

地中連続壁切削継ぎ手部のせん断伝達耐力

長 澤 保 紀
(技術研究所)
黒 田 正 信
(土木本部設計第2部)

§ 1. 実験目的

鉄筋コンクリート造の地中連続壁におけるエレメント間の継ぎ手の一つとして、先行エレメントのコンクリート面を掘削機械で切削した後に後行エレメントのコンクリートを打設して形成する切削継ぎ手がある。この切削継ぎ手部のせん断伝達は継ぎ手面に作用する圧縮応力（面圧）に応じて期待できることは摩擦理論から容易に推察される。しかし、この切削継ぎ手のせん断伝達を評価する実験データは少なく、設計において使用できる耐力式の確立には至っていなかった。特に、切削面は掘削機械の能力・ビット形状・泥水掘削の状況・コンクリート打設方法などに左右され、室内実験での再現が困難であり、実際の現場での試料採取が不可欠な点も一因であった。今回、東京電力㈱殿の御協力を得て、東京電力㈱殿新豊洲変電所建設工事における地中連続壁のエレメント間（切削面）のコアを採取する機会を得ることができた。当該地中連続壁は仮設の円筒形山留め止水壁であり、エレメント間の切削には当社のエレクトロミル掘削機が採用されていた。

本報告は、実際の地中連続壁で得られたコアを用いて切削継ぎ手部のせん断伝達耐力確認実験を行い、その実験結果からエレクトロミル掘削機によって切削した面のせん断伝達耐力式を検討したものである。

§ 2. 実験方法

切削面のせん断伝達耐力確認方法として、切削面に直角に面圧が作用した状態で、切削面に平行にせん断力が作用する、いわゆる、Push-Off Testを採用した。

面圧の水準としては設計で採用する範囲を想定して10, 30, 60kgf/cm²を基本にし、さらに、面圧3,

20kgf/cm²についても補間データとして採用した。

なお、面圧0 kgf/cm²の場合を水準に含めることも検討したが、切削面の隙間制御が不安定であり、凹凸の噛み合わせが信頼できない、隙間が存在すれば切削面で接触しないことになる、などの理由から、面圧0 kgf/cm²は採用しなかった。

2.1 試験体の採取

コア試験体は、円筒形地中連続壁構築後の内部掘削中に、切削面を中心に挟んで水平壁厚方向にφ15 cm×約100 cmのコアボーリングを行うことで採取した。コア試験体は、採取後、直ちに、焼鈍鉄線でバンド巻きにして、運搬時の切削面での剥がれを防止した。

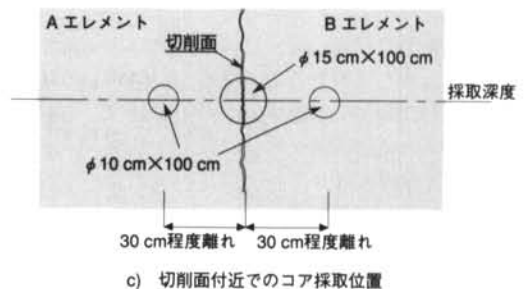
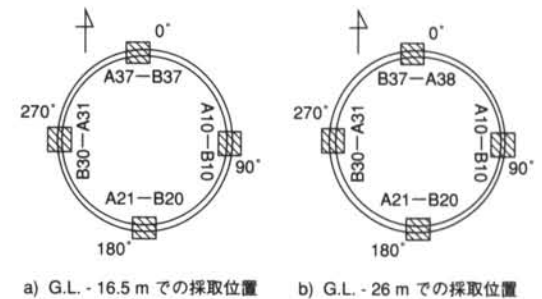


図-1 地中連続壁におけるコア採取位置と採取したエレメント番号

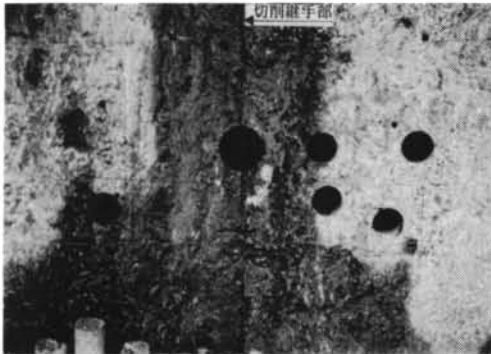


写真-1 地中連続壁切削継ぎ手部のコア抜き状況

コア採取 エレメント位置	深度	面圧 (kgf/cm ²)					荷重方向
		3	10	20	30	60	
90°方向 A10~B10	G.L. -16.5m	2	2	-	2	2	鉛直せん断
180°方向 B20~A21		2	2	1	2	2	水平せん断
270°方向 B30~A31		-	1	-	1	1	鉛直せん断
0°方向 A37~B37	-	2	-	1	2	水平せん断	
90°方向 A10~B10	G.L. -26m	-	2	-	2	2	水平せん断
180°方向 B20~A21		-	2	-	2	1	鉛直せん断
270°方向 B30~A31		-	2	-	1	1	水平せん断
0°方向 B37~A38		-	2	-	2	2	鉛直せん断
プレーンコンクリート	-	-	1	-	1	1	-

表-1 コア採取位置と試験体本数

図-1 に採取位置と対象エレメント番号を示す。

コア採取位置は、掘削深度G.L.-16.5mおよびG.L.-26mで、かつ、北をほぼ0°として時計回りに角度を与え、0°、90°、180°、270°付近の合計8箇所の位置とした。

地中連続壁のエレメント割り付けも、先行して構築するエレメントをAエレメント、先行エレメント間に構築する後行エレメントをBエレメントとして、ほぼ北から時計回りに順にA1、B1、A2、B2、……と与えられている。

また、表-1 に本実験の要因と水準を示す。

実験要因のうち、面圧は地中連続壁に作用する土水圧によって発生する応力であり、切削面のせん断伝達耐力に大きく影響する。荷重方向は、鉛直方向に掘削機の切削爪痕が筋状に残ることから、その筋と平行に作用するせん断力の場合（鉛直せん断）と、その筋と直角、すなわち、切削爪痕の波を乗り越える方向に作用するせん断力の場合（水平せん断）で異なることを想定した。深度については、泥水中の掘削および切削であるために浮遊泥分の沈降付着や泥膜形成などによる切削面の摩擦軽減が生じること

を懸念して設定したもので、2深度を選定した。

同時に、コア切削試験体を採取した位置からAエレメント側およびBエレメント側へ30cm程度水平移

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	目標 スラブ 寸法 (cm)	水セメント 比 W/C (%)	目標 空気 量 (%)	細骨 材率 S/a (%)	単 位 量 (kgf/m ³)				
					水 W	セメント C	砂 S	砂利 G	高性能 減和剤
20	22.0	43.0	4.0	46.5	160	372	810	950	0.017C

注) 地中連続壁コンクリートの基本配合であり、6箇所の生コン工場から支給されている。設計基準強度 320 kgf/cm² (管理材齢 91 日)
減和剤 : 高性能AE減水剤 (MT2000S, SP9N)

表-2 圧縮強度用コア試験体コンクリートの基本配合

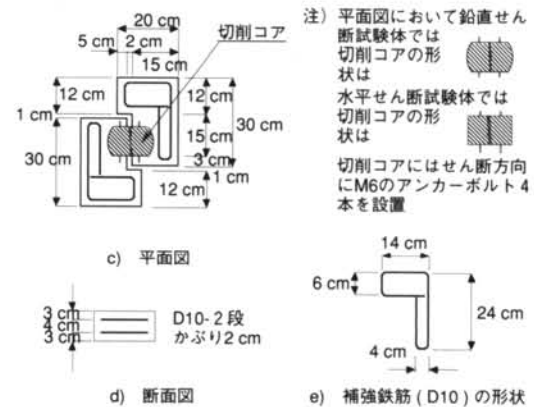
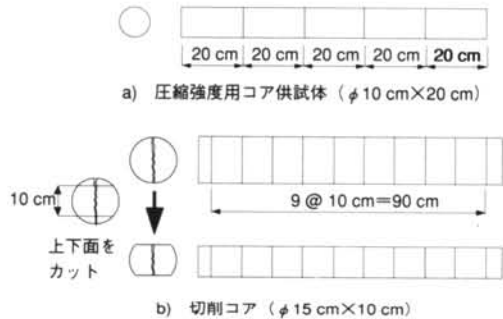


図-2 圧縮強度用コア試験体・切削コア・せん断試験体の形式と配筋図

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	目標 スラブ 寸法 (cm)	水セメント 比 W/C (%)	目標 空気 量 (%)	細骨 材率 S/a (%)	単 位 量 (kgf/m ³)					
					水 W	セメント C	砂 S	砂利 G	高性能 減水剤	AE 助剤
20	18.0	35.0	4.5	42.0	170	486	695	988	4.374	0.039

注) セメント : 普通ポルトランドセメント (日本セメント社製)
細骨材 : 山砂 (君津産、65%) 砕砂 (鳥形産、35%) の混合砂
粗骨材 : 青梅砕石 (30%) 嶺頭砕石 (70%) の混合砕石
高性能減水剤 : マイティ2000WH-Z (花王社製)
AE助剤 : ヴィンゾール (山宗社製)

表-3 せん断試験体成形用コンクリートの配合



写真-2 コアの切断加工状況

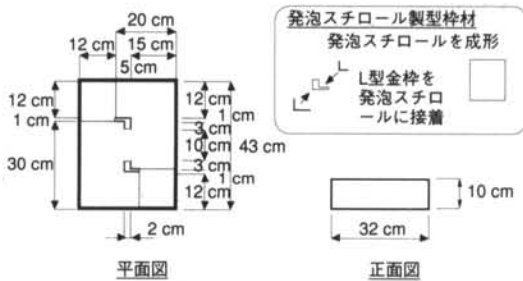


図-3 セン断試験体成形用型枠の形状と寸法

動した位置において、Aエレメント側およびBエレメント側の圧縮強度用コア試験体 $\phi 10\text{cm} \times \text{約}100\text{cm}$ を各1本採取した。

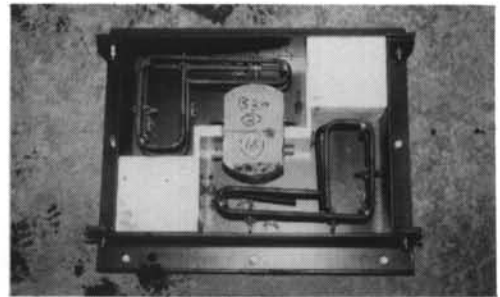
なお、地中連続壁のコンクリート材齢はコア採取時で350日~800日であり、せん断実験実施時材齢で590日~890日であった。

また、参考値として圧縮強度が約 600kgf/cm^2 のPush-Off Test用試験体3体を新たに作製した(以下ではプレーンコンクリート試験体と称する)。このプレーンコンクリート試験体については、せん断実験前に、せん断面に楔を押し当ててアムスラー型試験機によって割裂ひびわれを人工的に発生させた。

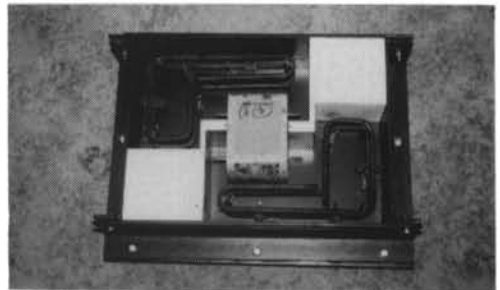
2.2 試験体の成形

圧縮強度用コア供試体は $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ に成形して端面処理を行い、圧縮強度試験を実施した。表-2には圧縮強度用コア供試体のコンクリート基本配合を示す。

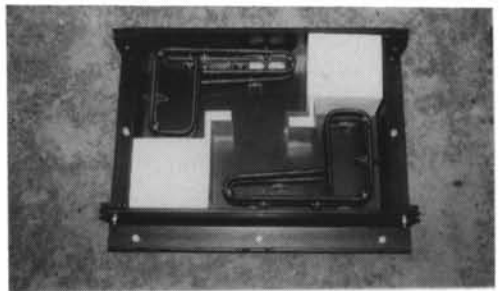
せん断試験体については、図-2に示すように、せん断面積が $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ となるようにかまぼこ形状にコアを切断加工した後、Push-Off Test用の試験体となるようにコンクリートを増し打ちして成形した。



a) 鉛直せん断試験体



b) 水平せん断試験体



c) プレーンコンクリート試験体

写真-3 端面処理済みコアの型枠セット状況



写真-4 プレーンコンクリート試験体割裂ひびわれ発生作業状況

切削コアとせん断試験体成形用コンクリートとの一体性をより強固とするために、図中に示されるように、切削コア表面に、せん断方向と平行に、埋め込み長さ15mm程度、突出長さ25mm程度で、M6のアンカーボルト4本を設置した。また、せん断実験時に、切削面以外のところで破壊あるいは変状が生じないように、補強用鉄筋D10を2段配筋した。補強用鉄筋D10のかぶり厚は2cmとし、ドーナツ型スペーサを用いて所要のかぶりを確保した。

切削コアの取り扱いにおいては、切削面のずれを防止するために、常にガムテープを表面に貼り付けた状態で実施した。

せん断試験体成形用コンクリートの配合は、切削コアの圧縮強度が600kgf/cm²程度発現していることから、実験時材齢で圧縮強度が600kgf/cm²となるものを選定し、表-3に示すとおりとした。

型枠はせん断試験体18体分を同時に成形できるようにして、3回に分けて全試験体の成形を行った。成形用コンクリート打設後の初期養生は湿布養生とした。

型枠の脱型は材齢3日で行い、その後は実験時まで現場気中養生とした。

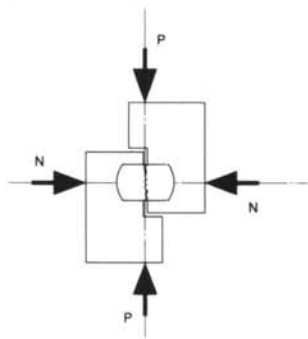


図-4 せん断試験方法 (Push-Off Test)



写真-5 試験体せん断実験状況

2.3 せん断試験体の載荷方法および計測項目

せん断試験体は、図-4のように、油圧ジャッキを用いて、切削面に所定の面圧力を作用させた状態で保持しながら、せん断力を単調増加で作用させることとした。

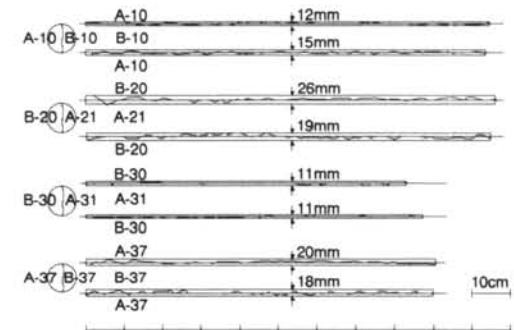
計測項目は、以下のとおりとした。

- 1) 面圧力
- 2) せん断力
- 3) 切削面でのずれ変形
- 4) 切削面での開き変形

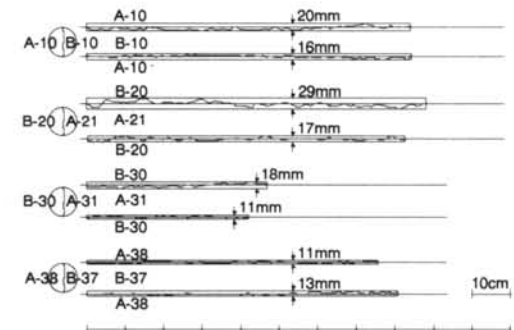
§3. 実験結果および考察

3.1 切削面の形状

採取したφ150mmのコアの切削面(幅150mm×長さ800~1000mm)を観察した結果、図-5のような形状を得た。すなわち、地中連続壁面直角水平方向での凹凸は、少し崩れた波形であり、波長100~250mmの波が大きくうねっており、そのうねり高さは10~30mmとなっていた。波長については、エレクトロミル掘削機のビット間隔に近い結果を得ているも



a) G.L. -16.5 m



b) G.L. -26 m

図-5 コアφ15cmの上下表面の切削形状

のと考えられる。鉛直方向での凹凸はあまりないようであるが、コア直径が150mmであるため、鉛直方向では波形の確認にいたらなかった。

3.2 コアの圧縮強度

圧縮強度用コア供試体の強度試験結果を表-4に示す。

せん断試験体成形用コンクリートの品質管理試験結果ならびに圧縮強度試験結果を表-5に示す。

深 度	サンプル No.	平均値	サンプル No.	平均値
G.L. -16.5 m	A-10	513	B-10	611
	A-21	505	B-20	351
	A-31	601	B-30	538
	A-37	446	B-37	602
G.L. -26 m	A-10	489	B-10	538
	A-21	324	B-20	460
	A-31	425	B-30	598
	A-38	405	B-37	527

表-4 コア圧縮強度試験結果

	スラブ (cm)	空気量 (%)	練上温度 (℃)	材齢 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)
1回目	19.7	5.8	19.3	28	604
2回目	19.4	5.6	20.7	27	592
3回目	19.6	5.0	19.8	25	582
				31	592

表-5 せん断試験体成形用コンクリートの試験結果

3.3 せん断試験結果

図-6~10に、プレーンコンクリート試験体・鉛直せん断試験体・水平せん断試験体のせん断応力度と変形の関係を示す。変位計測は所定の面圧を作用させた時点を零として行っており、初期の残留変形は不明であるが、目視では0.3mm以下と判断された。

荷重の作用方法として、手で油圧ポンプを制御する方法をとったが、所定の面圧保持がせん断ずれ変形の状況によって困難な場合があり、必ずしも一定面圧を保持できなかった。試験体によって異なっているが、最大で、面圧10kgf/cm²で±2~3 kgf/cm²、面圧60kgf/cm²で±5 kgf/cm²程度の変動を生じている。それゆえ、せん断強度に対する面圧は目標値ではなく、せん断強度時の面圧計測値を採用した。

当初、プレーンコンクリート試験体においては、骨材を乗り越える挙動か、あるいは、骨材を割って擦り潰す挙動を予想した。鉛直せん断試験体の破壊状況では、切削面の筋方向と一致しているために、切削面の開きが少なくせん断ずれ変形が進む、平滑な摩擦面をすべる挙動で摩擦せん断伝達が生じていると予想した。そして、水平せん断試験体の破壊状況では、せん断方向が切削面の筋と直角となるために高さ10~30mmの筋を乗り越える挙動を示し、せん断ずれ変形の進行とともに切削面の開きも大きく

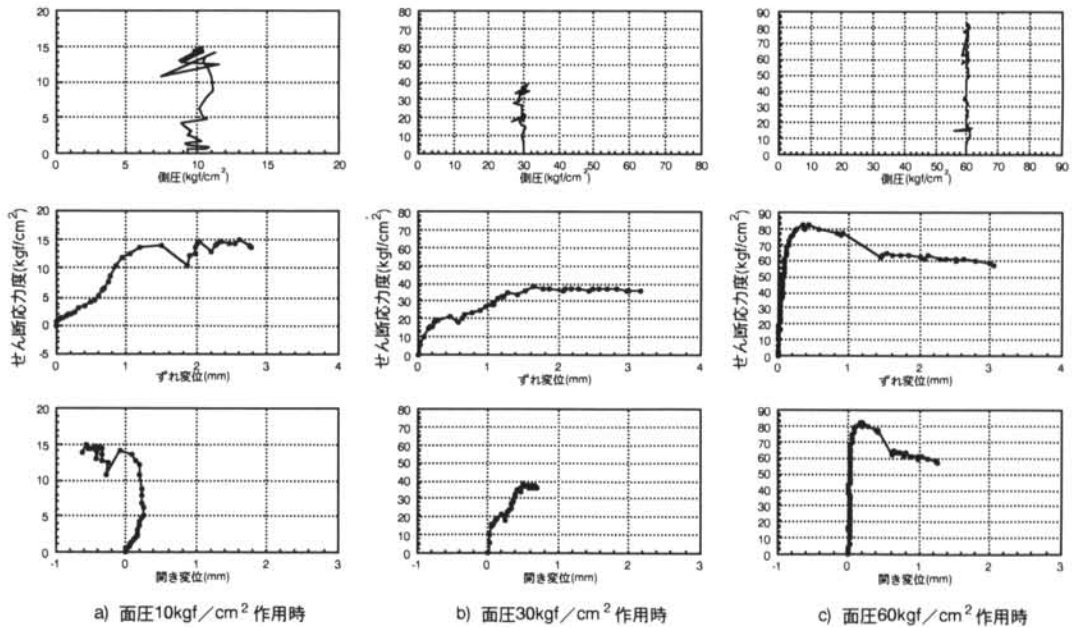


図-6 せん断応力度と面圧・ずれ・開きの関係図 (プレーンコンクリート)

なると予想した。しかし、せん断面の形状は、ねじれた曲面で、かつ、傾斜しているようであり、また、せん断面の付着状況も様々なようであるため、せん断応力-ずれ変形挙動ならびにせん断応力-開き変形挙動は予想に反して多種多様であった。図-6か

らは、面圧が小さいうちはせん断バネで120kgf/cm³ (せん断応力12kgf/cm²作用時にずれ1mm)程度を有する挙動を示すが、最大摩擦力に達すると、そのまま、ずるずるとずれ変形が進行する。面圧が大きくなると、せん断バネで6000kgf/cm³ (せん断応力

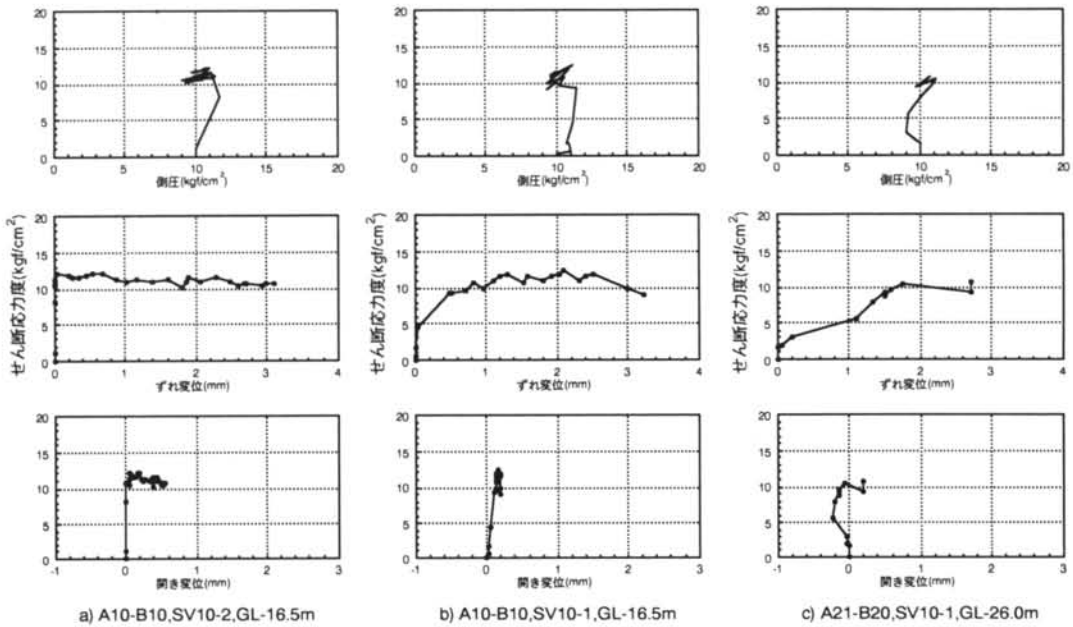


図-7 せん断応力度と面圧・ずれ・開きの関係図 (面圧10kgf/cm²作用時、鉛直せん断)

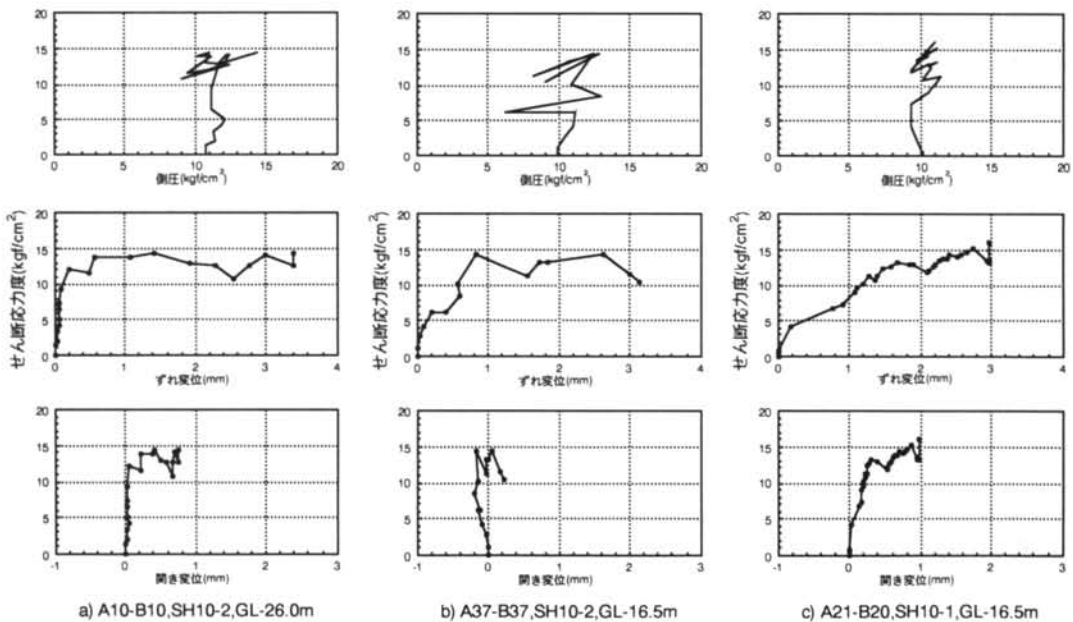


図-8 せん断応力度と面圧・ずれ・開きの関係図 (面圧10kgf/cm²作用時、水平せん断)

度60kgf/cm²作用時にずれ0.1mm)程度に増大した挙動を示し、最大値を越えると、あるところまで抵抗応力が下がって、そこで、ずるずると変形が進行する、と判断された。しかし、**図-7~10**をみると、切削面での挙動は面圧の大小に関わらず、初期剛性

の高いものから低いものまで混在しており、その傾向は鉛直せん断でも水平せん断でも同様であった。開きについては、面圧が小さいと開きが負の値となっているが、これは初期の残留変形とせん断面の傾斜によるものと考えられ、面圧が大きくなるとこの

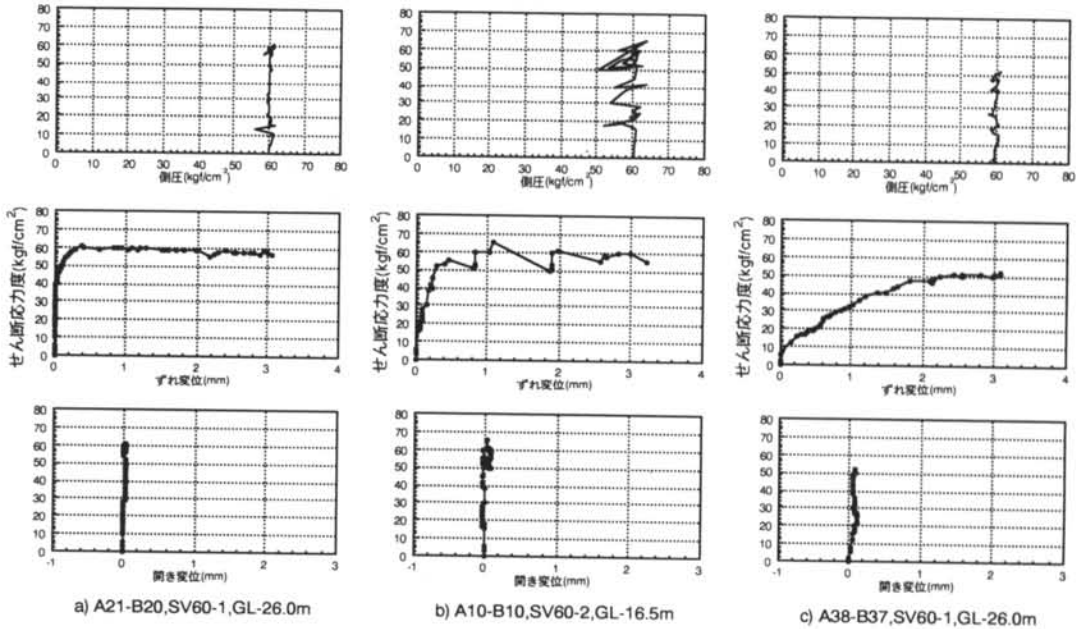


図-9 せん断応力と面圧・ずれ・開きの関係図(面圧60kgf/cm²作用時、鉛直せん断)

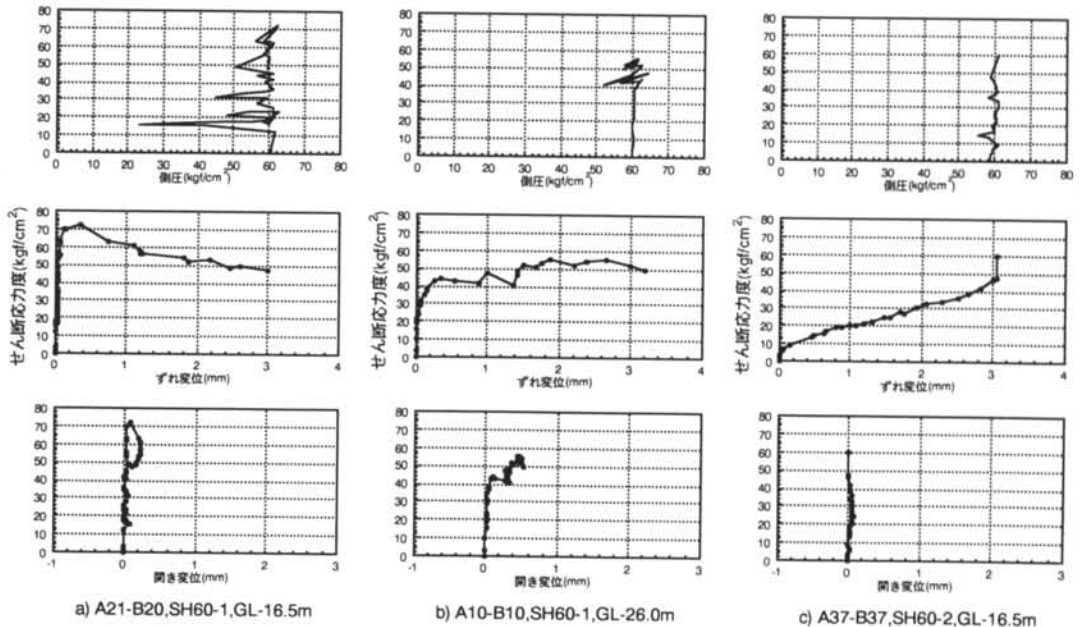


図-10 せん断応力と面圧・ずれ・開きの関係図(面圧60kgf/cm²作用時、水平せん断)

試験体記号	せん断面積 (cm ²)	面圧 (kgf/cm ²)	せん断強度 (kgf/cm ²)
SN10-1	107.4	10.4	15
SN30-1	101.6	31.3	38.8
SN60-1	100.3	59.8	82.1

表-6 プレーンコンクリートせん断試験体実験結果

エレメントNo.	試験体記号	深度 (m)	せん断面積 (cm ²)	面圧 (kgf/cm ²)	せん断強度 (kgf/cm ²)
A10-B10	SV03-1	-16.5	103	3.2	5
A10-B10	SV03-2	-16.5	100	3.5	5.8
A10-B10	SV10-1	-16.5	103	11.1	12.5
A10-B10	SV10-2	-16.5	102.9	10.8	12.2
A31-B30	SV10-1	-16.5	101	11.1	9.5
A21-B20	SV10-1	-26	105	11.2	10.5
A21-B20	SV10-2	-26	100.9	11.1	13.3
A38-B37	SV10-1	-26	101	10.7	9.3
A38-B37	SV10-2	-26	100	13.1	12
A10-B10	SV30-1	-16.5	102	31.1	29.6
A10-B10	SV30-2	-16.5	99	40.7	40.2
A31-B30	SV30-1	-16.5	98	31.3	26.3
A21-B20	SV30-1	-26	104	30.4	27.7
A21-B20	SV30-2	-26	103	30.3	25.8
A38-B37	SV30-1	-26	100	30.6	30.9
A38-B37	SV30-2	-26	101	34.9	31.8
A10-B10	SV60-1	-16.5	102	61.6	59.7
A10-B10	SV60-2	-16.5	102	63.6	66
A31-B30	SV60-1	-16.5	105.1	57.5	53.8
A21-B20	SV60-1	-26	100.9	60.8	60.5
A38-B37	SV60-1	-26	103	60.1	51.3
A38-B37	SV60-2	-26	103	61.1	49.3

表-7 鉛直せん断試験体実験結果

エレメントNo.	試験体記号	深度 (m)	せん断面積 (cm ²)	面圧 (kgf/cm ²)	せん断強度 (kgf/cm ²)
A21-B20	SH03-1	-16.5	127.5	3.1	3.3
A21-B20	SH03-2	-16.5	116.6	3.4	3.7
A21-B20	SH10-1	-16.5	102	11.1	15.2
A21-B20	SH10-2	-16.5	105.1	11	14.2
A37-B37	SH10-1	-16.5	101	12.8	13.3
A37-B37	SH10-2	-16.5	105.1	12.5	14.5
A10-B10	SH10-1	-26	100	13.4	11.9
A10-B10	SH10-2	-26	99	11	14.4
A31-B30	SH10-1	-26	105	12.4	15.5
A31-B30	SH10-2	-26	105	10.7	14.5
A21-B20	SH20-1	-16.5	133.3	20	20.5
A21-B20	SH30-1	-16.5	100	33.7	33.3
A21-B20	SH30-2	-16.5	101	30.7	41.8
A37-B37	SH30-1	-16.5	101	30.2	32.9
A10-B10	SH30-1	-26	104	33	42.3
A10-B10	SH30-2	-26	100	32	32.5
A31-B30	SH30-1	-26	104	32.8	34
A21-B20	SH60-1	-16.5	101	62.3	72.2
A21-B20	SH60-2	-16.5	102	62.3	72.5
A37-B37	SH60-1	-16.5	103	60.5	53.8
A37-B37	SH60-2	-16.5	98	59.2	45.9
A10-B10	SH60-1	-26	100	61.8	55.7
A10-B10	SH60-2	-26	103	58.9	54
A31-B30	SH60-1	-26	100	59.8	49.9

表-8 水平せん断試験体実験結果

傾向は示さない。

表-6~8にせん断実験結果を示す。これらの結果を同一図に示したものが図-11である。同図からは、いずれの試験体においても、原点を通過する傾

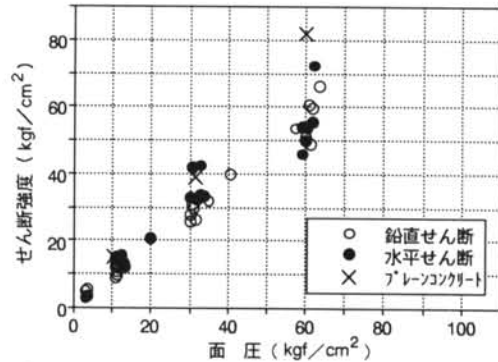


図-11 せん断強度と面圧の関係図

SQ.	x	y	x ²	xy	y ²	Y	Y ²	yY	y/Y
1	3.2	5	10.2	16	25	3	9	15	1.67
2	3.5	5.8	12.3	20.3	33.6	3.3	10.9	19	1.76
3	11.1	12.5	123.2	138.8	156.3	10.4	108.2	129.8	1.20
4	10.8	12.2	116.6	131.8	148.8	10.1	102	123.3	1.21
5	31.1	29.6	967.2	920.6	876.2	29.1	846.8	861.4	1.02
6	40.7	40.2	1656.5	1636.1	1616	38.1	1451.6	1531.1	1.06
7	61.6	59.7	3794.6	3677.5	3564.1	57.6	3317.8	3441.3	1.04
8	63.6	66	4045	4197.6	4356	59.5	3540.3	3928	1.11
9	11.2	10.5	125.4	117.6	110.3	10.5	110.3	110	1.00
10	11.1	13.3	123.2	147.6	176.9	10.4	108.2	138.1	1.28
11	30.4	27.7	924.2	842.1	767.3	28.4	806.6	788	0.98
12	30.3	25.8	918.1	781.7	665.6	28.4	806.6	731.5	0.91
13	60.8	60.5	3696.6	3678.4	3660.3	56.9	3237.6	3442.1	1.06
14	11.1	9.5	123.2	105.5	90.3	10.4	108.2	98.7	0.91
15	31.3	26.3	979.7	823.2	691.7	29.3	858.5	770.3	0.90
16	57.5	53.8	3306.3	3093.5	2894.4	53.8	2894.4	2894.8	1.00
17	10.7	9.3	114.5	99.5	86.5	10	100	93.1	0.93
18	13.1	12	171.6	157.2	144	12.3	151.3	147.1	0.98
19	30.6	30.9	936.4	945.5	954.8	28.6	818	884.8	1.08
20	34.9	31.8	1218	1109.8	1011.2	32.7	1069.3	1038.5	0.97
21	60.1	51.3	3612	3083.1	2631.7	56.2	3158.4	2885.1	0.91
22	61.1	49.3	3733.2	3012.2	2430.5	57.2	3271.8	2818.8	0.86
平均	30.9	29.2	1395.8	1306.2	1231.4	28.9	1222.1	1222.3	1.08

(x : 面圧, y : 鉛直せん断強度, Y : 回帰式値)
 [原点を通過する一次回帰式 $Y = ax$ の算定と有意性検定]
 $a = \frac{\sum(xy)}{\sum(x^2)} = \frac{1306.2}{1395.8} \approx 0.94$
 $s_{yx}^2 = \frac{[\sum(y^2) - \frac{(\sum y)^2}{n}]}{n-1} = \frac{[1231.4 - \frac{1306.2^2}{1395.8}]}{21} \approx 0.4308 \therefore s_{yx} = 0.656$
 $t = \frac{(y_m - Y_m)}{s_{yx} \sqrt{1/n + x_m^2 / \sum(x^2)}}$
 $= \frac{(29.2 - 28.9)}{0.656 \sqrt{1/22 + 30.9^2 / 1231.4}} = 1.653$
 片側95%信頼限界における有意性検定を行うために表から自由度21で読み取ると、 $t_{0.1} = 1.721$; $t = 1.653 < t_{0.1} = 1.721$
 \therefore 有意であり、原点を通過する一次回帰式 $Y = ax$ は妥当。
 \therefore 鉛直せん断強度 $\tau = 0.94 \sigma_n$ ただし、 σ_n : 面圧
 $\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum(y^2)/n - y_m^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{1231.4 - 29.2^2}{21}} = 19.46$
 $\sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum(Y^2)/n - Y_m^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{1222.1 - 28.9^2}{21}} = 19.67$
 相関係数 $r = \frac{\sum(yY)/n - y_m Y_m}{\sigma_y \sigma_Y}$
 $r = \frac{1222.3 - 29.2 \times 28.9}{19.46 \times 19.67} = 0.989$
 回帰式値に対する実験値の比について平均値と標準偏差を求めると、
 平均値 (m) = 1.08 標準偏差 (σ) = 0.225 正規分布に従うとして下限値を求めると、片側95%信頼限界における下限値 $= m - 1.64 \sigma = 0.711$
 \therefore 安全係数 = 1.41 となる

表-9 鉛直せん断試験体のせん断強度式の検討

向を示しており、これまでの切片を有するモデルとは異なっていると思われる。強度的には、ブレン

SQ.	x	y	x ²	xy	y ²	Y	Y ²	yY	y/Y
1	11.9	13.4	141.6	159.5	179.6	11.6	134.5	155.4	1.16
2	14.4	10.9	207.4	157	118.8	14	197	153	0.78
3	42.3	32.8	1789.3	1387.4	1075.8	41.2	1699.6	1352.2	0.80
4	32.5	31.8	1056.3	1033.5	1011.2	31.7	1003.3	1007.3	1.00
5	55.7	61.4	3102.5	3420	3770	54.3	2946.9	3333.1	1.13
6	54	58.6	2916	3164.4	3434	52.6	2769.8	3084	1.11
7	3.3	3	10.9	9.9	9	3.2	10.3	9.6	0.94
8	3.7	3.4	13.7	12.6	11.6	3.6	13	12.3	0.94
9	15.2	11	231	167.2	121	14.8	219.5	163	0.74
10	14.2	10.9	201.6	154.8	118.8	13.8	191.5	150.8	0.79
11	20.5	19.9	420.3	408	396	20	399.2	397.6	1.00
12	33.3	33.5	1108.9	1115.6	1122.3	32.5	1053.3	1087.2	1.03
13	41.8	30.5	1747.2	1274.9	930.3	40.7	1659.6	1242.5	0.75
14	72.2	61.9	5212.8	4469.2	3831.6	70.4	4951.4	4355.7	0.88
15	72.5	61.9	5256.3	4487.8	3831.6	70.7	4992.7	4373.8	0.88
16	15.5	12.3	240.3	190.7	151.3	15.1	228.2	185.8	0.81
17	14.5	10.6	210.3	153.7	112.4	14.1	199.7	149.8	0.75
18	34	32.6	1156	1108.4	1062.8	33.1	1098	1080.3	0.98
19	49.9	59.5	2490	2969.1	3540.3	48.6	2365.1	2893.6	1.22
20	13.3	12.7	176.9	168.9	161.3	13	168	164.6	0.98
21	14.5	12.4	210.3	179.8	153.8	14.1	199.7	175.2	0.88
22	32.9	30.1	1082.4	990.3	906	32.1	1028.1	965.1	0.94
23	53.8	60.2	2894.4	3238.8	3624	52.4	2749.3	3156.5	1.15
24	45.9	58.8	2106.8	2698.9	3457.4	44.7	2001.2	2630.4	1.32
平均	31.7	30.6	1416	1380	1380.4	30.9	1345	1345	0.96

(x : 面圧, y : 水平せん断強度, Y : 回帰式値)
 【原点を通過する一次回帰式 $Y = ax$ の算定と有意性検定】
 $a = \Sigma(xy) / \Sigma(x^2) = 1380.0 / 1416.0 \approx 0.97$
 $syx^2 = \{ \Sigma(y^2) - [\Sigma(xy)]^2 / \Sigma(x^2) \} / (n-1)$
 $= \{ 1380.4 - 1380.0^2 / 1416.0 \} / 23 \approx 1.5428 \therefore syx = 1.242$
 $t = (ym - Ym) / \{ syx \sqrt{[1/n + xm^2 / \Sigma(x^2)]}$
 $= (30.6 - 30.9) / \{ 1.242 \sqrt{[1/24 + 31.7^2 / (24 \times 1416)]} \} = -0.905$
 片側95%信頼限界における有意性検定を行うためにt表から自由度23で読み取ると、 $t_{0.1} = 1.714$ $t = 0.905 < t_{0.1} = 1.714$
 \therefore 有意であり、原点を通過する一次回帰式 $Y = ax$ は妥当。
 \therefore 水平せん断強度 $\tau h = 0.97 \sigma_n$ ただし、 σ_n : 面圧
 $\sigma_y = \sqrt{[\Sigma(y^2) / n - ym^2]} = \sqrt{[1380.4 - 30.6^2]} = 21.07$
 $\sigma_Y = \sqrt{[\Sigma(Y^2) / n - Ym^2]} = \sqrt{[1345.0 - 30.9^2]} = 19.75$
 相関係数 $r = [\Sigma(yY) / n - ymYm] / [\sigma_y \sigma_Y]$
 $r = [1345.0 - 30.6 \times 30.9] / [21.07 \times 19.75] = 0.960$
 回帰式値に対する実験値の比について平均値と標準偏差を求めると、
 平均値 (m) = 0.96 標準偏差 (σ) = 0.158 正規分布に従うとして下限値を求めると片側95%信頼限界における下限値 = $m - 1.64 \sigma = 0.689$
 \therefore 安全係数 = 1.42 となる

表-10 水平せん断試験体のせん断強度式の検討

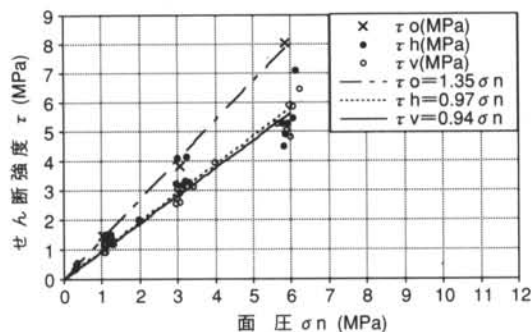


図-12 試験結果および原点通過回帰式の当てはめ

コンクリート、水平せん断、鉛直せん断の順に小さい傾向であり、せん断面の粗滑状態と一致した傾向であると判断される。

3.4 せん断耐力式の検討

コンクリートの圧縮強度がかなりバラついた結果を示しているため、コンクリートの圧縮強度の影響がせん断強度と面圧の関係にどの程度影響をおよぼしているかは不明であるが、ここでは、得られたせん断強度と面圧の結果のみを用いて回帰分析を行い検討した。

表-9~11に原点通過の一次回帰式としての検討結果を示す。図-12はそれらの結果を図示したものであり、一次回帰式がほぼ妥当な結果を示しており、設計に用いるせん断強度式として採用できる。安全

SQ.	x	y	x ²	xy	y ²	Y	Y ²	yY	y/Y
1	10.4	15	108.2	156	225	14	197.1	210.6	1.07
2	31.3	38.8	979.7	1214.4	1505.4	42.3	1785.5	1639.5	0.92
3	59.8	82.1	3576	4909.6	6740.4	80.7	6517.3	6627.9	1.02
平均	33.8	45.3	1554.6	2093.3	2823.6	45.7	2833.3	2826	1.00

(x : 面圧, y : ブレンコンクリートせん断強度, Y : 回帰式値)
 【原点を通過する一次回帰式 $Y = ax$ の算定と有意性検定】
 $a = \Sigma(xy) / \Sigma(x^2) = 2093.3 / 1554.6 \approx 1.35$
 $syx^2 = \{ \Sigma(y^2) - [\Sigma(xy)]^2 / \Sigma(x^2) \} / (n-1)$
 $= \{ 2823.6 - 2093.3^2 / 1554.6 \} / 2 \approx 2.4648 \therefore syx = 1.570$
 $t = (ym - Ym) / \{ syx \sqrt{[1/n + xm^2 / \Sigma(x^2)]}$
 $= (45.3 - 45.7) / \{ 1.570 \sqrt{[1/3 + 33.8^2 / (3 \times 1554.6)]} \} = -0.335$
 片側95%信頼限界における有意性検定を行うためにt表から自由度2で読み取ると、 $t_{0.1} = 2.920$ $t = 0.335 < t_{0.1} = 2.920$
 \therefore 有意であり、原点を通過する一次回帰式 $Y = ax$ は妥当。
 \therefore ブレンコンクリートせん断強度 $\tau o = 1.35 \sigma_n$ ただし、 σ_n : 面圧
 $\sigma_y = \sqrt{[\Sigma(y^2) / n - ym^2]} = \sqrt{[2823.6 - 45.3^2]} = 27.78$
 $\sigma_Y = \sqrt{[\Sigma(Y^2) / n - Ym^2]} = \sqrt{[2833.3 - 45.7^2]} = 27.29$
 相関係数 $r = [\Sigma(yY) / n - ymYm] / [\sigma_y \sigma_Y]$
 $r = [2826.0 - 45.3 \times 45.7] / [27.78 \times 27.29] = 0.997$
 回帰式値に対する実験値の比について平均値と標準偏差を求めると、
 平均値 (m) = 1.00 標準偏差 (σ) = 0.064 正規分布に従うとして下限値を求めると片側95%信頼限界における下限値 = $m - 1.64 \sigma = 0.895$
 \therefore 安全係数 = 1.12 となる

表-11 ブレンコンクリートせん断試験体のせん断強度式の検討

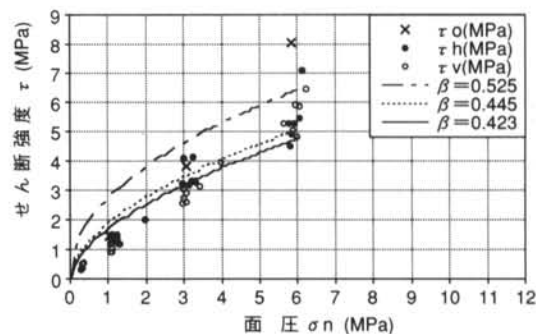


図-13 試験結果および土木学会せん断伝達強度式の当てはめ

係数は、片側95%信頼限界における下限値管理を行うとして設定すると、表-9~10の結果から1.4が望ましい。ただし、今回の実験結果においては、せん断面積が10cm×10cmと小さいことから実物大のせん断強度と異なる可能性があり、設計として採用する際にはスケール効果について検討する必要がある。しかし、エレクトロミル掘削機による切削面のせん断伝達強度の実験は今回が初めてであり、スケール効果についての資料は皆無である。そこで、土木学会コンクリート標準示方書の棒部材のせん断設計で用いられるせん断強度のスケール効果に準じて $\sqrt[4]{(1/d)}$ (d:有効高さ)で配慮することが考えられる。例えば、今回の寸法が10cmであるのに対して地中連続壁壁厚が100cmであるならば、0.56 (= $\sqrt[4]{(10\text{cm}/100\text{cm})} = \sqrt[4]{0.1}$) 倍にせん断伝達強度を低減することとなる。

図-13は、参考として、土木学会コンクリート標準示方書(平成8年版)に記載されているせん断伝達耐力式に当てはめて、最小自乗法によって係数 β の値を求めた結果を図示したものである。

コンクリートのせん断伝達強度

$$\tau_c = \mu f_{cd} \beta (\alpha p f_{yd} - \sigma'_{na} / 2) \sqrt[4]{(1/d)}$$

ただし、

μ : 固体接触に関する平均摩擦係数で、0.45

f_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度

β : 面形状を表す係数(0~1)で、以下の値とする。

2/3 = ひび割れ面(普通強度のコンクリート)

1/2 = 打継面(処理あり)あるいは高強度コンクリートのひび割れ、プレキャスト部材の継目に接着材を用いた

場合の継目

$$\alpha: 0.75 \{1 - 10(p - 0.85\sigma'_{na}/f_{yd})\}$$

ただし、 $0.08\sqrt[4]{3} \leq \alpha \leq 0.75$ (異形鉄筋の場合)

σ'_{na} : せん断面に垂直に作用する平均圧縮応力度

p: せん断面における鉄筋比

f_{yd} : せん断面における鉄筋の設計引張降伏応力度

同図からは、原点通過の一次回帰式に比して土木学会式では回帰の適合度が劣ると判断される。

§4. まとめ

実際の地中連続壁から切削部分のコアを抜いてせん断強度を実験によって検討を行った結果、以下のせん断強度式を得た。

$$\text{鉛直せん断強度 } \tau_v = 0.94 \sigma_n$$

$$\text{水平せん断強度 } \tau_h = 0.97 \sigma_n$$

ただし、 σ_n : 面圧

ただし、実験データのバラツキを配慮して、設計として採用する際には、片側95%信頼限界における下限値管理として安全係数を1.4と設定するのが適切と判断される。

さらに、今回の試験体のせん断面積が10cm×10cmと小さいことから、実物大のせん断強度と異なる可能性があり、土木学会コンクリート標準示方書の棒部材のせん断設計で用いるスケール効果に準じて、 $\sqrt[4]{(0.1/d)}$ (d:地中連続壁の有効高さ(m))を乗じることで安全側に配慮することが、実大規模でのデータを有しない現時点では適当と考えられる。

<参考文献>

- 1) 入沢賢一ほか: "カッティングジョイント工法による地中連続壁鉛直継手部の実大実験" 大林組技術研究所報, No.35, 1987, pp35-41
- 2) 黒田正信ほか: "地中連続壁切削継手部のせん断伝達耐力" 日本建築学会大学学会大会学術講演梗概集, 1996年9月構造1 (B-1), pp777-778