

[2087] 高強度グラウトを利用した PC 鋼より線埋込み定着部の力学性能試験

正会員 岡田克也 (竹中工務店技術研究所)
 正会員 持田哲雄 (竹中工務店技術研究所)
 正会員 ○ 柿沢忠弘 (竹中工務店技術研究所)
 正会員 尾高英雄 (黒沢建設技術部)

1. まえがき

プレストレストコンクリート (PC) は動のおよび繰り返し荷重のもとで長期的にすぐれた性能をもち、これを利用することで大水深の海洋構造物の出現が可能になり、かつ海洋の安全で効率的な開発が実現したと言っても過言ではない。現在、建造される海洋構造物は、ほとんどが大きく、かつ複雑な構造物であり、そこに適用するプレストレス鋼材の配置も複雑とならざるをえない。その際、構造物の外殻部、柱および壁を PC 工法で施工する場合に、従来のように縦方向でプレストレス導入に PC 鋼より線 (ストランド) を用いようとすると、下端での定着作業用のスペースを確保することが非常に困難な場合が多い。そこで、このような施工上の問題を解決するために、シースと埋込み定着体を予めコンクリート中に埋めこんでおき、後からストランドを挿入して埋込み定着体にグラウトで固化し、縦方向のプレストレス導入を容易でかつ経済的に行なう新工法として「後入れ縦方向 PC ストランドの埋込み定着工法」が考えられる。

この新工法では、埋込み定着部の鋼製容器 (定着ボトル) 内で最短の長さで、いかに確実にストランドを定着でき、かつ、その定着ボトルがコンクリート部材中で安全な埋込み定着具となるかが重要であり、そのためにボトル内に注入する高強度グラウトの性状、ストランド先端の処理、定着ボトルの形状などの定着性能に関する要因の検討が必要である。本論文では、それらの要因について定着部の力学性能試験を行なった結果を報告する。

2. 研究計画

ストランドを用いた埋込み定着工法の基本的な構成は以下の通りである。(図-1)

- a. シースおよび定着ボトルをコンクリート部材中に打込む。
- b. ストランドをシース上端より挿入する。
- c. 定着ボトル中に高強度グラウトを注入する。
- d. グラウトの硬化後に縦方向のプレストレスを導入する。
- e. 定着ボトルより上のシース内のグラウトを注入する。

今回は次の2種類の実験を行なった。すなわち、

- 1) 高強度グラウトの変形性状を調べるためのグラウトの支圧実験

- 2) 先端処理したストランドの定着性能を調べるための、ストランドの定着性能実験

ストランドの先端処理については、定着具の形状、部材内へのおさまり、ストランドのボトル内での定着の可能性等により、図-2に示すようにストランドの先端に圧着グリップを用いた工法について検討した。

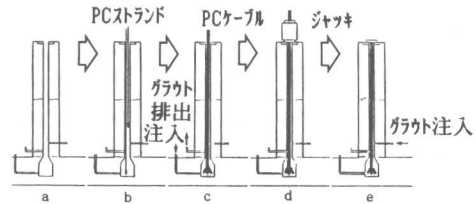


図-1 圧着グリップを用いた縦方向プレストレス工法

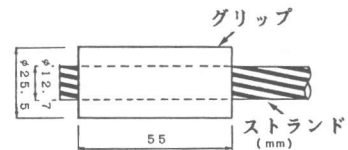


図-2 圧着グリップの形状寸法

3. 高強度グラウトの支圧実験

3.1 実験概要

実験の定着ボトル内の圧着グリップはストランドを介して引抜き力を受けているが、実験装置の簡便のためにストランドの代わりに同径の丸鋼棒を取り付けたグリップの押し込み実験を行ない、高強度グラウトの収縮性状を調べた。(図-3)

グリップのめり込みに影響を与える要因としては、

- 1) グラウト材の種類
- 2) グラウト中の空気量
- 3) グリップ本数
- 4) グリップの径
- 5) ボトルの径、長さ、肉厚

が考えられ、表-1に要因と水準をまとめて示した。供試体はグリップが1本(Aシリーズ)と7本(Bシリーズ)の2種類を作成し(図-4)、3種類のグラウト(グラウトD, グラウトM, グラウトT)を使用した。グラウトTは通常用いられているグラウト材と同程度の性状を有するが、高強度グラウトとしてグラウトDとグラウトMを選び、比較検討した。なお、グラウトDは微粉シリカ系超高強度セメント、グラウトMは金属フィラー系超高強度モルタル、グラウトTは無収縮グラウトモルタルである。

水セメント比はグラウトD、18%、グラウトM、11%、グラウトT、30%とし、ペーストミキサーで練混ぜ、打設後は実験開始(材令7日)まで室内に放置した。なお真空練りグラウトはミキサー内を減圧して、グラウト内部の空気を抜き出しながら練混ぜた。

また実験の前段階として4×4×16cmのモルタルバーを作製して材令圧縮強度を測定、さらにφ10×20cmの供試体を封函養生し、埋込みひずみ計を用いてグラウトの硬化収縮を計測した。一方、グリップのめり込み量は、図-4に示すように底板上面を不動点として相対変位を測定した。また、定着ボトルの対角位置にゲージを貼付し、ボトルの表面ひずみを測定した。

3.2 実験結果と考察

- (1) グラウト材の圧縮強度および硬化収縮

各材令での圧縮強度を表-2に示す。

硬化収縮はグラウトTで 80×10^{-6} 程度、グラウトD、Mはそれぞれ 2700×10^{-6} 、 1600×10^{-6} であった。よって収縮の大きいグラウトD、Mを定着用グラウトとして用いる場合には、グラウトはボトル内壁より剝離していると考えられるので、収縮を低減する混和剤を添加するなど、何らかの措置が必要であると思われる。

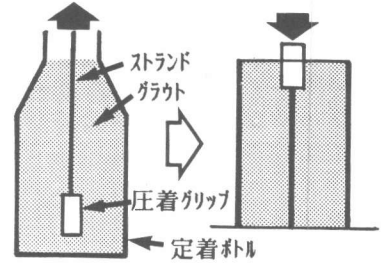


図-3 高強度グラウトの支圧実験

表-1 実験の要因と水準

供試体	劣化材料			AN	グリップ径			ボトル寸法			
	D	M	T		G1	G2	G3	内径	高さ	肉厚	
AG1D	○										
AG2D	○			1.1							
AG3D	○										
AG1DV	○			0.0							
AG2DV	○										
AG1M		○						72.6		5.0	
AG2M		○		1.8	1				162.0		
AG3M		○									
AG1T			○								
AG2T			○	2.4							
AG3T			○								
AG1TV			○								
AG2TV			○	0.0							
AG3TV			○								
BIG1D	○										
BIG2D											
BIG3D					7			121.8		9.0	
BIG1M		○							237.0		
BIG3M		○									
B2G1D	○										
B2G3D					7			159.8		9.0	
B2G3M		○							295.0		

A: 空気量(%) (mm)

N: グリップ本数

V 真空練り

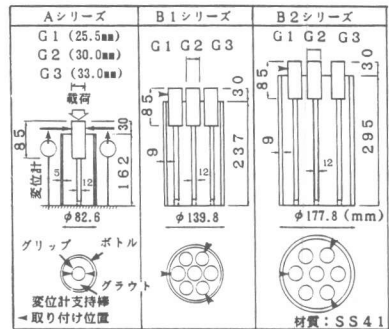


図-4 供試体形状寸法

表-2 高強度グラウト材令強度試験結果

グラウト材	W/C	圧縮強度 (kg/cm ²)			
		4日	7日	18日	33日
グラウトD	1.8	904	989	1202	1225
グラウトM	1.1	805	894	942	1050
グラウトT	3.0	781	737	757	917

グラウトD: デンシット

グラウトM: メタロック 2000

(金属フィラー系超高強度モルタル)

グラウトT: タスコン

(2) グラウト材の種類とグリッパのめり込み量の関係

荷重-グリッパめり込み曲線の一例を図-5に示す。このデータを基にある荷重レベルにおけるグリッパのめり込み量とグラウト材の種類との関係を図-6,7に示す。ここで言う荷重レベルとは告示1320号建設省住指発404号に掲げられた試験結果の判定基準で示された、ストランド引張荷重 P_y 及び降伏荷重 P_u をもとに決められた値であり、図は $0.85P_y$ の場合である。なお本工法で定着するストランドはSWPR7B、7本より12.7mmであり、 $P_y \geq 18.7(\text{ton})$ 、 $P_u \geq 15.9(\text{ton})$ である。図から明らかなように、圧縮強度の最も低いグラウトTがグリッパのめり込みが大きく、グラウトMでのめり込みは小さい。この傾向はグリッパの径が小さいほど顕著であり、グリッパ本数が増えてもグラウトMはめり込みを小さくできる。

また真空練りしたグラウト(空気量0%)では、グリッパのめり込み量は普通練りのグラウトの場合と同程度の値を示している。よって普通練りで連行される程度の空気量であればグリッパのめり込みに対しては影響がなく、空気量を減らしても、めり込みに対するグラウトの抵抗性は改善されないと考えられる。

(3) グリッパ径とめり込み量の関係

Aシリーズについて、グリッパ径とめり込み量の関係を図-8に示す。グラウトの支圧応力度はグリッパ径が小さい程大きく、従って径が大きいものより小さいものの方がめり込みやすい。さらに径G1のグリッパのめり込み量は大きい、径が30mmをこえるG2,G3のグリッパでは、めり込み量はかなり低く抑えられることがわかる。このことは、グリッパめり込み量の最も大きいグラウトTを用いる場合でも、径を30mm以上にすることでグラウトD,Mと同程度の低いめり込み量にすることが可能であることを示している。

(4) グリッパの本数とめり込み量の関係

荷重の絶対値ではグリッパ本数が多い方が、全体としてより大きな荷重を負担できるが、図-9から明らかなように、同じ荷重レベルに対してはグリッパ本数が多い方がめり込み量は大きい。これは、グリッパ本数が多いとグリッパ間のグラウトが低荷重レベルで先に破壊してしまい、その結果、拘束効果が減じ、めり込みに対するグリッパの抵抗が小さくなるためと思われる。従ってグリッパ間のグラウトの破壊を防止し、グリッパのめり込みを小さくするには、グリッパはある程度離して配置することが望ましい。

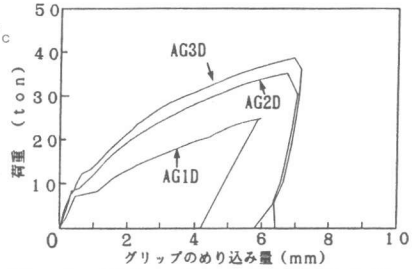


図-5 荷重-グリッパめり込み曲線

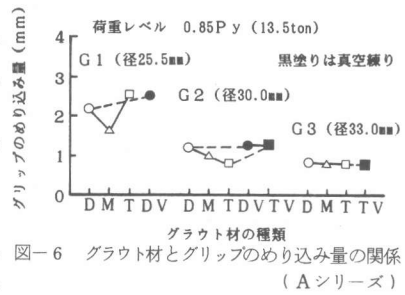


図-6 グラウト材とグリッパのめり込み量の関係 (Aシリーズ)

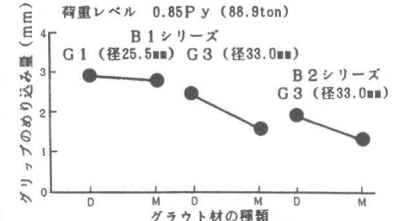


図-7 グラウト材とグリッパのめり込み量の関係 (Bシリーズ)

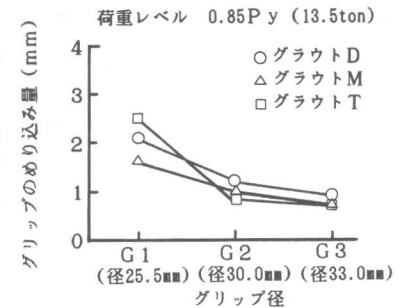


図-8 グリッパ径とめり込み量の関係 (Aシリーズ)

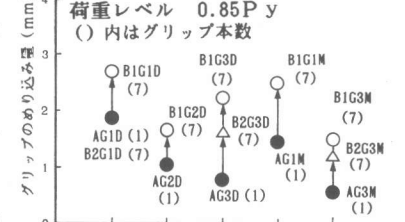


図-9 グリッパ本数とめり込み量の関係

(5) ボトルのひずみとグラウトの破壊について

図-10にボトルのひずみとグリップのめり込み量の関係の一例を示す。点aでグリップは急激なめり込みを示しているが、この点はボトルのひずみの発生点と一致しており、それ以下の荷重ではひずみはほとんど発生していない。この現象は、もしボトル内にグラウトが充填されているなら、载荷初期の段階からひずみは発生するが、グラウトの収縮が大きいためにグラウトがボトル内壁より剝離しており、グラウトが破壊して体積膨張を起こす点aで、始めてボトルのひずみが発生していると解釈できる。

図-11(a)はB1シリーズ、グラウトDのボトルのひずみ分布であるが、縦方向ひずみはボトルの下方、円周方向ひずみはグリップ下面から下方斜め約45°の方向で最大となっている。また図-11(b)は実験後にボトルを解体して観察した内部グラウトの破壊状況であるが、グリップ下方に角度約45°のすべり面を形成し、せん断破壊を起こしており、その点でボトルの円周ひずみが最大である実験結果と一致している。すべり面上側ではグリップ周囲に放射状にひび割れが発生しているが、下側では著しいひび割れは観察されなかった。

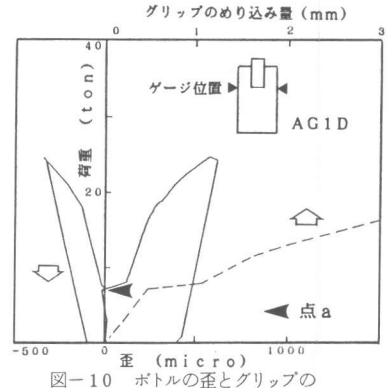


図-10 ボトルの歪とグリップのめり込み量の関係 (AG1D)

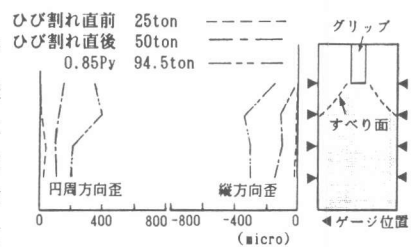


図-11 ボトルの歪とグラウトの破壊状況 (Aシリーズ)

4. 圧着グリップのグラウトによる定着性能実験

4.1 実験概要

定着ボトル内にグラウトを注入して定着した圧着グリップ付のストランドの定着性能を以下の要因について検討する。

- 1) ストランドの本数
- 2) 圧着グリップの定着ボトル内での位置
- 3) 定着ボトルの寸法
- 4) グラウト材の種類

先の実験では3種類のグリップ径を用いたが、本実験ではPC工法で一般使用の12.7mmストランド用のグリップ径2.55mmのものを用いる。(図-2にグリップの詳細を示す) 実験はストランド1本(Mシリーズ)、7本(E7シリーズ)、12本(E12シリーズ)について行ない、供試体の形状寸法は表3に示す通りである。なお、注入に用いるグラウトの調合を表-4に示す。ストランドの引張力の加力は図-12に示すように、ロードセルを介してアンカプレートに反力を取り、センターホールジャッキにより行なうものとし、実験時には圧着グリップの端部のめり込み、定着ボトルの表面ひずみ、および終局耐力について測定記録する。

表-3 供試体一覧表

試験体記号	グリップ位置 a	定着ボトル寸法		グラウト材料
		径 φ	厚さ	
M-50H	50	89.1	10	H
M-100H	100	89.1	10	H
M-100M	100	89.1	10	M
M-100D	100	89.1	10	D
M-100H5	100	76.3	5	H
M-100H20	100	114.3	20	H
M-150H	150	89.1	10	H
E7-100H	100	139.8	15	H
E7-150H	150	139.8	15	H
E7-200H	200	139.8	15	H
E12-100H	100	177.8	15	H
E12-150H	150	177.8	15	H
E12-150M	150	177.8	15	M
E12-150D	150	177.8	15	D

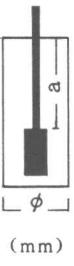


表-4 高強度モルタルの配合と材令強度

グラウト材	W/C	圧縮強度 (kg/cm ²)		
		材令3日	材令7日	材令14日
グラウトH	35	418	481	529
グラウトM	25	452	541	753
グラウトD	18	789	876	990

グラウトH: ハイタセメント (早強性)
 グラウトM: メタロックM (珪石フィラー系)
 グラウトD: デンシット 超高強度モルタル)

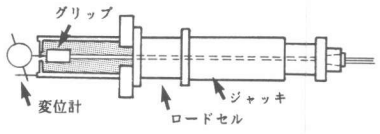


図-12 载荷方法

4.2 実験結果と考察

(1) グラウト材とグリップめり込み量の関係

グラウト注入した試験体の荷重とグリップのめり込み量の関係 (Mシリーズ) は図-13に示す通りであり、グラウトHを用いて定着したものでは初期のめりこみは小さいが、荷重の増加とともにめりこみも大きくなる傾向が認められる。一方、グラウトDを用いたM-100DのP- δ 曲線は終局までほぼ直線的であるが、グラウトM (M-100M)は両者の中間的な性状を示していることがわかる。なお、同様の傾向がE7およびE12シリーズにおいても認められた。

(2) 定着ボトルの長さと同肉厚の影響

図-14に示すように同一種類のグラウトで比較すると、L=50mm供試体(M-50H)ではL=150mm(M-150H)に比べてグリップのめりこみが大きい、この差はストランドの付着長さが異なるためと考えられる。

図-15にはE7シリーズの荷重とグリップめりこみ量の関係を示す。E7-150HとE7-200Hでは、ボトルが長い後者の方が若干めりこみが小さいが、0.85Py, 1.1×0.85Py (Py:ストランドの引張荷重, 18.7 ton以上)の荷重レベルでは差は認められなかった。E12シリーズでも、ボルトが短いほどめりこみは大きく、特にボトルの短いE12-100H (L=100mm)では1.1×0.85Py時のめりこみは8mm以上であり、抜け出しにより最終破壊していた。

また、ボトルの肉厚を5, 10, 20mmと変えた時の荷重-グリップめりこみ量曲線は、図-16に示すようにほとんど差は見られない。しかしボトルの円周方向ひずみを見ると、t=5mmで終局時に500 μ 程度であったのに対し、t=20mmでは100 μ と小さく抑えられることがわかった。

(3) ボトルのひずみについて

図-17に示すように、E7シリーズのE7-150Hのボトルのひずみは最大荷重時でも縦方向、円周方向ともに約500 μ であるが、グリップ本数を増やすと円周方向で2000 μ となり、ボトル(SS41)は降伏していると考えられる。グラウト強度の大きいE12-150M, E12-150Dでは1000 μ 以下と小さい値となっていたがE12シリーズではボトルの鋼管の厚さが、作用荷重を十分拘束するのに若干不足していると思われる。

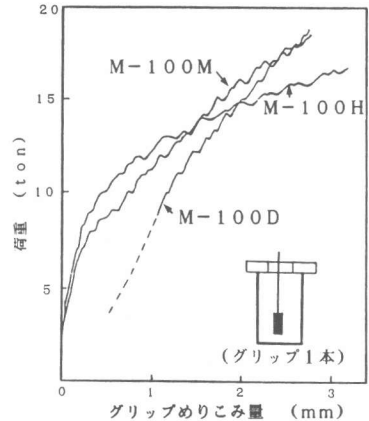


図-13 荷重-グリップめり込み量曲線 (Mシリーズ)

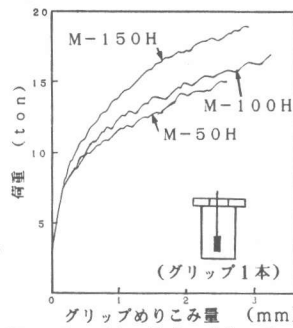


図-14 ボトル長さ-グリップめり込み量曲線 (Mシリーズ)

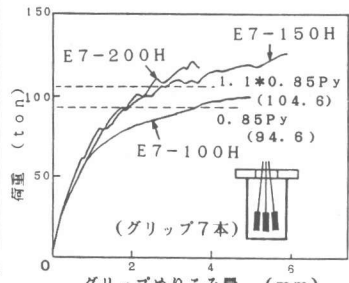


図-15 ボトル長さ-グリップめり込み量曲線 (E7シリーズ)

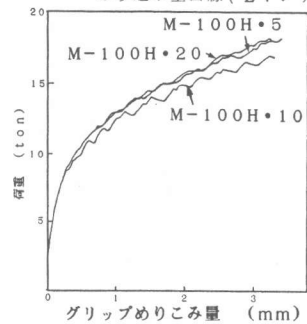


図-16 ボトル肉厚-グリップめり込み量曲線 (Mシリーズ)

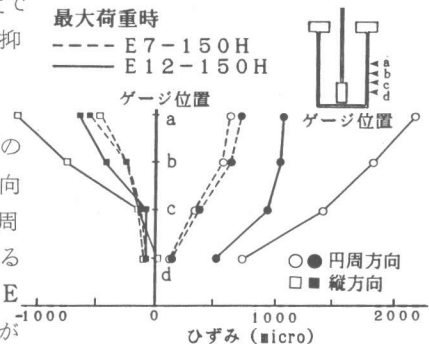


図-17 定着ボトルの歪分布

(4) グリップの支圧応力度とすべりの関係

図-18によれば定着ボトル内のストランドの本数が多いほど、グリップの支圧応力度に対するグリップのめりこみが大きいことがわかる。ストランドの引張力が $0.85P_y$ のときのM, E7, E12の各シリーズのすべり量はそれぞれ1.25mm, 2.0mm, 4.0mmであり、E12ではめりこみが過大で定着性能としては充分とは言えない。

(5) グリップのめりこみに対するストランドの付着の影響

ストランドのみの定着性能実験結果(MO-250H, -150H, -50H)の平均値として単位長さ当りの付着応力を求め、付着長さ10cmのときの荷重めりこみ曲線を算定して図-19に示した。またM-50Hの荷重めりこみ曲線にこの曲線を累荷した曲線と、M-150Hの曲線とを比較して示した。めりこみが1.0mm以下では(M-50H+付着長さ10cm)の計算値の方が大きく推定されるが、1.0mm以上ではこの傾向は逆転する。このように、グリップの支圧応力とストランドの付着応力の単純な累加によって厳密に定着性能を評価することは出来ないが、一応の目安は得られると思われる。

5. 結論

PC定着の新工法である「後入れ縦方向PCストランドの埋込み定着工法」の基礎的な性状を調べるために行なった、高強度グラウトの支圧実験、ならびに圧着グリップのグラウトによる定着性能実験を通じて以下のような知見が得られた。

- (1) 圧縮強度はグラウトD, M, T(H)の順に高いが、グリップのめり込みは、グラウトM, D, T(H)の順に小さい。
- (2) グラウトDとMは硬化収縮が大きく、グラウトはボトル内壁より剥離している。
- (3) 空気量を減らしても、グリップのめり込みを小さくすることは出来ない。
- (4) グリップ径が大きいほど、めり込みは小さいが、この傾向は径が30mmをこえると顕著でなくなる。
- (5) ボトル内のグラウトはグリップ下方斜め 45° のすべり面を形成し、せん断破壊する。
- (6) ボトルが長いとグリップのめりこみは小さいが、これはストランドとグラウトの付着長さが異なることが原因である。
- (7) ストランドの本数が多いと、グリップの支圧応力度に対するグリップのめりこみは大きく、かつボトルのひずみも大きくなるので、肉厚についての検討が必要である。
- (8) グリップの支圧応力とストランドの付着応力の累加により、定着性能を一応評価できる。

以上、高強度グラウトと圧着グリップについては基本的な性状が解明できたので、今後は長期載荷時のストランドの定着性能を調べ、ならびにグリップのめりこみを小さくするボトルの形状等を検討してゆく予定である。

なお本実験を行なうにあたり、電気化学工業株式会社の御協力を得た。ここに付記し、感謝する次第である。

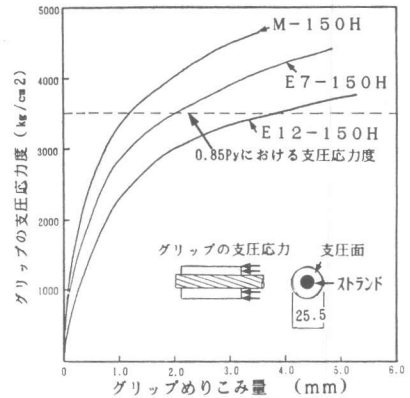


図-18 グリップの支圧応力度とめり込み量の関係

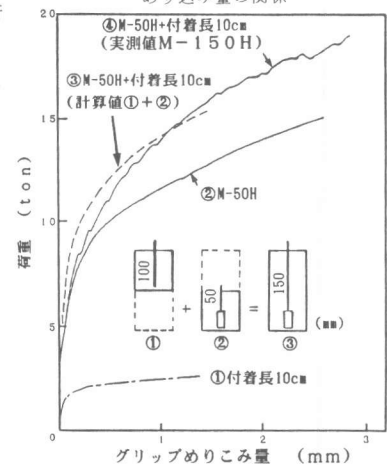


図-19 グリップのめり込みに対するストランドの付着長さの影響