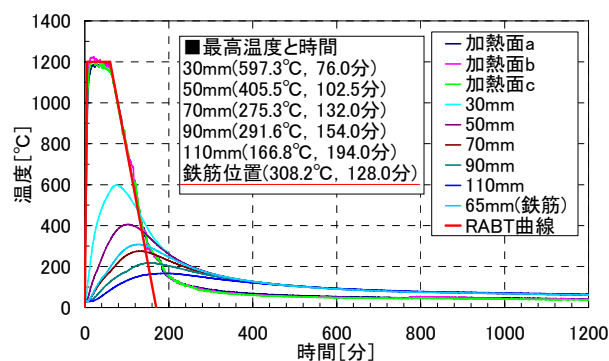


図-8 温度と時間の関係(NC-4)

表-6 各位置での最高温度(JT-1, JD-1)

JT-1		JD-1	
位置	最高温度	位置	最高温度
30mm	675.8℃	下段シール溝	143.9℃
50mm	433.8℃	上段シール溝	97.3℃
70mm	308.9℃	把持金物	133.6℃
90mm	236.5℃	継手部	98.7℃
110mm	188.3℃	セラミック	115.5℃
継手部	124.5℃	インサート	

の温度については、90～150℃となった。構造用鋼材のSS400やSM490は、既往の研究³⁾で300℃程度までは明瞭な降伏点が認められ、降伏強度は300℃で約30%、600℃で約60%低下すると言われている。また600℃程度までであれば、一度加熱を受けても、その後冷却すれば、降伏強度、引張強度ともにほとんど低下しないとされている。これに対して、今回の実験結果は、十分に低い温度であり、特に問題無いと考えられる。

(6) 補修後の耐火性能(NT-1)

図-9に温度と時間の関係、写真-2に耐火試験終了後の加熱面表面の状態を示す。補修材と既設部材との界面にあたる深さ45mmの位置において、最高温度は267.0℃となっており、NC-1～4やNT-1での深さ50mmでの最高温度(約400～530℃)に比べて、低くなっていた。また損傷状況は、表面に最大で幅2.0mmのひび割れが発生したが、既存部材との一体化も問題ないことを確認した。

3.2 曲げ試験結果

(1) 結果概要

図-10にNC-1を用いた耐火試験後の曲げ試験結果から、試験体中央における作用曲げモーメントと鉛直変位の関係を示す。

試験体は、耐火試験により载荷前から圧縮側(加熱面側)に多数のひび割れが発生していた。曲げモーメント40kNm付近で変位の増加勾配が変化しているが、目視では新たなひび割れの発生等は見られなかった。载荷初期の段階から、試験体からミシミシと音がしており、内部ひび割れが伸展した影響と考えられる。その後、鉄筋の降伏により曲げモーメント185kNm付近で変位の増加勾配が更に大きく変化し、曲げモーメント250kNm付近で試験体上縁のコンクリートが剥離し始め、コンクリートの曲げひび割れが拡大した。曲げモーメント281kNmまで载荷した時点で試験機の制限により除荷した。

(2) ひずみ分布

図-11に試験体中央における、コンクリート側面のひずみと、主鉄筋のひずみの分布を示す。

図中に示した「既存断面の中立軸位置」は、試験体の桁高390mmに対してRC構造として算出した中立軸位置である。実験結果のひずみ分布から得られた中立軸の位置は、「既存断面の中立軸位置」に比べ、約40mm下がっていた。実験結果から得られた中立軸の位置から、構造部材

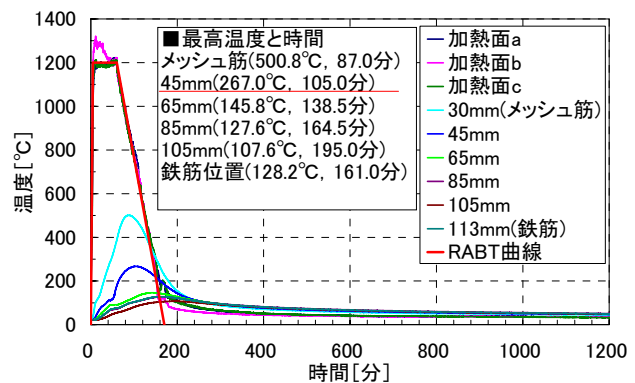


図-9 温度と時間の関係(NT-1 補修後)



写真-2 試験終了後(NT-1 補修後)

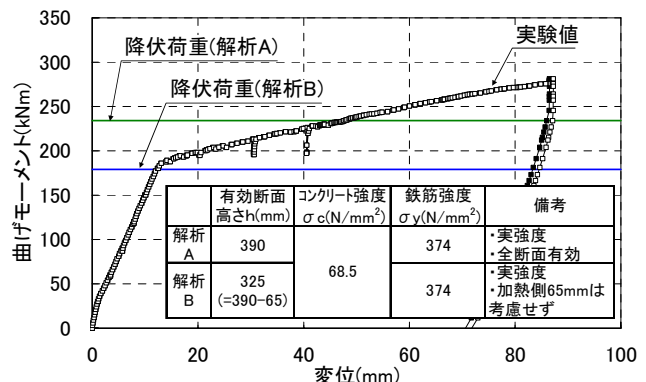


図-10 曲げ試験結果よりM- δ 関係(NC-1)

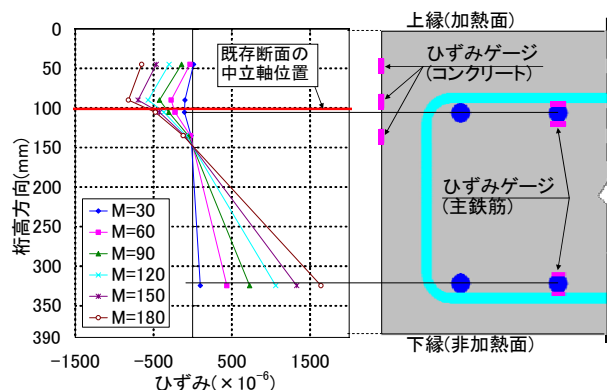


図-11 ひずみ分布(NC-1)

として有効な桁高を計算すると、約 325mm となる。これは、熱を受けた圧縮側のコンクリートが構造部材として機能しないためと考えられる。

図-12 に耐火試験結果から NC-1~4, NT-1 について、コンクリート温度と加熱面からの距離の関係を示す。土木学会「コンクリート構造物の耐火設計の手順と方法(案)」³⁾では、コンクリートの許容温度を 250~380℃としている。今回の試験結果で、380℃に達していたのは、約 50~70mm となっており、上述の桁高を 325mm とする仮定とおおよそ一致した。

(3) 耐力の評価(解析値との比較)

図-10 に実験値との比較のために行ったファイバーモデルによる解析結果とその条件を示す。

解析 A は、テストピースにより確認した耐火試験前のコンクリート強度と鉄筋の強度を用い、有効断面高さを 390mm(全断面)とした。

解析 B では上述の実験結果を受けて有効断面高さを 325mm とした。本来、熱を受けた断面は、その温度と時間に応じて、圧縮強度およびヤング係数が低下するため、単純に構造部材として有効な部分と有効でない部分に分けることは難しい。そこで、ここでは設計および耐力の評価の一手法として、加熱面から 65mm(390-325mm)は、構造部材として考慮しないこととした。

実験と解析 A の耐力(降伏荷重)を比較すると、加熱の影響により降伏荷重は約 20%低下したことがわかった。解析 B は、実験とほぼ一致する結果となった。

また NC-3 の計 2 回の耐火試験後にも曲げ耐力試験を行ったが、NC-1 に比べて耐力の低下は見られなかった。

4. まとめ

剥落防止用のポリプロピレン繊維を混入した高強度コンクリートを対象とし、耐火性能について検討した結果、下記の点を明らかにした。

- (1) 加熱面の応力状態が圧縮の場合、引張の場合、および継手部について、RABT 曲線の加熱に対し有意な損傷が発生しないことを確認した。

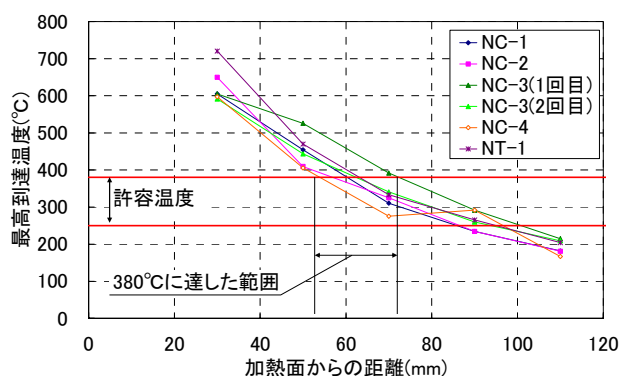


図-12 コンクリート温度と加熱面からの距離の関係(耐火試験)

- (2) 加熱面からの距離と温度の関係(図-12)を確認した。これより、所要の耐火性能を有する部材の設計が可能となった。
- (3) 加熱面が圧縮応力を受けている状態については RABT 曲線の加熱を 2 回受けても爆裂等の破壊が発生せず、また残存耐力も低下しないことを確認した。
- (4) アルミナセメント系耐火補修材による補修により、既存部材と一体性を確保し、十分な耐火性能を有することを確認した。
- (5) 加熱を受けた部材の残存曲げ耐力は、熱により損傷を受けた部分を適切に評価することにより、評価できることを確認した。

今後は、コンクリート部材の耐力のみならず、変形性能を評価するため、加熱による各材料のヤング係数への影響を考慮した検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 半野久光ほか：RC セグメントの耐火性能に関する実験的検証，コンクリート工学年次論文集，vol.24，No.1，pp1719-1724，2002.6
- 2) 百瀬晴基ほか：ポリプロピレン繊維を混入した設計基準強度 150N/mm²の超高強度コンクリートの耐火性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.995-1000，2003.6
- 3) 土木学会：コンクリート技術シリーズ・コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集，2004.10