

共同住宅向けFR鋼メンブレン耐火工法の開発

Development of the Fire-Protective System (Membrane System)

Using Fire-Resistant Steel for Cooperative Houses

窪 田 伸^{*(1)}
Shin KUBOTA

作 本 好 文^{*(2)}
Yoshifumi SAKUMOTO

抄 録

建築構造用耐火鋼材(FR鋼)は、耐熱性を向上させる合金元素(モリブデンなど)を添加することで高温強度を向上した鋼材で、鋼材温度600℃で常温規格値の2/3(長期許容応力度)以上の耐力(降伏点)を有している。しかし、住宅など可燃物が多い建物で火災が発生すると火災温度は1 000℃程度に達することから、このような建物にFR鋼を適用しても、ロックウールなどの耐火被覆を省略することはできない。共同住宅を対象に、内装材(壁、天井)の遮熱効果を利用したFR鋼無耐火被覆鉄骨構造とその耐火設計手法の開発について述べた。

Abstract

Fire-resistant steel for building structure (FR Steel) is the one whose high-temperature intensity is improved by adding alloy elements (e.g. molybdenum) with heat-resistant enhancing ability. At 600 centigrade, the steel has over 2/3 yield of the standard value at normal temperature, which is long-term permissible stress. On the other hand, a fire temperature reaches about 1,000 centigrade in case of a fire in a building with a lot of flammables such as a house, therefore, applying FR steel to this kind of building cannot eliminate insulating shield, rock walls, for example. With cooperative houses as our target, we have developed FR steel non-fire-resistant shield steel framed construction and its fire-resistance design method, which makes use of the thermal insulation effects of the interior materials (walls and ceilings).

1. 緒 言

鉄骨造建築物で不特定多数の人が利用する建物(特殊建築物:建築基準法第27条)及び市街地に建設する建物(同法第61条, 62条)は、火災時に熱で鋼材の強度が低下することから、ロックウールなどの耐火被覆で鉄骨を保護することが建築基準法により義務付けられている。耐火被覆は、建設コストだけでなく、工期短縮、吹付け工事の作業環境(人手不足や周辺への飛散、養生)などの面から鉄骨造建築物の競争力を阻害する一因となっている。また、近年、鉄骨そのものを建物のデザインに取り入れる試みが多く、この点からも無耐火被覆の鉄骨造建築物の実現が望まれていた。

建築構造用耐火鋼材(FR鋼)は、このようなニーズに対応して1988年に開発した鋼材で、高温時における耐力(降伏点)が従来の一般構造用鋼材と比較して高く、鋼材温度600℃で常温規格値の2/3(長期許容応力度)以上の耐力を有している(許容温度600℃相当)。そのため、立体駐車場やアトリウムなど可燃物が少なく、火災が発生しても鉄骨の温度が600℃以下となる建物では耐火被覆を省略できる。しかしながら、住宅など可燃物が多い建物で火災が発生すると、火災温度はFR鋼の許容温度を大きく上回る(約1 000℃)

ことから、このような建物にFR鋼を適用しても耐火被覆を省略できない。

一方、住宅などの室内には壁、天井などの内装材(不燃材)が設けられており、その遮熱効果が期待できるが、鉄骨部材の耐火被覆としては利用されていない。これは、内装材が火災加熱を受けると継ぎ目に隙間が生じるため、一般鋼(許容温度:350℃)では要求性能(所定の火災加熱に対して鉄骨温度を350℃以下にする)の確保が難しいためである。

本開発は、建築基準法第27条により耐火被覆が必要となる共同住宅(3階以上)を対象に、柱、梁に高温性能に優れたFR鋼を適用し、内装材の遮熱効果を利用することで耐火被覆の省略を試みたものである(以下、FR鋼メンブレン耐火工法)。

2. FR鋼の特性

FR鋼は、耐熱性を向上させる合金元素(モリブデンなど)を添加することで高温強度を向上した鋼材である。FR鋼(NSFR400)及び一般鋼(SS400)の強度の温度依存性を図1に示す。一般鋼の耐力(YP)は温度上昇に伴い、ほぼ直線的に低下し、350℃付近で常温規格値の2/3(157N/mm²)まで低下するが、FR鋼は、一般鋼と比

*⁽¹⁾ 建材開発技術部 マネジャー
東京都千代田区大手町2-6-3 ☎100-0014 ☎(03)3275-7777

*⁽²⁾ 建材開発技術部 グループリーダー(薄板営業部兼務) 工博

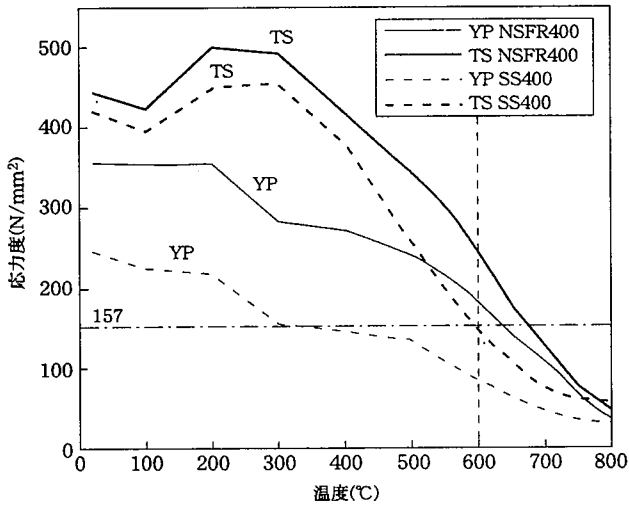


図1 高温強度の温度依存性

較して耐力低下が少なく、600°Cにおいて常温規格値の2/3以上の耐力を保持している。引張強さ(TS)については、一般鋼、FR鋼ともほぼ同様の傾向を示すが、600°CにおけるFR鋼の引張強さは一般鋼の約2倍となっている。

3. 耐火設計手法

FR鋼メンブレン耐火工法の耐火設計フローを図2に示す。住宅における火災は、建設省告示第2999号に規定される標準加熱(以下、標準加熱)とほぼ等しいことから、本耐火設計手法では、火災性状予測(火災温度や火災継続時間を予測する)は行わず、火災条件

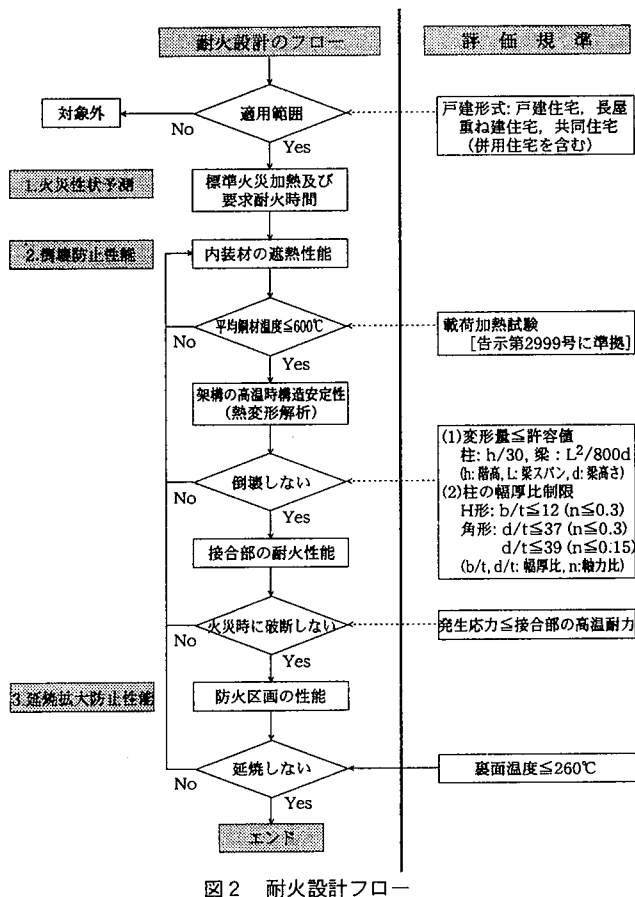


図2 耐火設計フロー

として標準加熱を採用した。また、延焼拡大防止性能(隣接区画への延焼を防止する性能)確保のために、防火区間部の性能(所定の火災加熱に対して非火災区画側の温度を木材の着火温度である260°C以下に抑える性能)を耐火試験または熱伝導解析により確認する。

本耐火設計手法は、階数に関わらず全ての共同住宅に適用することができるが、本報では、4階以下の共同住宅(要求耐火時間: 1時間)を例に倒壊防止性能の確認手法を説明する。

4. 内装材の遮熱性能

内装材の遮熱性能は、建設省告示第2999号に規定される載荷加熱試験により確認する。以下に、柱、梁の載荷加熱試験結果を示す。

4.1 試験体

試験体は、共同住宅で多く使用される石膏ボードを用いた壁及び天井で柱、梁を遮熱したもの(以下、メンブレン)をそれぞれ2体準備した。なお、壁及び天井の遮熱性能を高めるために、石膏ボードはJIS A 6901に規定される強化石膏ボード(以下、石膏ボード)とした。また、壁、天井内に納まらない柱、梁(吹抜け部の梁など)も想定されることから、石膏ボードで柱、梁を直接囲った試験体(以下、囲い型)もそれぞれ2体準備した。なお、試験条件を表1に、試験で使用したFR鋼(柱: STKR400-FR、梁: SM400-FR)の常温時及び600°Cにおける機械的性質を表2に、石膏ボードの含水率、比重を表3に示す。

表1 試験条件

試験種類	内装材	試験数	記号	試験所
柱	メンブレン 強化石膏ボード(厚15mm)	2体	CM1, 2	建材試験センター
	囲い型 強化石膏ボード(厚15mm)	2体	CE1, 2	日本建築総合試験所
梁	メンブレン 強化石膏ボード(厚12.5mm×2枚)	2体	BM1, 2	建材試験センター
	囲い型 強化石膏ボード(厚15mm)	2体	BE1, 2	建材試験センター

表2 機械的性質

種類	種類	降伏点 (N/mm ²)		引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
		常温	600°C		
柱	STKR400-FR (厚3.2mm)	424	214	478	23
梁	SM400-FR (厚4.5mm)	362	184	470	35
規格値		245以上	157以上	400以上	23以上

表3 石膏ボードの含水率及び比重

種類	石膏ボードの種類	含水率(%)	比重	乾燥状況
柱	メンブレン 強化石膏ボード(厚15mm)	0.20	0.78	40°C7日間乾燥
	囲い型 強化石膏ボード(厚15mm)	0.17	0.87	
梁	メンブレン 強化石膏ボード(厚12.5mm)	0.50	0.80	40°C7日間乾燥
	囲い型 強化石膏ボード(厚15mm)	0.20	0.78	

4.1.1 柱

メンブレン試験体の形状を図3に示す。試験体枠の中央にFR鋼柱(□-125×125×3.2, STKR400-FR)を設置し、内壁側に石膏ボード(厚15mm)をタッピンねじで取り付け、外壁側にALC板(厚100mm)を取り付けた。なお、石膏ボードの取り付け下地は鋼製とした。

囲い型試験体の形状を図4に示す。石膏ボード(厚15mm)は、FR鋼柱(□-125×125×3.2, STKR400-FR)に石膏系接着剤で取り付けた。なお、石膏ボードと柱の間にはスペーサー(厚6mm, @600mm)を挟んでいる。更に、コーナー部にはコーナーカバー(L-30×30×0.4)を取り付けた。

4.1.2 梁

メンブレン試験体の形状を図5に示す。試験体枠の中央にFR鋼梁(H-150×100×3.2×4.5, SM400-FR)を設置し、その上側に床板としてALC板(厚100mm)を取り付けた。その後、床板から吊した鋼製下地(野縁)に、天井材として石膏ボード(厚12.5mm×2枚)をタッピンねじで取り付けた。

囲い型試験体の形状を図6に示す。試験体枠の中央にFR鋼梁(H-300×150×3.2×4.5, SM400-FR)を設置し、その上側に床板としてALC板(厚100mm)を取り付けた。その後、梁側面には、梁のウェブに取り付けた繊維混入けい酸カルシウム板に石膏ボード(厚15mm)をスクリュー釘で取り付け、梁下面には、石膏ボード(厚15mm)をタッピンねじと石膏系接着材で取り付けた。なお、梁下面の石膏ボードと梁フランジの間には、スペーサー(厚6mm, @600mm)を挟んでいる。更に、コーナー部には、コーナーカバー(L-30×30×0.4)を取り付けた。

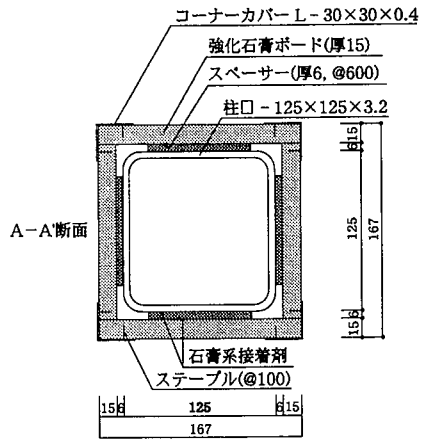
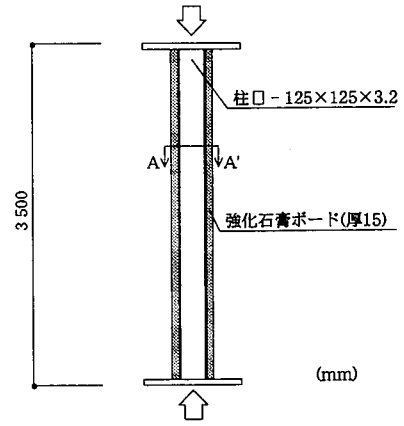


図4 試験体形状(柱, 囲い型)

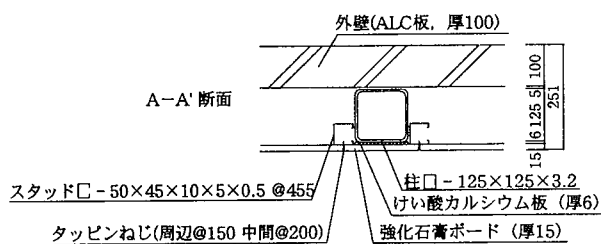
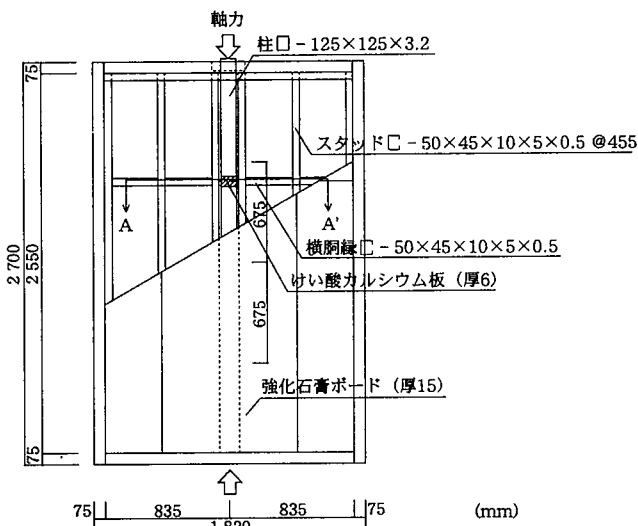


図3 試験体形状(柱, メンブレン)

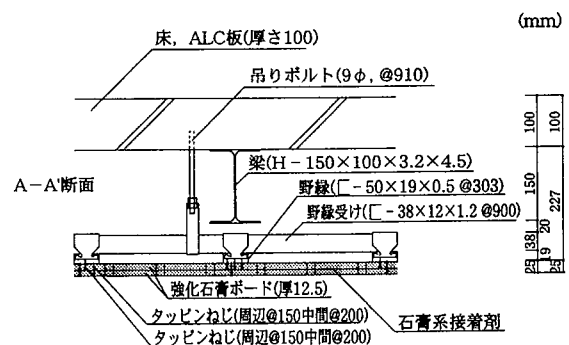
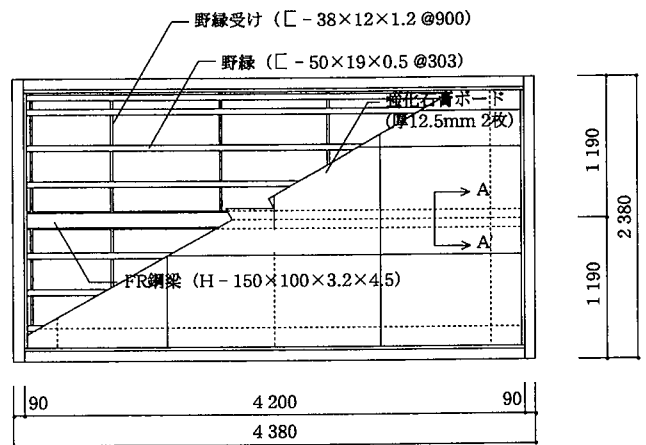


図5 試験体形状(梁, メンブレン)

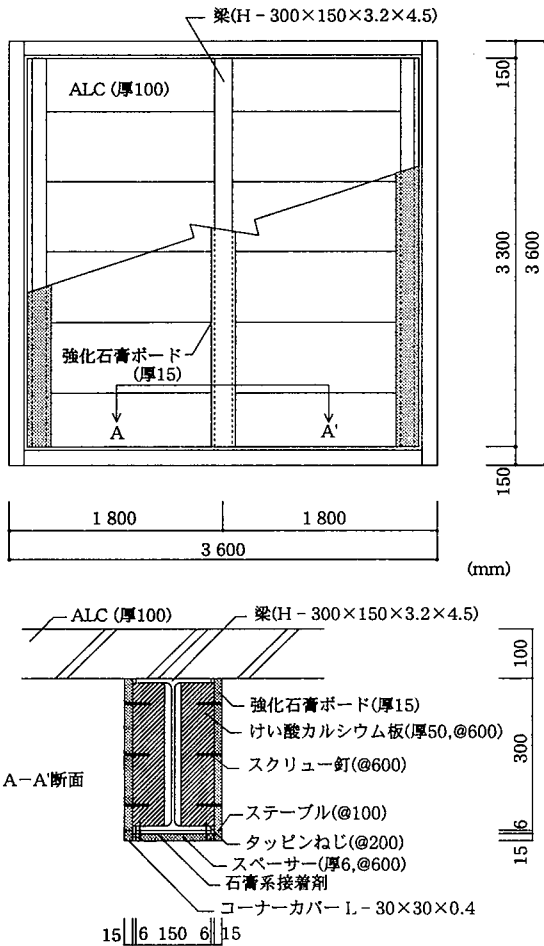


図6 試験体形状(梁, 囲い型)

4.2 試験方法

試験方法は、建設省告示第2999号に示される荷重加熱試験方法に準じた。なお、試験の合否判定規準を以下に示す。

要求耐火時間の間継続する火災加熱(標準加熱)に対して、

- (1)平均鋼材温度がFR鋼の許容温度である600℃を越えないこと
- (2)部材の変形量が次に示す値を越えないこと

柱：軸方向収縮量 $\leq h/100$ (mm)

軸方向収縮速度 $\leq 3 h/100$ (mm/min)

ここで、h：柱長さ(mm)

梁：たわみ量 $\leq L^2/400d$ (mm)

たわみ速度 $\leq L^2/9000d$ (mm/min)

ここで、L：梁長さ(mm)，d：梁高さ(mm)

4.2.1 柱

メンブレン試験体は建材試験センターの壁炉で試験した。柱の長さ(支点間距離)は2550mmである。載荷荷重は共同住宅における柱軸力の調査結果(最大軸力比：0.28)をもとに、軸力比：0.3に相当する荷重(11.03t)とした。加熱は屋内火災を想定し、片面加熱(内側壁)とした。試験は柱が荷重を支持できなくなった時点で終了した。以下、本報ではこの荷重が支持できなくなった時点をもって崩壊時間と定義する。

囲い型試験体は日本建築総合試験所の柱炉で試験した。柱の長さ(支点間距離)は3500mm，加熱有効長さは3000mmである。加熱は全周加熱とし、載荷荷重及び試験の終了はメンブレンの試験と同様とした。

4.2.2 梁

メンブレン試験体は建材試験センターの梁炉で試験した。梁の長さ(支点間距離)は4200mmである。載荷方法は、1m²当たり180kg(建築基準法に規定される住宅の積載荷重)に相当する荷重を床板に載せ、更に、梁の外縁に長期許容応力(1600kgf/cm²)が生じる荷重と梁中央のたわみがL/300(L：梁長さ)になる荷重のうち、小さい荷重を梁に直接載荷した。加熱は梁が荷重を支持できなくなった時点で終了した。

囲い型試験体は建材試験センターの水平炉で試験した。梁の長さ(支点間距離)は3300mmである。載荷方法及び試験の終了はメンブレンの試験と同様とした。

4.3 試験結果

4.3.1 柱

メンブレン試験体の鋼材温度測定結果(平均温度)を図7に、柱の伸び量及び面外たわみ量を図8に、試験前及び試験後の試験体を写真1に示す。鋼材温度は、石膏ボードの水分蒸発の影響で温度上昇の停滞(100℃近辺)が観察された(以下、いずれの試験でも同様)。1時間後の鋼材温度はいずれも600℃以下であった。柱(CM1)の崩壊は鋼材温度：694℃(崩壊時間：95分)で発生している。柱の面外たわみは加熱開始20分から40分まで増加し、その後減少している。これは柱断面内の温度差によるものと考えられる。石膏ボードの脱落は試験終了まで生じなかった。

囲い型試験体の鋼材温度測定結果(平均温度)を図9に、柱の伸び量を図10に示す。1時間後の鋼材温度はいずれも600℃以下であった。柱(CE1)の崩壊は鋼材温度：790℃(崩壊時間：81分)で発生している。石膏ボードの脱落は試験終了まで生じなかった。

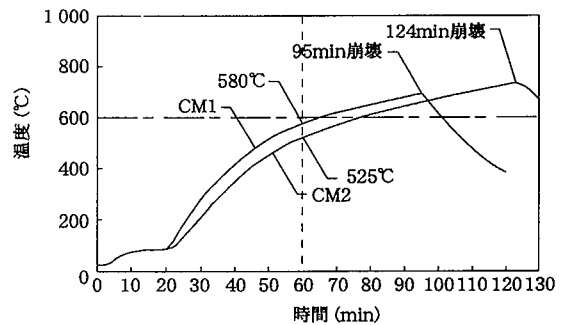


図7 鋼材温度(柱, メンブレン)

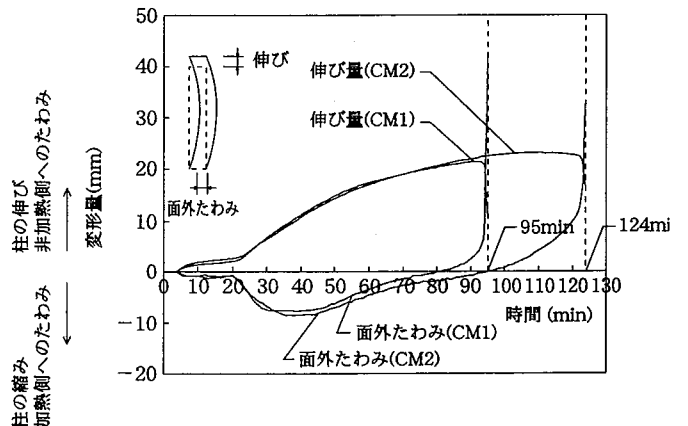


図8 柱の伸び量と面外たわみ量(柱, メンブレン)

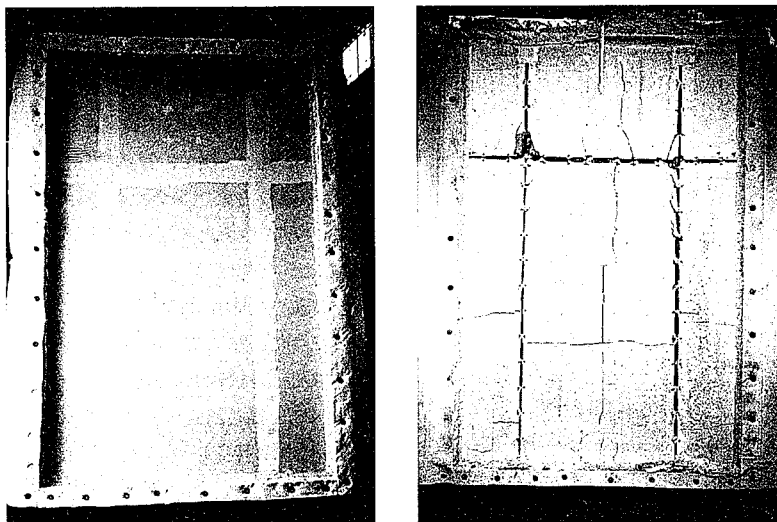


写真1 試験前及び試験後の試験体(柱, メンブレン)

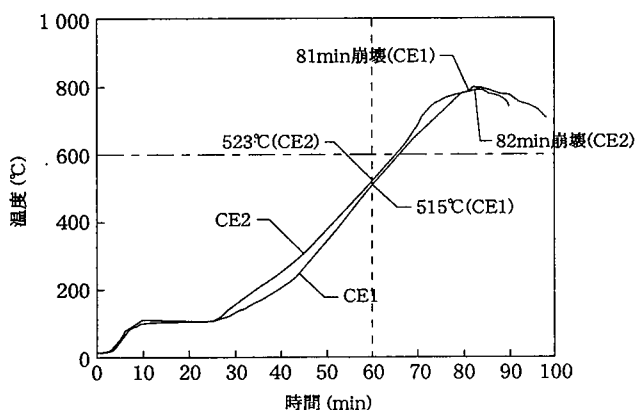


図9 鋼材温度(柱, 囲い型)

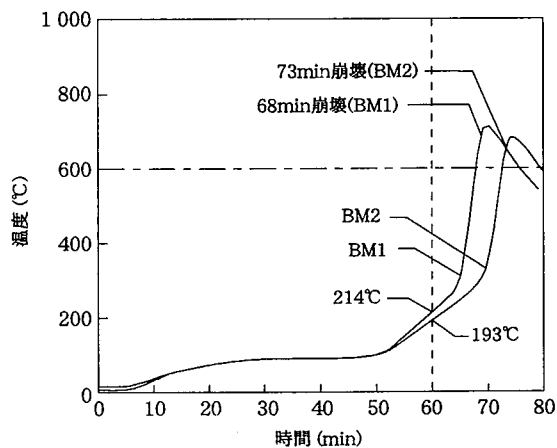


図11 鋼材温度(梁, メンブレン)

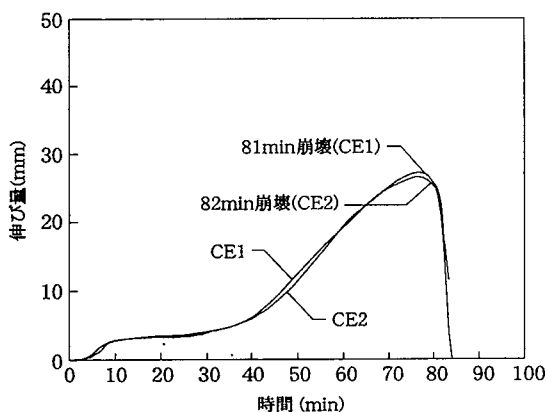


図10 柱の伸び量(柱, 囲い型)

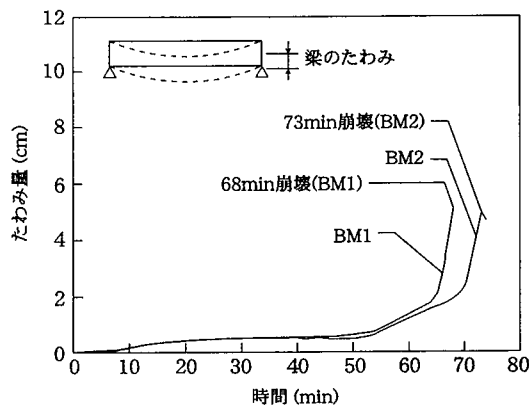


図12 梁のたわみ量(梁, メンブレン)

4.3.2 梁

メンブレン試験体の鋼材温度測定結果(平均温度)を図11に、梁のたわみ量を図12に、試験前及び試験後の試験体を写真2に示す。1時間後の鋼材温度はいずれも600°C以下であった。石膏ボード(BM1)は加熱開始55分後に上張りが脱落し、64分後に下張りが脱落した。下張りが脱落すると梁が直接加熱されるため、鋼材温度は急激に上昇する。梁(BM1)の崩壊は鋼材温度：691°C(崩壊時間：68分)で発生した。

囲い型試験体の鋼材温度測定結果(平均温度)を図13に、梁のたわみ量を図14に示す。1時間後の鋼材温度はいずれも600°C以下であった。梁(BE1)の崩壊は鋼材温度：695°C(崩壊時間：70分)で発生した。下面の石膏ボードは崩壊直前に脱落したが、側面の石膏ボードは試験終了まで脱落しなかった。

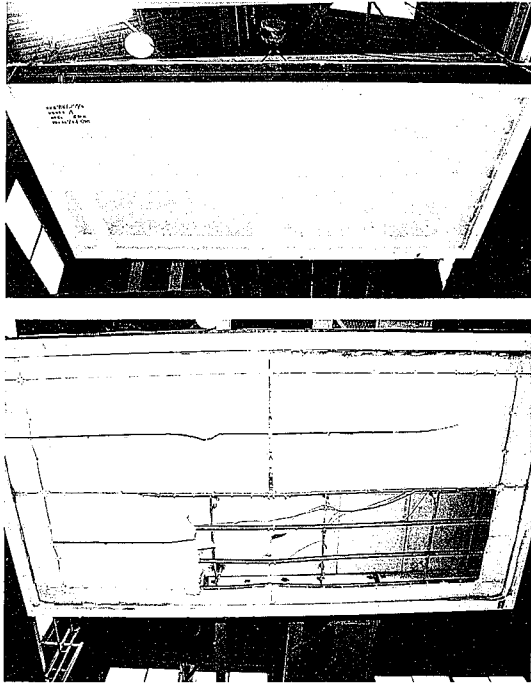


写真2 試験前及び試験後の試験体(梁, メンブレン)

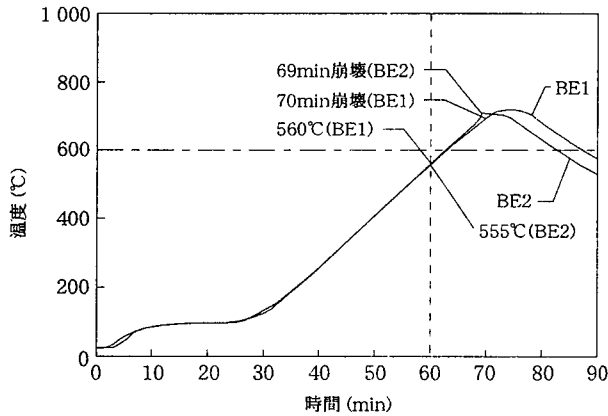


図13 鋼材温度(梁, 囲い型)

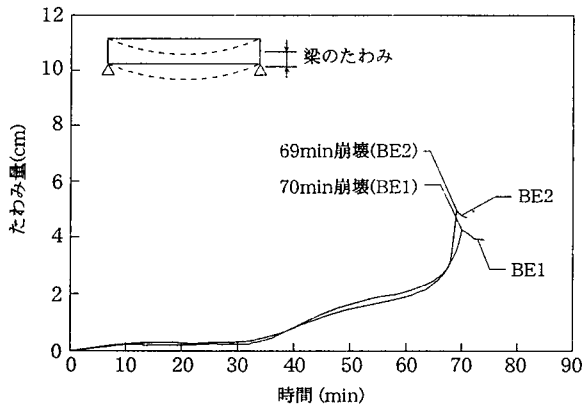


図14 梁のたわみ量(梁, 囲い型)

4.4 まとめ

石膏ボードで遮熱(メンブレン及び囲い型)したFR鋼柱・梁の荷重加熱試験を実施し、

- (1)柱においては、メンブレン及び囲い型とも厚15mmの石膏ボードで遮熱する(ただし、軸力比:0.3以下)
- (2)梁においては、メンブレンでは厚12.5mmの石膏ボード2枚で、囲い型では厚15mmの石膏ボードで遮熱することにより、1時間耐火相当の耐火性能を発揮することが明らかとなった。

5. 架構の構造安定性

5.1 検討方法の概要

架構の構造安定性は弾塑性熱変形クリープ解析¹⁾を用いて検証する。火災時は鋼材温度の上昇に伴い、鋼の機械的性質が変化する。本解析では、高温における応力-ひずみ曲線から材軸方向に分割した小部材毎(温度毎)の剛性及び応力度を算定する。この応力度から各小部材の接点力を求め、小部材を繋ぐ各接点で力が釣り合うまで収束計算(接線剛性法)を行い、高温における架構の変形性状を求める。

解析結果の一例(ナショナル住宅NS-MFR型共同住宅)を図15に示す。鋼の熱膨張による変形が生じている。特に、剛性の低い外柱には梁の熱膨張による大きな変形(水平変形)が生じており、局部座屈の発生に伴う柱の荷重支持能力の低下が懸念される。そのため、後述する柱の高温時ビームコラム試験²⁾により、柱の荷重支持能力を確認し、許容水平変形量($h/30$, h :階高)を設定した。なお、梁の許容変形量については既応の研究³⁾により、 $L^2/800d$ (L :梁長さ, d :梁高さ)とした。上記解析例では、架構の熱変形量は制限値以下となっている。

5.2 柱の高温時ビームコラム試験

5.2.1 試験体

試験体の一例を図16に示す。柱はFR鋼熱間圧延鋼板をロール成形した角形鋼管(□-125×125×3.2, STKR400-FR)である。な

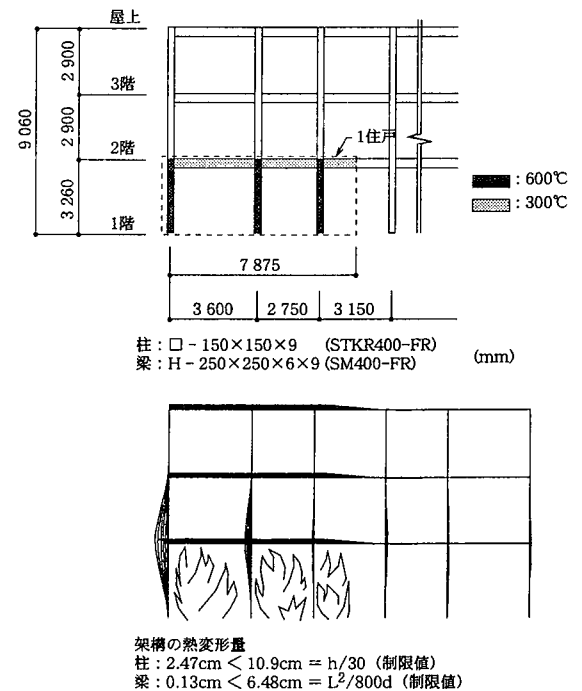


図15 熱変形解析例

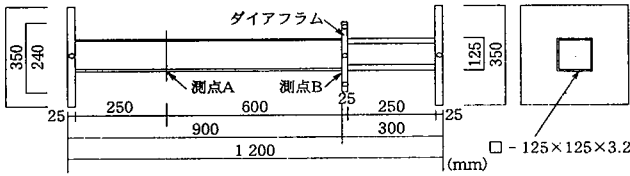


図16 試験体形状

お、この柱は、4階以下の共同住宅で使用する柱のうち、幅厚比(柱の幅と板厚の比で、幅厚比が大きいほど柱の局部座屈耐力は低下する)が最も大きいもの(幅厚比:39)である。

5.2.2 試験方法

加力装置を図17に示す(於 千葉大学)。本試験では火災時における柱の応力状態を再現するため、水平アクチュエーターで降伏軸力($\sigma_y = 2.4t/cm^2$)の15~30%の圧縮力(柱軸力)を加え、加力側垂直アクチュエーターで曲げ変形(梁の熱膨張による伸びだしを再現)を与えることにより崩壊モードへ到達するようにした。加力は試験体を所定温度(試験温度:常温, 500°C, 600°C, 650°C)に加熱した後を開始した。

5.2.3 試験結果

試験結果の一例(幅厚比39, 軸力比0.15)を図18に示す。縦軸はB測点における曲げモーメント(M_C)を柱の常温時全塑性モーメント(M_p)で無次元化したもので、横軸はA, B間の相対変形量($\delta_B/60$)を

評点距離(600mm)で除した値(部材角)である。試験の結果、FR鋼を用いた角形鋼管は、幅厚比39, 軸力比0.15において、鋼材温度が650°Cに達しても十分な荷重支持能力及び変形能力を有していることが明らかとなった。

6. 接合部の耐火性能

接合部の耐火性能については、既応の研究⁴⁾により高温性能に優れたFR鋼用接合材料を使用することにより、母材と同等以上の高温耐力を確保できることが確認されている。

7. 結 言

本開発により、FR鋼メンブレン耐火工法の耐火設計手法を確立し、共同住宅へのFR鋼無耐火被覆適用が可能となった。本開発は、可燃物が多い建物へのFR鋼無耐火被覆適用を初めて実現したものであり、今後、事務所ビルディングなど他用途への適用拡大が期待できる。

謝辞

本開発は、日本建築センターに委託した“FR鋼を用いた住宅の耐火安全性に関する研究会”(旭化成工業、大和ハウス工業、ナショナル住宅産業、ニッセキハウス工業、ミサワホーム及び新日本製鐵)で実施した。ご指導いただいた委員長の日本大学 斉藤光教授をはじめ、各委員の方々に深く感謝致します。

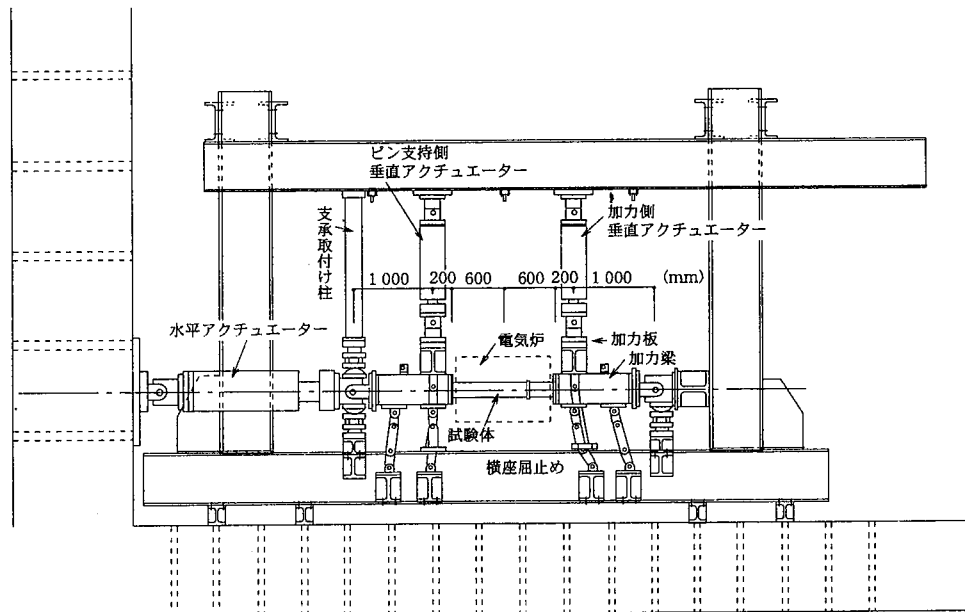


図17 加力装置

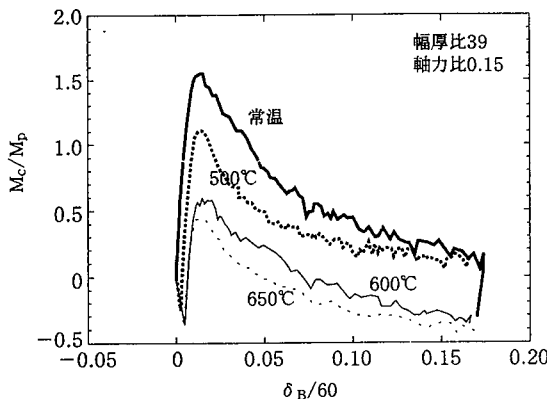


図18 加力試験結果

参考文献

- 1) 古村福次郎 ほか：塑性設計された鋼構造骨組の弾塑性クリープ熱変形挙動。日本建築学会論文報告集。(368),68-77(1986)
- 2) 上杉英樹 ほか：耐火鋼を用いた角形・H形鋼柱の耐火性。構造工学論文集。42B, 407-414(1996)
- 3) 作本好文 ほか：建築構造用耐火鋼梁の耐火性能に関する実験的研究。日本建築学会構造系論文報告集。(442),147-156(1992)
- 4) 作本好文 ほか：耐火鋼用高力ボルトの高温強度特性に関する実験的研究。日本建築学会構造系論文報告集。(432),119-128(1992)