

# 自硬性安定液に関する研究 (その9)

—H形鋼を建て込んだ SG 固化壁の曲げ・せん断試験—

喜 田 大 三      久 保      博

## Studies on Self-hardening Slurry (Part 9)

—Bending and Shearing Tests of Hardened Slurry  
Diaphragm Wall Set with H-shaped Steel Member—

Daizo Kita      Hiroshi Kubo

### Abstract

The SG method is a method by which diaphragm walls for sheathing and water cut-off are constructed using SG (Self-hardening Slurry). In order to increase the strength of the wall, "SG-H walls" which have H-shaped steel members set at regular intervals in SG have seen much use recently. The bending and shearing strengths of hardened SG in such walls are calculated here on the basis of the design method for horizontal sheathing retained by guide piles. However, an adequate method of calculation has not yet been found. Accordingly, bending and shearing tests of the hardened SG walls were performed with model samples. (1) The bending and shearing strength of hardened SG was greatly increased by the fixing effect of the H-shaped steel members. (2) The tested strengths at appearance of initial bending cracks ( $S_1$ ) were about three times higher than the ultimate bending strength calculated for a simple beam ( $S_3$ ). The ultimate strengths tested,  $S_2$ , were about seven times  $S_3$ . (3)  $S_2$  was similar to the calculated ultimate shearing strength.

### 概 要

SG工法は、SG(自硬性安定液)によって山留め・遮水のための地中連続壁を構築する工法である。この連続壁の土水圧に対する耐力を増すため、壁中にH形鋼を一定間隔で鉛直方向に建て込む"SG-H壁"が多く採用されている。SG-H壁におけるSG固化壁の耐力は、親杭横矢板山留め壁の設計法に基づいて計算されているが、不明な点が多い。

そこで、現場条件とは異なり品質のばらつきの少ないSGを用いたSG-H壁の模型供試体を作製し、SG固化部にも等分布荷重がかかると仮定して曲げ・せん断力に関する基礎的試験を行なった。

- (1) 耐力には、H形鋼による拘束効果が大きく寄与している。
- (2) 曲げひび割れ発生時の耐力 $S_1$ は、単純梁として計算した曲げ耐力計算値 $S_3$ に比べて約3倍、最大耐力 $S_2$ は $S_3$ に比べて約7倍大きい。
- (3)  $l/h < 3$  (但し、 $l$ : H形鋼相互のフランジ端間隔、 $h$ : 壁厚)では、 $S_2$ は $S_4$ (せん断耐力計算値)とほぼ一致する。

## 1. まえがき

SG工法は、①SG(自硬性安定液)を孔内に満しながら溝孔を掘削して、または②通常の安定液を満しながら溝孔を掘削したのちにSGで置換して、山留め・遮水のための地中連続壁を構築する工法である<sup>1),2)</sup>。

ところで、SG工法によって構築されるSG固化壁は、横方向からの土水圧に対する耐力を増すため、その内部にH形鋼などの鋼材を鉛直方向に建て込む場合が多い。

H形鋼を建て込んだSG固化壁を"SG-H壁"と称している。SG-H壁を「親杭横矢板山留め壁」と対比させると、親杭としてH形鋼、また横矢板としてSG固化壁があると考えることができる。

このSG-H壁の設計は、H形鋼を建て込む類似の固化壁の場合と同様に、親杭横矢板山留め壁の設計手法に基づいて行なわれているのが現状である。すなわち、SG固化壁の曲げ応力度(単純梁として)およびせん断応力度を計算して、いずれも一定の安全率を上回るような固

化強度に設計している。しかし、SG 固化壁は、横矢板と比較して、形状・材質ともに大きく異なっている。したがって、SG 固化壁の現状の設計法が適切か、また SG 固化壁の耐力をどのように評価すべきか、などの問題は未解明のままである。

そこで、SG 固化壁の耐力に関する基礎資料を得るため、SG の品質のばらつきの少ない理想条件下の模型供試体を用いて SG 固化部にも等分布荷重がかかると仮定して、その曲げ・せん断試験を行なった。

## 2. 現場の SG-H 壁と供試体の概要

現場の SG-H 壁と模型供試体の概要を図-1 に示す。現場の SG-H 壁の壁厚  $h'$  は、H 形鋼のフランジ面間隔  $h$  よりも 10~30 cm 厚くなっている。一方、供試体は、H 形鋼のフランジ面で囲まれた範囲のみの SG 固化壁を対象とした。この理由は、①H 形鋼フランジ面よりも外

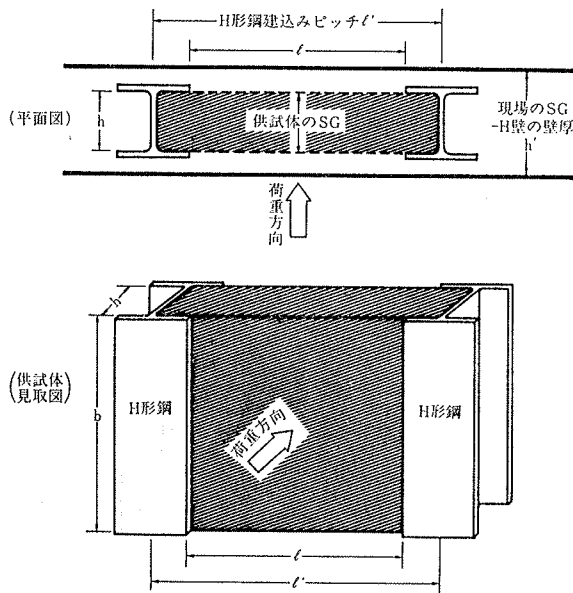


図-1 現場の SG-H 壁と供試体の対比

No.	$h'$	$h$	$b$	$l'$	$l$	$l/h$	H 形鋼の種類
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	比	
供試体	19	—	8.4	30	20	2.4	100×100×6×8
	20	—	8.4	30	40	3.6	
	21	—	8.4	30	50	4.8	
	22	—	8.4	30	60	6.0	
	23	—	8.4	30	—	30*	3.6
現場の SG-H 壁 (一般値)	40	22.2	700	60	40	1.1	250×250×9×14 300×300×10×15 350×350×12×19 400×200×8×13
	60	37.4	3000	100	75	2.7	

\*支点間距離

表-1 供試体の種類と現場 SG-H 壁の形状

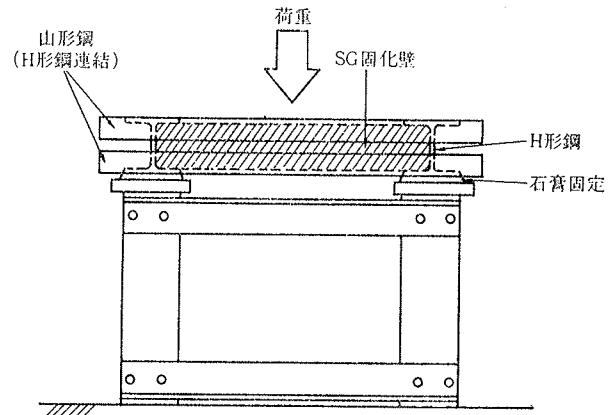


図-2 載荷試験の受台と供試体設置方法の概略

側の SG 固化壁のうち片側のそれは根切り時に削除されること、②曲げ・せん断試験が行ない易いこと、③試験結果が安全側であること、などを考慮したからである。

供試体は、No. 19~23 の 5 種類を各 4 体ずつ作製した。供試体の形状を、現場の SG-H 壁のそれと対比させて表-1 に示す。No. 19~22 は、H 形鋼の大きさとして約 1/3~1/4 の縮小模型を考え、100×100 の H 形鋼を用い、 $l/h$  比を 2.4~6.0 とした。また、No. 23 は、H 形鋼を用いず、 $l/h$  比を 3.6 ( $l$ : 支点間距離) とした。

## 3. 試験方法

### 3.1. SG の配合と作製

SG の配合は、水 1 m<sup>3</sup> 当たりで、ベントナイト (共立、250メッシュ) 70 kg、硬化材 (高炉セメント C 種相当品) 260 kg とした。0.1 m<sup>3</sup> のグラウトミキサーに、水 90 l を入れ、ベントナイト 6.3 kg を添加し 30 分間混合したのち、硬化材 23.4 kg を添加し 20 分間混合して、SG を作製した。

### 3.2. 供試体の作製

各供試体の養生型枠内に、2 本の H 形鋼を所定の間隔で設置した。その際、2 本の H 形鋼相互を山形鋼で連結固定しておいた。これに SG を流し込んで、室内で 1 週間養生したのち脱型成形して、さらに 3 週間水中養生 (20℃) した。すなわち、計 4 週間養生した。

また、養生型枠内には、 $\phi 3 \text{ cm} \cdot h 7 \text{ cm}$  のモールドを 3 本ずつ挿入しておき、同様の養生を行ない、SG 固化壁の一軸圧縮試験 (4 週材令) に供した。

### 3.3. 曲げ・せん断試験

試験は、200 ton 圧縮試験機 (東衡工機) によって行なった。その際、SG 固化壁の変位測定用の変位計をセットする空間を確保するため、また SG 固化壁のひび割れ発生状況を

観察できるようにするため、図-2に示すような供試体受台を使用した。

そして、H形鋼を用いた供試体では、その2本のH形鋼相互は、試験時においても山形鋼で連結固定した状態とした。また、載荷板は、荷重をできる限り等分布荷重に近似させるため、図-3のようにトーナメント方式に組んで試験した。

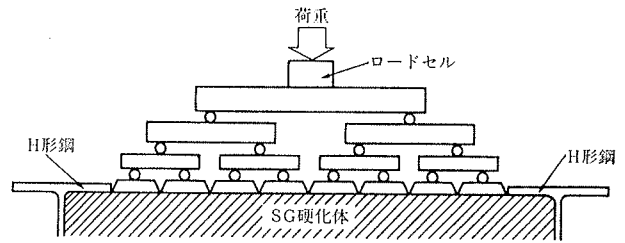


図-3 トーナメント方式による載荷方法の概略 (l=40 cm の例)

#### 4. 結果と考察

##### 4.1. SG 固化壁の一軸圧縮強度

SG 固化壁の一軸圧縮強度は、3章2節で述べたように、1供試体当たり3個測定した。結果を図-4に示す。

一軸圧縮強度は、9.5~14 kgf/cm<sup>2</sup>の範囲にあり、平均11.6 kgf/cm<sup>2</sup>、標準偏差 1.45 kgf/cm<sup>2</sup>、変動係数13%であった。すなわち、一軸圧縮強度は、そのばらつきを正規分布とみなすと、68%の確率で10~13 kgf/cm<sup>2</sup>の範囲にあるといえる。

ところで、SG 固化壁の一軸圧縮強度 (qu)、曲げ強度 (σ<sub>b</sub>)、せん断強度 (τ) の間には、次のような実験式が得られている<sup>3)</sup>。なお、(1)式は、文献3)のデータをもとに導かれたものである。

$$\sigma_b = 0.97 \sqrt{qu} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\tau = 0.27 qu + 1.26 \quad \dots\dots\dots(2)$$

これらの式から、SG 固化壁の qu=10~13 kgf/cm<sup>2</sup>に対応するのは、σ<sub>b</sub>=3.1~3.5 kgf/cm<sup>2</sup>、τ=4~4.8 kgf/cm<sup>2</sup>である。

##### 4.2. SG 固化壁のひび割れ発生状況

SG 固化壁の荷重増大に伴うひび割れ発生状況について、l=30 cmの供試体 (No. 20, No. 23) を例として、図-5に示す。他の供試体のひび割れ発生状況も、l=30 cmの供試体のそれと類似していた。

まず、H形鋼を用いた供試体の場合につ

いて述べる。

〔第1段階〕 底面の中央部から両側面の中央部にかけて、縦方向に曲げひび割れが発生する。これらのひび割れは、SG 固化壁に加わる曲げ引張り力に起因すると考えられる。

〔第2段階〕 上記のひび割れは増大した。そして底面の中央から少し離れた部分、また両側面のH形鋼フランジ下端付近から内側に斜め方向にひび割れが発生した。これらは、主にSG 固化壁に加わるせん断力に起因すると考えられる。さらに、供試体によっては、曲げ引張り力に起因すると考えられるひび割れがH形鋼フランジの上端付近に認められたが、l/h比との関係は不明であった。

〔第3段階〕 第1~2段階のひび割れは、さらに増大した。そして、底面においてはH形鋼のフランジに近い

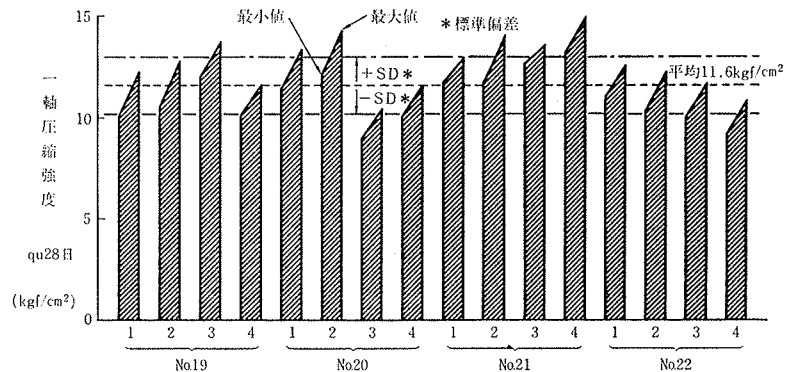


図-4 供試体の SG 固化壁の一軸圧縮強度 (28日材令)

・No.20の場合

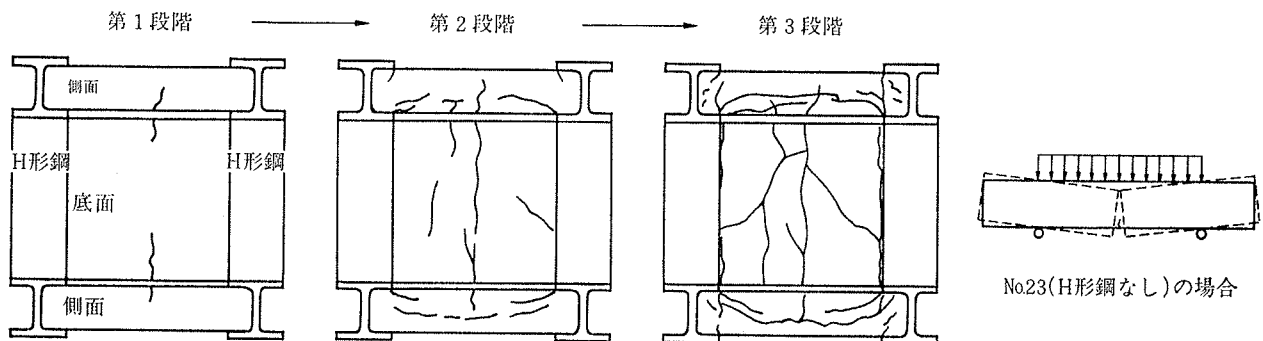


図-5 供試体の SG 固化壁のひび割れ発生状況 (l=30 cm の例)

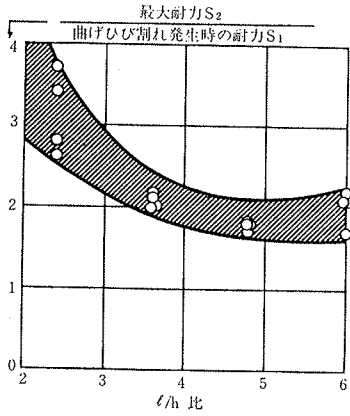


図-6 l/h比と最大耐力 S<sub>2</sub>/曲げひび割れ発生時耐力 S<sub>1</sub> の関係

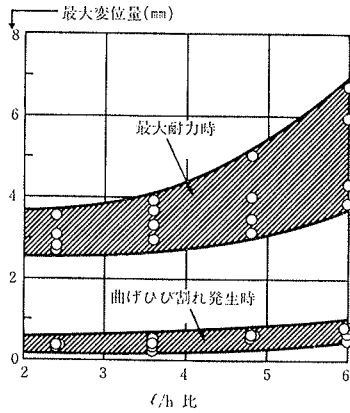


図-7 l/hと最大変位量の関係

部分にもひび割れが発生し、また側面においてはH形鋼のフランジ端を結ぶような縦方向のひび割れやH形鋼のフランジで囲まれた内部にも横方向・斜め方向のひび割れが発生した。これらは、主にSG 固化壁に加わる押抜きせん断力および圧縮力などに起因すると考えられる。

なお、H形鋼を使用した供試体が最大耐力を示すのは、概ね第2段階から第3段階への移行過程であった。

つぎに、H形鋼を使用しない供試体の場合、図-5の右端に示すように、そのひび割れは支点間中央部に発生した(曲げひび割れ)。そして、ひび割れ発生時の耐力と最大耐力は、ほぼ等しく、供試体は図のように二つに折れて破壊した。

4.3. SG 固化壁の耐力

SG 固化壁の曲げ・せん断試験結果を表-2に示す。

ここで、

曲げひび割れ発生時の耐力……S<sub>1</sub>

最大耐力………S<sub>2</sub>

と表示する。H形鋼を用いた供試体では、

S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> は l/h 比とともに減少する傾向を示し、

また S<sub>2</sub>/S<sub>1</sub> 比は図-6に示すように1.7~3.7であった。そして、S<sub>1</sub> および S<sub>2</sub> における最大変位量は、図-7に示すように、それぞれ0.3~0.8 mm, 2.7~6.7 mmを示し、l/h 比とともに増大した。一方、H形鋼を用いない供試体 No. 23 は、同一の l/h 比の No. 20 と比較して、S<sub>1</sub> では0.4倍、S<sub>2</sub> では0.2倍の耐力にとどまった。このことは、SG 固化壁の曲げ耐力、せん断耐力のいずれ

れに対しても、H形鋼の拘束効果が大きく寄与していることを示唆している。

ところで、SG 固化壁の最大耐力は、従来の設計法によると、図-8のように計算される。ここで、以下のように表示する。

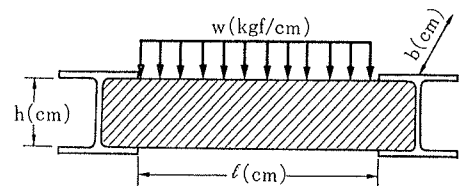
最大曲げ耐力の計算値………S<sub>3</sub>

最大せん断耐力の計算値………S<sub>4</sub>

上記の計算式において、SG 固化壁の σ<sub>b</sub> お

No.	ℓ(上段) h(下段) (cm)	ℓ/h 比	サ ブ No.	成形後 の b (cm)	曲げひび割れ 発生時耐力 S <sub>1</sub> (kgf) 平均	最大耐力 S <sub>2</sub> (kgf) 平均	
19	20 8.4	2.4	1	26.5	900	2553	2679
			2	25.2	720	2474	
			3	26.8	840	3071	
			4	26.4	1020	2673	
20	30 8.4	3.6	1	26.7	970	1901	1887
			2	26.9	940	2038	
			3	26.5	920	1862	
			4	26.7	820	1747	
21	40 8.4	4.8	1	26.9	850	1553	1409
			2	26.3	730	1338	
			3	26.4	730	1293	
			4	26.8	850	1450	
22	50 8.4	6.0	1	25.7	580	1206	1134
			2	25.6	600	1043	
			3	25.2	540	1190	
			4	25.8	530	1097	
23	30 8.4 H形鋼なし	3.6	1	26.3	240	245	379
			2	26.1	450	450	
			3	26.4	320	348	
			4	26.3	440	474	

表-2 SG 固化壁の曲げ・せん断試験結果



SG 固化壁の曲げ強度; σ<sub>b</sub>(kgf/cm<sup>2</sup>)

SG 固化壁のせん断強度; τ(kgf/cm<sup>2</sup>)

(1) 最大曲げ耐力の計算式(単純梁)

$$M_{max} = \frac{W_{max} \cdot \ell^2}{8}, \quad \sigma_b = \frac{M_{max}}{Z} \text{ (より)}$$

$$W_{max} = \frac{8 \cdot Z \cdot \sigma_b}{\ell^2} = \frac{8 \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot \ell^2} \cdot \sigma_b$$

$$S_{max} = W_{max} \cdot \ell = \frac{8 \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot \ell} \cdot \sigma_b$$

(2) 最大せん断耐力の計算式

$$\tau = \frac{S_{max}}{2 \cdot b \cdot h} \text{ (より)}$$

$$S_{max} = 2 \cdot b \cdot h \cdot \tau$$

図-8 SG 固化壁の最大耐力計算式

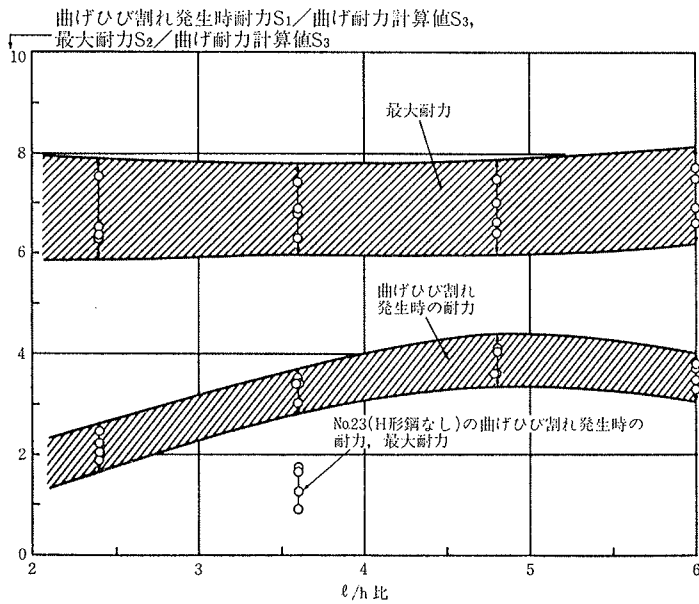


図-9  $l/h$  比と曲げひび割れ発生時耐力  $S_1$ /曲げ耐力計算値  $S_3$ , 最大耐力  $S_2$ /曲げ耐力計算値  $S_3$  の関係

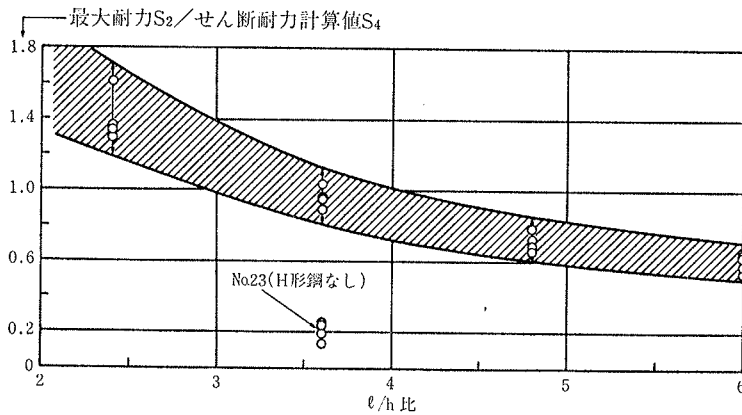


図-10  $l/h$  比と最大耐力  $S_2$ /せん断耐力計算値  $S_4$  の関係

よび  $\tau$  は、4章1節に述べた値を用いた。また、曲げ耐力計算式において、ここでは支点間距離  $l$  を2本のH形鋼のフランジ端間隔とした。 $l$  をもう少し大きくとる計算法もあるが、その場合、より安全側の計算値を与えることになる。

まず、曲げ耐力計算値に対する実際の耐力の比、すなわち  $S_1/S_3$  比、 $S_2/S_3$  比と  $l/h$  比との関係を図-9に示す。H形鋼を用いた供試体では、 $S_1/S_3$  比は概ね2~4(平均3)を示した。一方、H形鋼を用いない供試体では、 $S_1/S_3$  比は0.9~1.8(平均1.5)を示した( $S_2/S_3$  比もほぼ同じ)。これらのことから、SG 固化壁の曲げ耐力にはH形鋼の拘束効果が大きく寄与していること、また曲げひび割れ発生時の耐力は計算値よりも2~4倍大

きいことが認められる。

また、図-9のように、 $S_2/S_3$  比は、6~8(平均7)であった。すなわち、曲げ耐力計算値は、最大耐力に比べて6~8倍大きい。

つぎに、せん断耐力計算値に対する最大耐力の比、すなわち  $S_2/S_4$  比と  $l/h$  比との関係を図-10に示す。H形鋼を用いた供試体では、 $S_2/S_4$  比は0.6~1.6を示し、 $l/h$  比<3においては1以上を示し、 $l/h$  比とともに減少した。一方、H形鋼を用いない供試体では、 $S_2/S_4$  比は、当然小さく、約0.2であった。

これらのことから、H形鋼を建て込んだSG 固化壁の最大耐力は、H形鋼の拘束効果が働くため、 $l/h$  比<3では、せん断耐力計算値とほぼ一致することが判明した。

### 5. あとがき

SG 工法において、構築される壁の耐力を増大させるため、SG 固化壁中にH形鋼を建て込む“SG-H壁”の採用が増えている。このSG-H壁におけるSG 固化壁の耐力を検討するため、SGの品質のばらつきの少ない模型供試体を用いて曲げ・せん断試験を行なった。その結果、SG 固化壁の耐力は、従来の設計法で計算される耐力に比べてかなり大きいことが示唆された。しかし、この成果を設計・施工に適用するには、今後、現場のSG-H壁での試験などとあわせて、SGの品質のばらつきも配慮した設計法の検討が必要であると考えられる。

最後に、本研究に際し御指導、御意見を頂いた構造第一研究室の小畠克朗室長、本社 土木技術第一部の土屋幸三郎職員(前・土木第三研究室)に感謝します。

### 参考文献

- 1) 斎藤, 喜田: 自硬性安定液に関する研究(その7), 大林組技術研究所報, No. 28, (1984), pp. 98~102
- 2) 喜田, 久保: 自硬性安定液に関する研究(その8), 大林組技術研究所報, No. 29, (1984), pp. 129~133
- 3) 喜田, 斎藤, 川地: 自硬性安定液に関する研究(その3), 大林組技術研究所報, No. 22, (1981), pp. 126~129