

# 高強度せん断補強筋ハイデック685Hの開発

## High Strength Shear Reinforcement (HIDEC 685H)

河原 俊哉<sup>\*(1)</sup>  
Toshiya KAWAHARA

長門 隆重<sup>\*(1)</sup>  
Takashige NAGATO

河合 立芳<sup>\*(2)</sup>  
Rippo KAWAI

### 抄 録

高強度せん断補強筋ハイデック685Hは、鉄筋コンクリート造建築物用に開発され、降伏強度685N/mm<sup>2</sup> (7 000kgf/cm<sup>2</sup>)以上を有する。素材は異形コイル鉄筋である。また、インライン熱処理型で生産されるため、高強度鉄筋にもかかわらず炭素量が少なく、溶接性も良好である。ハイデック685Hの材料開発及び設計手法について報告した。

### Abstract

High strength shear reinforcement HIDEC 685H was developed for steel reinforced concrete construction and has a minimum of 685 N/mm<sup>2</sup> of yield strength. The material used is a deformed coil reinforcement. Applying in-line heat treatment with hot water as coolant after the rooling mill, the material has less carbon amounts despite the high strength shear steel reinforcement and it has good weldability. This paper reports on the development of materials for HIDEC 685H and procedures for designing of concrete construction.

## 1. 緒 言

昨今の建築技術の高度化及び都市部の住環境の変化に伴い、鉄筋コンクリート(RC)構造の高層建築物が多く建設されるようになった。大きなせん断力を受ける部材において十分な耐力及び靱性を得るためには、従来の普通鉄筋(降伏強度295N/mm<sup>2</sup>級)の使用では必要せん断補強筋量の確保が困難であることが多い。また、1995年の兵庫県南部地震の被害状況から、RC部材にはさらに高い耐力及び靱性が要求されるものとする。これらの背景のもとで、降伏強度685N/mm<sup>2</sup>以上を有する高強度せん断補強筋ハイデック685H(ハイデック685Hと略記)をせん断補強筋として適用することにより、部材の経済的な設計が可能となる。

本報では、室蘭製鐵所で製造しているハイデック685Hの材料開発について概説すると共に、ハイデック685Hをせん断補強筋として用いた部材のせん断耐力を評価するために行った実験結果と、その結果により検証した設計手法について報告する。

## 2. せん断補強筋用高強度コイル鉄筋

### 2.1 必要な特性

せん断補強筋には、高強度と延性の両立はもとより、溶接閉鎖型フープを対象とした時の溶接性、種々の形状に曲げ加工を行う際の加工寸法精度を損なわないふし形状等の特性が要求される。ハイデック685Hの強度は、短期許容応力度585N/mm<sup>2</sup> (6 000kgf/cm<sup>2</sup>)を達成するために必要な下限値として、0.2%耐力が685 N/

mm<sup>2</sup>以上であることを目標とした。また、伸びは建設省総合技術開発プロジェクト“鉄筋コンクリート造建築物の超計量・超高層化技術の開発”で規格化された横補強筋USD785に準じて8%を下限值に設定した。上記の必要特性を得るための素材の開発経緯と考え方を以下に述べる。

### 2.2 製造プロセスと成分

高強度線材の製造工程では、熱間圧延に引き続いて調整冷却を行う手法が広く用いられている。室蘭製鐵所の線材工場は、衝風冷却、冷水・温水への浸漬冷却、カバー徐冷等、種々の調整冷却設備を擁している。ハイデック685Hの素材となる高強度線材を得るために、比較的大きな冷却速度を安定的に得ることができる沸騰水を冷媒とする温水調整冷却設備を用いることとした。鋼の成分は温水冷却の冷却速度でベイナイト組織を安定して得ることを狙い、ポルト・PCワイヤ用に開発された高強度線材<sup>1)</sup>の製造技術をベースとして開発した。

基本となる成分を表1に示す。この冷却プロセスでは、冷却速度が比較的大きいため同じ強度を得る上でCをはじめとする合金成分の添加を少なく、そして溶接性に影響を及ぼすスケールを薄くする

表1 ハイデック685Hの化学成分(mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	特殊元素	炭素当量
0.20 以下	1.20 以下	2.00 以下	0.030 以下	0.025 以下	0.10 以下	添加	0.70 以下

炭素当量(%)=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14

<sup>\*(1)</sup> 室蘭製鐵所 製品技術部 マネジャー  
北海道室蘭市仲町12 ☎050-8550 ☎(0143)47-2539

<sup>\*(2)</sup> 室蘭製鐵所 圧延工場 グループリーダー

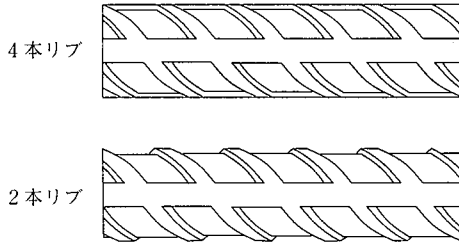


図1 ハイデック685Hのふし形状

ことができる。さらに、特殊合金の微量添加による析出・固溶強化を利用することにより、Cの添加量を低くすることが可能である。一般にCが高いほど溶接はし難くなるが、ハイデック685HはC量が少ないためフラッシュバット等による溶接が容易である利点を有する。

2.3 曲げ加工性

ハイデック685Hはコンクリートとの付着性能を十分確保するためにJIS G 3112“鉄筋コンクリート用棒鋼”に準じたふしを有する。このふしの形状は、曲げ加工品の寸法精度に影響を及ぼすため、ハイデック685Hには加工寸法ばらつきを小さくするよう設計された“斜めふし”<sup>2)</sup>を採用した。さらにばらつきを小さくするために、リブを4本としたふし形状も製造可能である。図1にハイデック685Hのふし形状を示す。ハイデック685Hの加工形状は角型、円形、多角形状のフープ筋、スパイラル筋と多岐に亘るが、この斜めふしの採用により、加工寸法精度は良好である。

3. 曲げせん断実験

3.1 実験概要

3.1.1 試験体

梁試験体の一覧を表2に、柱試験体の一覧を表3に示す。試験体は、梁せん断破壊型21体、梁曲げ破壊型9体、柱せん断破壊型24体の合計54体を製作した。梁試験体断面はすべて225mm×450mm、柱試験体断面はすべて400mm×400mmとした。梁及び柱試験体の形状、配筋をそれぞれ図2、図3に示す。コンクリートの設計基準強度 $F_c$ は、梁・柱試験体ともに、210、360kgf/cm<sup>2</sup>の2水準とした。シアスパン比(M/QD、M：曲げモーメント、Q：せん断力、D：部材断面のせいー梁せい、柱せい等)は、せん断破壊型は1.0、1.5、2.0の3水準、曲げ破壊型は1.5、2.0、2.5の3水準とした。せん断補強筋比 $p_w$ は、梁せん断破壊型は0.254～1.179%、梁曲げ破壊型は0.219～0.636%、柱せん断破壊型は0.238～1.10%の範囲とした。

3.1.2 加力及び計測方法

柱試験体の加力装置を図4に示す。建研式加力法を採用した。水平加力は100tオイルジャッキ、軸力は定荷装置付きの200tオイルジャッキにより行った。加力は変位増増繰返し加力とし、部材角は1/800～1/75の範囲とした。変位の測定は図5に示すように上下スタブの相対変位を左右、裏表の4箇所で行った。

3.2 実験結果

梁試験体の実験結果<sup>3)</sup>について以下に概説する。

3.2.1 ひび割れ及び破壊状況

図6に梁試験体の実験終了時におけるひび割れ及び破壊状況を示す。せん断破壊型、曲げ破壊型ともに加力後間もなく左右の梁端部に曲げひび割れが発生し、その後梁端部から1.5D(D：梁せい)の範

表2 梁試験体一覧

破壊形式	番号	Fc (kgf/cm <sup>2</sup> )	シアスパン比 (M/QD)	$p_w$ (%)	$p_t$ (主筋比) (%)	
せん断破壊型	24	210	1.0	0.254	3.00(5-D'25) D': 主筋径	
	25			0.424		
	26			0.794		
	16		1.5	0.254		
	17			0.424		
	18			0.794		
	5		2.0	0.254		
	6			0.424		
	7			0.794		
	27		1.0	0.753		0.753
	19					1.5
	8					2.0
	28		1.0	1.179		1.179
	20					1.5
9	2.0					
曲げ破壊型	29	360	1.0	0.75		
	22		1.5			
	13		2.0			
	30		1.0			1.18
	23		1.5			
	14		2.0			
曲げ破壊型	15	210	1.5	0.406	0.98(7-D'13)	
	21	360		0.203		
	3	210	2.0	0.406	1.27(3-D'22)	
	10	360		0.219		
	11	360		0.316		
	4	210	1.0	0.530	1.66(5-D'19)	
	12	360		0.318		
	1	210		2.5		0.636
	2	360	0.373			

表3 柱試験体一覧

破壊形式	番号	軸応力	Fc (kgf/cm <sup>2</sup> )	シアスパン比 (M/QD)	$p_w$ (%)	$p_t$ (主筋比) (%)						
せん断破壊型	1	Fc / 6	360	1.0	0.357	1.81(5-D'25) D': 主筋径						
	2				0.422							
	3						210	0.792				
	4								360	1.100		
	5										1.5	0.253
	6											
	7	0.792										
	8		2.0	0.143								
	9				0.238							
	10	0.357										
	11		1.0	0.422		1.81(5-D'25)						
	12				1.5							
	13	2.0										
	14		Fc / 6	210		1.0	0.357	2.53(7-D'25)				
	15				0.422							
	16	0.792										
	17						1.5		0.422			
	18									0.792		
	19										2.0	0.238
	20		1.0	0.422								
	21				1.5							
	22	Fc / 3				1.0	0.422	1.81(5-D'25)				
	23		1.5									
	24			2.0								

破壊型式	せん断破壊型		曲げ破壊型		
	5-D' 25	5-D' 19	5-D' 22	3-D' 22	7-D' 13
梁引張主筋	50 ↓ 50	50 ↓ 50	50 ↓ 50	50 ↓ 50	35 ↓ 35
断面					
	(mm)	450, 225, 50, 63, 50	450, 225, 50, 63, 50	450, 225, 50, 63, 50	450, 225, 50, 63, 50

図2 梁試験体の形状、配筋

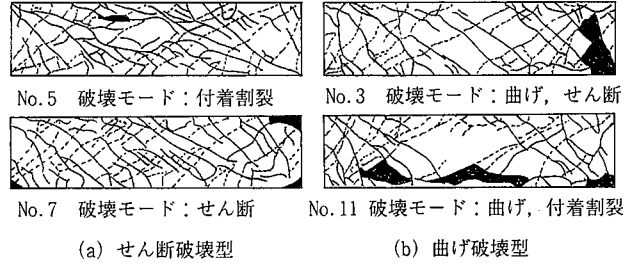


図6 梁試験体のひび割れ及び破壊状況

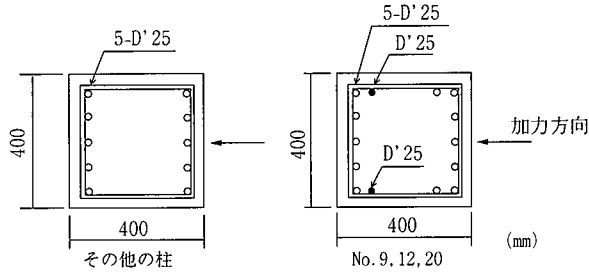


図3 柱試験体の形状、配筋

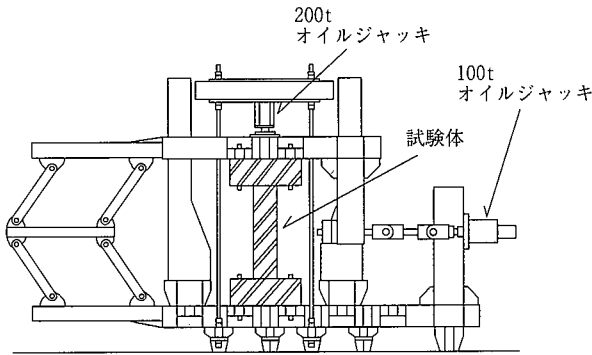


図4 柱試験体の加力装置

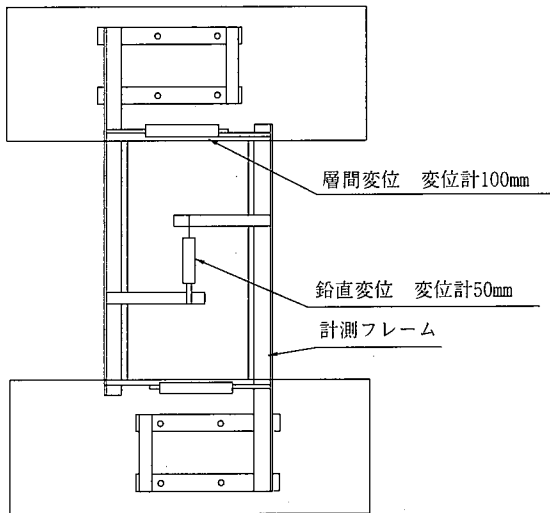


図5 変位測定要領

囲内で曲げせん断ひび割れ、せん断ひび割れが入った。せん断破壊型については、コンクリート強度が小さい試験体の一部に付着割裂破壊がみられた。このデータは付着割裂破壊の影響を考慮したせん断信頼強度式の評価に活用した。曲げ破壊型については、曲げ降伏後の耐力低下の要因となった破壊モードにせん断破壊と付着割裂破壊

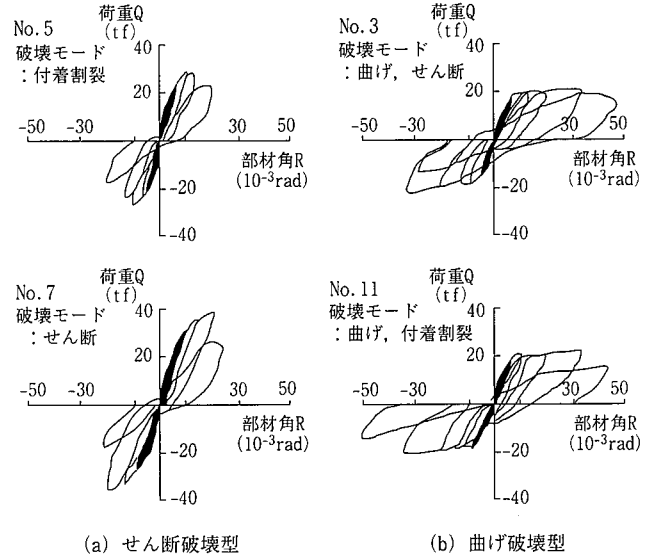


図7 梁試験体の荷重変形曲線

壊の両者がみられた。

### 3.2.2 荷重変形関係

図7に梁試験体の荷重変形曲線の例を示す。せん断破壊型については、最大耐力に到達後変位振幅の増大に伴い耐力減少を生じたが、せん断補強筋比が大きいほど脆性的な破壊性状を示した。曲げ破壊型については、コンクリート強度が大きいほど最大耐力は大きくなるが、最大耐力時の変形量は小さく、脆性的な破壊性状を示した。

### 3.2.3 梁曲げ破壊型の変形能力

荷重変形包絡線上で耐力が最大耐力の80%まで低下したときの部材角を限界変形角と定義し、この限界変形角実験値と「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説」<sup>4)</sup>(以下、靱

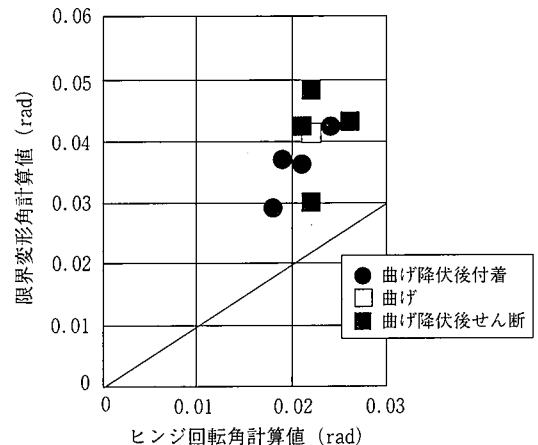


図8 ヒンジ回転角の実験値と計算値の関係

性指針と略記する)式から計算されるヒンジ回転角計算値との関係を図8に示す。すべての実験値が計算値を上回っており安全側の評価になっている。

#### 4. 設計手法

##### 4.1 許容せん断耐力

短期許容せん断力算定式は“鉄筋コンクリート構造計算規準・解説”<sup>5)</sup>(以下、RC規準と略記する)に示される短期許容せん断力の算定式において、補強筋強度を考慮して、(1)式第2項の( $p_w - 0.002$ )を( $p_w - 0.001$ )とした式を採用した。この結果、短期許容せん断耐力 $Q_{AS}$ は(1)及び(2)式より求めた。

$$\text{梁 } Q_{AS} = \{ \alpha \cdot f_s + 0.5_w f_t (p_w - 0.001) \} b \cdot j \quad \dots\dots(1)$$

$$\text{柱 } Q_{AS} = \{ f_s + 0.5_w f_t (p_w - 0.001) \} b \cdot j \quad \dots\dots(2)$$

- ここで、
- $\alpha$  :  $4/(M/QD + 1)$
  - $f_s$  : コンクリートの許容せん断応力度
  - $w f_t$  : ハイデック685Hの許容引張り応力度 (585N/mm<sup>2</sup>)
  - $b$  : 梁、柱の幅
  - $p_w$  : せん断補強筋比
  - $j$  : 応力中心間距離,  $j = (7/8)d$
  - $d$  : 梁、柱の有効せい

ただし、 $p_w$ は0.2%以上とし、0.6%を超える場合は0.6%とする。

梁・柱試験体の終局耐力と短期許容せん断力算定値の関係を図9に示す。梁試験体の平均安全率(終局耐力/短期許容せん断力)は1.54、柱試験体の平均安全率は1.92で、いずれも安全側である。

ハイデック685Hを用いた場合の梁・柱試験体のせん断補強筋の補強効果を図10及び図11に示す。ここでは、せん断補強筋効果を評価するために、梁のコンクリートのせん断力負担分をRC規準に示されている $\alpha \cdot f_s$ (柱では $f_s$ )として、これを実験による終局耐力 $\tau_u$ (= $Q_{exp}/b \cdot j$ ,  $Q_{exp}$ : 実験による終局せん断応力)から差し引くことにより、せん断補強筋の寄与分としている。梁・柱試験体ともに実験値は計算値に対し十分安全側である。

##### 4.2 終局せん断耐力

二次設計に用いる終局耐力 $V_u$ は(3)~(5)式による値のうち最小

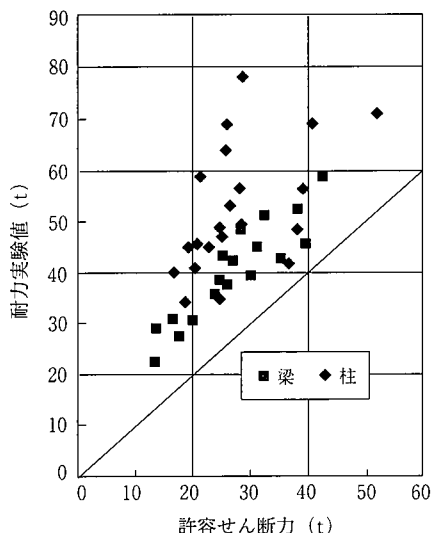


図9 終局耐力実験値と短期許容せん断算定値の関係

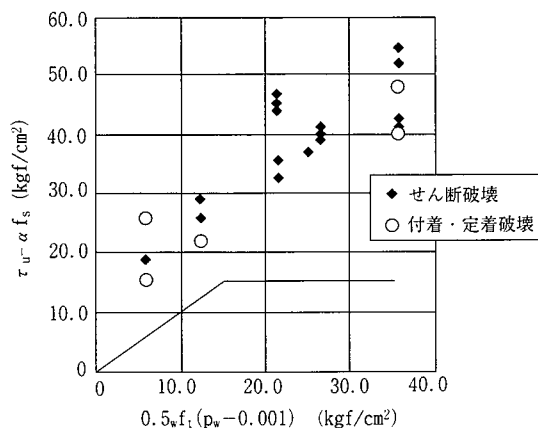


図10 梁試験体のせん断補強筋の補強効果

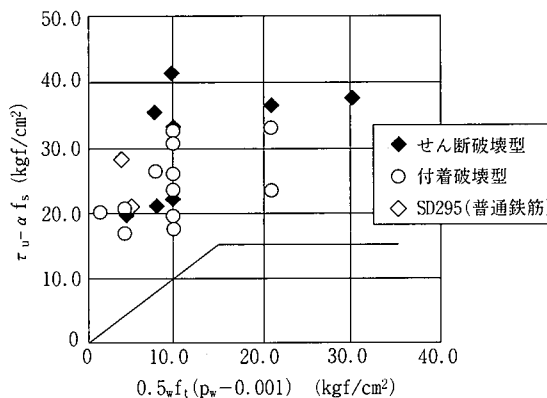


図11 柱試験体のせん断補強筋の補強効果

値とする。本式は、韌性指針で採用されているせん断信頼強度式と同一のものである。

$$V_u = \mu p_{we} \sigma_{wy} b_e j_e + \{ \nu \sigma_B - 5 p_{we} \sigma_{wy} / \lambda \} b D \tan \theta / 2 \quad \dots\dots(3)$$

$$V_u = (\lambda \sigma_B + p_{we} \sigma_{wy}) b_e j_e / 3 \quad \dots\dots(4)$$

$$V_u = \lambda \nu \sigma_B b_e j_e / 2 \quad \dots\dots(5)$$

- ここで、
- $\mu$  : トラス機構の角度を表わす係数
  - $p_{we}$  : 有効せん断補強筋比
  - $\sigma_{wy}$  : ハイデック685Hの終局せん断耐力用強度 (685N/mm<sup>2</sup>)
  - $b_e$  : 部材断面の有効幅
  - $j_e$  : 部材断面の有効せい
  - $\nu$  : コンクリート圧縮強度の有効係数
  - $\sigma_B$  : コンクリートの圧縮強度
  - $\lambda$  : トラス機構の有効係数
  - $\theta$  : アーチ機構の圧縮束の角度

図12、図13に、梁・柱試験体でせん断破壊型となった試験体の終局耐力の実験値と(3)~(5)式より求めた計算値の関係を示す。梁・柱試験体ともすべて実験値は計算値よりも大きくなり、実験値/計算値の平均値は、梁試験体で1.158(変動係数7.6%)、柱試験体で1.164(変動係数9.4%)となった。以上より、ハイデック685Hの終局せん断耐力式は韌性指針式を採用することとした。

##### 4.3 付着に対する設計

付着割裂破壊の影響を考慮したせん断信頼強度 $V_{bu}$ は(6)~(7)式による値のうち最小値とする。本式は、韌性指針で採用されている

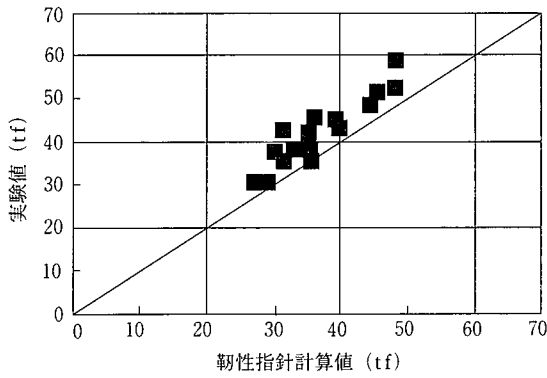


図12 梁試験体の終局耐力の実験値と計算値の関係

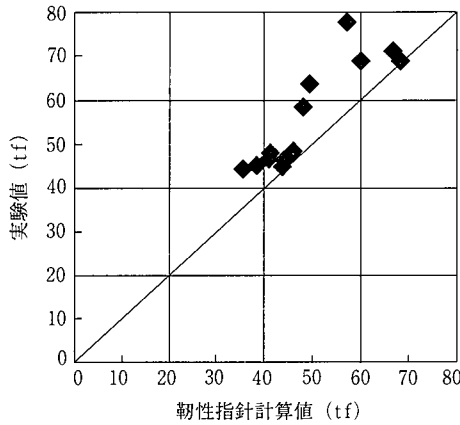


図13 柱試験体の終局耐力の実験値と計算値の関係

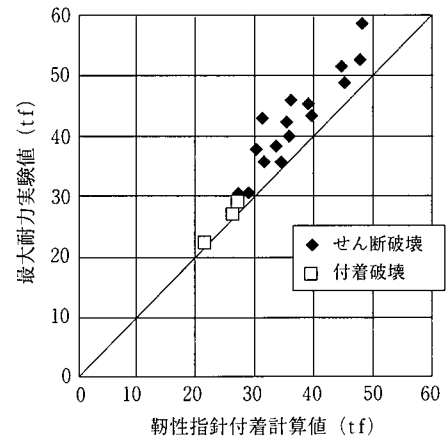


図14 梁試験体の終局耐力実験値と計算値の関係

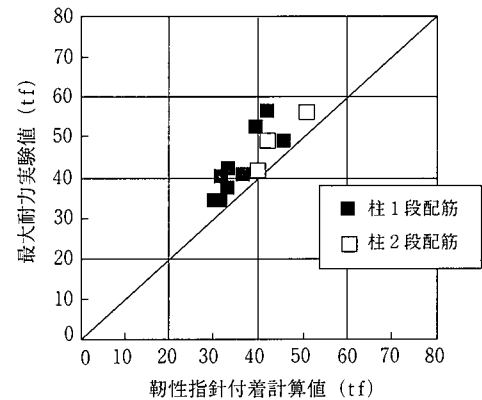


図15 柱試験体の終局耐力実験値と計算値の関係

式と同一のものである。

$$V_{bu} = \Sigma(\tau_{bu}\Psi) j_e + \nu \sigma_B - 2.5 \Sigma(\tau_{bu}\Psi) / \lambda b_e j_e b D \tan \theta / 2 \quad \dots\dots(6)$$

$$V_{bu} = \lambda \nu \sigma_B b_e j_e / 2 \quad \dots\dots(7)$$

ここで、 $\Sigma(\tau_{bu}\Psi) = \tau_{bu}\Sigma\Psi_1 + \tau_{bu2}\Sigma\Psi_2$   
 (降伏ヒンジを計画する部材)  
 $= (1 - 10R_p) \tau_{bu}\Sigma\Psi_1 + \tau_{bu2}\Sigma\Psi_2$   
 (降伏ヒンジを計画しない部材)

- $\tau_{bu}$  : 1段目主筋の付着信頼強度
- $\Sigma\Psi_1$  : 1段目主筋の周長の合計
- $\tau_{bu2}$  : 梁の2段目主筋の付着信頼強度
- $\Sigma\Psi_2$  : 梁の2段目主筋の周長の合計
- $R_p$  : 終局限界状態でのヒンジ領域の回転角

“鉄筋コンクリート構造物の終局強度型耐震設計指針・同解説”<sup>6)</sup>  
 (以下、終局強度指針と略記する)においては、藤井、森田の提案式を基に導いた付着強度が採用されていた。しかしながら、近年の研究によると、この付着強度式は中子筋や中吊り筋などの副補強筋が配筋されている部材の付着割裂強度を過小評価することが指摘されている。靱性指針では、近年の付着強度に関する多くの実験結果を基に副補強筋の効果を適切に評価した、比較的精度のよい付着割裂強度式を採用している。

図14に梁試験体の終局耐力実験値と(6)~(7)式より求めた計算値との関係を示す。梁試験体は付着割裂破壊した試験体が3体と少なかったため、せん断破壊した試験体もデータに含めた。また、二段目主筋を計算値に算入している。図15に柱試験体の終局耐力実験値と計算値との関係を示す。柱試験体のデータはすべて付着割

裂破壊したものである。二段目主筋は計算値に算入していない。梁・柱試験体ともすべて実験値は計算値よりも大きくなり、実験値／計算値の平均値は、梁試験体で1.144、柱試験体で1.155となった。以上より、ハイデック685Hの付着割裂破壊影響を考慮したせん断信頼強度は靱性指針式を採用することとした。

## 5. 結 言

降伏強度685N/mm<sup>2</sup>以上を有する高強度せん断補強筋ハイデック685Hを安全かつ効率的に評価する設計手法を検証した。具体的には、

- (1)低炭素ベイナイト鋼の成分を微調整し、温水調整冷却設備と組合わせて、インライン熱処理型高強度コイル鉄筋を開発した。
- (2)許容応力度設計では、RC規準に示される許容せん断力式を用いることの妥当性を示した。
- (3)終局強度設計では、靱性指針に示されるせん断信頼強度式を用いることの妥当性を示した。
- (4)付着に対する設計では、靱性指針に示される付着破壊を考慮したせん断信頼強度式を用いることの妥当性を示した。

## 謝 辞

北海道工業大学の柴田拓二教授(現学長)、武田寛助教授にはハイデック685Hの性能評価全般に多大なるご指導をいただいた。また、室蘭工業大学荒井康幸教授及び学生各位には梁試験体の実験及びデータ整理のご協力をいただいた。お礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 権藤永 ほか：製鉄研究. (303), 75(1980)
- 2) 梶丸谷政志 ほか：塑性と加工. 37(428), 945(1996)
- 3) 河原俊哉 ほか：600N/mm<sup>2</sup>級高強度せん断補強筋を用いた鉄筋コンクリート梁のせん断補強効果. 日本建築学会北海道支部研究報告集. 1997
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説. 第1版. 1997.7
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造設計規準・同解説. 第6版. 1994.2
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説. 第1版. 1990.11