

## 負の摩擦力低減杭に使用するSL材のせん断性状に関する要素試験

Element Test on Shear Behavior of Asphaltic Slip-layer  
to Reduce Negative Skin Friction on Pile

富永晃司 Koji TOMINAGA (広島大学大学院国際協力研究科)  
山本春行 Haruyuki YAMAMOTO (広島大学大学院国際協力研究科)  
徐挺 Ting XU (広島大学大学院国際協力研究科)

地盤沈下に伴い杭に発生する負の摩擦力(NF)を低減するため、杭表面に特殊アスファルトを塗布したSL杭が実用に供されている。SL杭に関する研究としては、NF低減効果やSL材の長期せん断変形などの実験があるが、地震等の短期的せん断や繰り返しせん断に対する研究は皆無に近い。この現況を踏まえ、本論文ではSL材の急速せん断時の挙動について、繰り返しせん断やせん断速度を載荷途中で変化させる要素試験を実施した。結果として、一定振幅繰り返しせん断試験の第1サイクル目の $\tau$ - $\gamma$ 曲線はせん断ひずみ速度が同じ場合はほぼ一束の曲線群になること、この $\tau$ - $\gamma$ 曲線は1次双曲線関数で定式化でき、同式がせん断速度を変化させる変速せん断試験による $\tau$ - $\gamma$ 関係の定性的傾向をよく説明できること、などの知見を得た。

キーワード：杭，繰り返しせん断，ひずみ速度，負の摩擦力，模型実験 (IGC：D-6,E-4)

## 1. はじめに

埋立て地などの地盤沈下地帯の杭基礎として支持杭を採用する場合、地盤沈下に伴って発生する負の杭周面摩擦力(以降、NFと略称)を考慮した設計を行う必要がある。この場合、①地盤改良による地盤沈下の抑制、②発生するNFに耐え得る杭、および③NF低減材(以降、SL材と略称)の塗布によるNF低減などの設計法が考えられるが、これらの中で、実際には③の方法による設計例が多く見られる。

SL材としては、急速なせん断変形には弾性的な挙動を示すが、地盤沈下などによる緩慢なせん断変形には粘性流体に近い挙動を示す材料が適切であるため、一般には特殊アスファルトまたは特殊潤滑材が使用されている。そして、その多くはオランダのシェル石油が開発したSLコンパウンドのBグレードであるが、この他にも別途開発されたものも数種使用されている<sup>1)</sup>。

実際のSL材に関する研究としては、地盤沈下が生じている地盤中の杭を対象とし、SL材によるNF低減効果を検討することを目的とした、Bjerrumら(1969)<sup>2)</sup>、Walkerら(1973)<sup>3)</sup>、およびClossenら(1974)<sup>4)</sup>などの特殊アスファルトSL処理杭と無処理杭との比較実験、吉田ら(1978)<sup>5)</sup>の実大杭の長期現場載荷試験、Shibataら(1982)<sup>6)</sup>の模型実験、あるいは膨潤性材料をSL材とした川辺・榎並(1993)<sup>7,8)</sup>の現場実大杭実験が見られる。一方、要素試験によりSL材のせん断特性を検討した研究としては、中澤・山肩(1986)<sup>9)</sup>の報告が見られる。

以上に概括した既往の研究は、いずれもSL材のNF低減効果を検討したものである。しかし、地震などにより上部構造に回転が生じる場合、SL杭は地盤に対して相対的に上下動する。このような状態を想定し、SL材が急速なせん断変形を受ける場合について検討を加え

た研究は、筆者らの知る限りでは皆無である。この研究現況を踏まえ、本論文では、SL材の要素試験として、一定振幅および漸増振幅繰り返しせん断試験、そして載荷途中でせん断速度を変化させる変速せん断試験を実施した結果について示す。また、これらの結果に考察を加えると共に、試験結果に基づきSL材のせん断抵抗～せん断ひずみ関係をモデル化した結果についても示す。

## 2. 試験の概要

## 2.1. 試験装置

図1に示すように、試験装置は、恒温水槽(図中の記号1、以下同じ)や恒温水循環装置(m)などを中心とした温度管理部、ボールネジジャッキ(h)、ACサーボモータ(g)、サーボドライバ(b)や制御用パーソナルコンピュータ(c)から成る載荷装置部、およびロードセル(k)やデータ収録用パーソナルコンピュータ(f)などから成るデータ収録部の三つの部分で構成されている。

試験には、実際の杭基礎に使用されているSL杭用特殊アスファルトのBグレード(針入度43 [1/10mm]、軟化点66℃)を用いた。供試体は、このSL材を約150℃の炉中で溶かし、縦60mm×横60mm×厚さ10mmの型枠に注ぎ込み自然冷却した後に熱した鉄ヘラで整形し作製した。その後、図2に示すように、可動板の両側にこれらの供試体を加熱圧着させた後、圧着面に空気が閉じこめられないようにそれらの外面を外板に圧着させた。

## 2.2. 試験方法

試験は、図2に示す可動板を上下に動かす二面せん断で、試験中の試験体厚さを一定に保つ方式で行った(図1および図3参照)。なお、試験体厚さは各種のせん断試験結果<sup>10)</sup>や実際のSL杭の設計などを参考にして10mmとした。また、試験に供したSL材は高感温性物質であり、

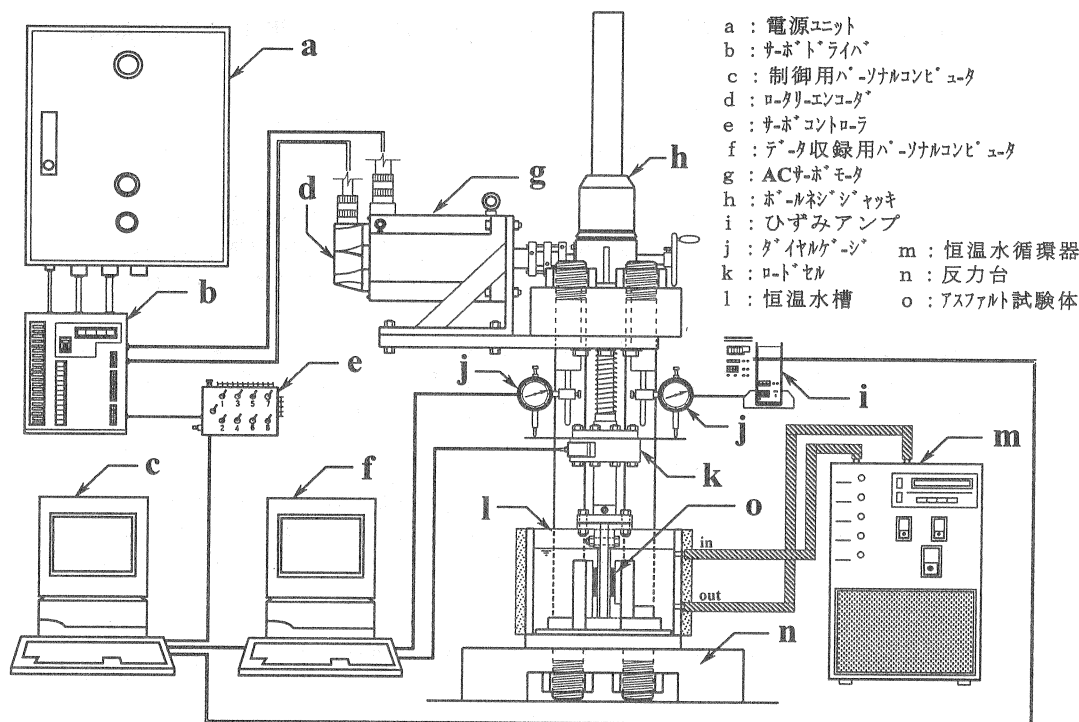
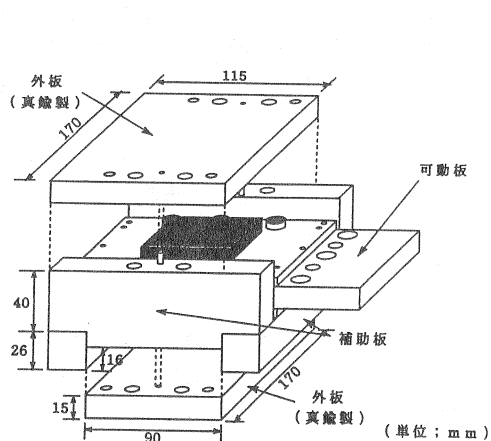


図1 試験装置全体組立図



(1) 外板圧着

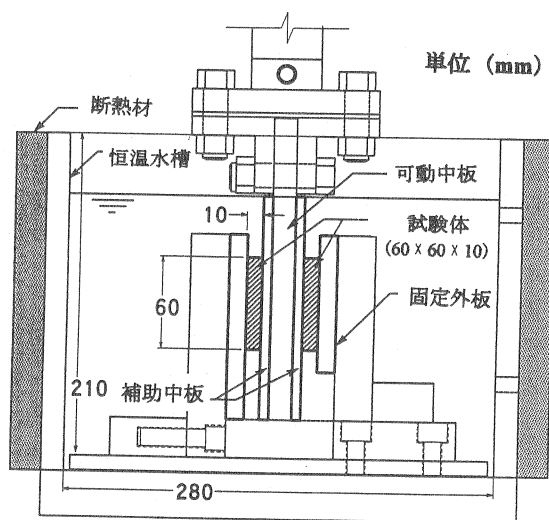
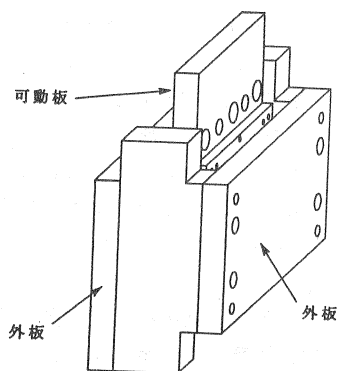


図3 恒温水槽詳細



(2) 組立完了状態

図2 二面せん断供試体組立図

その変形性状は試験中の温度によって大きく影響される物質である。したがって、試験は供試体を恒温水槽中に水没させた状態で行うこととし (図3参照)、同水槽内の水温を一定に保つために、高精度温度センサーと恒温水循環装置 (温度設定範囲:  $-10^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$ 、精度:  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ) を用いて厳密な温度管理の下で実施した。また、試験中の恒温水槽内の水温変化を極力抑えるために、同水槽は熱伝導性の低いアクリル製とし、同水槽と恒温水循環装置を接続するホースを断熱材で覆うと共に、図3に示すように恒温水槽側面を発砲スチロールの断熱材で覆った。なお、本研究ではいずれの試験においても、供試体の設定温度として、日本各地で測定された平均的な地中温度である  $15^{\circ}\text{C}$  を採用した。

2.3. 試験の種類

実施した試験は、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ とせん断ひずみ振幅 $\gamma_a$ の影響を調べるための繰り返しせん断試験、および $\dot{\gamma}$ をせん断载荷の途中で変化させる変速せん断試験である。なお、繰り返しせん断試験は $\gamma_a$ を一定とした定振幅せん断試験、および $\gamma_a$ を漸増させる漸増振幅せん断試験の2種類とし、また変速せん断試験は $\dot{\gamma}$ の変化を载荷の途中で一度だけ行う単一変速せん断試験、および $\dot{\gamma}$ を順次変化させる複数変速せん断試験の2種類とした。

繰り返しせん断試験は表1に示す全15件であり、定振幅せん断試験(表1:A~L)では、 $\dot{\gamma}$ が5%/sec、10%/secおよび50%/secの3種類、 $\gamma_a$ が $\pm 10\%$ 、 $\pm 25\%$ 、 $\pm 50\%$ および $\pm 75\%$ の4種類を設定した。また、漸増振幅せん断試験(同表:M~O)については、図4に示すように、 $\gamma_a$ を $\pm 5\% \sim \pm 75\%$ と変化させることとした。

つぎに、単一変速せん断試験は表2に示す計18種類を計画し、複数変速せん断試験は、図5に示すように、せん断速度の切り換え時間間隔を $\Delta t = 0.1 \text{ sec}$ 、 $0.2 \text{ sec}$ 、および $0.4 \text{ sec}$ の3種類について、 $\dot{\gamma}$ を5%/secずつ増加させる試験とした。

ただし、本試験におけるせん断ひずみは、可動板の変位量を供試体の厚さ(片側)で除した値と定義している。

3. 試験結果およびその考察

3.1. 繰り返しせん断試験

一定振幅繰り返しせん断試験から得られるせん断抵抗 $\tau$ ~せん断ひずみ $\gamma$ 関係の例として、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma} = 10 \text{ %/sec}$ におけるせん断ひずみ振幅 $\gamma_a = \pm 10\%$ 、 $\pm 25\%$ および $\pm 50\%$ (表1のE、F、G)の結果を、図6に示す。また、図7にせん断抵抗 $\tau$ ~時間 $t$ 関係を示す。

表1 繰り返しせん断試験の種類

$\gamma_a$ (%)	$\dot{\gamma}$ (%/sec)		
	5	10	50
$\pm 10$	A	E	I
$\pm 25$	B	F	J
$\pm 50$	C	G	K
$\pm 75$	D	H	L
$\pm 5 \sim \pm 75$	M	N	O

$\dot{\gamma}$  : せん断ひずみ速度、 $\gamma_a$  : せん断ひずみ振幅

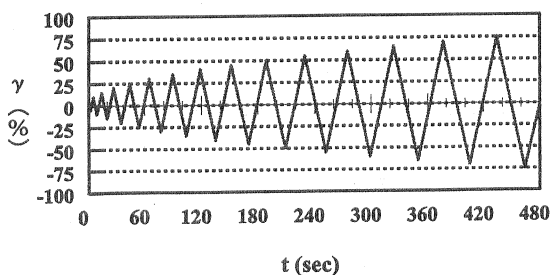


図4 漸増振幅繰り返し試験における $\gamma \sim t$ 関係

これらの図から、以下のことが指摘できる。

まず図6では、試験機の特長から約 $0.4 \text{ kgf/cm}^2$ 付近でせん断ひずみが若干シフトする現象が現れているが、いずれの試験においても、その $\tau \sim \gamma$ 関係は各サイクルにおいて正負ともほぼ同じせん断抵抗値を示し、原点对称型の履歴曲線を示している。そして、繰り返しの増加により、原点と各サイクルのピーク点を結ぶ傾き(以降、割線勾配と呼称する)は減少するが、繰り返し回数を重ねていくと、その履歴曲線は一定のループ曲線に収束していく傾向が見られる。このことは、別の視点から表した図7からも読み取れる。すなわち、各サイクルの正負の最大せん断抵抗は、サイクル数の増加につれて減少しながらある値に収束している。ちなみに、1サイクル目に対する最終50サイクル目の減少率は、試験E、FおよびGにおいて、それぞれ約60%、約50%および約40%となっている。さらに図6より、 $\tau \sim \gamma$ 関係の曲線形状は、繰り返し振幅 $\gamma$ が5%と小さな状態から25%および50%へと増大すると、紡錘型から逆S字型に推移する傾向が読み取れる。

次に、全ての一定振幅繰り返しせん断試験における原点から1サイクル目の最大せん断抵抗 $\tau_{\text{max}}$ までのせん断抵抗 $\tau$ ~せん断ひずみ $\gamma$ 関係曲線(以降、第1サイクル曲線と呼称する)を、まとめて図8に示す。この図において、 $\dot{\gamma}$ が低下すれば、同じせん断ひずみでせん断抵抗は減少しており、S L材に適する材料特性のあることが示されている。また、同じ $\dot{\gamma}$ を与えた場合、それらの第1サイクル曲線は、原理的には同一曲線を描くことが予測できるが、図8の試験曲線群にはこの性状は現れており、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が同じ試験から得られる第1サイクル曲線は、ほぼ一束の曲線群となっている。

表2 単一変速せん断試験の種類

$\dot{\gamma}_1$ (%/sec)	$\dot{\gamma}_2$ (%/sec)	$\gamma_c$ (%)			
		5	10	20	25
40	10	a	b	c	d
40	20	-	e	-	f
40	30	-	g	-	h
40	50	-	i	-	j
40	60	-	k	-	l
40	70	m	n	o	p
10	50	-	-	q	-
20	50	-	-	r	-

$\gamma_c$  : せん断ひずみ速度切り換え点のひずみ

$\dot{\gamma}_1$  :  $\gamma_c$  前のせん断ひずみ速度

$\dot{\gamma}_2$  :  $\gamma_c$  後のせん断ひずみ速度

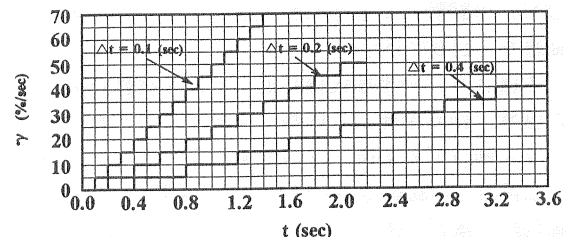
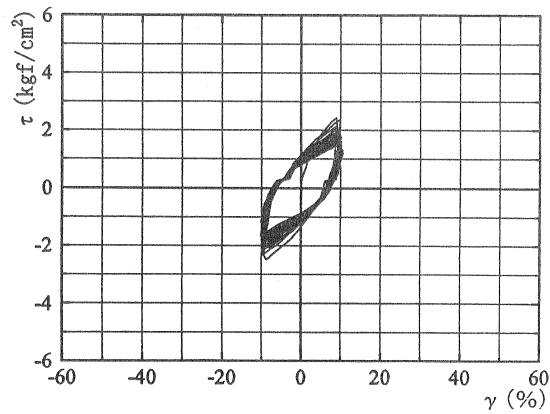
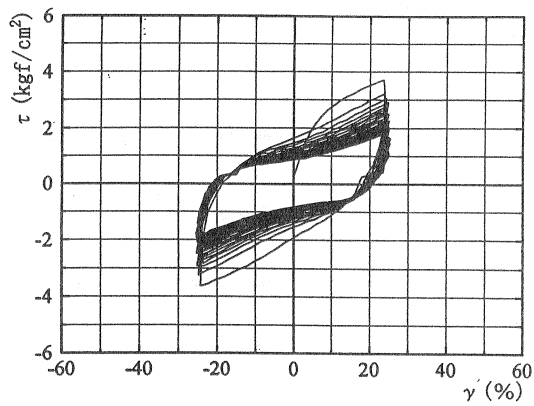


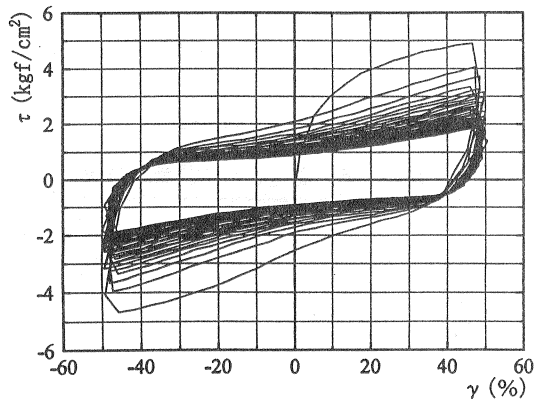
図5 複数変速せん断試験における $\gamma \sim t$ 関係



1) 試験E



2) 試験F

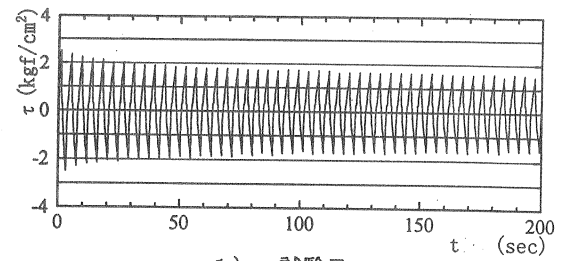


3) 試験G

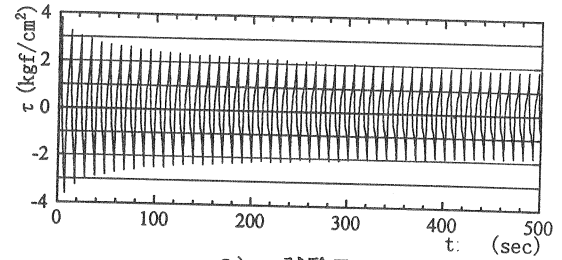
図6 一定振幅繰り返しせん断試験による $\tau \sim \gamma$ 関係 ( $\text{kgf/cm}^2 = 98\text{kN/m}^2$ )

一方、漸増振幅せん断試験による例として、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma} = 5\%/sec$  および  $10\%/sec$  (表1の試験MおよびN)の試験によるせん断抵抗 $\tau \sim$ せん断ひずみ $\gamma$ 関係曲線を、図9に示す。

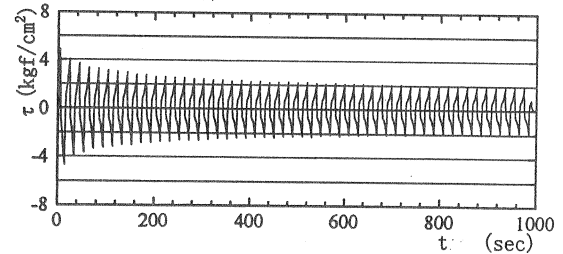
この図より、一定振幅繰り返しせん断試験結果で見られた性状(図6参照)と同様に、繰り返し回数(すなわち、せん断ひずみ振幅)が増大すると、せん断ひずみが小さな段階での紡錘型から逆S字型に推移するとともに、割線勾配の傾きが減少する性状のあることが読み取れる。なお、各せん断ひずみ振幅段階毎の最大せん断抵抗につ



1) 試験E



2) 試験F



3) 試験G

図7 一定振幅繰り返しせん断試験による $\tau \sim t$ 関係 ( $\text{kgf/cm}^2 = 98\text{kN/m}^2$ )

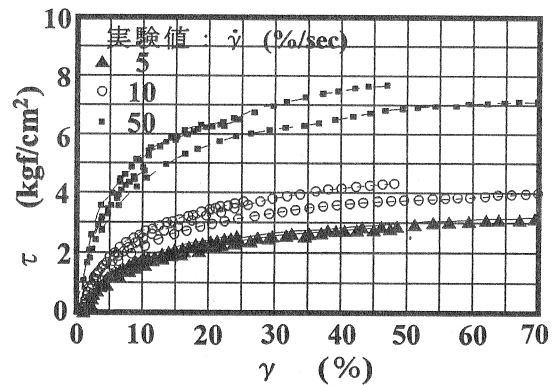


図8 一定振幅繰り返しせん断試験による第1サイクル載荷時の $\tau \sim \gamma$ 曲線 ( $\text{kgf/cm}^2 = 98\text{kN/m}^2$ )

いて見れば、その値はある段階(実施した試験では、いずれも7段階目)でピークを示した後は、減少する傾向のあることが分かる。また、各せん断ひずみ振幅段階における徐荷過程および再載荷過程での $\tau \sim \gamma$ 関係曲線は、第1サイクル曲線とほぼ同じ曲線形状を描いていること、そして各段階での残留せん断抵抗(せん断ひずみ $\gamma = 0\%$ 時)は、正負ともほぼ同じ値を示すこと、などが指摘できる。

### 3.2. 変速せん断試験

まず、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ を載荷途中で変化させた単

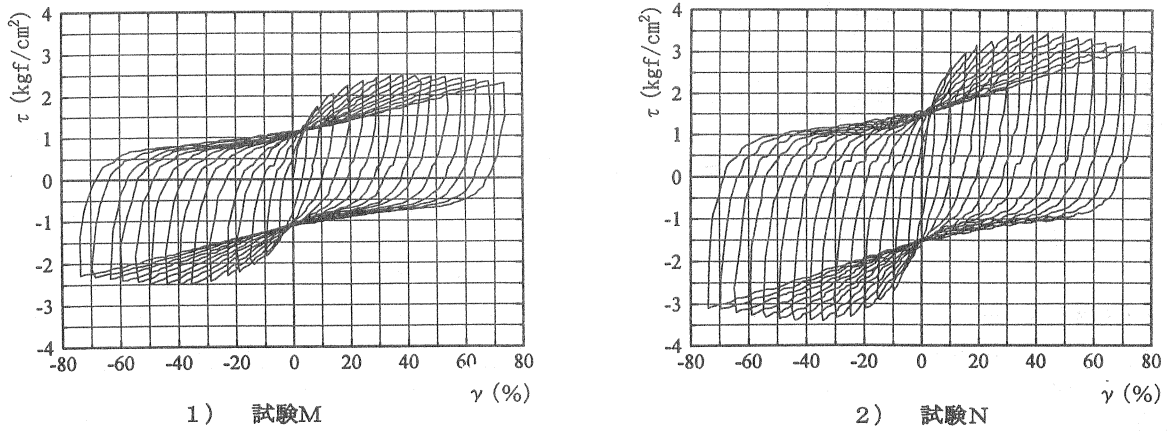


図9 漸増振幅繰返しせん断試験による $\tau \sim \gamma$ 関係曲線 ( $\text{kgf/cm}^2 = 98\text{kN/m}^2$ )

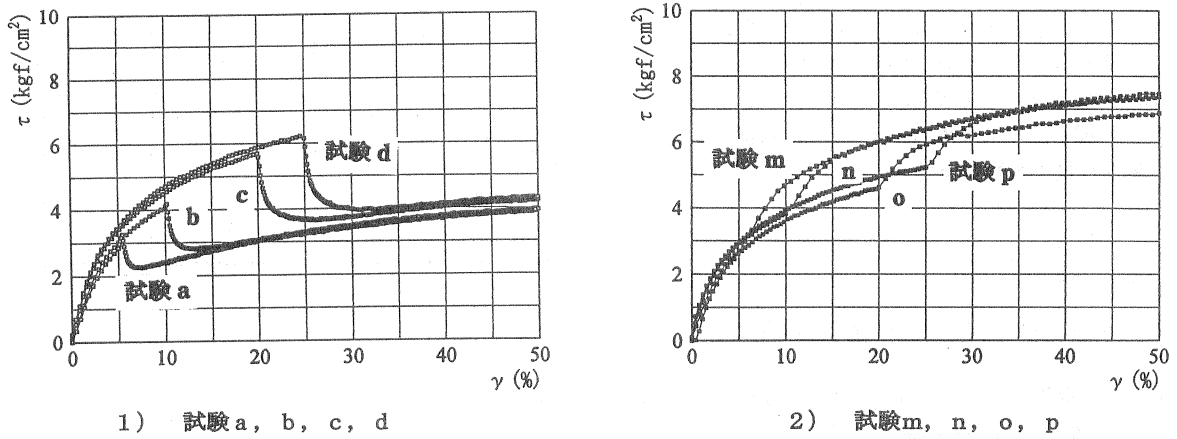


図10 単一変速せん断試験による $\tau \sim \gamma$ 関係曲線 ( $\text{kgf/cm}^2 = 98\text{kN/m}^2$ )

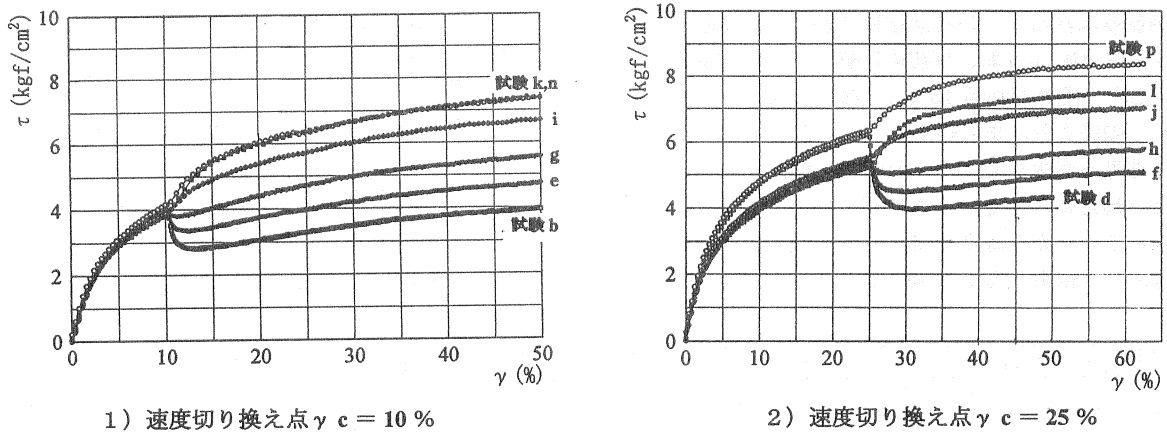


図11 単一変速せん断試験による $\tau \sim \gamma$ 関係曲線 ( $\text{kgf/cm}^2 = 98\text{kN/m}^2$ )

一変速せん断試験の結果として、 $\dot{\gamma}$ を $\dot{\gamma}_1 = 40\%/sec$ から $\dot{\gamma}_2 = 10\%/sec$ に減少(表2中の試験a, b, c, d)、および $\dot{\gamma}_1 = 40\%/sec$ から $\dot{\gamma}_2 = 70\%/sec$ に増加(同じく、試験m, n, o, p)させた場合のせん断抵抗 $\tau \sim$ せん断ひずみ $\gamma$ 関係を図10に示す。この図より、速度の切り換えを行う時のせん断ひずみ(以降、速度切り換え点と略称する)が異なっても、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が切り換った後の $\tau \sim \gamma$ 関係曲線は、ほぼ同一の関係曲

線に収束する傾向のあることが分かる。

また、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_1$ を $40\%/sec$ から $\dot{\gamma}_2$ を $10\%/sec \sim 70\%/sec$ に変化させた単一変速せん断試験において、速度切り換え点を10%(表2中の試験b, e, g, i, k, n)および25%(同じく、試験d, f, h, j, l, p)とした場合の $\tau \sim \gamma$ 関係曲線を図11に示す。この図から、ひずみ速度を切り換えた後は、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_2$ が速くなるほどせん断抵抗 $\tau$ は増大し、反対に $\dot{\gamma}_2$ を遅くすれ

ばするほど $\tau$ の低下が大きくなる性状のあることが読み取れる。

つぎに、速度切り換え点を順次変化させる複数変速せん断試験から得られた $\tau \sim \gamma$ 関係曲線を図12に示す。この図においては、一般的傾向として切り換え間隔 $\Delta t$ (sec)が大きくなるほどせん断抵抗 $\tau$ が低下する傾向のあることが明らかとされた。

4. 試験結果の定式化

前章で示したせん断抵抗 $\tau \sim$ せん断ひずみ $\gamma$ 関係の第1サイクル曲線に対して定式化を試みた。以下にそれらの結果について示す。

4.1. せん断抵抗 $\tau \sim$ せん断ひずみ $\gamma$ 関係の定式化

前述したせん断抵抗 $\tau \sim$ せん断ひずみ $\gamma$ 関係の第1サイクル曲線(図8)は、式(1)の双曲線関数で近似できると仮定し、同式の $\alpha$ および $\beta$ の値を最小二乗法によって決定することとした。なお、同式における $\alpha$ の逆数( $=1/\alpha$ )はせん断ひずみ $\gamma$ が無大の時のせん断抵抗の収束値であり、同じく $\beta$ の逆数( $=1/\beta$ )はせん断抵抗 $\tau \sim$ せん断ひずみ $\gamma$ 関係の初期勾配を意味する。

$$\tau = \frac{\gamma}{\alpha \gamma + \beta} \quad \dots (1)$$

ここに、 $\alpha$  (m<sup>2</sup>/kN) および  $\beta$  (m<sup>2</sup>/kN) は定数

図8中の各試験値に対して最小二乗法を適用した結果、式(1)中の定数 $\alpha$ および $\beta$ の値として、表3が得られた。この表から、定数 $\alpha$ および $\beta$ の値は、両者とも同一のせん断ひずみ速度毎にほぼグループ分けできる傾向のあることが読み取れる。この考察結果を基に、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ と収束値 $1/\alpha$ および初期勾配 $1/\beta$ との関係をプロットすると、それぞれ図13および図14のようになる。

これらの図より、まず収束値 $1/\alpha$ に関しては、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が大きくなると収束値が増大するが、その関係は非線形的であることが判明した。したがって、 $1/\alpha$ が $\dot{\gamma}$ の1次の双曲線関数で表せると仮定し、最小二乗法を適用した結果、式(2)が得られた。

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{\dot{\gamma}}{1.05 \times 10^{-3} \dot{\gamma} + 1.10 \times 10^{-2}} \text{ (kN/m}^2) \quad \dots (2)$$

そして、図13に示すように、同式に基づいて描いた関係曲線と試験結果との比較より、 $1/\alpha \sim \dot{\gamma}$ 関係は同式を用いてを説明付けることができると判断される。

表3 最小二乗法による式(1)の定数 $\alpha$ ,  $\beta$ の決定値

$\dot{\gamma}$ (%/sec)	$\gamma$ (%)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /kN)	$\beta$ (m <sup>2</sup> /kN)
5	10	0.3538	1.9162
5	25	0.3013	2.2207
5	50	0.2910	2.8711
5	75	0.2744	2.9799
10	10	0.2484	1.4555
10	25	0.2125	1.4523
10	50	0.1957	1.8657
10	75	0.2192	2.3202
20	20	0.1876	1.5030
30	60	0.1393	1.2235
40	20	0.1260	0.9835
50	10	0.1352	0.7388
50	25	0.1223	0.6911
50	50	0.1161	0.7138
50	75	0.1291	0.9299

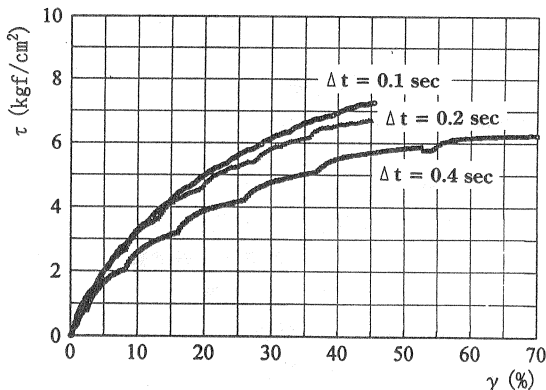


図12 複数変速せん断試験による $\tau \sim \gamma$ 関係曲線 ( $\text{kgf/cm}^2 = 98\text{kN/m}^2$ )

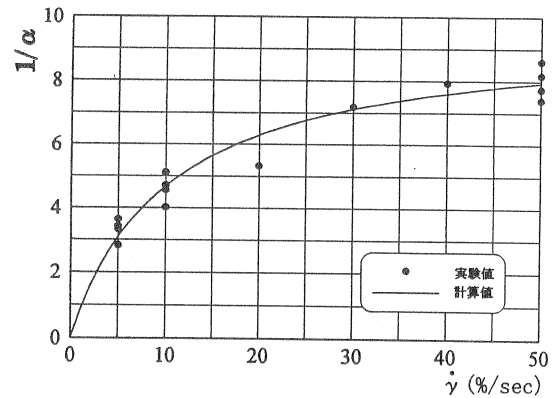


図13 収束値 $1/\alpha \sim$ せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ 関係

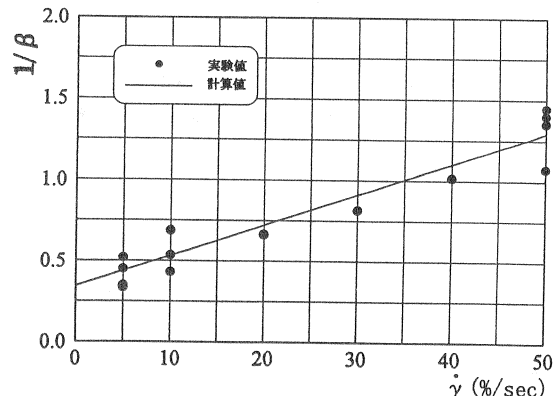


図14 初期勾配 $1/\beta \sim$ せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ 関係

ついで、図14より、初期勾配  $1/\beta$  はせん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}$  とほぼ線形関係にあると判断できたため、線形関係式で表せると仮定し、最小二乗法を適用した結果、式(3)を得た。なお、同式による  $1/\beta \sim \dot{\gamma}$  関係を図14中に実線で示しておく。

$$\frac{1}{\beta} = 1.85 \dot{\gamma} + 3.35 \times 10 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad \dots (3)$$

以上の検討結果より、与えられたせん断ひずみ  $\gamma$  に対するせん断抵抗力  $\tau$  は、その時のせん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}$  が分かれば、決定できることになる。この方法を試験による  $\tau \sim \gamma$  関係の第1サイクル曲線(図8)に適用した結果を試験結果と比較して、図15に示す。同図より、得られた評価式は、ほぼ満足できる精度で試験結果を説明付けていると言えよう。

また、この評価式はせん断荷重の途中でせん断速度が変化する場合にも、次の仮定の下で適用することが可能である。すなわち、 $\dot{\gamma}$  が変化した後の  $\tau \sim \gamma$  関係は、そのせん断速度に基づく  $\alpha$  値および  $\beta$  値を用いて、式(1)で計算される  $\tau \sim \gamma$  関係にシフトすると仮定する。ここに、せん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}$  を 40 (%/sec) から 10 (%/sec) に減速させた単一変速せん断試験の  $\tau \sim \gamma$  曲線(表2中の試験 a ~ 試験 d) と、この方法による予測曲線を比較して、図16に示した。この図より、仮定により予測曲線はせん断速度変化後の曲線にシフトするのに対して、試験の  $\tau$

$\sim \gamma$  曲線はせん断速度を切り換えた後の応答に若干時間がかかるため、緩やかに変化する違いがみられる。しかし、切り換え点が異なるいずれの試験においても、予測曲線は試験結果の示す傾向を比較的よく表現していると言える。また、これらのことは、加速する試験、すなわち図17に示すようにせん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}$  を 10 (%/sec) から 50 (%/sec) とした試験(表2中の試験 q)、あるいは図18に示した 20 (%/sec)  $\rightarrow$  50 (%/sec) の試験(同じく表2中の試験 r)においても、同じように言うことができる。

さらに、速度切り換え点を順次変化させた複数変速せ

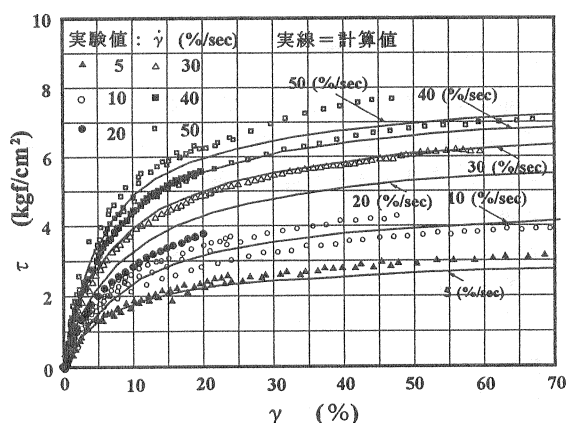
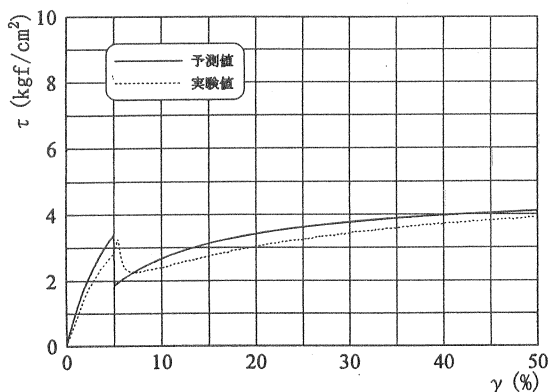
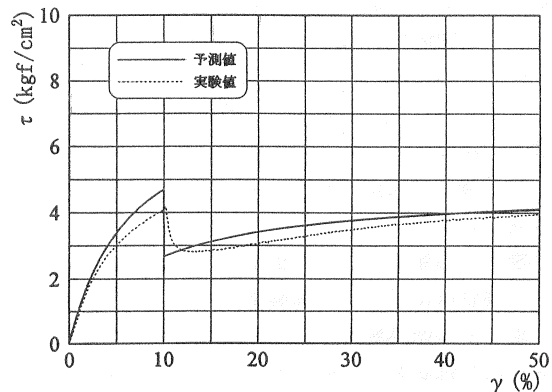


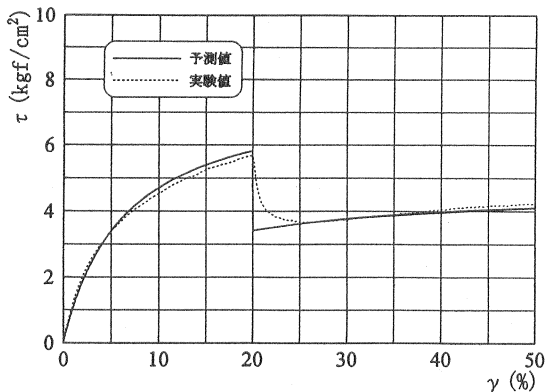
図15 第1サイクル曲線の予測曲線と試験曲線の比較 ( $\text{kgf/cm}^2 = 98\text{kN/m}^2$ )



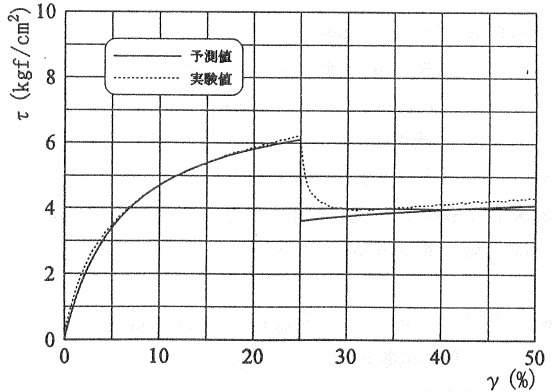
1) 速度切り換え点:  $\gamma_c = 5\%$



2) 速度切り換え点:  $\gamma_c = 10\%$



3) 速度切り換え点:  $\gamma_c = 20\%$



4) 速度切り換え点:  $\gamma_c = 25\%$

図16 予測曲線と試験曲線の比較 [せん断ひずみ速度: 40%/sec  $\rightarrow$  10%/sec] ( $\text{kgf/cm}^2 = 98\text{kN/m}^2$ )



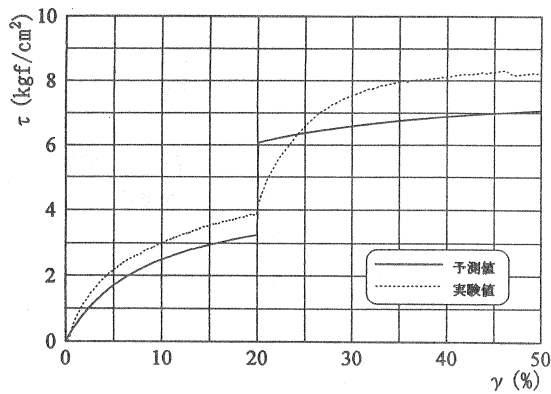


図 17 予測曲線と試験曲線の比較[10%/sec → 50%/sec]  
( $\text{kgf/cm}^2 = 98\text{kN/m}^2$ )

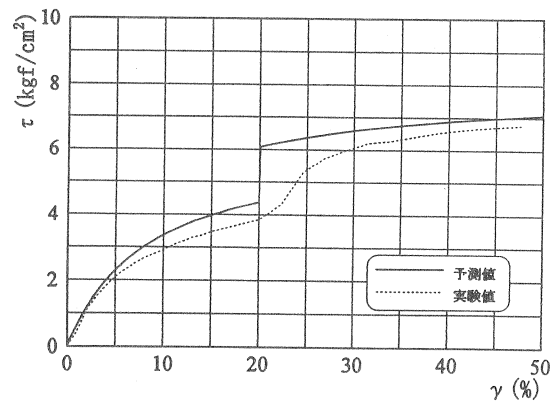


図 18 予測曲線と試験曲線の比較[20%/sec → 50%/sec]  
( $\text{kgf/cm}^2 = 98\text{kN/m}^2$ )

せん断試験における  $\tau \sim \gamma$  関係の試験曲線と予測曲線を比較して、図 19 に示した。この図より、予測曲線は試験のせん断抵抗を若干大きく見積もる傾向が見られるが、切り換え間隔が大きくなるほど同じせん断ひずみでせん断抵抗が低下していくことなど、試験曲線が示す定性的傾向をよく表現している。

### 5. 結論

本論文では、負の摩擦力低減杭に用いる S L 材において、既往の研究で扱われていなかった急速せん断時の挙動性状について、繰り返しやせん断速度を変化させた試験結果を示した。また、これらの試験結果に若干の考察を加えると共に、試験結果に基づくせん断抵抗  $\tau \sim$  せん断ひずみ  $\gamma$  関係の定式化を行った結果についても示した。

本研究で得られた新しい知見は、以下の通りである。

①一定振幅繰り返し試験では、繰り返し回数の増加に伴い履歴曲線は一定ループに収束するが、その形状は振幅が小さい場合の紡錘型から、大きくなると逆 S 字型になる傾向がある。

②試験による第 1 サイクル曲線は、せん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}$  が同じ場合はほぼ一束の曲線群になる。また、漸増振幅繰り返しせん断試験では、一定振幅繰り返しせん断試験で見られた性状を示す他、各せん断ひずみ振幅毎の最大せん断抵抗が、ある振幅段階でピーク値をもつ特異性も見られる。

③せん断途中で  $\dot{\gamma}$  を急激に変化させる変速せん断試験においては、速度を切り換える点のせん断ひずみが異なっても、それ以降の  $\tau \sim \gamma$  曲線はほぼ同一の曲線に収束する。また速度を切り換えた後は、せん断ひずみ速度が速くなるほどせん断抵抗が増大する。

④速度切り換え点を順次変化させる変速せん断試験においては、切り換え間隔を大きくするほどせん断抵抗が低下する。

⑤第 1 サイクルの  $\tau \sim \gamma$  曲線は 1 次双曲線関数で定式化でき、この式が試験結果をよく説明できることを示した。

おわりに際し、本研究の試験にご尽力頂いた広島大学

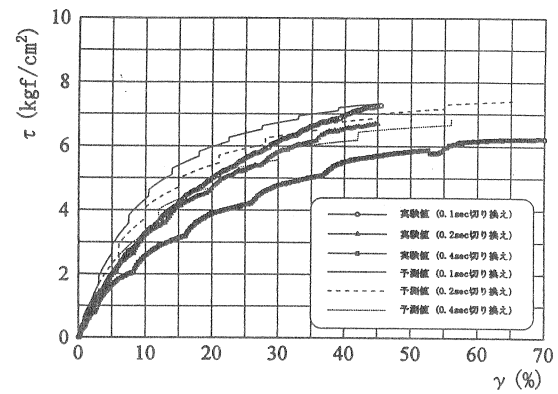


図 19 予測曲線と試験曲線の比較[複数変速せん断試験]  
( $\text{kgf/cm}^2 = 98\text{kN/m}^2$ )

文部技官原田誠一氏、ならびに同大学大学院修士課程修了生濱田博貴氏(現: 熊谷組)および小林健氏(現: 浅沼組)に深甚の謝意を表します。

### [参考文献]

- 1) 山肩邦男、町田重美(1989): 「日本建築センター基礎評定物件における最近の傾向と話題」基礎工、Vol.17, No.5, pp.12-23.
- 2) Bjerrum L, Johannessen and I.J.Eido.O (1969): "Reduction of Negative Skin Friction on Steel Piles to Rock", Proc. 7th I.C.S.M.F.E., Vol.2, pp.27-34.
- 3) Walker L.K. and Darvall P.L.E.P. (1973): "Dragdown on Coated and Uncoated Piles", Proc. 8th I.C.S.M.F.E., Vol.2, pp.257-262.
- 4) Clossen A.I.M. and Horvat E. (1974): "Reducing Negative Friction with Bitumen Slip Layers", Journal of ASCE, Vol.100, No.GT8, pp.925-944.
- 5) 吉田常松、青木健三、戸田井浩、春日正臣(1978): 「粘弾性物質を利用したネガティブフリクション低減杭」土木技術、第 33 巻、第 3 号、pp.24-31.
- 6) Shibata T., Sekigutchi H. and Yukitomo H. (1982): "Model Test and Analysis of Negative Friction Acting on Pile", Soils & Foundations, Vol.22, No.2, pp.29-39.
- 7) 川辺一洋、榎並昭(1993): 「膨潤性塗料を用いた負の摩擦力低減対策杭の研究(その 1 材料特性)」日本建築学会構造系論文報告集、第 443 号、pp.87-94.
- 8) 川辺一洋、榎並昭(1993): 「膨潤性塗料を用いた負の摩擦力低減対策杭の研究(その 2 現場実験)」日本建築学会構造系論文報告集、第 449 号、pp.121-131.
- 9) 中澤瑤子、山肩邦男(1986): 「S L 処理杭の鉛直載荷試験におけるスリップレイヤーの変位特性」日本建築学会構造系論文報告集、第 368 号、pp.49-56.
- 10) 渡辺徹、富永晃司、山本春行(1995): 「NF 低減杭に用いる S L 材の各種せん断クリープ実験結果の相互比較」、日本建築学会中国支部研究報告集、第 19 巻、pp.97-100.