

論文 大断面 TBM における二次覆工機能を有した耐火 RC ライナーについて

森山 守^{*1}・小原 伸高^{*2}・六郷 恵哲^{*3}

要旨：山岳大断面 TBM において、耐火機能を付加した二次覆工機能を有した RC ライナーの施工にあたり、設計の妥当性、補修範囲の決定をするために耐火試験後の力学試験を実施した。その結果、平面的な劣化範囲を調査するには打音検査と反発硬度の試験が有効であること、劣化深さの調査は、深さ方向への圧縮強度分布と残存繊維深さの試験が有効であることを明らかにした。損傷評価には、火災の規模に応じて必要な項目を選択して実施し、それらの測定結果を総合的に判断することで、火害の程度と範囲を評価できると考えられる。

キーワード：RC ライナー，耐火試験，爆裂抑制，短繊維補強，RABT，力学特性

1. はじめに

通常、TBM では、RC ライナー等を組み立てた後、その内側をコンクリートで被覆する「二次覆工」を行っている。特に道路トンネルの場合は、トンネル火災に備えて耐火性を確保する必要があり、これまでは、この二次覆工に耐火性能を持たしてきた。しかし、近年では、一次覆工の止水性能が向上したことや、コスト縮減のニーズの高まりにより、二次覆工を省略するタイプのシールドトンネルが増加してきているが、これらの工法では、供用後はセグメント本体が被覆されてしまうため、地震などが発生した後のひび割れの発生や漏水など、維持管理を行う上で大事な目視点検を行うことが出来ないことになる。

実際にトンネル火災が発生した場合には、火災の熱による劣化範囲を補修しなくてはならず、火害範囲を定量的に評価しなくてはならない。火害の程度と範囲を評価する方法は、主に建築分野のコンクリート構造物に対していくつかの方法が挙げられているが、RABT 加熱曲線にしたがい加熱したコンクリートでの評価事例は極めて少ない。

本研究では、従来の耐火被覆の工程を省き、工期短縮が期待できる、TBM 工法の二次覆工として設けられる RC ライナー(ポリプロピレン (PP) 繊維を混入したコンクリートを型枠に流し込んだもの)の耐火性能と耐火後の力学特性試験を実施した。また、耐火試験後の火害程度と範囲を定量的に評価するの

に有効と思われるいくつかの試験を実施して、測定方法の有効性と火害程度についても評価を行った。

2. 耐火構造計算及び部材耐力の検討の背景

岩盤中の山岳トンネルであることを考慮すると、都市部のシールドトンネルで適用されている耐火構造と同等の性能までは必要ないと考えられ、実証試験結果及び経済性を勘案して爆裂抑制型耐火方式が有効であると考えられる。また、火災時の構造安定性については、火災時にコンクリートや鉄筋が高温になることによる耐力の低下が予想されることから火災時の RC ライナーの終局耐力が、設計断面力以上であることを確認する必要がある。

「国土交通省住宅局建築指導課：2001 年版耐火性能検証法及び計算例とその解説」に基づいて実施した火災中の耐力計算例を図-1 に示す。常時の許容応力

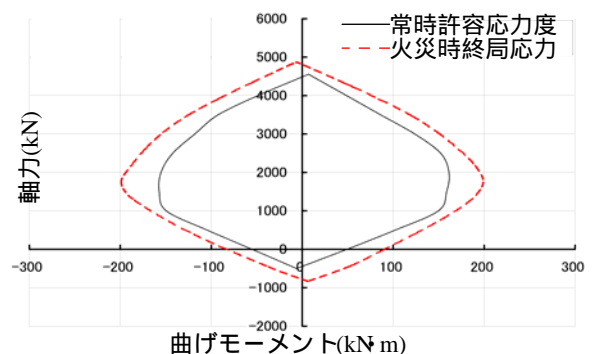


図-1 常時許容応力度 MN カーブと火災時終局耐力の比較

*1 中日本高速道路(株) 中部支社 清見工事事務所飛騨工事長 (正会員)

*2 大成建設(株) 土木設計部陸上第二設計室

*3 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 工博 (正会員)

表-2 配合及び耐火実験時の圧縮強度と含水率

試験体名	C	S	G	Ad	PP混入量 (kg/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	含水率 (%)	軸力 (N/mm ²)	シール材 (目開き)
No.1	普通 ホル トラン トセ メント	普通 砂	硬質 砂岩 砕石	高性 能減 水剤	1.5	63.0	3.60	17	
No.2					1.2	61.5	3.57	17	
No.3					1.5	63.0	3.60	2mm	

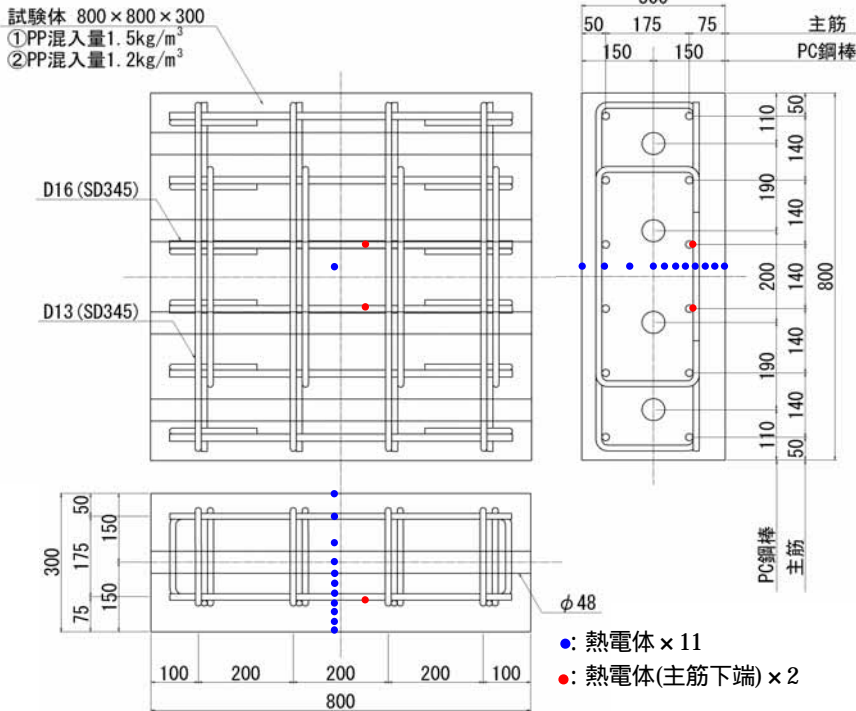


図-2 供試体の一般図

度相当のMNカーブと火災時の終局耐力MNカーブを示す。火災時の断面欠損や受熱による一時的な強度低下を考慮した終局耐力MNカーブの方が常時の許容応力度相当MNカーブより大きいことがわかる。従って、大規模火災を受けたとしても、爆裂を抑止することにより覆工内部の温度上昇が抑えられ、一時的に断面耐力が低下するもののトンネル覆工の構造安定性は確保されるといえる。

3. RCライナーの耐火性能試験

3.1 加熱試験計画及び試験体概要

供試体は、実際のRCライナーに使用する配合と同じ配合により作製した。表-1にコンクリートの示方配合及び耐火実験時のコンクリートの圧縮強度と含水率を示す。

有機繊維の混入量によるコンクリート内での繊維

のバラツキが爆裂抑制に及ぼす影響について検討を行うため、繊維混入率は、1.5kg/m³と1.2kg/m³の2種類とした。また、施工誤差等によるRCライナーセグメント部の目開きがセグメント部のシール材の耐熱性に及ぼす影響について検討を行うため、シール部を設けた供試体も作製した。有機繊維は、径18μm、長さ10mmのポリプロピレン(PP)を用いた。図-2に供試体の一般図を示す。

3.2 軸力導入及び加熱方法

一般部No.1,2の試験体では、覆工にかかる軸力を再現するため加熱前にPC鋼棒により、ゆるみ荷重(2D)(D:は掘削径)まで緊張し、圧縮力を与えた。PC鋼棒のひずみは、目標下限値4156μに対して4166μ~4211μとなった。加熱前の圧縮力は、供試体No.1, No.2共に17.2N/mm²となった。試験体の加熱範囲は、試験体加熱面中央部の550mm×550mmとし、RABT曲線(60分)に準拠して加熱した。

3.3 加熱試験結果

図-3に一般部No.1,2の試験体のPC鋼棒による圧縮応力と時間(加熱時間)の関係を示す。加熱開始から180分で圧縮力が約24%低減した。理由としてはコンクリートが熱収縮したことで圧縮力が低くなったと考えられる。

図-4~6及び写真-1~3に各供試体の内部温度と時間との関係及び加熱後の供試体の関係を示す。PP混入量1.5kg/m³の加熱後の試験体加熱面の様子については、加熱開始から15分程度までは表面から薄いコンクリート片の剥離が見られたが、爆裂による欠損は生じなかった。加熱後の加熱面には、5mm程度の局所的な剥離が生じたが、部分的に骨材が溶出して固まった突起が多数見られた。PP混入量1.2kg/m³の場合においても、加熱後の試験体加熱面の様子はPP混入量1.5kg/m³の場合と同じであった。

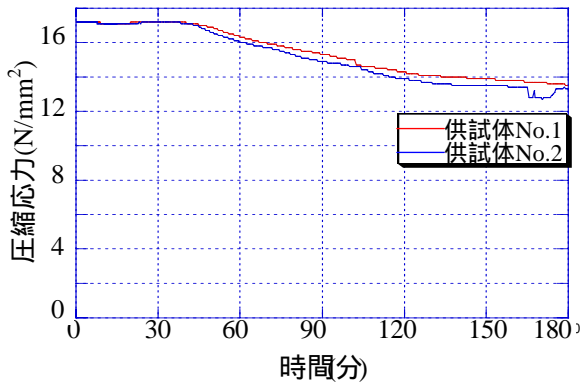


図-3 コンクリート圧縮応力と時間の関係

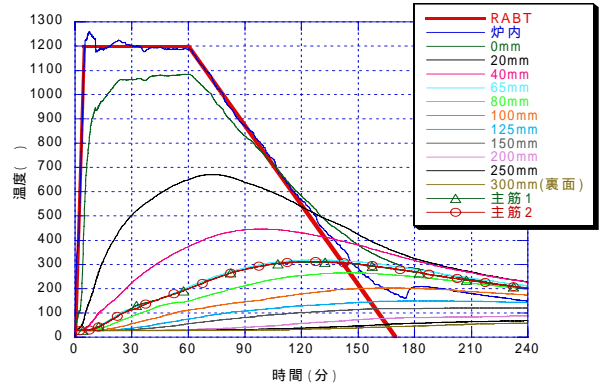


図-4 試験体内部温度と時間の関係 (No.1)

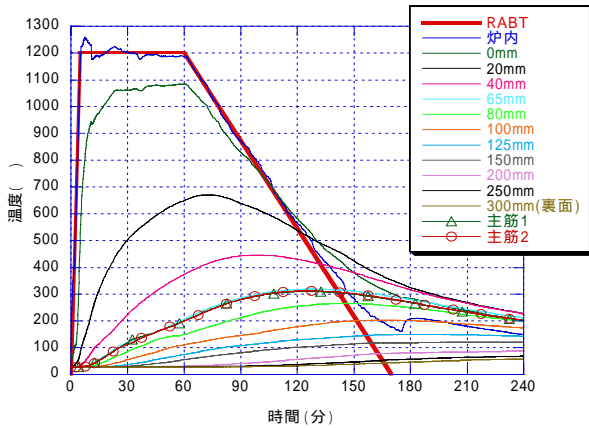


図-5 試験体内部温度と時間の関係 (No.2)

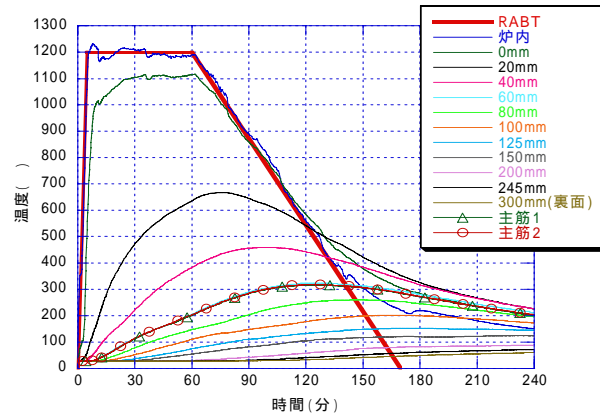


図-6 試験体内部温度と時間の関係 (No.3)



写真-1 加熱後の様子 (No.1)



写真-2 加熱後の様子 (No.2)

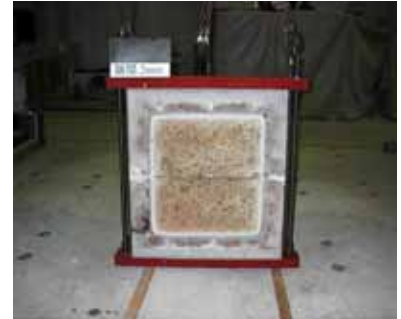


写真-3 加熱後の様子 (No.3)

シール部における加熱後の試験体加熱面の様子については、試験体の表面は薄いピンク色となったが爆裂もなく表面剥離も見られなかった。シールの目開き 2mm の試験体も、母材コンクリートと同様な結果となり 2mm 程度の目開きによる影響は無かった。

3.4 加熱後供試体の力学特性等

加熱後供試体を用いて、表面観察、打音確認、反発硬度測定および小径コアによる各試験を実施した。打音確認と反発硬度測定については加熱前後とも試験を行った。

小径コアによる測定は、圧縮強度、残存繊維確認、中性化深さ、密度(気乾密度・絶乾密度)、引張強度、ピッカース硬さについて試験することとした。小径

コアは、試験項目ごとに 24, 30, 50mm の径で長さ 300mm(ピッカース硬さのみ長さ 100mm)のコアを採取し、深さ方向に所定の寸法に切断して各試験を実施することとした。

ピッカース硬さ試験は、菱形の先端形状をした針を一定荷重で載荷し、そのとき発生するくぼみの面積から測定対象の硬さを測定するものである。ここでは、コンクリートの深さ方向へピッカース硬さを測定するが、モルタル部分を目視により確認しながら針を貫入させる。

(1) 表面観察

表-2に加熱後供試体表面のデジタル画像からウェーブレット解析により、ひび割れ画像からひび割れ

表-2 ひび割れ長さ分布

ひび割れ幅 (mm)	ひび割れ長さ (mm)		
	供試体 No.1	供試体 No.2	供試体 No.3
~0.1	45,170.7	42,315.2	49,045.9
0.1~0.2	4,772.4	592.3	5,550.7
0.2~0.3	988.9	1,475.8	1,253.6
0.3~0.4	22.5	35.8	32.1
0.4~0.5	9.2	196	17.2
0.5~	0	0.3	0.1
合計(mm)	50,973.7	49,749	55,899.6
ひび割れ密度	142(m/m ²)	138(m/m ²)	155(m/m ²)

幅 0.1mm ごとのひび割れ長さを示す。供試体 No.1 と No.2 はポリプロピレン繊維混入量がそれぞれ 1.5 と 1.2kg/m³ のコンクリート供試体であるが、ひび割れ密度はほぼ同一であり、繊維量によるひび割れ密度の違いは生じなかった。

(2)打音

打音確認は加熱前に比べ、供試体 No.1 ,No.2 の加熱後については、局所的に浮きが生じた。強打すると表層数 mm がスケーリングのように薄層剥離した。

(3)反発硬度

加熱前後のシュミットハンマーによる反発硬度の測定結果においては、供試体 No.1 及び No.2 とともに、加熱前が 49.5(標準偏差=1.33)と 49.4(標準偏差=1.84)であり、加熱後が 30.1(標準偏差=1.2.68)と 29.0(標準偏差=3.35)と、加熱により反発硬度の低下するとともに、反発硬度のバラツキも大きくなった。

(4)圧縮強度

図-7~8 に小径コアの深さ方向への圧縮強度の分布及び寸法効果を補正した圧縮強度を示す。小径コアの径は 30mm と 24mm で、30mm の小径コアは深さ方向に 30mm (10 等分)、24mm の小径コアは深さ方向に 25mm (12 等分)の高さに切り分けて測定した。

供試体 No.1 と No.2 では、30mm の小径コアで見ると、表面からの平均深さが 75mm (深さ 60~90mm の位置のコア)まで圧縮強度が低下している。一方、

24mm の小径コアで見ると、表面からの平均深さが 87.5mm まで圧縮強度が低下している。ただし、小径コアの寸法効果により、内部の健全と思われる深さの圧縮強度は、加熱前の初期強度(供試体 No.1 で 63.0N/mm², No.2 で 61.5N/mm²)を大きく上回っている。この寸法効果による圧縮強度のみかけの増加を補正するために、加熱による熱の影響を受けていないコンクリートで 30mm、24mm の小径コアを採取

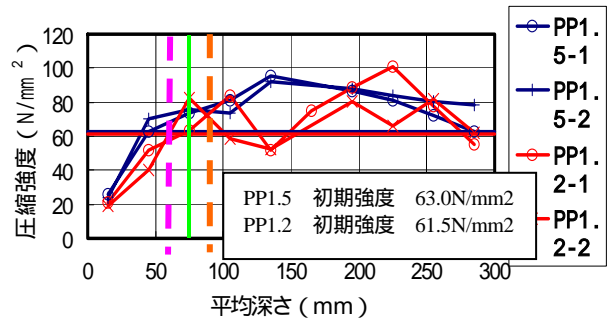


図 - 7 30mm-L30mm 小径コア圧縮強度

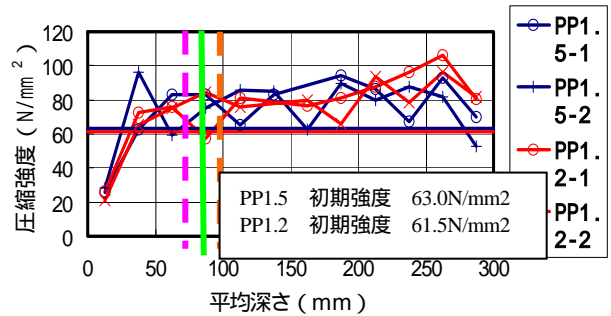


図 - 8 24mm-L25mm 小径コア圧縮強度

して、小径コア高さを 3 通りに変えて、100×200mm のコアに対する圧縮強度比率を求めた。この結果、30×30mm の小径コアの圧縮強度は、100×200mm のコアに対して 1.31 倍となった。また、24×25mm の小径コアの圧縮強度は、100×200mm のコアに対して 1.23 倍となった。図-7~8 中の寸法効果を補正した圧縮強度により、加熱による圧縮強度の低下範囲は、深さ方向には 100mm 程度までと考えられる。なお、図-4~6 によれば、深さ 100mm における受熱温度は 200 程度であり、コンクリートにおけるこの受熱温度は、「建物の火害診断及び補修・補強方法(日本建築学会)」によれば、ほとんど圧縮強度が低下しない温度であることが分かった。

(5)残存繊維確認

写真-4 に加熱後小径コア割断面の代表的な拡大鏡観察写真を示す。残存繊維の観察は、所定の深さごとに切断した小径コアを割裂し、その断面を拡大鏡により目視観察し、ポリプロピレン繊維の有無を確かめた。その結果、供試体 No.1, No.2 では深さ 70mm では繊維が見られなかったが、深さ 105mm では繊維の残存が確認された。これらの深さでは、受熱温度は 200 をやや下回る温度であり、PP の融解温度とされる 185 程度とほぼ一致する。これから、PP 繊維を混入したコンクリートやモルタルが加熱された場合に、コンクリート内部の繊維残存深さを確認することにより、受熱温度が 200 程度を上回っ

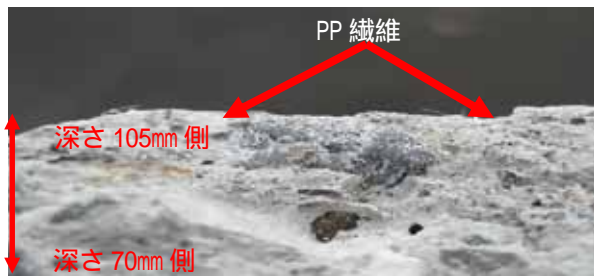


写真-4 加熱後小径コア割裂断面の拡大写真

温度が 500 に達しても全ての水酸化カルシウムが反応できないためではないかと思われる。

(7)密度

図-9に加熱後小径コアによる気乾密度の測定結果を示す。気乾密度は、圧縮強度を測定した後の 30mm, 24mmのコアと、引張強度を測定した後の 50mmのコアで、強度を測定した後の気乾状態で測定した。

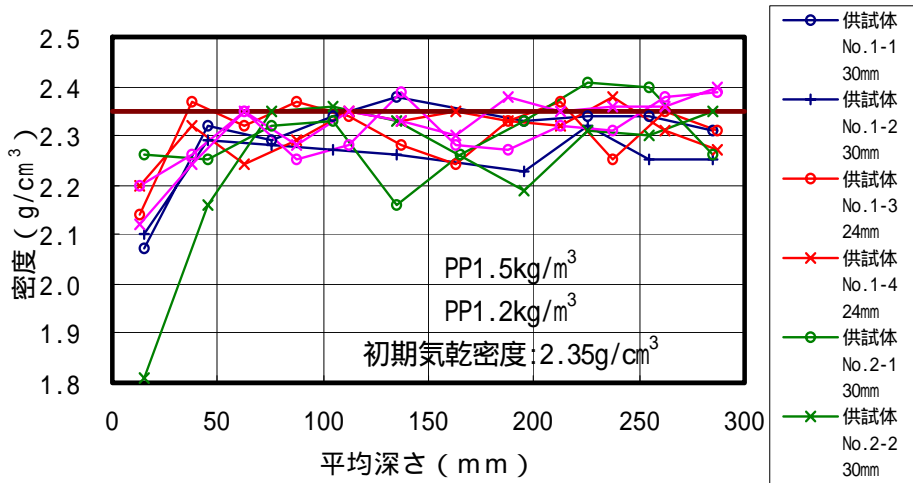


図-9 供試体 No.1, No.2 小口径コア気乾密度

また、図-10に加熱後小径コアによる絶乾密度の測定結果を示す。絶乾密度は、気乾密度を測定した 30mm, 50mmのコアに対して、110 乾燥炉に 2 日間静置した後に測定した。

深さ方向への密度の分布は、気乾密度と絶乾密度でほぼ同じ傾向を示している。また、小径コアによる圧縮強度の分布とも同じような傾向を示しているが、深さ方向への受熱温度の違いによる影響は、圧縮強度ほど明確ではなかった。

(8)引張強度

図-11 に加熱後小径コアによる割裂引張強度の測定結果を示す。加熱表面から深さ 70mm 程度までの引張強度が低下していることがわかるが、コンクリート内部

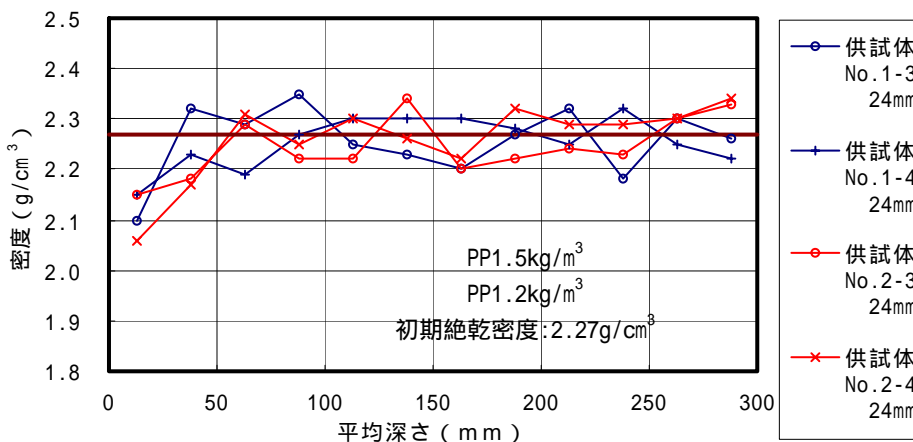


図-10 供試体 No.1, No.2 の 24-L25mm 小径コア絶乾密度

た範囲を確認することができた。

(6)中性化深さ

中性化深さは供試体 No.1 で 7.5mm, 供試体 No.2 で 8.6mm, 供試体 No.3 で 7.7mmであった。一般にセメント系材料は、受熱温度 500 程度で水酸化カルシウムが酸化カルシウムと水に分解して中性化を示すとされている。図4~6によれば、受熱温度 500 に達した深さは、40mm程度と考えられ、実際の中性化深さとの違いが大きい。この理由として、RABT 加熱曲線 (60分加熱)における、加熱開始から5分間で1200 に達するような急激な温度上昇では、受熱

では引張強度のばらつきも大きい。これは、割裂引張強度が粗骨材の分布状態の影響を受けるためと考えられる。

(9)ビッカース硬さ

図-12 に加熱後小径コアによるビッカース硬さの測定結果を示す。各図ともに、30mmの小径コア2本の測定結果が示す。

PP 混入コンクリートの供試体 No.1 では、加熱表面から深さ 10mm 程度までのビッカース硬さに大きな値が見られる。これは、コンクリート中のモルタ

ル分が消失し、骨材部分で測定している頻度が高いためと考えられる。図中の赤い太線は、ビッカース

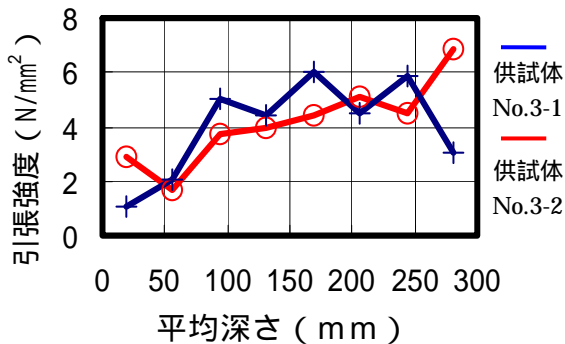


図 - 11 供試体No.3 50-L35mm小径コア引張強度

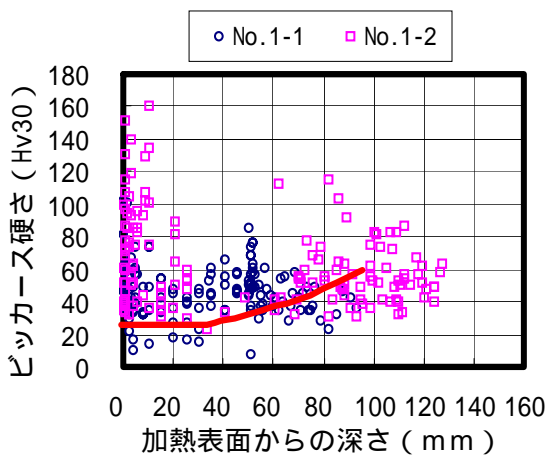


図 - 12 供試体No.1小径コアビッカース硬さ

表-11 各測定方法の火害損傷度評価への適用性

測定項目	火害評価への適用	長 所	短 所
表面観察		ひび割れ密度分布による劣化程度の定量的な評価ができる。	ひび割れ密度分布の解析に手間と時間を要する。
打音		平面的な劣化の範囲を簡易的に知ることが出来る。	火害コンクリートの表面を傷めコア採取に考慮を要する。
反発硬度		平面的な劣化の範囲を簡易的に知ることが出来る。	火害コンクリートの表面を傷めコア採取に考慮を要する。
圧縮強度		深さ方向への圧縮強度の分布を直接把握できる。	コア採取、整形に手間と時間を要する。
残存繊維確認		200 程度の上熱温度範囲を知ることが出来る。	繊維の確認に手間と時間を要する。
中性化深さ		500 程度の上熱範囲を知ることが出来る。	RABT加熱では中性化先端の上熱温度が500 とはならない。
密度		圧縮強度の低下傾向を間接的に知ることが出来る。	体積の測定に手間と時間を要する。
引張強度		深さ方向への引張強度の分布を直接把握できる。	測定値のバラツキがやや大きい。
ビッカース硬さ		深さ方向へのコンクリートの硬さの変化を直接把握できる。	引張強度の測定値のバラツキがやや大きい。

硬さの下限値に対する包絡線を示しており、加熱表面から深くなるに伴い、ビッカース硬さの下限値は大きくなる傾向が見られた。しかし、圧縮強度との相関性については、明確ではない。

4. 各測定方法の火害損傷度評価への適用性

表-11 に各測定方法の火害評価損傷度評価への適用性を示す。各測定方法には長所と短所がある。よく知られているように、面的な劣化範囲を調査するには、打音検査と反発硬度の測定が有効であった。本研究においては、深さ方向への劣化深さを調査する場合に、深さ方向への圧縮強度分布と残存繊維深さの確認が有効であることを明らかにした。

5. あとがき

R C ライナーは、火災が発生した際の最大爆裂深さが50mm以下になることや、セグメント本体部分の鉄筋位置での最高温度を鉄筋が損傷を受けない250度以下に抑えることなどを、RABT 基準による加熱試験を行い確認した。

実際の火災後の損傷評価には、測定項目から、火災の規模に応じて、必要と考えられる項目を選択して実施し、それらの測定結果を総合的に判断することで、火害の程度と範囲を評価できることが確認できた。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書，2002.6
- 2) 土木学会：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，コンクリート技術シリーズ，No.23，2004.10
- 3) 岡田 清，六車 熙編：コンクリート・ハンドブック，朝倉書店，1981
- 4) Malhotra, V. M.: Superplasticized Fly Ash Concrete for Structural Applications, Concrete International, Vol.8, No.12, pp.28-31, Dec.1986