

# 中段筋基礎梁の設計

益尾 潔 ◎（一社）建築構造技術支援機構 代表理事

## 中段筋基礎梁開発の背景

中段筋基礎梁は、SABTEC機械式定着工法RCS混合構造設計指針（2018年）<sup>1)</sup>の鉄骨露出柱脚・基礎梁主筋定着部編3章（2）で規定する直接基礎の場合、基礎梁上下主筋定着部の応力緩和のために用いることにしている。また、基礎梁鉄筋工事の施工性改善を意図し、中段筋梁の実験を基に、キョウエイリング685設計施工指針に中段筋基礎梁の設計が盛り込まれたことより、SABTEC指針（2021年）に中段筋基礎梁の設計が盛り込まれている<sup>2)</sup>。

## 中段筋基礎梁設計の基本事項

中段筋基礎梁では、図1に示すように全主筋本数を変えずに、梁上下面から梁せい $D/3$ とした中段筋範囲の上側と下側に中段筋を配置し、構造規定①～③を満足すれば、剛性低下率、降伏曲げモーメント、曲げ終局耐力を算定したうえで、従来の基礎梁と同様、せん断設計を行うことができる。ただし、上側と下側中段筋はそれぞれ1段とし、中段筋鋼種、呼び名、本数は同じとしている。

### ◎構造規定

- ①中段筋基礎梁の内法スパン長比 $L/D$ は、3.0以上とする。
- ②中段筋比 $p_m \leq 2.0\%$ かつ中段筋鋼種SD390の場合 $F_c 30\text{N/mm}^2$ 以上とし、SD490の場合 $F_c 60\text{N/mm}^2$ とする。
- ③中段筋基礎梁の引張鉄筋比 $p_t$ は、曲げ終局強度時釣合い鉄筋比 $p_{th}$ 以下とする。

$$p_t = a_t / bD : \text{中段筋基礎梁の引張鉄筋比}$$

ただし、引張鉄筋断面積 $a_t$ は、上端側の $a_{tT}$ 、ま

たは下端側の $a_{tB}$ としている。

$$p_m = \frac{a_g - (a_{tT} + a_{tB})}{bD} : \text{中段筋比}$$

$a_g$ ：全主筋断面積（ $\text{mm}^2$ ）

$b, D$ ：基礎梁幅とせい（ $\text{mm}$ ）

$F_c$ ：コンクリートの設計基準強度（ $\text{N/mm}^2$ ）

また、中段筋基礎梁の設計では、図1の中段筋基礎梁断面の配筋諸元を用い、一次設計による長期および短期許容応力度を確認することとしている。

## 中段筋基礎梁の剛性低下率、降伏曲げモーメント、曲げ終局耐力の算定

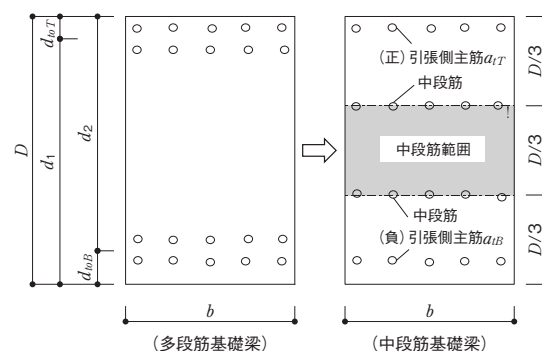
中段筋基礎梁の剛性低下率 $\alpha_y$ は式（1）、降伏曲げモーメント $M_y$ は式（2）、曲げ終局耐力 $M_u$ は式（3）で算定することができる。

- $a/D \geq 2$  の場合

$$\alpha_y = (0.043 + 1.64n \cdot p_t + \frac{0.043a}{D}) \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2$$

- $a/D < 2$  の場合

$$\alpha_y = \left(-0.0836 + \frac{0.159a}{D}\right) \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (1)$$



$a_{tT}, a_{tB}$ ：上端側、下端側引張鉄筋断面積  
 $d_{10T}, d_{10B}$ ：上端側、下端側引張主筋群の重心位置  
 $d_1 = D - d_{10T}$ ：上端引張時の有効せい  
 $d_2 = D - d_{10B}$ ：下端引張時の有効せい

図1 多段筋基礎梁と中段筋基礎梁

$$M_y = 0.9a_t \cdot f_{ut} \cdot d \quad (2)$$

$$M_u = 0.9 \left(a_t + \frac{a_n}{2}\right) \cdot \sigma_{sy} \cdot d \quad (3)$$

ここで、 $a/D$ ：シアスパン比

$n$ ：ヤング係数比

$a_n$ ：上側と下側中段筋の全断面積（ $\text{mm}^2$ ）

$d$ ：多段筋基礎梁の有効せい（図1）（ $\text{mm}$ ）

（多段筋基礎梁の圧縮コンクリート縁から上端側または下端側主筋群の重心までの距離 $d_1, d_2$ ）

$f_{ut}$ ：梁主筋の短期許容引張応力度

$\sigma_{sy}$ ：梁主筋の降伏強度

ただし、SD345, SD390の場合は $\sigma_{sy} = 1.1 \times \sigma_{syo}$ , SD490の場合は $\sigma_{sy} = \sigma_{syo}$ とする。

$\sigma_{syo}$ ：規格引張降伏点

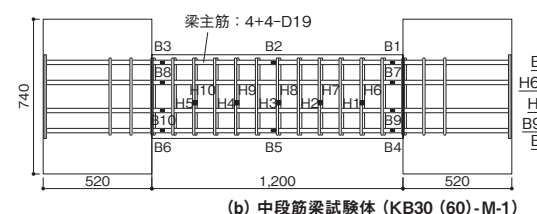
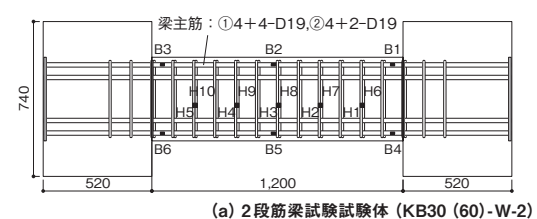
## 中段筋基礎梁のせん断設計

中段筋基礎梁の場合、SABTEC指針（2021年）<sup>2)</sup>に従い、荒川mean式または、修正塑性式でせん断終局耐力を算定し、両式のせん断条件を満足するように、せん断設計を行うことにしている。

表1 中段筋梁実験計画

試験体	$F_c$ ( $\text{N/mm}^2$ )	梁主筋		横補強筋	
		主筋 ( $p_t$ )	鋼種	配筋	$p_w$ (%)
KB30-W-2	30	4+4-D19	SD	4-D10 @100	0.95
KB30-M-1		(1.91%)	390		
KB60-W-2	60	4+4-D19	SD		
KB60-M-1		(1.91%)	490		

内法スパン長 $L=1,200\text{mm}$  ( $L/D=3.0$ )、梁幅 $b \times$ 梁せい $D=300\text{mm} \times 400\text{mm}$   
 $F_c$ ：コンクリートの目標圧縮強度、 $p_t$ ：引張鉄筋比、 $p_w$ ：横補強筋比  
 横補強筋鋼種：すべてUSD685（溶接閉鎖型）  
 KB30-W-2, KB60-W-2：2段筋梁、KB30-M-1, KB60-M-1：中段筋梁  
 中段筋比 $p_m=1.91\%$ （上下中段筋とも、4-D19）



B1：主筋ひずみ測定位置、H1：横補強筋ひずみ測定値

図2 中段筋梁と2段筋梁試験体の配筋詳細

## 中段筋梁実験計画および実験結果

中段筋基礎梁の終局耐力の妥当性は、表1、図2に示すように、SD390およびSD490とした2段筋梁試験体と中段筋梁試験体について、建研式加力装置を用いた正負繰返し加力実験で確認されている。

この場合、中段筋梁試験体では、上下引張側主筋を各4-D19、上下中段筋を各4-D19とし、中段筋比 $p_m = 1.91\%$ としている。

これらより、構造規定②では、中段筋比 $p_m \leq 2.0\%$ 、かつ、中段筋鋼種SD390の場合、 $F_c 30\text{N/mm}^2$ 以上とし、鋼種SD490の場合、 $F_c 60\text{N/mm}^2$ としている。

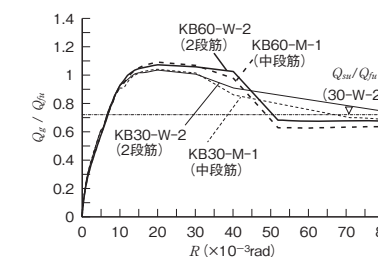
また、2段筋梁と中段筋梁試験体の正加力時包絡線を図3に示す。同図中には、表2に記載の2段筋梁試験体KB30-W-2の荒川mean式によるせん断余裕度 $\lambda_p = Q_{su}/Q_{fu} = 0.72$ を破線で示している。

図3によると、各試験体ともに、梁曲げ降伏後、部材角 $R = 30 \times 10^{-3}\text{rad}$ 程度までほぼ一定の耐力を維持した後、SD390、 $F_c 30$ のKB30-W-2とKB30-M-1試験体および、SD490、 $F_c 60$ のKB60-W-2とKB60-M-1

表2 中段筋梁と2段筋梁試験体の終局耐力一覧

試験体	配筋方式	$Q_{fu}$ (kN)	$Q_{su}$ (kN)	$Q_{fu}/Q_{fu}$	$Q_{su}/Q_{fu}$	$Q_{max}$ (kN)	$Q_{max}/Q_{fu}$	$Q_{max}/Q_{fu}$
KB30-W-2	2段筋	527	380	0.72	0.98	545	1.04	1.05
KB30-M-1	中段筋	513	346	0.68	0.73	534	1.04	1.03
KB60-W-2	2段筋	661	484	0.73	0.77	708	1.07	1.13
KB60-M-1	中段筋	653	432	0.66	0.69	713	1.09	1.13

$Q_{fu}$ ：平面保持仮定による曲げ耐力時せん断力  
 $Q_{su}$ ：略算式による曲げ耐力時せん断力  
 $Q_{su}$ ：荒川mean式によるせん断終局耐力  
 $Q_{max}$ ：最大耐力実験値



$Q_{fu}$ ：曲げ終局耐力計算値、  
 $Q_{su}$ ：荒川mean式によるせん断耐力計算値

図3 中段筋梁と2段筋梁試験体の正加力時包絡線

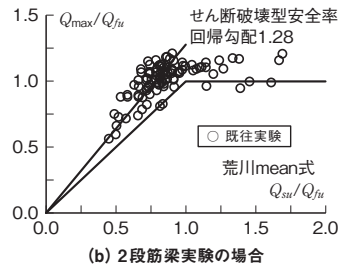
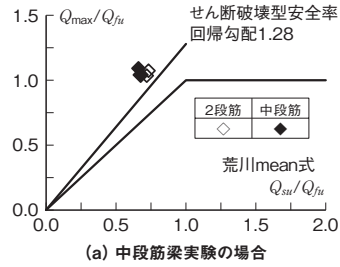


図4 中段筋梁と一般梁実験の耐力安全率 $Q_{max}/Q_{fu}$ —せん断余裕度 $Q_{su}/Q_{fu}$ 関係

試験体の正加力時包絡線は、それぞれ限界部材角 $R_{80}$ を超える大変形域までほぼ一致している。 $R_{80}$ は最大耐力の80%低下時限界部材角実験値である。

## 中段筋梁と2段筋梁試験体の終局耐力

中段筋梁と2段筋梁試験体の終局耐力一覧を表2、中段筋梁と一般梁実験の耐力安全率 $Q_{max}/Q_{fu}$ —せん断余裕度 $Q_{su}/Q_{fu}$ 関係を図4に示す。

$Q_{max}$ は最大耐力実験値、 $Q_{fu}$ は平面保持仮定に基づく精算式による曲げ終局耐力時せん断力、 $Q_{fuo}$ は略算式による曲げ終局耐力時せん断力、 $Q_{su}$ は荒川mean式によるせん断終局耐力を示す。

ここで、中段筋梁の略算式は式(3)であり、2段筋梁の略算式は慣用式( $M_u = 0.9a_t \cdot \sigma_{sy} \cdot d$ )としている。

図4(a)では2段筋梁と中段筋梁実験値(◇, ◆), 図4(b)では1段筋梁と2段筋梁(以下、一般梁)実験値(○)<sup>3),4)</sup>を示し、図4(a),(b)ともに、 $Q_{su}/Q_{fu} \leq 1.0$ (せん断破壊型)の回帰勾配(1.28)を示している。計算耐力はコンクリートおよび鉄筋の実強度を用いて算定している。

表2に示すように、中段筋梁試験体の式(3)による曲げ終局耐力時せん断力 $Q_{fuo}$ は $Q_{fu}$ の0.96~1.01倍、 $Q_{max}$ の1.03~1.13倍であり、2段筋梁試験体と同様、 $Q_{max}$ に対して安全側に評価されている。

表3 精算式と略算式による曲げ終局耐力時せん断力の算定結果

主筋鋼種	配筋種別	中段筋位置係数 $n$	略算式		精算式		$Q_{fuo}/Q_{fu}$
			$Q_{fuo}$ (kN)	$Q_{fu}$ (kN)	$X_n/D$	$D\phi_u$ ( $\times 10^{-3}$ )	
SD 390	2段筋	—	518	515	0.23	13.4	1.01
		4.0	518	513	0.23	13.3	1.01
	中段筋	3.0	518	502	0.26	11.6	1.03
		2.5	518	500	0.28	10.6	1.04
SD 490	2段筋	—	630	643	0.22	13.8	0.98
		4.0	630	647	0.20	15.4	0.97
	中段筋	3.0	630	643	0.22	13.7	0.98
		2.5	630	648	0.24	12.8	0.97
		2.0	630	663	0.26	11.8	0.95

(注) 梁上下縁からの中段筋位置:  $\pm D/n$ ,  $D$ : 梁せい  
 $Q_{fuo}$ ,  $Q_{fu}$ : 略算式および精算式の曲げ終局耐力時せん断力  
 $X_n$ : 終局時中立軸位置,  $\phi_u$ : 終局時曲率  
(材料強度) SD390:  $\sigma_{sy}=452\text{N/mm}^2$ ,  $\sigma_B=30.9\text{N/mm}^2$ , SD490:  $\sigma_{sy}=549\text{N/mm}^2$ ,  $\sigma_B=58.8\text{N/mm}^2$

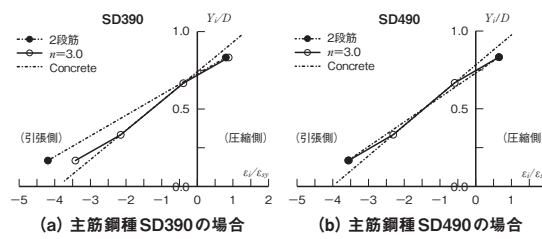


図5  $n=3$ とした精算式による曲げ終局耐力時各部ひずみ分布

また、表2、図4によると、せん断余裕度 $Q_{su}/Q_{fu} \geq 1.1$ の場合、おおむね、最大耐力実験値 $Q_{max}$ は式(3)の曲げ終局耐力時せん断力 $Q_{fuo}$ を上まわる。これらより、SABTEC指針(2021年)<sup>2)</sup>で規定する中段筋基礎梁は、基本事項を満足する場合、従来の基礎梁と同様、せん断設計を行うことができる。

## 中段筋梁と2段筋梁試験体の曲げ終局耐力時中立軸位置比 $X_n/D$

表1の試験体と同一断面寸法の中段筋梁と、2段筋梁の略算式と精算式による曲げ終局耐力時せん断力の算定結果を表3に示す。精算式は平面保持仮定に基づく曲げ終局耐力量式、略算式は式(3)としている。表3中の中段筋位置係数 $n$ は、梁せい $D$ に対する梁上下面からの中段筋位置までの距離の比の逆数であり、実験に供した中段筋梁では $n=3$ としている。また、同表中の計算耐力は、実験に供した主筋とコンクリートの実強度を用いて算定している。

表3によると、中段筋梁の曲げ終局耐力時せん断力の比 $Q_{fuo}/Q_{fu}$ は、中段筋位置係数 $n=2.0\sim 4.0$ では、SD390の場合1.01~1.04、SD490の場合0.95~0.98であり、 $Q_{fuo}$ と $Q_{fu}$ の差異は小さく、曲げ終局

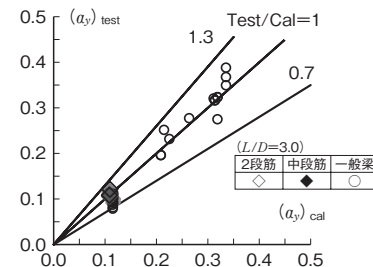


図6  $(\alpha_y)_{test} - (\alpha_y)_{cal}$ 関係

耐力 $M_u$ は式(3)で実用上十分な精度で評価できる。これらより、構造規定②では、SD390の場合 $F_c 30\text{N/mm}^2$ 以上とし、SD490の場合 $F_c 60\text{N/mm}^2$ としている。一方、表3に示すように、中段筋位置係数 $n=3$ としたSD390とSD490の場合、精算式による終局時中立軸比 $X_n/D$ は、0.26および0.22となる。

これらの点を考慮すると、構造規定②にかかわらず、 $F_c 60\text{N/mm}^2$ 未満の場合、 $X_n/D$ を0.25以下に制限すれば、中段基礎梁として扱ってもよいと判断できる。

図5に、中段筋位置係数 $n=3$ とした精算式による曲げ終局耐力時各部ひずみ分布を示す。図5によると、SD390、SD490ともに、中段筋ひずみは、2段筋梁主筋ひずみよりも小さく、コンクリート断面要素分割位置のひずみとほぼ一致する。

## 中段筋梁の剛性低下率および降伏曲げモーメント

式(1)<sup>6),7)</sup>の剛性低下率 $(\alpha_y)_{test} - (\alpha_y)_{cal}$ 関係を図6に示す。剛性低下率実験値 $(\alpha_y)_{test}$ は、図7の $M-R$ 関係を基に式(5)で算定し、式(5)中の $S_e$ を式(6)で求めている。図6中には、 $L/D=3.0$ の2段筋梁および中段筋梁実験結果と、SABTEC指針(2021年)<sup>2)</sup>の検討対象試験体(12体)ならびに $L/D \geq 4.0$ かつ $Q_{su}/Q_{fu} \geq 0.9$ の(14体)<sup>3)</sup>の既往実験結果を示している。

図7中の $(R_y)_{test}$ は、参考文献3)の定義より、 $(M_y)_{test} = 0.9M_u$ ,  $(R_y)_{test} = 10 \times 10^{-3}\text{rad}$ とし、 $M_u$ は平面保持仮定による曲げ終局耐力としている。

次に、式(2)<sup>8)</sup>の降伏曲げモーメント $(M_y)_{test}/bD^2 - (M_y)_{cal}/bD^2$ 関係を図8に示す。また、図8には、 $L/D=3.0$ の中段筋梁実験結果とSABTEC指針(2021年)<sup>2)</sup>の検討対象試験体(12体)の既往実験結果を示している。

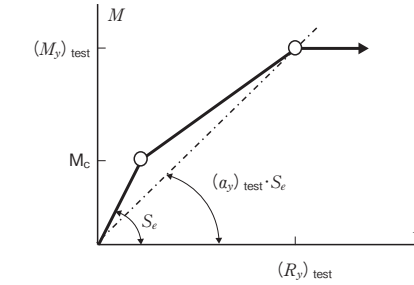


図7 剛性低下率実験値 $(\alpha_y)_{test}$ の定義

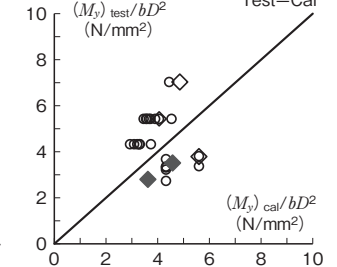


図8  $(M_y)_{test}/bD^2 - (M_y)_{cal}/bD^2$ 関係

$$(\alpha_y)_{test} = (M_y)_{test} / \{S_e \cdot (R_y)_{test}\} \quad (5)$$

$$S_e = M/R = 6E_c \cdot I_c / L_e, L_e = L + 2 \times (D/4) \quad (6)$$

ここで、 $(M_y)_{test}$ : 梁主筋降伏時曲げモーメント、 $E_c$ : コンクリートのヤング係数、 $I_c$ : 梁断面2次モーメント、 $L_e$ : 剛域を考慮した梁スパン長

図6の式(1)による $(\alpha_y)_{cal}$ および、図8の式(2)による $(M_y)_{cal}$ は、既往実験と同様、それぞれ実験値の0.7~1.3倍程度となるので、一般梁と同様、中段筋梁の剛性低下率 $\alpha_y$ は式(1)、降伏曲げモーメント $M_y$ は式(2)で算定してもよいとしている。

## おわりに

本連載第2回「中段筋基礎梁の設計」として、中段筋基礎梁設計の主要規定とそれらの実験的ならびに理論的根拠について紹介した。

(ますお きよし)

## 【参考文献】

- (一社) 建築構造技術支援機構: SABTEC機械式定着工法RCS混合構造設計指針(2018年), 2018年11月
- 益尾潔: SABTEC高強度せん断補強筋設計施工指針(2021年)第1回SABTEC指針(2021年)の概要, 建築技術2022年1月号, pp.58~59
- 益尾潔: 鉄筋コンクリート柱, はり部材の終局せん断耐力ならびに降伏変形の評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第452号, pp.87-97, 1993年10月
- 林哲平, 小寺耕一郎, 益尾潔: SD490および785N/mm<sup>2</sup>級横補強筋を用いたRC梁の構造性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.457-458, 2015年9月
- (一社) 日本建築防災協会: 2017年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説, 付則2壁, pp.271-276, 2017年7月
- 菅野俊介: 鉄筋コンクリート部材の復元力特性に関する研究, コンクリートジャーナル, Vol.11, No.2, pp.1-9, 1973年2月
- 菅野俊介, 東端泰夫, 山口育雄: 鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する研究(その18), 日本建築学会大会梗概集, pp.1.323~1.324, 1974年10月
- (一社) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準8条, pp.68~88, 2018年12月