

# フック付き鋼繊維補強コンクリート合成スラブの開発

木村 耕三 小島 克朗 津田 和明  
(本社 建築本部設計第八部)  
中根 淳 永井 康淑

## Development of Composite Slab of Hooked-Fiber Reinforced Concrete

Kohzo Kimura Yoshiro Kobatake Kazuaki Tsuda  
Sunao Nakane Yasuyoshi Nagai

### Abstract

The purpose of this study is to develop composite slabs made of steel decks approved for use in composite slabs and hooked-fiber reinforced concrete (SFRC). These slabs will be helpful in rationalization of work execution and improvement in slab quality. This report describes the structural behaviors of SFRC slabs and composite slabs, and the fire-resisting behaviors of these slabs.

As a result of the study, it was found that the structural behaviors of this type of composite slab with hooked fiber content of 0.6 vol% are the equivalent of those of a composite slab reinforced with wire mesh. A composite slab in which the hooked fiber content is 0.8 vol% has good fire resistance properties for 2-hour fire-proof construction.

### 概 要

本研究の目的は、フック付き鋼繊維を用いた鋼繊維補強コンクリート (SFRC) の曲げ性能を把握し、この繊維を用いた合成スラブを開発、実用化することである。この合成スラブは現行のものに比べて、溶接金網の代わりに鋼繊維を用いていることが特長で、施工の合理化、品質の向上が期待できる。

フック付き鋼繊維を用いた SFRC の曲げ実験、合成スラブの構造性能および耐火性能に関する実験の結果、長さ 60 mm のフック付き鋼繊維は曲げ補強効果が大きいこと、この繊維を 0.6% 以上混入した合成スラブは、溶接金網を配筋した現行の合成スラブと同等の曲げ性能を、また 0.8% 以上混入した合成スラブは、無耐火被覆による 2 時間の床耐火構造としての性能を有することがわかった。

## 1. はじめに

近年、建設分野では技術労働者の不足が深刻化し、現場での施工の合理化・省力化が求められている。そのため、建物の床構造において、構造材と施工時の型枠をデッキプレートで兼ねた合成スラブが広く使われている。

この研究の目的は、フック付き鋼繊維を用いた鋼繊維補強コンクリートの曲げ性能を把握し、このフック付き鋼繊維を用いた合成スラブを実用化することである。

鋼繊維補強コンクリート (Steel Fiber Reinforced Concrete, 以下、SFRC と記す) は、従来のコンクリートに比べて、曲げ強度、曲げタフネス、耐摩耗性、耐疲労性などに優れた特性を持っている。しかし、鋼繊維の形状によってひびわれ後の曲げタフネスに差が見られる。一方、SFRC を製造する場合には、鋼繊維をコンクリート中に均一に分散させるために特殊な混練法を要するため、施工上に問題がある。

本研究で使用した鋼繊維は、両端部にフックが設けられており、ストレートな繊維に比べてコンクリートとの付着性能が改善されるようになっている。この鋼繊維は、30本の単繊維を水溶性の接着剤で貼りあわせたもので、SFRC を製造する際には、これを生コン車に直接投入して練り混

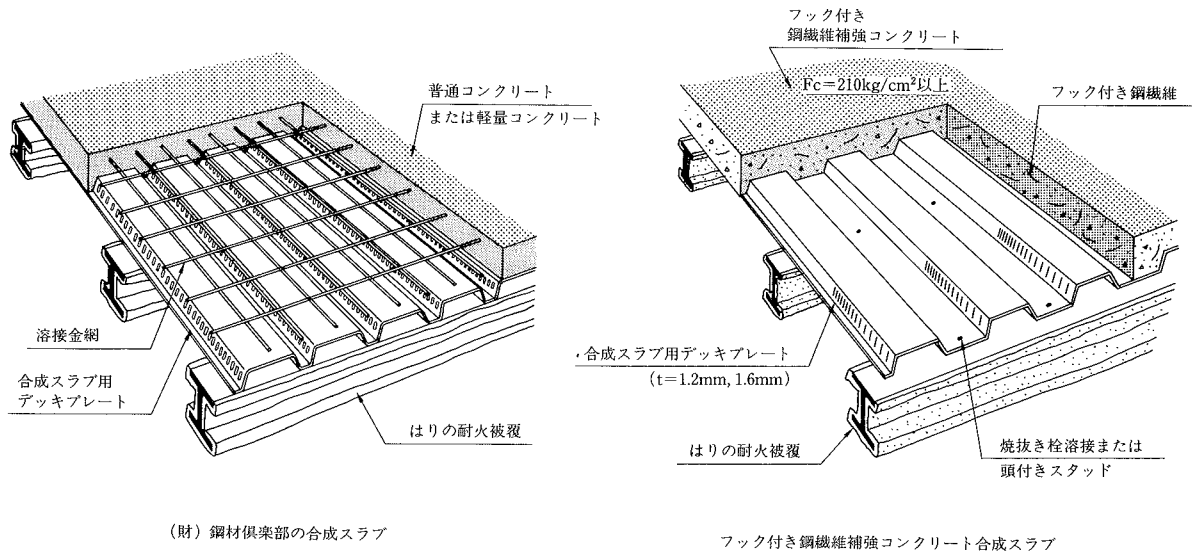
ぜることにより、貼りあわされた鋼繊維は 1 本 1 本に分離し、コンクリート中に均一に分散する。

今回開発・実用化した合成スラブは、建設大臣の構造認定を取得した合成スラブ用デッキプレートにフック付き鋼繊維を用いたコンクリート (以下、フック付き SFRC と記す) を打設して一体化した床構造 (以下、本合成スラブと記す) で、この種の床構造としては、図-1 に示す(社)鋼材倶楽部の合成スラブ<sup>1)</sup> (以下、現行の合成スラブと記す) がある。

一般に合成スラブにおいて、デッキプレートは主要構造材 (曲げ補強材) で、火災時にも合成スラブが曲げ耐力を保持するためにデッキプレートに耐火被覆を施す必要がある。しかし、鋼材倶楽部の上記合成スラブ (現行の合成スラブ) では、スラブの上端に溶接金網を配筋することによって無耐火被覆での 2 時間の耐火構造としての指定を取得している<sup>2)</sup>。

本合成スラブは、ひびわれ進展防止および火災時の曲げ補強筋として、現行の合成スラブにおける溶接金網の代わりにフック付き SFRC を用い、無耐火被覆での 2 時間の耐火構造を目指すものである。

本合成スラブでは、現行の合成スラブに比べ、現場での配筋作業の削減、コンクリート打設時の作業能率の向上な



図一 合成スラブの概要

どによる施工の合理化のほか、耐摩耗性、耐衝撃性などの鋼繊維の利用による品質の向上が期待できる。

なお、本研究は、フック付き鋼繊維の発売元である(株)ブリダストンからの委託研究として実施したものである。

## 2. フック付き鋼繊維を用いたSFRC版の曲げ性能

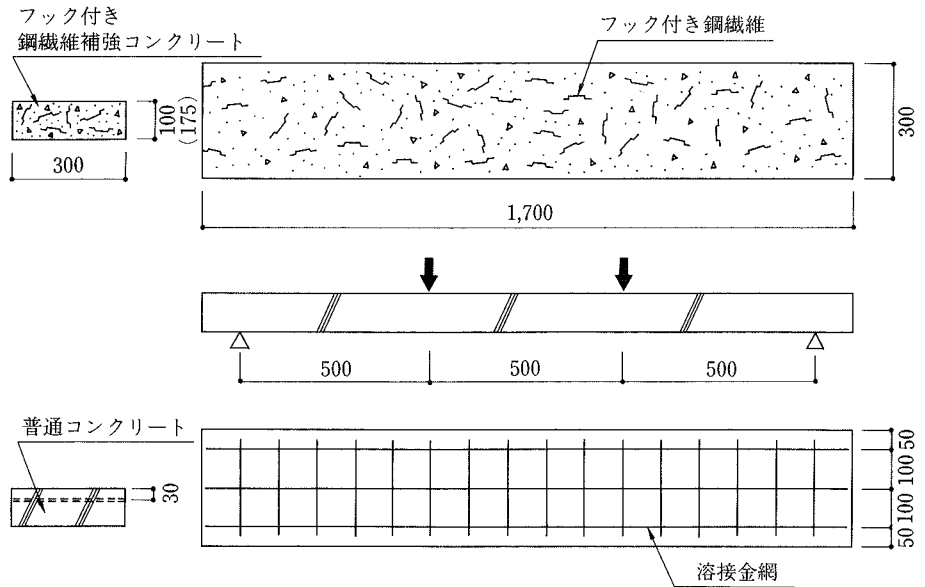
### 2.1 試験体

試験体の形状寸法は、図一2に示すように、幅30cm、スパン150cmの矩形断面の版である。

試験体のパラメータは、次のように選定した。

- ① 鋼繊維の混入率(体積比)  $V_f$  : 4水準 (0.4, 0.8, 1.0, 1.2%)
- ② 鋼繊維の種類: フック付き鋼繊維, 異形ファイバー
- ③ 鋼繊維の長さ: フック付き鋼繊維は, 60mm (線径 0.8mm), 50mm (同, 0.5mm), 30mm (同, 0.5mm) の3種類, 異形ファイバーは, 50mm (線径 0.6mm) の1種類
- ④ 補強材の種類: 鋼繊維, 溶接金網 (6φ)
- ⑤ コンクリートの設計基準強度 ( $F_c$ ) : 210, 300 kg/cm<sup>2</sup>
- ⑥ コンクリート厚さ: 10, 17.5 cm

試験体は、上記パラメータを組合わせた計15体で、それらの一覧を表一1に示す。なお、試験体名称は、次のような意味を持っている。



図一2 試験体の形状寸法

表一1 試験体一覧

試験体記号	補強材の種類	鋼繊維の長さ	繊維の混入率 (%)	スラブ厚さ	設計基準強度	圧縮強度		
H30-4-10-2	フック付き	30mm	0.4	10cm	210kg/cm <sup>2</sup>	299		
D50-4-10-2						339		
D50-8-10-2						異形ファイバー	0.8	308
D50-12-10-2							1.2	312
H50-4-10-2	フック付き鋼繊維	50mm	0.4			274		
H50-8-10-2			0.8			265		
H50-12-10-2			1.2		278			
H60-4-10-2	フック付き鋼繊維	60mm	0.4		17.5cm	210kg/cm <sup>2</sup>	300	
H60-8-10-2			0.8				307	
H60-8-10-3			1.0				10cm	422
H60-10-10-3					390			
H60-10-10-2					288			
H60-10-17-2			17.5cm	288				
RC-10-2	溶接金網	6φ×100×100		10cm	210kg/cm <sup>2</sup>	319		
RC-17-2				17.5cm				

H60-8-10-2

- 設計基準強度 2 : 210 kg/cm<sup>2</sup>  
3 : 300 kg/cm<sup>2</sup>
- 試験体厚さ 10 : 10 cm  
17 : 17.5 cm
- 混入率 4 : 0.4%, 8 : 0.8%  
10 : 1.0%, 12 : 1.2%
- 繊維長さ 30 : 30 mm, 50 : 50 mm, 60 : 60 mm
- 補強材の種類 H : フック付き鋼繊維  
D : 異形ファイバー, RC : 溶接金網

## 2.2 実験方法

実験は、図-2に示したように、2点集中荷重による単純ばり形式での一方向単調荷重によって行ない、載荷荷重は、ロードセルによって検出した。

溶接金網を用いた試験体では、合成スラブでのコンクリート部を想定し、試験体の上端に溶接金網を配し、コンクリートのひびわれ進展後、溶接金網に引張力が作用するように載荷した。

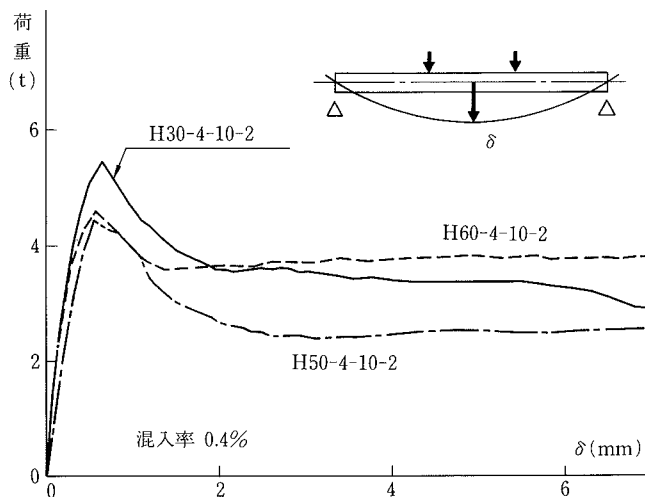


図-3 荷重～変位関係 (繊維長さによる違い)

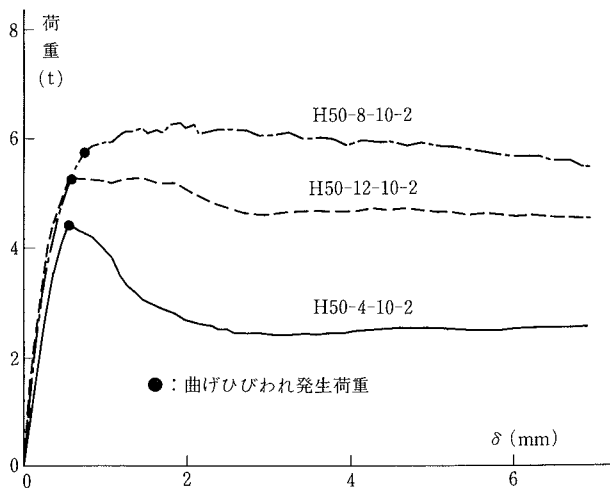


図-4 荷重～変位関係 (フック付き鋼繊維)

実験時の測定は、部材中央での鉛直方向変位を高感度型変位計で、またコンクリート表面および溶接金網のひびきをワイヤーストレインゲージでそれぞれ行なった。

## 2.3 実験結果および検討

2.3.1 破壊経過 鋼繊維を用いた試験体においては、スパン中央に曲げひびわれが入り、変位の増大とともに荷重の低下が見られた。フック付き鋼繊維を用いた試験体では、鋼繊維の混入率が増えるに従って曲げひびわれ後の荷重低下が小さくなっている。また、異形ファイバーを用いた試験体の荷重低下は、フック付き鋼繊維を用いた場合に比べて大きくなっている。しかし、ひびわれ後の挙動は、いずれも無筋コンクリートに見られるようなひびわれの発生と同時に急激な荷重低下は見られず、変位の増大につれて徐々に低下する。最大荷重時のひびわれ状況は、最初に発生した曲げひびわれ1本のみで、終局時には、繊維長さが30 mmのフック付き鋼繊維および50 mmの異形ファイバーを用いた場合には、繊維が抜け出し、ひびわれ位置で試

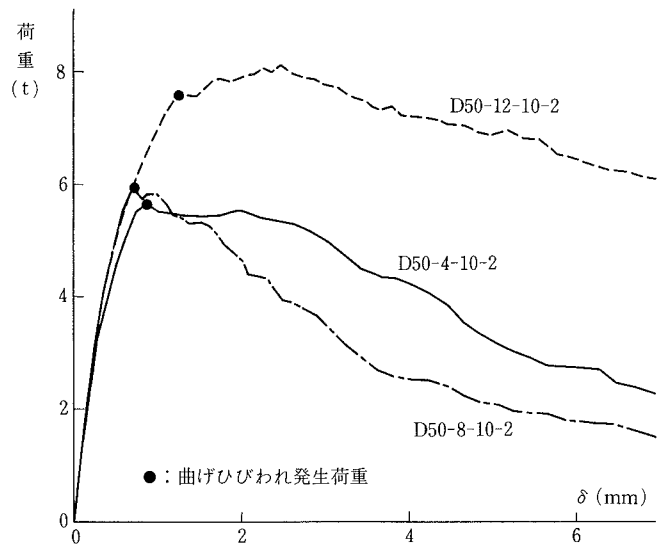


図-5 荷重～変位関係 (异形ファイバー)

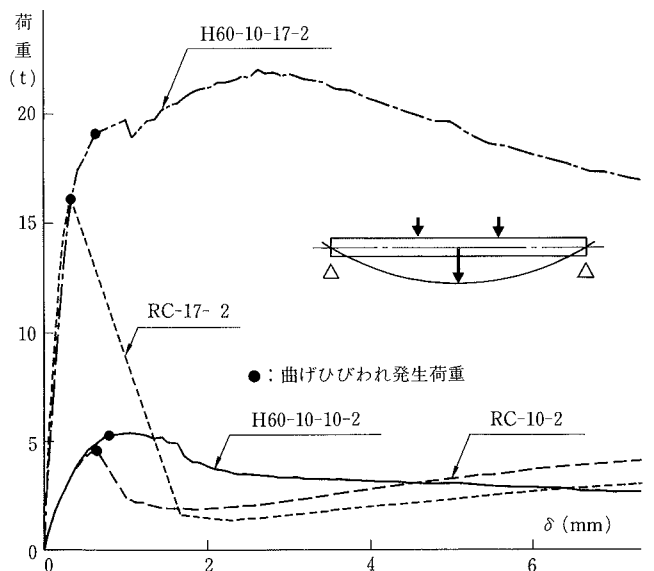


図-6 荷重～変位関係 (コンクリート厚さによる比較)

表一2 ひびわれ発生荷重と最大荷重

試験体名	曲げひびわれ発生荷重 (kg)			最大荷重 (kg)	
	$eP_{cr}$	$eP_{cr}^*$	$eP_{cr}/eP_{cr}$	$eP_{max}$	$eP_{max}/eP_{cr}$
H30-4-10-2	547	622	0.88	547	0.88
D50-4-10-2	567	663	0.86	567	0.86
D50-8-10-2	596	632	0.94	596	0.94
D50-12-10-2	760	636	1.19	814	1.28
H50-4-10-2	445	596	0.75	445	0.75
H50-8-10-2	575	586	0.98	629	1.07
H50-12-10-2	531	600	0.89	531	0.89
H60-4-10-2	399	624	0.64	460	0.74
H60-8-10-2	495	631	0.78	495	0.78
H60-8-10-3	656	740	0.89	697	0.94
H60-10-10-3	792	711	1.11	974	1.37
H60-10-10-2	533	611	0.87	541	0.89
H60-10-17-2	1916	1871	1.02	2201	1.18
RC-10-2	465	643	0.72	594	0.92
RC-17-2	1618	1969	0.82	1618	0.82

\* )  $eP_{cr}=1.8\sqrt{F_c}\cdot Z_c$

験体が二つに折れた。一方、繊維長さが 50 mm 以上のフック付き鋼繊維を用いた場合には、ひびわれの間から繊維が目視できる状態であった。

溶接金網を用いた試験体では、曲げひびわれの発生によって急激な荷重の低下と、変位の増大が見られる。なお、終局時のひびわれは、SFRC の試験体と同様曲げひびわれは 1 本しか生じなかった。

**2.3.2 荷重～変位関係** 図一3は、フック付き鋼繊維を 0.4%混入した時の鋼繊維の長さによる荷重～変位関係を比較したものである。この図から、短い (30 mm) 繊維を用いた試験体の曲げひびわれ発生荷重は、他の (50, 60 mm) 試験体に比べてやや大きくなっている。これは、同一混入率 (体積比) で短い繊維を用いた場合、長い繊維を用いた場合に比べ、コンクリート内に混入されている繊維本数が多いことがその一因と考えられる。ひびわれ後の性状を見ると、長い繊維を用いた試験体では、ひびわれ後一旦荷重が低下した後、その荷重を保持あるいは若干の荷重増大が見られた。しかし、短い繊維を用いた試験体では、ひびわれ後、徐々に荷重が低下する。図一4、図一5は、それぞれ繊維長さ 50 mm のフック付き鋼繊維および異形ファイバーの混入率による性状の違いを比較したものである。両図から繊維の形状による性状の違いを見ると、異形ファイバーを用いた試験体では、ひびわれ発生後一時的に荷重を保持するもののそれ以降は、徐々に荷重が低下する。これは、ひびわれ後ファイバーとコンクリートの付着によって一時的に荷重を保持するものの、すぐに付着切れが生じて荷重が低下するためと考えられる。一方、フック付き鋼繊維では、繊維とコンクリートの付着が少なく、ひびわれの進展により荷重の低下が生じるものの、以降、繊維両端のフックによって荷重の保持あるいは増大が生じるものと推測される。

図一6は、試験体の厚さと、補強材 (フック付き鋼繊維と溶接金網) による性状の比較である。フック付き鋼繊維を用いた試験体では、試験体厚さが大きくなると曲げひびわれ発生による荷重の低下はほとんど見られず、その後も荷重が増大している。

溶接金網を用いた試験体では、ひびわれの発生後の荷重低下は大きい。また、荷重の低下は、コンクリート厚さが 10 cm よりも 17.5 cm の方が大きい。

**2.3.3 曲げひびわれ荷重と最大荷重** 各試験体の曲げひびわれ発生荷重と最大荷重を表一2に示す。各試験体でコンクリート強度が異なるため、曲げひびわれ発生荷重、最大荷重をコンクリートの曲げ引張強度を  $1.8\sqrt{F_c}$  として求めた曲げひびわれ荷重  $eP_{cr}$  で除した値で比較する。曲げひびわれ発生荷重は、繊維長さが短いほど、また、フック付き鋼繊維よりも異形ファイバーの方が大きくなっている。また、溶接金網を用いた試験体と鋼繊維を用いた試験体を比べると、H60-4-10-2 試験体を除いて後者の曲げひびわれ発生荷重の方が大きくなっている。

長さ 50 mm 以下の繊維を用いた場合の最大荷重は、混入率 1.2% の異形ファイバー、混入率 0.8% のフック付き鋼繊維を除いて、曲げひびわれ発生荷重と同じである。しかし、長さ 60 mm のフック付き鋼繊維を用いた試験体の最大荷重は、混入率 0.8% ( $F_c=210 \text{ kg/cm}^2$ ) の試験体 1 体を除いて全て曲げひびわれ発生荷重を上回っている。さらに、鋼繊維の混入率が同じ場合には、コンクリート強度が高いほど曲げひびわれ荷重、最大荷重ともに高くなっている。

### 2.4 フック付き SFRC の曲げ性能

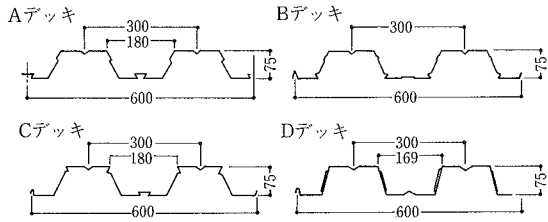
以上の曲げ性能実験の結果、繊維長さ 60 mm のフック付き鋼繊維を用いた SFRC の曲げひびわれ荷重は、普通コンクリートを用いた場合よりも大きい。また、フック付き SFRC は、曲げひびわれ後も荷重の増大が見られ、最大荷重は曲げひびわれ荷重を上回っている。

## 3. フック付き鋼繊維を用いた合成スラブの構造性能

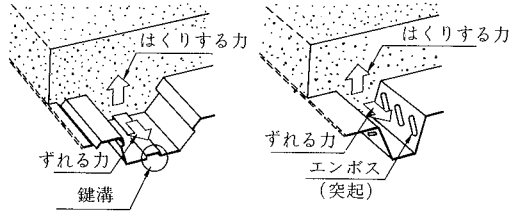
### 3.1 構造性能実験概要

合成スラブは、施工上 2 スパン以上の連続ばりとなるため、積載荷重に対して曲げモーメントの分布状態は、正曲げ (曲げによってデッキプレートに引張力が生じる場合) 区間、負曲げ (曲げによってデッキプレートに圧縮力が生じる場合) 区間の組み合わせとなる。したがって、正曲げ区間を対象とした正曲げ実験 (PB シリーズ)、負曲げ区間を対象とした負曲げ実験 (NS シリーズ) および、これらを組み合わせた連続ばり実験 (NB シリーズ) の 3 種類、計 21 体の試験体による実験を行ない、本合成スラブの構造性能を把握した。

本合成スラブに用いる鋼繊維は、曲げ補強効果の大きい長さ 60 mm のフック付き鋼繊維とし、デッキプレートは、合成スラブ用デッキプレートのうち溝広タイプ 75 (デッキ成 75 mm) である。なお、合成スラブ用デッキプレートとしては、図一7に示す 4 種類の製品があり、それらは、コ



デッキプレートの形状寸法



デッキプレートの合成機構

図-7 デッキプレートの形状と合成機構

ンクリートとの一体性を確保する合成機構から、鍵溝タイプ (A, C デッキ) とエンボスタイプ (B, D デッキ) の 2 種類に大別される。

全シリーズ共通のパラメータは鋼繊維の混入率で、そのほか曲げ (PB シリーズ) 試験体ではせん断スパン (600 mm, 1200 mm) とデッキプレートの種類 (鍵溝タイプ, エンボスタイプ), 連続ばり (NB シリーズ) 試験体ではデッキプレートの種類もパラメータとした。

各試験体の名称は、次のように定めた。

使用した鋼繊維補強コンクリートの設計基準強度はいずれも 210 kg/cm<sup>2</sup> でその調査と材料特性を表-3 に、デッキプレートと溶接金網の材料特性を表-4 に示す。

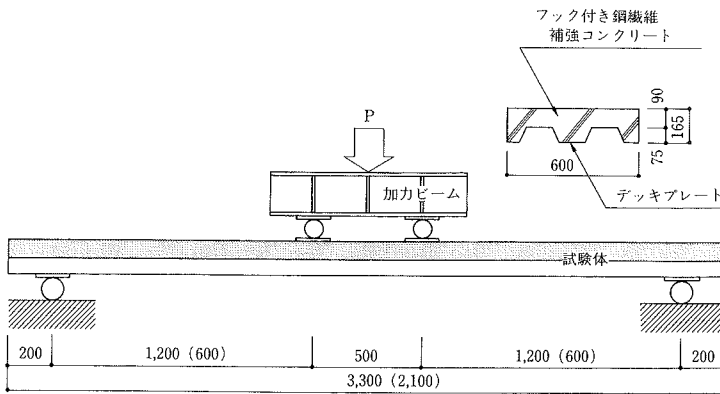
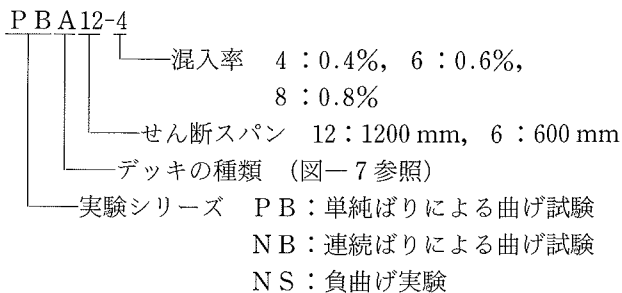


図-8 試験体の形状寸法

表-3 鋼繊維補強コンクリートの調査と特性

鋼繊維混入率 (%)	水セメント比 (%)	砂率 S/C (%)	配合 (kg/m <sup>3</sup> )					材料特性 (kg/cm <sup>2</sup> )	
			セメント	水	砂	砂利	混和剤	圧縮強度	弾性係数
0.0	62.5	47.2	292	182	846	967	110cc	340	2.71×10 <sup>5</sup>
0.4		55.2	324	202	944	785	121	219	1.96×10 <sup>5</sup>
0.6		58.2	332	207	988	724	124	254	2.14×10 <sup>5</sup>
0.8		62.2	340	212	1043	646	125	285	2.39×10 <sup>5</sup>

表-4 デッキプレートおよび溶接金網の材料特性

補強材・デッキプレートの種類	形状寸法 (mm)	断面積 A (cm <sup>2</sup> /m)	降伏強度 $\sigma_y$ (t/cm <sup>2</sup> )	引張強度 $\sigma_u$ (t/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 $E_s$ (t/cm <sup>2</sup> )	伸び率 (%)
Aデッキ	H : 75 × B : 600 × t : 1.2	17.7	3.15	4.20	1.95×10 <sup>3</sup>	35.5
Bデッキ		16.7	3.31	4.06	1.92×10 <sup>3</sup>	37.4
Cデッキ		17.7	2.83	3.64	1.90×10 <sup>3</sup>	30.0
Dデッキ		16.8	2.89	3.94	1.93×10 <sup>3</sup>	35.9
溶接金網	6φ	0.28	5.31	5.84	2.02×10 <sup>3</sup>	11.6

### 3.2 正曲げ実験

3.2.1 試験体と加力方法 試験体の形状および一覽を図-8, 表-5 に示す。実験は、デッキプレートが曲げモーメントに対して引張側となるように、単純ばり形式 (2点集中荷重) で行なった。荷重は、デッキプレートの引張応力度が材料試験結果での降伏応力度の 2/3 となる時の荷重 (以下、長期相当荷重と呼ぶ) で一旦除荷し、その後破壊させる一方向単調荷重とした。

3.2.2 破壊経過 長期相当荷重の 0.51~0.75倍 (平均 0.62倍) の荷重時に曲げひびわれが発生した後、長期相当荷重の 1.12~2.35倍 (平均 1.56倍) の荷重時にコンクリートとデッキプレートとの付着が切れ始め、その後、試験体端部でデッキプレートとコンクリートとのずれが確認された。最終破壊状況は、合成機構によってコンクリートの圧壊により曲げ破壊するもの (A, C デッキ) とコンクリートとデッキプレートのずれが進行してすべり破壊するもの (B, D デッキ) の 2 種類にわかれた。前者の破壊では、コンクリートとデッキプレートのずれが試験体の両端部でほぼ均等に生じたのに対し、後者の破壊では、ずれが試験体

表-5 試験体一覽

試験体記号	せん断スパン	鋼繊維の混入率	デッキプレートの種類
PBA12-0	1,200mm	0.0	Aデッキ
PBA12-4		0.4	
PBA12-8		0.8	
PBB12-4		0.4	Bデッキ
PBC12-4		0.4	Cデッキ
PBD12-0		0.0	Dデッキ
PBD12-4		0.4	
PBD12-8		0.8	
PBA 6-0	600mm	0.0	Aデッキ
PBA 6-4		0.4	
PBA 6-8		0.8	
PBB 6-4		0.4	Bデッキ
PBC 6-4			Cデッキ
PBD 6-4			Dデッキ

の片側に集中した。しかし、せん断スパン、鋼繊維の混入率による破壊経過への顕著な差は見られなかった。

**3.2.3 荷重～変位関係** せん断スパン 600 mm, 1200 mm の試験体での鋼繊維の混入率の違いによる荷重～変位関係を図-9 に、せん断スパン 600 mm, 混入率0.4%でのデッキプレートの種類による荷重～変位関係の違いを図-10に示す。図-9 から試験体の初期剛性は、デッキプレートとコンクリートが一体であると仮定し、全断面有効として求めた計算値と近似している。また、せん断スパン 600 mm で混入率0.0%, 0.4%の試験体は、曲げ降伏直後に変位量がやや増大したが、全体的には良好な変位性状を示している。

図-10からデッキプレートの種類による曲げ性状の違いを見ると、曲げ降伏まではデッキの種類による顕著な差は見られないが、それ以降はデッキプレートの種類（合成機構の違い）によって差が見られる。

**3.2.4 諸荷重** 実験で得られた諸荷重とその計算値を表-6に示す。計算値は、デッキプレートとコンクリートが一体であると仮定して求めたもので、曲げ降伏荷重は、合成スラブの引張側有効等価断面係数 ( $cZ_t$ ) を用い、最大荷重は、コンクリートの圧縮応力を矩形分布とし、引張力は、デッキプレートの重心位置に集中するものとして次式で求めた各モーメントから算出した。

$$\begin{aligned} \text{曲げ降伏モーメント} : M_y &= \sigma_y \cdot cZ_t \\ \text{最大曲げモーメント} : M_u &= \sigma_y \cdot A_s \cdot j \\ j &= s_d - A_s \cdot \sigma_y / (2 \cdot F_c \cdot B) \end{aligned}$$

ここで、 $A_s$  : デッキプレートの断面積  
 $s_d$  : 圧縮縁からデッキプレート重心までの距離

$F_c$  : コンクリートの圧縮強度  
 $B$  : 試験体の幅  
 $\sigma_y$  : デッキプレートの降伏応力度  
 $cZ_t$  : 合成スラブの引張側有効等価断面係数

曲げ降伏荷重は、計算値の0.78～1.12倍（平均

0.97倍）、曲げ破壊した試験体の最大荷重は計算値の0.94～1.10倍（平均0.99倍）で、いずれも実験値と計算値は近似している。また、鋼繊維の混入率0.8%の試験体は、曲げ降伏荷重と最大荷重の計算値に対する比率が他の試験体に比べて高くなる傾向を示している。

**3.3 負曲げ実験**

**3.3.1 試験体と加力方法** 試験体は、図-11に示すように、合成スラブの中間ばり近傍を模擬した形で、試験体中央に H 形鋼ばりを設け、デッキプレートと焼抜き栓溶接で接合している。また、鋼繊維を混入しない試験体には、現行の合成スラブと同様に上端（かぶり厚さ 3 cm）に溶接金網を配筋している。実験は、誘験体中央の H 形鋼ばりを支点とする片持ちばり形式で行なった。試験体の一覧を表-7に示す。

**3.3.2 破壊経過** いずれの試験体も試験体中央の H 形鋼ばり部の上端に曲げひびわれが発生し、一時的な荷重の低下、変位の増加が見られたが、その後、再び荷重が増大した。溶接金網で補強した試験体はその破断によって、鋼繊維で補強した試験体は、デッキプレートの座屈によって最大荷重に至った。

表-6 諸荷重一覧

試験体名	曲げ降伏荷重 (t)			最大荷重 (t)		
	$eP_y$	$cP_y$	$eP_y/cP_y$	$eP_{max}$	$cP_{max}$	$eP_{max}/cP_{max}$
PBA12-0	4.29	4.91	0.87	6.75	6.79	0.99
PBA12-4	4.38	4.75	0.92	6.19	6.54	0.95
PBA12-8	5.04	4.85	1.04	7.34	6.70	1.10
PBB12-4	4.91	4.70	1.04	4.91	6.46	0.76
PBC12-4	4.80	4.28	1.12	6.07	5.94	1.02
PBD12-0	3.86	4.23	0.91	4.90	5.91	0.83
PBD12-4	3.43	4.10	0.84	4.88	5.72	0.85
PBD12-8	4.26	4.18	1.02	6.18	5.85	1.06
PBA 6-0	10.2	9.82	1.04	13.0	13.6	0.96
PBA 6-4	9.32	9.51	0.98	12.3	13.1	0.94
PBA 6-8	9.49	9.70	0.98	13.5	13.4	1.01
PBB 6-4	7.32	9.39	0.78	7.41	12.9	0.57
PBC 6-4	9.41	8.59	1.10	11.2	11.9	0.94
PBD 6-4	7.32	8.19	0.89	9.27	11.4	0.81

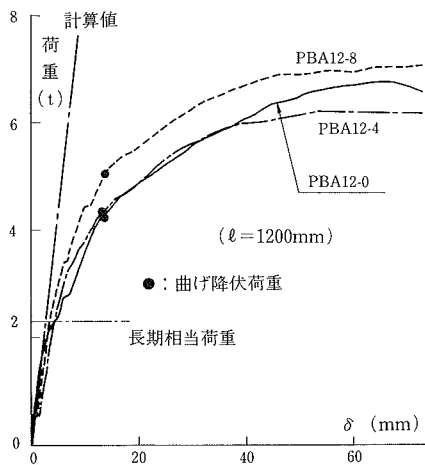


図-9 荷重～変位関係（せん断スパン  $l=1,200$  mm,  $l=600$  mm）

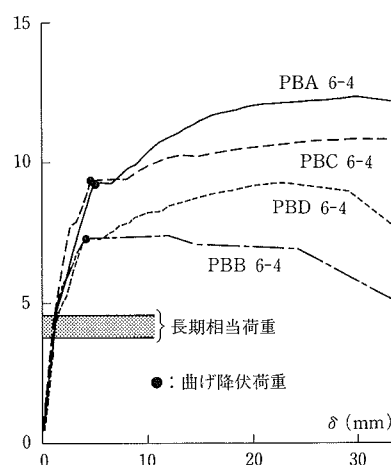
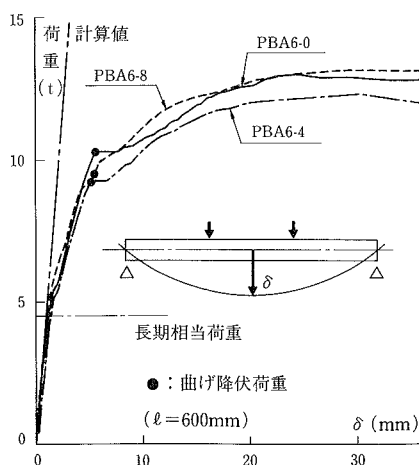


図-10 荷重～変位関係

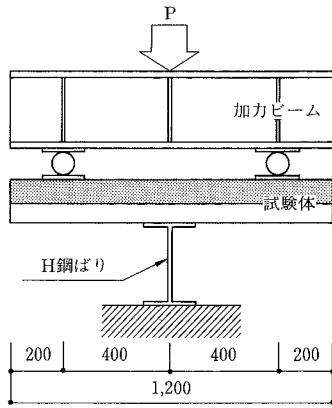


図-11 試験体の形状寸法

表-7 試験体一覧

試験体記号	せん断スパン	鋼繊維の混入率	溶接金網	デッキプレートの種類
NSA4-0M	400mm	0.0	あり	Aデッキ
NSA4-4		0.4	なし	
NSA4-8		0.8		

3.3.3 荷重～変位関係 鋼繊維の混入率による荷重と変位の関係を図-12に示す。鋼繊維の混入率が高くなると、曲げひびわれによる荷重の低下量、変位の増大量が少なくなる。また、溶接金網を補強筋とした試験体と混入率0.8%の試験体を比べると、ひびわれ発生時の挙動（変位の増大、荷重の低下）においては後者の方が若干優れているが、溶接金網の降伏荷重（7.72 t）までの変位性状においては両者で顕著な差は見られない。しかし、降伏荷重以降の挙動を見ると、前者の試験体の最大荷重は、後者に比べて大きい。最大荷重後の荷重低下も大きい。

3.3.4 諸荷重 実験で得られた諸荷重と計算値を表-8に示す。曲げひびわれ荷重は、コンクリートの曲げ引張応力度を $2.0\sqrt{F_c}$ として求めた計算値に対して、実験値は1.15～1.41倍（平均1.30倍）であり、鋼繊維で補強し

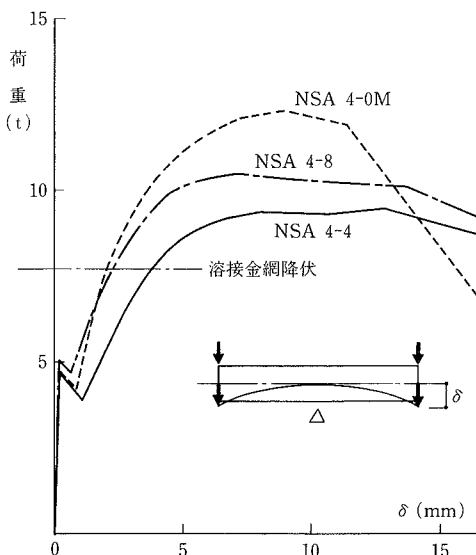


図-12 荷重～変位関係

表-8 諸荷重一覧

試験体記号	曲げひびわれ荷重 (t)			最大荷重 (t)		
	$eP_{cr}$	$cP_{cr}$	$eP_{cr}/cP_{cr}$	$eP_{max}$	$cP_{max}$	$eP_{max}/cP_{max}$
NSA4-0M	4.75	4.12	1.15	12.4	10.1	1.23
NSA4-4	4.68	3.31	1.41	9.54	(4.00)*	(2.39)
NSA4-8	5.04	3.77	1.34	10.6	(4.00)	(2.65)

\*) デッキプレートの全塑性モーメントから求めた値

表-9 試験体一覧

試験体記号	せん断スパン	鋼繊維の混入率	溶接金網	デッキプレートの種類
NBA6-0M	600mm	0.0	あり	Aデッキ
NBA6-4		0.4	なし	
NBA6-6		0.6		
NBA6-8		0.8		

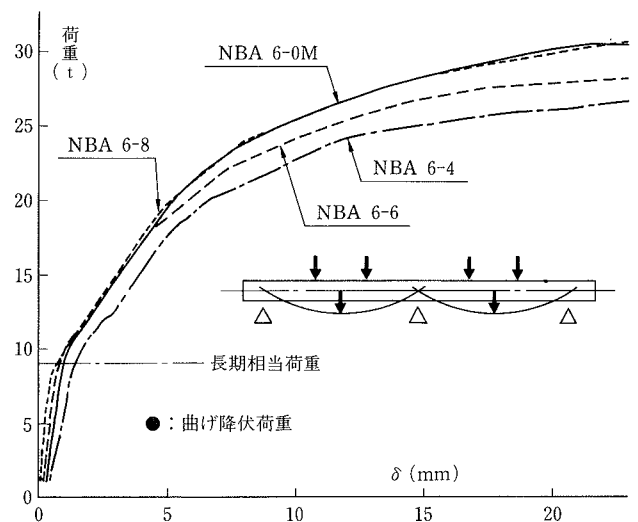


図-14 荷重～変位関係

表-10 諸荷重一覧

試験体記号	曲げひびわれ荷重 (t)			最大荷重 (t)		
	$eP_{cr}$	$cP_{cr}$	$eP_{cr}/cP_{cr}$	$eP_{max}$	$cP_{max}$	$eP_{max}/cP_{max}$
NBA6-0M	6.47	5.49	1.18	32.0	35.6	0.90
NBA6-4	6.90	4.41	1.56	27.9	29.7	0.94
NBA6-6	7.92	4.79	1.65	28.5	30.2	0.94
NBA6-8	8.45	5.03	1.68	33.5	30.4	1.10

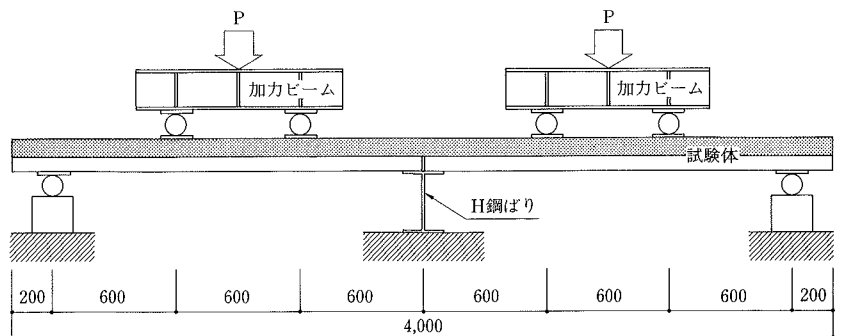


図-13 試験体の形状寸法

た試験体の方が溶接金網で補強した試験体より大きくなっている。また、鋼繊維で補強した試験体の最大荷重は、コンクリートを無視し、デッキプレートのみ全塑性モーメントから求めた荷重の2.39, 2.65倍となっている。このことから、フック付き鋼繊維補強コンクリートは、ひびわれ後も引張応力を負担していると考えられる。

### 3.4 連続ばり実験

**3.4.1 試験体と加力方法** 試験体は、図-13に示すように、2スパン連続の合成スラブで、デッキプレートは、H形鋼の上で継手を設け、スパンの左右で不連続とした。デッキプレートは、負曲げ試験体と同様、焼抜き栓溶接でH形鋼と接合した。鋼繊維を混入しない試験体には、現行の合成スラブと同様上端(かぶり厚さ3cm)に溶接金網を全面に配筋している。試験体の一覧を表-9に示す。

実験は、左右各スパンの3等分2点集中荷重で行ない、試験体両端の支点部の反力をロードセルにより測定した。また、変位の測定は、各スパン中央で高感度型変位計を用いて行なった。

**3.4.2 破壊経過** 試験体中央のH形鋼ばり上に負曲げによる曲げひびわれと、スパン中央近傍に正曲げによるひびわれがほぼ同時に発生した。荷重の増大によりデッキプレートとコンクリートとのずれが試験体端部で確認され、その後、正曲げによってデッキプレートが引張降伏した。最終破壊は、いずれもコンクリートの圧壊による曲げ破壊で、補強材とその量による顕著な差は見られなかった。

**3.4.3 荷重～変位関係** 各試験体の荷重と試験体スパン中央での変位(左右両スパンの平均)の関係を図-14に示す。混入率0.4%の試験体では、曲げひびわれの発生によって、変位の増大が見られる。しかし、鋼繊維を0.6%以上混入した試験体では、ひびわれによる変位の増大は少なく、また、混入率が高くなるほど、同一変位に対する荷重が増大している。

曲げ降伏荷重に至るまでの変位性状は、鋼繊維を0.6%以上混入した試験体と溶接金網を用いた試験体において顕著な差は見られなかった。

**3.4.4 諸荷重** 実験で得られた諸荷重とその計算値を表-10に示す。曲げひびわれ荷重の計算値は、連続ばりとして求めた負曲げ位置での曲げモーメントがコンクリートの曲げ引張応力度を $2.0\sqrt{F_c}$ として求めた曲げひびわれモーメントとなる時の荷重である。最大荷重の計算値は、図-15に示す負曲げ位置での最大曲げモーメント $M_1$ (3.3.4で述べた方法で算出)と正曲げ位置での最大曲げモーメント $M_3$ (3.2.4で述べた $M_u$ の値)を用いて得られたモーメント分布から、この時の荷重(最大荷重)を求めた。この結果、実験値は、計算値の0.90~1.10倍(平均0.97倍)で、両者は近似している。

**3.4.5 曲げモーメント分布** 図-15は、試験体両端の支点反力から求めた曲げモーメント分布の一例で、図-16は、試験体中央のH形鋼ばり位置での負曲げモーメントとひびわれ幅の関係である。

試験体中央部(H形鋼ばり位置)の負曲げモーメント

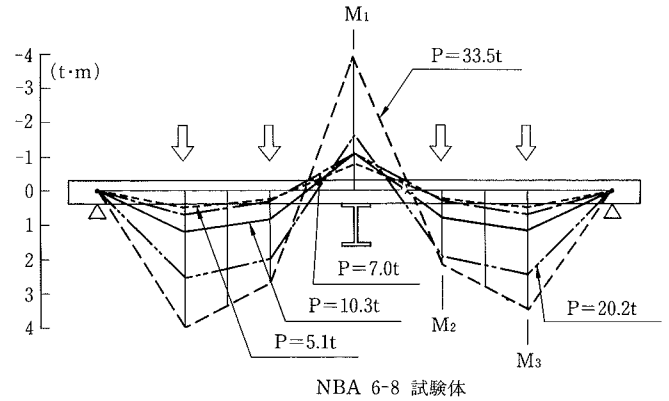


図-15 モーメント分布図

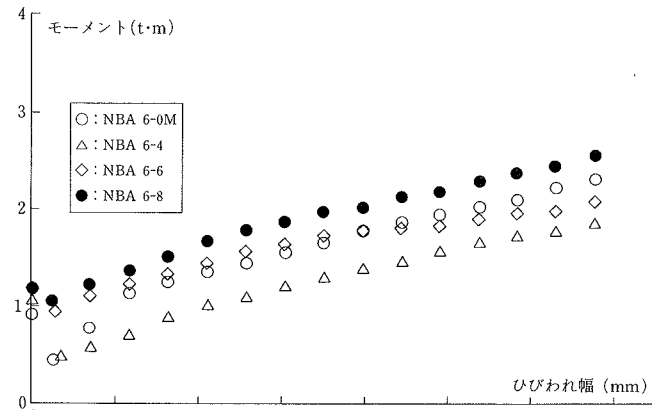


図-16 モーメント～ひびわれ幅関係

は、曲げひびわれの発生によって一時低下するが、その後、荷重の増大と共に負曲げモーメントも増大している。なお、実験結果によれば負曲げモーメントの大きさは、鋼繊維の混入率が高いほど大きくなっている。

試験体中央部(H形鋼ばり位置)での負曲げモーメントとひびわれ幅の関係を見ると、同一ひびわれ幅に対する負曲げモーメントは、鋼繊維の混入率が高くなるほど大きくなっており、混入率0.6%の試験体と溶接金網を配した試験体がほぼ同等となっている。

### 3.5 本合成スラブの構造性能

以上の構造性能実験の結果から、フック付き鋼繊維補強コンクリートを用いた合成スラブの構造性能について以下のことが言える。

- ① 本合成スラブは、床構造として十分な曲げ性能を有する。
- ② デッキプレートが降伏するまでの曲げ性能において、せん断スパン、デッキプレートの種類による顕著な差はない。
- ③ 初期剛性、降伏曲げモーメントの評価は、デッキプレートとコンクリートが一体と仮定し、通常の鉄筋コンクリート部材に準じて行なうことができる。
- ④ フック付き鋼繊維で補強したコンクリートは、曲げひびわれ発生後も曲げモーメントを負担することができる。
- ⑤ フック付き鋼繊維を0.6%以上混入した合成スラブ



は、溶接金網を配筋した現行の合成スラブと同等の曲げ性能を有する。

#### 4. フック付き鋼繊維を用いた合成スラブの耐火性能

##### 4.1 耐火性能試験

4.1.1 試験体 試験体は、幅 168 cm、長さ 650 cm の大きさで、その両端と中央に支持ばりを設けた均等の 2 スパン連続の合成スラブである。試験体のパラメータは、鋼繊維の長さとその混入率である。使用する SFRC は、普通コンクリートにフック付き鋼繊維を混入したもので、設計基準強度は、いずれも 210 kg/cm<sup>2</sup> で、デッキプレートは、図-7 に示す A デッキ (板厚 1.2 mm) である。試験体の形状とその一覧を図-17、表-11 に示す。

4.1.2 試験方法 試験は、2 スパン連続支持で、建設省告示第2999号に基づく 2 時間の荷重加熱試験と衝撃試験を、(財)日本建築総合試験所で行なった。この合成スラブでは、単位面積当たり 360 kg/m<sup>2</sup> の設計荷重を想定している。そのため、耐火性能試験での荷重は、1 スパンにつき 3 等分 2 線荷重で行ない、荷重荷重は、試験時の最大曲げモーメントが設計荷重の 1.2 倍に相当する単位面積当たり 432 kg/m<sup>2</sup> の床荷重が作用した時の最大曲げモーメントと一致するように定めている。

荷重加熱試験は、上記荷重を一定に保持した状態で、試験体のデッキプレート表面より 3 cm の位置に設置した熱電対による測定温度が JIS A 1304 で規定された標準加熱温度曲線と近似するようにして 2 時間の加熱を行なった。

試験時のたわみ、裏面、温度および加熱温度の測定位置は、図-17 に示すとおりである。内部温度は、試験体製作時にコンクリート内に埋め込んだ熱電対により、裏面温度は、JIS 法 (杉板による支持法) によって測定した。

##### 4.1.3 試験結果

(1) ひびわれ状況 長さ 30 mm の短い繊維を用いた

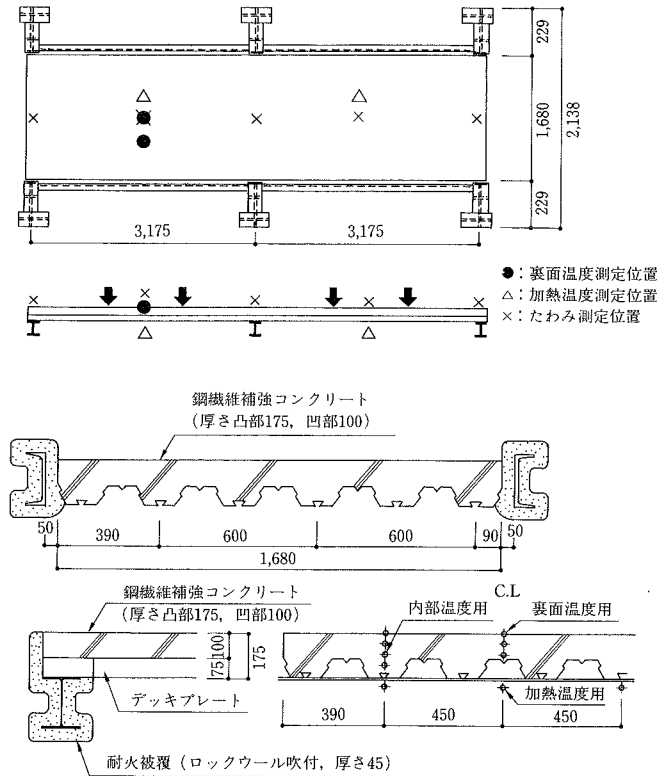


図-17 試験体の形状寸法

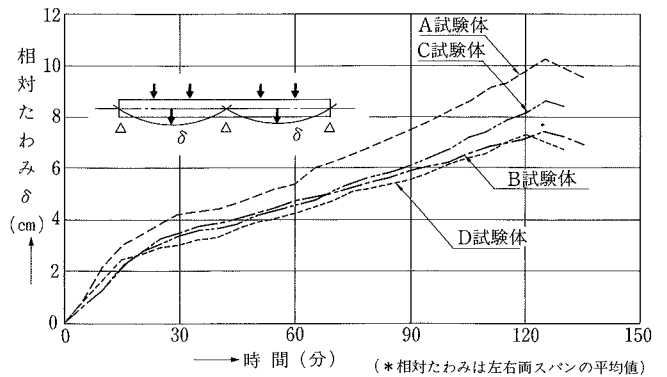


図-18 たわみ曲線

表-11 試験体および試験結果一覧

試験体記号	スパン	鋼繊維の長さ	混入率(%)	含水率(%)	最高裏面温度	最大たわみ	許容たわみ
A	317.5cm	30mm	0.6	4.6	205°C	10.85cm	10.08cm
B			0.4		536*	7.90	
C		60mm	0.6		198	8.95	
D			1.0		198	7.50	

\* ) ひびわれ上での測定温度

表-12 2時間耐火構造の仕様

構造区分	スパン	許容積荷重	デッキプレートの種類	コンクリート厚さ	コンクリート強度	鋼繊維の種類	鋼繊維の混入量
床2時間耐火	3.0m以下	360kg/m <sup>2</sup> 以下	合成スラブ用 デッキプレート 溝広タイプ75	デッキプレート 山上 10cm以上	210kg/cm <sup>2</sup> 以上	フック付き 鋼繊維 長さ60mm	60kg/m <sup>3</sup>

試験体では、中間支持ばり上に生じるひびわれはあまり分散せず、支持ばり上に生じたひびわれの幅は、加熱後90分後に20 mm、加熱120分後には、30 mmとなった。一方、長さ60 mmの長い繊維を用いた試験体では、混入量が多くなるとひびわれは分散し、ひびわれ幅も小さくなっている。加熱後、120分での最大ひびわれ幅は、混入率が0.4%、0.6%で約20 mm、1.0%で約8 mmであった。

(2) 最大たわみ 各試験体のたわみと加熱時間の関係を図-18に示す。繊維長さ30 mmの試験体では、他の試験体に比べて、加熱開始後から相対たわみは大きく、2時間の耐火試験での最大たわみは許容値(=  $l^2/10,000$ ,  $l$ : 支点間距離)を超えたが、繊維長さ60 mmの試験体では、最大たわみは許容値以下となっている。また、混入率によるたわみ性状への顕著な差は見られない。

(3) 裏面温度 各試験体の最大裏面温度を表-11に示す。短い繊維を用いた試験体では、ひびわれ上での着火テストで木綿に着火し、また、長さ60 mmの繊維を0.4%混入した試験体では、ひびわれ上での裏面温度が500°Cを超えたが、他の試験体では、ひびわれ上での裏面温度が260°Cを超えることも、木綿への着火も見られなかった。

#### 4.2 本合成スラブの耐火性能

フック付き SFRC を用いた合成スラブの耐火試験の結果、長さ60 mmのフック付き鋼繊維を0.6%あるいは、1.0%混入した2スパン連続支持による合成スラブは、床耐火構造としての性能を有していると考えられる。特に、混入率1.0%の場合には、中間支持ばり上でのひびわれは、分散し、その幅も小さく、優れた耐火性能を有している。

#### 4.3 耐火構造(床2時間耐火)性能認定試験

一連の研究結果を踏まえて、表-12に示すように長さ60 mmのフック付き鋼繊維を0.8%混入した鋼繊維補強コンクリート(厚さ10 cm以上)を用いた合成スラブの床2時間耐火構造の性能認定試験を行なった。

耐火性能の認定試験では、2体の同一試験体による試験を行ない両試験体において以下に示す基準を満たしたものについて耐火性能があると判断される。

##### 耐火性能の判定基準

- ① 加熱中耐火上および構造耐力上有害な変形、破壊、脱落等の変化を生じないこと。
- ② 加熱中火炎が通る割れ目を生じないこと。
- ③ 裏面温度が260°Cを超えないこと。
- ④ 荷重加熱試験において、試験体の最大たわみ量が試験体の支点間距離を2乗したものの1/10,000を超えないこと。
- ⑤ 衝撃試験において、試験体の耐火被覆材料の全厚にわたる剝離または裏面に達する穴を生じないこと。

その結果、同一試験体2体での最大たわみは、4.40 cm、5.65 cmといずれも許容たわみ9.0 cm以下に納まり、また、裏面温度も、ひびわれ上での裏面温度を含めてすべて260°C以下で、表-12に示す仕様の本合成スラブは、無耐火被覆による2時間の床耐火構造としての性能を有すると判定された<sup>3)</sup>。

## 5. フック付き鋼繊維を用いた合成スラブの設計施工

フック付き鋼繊維を用いた合成スラブの設計・施工は、(株)ブリヂストンと当社で作成した、「ドラミックス合成スラブの設計指針、同 施工指針」<sup>4)</sup>に基づいて行なう。これらの指針のうち、デッキプレート部分については、鋼材倶楽部の「デッキプレート床構造設計・施工規準」と「耐火被覆のない合成スラブの耐火構造設計・施工マニュアル」に基づいて作成した。

設計指針では、合成スラブの適用範囲を成75 mm以上、板厚1.2 mm以上の合成スラブ用デッキプレートを用い、その山の平板部上のSFRCの厚さを9 cm以上(耐火構造の場合は10 cm以上)と定めている。また、使用するフック付き鋼繊維は、長さ60 mm、直径0.8 mmの製品に限定し、その混入率は、0.6%以上(耐火構造の場合は0.8%)としている。

合成スラブの断面設計は、単純支持された一方向スラブとして求めた正曲げモーメントに対して算定するとともに、両端固定として求めた支持縁の上端に生じる負曲げモーメント(=  $\omega l^2/12$ )による引張応力度が $1.8\sqrt{F_c}$ ( $F_c$ : SFRCの設計基準強度)以下(現行の合成スラブの設計は $2.0\sqrt{F_c}$ )になるようにしている。

施工指針では、当社で行なってきた施工試験を含む一連の研究成果をふまえて、SFRCの調査計画から、混練、打設、品質管理まで、施工に関する事項について定めている。

## 6. まとめ

合成スラブ用デッキプレートにフック付き鋼繊維を用いた鋼繊維補強コンクリートを打設して一体化した合成スラブは、溶接金網を配筋した現行の合成スラブと同等の構造性能を有し、また、設計荷重に対しても十分な構造安全性があることが確認された。

本合成スラブは、積載荷重360 kg/m<sup>2</sup>、スパン3.0 m以下の床構造として、無耐火被覆での2時間の耐火性能認定試験に合格し、床2時間耐火構造としての指定を取得することができた。

## 謝辞

本研究に当たり、御指導、御尽力頂きました東京理科大学 平野道勝教授、建設省建築研究所 中村賢一室長に対し謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 鋼材倶楽部：デッキプレート床構造設計・施工規準、技報堂
- 2) 鋼材倶楽部：耐火被覆のない合成スラブの耐火構造設計・施工マニュアル
- 3) 日本建築センター：耐火防火構造・材料等便覧、新日本法規出版
- 4) 大林組、ブリヂストン：ドラミックス合成スラブの設計指針、同 施工指針