

# 報告 シリカフュームと低熱セメントを用いた高強度高流動 コンクリートの連続地中壁実大模型の施工実験

井上 孝之\*1, 三井 健郎\*2, 米澤 敏男\*3, 小島 正朗\*4

**要旨:** シリカフュームと低熱セメントによりコンクリートの粘性と水和発熱の低減を図った設計基準強度  $60\text{N/mm}^2$  の超高強度コンクリートの連続地中壁への適用性を実証するため、実大スケールの試験体への施工実験を実施した。その結果、構造体のコンクリートはほぼ均一であり、連続地中壁用高強度高流動コンクリートとして十分な充填性と構造体強度発現性を持つコンクリートが得られた。また今回の結果から、高強度高流動コンクリートを地中連続壁に適用する場合には、温度上昇による構造体強度の低減および水中打設による低減を考慮する必要があることがわかった。

**キーワード:** 高強度高流動コンクリート、連続地中壁、施工実験、水中低減係数

## 1. はじめに

LNG地下式タンクやシールド発進立坑などの大規模地下構造物においては、近年更なる大深度化、大口径化が必要とされる傾向にある。これに伴い、躯体の壁厚、鉄筋量が増加するが、コンクリート強度を高くすることにより壁厚の低減が可能となり、掘削土量も削減できるため、コンクリートを高強度化することの経済的な効果は大きい。この種の構造物では、配筋が過密となりかつ締固めができないため、十分な充填性と流動性を持つコンクリートとする必要がある。

本報告では、設計基準強度  $60\text{N/mm}^2$  の高強度高流動コンクリートを連続地中壁に適用することを想定した模擬部材の施工実験を行ない、フレッシュコンクリートの性状、充填性、構造体強度、水中での強度の低減等の検討を行なった結果を報告する。

## 2. 模擬部材施工実験

### 2. 1 実験概要

実験は、実際の連続地中壁と同様の断面形状および配筋を有する高さ  $2\text{m}$  の模型試験体を用いて行なった。コンクリートの打設は実際の施工条件と同等となるようにトレミー管を用いて行ない、フレッシュコンクリートの性状、安定液中でのコンクリートの流動性、充填性、分離抵抗性、側圧、コンクリート温度、コア表面の粗骨材面積率、構造体コア圧縮強度および鉄筋の付着強度を試験した。

### 2. 2 使用材料と配合

コンクリートの配合条件は表1のように定めた。使用材料を表2に示す。セメントは、流動性が良く発熱も比較的小さい高ビーライト系低熱ポルトランドセメント(記号:L A)と低発熱で流動性に優れた低熱高炉セメント(記号:L B)の2種類を使用した。粘性の低減、強度向上を目的とし、シリカフュームを置換率10%混入した。

\* 1 (株)竹中工務店技術研究所生産研究開発部, 工修(正会員)

\* 2 (株)竹中工務店技術研究所生産研究開発部副主任研究員, 工修(正会員)

\* 3 (株)竹中工務店技術研究所生産研究開発部主任研究員, Ph. D. (正会員)

\* 4 (株)竹中工務店技術研究所生産研究開発部, 工修

施工実験におけるコンクリートの配合強度は(1)式により求めた。(1)式では、過去の事例等を考慮して、構造体強度低減係数を0.9、水中低減係数を0.95、変動係数を10%と設定した。その結果、配合強度は84N/mm<sup>2</sup>となり、各セメントにおける室内試験の結果より水結合材比を決定した。配合を表3に示す。

表1 配合条件

スラフ厚	空気量	L型スラフ-初速度[1]
650±50mm	3.0±1.0%	10cm/sec以上

表2 使用材料

セメント	高比重・ライト系低熱材「ルランド」セメント(LA)：比重3.22 低熱高炉セメント(LB)：比重3.04
細骨材	千葉県大栄産山砂と栃木県葛生産砕砂の混合砂 (比重2.59, FM2.56)
粗骨材	栃木県葛生産砕石(比重2.65, FM6.60, 最大20mm)
混和材	粉体シリカフューム：比重2.17
混和剤	特殊ポリカルボン酸系高性能AE減水剤

$$\sigma_{cr} = \sigma_{ck} / (0.90 \times 0.95) \times 1.20 \quad (1)$$

ここに  $\sigma_{cr}$ ：配合強度,  $\sigma_{ck}$ ：設計基準強度

表3 コンクリートの配合

試験体番号	セメント種類	水結合材比 %	細骨材率 %	空気量 %	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水	セメント	珪砂	細骨材	粗骨材
A	LA	30	46.4	3.0	165	495	55	751	888
B	LB	23	45.2	3.0	148	579	64	704	875

### 2.3 実大模型試験体

試験はセメント種類の異なる2体とした。試験体寸法及び配筋状況を図1に示す。試験体の形状は高さ2.0m、幅1.0m、長さ4.5mとした。型枠は、打設時のコンクリートの流動状況が観察できるように、1面を透明アクリル板とした。配筋は高強度連続地中壁に使用される最も過密な配筋部分を想定して決定した。型枠中にはベントナイト安定液(ベントナイト3.0%、CMC0.3%、分散剤0.3%)を満した。

### 2.4 コンクリートの製造と打設方法

コンクリートは、市中の生コンプラントで製造し、打設場所までアジテータ車により運搬した。コンクリートの打設は、内径25cm、

長さ4.0mのトレミー管により行なった。トレミー管はコンクリートの最大流動距離が3.0m、その下端と試験体底部とのアキが25cmとなるように設置した。トレミー管へのコンクリートの供給はポンプ車を利用し、コンクリートの高さ方向の打ち上がり速度を4m/hとした。

### 2.5 試験方法

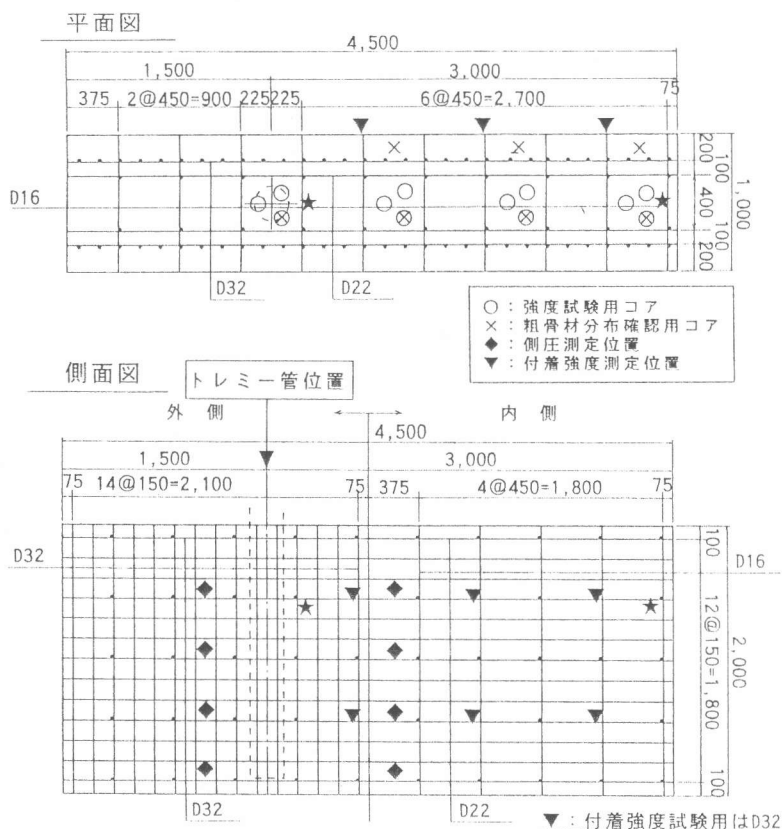


図1 試験体の配筋及び各試験位置

### 1) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験項目はスランプ、スランプフロー、空気量およびL型フロー試験[1]とし、プラント出荷、荷卸、筒先にて行なった。

### 2) 側圧および構造体温度

コンクリート打設中の側圧を、図1に示す8箇所において、型枠に取り付けた土圧計により測定した。また試験体の20箇所におけるコンクリートの温度履歴を熱電対を用いて測定した。

### 3) 粗骨材面積率

試験体から採取したコア側面の粗骨材を透明シートに写し取り、画像解析装置を用いて全側面積に対する粗骨材の面積率を求めた。

### 4) 圧縮強度

管理用としてφ 10×20cmの標準養生供試体およびマッシュな部材の温度履歴を模擬するスチロール製断熱容器で養生した簡易断熱養生供試体[2]を作製し、材齢7、28、91日で圧縮試験を行なった。また模擬部材では、図1に示す位置でφ 10×20cmコアを鉛直方向にドリルで採取し、圧縮試験を行なった。

### 5) 鉄筋の付着強度

図1に示す6箇所のD32鉄筋に対し付着強度試験を行なった。試験は図2に示すように、J S C E「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法(案)」に準じた。中央部の長さ12.7cm区間のみコンクリートと付着するようにし、他の部分は塩ビ管で被覆しコンクリートと縁切りを行なった。試験は材齢91日で

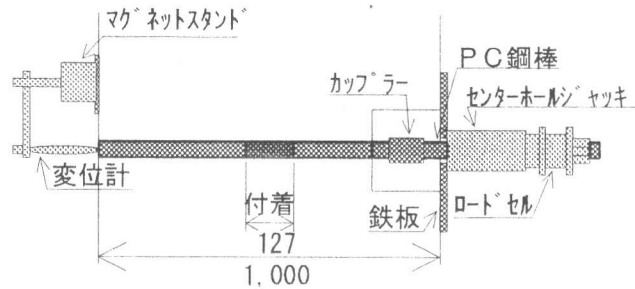


図2 鉄筋の付着強度試験

実施し、上下2段の鉄筋の測定値を平均してその鉄筋位置での付着強度値とした。比較用として、ベントナイト安定液の影響を受けない40cm角立方体供試体を別途作製し、同様の付着強度試験を行なった。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を表4に示す。LAの空気量が若干小さかったが、どちらのコンクリートにおいても、表1に示した目標値をほぼ満足していた。

表4 フレッシュコンクリートの試験結果

試験体	使用セメント	スランプ cm	フロー mm	空気量 %	Lフロー cm	L70-初速度 cm/sec
A	LA	26.5	610	1.7	63.5	12.4
B	LB	27.5	673	2.1	66.5	15.5

練り上がりから打設終了までのスランプフローの経時変化を図3に示す。試験体Aではアジテータ車による約1時間の運搬によりフローが約15cm低下していたため、高性能AE減水剤の再添加により目標とするフローとした。試験体Bでは約1時間の運搬後でもフローの低下はほとんど見られなかった。

### 3.2 コンクリートの流動勾配

図4～5にコンクリートの流動勾配の測定結果を示す。流動勾配は打設前のコンクリートのスラ

ンプフロー値の大きい試験体Bの方が小さかったが、試験体Aの流動勾配は約 1/13、試験体Bでは約 1/18 となり、ほぼ水平に打ち上がることが確認された。従来の高流動コンクリート[3]と比較しても遜色ない結果であった。

### 3. 3 側圧

試験体B打設時の流動距離 450mm の位置における側圧の変化を図6に示す。いずれの高さで測定した結果もコンクリートおよびベントナイト安定液の単位容積質量の値を用いて算定した液圧にほぼ一致する結果となった。高さ 175mm および 625mm の位置では、土圧計位置到達後約 20 分以降に側圧が液圧を下回り始めた。コンクリートの圧密と流動性が低下したによるものと思われる。試験体Aにおいても同様の結果であった。

### 3. 4 試験体の温度分布

試験体A、Bにおいて最も温度上昇の大きかった測定点および試験体端部に近い測定点(図1中★印と☆印)における温度履歴を図7に示す。打ち込み温度からの最高温度上昇量は試験体Aで 40°C、試験体Bでは 36°Cであった。低熱高炉セメントを用いた試験体Bの方が、単位セメント量が多いにもかかわらず温度上昇量は小さくなり、水和発熱による温度上昇の低減には低熱高炉セメントの使用がより有効なことがわかる。

### 3. 5 粗骨材分布

粗骨材面積率の測定結果を図8に示す。各試験体での粗骨材面積率は、上下方向あるいは流動距離、中央部と端部による明かな傾向は見られず、ほぼ均一な分布状況であると判断された。どちらのコンクリートも十分な充填性と分離抵抗性を持っていたものと判断される。

### 3. 6 圧縮強度

図9~10に各材齢におけるトレミー管からの距離とコア圧縮強度の関係を示す。値は各点での上下方向の平均値で示した。いずれの試験体においても、試験体先端部に近いほど材齢7日強度は小さかったが、その後の強度向上は大きく、91日強度では全体はほぼ均一あるいは試験体

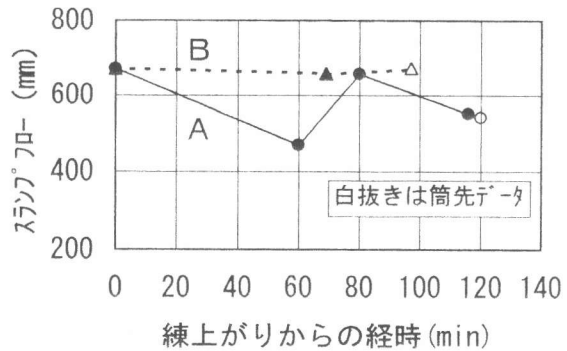


図3 スランプフローの経時変化

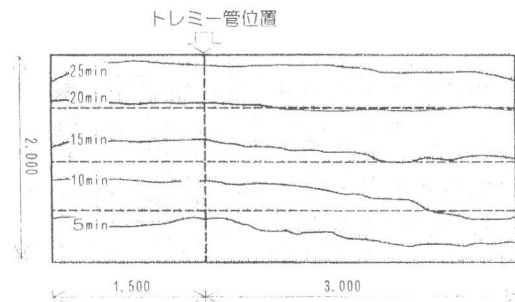


図4 コンクリートの流動勾配(試験体A)

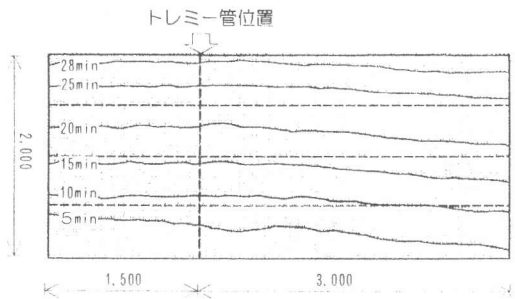


図5 コンクリートの流動勾配(試験体B)

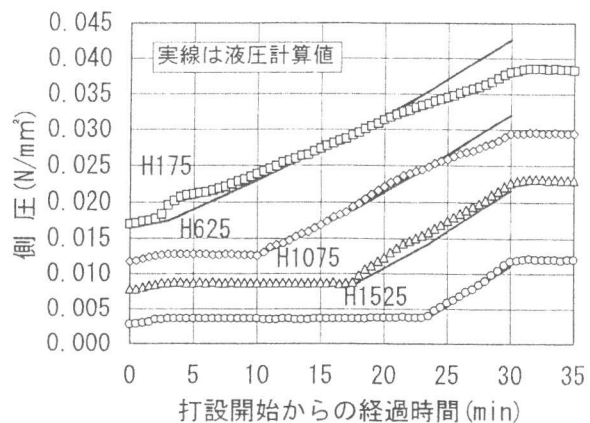


図6 打設中の側圧の変化(試験体B)

先端部に近いものほど強度が大きい結果となった。これは、図7に示したように、試験体先端部の温度上昇量は試験体中心部に比較して低く、試験体中央部では材齢初期に高温履歴を受けたために、長期強度の伸びが小さくなったものと思われる。従ってコア強度は養生温度の影響が大きく、コンクリートの流動はコアの強度に悪影響を及ぼさないことがわかる。

各試験体における91日圧縮強度の一覧を表5に示す。簡易断熱養生試験体の温度履歴は構造体の平均的な温度履歴とほぼ一致したため、簡易断熱試験体の試験結果は気中での構造体強度をほぼ示すものと考えられる。したがって、構造体の養生温度の違いに起因する構造体強度低減係数は断熱/標水で示される。また水中に打設されたことによる強度の低減を示す水中低減係数はコア/断熱で示される。表5より構造体強度低減係数は0.87~0.90、水中低減係数は0.93~0.96となり、配合強度を標準水中養生91日の試験結果から決定する場合には、構造体強度の低減、水中低減の両者を併せて15~20%程度見る必要がある。

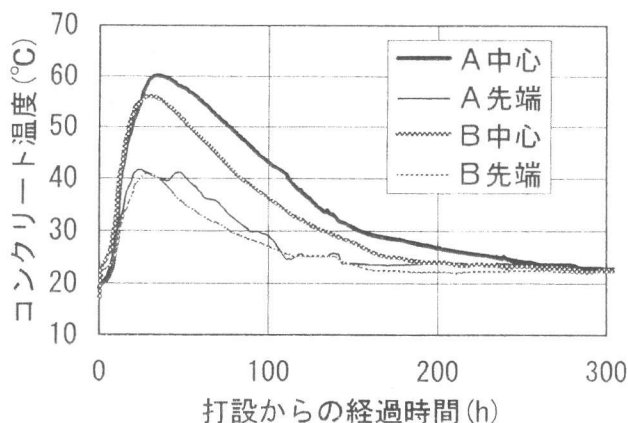


図7 模擬部材の温度履歴

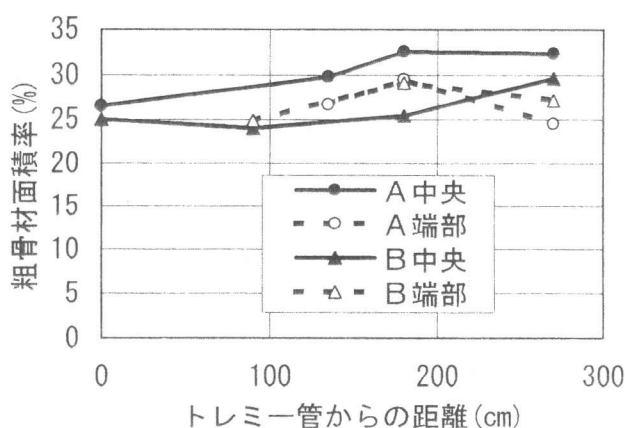


図8 粗骨材面積率測定結果

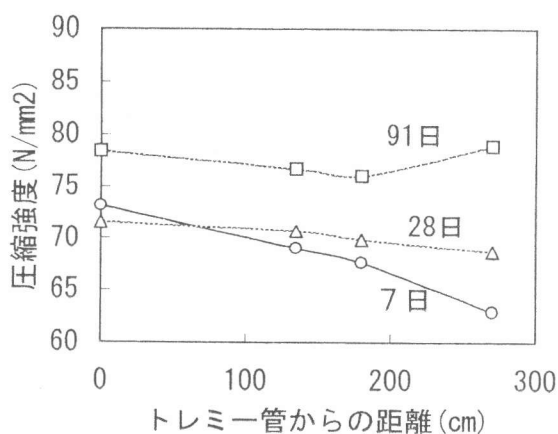


図9 コア強度分布(試験体A)

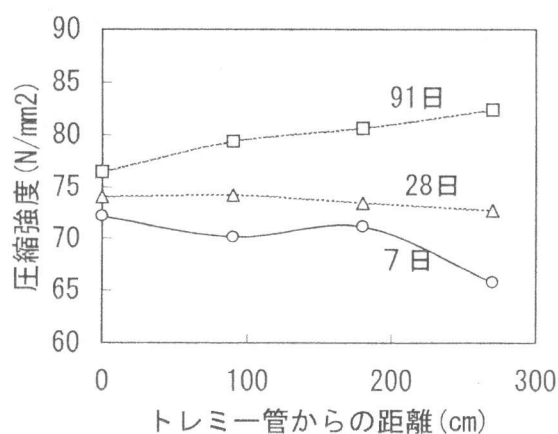


図10 コア強度分布(試験体B)

表5 圧縮強度試験結果(材齢91日)

	標準養生 N/mm <sup>2</sup>	コア強度 N/mm <sup>2</sup>	標準偏差 N/mm <sup>2</sup>	変動係数 %	簡易断熱 N/mm <sup>2</sup>	断熱/標水	コア/断熱	コア/標水
試験体A	95.5	77.5	3.7	4.8	82.9	0.87	0.93	0.81
試験体B	93.0	79.7	4.5	5.7	83.3	0.90	0.96	0.86

図 11 には、試験体 A におけるコア圧縮強度の上下方向の分布を示す。今回の実験範囲では上下方向に差異は見られず、安定液との界面となった上部においても強度低下はなかった。連続地中壁の施工ではコンクリート天端の勾配が大きいとコンクリートのなだれ込みによる安定液の巻き込みを生じて局部劣化を生じることもあるが[4]、流動勾配の小さい高流動コンクリートとしたことで、部材内部の均等な強度分布が得られたものと考えられる。

### 3. 7 鉄筋の付着強度

トレミー管からの水平距離と付着強度の関係を図 12 に示す。試験体 A, B ともに付着強度は比較試験体に比べて若干小さかった。また流動距離が大きくなるにつれ低下する傾向にあった。これはトレミー管に近いほどその鉄筋部を通過するコンクリートが多く、鉄筋表面のベントナイト粒子が除去されやすいことによるものと考えられる。しかしながら、最も小さいところでも  $20\text{N/mm}^2$  を越えており、水中に打設されたことを考慮しても、十分な付着強度であったと判断される。

### 4. まとめ

今回の模擬部材施工実験により、以下のことが知見として得られた。

- ①コンクリートの流動勾配、粗骨材面積率およびコア強度の測定結果から、構造体の品質はほぼ均一であり、連続地中壁用高強度高流動コンクリートとして十分な充填性と構造体強度発現性を持つコンクリートが得られる。
- ②コンクリートの温度上昇に対しては、セメント種類の影響が大きく、水和発熱による構造体の温度の低減には低熱高炉セメントの使用が有効である。
- ③今回の実験により、水中低減係数として  $0.9\sim 0.95$  程度、構造体強度低減係数として  $0.8\sim 0.9$  程度の値を採用することが可能であると考えられる。
- ④鉄筋の付着強度は、流動距離が大きいほど傾向が見られたが、今回の実験では十分満足できる付着強度が得られた。

#### 参考文献

- [1] 谷川恭雄ほか：高強度・超高強度コンクリートのコンシステンシー評価試験方法に関する基礎的研究、日本建築学会学術講演梗概集、1990、pp477-478
- [2] 三井健郎ほか：低熱セメント及びシリカフェムを用いた高強度高流動コンクリートの研究、日本建築学会学術講演梗概集、1994、pp557-558
- [3] 小久保正美ほか：高流動コンクリート実大施工実験(その5：流動勾配)、日本建築学会学術講演梗概集、1995、pp327-328
- [4] (社)日本建設機械化協会編：地下連続壁工法設計・施工ハンドブック、技報堂、pp335

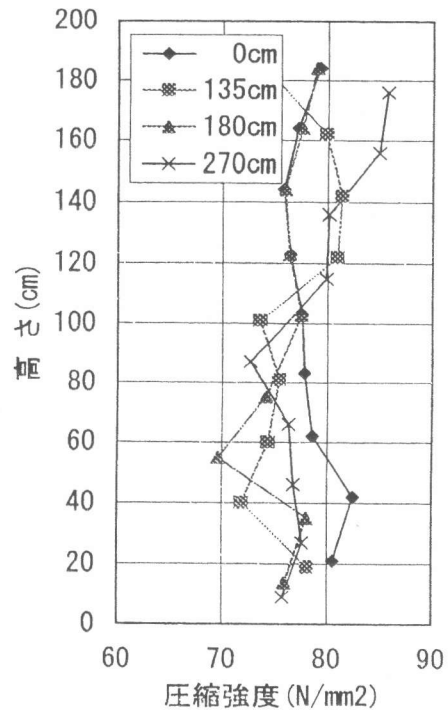


図 11 高さ方向のコア強度分布  
(試験体 A・9 1 日)

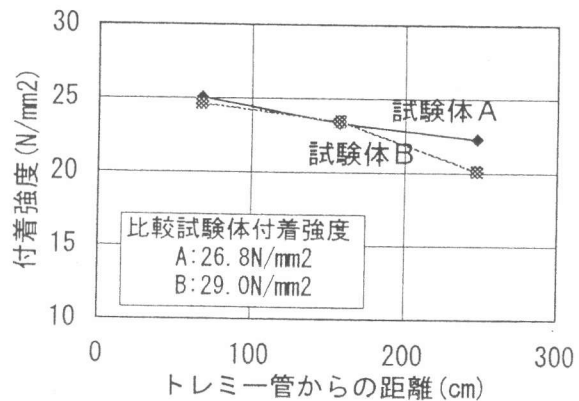


図 12 付着強度分布