橋梁用耐火パネルの開発

~ 挑戦:橋を火から守る ~

Fire Protection Panel Developed for Bridges

柳澤 則文 ^{*1}	野呂 直樹 ^{*2}	越後 滋 ^{*3}
Norifumi YANAGISAWA	Naoki NORO	Shigeru ECHIGO
大山 理 ^{*4} Osamu OHYAMA	栗田 章光 ^{*5} Akimitsu KURITA	

近年,車両の横転事故や不審火,放火などによる橋梁での火災事例が国内外を問わず,数多く報告されている。ひとたび、このような火災が発生すると、交通規制や補修工事など、その社会的・経済的な損失は計りしれないものである。また、こういったリスクは常に存在しており、発生する確率は低いとしてもゼロとはいえない。わが国では、これから本格的な橋梁の維持管理時代を迎え、既設の橋梁を末永く安全に安心して利用できるよう、計画的な維持・補修(予防保全)対策が求められている。そこで、今まであまり想定されなかった「火災損傷」から橋を守るため、耐火工として耐火パネルの開発を行った。本文では、実橋への適用に向け実施した加熱実験とその耐火性能について報告する。

キーワード:橋梁火災事故,耐火パネル,耐火材,炭化水素曲線,加熱実験

1. はじめに

近年,タンクローリー車等の車両事故による炎上,あ るいは不審火や放火などにより,一般橋梁や高架橋での 火災事例(写真1)が国内外を問わず,数多く報告されて いる³⁾。例えば,2008年8月上旬に,首都高速5号池袋 線で,タンクローリー車による横転・炎上事故が発生し, 橋桁およびコンクリート橋脚が大きな被害を受け,大規 模な車線規制と橋桁の取替えが約2ヶ月にわたって行わ れ,その経済的な損失は計り知れないものであった⁴⁾。

このようなことから,万が一火災事故が発生した場合 であっても,橋梁の安全性が保持できる十分な要求性能 を備えた耐火パネルの開発が必要と考えられた(図1)。 そこで,実橋への適用に向け考案した耐火パネルの加熱 実験を実施した^{5),6)}。ここでは,その実験結果と耐火性 能について報告する。

2. 耐火パネル

(1) 耐火パネルの設計

トンネル火災における耐火工の設計では、火災温度– 時間曲線として加熱開始5分で1200℃に達する RABT 曲 線⁷⁾ が採用されている。しかしながら、橋梁下ではトン ネル火災のような閉鎖された空間とはならないことから、 RABT 曲線と同様に短時間で1000℃を超えるが、最高温 度は1100℃と若干低い油火災を想定した炭化水素曲線 (HC)を採用することとした(図2)。また,高温下での鋼の強度の低下を考慮し,火災時に橋梁各部材の受熱温度が350℃以上⁸⁾にならないよう,耐火パネルのフレーム構



写真1 橋梁の火災事例 (アメリカ合衆国: 2007, 4, 29) 1), 2)



図1 耐火パネルを用いた橋梁耐火工(イメージ)

*4 大阪工業大学工学部都市デザイン工学科 准教授 博士(工学) *5 大阪工業大学八幡工学実験場 特任教授 博士(工学) 造と耐火材の種類を決定した。

(2) フレーム構造

耐火パネルに採用したフレーム構造は、軽量化とフレ ームの変形を最小限に抑えるため, SSC400 材の軽量溝形 鋼で構成することとした。なお、フレームの標準外形寸 法は,現場での施工時の作業性や既存の裏面吸音板の形 状寸法等も踏まえ,幅 500mm,長さ 2000mm,厚さ 80mm と した(図3)。また,橋梁本体の両側面への設置を考慮し, フレームの幅が広い 950mm のフレームも製作した。

(3)耐火材の選定

耐火材は,建築で用いられる耐火被覆や鉄鋼業の炉材 等に広く使用され,多種多様な製品が商品化されている。 トンネル内や橋梁下での車両火災を対象とする場合は,



図2 様々な火災温度一時間曲線

フレーム:軽量溝形鋼(80×40×40×2.3),材質:SSC400,金網:線径(φ3.2),開目(20mm)



図3 耐火パネル (フレームの構造)

表1	使用した耐火材の主な物	性值	[ALC] 主として住宅等の外壁材に使用
	CFB	ALC	
耐火材の最高 使用温度(℃)	1260	1 時間耐火 (1S0) 以上	
密度(kg/m ³)	130	510	[CFB]
比熱(J/kgK)	1130	1332~1650	
熱伝導率(W/mK)	0. 13 ~ 0. 28	0.15 ~ 0.36	主として炉材等に使用
			写真2 フレーム内の耐火材積層状況

論文·報告 3-2

火災想定温度が建築の分野と比べ高温になると考えられる。そこで、耐火パネルに用いる耐火材には、高温下でも使用に耐えうるセラミックファイバーブランケット(以下、CFBと称する)⁹⁾を選定した。しかしながら、CFBは軽量なことから、火災時に発生する熱風等により、CFB自身が吹き上げられ、本来CFBがもつ耐火性能を十分に発揮できないことも予想される。そこで、断熱効果を有する軽量気泡コンクリート板(以下、ALCと称する)¹⁰⁾をCFBのバックアップ材としてCFB裏面に積層した(**表1,写真2**)。

3. 実験方法

加熱実験は、大阪工業大学が所有する大型水平加熱炉 (幅3m,長さ8m,高さ1.5m)を用いて行い、橋梁直下で タンクローリー車が横転・炎上したことを想定し、ヨー ロッパの設計規準(Eurocode)¹¹⁾で規定されている火災 温度-時間関係である最高温度が1100℃の炭化水素曲線 (HC)で90分間加熱することとした。実験供試体は、実橋 への取付け方法と同様,取付け金具を介して横梁(H形鋼) に吊下げ,加熱炉の上面に蓋状に設置した。

4. 加熱実験

(1) 実験供試体

加熱実験では、耐火材の厚さや固定方法、耐火パネル のフレーム幅等を変え、5種類の実験供試体について検討 を行うこととした。**写真3**に実験供試体の設置状況を示す。 耐火材の固定方法は,製作時に耐火材を一体化すること で耐火パネルの設置作業を省力化したタイプと,将来的 な耐火パネルの維持管理において,耐火材の交換を可能 にしたタイプの2種類とした(図4)。

(2) 受熱温度測定位置

受熱温度の測定位置は、フレームの加熱面、各耐火材 の裏面中央部および横梁下面にK熱電対を設置し(図5)、 耐火パネル上面の空気層の温度が350℃以上にならない ことを確認するため、実験供試体下面(加熱面)から約 400mm上方の各空気層にもK熱電対を設置することとした。



写真3 実験供試体の設置状況



図4 実験供試体のタイプと耐火材の固定方法(断面図)



図5 受熱温度測定位置



5. 実験結果

(1) フレームの変形

図6に加熱冷却後の各実験ケースのフレームの変形量 を示す。図6より、フレームの変形は、最大で5~21mm程 度発生し、供試体のタイプによってその量には差が生じ る結果となった。これは、フレームの長辺側は、隙間か らの熱気の侵入を防止するため、フレーム間を連結し拘 束したが、軽量溝形鋼の上フランジのみを連結し拘束し たことから、拘束力が小さく隣接したフレーム間の変形 量に差が生じ、たわみにこのような差が発生したものと 考えられる。一方、フレームの短辺側では、フレームの たわみはほとんど無く、タイプ-AC50W以外のどの供試体 のタイプも最大で1mm程度であった。なお、タイプ-AC50W の短辺側については、フレームの幅が他の実験ケースと 比べて約2倍の長さであることも影響し、最大で7mm程度 と幾分大きな値となった。しかし、フレームの局部的な 変形はいずれの供試体のタイプでも見られず、耐火材が 落下するような大きな変形も認められなかった (写真4)。

(2) 受熱温度

図7および8に、代表してタイプーAC37、タイプーAC50 の受熱温度を示し、表2には各実験供試体の受熱最高温度 を示す。フレームの受熱温度は、いずれの実験ケースも 約1 080℃程度と炉内温度に近く、耐火材裏面(ALC)の 受熱最高温度は、ALCの厚さが37mmのタイプーAC37では 244℃(タイプーAC37I:223℃)であり、ALCの厚さが50mm のタイプーAC50では98℃(タイプーAC50W:165℃)と約 80~120℃程度低い値となった。また、横梁下面の受熱最 高温度はタイプーAC37では243℃(タイプーAC37I:288℃)。 タイプーAC50では190℃(タイプーAC50W:202℃)とALCの 厚さの違いにより、約50~80℃程度低い値となった。空



写真4 加熱冷却後のフレームの状況





1200





供試体の タイプ	フレーム (°C)	CFB(℃) [厚さ:mm]	ALC(℃) [厚さ:mm]	横梁 (℃)	空気層 (℃)
AC37	1077	790 [25]	244 [37]	243	153
AC37I	1088	607 [25]	223 [37]	288	170
AC50	1071	762 [25]	98 [50]	190	88
AC50W	1087	760 [25]	165 [50]	202	100
AC50A	1076	833 [25]	168 [50]	372	153

気層の受熱最高温度もタイプーAC37では153℃(タイプー AC37I:170℃)。タイプーAC50では88℃(タイプーAC50W: 100℃)と耐火材裏面(ALC),横梁下面と同様,約70℃ 程度低い結果となった。これは、明らかに耐火材(ALC) の厚さの違いが影響して生じたものと考えられる(**表**2の 緑着色部分参照)。なお、タイプーAC50Wは、フレームの 幅が950mmと他の実験ケースの約2倍程度あるが、受熱温 度に対しては、フレームの幅の影響はほとんど見られな い。また、フレームを構成する軽量溝形鋼の内部に耐火 材を充填していないタイプーAC50Aについては、タイプー AC50、タイプーAC50Wと耐火材(ALC)の厚さが同じであ るにもかかわらず、横梁下面の受熱最高温度は、372℃と



写真5 加熱冷却後のALCの状況



写真6加熱冷却後のCFBの状況

約170℃程度高く、空気層の受熱最高温度も153℃と約50 ~70℃程度高くなった。これは、横梁下面に位置するフ レームの短辺側や長辺側の空隙にこもった熱気が影響し、 タイプーAC50、タイプーAC50Wと比べ温度が上昇したもの と思われる(**表2**の赤着色部分参照)。このようなことか ら、横梁下面や空気層の受熱温度の上昇を抑制するには、 フレームを構成する軽量溝形鋼の内部に耐火材を充填す ることが望ましいと考えられる。

(3) 加熱冷却後の耐火材

写真5に加熱冷却後のALCの状況を、写真6にCFBの状況 を示す。加熱冷却後のALCは,加熱面(CFB)側に亀甲状 のひび割れが生じ,空気層側にはフレームの幅方向にい くつかのひび割れが生じていた。しかしながら, ALC内に は補強材としてメタルラスが配置されていることから, ALCをフレームから取外しても粉々になることはなかっ た。この亀甲状のひび割れは、加熱を受けたALCが熱膨張 により曲げ変形することから発生し、加熱時間の増加に 伴ってそのひび割れ幅は大きくなったと考えられる。ま た,加熱冷却後の加熱面 (CFB) 側には凹状のたわみが残 存¹²⁾することから、この影響により空気層側にはフレー ムの幅方向にひび割れが生じたものと考えられる。なお, 加熱冷却後のCFBは、加熱面側、空気層(ALC) 側ともに 損傷等は見られず健全である。加熱面側では、茶色くフ レームや金網の痕が残ったが、これは鋼材が加熱される ことにより生成されるミルスケールが付着したものであ り, CFBが焼け焦げたものではない。

6. 耐火パネルの取付け構造と概算工費

(1) 取付け構造

今回考案した耐火パネルを鋼 I 桁橋に取付けた場合の 概略構造を図9に示す。耐火パネルの取付け位置は,既存 の裏面吸音板(取付け支材も含めm²あたり60kg程度)の 取付け構造と同様,主桁下フランジ底面から約600mm程度 離れた位置に吊材・縦梁・横梁を介して隙間なく取付け るものとする¹³⁾。なお,この高さ600mmの空間は,点検・ 補修用で,火災の際には主桁下フランジの温度上昇を抑 制する効果も期待できる。





・工費は橋長160m, 幅員11mの鋼I桁4主桁橋に設置することを想定 (パネル総幅17.2m,施工面積2752m2)。

図10 概算工費試算にあたり想定した橋梁の概略断面

(2) 概算工費の検討

図10に示す条件をもとに耐火パネルの概算工費につい て試算を行った。その結果を同様の条件で試算した裏面 吸音板の概算工費とあわせて表3に示す。耐火パネルの概 算工費は,裏面吸音板と比べ約1割程度高い試算結果とな った。しかしながら、耐火パネルの製作数、取付ける橋 梁の形式や規模および設置範囲などの諸条件によっては, 試算した工費は幾分削減できると考えられる。このよう なことから、裏面吸音板と比べ若干高いかほぼ同等程度 に収まるといえる。

7. まとめ

実橋への適用に向けた耐火パネルを考案し、その耐火 性能を確認するため加熱実験を行った。得られた結果を 要約すると次のとおりである。

- 1) 耐火パネルのフレームは、長辺側で最大5~21mmのた わみが生じたが、耐火パネル自体が落下するような大 きな損傷はなく、実橋に適用しても問題ないことが確 認された。
- 2) 耐火材を支えるためにフレーム下面に設けた金網は, 加熱にともない変形が生じたが、耐火材が落下するよ うな破断や大きな変形等は見られない。したがって, 実橋への適用に際し十分耐えうる構造といえる。
- 3)炭化水素曲線(HC)による90分間の加熱を行ったが、空 気層の受熱温度の上昇は最大で170℃程度に止まった。 したがって、実橋に適用しても、主桁下フランジの受 熱温度は、350℃未満に抑制することが可能といえる。
- 4) 空気層の受熱温度の上昇を抑制するには、フレームを 構成する軽量溝形鋼の内部にも耐火材を充填すること が効果的である。
- 5) 耐火パネルの概算工費は, 裏面吸音板と比べ若干高い かほぼ同程度である。

以上から、今回考案した耐火パネルは、実橋に適用し ても十分な耐火性能を有するものといえる。

表3 単位面積当たりの概算工費試算結果

	耐火パネル (円/m ²)	裏面吸音板 (円∕m ²)
パネル	74,000	65,000
現場取付け費	13,000	13,000
合計	87,000	78,000

注)・上記,概算工費は直接工費のみ。

・現場取付け費は、「橋梁架設工事の積算」の裏面吸音板設置工を適用。

 ・耐火パネルの費用については、実験供試験体の材料および製作費をもとに 算出

謝辞

最後に、本開発を行うにあたり、軽量気泡コンクリー ト板 (ALC) の提供をいただいた旭化成建材(株)ほか,実 験に御協力いただいた関係者の方々に対し、紙面を借り て深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) California Department of Transportation (http://www.dot.ca.gov/dist4/mazedamage/)
- 2) The New York Times (http://www.nytimes.com/2007/04/29/us/29cnd-collapse.htm 1)
- 3) 大山, 今川, 栗田: 火災による橋梁の損傷事例, 橋梁と基礎 Vol. 42, No. 10, pp. 35-39, 2008. 10.
- 4) 桑野, 増井, 鈴木, 依田: タンクローリー火災事故により損傷 を受けた橋梁の復旧,橋梁と基礎 Vol. 43, pp. 13-18, 2009. 4.
- 5) 柳澤, 越後, 長谷, 大山, 栗田:橋梁用耐火パネルの性能評価, 構造工学論文集 Vol. 58A, pp. 732~743, 2012.3.
- 6) N. Yanagisawa, S. Echigo, O. Ohyama, A. Kurita. : Fire Protection Panel for Bridges, 18th CONGRESS OF IABSE, Seoul, Korea, September 19-21, pp. 472-473, 2012.
- 7) 久保田, 滝本: 最近の道路トンネル防災設計の動向, こうえい フォーラム 第18号 2009.12.
- 8) 土木学会: コンクリート技術シリーズ No. 63 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 p.151, 付15-17, 2004.10.
- 9) ファイバーエクセルブランケット130,(株) I TM
- 10) 鋼構造耐火設計指針, 日本建築学会, p. 222, 2008.3.
- 11) CEN: Eurocode 1-Actions on structures-Part 1-2: General actions-Actions on structures exposed to fire, EN 1991-1-2, 2002.
- 12) 遠藤, 橘高: ALC パネルの各種強度性状に及ぼす加熱の影響, 日本建築学会構造系論文集 第73 巻 第633 号, pp. 1921-1926, 2008.11.
- 13) 都市高速道路付属物の設計,都市高速道路研究会/編著,山 海堂 pp. 241-260, 1998.6.