

耐アルカリガラス繊維補強セメント打込み型枠を用いた RC 梁の耐火性能に関する考察

藤田 直明*1・平居 孝之*2・村上 聖*3・佐藤 嘉昭*4

概要 耐アルカリガラス繊維補強セメント打込み型枠（以下では GRC 打込み型枠と表す）を使用した RC 梁の火災時における GRC 打込み型枠とコンクリートの接合面に発生する応力を 3 次元有限要素法による数値計算にて調べた。その結果、GRC 打込み型枠の底板と側板の境目近傍で、GRC 打込み型枠とコンクリートの接合面（以下では接合面と表す）に大きな引張り応力およびせん断応力が発生することが判明した。先に行われた基礎実験^{1)~3)}から、円形凹み内面形状の GRC 打込み型枠（以下では円形凹み GRC 打込み型枠と表す）と、金網埋設内面形状の GRC 打込み型枠（以下では金網埋設 GRC 打込み型枠と表す）がコンクリートとの接合性に優れた結果を示したことから、これらの内面形状を有し、底板と側板が一体となった GRC 打込み型枠を作成し、これらを使用した RC 梁について加熱試験を行い耐火時の挙動を調べた。その結果、金網埋設 GRC 打込み型枠 RC 梁試験体は加熱試験後も耐火上有害な GRC 打込み型枠とコンクリートの分離は見られず、鉄筋の昇温もコンクリートのみの RC 梁試験体と同様な傾向を示した。円形凹み GRC 打込み型枠 RC 梁試験体については、他の試験体に比べて鉄筋の昇温はいくぶん低く、これは GRC 打込み型枠の部分的な剝離で形成された断熱層の影響と考えられる。

キーワード：耐アルカリガラス繊維補強セメント、打込み型枠、RC 梁、耐火性能、付着性能

1. はじめに

耐アルカリガラスの短繊維を分散させて混入して補強したセメント製品（以下では GRC と表す）は、1968 年に英国の Building Research Establishment の Dr. Majumdar らにより基礎的な研究が行われ、その後工業製品の開発へ発展した⁴⁾。GRC に関する基本技術は日本にも導入され、国内でも GRC の商品開発が盛んに行われた^{5), 6)}。

GRC は、不燃性、造形性、高強度などの特性を生かして、カーテン・ウォールや防音壁などに広く使われているが、その極めて高い中性化抑制効果を生かした製品はまだない。筆者らは建築構造物の RC 部材の打込み型枠に GRC を適用することに着目し、GRC 打込み型枠を用いた梁の曲げによる部材構造試験^{7), 8)}、炭酸ガスによる促進中性化試験⁹⁾、実構造物への施工試験¹⁰⁾を行って検討し、その可能性があることを示した。さらに建築物に広く用いられるようになるには建築基準法に定められた耐火構造に指定されることが必要である。

そこで本研究では、GRC 打込み型枠を用いた RC 梁の耐火性能について調べた。GRC のように高強度で不

燃のセメント系材料を用いたパネルを打込み型枠に適用する研究が多く行われているが、その厚さをかぶり厚さに含めるのではなく捨て型枠として考えており、打込み型枠とコンクリートとの接合性について検討した研究は少ない。耐火試験において GRC 打込み型枠とコンクリートが接合面で分離すると判定条件を満たさないので、筆者らは GRC 打込み型枠とコンクリートとの接合性を十分に得ることが、GRC 打込み型枠をかぶり厚さに含めるために重要であると考えて研究を行った。

2. GRC 打込み型枠の接合面と構成に関する検討

2.1 火災時の接合面に生じる応力の数値解析

GRC 打込み型枠を用いた RC 梁は、火災時に内部の位置によって温度が異なり材料定数が変わるため、接合面に両者を分離させるような応力が生じると考えられる。ここでは、その応力の解析を 3 次元有限要素法による数値計算で行った。

(1) 解析モデル

図-1 に示す GRC 打込み型枠を用いた梁の耐火試験体について、太い点線で囲った ABCDEFGH の直方体の部分を解析の対象とした。GRC 打込み型枠の厚さは 15 mm とし、配筋は図-2 と図-3 のように設定した。鉄筋はいずれも矩形断面とした。GRC 打込み型枠を含んだかぶり厚さは、あばら筋が 30 mm、主筋が 40 mm

*1 大分大学大学院工学研究科（正会員）
*2 大分大学工学部 教授（正会員）
*3 熊本大学工学部 助教授（正会員）
*4 大分大学工学部 教授（正会員）

である。

JIS A 1304 建築構造部分の耐火試験方法に示された加熱温度曲線で加熱した時の 10 分, 20 分, 30 分, 40 分, 60 分, 80 分, 120 分経過時について, 加熱面すなわち解析モデルでは図-1 の ABCD の面, ABFE の面および BCGF の面からの距離が 0~15, 15~30, 30~40, 40~60, 60~90, 90~125 mm の区域に分け, これらに位置する有限要素の温度, 線膨張量および線形弾性を仮定したときのヤング率を, 文献 11)~14) を参考にして表-1 のように設定した。なおポアソン比はコンクリートについて高温になると増加する場合と減少する場合が示された文献 15) があるが, 他に適当な参考値がなく常温の値と同じと仮定し, コンクリートと GRC は 0.2, 鉄筋は 0.3 とした。

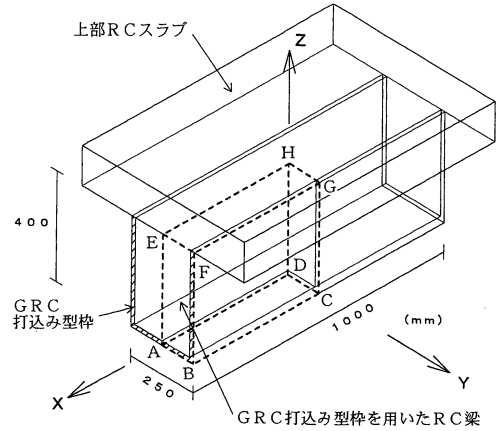


図-1 GRC 打込み型枠を用いた RC 梁

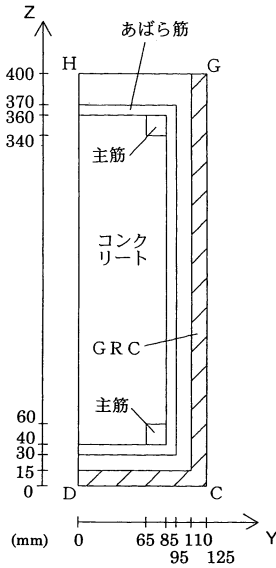


図-2 GRC 打込み型枠 RC 梁 Y-Z 断面図

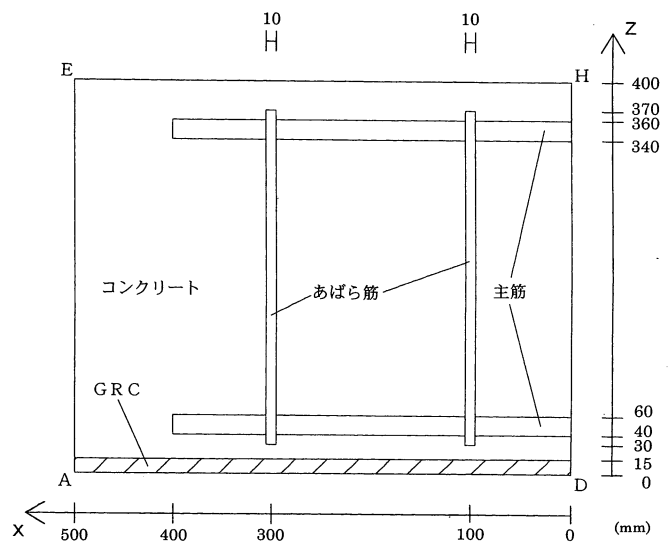


図-3 GRC 打込み型枠 RC 梁 X-Z 断面図

表-1 梁の構成材料の物性値の加熱経時変化

	加熱面からの距離 mm	初期			10分加熱			20分加熱			30分加熱			40分加熱			60分加熱			80分加熱			120分加熱		
		t	E	ϕ	t	E	ϕ	t	E	ϕ	t	E	ϕ	t	E	ϕ	t	E	ϕ	t	E	ϕ			
コンクリート	0~15	20	220	0	280	157	22	430	130	47	520	115	65	610	103	83	710	87	108	790	73	131	800	72	134
	15~30				180	177	12	280	157	22	360	141	35	430	130	47	550	111	71	650	97	95	680	92	103
	30~40				140	136	9	210	170	15	270	159	21	320	147	29	440	129	49	540	112	69	590	106	80
	40~60				110	194	6	160	182	10	200	172	14	230	165	17	340	144	32	430	130	47	490	121	58
	60~90				60	206	3	90	201	4	110	194	6	120	191	7	210	170	15	290	154	24	370	139	36
	90~125				30	217	0.5	40	214	1	45	212	2	50	211	2	120	191	7	190	174	13	260	161	20
GRC	0~15	20	250	0	280	192	37	430	159	58	520	139	71	610	118	84	710	104	110	790	93	135	800	90	137
あばら筋	30~40	20	2100	0	140	2020	12	210	1960	20	270	1900	28	320	1840	35	440	1630	53	540	1280	74	590	990	78
主筋	40~60	20	2100	0	110	2050	9	160	2000	14	200	970	19	230	1950	23	340	1810	38	430	1660	51	490	1490	61
加熱温度 (JIS)	20	-	-	725	-	-	815	-	-	860	-	-	900	-	-	945	-	-	985	-	-	1030	-	-	

t: 温度 °C, E: ヤング率 $\times 10^2$ N/mm², ϕ : 線膨張量 $\times 10^{-4}$

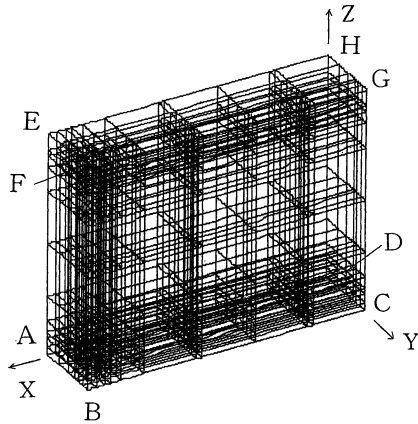


図-4 要素分割図

図-4はモデルの要素分割であり、座標軸に平行な面で分割し、726個の6面体、20節点のアイソパラメトリック要素を設定した。節点総数は3720個である。

ADHEの面はY方向の変位が0, CDHGの面はX方向の変位が0, EFGHの面はZ方向の変位が0, 他は節点力が0の境界条件を与えた。なおここで上部RCスラブとの接合面は火災時も平面であると仮定し、EFGH面に生じる鉛直変位を無視している。加熱途中の損傷はなく形状は初期と同じと仮定して原点からの割線によるヤング率を用いて、各経過時間での個別の計算を行った。数値計算はプログラムが公開されているソフト¹⁶⁾を用いて行った。

(2) 接合面に生じる応力の計算結果

図-5は、加熱時間の経過に対して接合面に生じる応力がどのように変化するかを、梁側面の接合面上について示している。加熱開始後20分から40分の間に応力が極大になるときがあり、その時刻は接合面の位置で多少異なっている。加熱20~40分後において応力が極大になるのは、これ以後温度が上昇するにつれて線膨張量の

差の影響よりヤング率の低下による応力緩和の影響が大きいからである。応力が最大であるのは、垂直応力度 σ_y とせん断応力度 τ_{yz} のいずれにおいても加熱後20分のときであり、その位置は $Y=110\text{ mm}$, $Z=15\text{ mm}$ (GRC打込み型枠の底板と側板の境目の位置の接合面)である。

加熱20分のときの梁側面の接合面上の応力を図-6に、梁底面の接合面上の応力を図-7に示す。面に垂直な垂直応力度と面に平行なせん断応力度は、いずれもGRC打込み型枠の底板と側板の境目($Y=110\text{ mm}$, $Z=15\text{ mm}$)に近いほど大きくなる傾向を示している。その傾向から応力の分布が多少ずれる箇所があるが、それは主筋に近接した箇所(梁側面では $Z=50\text{ mm}$ と 350 mm , 梁底面では $Y=75\text{ mm}$)の付近である。図-6と図-7はあばら筋に近い位置($X=100\text{ mm}$)とあばら筋から離れた位置($X=200\text{ mm}$)について示しており、両者に多少の差が出るのはあばら筋の影響である。

図-8は、梁の長さ方向(X軸方向)での応力の分布

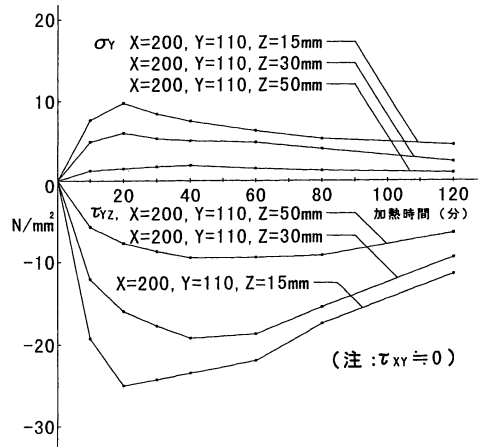


図-5 梁側面の接合面上の応力

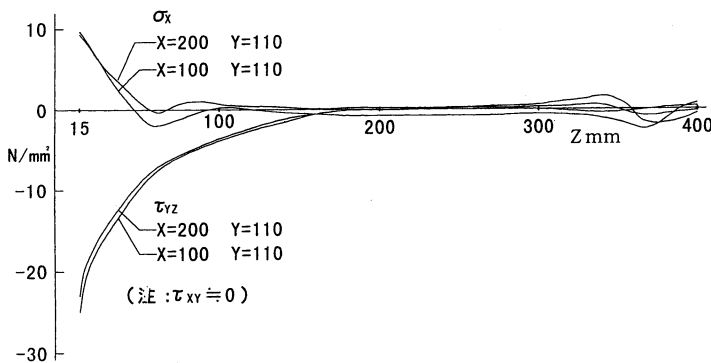


図-6 梁側面の接合面上の応力

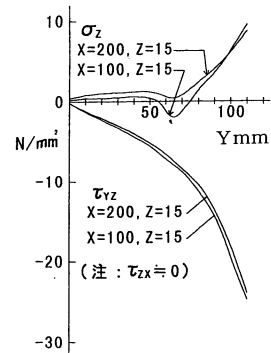


図-7 梁底面の接合面上の応力

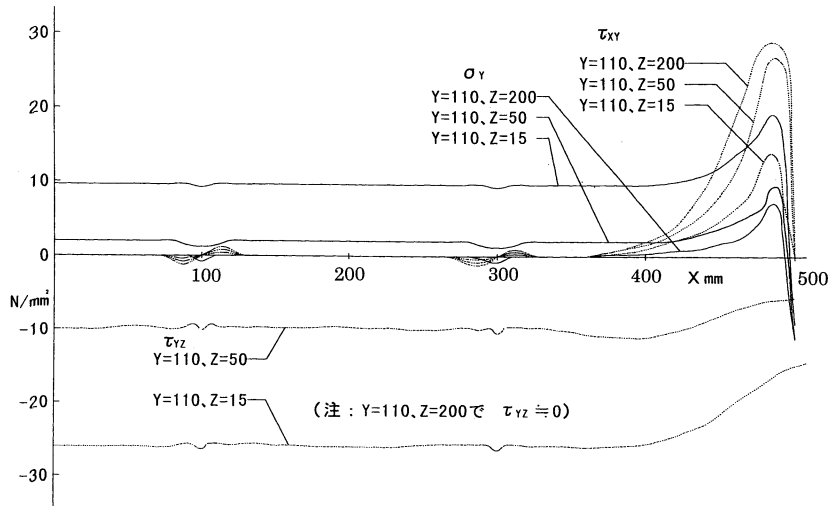


図-8 梁の長さ方向での応力分布

を示している。Xが0~300 mmの間において応力はほぼ一定の値である。X=100 mmと300 mmで少し変動しているのは、この位置にあるあばら筋の影響である。Xが400 mmの所から応力の値が変化し、Xが500 mmすなわち、梁小口(図-1のABFEの面)に近づくほどその変化の割合が急激になり、梁小口に近い箇所で大きな応力が生じている。

(3) 接合面の応力に関する考察

図-8に示したように、梁小口から離れた部分では、接合面に生じる応力は、梁の軸方向に変化が小さい。GRC打込み型枠を用いたRC梁は、通常端部を柱または大梁に接続され小口がないので、火災時の性質を検討するには、小口に近い部分でなく小口から離れた部分が対象になる。

小口から離れた部分では、接合面上の最大の応力は、加熱後20分のときに、GRC打込み型枠の底板と側板の境目の位置の接合面に生じ、接合面に垂直な引張応力度は約9 N/mm²、接合面に平行なせん断応力度は約25 N/mm²である。

梁小口から離れた部分において最初に損傷の起きる位置は、最大の応力が生じるGRC打込み型枠の底板と側板の境目近傍の接合面と考えられる。ただし、図-1に示す耐火試験体の全体で見ると、梁小口の近くに大きな応力が生じており、耐火試験体の接合面の損傷は、梁小口の付近で最初に起きると考えられる。

なお解析モデルは要素ごとの温度の分布を一定としているため、本来連続した温度の分布を隣り合った要素の境目で不連続として計算した。そのため、接合面の応力の計算結果は実際より大きくなるという誤差を含んでいる。また加熱過程で生じる局所的な損傷の影響は考慮し

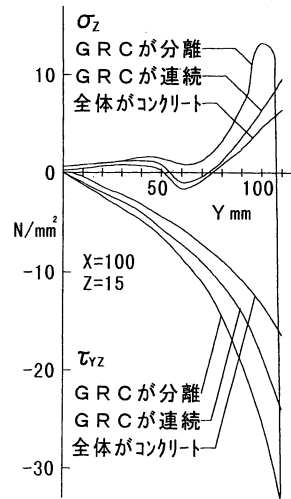


図-9 底面の接合面に生じる応力

ていない。

(4) GRC打込み型枠の底板と側板の連続性について

GRC打込み型枠の底板と側板を一体的に成形し両者が連続した構成の場合と、底板と側板を組み立てて両者が分離した場合を比較した。図-2のZ=15 mm, Y=110~125 mmの位置の面上で、GRC打込み型枠の底板と側板に属する節点をそれぞれ別に設けて、この面で底板と側板の間に応力が伝達しないモデルを作成した。GRC打込み型枠の底板とコンクリートとの接合面に生じる応力の計算結果は図-9になる。

図-9のように、GRC打込み型枠の底板と側板が分離している場合は、連続している場合に比べてコンクリー

トと GRC 打込み型枠の接合面に生じる応力は大きく、また $Y=110$ mm すなわち底板と側板の境目で応力が拡大しており特異性が表れている。このように接合された箇所と接合されていない箇所の境目が特異点となり、脆性的性質を持つ材料では不安定破壊の原因になって接合面が急激に剝離することになる。したがって GRC 打込み型枠の底板と側板が連続した構成にする方が、コンクリートとの接合面の剝離を抑えるのに有利であると考えられる。

なお図-9には、GRC 打込み型枠を用いず全体がコンクリートの場合についての計算結果を示している。図-9のように、GRC 打込み型枠を用いた場合は全体がコンクリートの RC 梁より接合面に生じる応力が大きい。

(5) GRC 打込み型枠とコンクリートの接合性能の検討

GRC 打込み型枠とコンクリートの接合面は、引張強度とせん断強度が大きいものほど、また強度に達した後も完全に分離するのではなく投錨効果等により接続しているものが望ましい。

円形凹みを付けた内面形状と亀甲金網を半分埋設した内面形状の GRC 打込み型枠がコンクリートとの接合性に優れており、 1 N/mm^2 程度の引張強度と 4 N/mm^2 程度の見掛けのせん断強度を有し、強度に達してキレツが生じた後も分離せずある程度の応力を伝達できることが報告されている^{1),17)}。これらの内面形状の GRC 打込み型枠を用いた場合でも、前述の接合面に生じる応力の計算結果とその考察を検討すると、GRC 打込み型枠の底板と側板の境目の近傍の接合面にキレツなどの損傷が起きると考えなければならない。

なおこれらのキレツなどの損傷の影響は解析していない。

3. 耐火試験

前述の検討結果から、円形凹みと金網埋設の内面形状をもち底板と側板が連続した構成の GRC パネルを打込み型枠に用いることが適当と考えられ、これらを用いて RC 梁の試験体を作成し、在来のコンクリートのみの RC 梁の試験体と共に耐火試験を行い耐火性能を調べた。GRC 打込み型枠を用いた RC 梁の常温における部材構造試験で性能を確認しているので^{7),8)}、ここでは鉄筋の温度で判定する無載荷加熱による耐火試験を用いた。

3.1 試験体作成方法

(1) GRC 打込み型枠

GRC 打込み型枠は、表-2 に示す調合を用い、プレミックス成形法にて作成した。試験体の断面寸法は、実

表-2 GRC の調合

使用原材料	重量比(%)
普通ポルトランドセメント	27.9
珪砂	53.3
マイクロシリカ	1.7
減水剤	1.3
耐アルカリ硝子繊維	3.1
水量	12.7

際に耐火試験の行われる標準的な断面寸法である幅 250 mm 高さ 400 mm とし、長さは大型試験炉の場合、4000 mm の試験体を使うことが多いが、今回使用した試験炉の大きさの関係から図-1 に示したように 1000 mm とした。また、端部小口を耐火被覆すると加熱面積が減少し、有利な条件となることから、図-8 に示す解析結果のように試験体小口の接合面に最も大きな応力が発生し不利な条件となるものの、試験体の両端小口面の耐火被覆を行わず試験することとした。

1) 円形凹み GRC 打込み型枠

円形凹み GRC 打込み型枠は、市販されているポリエチレン気泡シートを GRC 成形用金型の内面に両面テープで接着し、プレミックス GRC を打設した。硬化脱型後 GRC 側に持ち込まれたシートを剥がし、GRC 内面に、直径 10 mm、深さ 4 mm、ピッチ 14 mm の円形凹凸模様をつけた。図-10 に円形凹み GRC 打込み型枠の構造図を示す。

2) 金網埋設 GRC 打込み型枠

金網埋設 GRC 打込み型枠の作成は、底板と側板の部分を蝶番でつないだ型を広げ、GRC を所定厚の半分まで打設した後、線径 1.6 mm、 26×38 mm の網目状亜鉛引き亀甲金網を 30×30 mm の角材を用いて 60 mm ピッチの凹凸状に型押ししたものを乗せ、残りの GRC を打設した。GRC が半硬化状態の際に、蝶番から折り曲げ、底板と側板の GRC は連続した構成とした。な

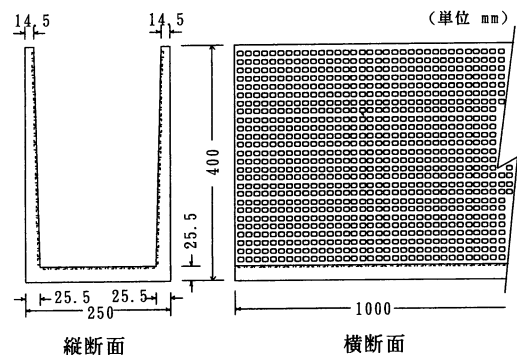


図-10 円形凹み GRC 打込み型枠構造図

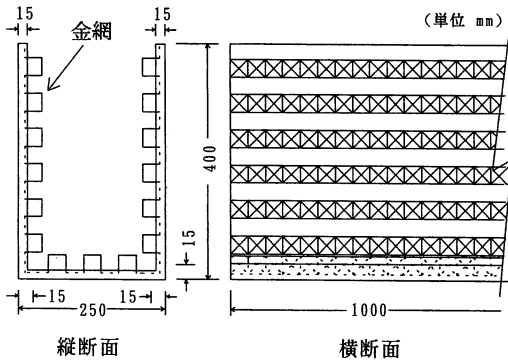


図-11 金網埋設 GRC 打込み型枠構造図

お、コーナー部は空洞が生じないようにコテ仕上げを行った。図-11に金網埋設 GRC 打込み型枠の構造図を示す。

これらの GRC 打込み型枠は成形後、一次養生として 60℃ の蒸気養生を 6 時間行った後、室内に 1 ヶ月保管する二次養生を行った。

(2) RC 梁試験体

GRC 打込み型枠は、コンクリート打設のときに型枠のはらみなどの変形が起きないように仮設の支持台上に設置した。その後、あらかじめ定められた位置に熱電対がセットされた鉄筋を型枠内に配筋した。鉄筋は、主筋が SD 295 D22 を、試験体上下左右位置に計 4 本、あばら筋が SD 295 D10 を、200 mm ピッチで長手方向に 4 本配筋した。配筋後、表-3 に示す調合および品質のコンクリートを打設した。なお、比較用として、GRC 打込み型枠を用いない在来 RC 梁を作成した。在来 RC 梁は合板型枠に配筋して表-3 に示す調合のコンクリートを打設し、1 週間後に合板型枠を脱型した。

GRC 打込み型枠 RC 梁および在来 RC 梁は、コンクリートが硬化した後に、あらかじめ成形された中央部に熱電対引き出し穴のあいた、600×1900×120 mm の床スラブを想定した RC 板をその上部に取り付けた。この上部 RC スラブと RC 梁の固定方法は、RC 梁のコンクリート打設の前に、両端のあばら筋近傍位置にあら

表-3 コンクリートの調合と品質

調 合	普通ポルトランドセメント	290 kg/m ³
	細 骨 材	844 kg/m ³
	粗 骨 材	1018 kg/m ³
	混 和 剤	3.07 kg/m ³
	単 位 水 量	167 kg/m ³
品 質	ス ラ ン プ	18.0 cm
	空 気 量	4.5%
	圧 縮 強 度	26.0 N/mm ²

じめセットされた埋め込み金物に上部 RC スラブの座掘り穴から長ボルトを通し固定した。この場合、加熱される梁部に対し上部 RC スラブは温度が低いことから、試験体両端の固定部において拘束力が働き、打込み型枠は膨張し、その中央部においてコンクリートと剥離しようとする力が働くと思われる。

RC 梁試験体は材齢 1 ヶ月まで室内に静置した後、含水率測定用のダミー試験体とともに強制乾燥を行い、含水率が建設省指定試験機関で耐火試験が行われる条件¹⁸⁾である 5% 以下に下がったことを確認して耐火試験を行った。

(3) 試験体構造および測温位置

円形凹み GRC 打込み型枠 RC 梁、金網埋設 GRC 打込み型枠 RC 梁、在来 RC 梁の構造および鉄筋の測温位置を示す小口断面図をそれぞれ図-12, 13, 14 に、また、試験体の側面から見た共通断面図を図-15 に示す。ここで、通常、耐火試験において、梁上部は上部 RC スラブからの冷却効果により温度上昇が低いことから、GRC 打込み型枠 RC 梁では上部のかぶり厚さを 20 mm とした。なお、在来 RC 梁では、建築基準法で定められているとおり一律 30 mm とした。つまり、GRC 打込み型枠 RC はりのかぶり厚さは、上部あばら筋 20 mm、上端主筋 30 mm であるが在来 RC 梁のそれらは、上部あばら筋 30 mm、上端主筋で 40 mm である。下部あばら筋および下端主筋では、いずれの試験体も前者が 30 mm、後者が 40 mm である。なおかぶり厚さは鉄筋表面から試験体表面までの距離であり

(単位 mm)

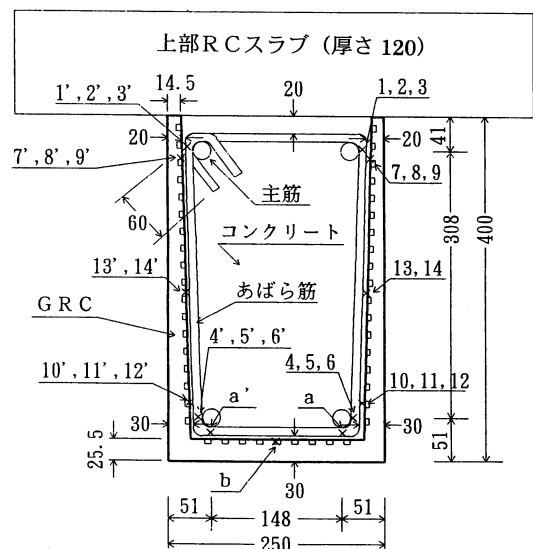


図-12 円形凹み GRC 打込み型枠 RC 梁

(単位 mm)

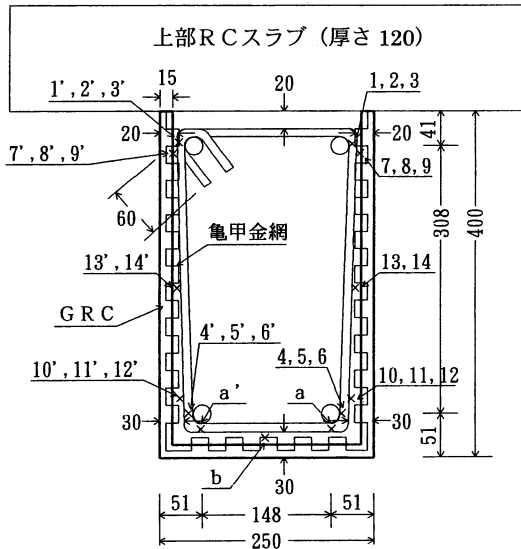


図-13 金網埋設 GRC 打込み型枠 RC 梁

(単位 mm)

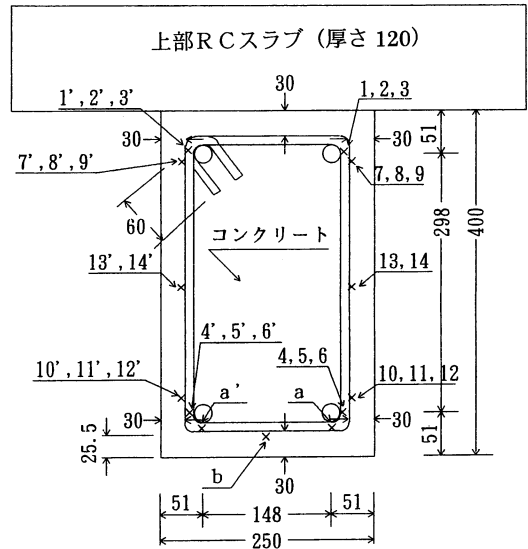


図-14 在来 RC 梁

(単位 mm)

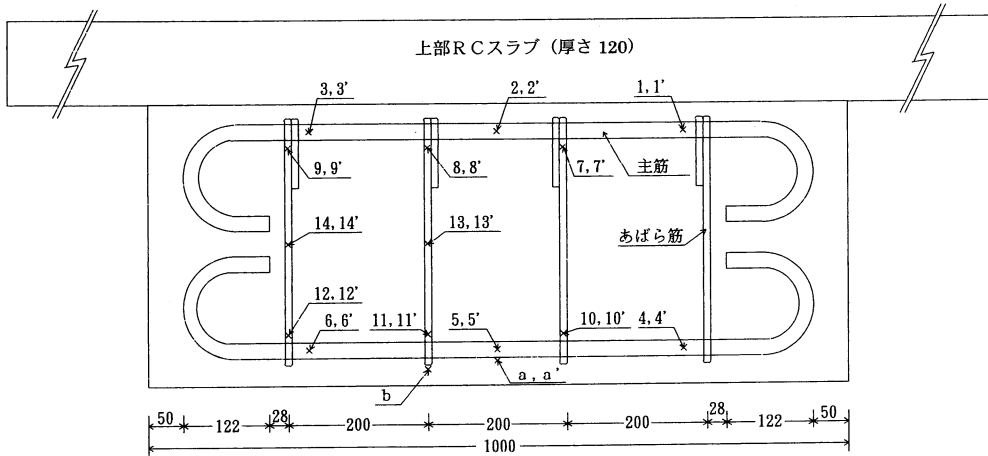


図-15 試験体共通横断面図

GRC 板の厚さを含んだ値である。測温位置については、主筋、上部と中央部と下部のあばら筋および鉄筋温度の最も上昇すると思われる位置に熱電対を取りつけた。

図-12~15 において、1,2,3, 1', 2', 3' は上端主筋の側面に取り付けられた熱電対位置を、また、4,5,6, 4', 5', 6' は下端主筋の側面に取り付けられた熱電対位置を示す。また、7,8,9, 7', 8', 9' は上部あばら筋側面位置に、10,11,12, 10', 11', 12' は下部あばら筋側面位置に、また、13,14, 13', 14' は中央部あばら筋側面位置に

取り付けられた熱電対位置を示す。また、a, a' は下端主筋下面位置に、b はあばら筋下面位置に取り付けられた熱電対位置を示す。

3.2 試験方法

耐火試験は、JIS A 1304 建築構造物の耐火試験方法の「はり」の2時間耐火試験方法に準拠して行った。実際に使用した試験炉は、図-16 に示す形状のもので、下方と左右側面からプロパンガスバーナーにて試験体を標準加熱曲線に沿って2時間加熱し、加熱中および加熱後の鉄筋の温度を測定した。炉内には、試験体の左右各3カ

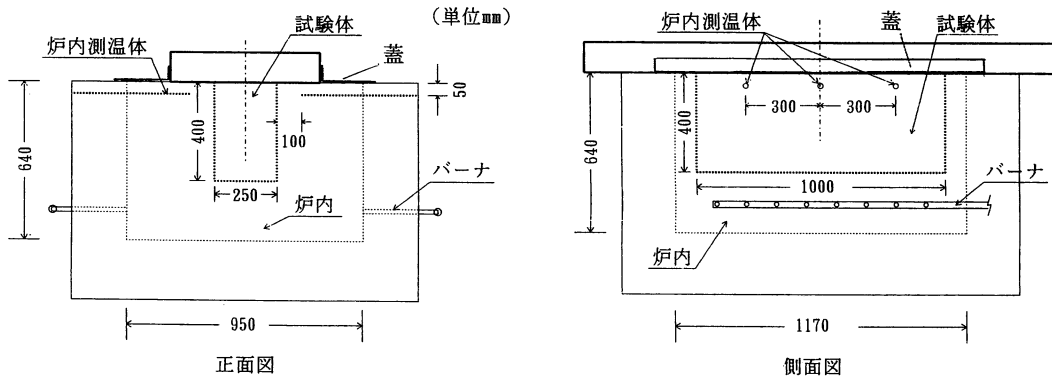


図-16 耐火試験状況

表-4 GRC 打込み型枠 RC 梁および在来 RC 梁の 2 時間耐火試験での各部の測温結果

加熱経過 時間	試験体 種類	温 度 (°C) (平均値)							炉内温度
		上端主筋側面	下端主筋側面	上部あばら筋	下部あばら筋	中部あばら筋	下端主筋下部	あばら筋下部	
		1,2,3,1',2',3'	4,5,6,4',5',6'	7,8,9,7',8',9'	10,11,12,10', 11',12'	13,14,13',14'	a, a'	b	
0 分	円形凹み	14.4	14.3	14.3	14.2	14.6	14.5	19.7	24.0
	金網埋設	5.8	6.1	5.3	6.8	6.0	8.1	7.0	47.5
	在来 RC	24.6	24.4	24.5	24.1	24.4	24.1	24.4	94.4
30 分	円形凹み	92.5	110.2	146.5	118.8	117.1	115.9	-	893.5
	金網埋設	97.3	127.4	132.2	161.1	147.4	124.4	178.6	864.0
	在来 RC	104.8	127.5	155.6	198.0	191.4	162.5	117.1	859.4
60 分	円形凹み	165.1	270.2	263.6	296.1	255.2	266.2	-	937.4
	金網埋設	146.6	331.8	250.7	369.5	310.5	329.1	387.0	945.5
	在来 RC	179.2	305.2	273.3	384.1	342.6	349.8	283.0	936.4
90 分	円形凹み	230.2	412.9	344.8	432.9	359.4	409.0	-	984.8
	金網埋設	216.1	484.4	336.0	508.1	425.2	482.6	527.7	986.5
	在来 RC	249.9	444.9	357.3	508.2	440.6	484.0	424.1	999.1
120 分	円形凹み	283.7	523.7	405.5	536.1	444.0	520.1	-	1007.1
	金網埋設	278.0	595.0	402.6	610.7	507.7	592.9	630.3	1011.2
	在来 RC	307.7	545.1	422.9	596.1	514.8	579.0	526.6	1034.6
最 大	円形凹み	294.0 (130分)	558.9 (137分)	409.6 (123分)	555.2 (130分)	456.2 (127分)	556.8 (138分)	-	1007.1 (120分)
	金網埋設	295.1 (136分)	623.1 (133分)	410.1 (126分)	626.2 (128分)	517.6 (126分)	621.1 (134分)	641.5 (126分)	1011.2 (120分)
	在来 RC	324.9 (136分)	575.6 (137分)	431.5 (126分)	607.2 (127分)	523.1 (126分)	590.1 (136分)	560.5 (138分)	1034.6 (120分)
150 分	円形凹み	275.0	545.1	324.5	514.7	393.6	544.4	-	320.6
	金網埋設	287.2	594.7	352.8	569.4	452.7	594.5	569.0	352.1
	在来 RC	315.9	560.6	372.1	545.2	451.0	557.3	550.9	302.9
180 分	円形凹み	230.5	463.5	247.7	422.1	310.1	464.0	-	62.9
	金網埋設	253.7	496.2	280.3	462.5	361.3	498.0	475.0	90.4
	在来 RC	279.6	482.7	307.7	452.6	373.0	471.4	481.8	203.2

所、直径 1 mm の CA 熱電対を試験体側面から 3 cm 離れた位置に置き、加熱中の炉内温度誤差が加熱 1 時間までは ±10% 以内、2 時間までは ±7.5% 以内になるように制御した。加熱が終了し、鉄筋の温度が低下したことを確認してから試験体を炉から取り出し、接合面の状況について調べるなど外観の目視検査を行った。

3.3 試験結果

(1) 鉄筋の測温結果

鉄筋温度の測定結果を表-4 に示す。GRC とコンクリートの分離により、鉄筋の温度が急激に上昇するような現象は観察されなかった。試験体の種類、および測温場所により異なるが、おおむね加熱開始から 125~140

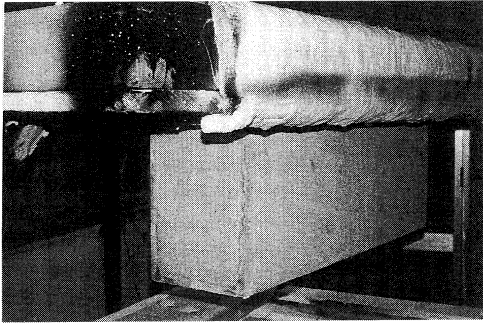


写真-1 円形凹み GRC 打込み型枠 RC 梁加熱試験後の外観

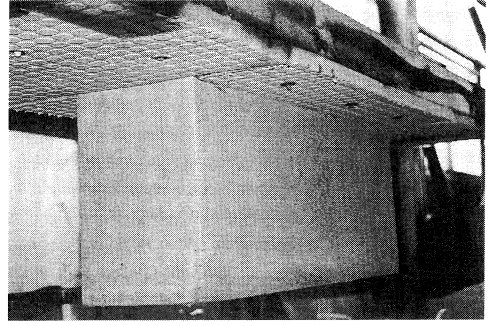


写真-3 在来 RC 梁加熱試験後の外観

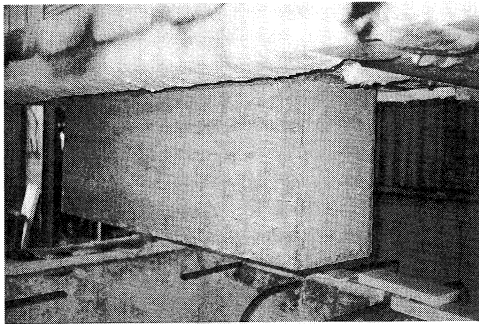


写真-2 金網埋設 GRC 打込み型枠 RC 梁加熱試験後の外観

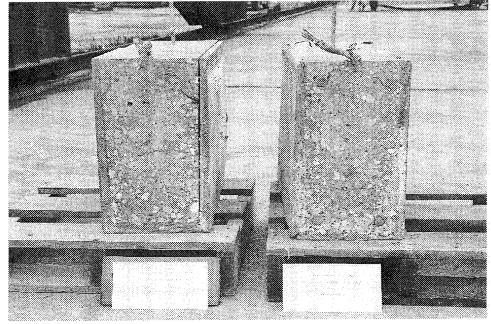


写真-4 加熱試験後の試験体切断断面。向かって左側が、円形凹み GRC 打込み型枠 RC 梁。右側が金網埋設 GRC 打込み型枠 RC 梁

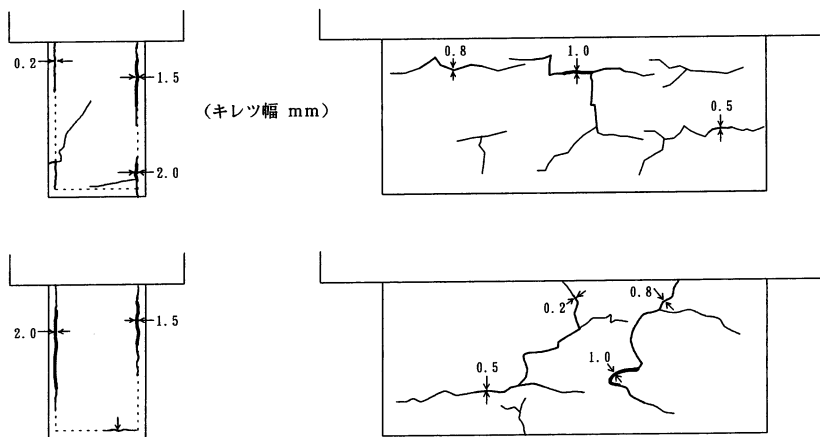


図-17 円形凹み GRC 打込み型枠 RC 梁加熱試験後のキレツ発生状況

分（加熱終了後5～20分）で温度の最大値を示した。

(2) 加熱後の試験体の外観検査結果

加熱終了後の外観を写真-1～3に、また試験体のキレツ発生状況を図-17～19に示す。キレツ幅については、比較的大きくかつ目視で計測が可能な0.2mm以上の幅について図中に表記した。なお建築物の診断で、鉄筋

が錆びる恐れがあるかないかの判断の指標にキレツの幅0.2mm以上が用いられており、これも参考にした。0.2mm以下のキレツについては寸法の測定は行わずスケッチにとどめた。GRC打込み型枠RC梁については加熱試験終了後の試験体について、それぞれ中央部から切断し、切断面を写真撮影した。その結果を写真-4に

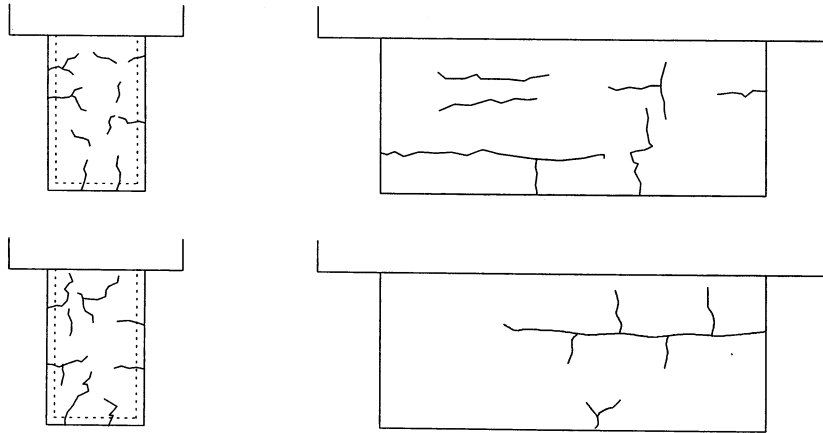


図-18 金網埋設 GRC 打込み型枠 RC 梁加熱試験後のキレツ発生状況

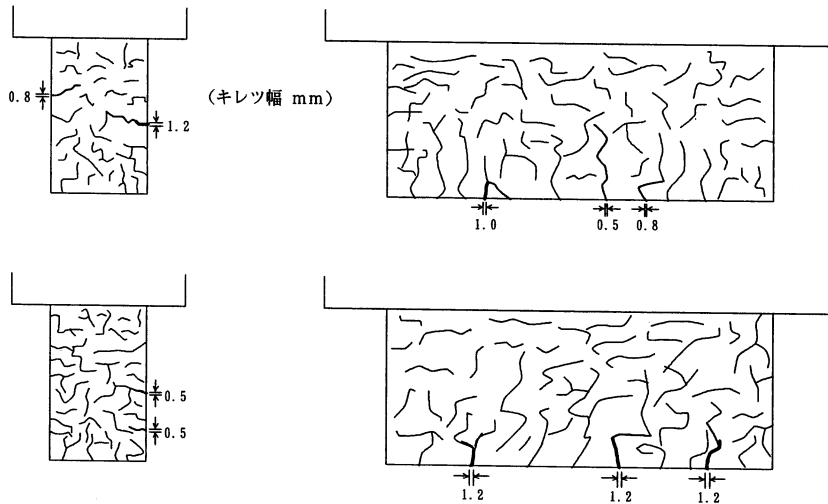


図-19 在来 RC 梁加熱試験後のキレツ発生状況

示す。写真-4 から、円形凹み GRC 打込み型枠 RC 梁は接合面に若干の剝離が見られるものの、金網埋設 GRC 打込み型枠 RC 梁は良好な状態を保っていた。なお、在来 RC 梁については、加熱終了後ハンドリング過程中的のコンクリート部の強度低下に起因するくずれが激しく、上記に示す切断は行えなかった。

4. 考 察

表-4 の結果をもとに、同じかぶり厚さにおける鉄筋の温度をグラフにすると図-20~23 に示すようになる。図-20 が他のグラフに比べ、全体的に温度が低い理由は、上部 RC スラブが上方から加熱を受けないため、そこからの冷却効果が原因と考えられる。上に取り付けられた上部 RC スラブとその下の RC 梁の断面積比率は約 7 : 10 であり、上部 RC スラブが及ぼす冷却効果

は大きい。また、図-20 において、在来 RC 梁の测温結果が、GRC 打込み型枠のそれらの値に比べて高い値を示した理由は、前者の鉄筋位置が後者に比べて上部 RC スラブより 10 mm 大きく下がっていて、上部 RC スラブからの冷却効果を受けにくいためと考えられる。

図-21~23 において、かぶり厚さの違いによる鉄筋の昇温の違いがあまり見られなかった理由として、鉄筋の熱伝導率の影響が考えられる。つまり、鉄の熱伝導率が $55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ であるのに対し¹⁹⁾、GRC 打込み型枠もしくはコンクリートのそれは $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ である^{19),20)}。したがって、鉄筋は、コンクリートの温度より接している鉄筋温度の影響をより大きく受ける。図-21 のかぶり厚さ 30 mm はあばら筋の位置であり、図-22, 23 のかぶり厚さ 40 mm は主筋の位置である。あばら筋の断面積に比べ、主筋のそれは 4.8 倍であること

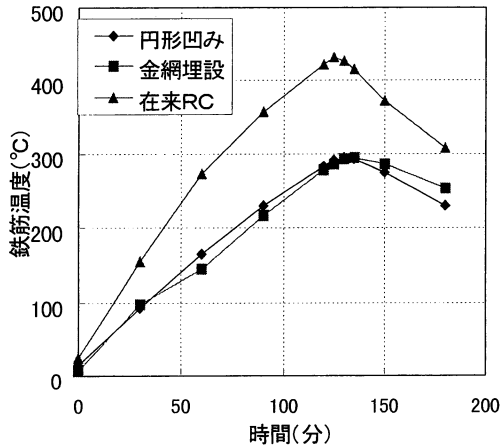


図-20 鉄筋温度の経時変化 (梁上・側面かぶり厚さ 30 mm)

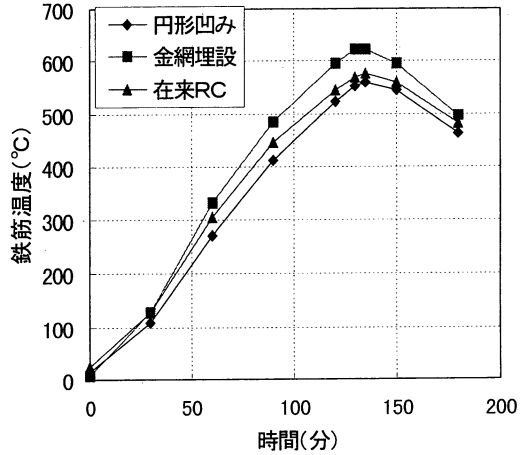


図-22 鉄筋温度の経時変化 (梁下・側面かぶり厚さ 40 mm)

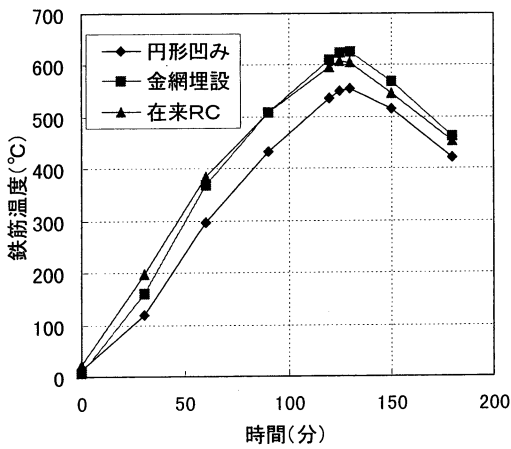


図-21 鉄筋温度の経時変化 (梁下・側面かぶり厚さ 30 mm)

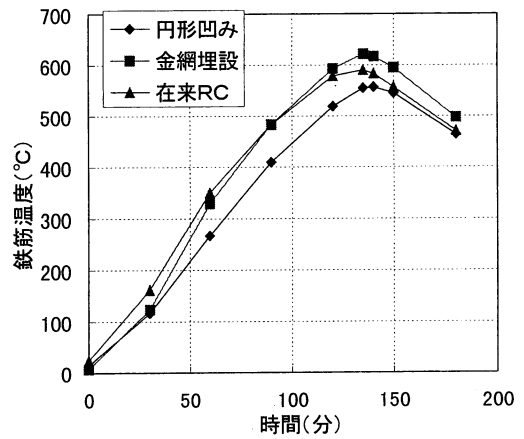


図-23 鉄筋温度の経時変化 (梁下・底面かぶり厚さ 40 mm)

表-5 耐火構造はりの2時間耐火試験判定結果

試験体種類	円形凹み GRC 打込み型 RC 梁試験体	金網埋設 GRC 打込み型 RC 梁試験体	在来 RC 梁試験体
判定条件	GRC 打込み型枠の若干の剝離あるも脱落には至らず	問題なし	問題なし
加熱中、耐火上および構造耐力上有害な変形、破壊、脱落の変化を生じないこと	問題なし	問題なし	問題なし
加熱中鋼材の最高温度が 500℃以下であること	最高温度 536.19℃ ※1)	最高温度 630.3℃ ※2)	最高温度 596.1℃ ※3)
構成材料の一部が不燃材料でないものにあつては、加熱終了後 10 分間火気が残存しないこと	火気の残存見られず。	火気の残存見られず。	火気の残存見られず。

※1~3) 表-4 から、120 分加熱終了時の最高温度を示した。

から、熱容量的にも主筋温度に支配される。

図-21~23 において、円形凹み GRC 打込み型枠 RC 梁が他のものに比べて鉄筋の昇温が若干低い理由として、加熱中に、図-17 および写真-4 に示すように接合面に部分的な剝離が生じ、空気による断熱層が形成されたからと考えられる。ただし、この剝離も大きくなると、鉄筋温度の急激な上昇、さらには GRC 打込み型枠の剝落等の問題が生じるが、今回、そのような問題は発生しておらず、耐火上有害な変形、脱落は生じていない。

一方、金網埋設 GRC 打込み型枠 RC 梁は、図-18 および写真-4 に示すように、加熱後の剝離は見られなかった。図-21~23 の鉄筋温度も、在来 RC 梁の鉄筋温度の上昇と似た様相を呈している。金網埋設 GRC 打込み型枠 RC 梁試験体の場合、GRC 打込み型枠に埋設された金網の GRC 表層部からの距離が浅いので、その

部分の発錆の恐れが考えられるが、GRC 打込み型枠は、組織が緻密であり中性化の進行は極めて遅いことが確認されている^{9),21)}。

今回の耐火試験結果を、建設省告示第 2999 号に規定する「耐火構造のはりの 2 時間耐火試験」の判定基準に照らし合わせると表-5 に示すとおりとなる。

表-5 から、今回の試験体はいずれも鋼材温度が 500℃ 以下の基準を超えた。基準の 500℃ 以下になるべき在来 RC 梁の場合も超えており、今回の試験体が小口耐火被覆を施していないため、加熱面積が大きくなり、全体に試験体の温度が上昇したためと考えられる。建築基準法により在来 RC 梁は、2 時間の耐火性能を有することが認められており、耐火性能判定に合格するには小口部分を耐火被覆した大型はり試験体で確認する必要がある。

5. ま と め

GRC 打込み型枠を使用した RC 梁の耐火性能について、GRC 打込み型枠をかぶり厚さに含めるという前提で検討し、以下のような知見が得られた。

(1) GRC 打込み型枠とコンクリートの接合面に生じる応力を、耐火試験の加熱開始から加熱 120 分までの間について 3 次元有限要素法で計算した結果、GRC 打込み型枠の底板と側板の境目近傍に最大の引張応力とせん断応力の発生が見られた。またこれらの最大の応力の発生は、加熱後 20 分程度経過した時であった。加熱時に GRC 打込み型枠とコンクリートが分離するのを防ぐには、コンクリートとの接合性能が高く、底板と側板が連続した構成の GRC 打込み型枠を用いることが必要と考えられた。

(2) コンクリートとの接合性能の高い円形凹み内面形状または金網埋設内面形状で、底板と側板が一体化するように成形した GRC 打込み型枠を用いた RC 梁の試験体を作成して耐火試験を行い、以下の結果を得た。

1) 金網埋設 GRC 打込み型枠を使用した RC 梁は、GRC とコンクリートとの付着性が優れ、加熱後の剥離も見られなかった。鉄筋の昇温も在来 RC 梁試験体と同様な傾向を示した。

2) 円形凹み GRC 打込み型枠を使用した RC 梁は、GRC 打込み型枠とコンクリートの接合面に部分的な剥離が生じたが、剥落には至らなかった。また、剥離に伴う断熱層の形成により、鉄筋の昇温傾向は他のものに比べ低い傾向が見られた。

3) 数値計算の結果では、GRC 打込み型枠とコンクリートの接合面の一部の箇所には強度より大きい応力が生じたが、それらの箇所では耐火試験において部分的な接合面の剥離が見られただけで、剥落などは起きなかった。これは、GRC 打込み型枠の底板と側板を接続した

構成にしたこと、コンクリートとの接合性に優れた GRC 打込み型枠を用いたためと考えられ、GRC 打込み型枠の適用においては底板と側板の連続性とコンクリートとの接合性が重要である。

(3) 底板と側板が連続しかつコンクリートとの接合性に優れた GRC 打込み型枠を使用した RC 梁は、同じ断面の在来 RC 梁と同程度の耐火性能を有し、GRC 打込み型枠をかぶり厚さに含めることが可能であると考えられる。

(4) なお建築基準法が改定され、また耐火試験方法が近く見直しになるので、これに対応して GRC 打込み型枠を用いた RC 梁が構造部材としての耐火性能を有することは載荷加熱試験により確認すべきである。また数値解析で耐火性能を評価するには、部材内の温度を連続した分布として計算する必要がある。

[謝 辞] 本研究に協力いただいた日本 GRC 工業会技術部会に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 平居孝之ほか：GRC 打込み型枠とコンクリートの接合面における応力伝達に関する基礎的考察，日本建築学会構造系論文集，第 485 号，pp. 17~24, July 1996
- 2) 何 仕栄・平居孝之・村上 聖・福田亮治：接合面に凹凸を付けたコンクリートのせん断応力伝達性能に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol. 18, No. 2, pp. 11~18, 1997
- 3) 何 仕栄・平居孝之：表面にシャーキを付けたガラス繊維補強セメントパネルとコンクリートの接合性状に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No. 497, pp. 9~15, 1997
- 4) A.J. Majumdar and J.F. Ryder : Glass Fibre Reinforcement of Cement Products, Journal of Glass Technology, Vol. 9, No. 3, pp. 78-84, June 1968
- 5) 鈴木由郎：耐アルカリ性ガラス，セラミックス，Vol. 1, 11, No. 7, pp. 54~61, 1976
- 6) 岸谷孝一：ガラス繊維強化セメント/GRC，セメントコンクリート，No. 377, pp. 2~4, July 1978
- 7) 村上 聖ほか：GRC 打込み型枠による鉄筋コンクリートはりの構造特性に関する実験的研究その 1 変形および耐荷性状，日本建築学会構造系論文集，第 487 号，pp. 21~28, 1996
- 8) 村上 聖ほか：GRC 打込み型枠による鉄筋コンクリートはりの構造特性に関する実験的研究その 2 負荷の下での GRC 打込み型枠の付着剥離性状，日本建築学会構造系論文集，第 494 号，pp. 29~36, 1997
- 9) 依田彰彦・横室 隆・平居孝之・藤田直明：GRC 打込み型枠を使用した RC の中性化試験 (Ⅲ)，第 11 回 GRC シンポジウム講演要旨集，pp. 1~4, 1999
- 10) 竹内好雄・藤田直明・平居孝之：GRC 打込み型枠を使用した梁の施工に関する考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20, No. 2, pp. 1219~1224, 1998
- 11) 浜田 稔ほか：建築学大系 21 建築防火論，彰国社，pp. 202~230, 1970

- 12) 原田 有：建築耐火構法，工業調査会，pp. 23～29，pp. 64～66，1973
- 13) 日本建築学会：構造用教材，日本建築学会，p 39，1995
- 14) 岸谷孝一ほか：GRCの物性と試験方法，日本GRC工業会，pp. 70～73，pp. 109～112，1988
- 15) U. Schneider・森永 繁監訳：コンクリートの熱的性質，技報堂出版，1983
- 16) 平居孝之ほか：WINDOWS 95 対応パソコン 3次元有限要素法，共立出版，1997
- 17) 前田孝一ほか：GRC打込み型枠に関する研究(1)接着試験と曲げ試験，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 529～530，1996
- 18) 建設省建築研究所：耐火構造等試験運用指針・防火材料試験運用指針，p 1-4)-1，Mar. 1995
- 19) 国立天文台編：理化年表，物 54-55，1998
- 20) 岸谷孝一ほか：GRCの物性と試験方法，日本GRC工業会，p 107，1988
- 21) 星野富夫・魚本健人・小林一輔：海洋環境下に長期間暴露した各種被覆材料を施した鉄筋コンクリート梁の耐久性と防食効果，コンクリート工学年次論文集，Vol. 18，No. 1，pp. 759～764，1996

(原稿受理年月日：1999年1月10日)

Fundamental Study on Fire Resistance Properties of Reinforced Concrete Beams Using GRC Casting Formworks

By Naoaki Fujita, Takayuki Hirai, Kiyoshi Murakami and Yoshiaki Sato

Concrete Research and Technology, Vol. 10, No. 3, Sept. 1999

Synopsis The tensile stress and shearing stress on the interface between the GRC casting forms and the concrete of the reinforced beam during fires were calculated by finite element method. Two types of GRC casting formworks were selected to improve joining performance between GRC and concrete. One was putting embossment and the other was burying wire net on the inside surface of GRC casting formworks. Fire resistance test was carried out on reinforced concrete beams covered with these GRC casting formworks and also to the reinforced concrete beam without GRC formwork. From these tests it was recognized that GRC formwork in which wire net was buried showed good joining performance between GRC and concrete. GRC formwork which has embossment on inside surface showed a little separation because the ascent of the temperature of the steel showed lower than in the other specimens and this fact was confirmed by the inspection of the specimen after the heating test but it was not so serious. It can be considered that RC beams using GRC permanent formworks have the similar degree of fire resistance properties with the conventional RC beam without formworks.

Keywords : glass fibre reinforced cement, casting formworks, reinforced concrete beam, fire resistance, bonding property