論文　機械式定着工法によるRC造ト形接合部における梁主筋の必要定着長さ

益尾　潔*

要旨：益尾，窪田は，機械式定着工法によるRC造ト形接合部における梁主筋の側面剥離定着耐力を精度よく評価できる算定式を既発表論文で提案した。本論文では，機械式定着工法による定着設計を明快に行えるように，同提案式を基に側面剥離定着耐力を確保するための梁主筋の必要定着長さの算定式を導出するとともに，同算定式を用いて求めた必要定着長さの常用値とRC構造計算規準による常用値との比較，検討結果を示した。

キーワード：機械式定着工法，ト形接合部，梁主筋，側面剥離定着耐力，必要定着長さ

1. はじめに

従来，機械式定着工法によるRC造ト形接合部における梁主筋定着部は，定着長さを一定値以上とするなどの基本要件を満足させた上で，側面剥離定着耐力が梁主筋自体の降伏引張力を上回るように設計されている[1)]。この設計方法で用いられている村上・窪田式[2)]では，側面剥離定着耐力の評価に定着長さが考慮されていない。

これに対し，益尾，窪田は，梁主筋の定着長さ等を考慮することによって，機械式定着工法による梁主筋側面剥離定着耐力を精度よく評価できる算定式を既発表論文[3)]で提案した。

本論文では，機械式定着工法による定着設計を明快に行えるように，側面剥離定着耐力の確保を条件とし，筆者らの提案式を基に梁主筋の必要定着長さの算定式を導出するとともに，同算定式を用いて求めた必要定着長さの常用値とRC計算規準[4)]による常用値を比較，検討する。併せて，長期荷重のみを受ける小梁主筋およびスラブ筋の必要定着長さについても検討する。

2. 梁主筋側面剥離定着耐力の算定式

益尾，窪田[3)]による梁主筋側面剥離定着耐力の提案式(1)は，既製定着金物を用いた場合について，実験値/計算値がほぼ1.0になるように導出されており，同式に低減係数(β_{ao}=0.8)を乗じた設計式を用いて求めた計算値は実験値の下限を与える。

$$Tau = k1 \cdot k2 \cdot k3 \cdot k4 \cdot k5 \cdot k6 \cdot \sigma_{auo} \cdot \Sigma Ap \quad (1)$$

$$\sigma_{auo} = (31.2Fc^{-0.5} - 1.26) \cdot Fc \quad (2)$$

：基本支圧強度(N/mm^2)

k1：支圧面積比(α_p)による補正係数

k2：定着長さ比($\ell a/db$)による補正係数

k3：ストラット勾配($\ell a/jtg$)による補正係数

k4：側面かぶり厚さ比(Cs/db)による補正係数

k5：接合部横補強筋比($pjwh$)による補正 係数

k6：定着筋直径(db)による補正係数

Fc：コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

ΣAp：定着金物の支圧面積の総和

$\alpha_p = Ap/at$：支圧面積比，at：定着筋の断面積

ℓa：定着長さ，pjwh：接合部横補強筋比，

表-1　補正係数k1～k6の算定式

$k_1 = 5.5/\alpha_p$	(A1)
$k_2 = 0.8+0.0167(\ell_a/d_b) \leqq 1.1$	(A2)
$k_3 = 0.7+0.3(\ell_a/j_{tg}) \leqq 1.05$	(A3)
$k_4 = 0.92+0.02(C_s/d_b) \leqq 1.05$	(A4)
$k_5 = 0.9+12.5p_{jwh} \leqq 1.0$	(A5)
$k_6 = k_{6d} \cdot k_{6f} \leqq 1.0$	(A6)-1
$k_{6d} = 1.31-0.0125d_b \leqq 1.0$	(A6)-2
$k_{6f} = 0.492+0.0169F_c \geqq 1.0$	(A6)-3

（単位：mm，N/mm^2）

実験因子の範囲

	最小値	最大値
α_p	2.6	5.8
σ_B (N/mm^2)	20.5	62.2
ℓ_a/d_b	8.0	16.8
ℓ_a/D_c	0.44	0.84
ℓ_a/j_{tg}	0.50	1.18
C_o/d_b	2.6	3.9
p_{jwh} (%)	0	0.79
d_b (mm)	19	41

＊　（財）日本建築総合試験所 試験研究センター 構造部長　工博（正会員）

jtg：梁上下主筋の重心間距離

表-1に，式(1)中で用いた補正係数k1～k6の算定式と式(1)の検証用試験体の実験因子の範囲を示す。式(1)では，側面剥離定着破壊は柱梁接合部のせん断破壊と複合して起こる可能性が高いと考え，接合部横補強筋比pjwhを評価指標としている。また，定着長さℓaは，定着金物位置でのコンクリートの支圧抵抗と密接に関係するので，評価指標として定着長さ比ℓa/dbとストラット勾配ℓa/jtgを選定している。ℓa/jtgについては，柱梁接合部のせん断ひび割れに沿う圧縮ストラットの傾きも側面剥離定着耐力に影響を及ぼすと考えて選定している。

Tmax/Ty－Tau/Ty関係を**図-1**，実験値/計算値の統計値一覧を**表-2**に示す。Tmaxは側面剥離定着耐力実験値，Tyは梁主筋の引張降伏耐力であり，同表中には村上・窪田式[2]と田才式[5]による計算値を併記した。これらより，式(1)による側面剥離定着耐力Tauは，いずれの既製定着金物を用いた場合にも精度よく評価できることがわかる。

なお，式(1)の原式では，jtgの代わりに梁の応力中心距離jが用いられているが，式(1)では，柱梁接合部の終局強度設計用せん断力との関連を考慮し，梁上下主筋の重心間距離jtgを用いている[3]。

3. 梁主筋必要定着長さの算定式

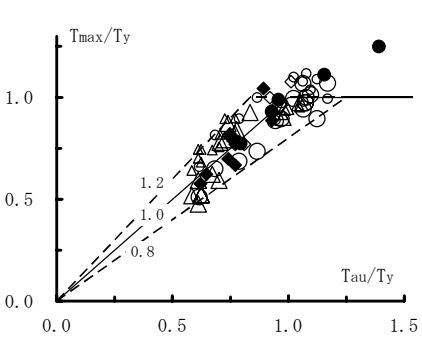
通常，梁主筋中心からの側面かぶり厚さCsは3db以上とされるので，Cs/db=3(k4=0.98)とし，低減係数(βao=0.8)を考慮すると，式(1)より，梁主筋側面剥離定着耐力時の引張応力σsauは，下式で求められる。

$$\sigma_{sau}=Tau/\Sigma at=5.39k2\cdot k3\cdot k5\cdot k6\cdot \sigma_{auo} \quad (3)$$

式(3)に対し，$\sigma_{sau}=\sigma_{sy}$とすると，下式が得られる。σ_{sy}は梁主筋の降伏強度を示す。

$$Sao=k2\cdot k3=\sigma_{sy}/(5.39k5\cdot k6\cdot \sigma_{auo}) \quad (4)$$

式(4)と表-1中に示したk2およびk3の算定式より，必要定着長さ比(ℓao/db)に関する2次式が得られ，その解として式(5)が導出される。



呼び名	上下筋区別	試験体数	プロット
D35	－	7	●
D41	上	5	(上)○
	下	4	(下)○
D25	上	7	
	下	6	
D19	上	2	
	下	2	
D25	上	11	(上)△
	下	8	(下)△
D41	上	5	
	下	5	
D41	－	1	◇
D25		3	
D22	－	10	◆

図-1　Tmax/Ty－Tau/Ty関係[3]

表-2　実験値/計算値の統計値一覧[3]

	提案式		村上式		田才式	
	Case1	Case2	Case1	Case2	Case1	Case2
平均値	0.96	1.00	0.97	1.02	1.09	1.13
最大値	1.18	1.23	1.29	1.41	1.43	1.86
最小値	0.78	0.78	0.71	0.71	0.74	0.74
標準偏差	0.09	0.11	0.12	0.15	0.15	0.18
変動係数	0.10	0.11	0.12	0.14	0.13	0.16

Case1:窪田らの実験の下端筋を除く場合(51体)
Case2:全試験体を含めた場合(76体)

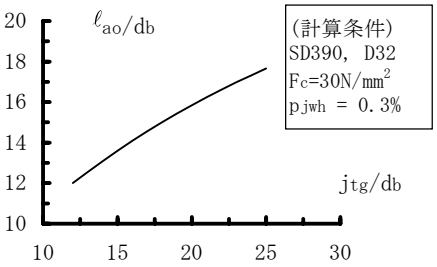


図-2　jtg/db－ℓao/db関係

$$\ell ao/db=\sqrt{Djg^2-2(jtg/db)\cdot Sa}-Djg \quad (5)$$

$$Sa=56-100Sao,\ Djg=1.17(jtg/db)+24 \quad (6)$$

補正係数k2,k3は，**表-1**に示すように，益尾・窪田式の検証用実験より，k2≦1.1およびk3≦1.05と制限される。この制限をℓaoで表すと，ℓao≦18db、ℓao≦1.1jtgとなる。

すなわち，ℓaoが18dbまたは1.1jtgを超える場合，ℓa=ℓaoとして求めたTauが梁主筋の降伏耐力Tyより小さいと、定着長さℓaを増やしても，TauはTyを超えない。この場合，Tau＞Tyとするためには，コンクリート強度Fc，定着筋直径db，接合部横補強筋比pjwhなどを変更し，再度，必要定着長さ比を式(5)より求める必要がある。

4. 梁主筋必要定着長さ比の常用値

式(5)による必要定着長さ比ℓao/dbは，他の要因が一定値の場合，**図-2**に示すように，jtg/db

が大きいほど増加する。

通常，定着長さ ℓa は12db以上と規定されることを考慮し，ℓao=12～18dbとすると，$\ell ao \leqq 1.1 jtg$ の時には，$jtg/db=(\ell ao/db)\cdot(jtg/\ell ao) \geqq 10.9$～16.4となる。これらの場合，定着長さ ℓa を増やしても，式(1)によるTauは一定値となる。

一方，**表-1**に示した実験による $\ell a/jtg$ の下限値(0.5)を用いると，$jtg/db=24$ となり，db=41mmとすると，jtg=984 mm(概ね実梁の最大値)となる。なお，既往実験のト形部分架構試験体[3]における jtg/db は10～20程度である。

以上より，$jtg/db=24$(Djg=52.1)，$pjwh=0.3\%$($k_5=0.938$)とするとともに，梁主筋の降伏強度 σsy を下記の上限強度算定用材料強度[6]とし，梁主筋必要定着長さ比の常用値を求める。

(SD295)1.30 σ syo，(SD345,SD390)1.25 σ syo
(SD490)1.15 σ syo，σ syo:規格最小降伏点

表-3に，梁主筋の鋼種と呼び名およびコンクリートの設計基準強度Fcを変化させて求めた梁主筋の必要定着長さ比$\ell ao/db$を呼び名に応じて3グループにまとめた中で，大きい方の呼び名に対する $\ell ao/db$ の値を常用値として示した。

同表中の〃－〃を付した場合は，$k_2 \leqq 1.1$ の条件より，接合部横補強筋比 pjwh などを変更しなければ，該当する鉄筋鋼種に対して利用できないコンクリートであることを示す。

なお，$jtg/db > 24$ の場合，同表による値を採用できないので，式(5)によって $\ell ao/db$ を算定する必要がある。

5. RC規準による必要定着長さ比との比較

(1) $\ell ao/db$ －Fc関係

RC規準17条[4]では，柱梁接合部において柱筋，梁筋端を標準フックとする場合，必要投影定着長さ ℓab は，下式によるとしている。ただし，横補強筋で拘束されたコア内に定着される場合には0.8を乗じてよいとしている。梁主筋の投影定着長さ ℓah の定義を**図-4**中に示す。

$$\ell ab = S\cdot \sigma t\cdot db/(8fb) \quad (7)$$

ここに，fb:許容付着応力度で、(Fc/40)+0.9(N/mm^2)を用いる。

S：側面かぶり厚さによる必要定着長さの修正係数(標準フックに対する側面かぶり厚さが鉄筋径の2.5倍以上の時S=0.9としてよい。)

σ t：仕口面における鉄筋存在応力、長期、短期に係わらず，当該鉄筋の短期許容応力度を用いることを原則とする。

db：鉄筋の呼び名に用いる数値(mm)

上式において，S=0.9，σ t=fta(短期許容引張応力度)として求めたRC規準による必要投影定着長さ比 $\ell ab/db$ との比較を**図-3**に示す。なお，S=0.9に対応する側面かぶり厚さに対する鉄筋径の比(2.5)は，本論文で提案する**表-3**の計算に用いた梁主筋中心からの最小側面かぶり厚さの比(3)に相当する。

同図中には，RC規準の適用対象外のSD490の場合にも，σ t=490N/mm^2 として式(7)より求めた必要投影定着長さ比 $\ell ab/db$ を示している。本提案およびRC規準による場合ともに，$\ell ao/db$ または $\ell ab/db$ のプロット値を結ぶ同一線上でのFcの最小値は，該当する鉄筋鋼種に対して利用できる最小値を表す。RC規準による場合，17条の解説に従い，投影定着長さの増大による定着耐力の上昇効果を見込める上限を $\ell ab/db=20$ とし表示している。

同図によると，いずれの鋼種も，本提案による必要定着長さ比 $\ell ao/db$ は，同一Fcに対するRC規準による必要投影定着長さ比 $\ell ab/db$ より

表-3　梁主筋の必要定着長さ比 $\ell ao/db$ の常用値

鋼種	呼び名	Fc (N/mm^2)												
		21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60
SD295	D25以下	12													
	D29,D32	14	13	12											
	D35～D41	－	17	15	14	12									
SD345	D25以下	15	13	12											
	D29,D32	18	16	15	14	12									
	D35～D41	－			18	15	13	12							
SD390	D25以下	－	18	16	15	14	13	12							
	D29,D32	－			18	15	13	12							
	D35～D41	－					17	15	12						
SD490	D25以下	－				18	17	16		15	14		13		12
	D29,D32	－					17	16		15	14		13		12
	D35～D41	－							17	15	14		13		12

も小さく，細径鉄筋の場合，両者の差は大きい。また，SD295およびSD345の場合，呼び名がD35～D41の太径鉄筋に対して利用できる本提案によるFcの最小値は，RC規準による場合よりも大きい。この点は，式(1)中の補正係数k6より，低強度コンクリートに対し，太径鉄筋の側面剥離定着耐力時の支圧強度が細径鉄筋の場合よりも小さく評価されることに起因する。

(2) 各鋼種の利用可能な最小Fc値

4章で前述したℓ_{ao}=12db 時のjtg/dbの下限値(10.9)に対し，式(5)によって決定する各鋼種の利用可能な最小Fc値の一覧を**表-4**に示す。同表中には，RC規準による必要投影定着長さℓ_{ab}の上限値20dbならびに村上・窪田式[2]によって決定する最小Fc値を併記した。

本提案による最小Fc値は，同表に示すように，RC規準による場合と同程度の値になる。

村上・窪田式によると，定着長さℓ_aを12db 以上とする基本要件を満足する場合，定着長さに係わらず，以下に示すように，最小Fc値が決定する。同式による最小Fc値は，太径鉄筋の場合，本提案による値よりも小さい。これは，村上・窪田式では，鉄筋直径の影響が考慮されていないことに起因する。

(3) 村上・窪田式[2]による最小Fc値

低減係数β_a=0.8，支圧面積比による影響係数κ_1=1，側面かぶり厚さによる影響係数κ_2=0.99(∵Cs/db=3)，外周横補強筋による拘束効果の影響係数κ_3=1.29-0.146Fc(∵pjwc=0.3%)とすると，側面剥離定着強度σ_uが梁主筋の降伏強度σ_{sy}に一致する条件より，最小Fc値は次式を用いて算定される。

$$\sigma_u=\beta_a\cdot\kappa_1\cdot\kappa_2\cdot\kappa_3\cdot 101\sqrt{Fc}\ (N/mm^2) \quad (8)$$

(4) 機械式定着と折曲げ定着の抵抗機構

本提案によるℓ_{ao}/dbとRC規準によるℓ_{ab}/dbの差は，機械式定着とRC規準で主対象とする折曲げ定着の抵抗機構の差異に起因すると考えられる。すなわち，**図-4**に示すように，機械式定着による定着金物内面での支圧抵抗は，折曲げ定着[4]による折曲げ部内面での支圧抵抗よりも大きいと推察される。

梁主筋の定着長さℓ_aと投影定着長さℓ_{ah}が等しい機械式定着および折曲げ定着としたト形接合部の実験[7]より，折曲げ定着の場合，梁曲げ降伏後の接合部せん断破壊は，機械式定着の場合よりも早期に発生したと報告されている。しかしながら，現在のところ，両者の抵抗機構の差異は，実験的に十分に解明されていない。

表-4　各鋼種の利用可能な最小Fc値一覧

鋼種	呼び名	利用可能な最小Fc		
		本提案	RC規準	村上式
SD295	D41以下	Fc21	Fc18	Fc21
SD345	D32以下	Fc21	Fc27	Fc21
	D35～D41	Fc30		
SD390	D25以下	Fc24	Fc36	Fc27
	D29, D32	Fc30		
	D35～D41	Fc36		
SD490	D25以下	Fc33	－	Fc39
	D29, D32	Fc36		
	D35～D41	Fc42		

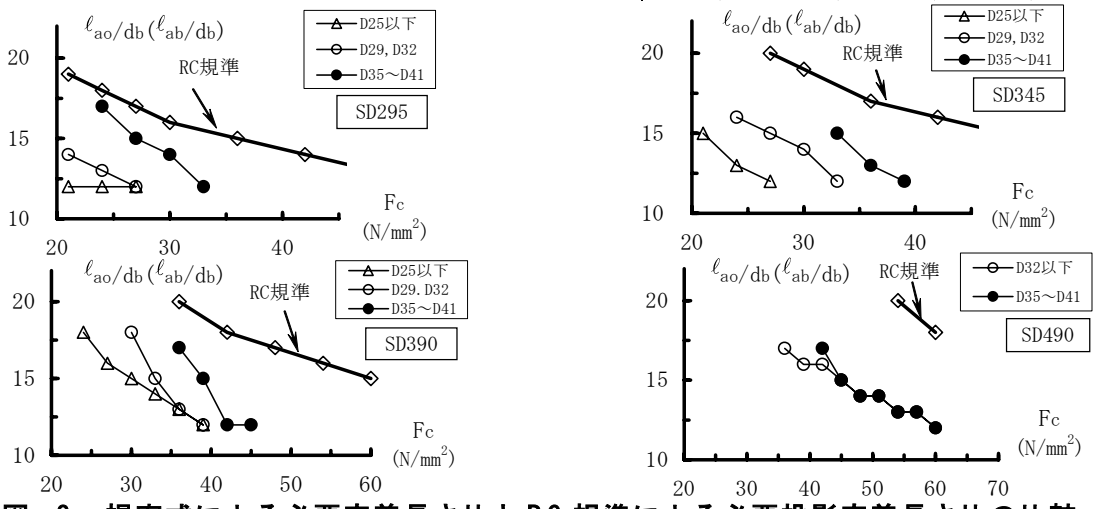


図-3　提案式による必要定着長さ比とRC規準による必要投影定着長さ比の比較

6. 仕口一般における鉄筋定着部

(1) 必要定着長さ比

柱梁接合部以外の仕口部一般については，柱梁接合部と同等のコアを形成することが難しいと推察されるが，小梁主筋およびスラブ筋は，長期荷重のみを受け，正負繰り返しの地震荷重を受けない。このような応力下の機械式定着工法による鉄筋の定着性能は実験的に明らかにされていない。

RC規準[4]では,仕口一般における引張鉄筋の必要定着長さは，靭性保証型指針[6]に示された掻き出し定着耐力式を基に，横補強筋の効果を無視するなどの簡略化を行なった算定式を用い，定着筋１本あたりの仕口幅に対する定着耐力を確保するための必要投影定着長さを求めることとしている。しかしながら，ト形接合部の既往実験[3]によると,掻き出し定着破壊は,定着長さが短い場合に表れる破壊形式であり，掻き出し定着耐力の実験値に対する靭性保証型指針式による推定精度はあまりよくない。

引張力を受ける小梁やスラブ端部の上端主筋定着部ついては，通常，側面は拘束されているが，上面は拘束されていないので，機械式定着の場合，上面側は側面剥離破壊を起こす恐れがある。この場合，定着側の梁断面内に適切な肋筋が配置されていれば,式(1)による側面剥離定着耐力と同程度以上の定着耐力を発現すると推察される。

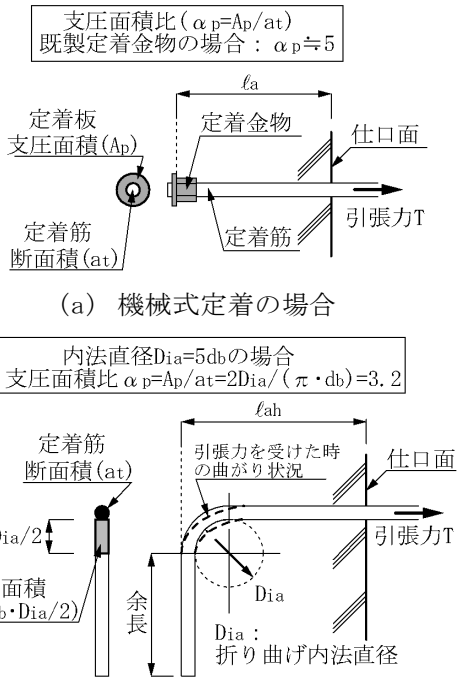
以上より，定着筋の拘束度合いを安全側に評価することを意図し，式(3)においてｐjwh=0(k5=0.9)とするとともに，ト形接合部の既往実験で採用されたストラット勾配(ℓa/jtg)の中でストラットによる拘束が最も小さい値(0.5)を用いk3=0.85と仮定し，小梁主筋およびスラブ筋の必要定着長さℓaoを式(9)より求める。

$$\ell ao/db=14.5\phi a\cdot fta/(k6\cdot \sigma auo)-47.9 \qquad (9)$$

fta：主筋の長期許容引張応力度

φａ：定着耐力に対する安全率(φａ=2.0)

上式によると，必要定着長さℓaoは，SD345～SD490の場合，鋼種に係わらず同じ長期許容引張応力度ftaに対して算定され，その値は同じftaを用いて求める当該の小梁およびスラブの長期許容曲げモーメントと整合する。また，定着耐力に対する安全率φａは，鉄筋の長期許容引張応力度に対する短期許容引張応力度の比(1.5)および長期荷重の変動を考慮して2.0とした。



図－4　機械式定着と折曲げ定着の抵抗機構

(2) 必要定着長さ比の常用値

必要定着長さℓaoは，ftaを大きく見積もった方が大き目に算定されるので，SD295の場合はfta=195N/mm^2，SD345～SD490の場合はfta=215N/mm^{2}として算定したℓaoを用いて常用値を定める。すなわち，**表-3**と同様，梁主筋の鋼種と呼び名およびコンクリートの設計基準強度を変化させて式(9)より求めた必要定着長さ比ℓao/dbを呼び名に応じて２～３グループにまとめた中で，大きい方の呼び名に対するℓao/dbの値を常用値とし，**表-5**に示した。

同表に示すように，小梁主筋およびスラブ筋の必要定着長さ比ℓao/dbの常用値は，ト形接合部における梁主筋に対する**表-3**による常用値よりもやや大き目の値となる。

表－5　小梁主筋およびスラブ筋の必要定着長さ比 $\ell ao/db$ の常用値

鋼種	呼び名	Fc (N/mm²)													
		21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60
SD295	D25以下	14	12												
	D29,D32	－	16	13	12	12									
	D35～D41	－				14	12								
SD345 SD390 SD490	D25以下	－	16	14	12	12									
	D29,D32	－			17	12									
	D35～D41	－					15	12							

(3) RC規準による必要定着長さ比との比較

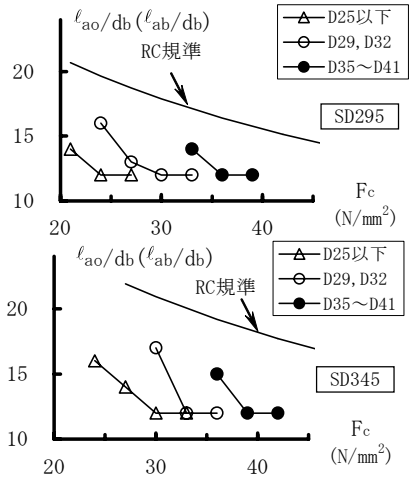
RC規準17条[4]によると，仕口一般の鉄筋端を標準フックとする場合，必要投影定着長さ ℓab は S=(4db)/Bs を用いて計算される。Bs は，定着筋1本あたりの仕口幅で，鉄筋径の5倍を超える場合は5db とし，補強筋で拘束されたコア内に定着する場合にはさらに0.8を乗じてよいとしている。

図-5に，Bs/db=4とするとともに，補強筋で拘束されたコア内に定着されるとし，σ t=fta(短期許容引張応力度)として求めたRC規準による $\ell ab/db$ との比較を示す。

同図によると，本提案による $\ell ao/db$ の値は，いずれの鋼種も同一Fcに対し，RC規準による $\ell ab/db$ の値よりもかなり小さい。ただし，本提案による場合，式(9)による $\ell ao/db$ が18を超えると，式(5)の場合と同様，k2≦1.1の条件より，Fcを大きくするか，鋼種を下げるかあるいは細径鉄筋を使用する必要がある。

7. まとめ

本論文では，機械式定着工法によるト形接合部における梁主筋側面剥離定着耐力を確保するための梁主筋の必要定着長さの算定式を導出するとともに，同算定式を用いて求めた必要定着長さの常用値とRC計算規準による常用値を比較，検討し，いずれの鋼種も，本提案による必要定着長さ ℓao は，同一Fcに対するRC計算規準による必要投影定着長さ ℓab よりも小さくなること等を明らかにした。併せて，長期荷重のみを受ける小梁主筋およびスラブ筋の必要定着長さの検討結果を示した。



図－5　小梁主筋およびスラブ筋の必要定着長さ比の常用値の比較

謝辞

本研究は，日本建築総合試験所が組織する「機械式鉄筋定着工法委員会(委員長：窪田敏行 近畿大学教授)での活動として行ったものであり，ここに記して，委員各位に感謝の意を表する。

機械式鉄筋定着工法研究委員会

委員長：窪田敏行、幹事：益尾潔
委員：菅野俊介、今井弘、中塚佶、田才晃
白沢吉衛、小林勝一、角彰、珍坂茂規、辻幸二
西村勝尚、山本憲一郎、渡辺勧
メーカー側委員：宇都宮武也、大橋茂信、小方智寿、塩川英世
高岸正章、中村一彦、松崎寿、三谷芳弘

参考文献

1) (財)国土開発技術研究センター:平成4年度New RC研究開発概要報告書，平成5年3月
2) 村上，藤，窪田：引き抜き試験によるはり主筋の機械式定着耐力の評価，コンクリート工学論文集，第8巻，第2号，pp. 1-10，1997. 7
3) 益尾，窪田:機械式定着工法によるRC造ト形接合部の終局耐力に関する設計条件，日本建築学会構造系論文集，第590号，pp. 87-94，2005. 4
4) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説－許容応力度設計法－，1999
5) 加藤，清原，田才，長田：RC 造柱梁接合部内に機械式定着した梁主筋の定着耐力の評価，JCI 年次論文集，Vol. 24，No. 2，pp. 859-864，2002
6) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建築物の靭性保証型耐震設計指針・同解説，1999
7) 中村，石渡，竹内，早川：円形定着板を用いた機械式定着工法の開発(その3)，(その4)，日本建築学会大会梗概集，構造Ⅳ，pp. 111-114，2001. 9