

# 論文 滑り変位の増大にともなうコンクリート接合面の表面粗さの破壊の進行と接合面せん断挙動との関係に関する研究

香取慶一\*1・林 静雄\*2

**要旨:** プレキャスト水平接合部において、接合面粗さの破壊（凹凸の崩れ）が進行するとと思われる接合面滑り変位が概ね 6mm 以下の領域での、載荷せん断力や目開き変位の挙動の特性を明らかにすることを目的とした。その結果、①接合面滑り変位が 1.5mm 程度までなら接合面粗さ評価値とコンクリート強度で載荷せん断力を推定可能である、②試験体の目開き変位は接合面の粗さの状態によってその挙動が大きく左右される、③目開き変位の観点から刷毛引き程度の接合面の粗し方と平滑な接合面とはほぼ差違がなく、その両者と高さ 5mm の山形の凹凸を施した鋼板押し付け試験体では異なる挙動を示す、ことがわかった。

**キーワード:** プレキャストコンクリート、接合面、表面粗さ、せん断力、目開き変位

## 1. はじめに

著者らは、プレキャストコンクリート構造の水平接合部において、接合面の表面粗さを定量的に評価することを目的に研究を行っている。接合面の滑り変位を微小な範囲に限定すると、載荷せん断力および接合面に直交配筋された接合筋に生じる軸方向引張力と接合面表面粗さ評価値（接合面表面粗さを数値化した値）との間に相関が見られた旨を今までに報告した<sup>1)</sup>。

本報では、接合面せん断挙動のうち、接合面滑り変位が 6mm までの領域での載荷せん断力や接合面目開き変位の挙動の解明を目的とした。

## 2. 試験体

### 2.1 試験体概要

試験体は、プレキャストコンクリート構造の耐震壁-梁（床）水平接合部の微小要素を意図したものである。試験体一覧を表-1に、また試験体詳細図を図-1に示す。本研究での「接合面」とは、図-1に示す試験体の「先打ち部分」・「後打ち部分」の境界、すなわち両部分コ

表-1 試験体一覧

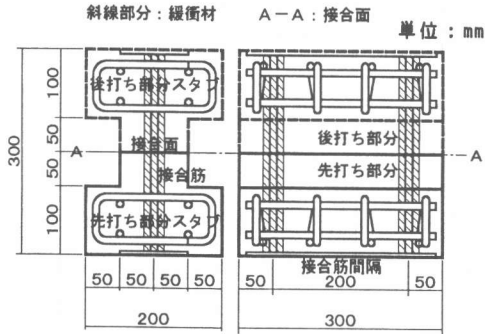
試験体名	接合面粗さ処理方法	接合筋種類・本数	緩衝材
1-1	山形鋼板押し付け	3-D10 無加工	あり
2-1		2-D10 無加工	なし
3-1、3-2	あり		
4-1	なし		
5-1、5-2	なし		
6-1	あり		
7-1、7-2	山形鋼板押し付け	2-D13 溝切り	なし
8-1	磨き鋼板	加工	なし
9-1	押し付け		あり

図-1の接合筋間隔：3-D10は@100mm、2-D10と2-D13は@200mm。

ンクリートの打継ぎ面のことである。試験体は接合面として 30cm（長さ方向）×10cm（幅方向）の大きさを持ち、先打ち・後打ち各部分がそれぞれ凸字型断面をなし、試験体全体ではI型断面となっている。変動要因は、接合面粗さ処理方法と接合筋の径および本数、そして 2.2 節に示す接合筋周囲に施す緩衝材の有無の計 3 種類である。試験体製作順序は、まず先打ち部分型枠を組み、接合筋とスタブ補強筋を所定の

\*1 東京工業大学助手 建築物理研究センター 工修（正会員）

\*2 東京工業大学教授 建築物理研究センター 工博（正会員）



緩衝材：接合筋全長にわたり接合筋周囲に巻き付け。厚さは接合筋表面から約20mm。

図-1 試験体詳細図

位置に配し、先打ち部分コンクリートを打設する。打設終了後約90分を目標に、接合面粗さ処理を施す。粗さ施工後およそ3日間常温常圧空气中で養生し、3.1節(2)項に示す方法で「接合面粗さ測定」を行う。測定後に後打ち部分型枠を組み、スタブ補強筋を所定の位置に配し、後打ち部分コンクリートを打設する。後打ち部分打設後1か月を目標に常温常圧空气中で養生し、養生後に型枠を脱型し、試験体を完成させる。

## 2.2 使用材料

コンクリート用粗骨材は石灰石砕石（ふるいにより最大粒径寸法20mm）を、細骨材には川砂を用い、セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。力学的性質を表-2に示す。先打ち部分と後打ち部分のコンクリート強度が異なるため、その両部分のコンクリートの圧縮強度をそれぞれ比較し、どちらか小さい方の値をその試験体の代表圧縮強度 $\sigma_B$ として以後の検討に用いる。

接合筋には、表-1に示す通りD13を2本、あるいはD10を2本または3本使用した。7-1試験体から9-1試験体までの4体では接合筋のリブ部分に軸方向の溝を施した。また、表-1に示す通り、ほぼ半数の試験体には接合筋の純粋な伸び歪み度だけを抽出する様に、だぼせん断力除去用の緩衝材（工作用油粘土を使用）を

表-2 使用コンクリートの力学的性質

試験体名	代表コンクリート強度		材齢(日)	
	圧縮 $\sigma_B$ (MPa)	左欄の平方根 $\sqrt{\sigma_B}$	先打ち部分	後打ち部分
1-1	20.8	4.56	31	23
2-1、4-1	22.2	4.71	56	50
3-1、3-2	21.3	4.62	44	39
5-1、5-2	22.5	4.74	32	28
6-1				
7-1、7-2	22.9	4.79	90	84
8-1				
9-1	22.7	4.76	79	73

材齢は試験体養生期間と同じ。

施した。接合筋の力学的性質を表-3に示す。

表-3 使用接合筋の力学的性質

鉄筋種類	降伏強度 $\sigma_y$ (MPa)	引張強度 $\sigma_u$ (MPa)	ヤング率 $E_s$ (MPa)
D10	360.7	487.3	$1.82 \times 10^5$
D13	353.4	528.6	$1.78 \times 10^5$

D13 溝切り加工接合筋の断面積 $A_s=1.02\text{cm}^2$

## 3. 実験

### 3.1 接合面粗さ処理・粗さ測定

#### (1) 粗さ処理

接合面粗さ処理では、粗さ処理方法として下記3種類を採用した。

#### 1. 面材（粗さ型枠）による押し付け形成

接合面に固形の面材を押し付け、粗さを形成するもの。表面を磨き処理した鋼板と高さ5mm、底辺10mmの二等辺三角形の凹凸処理を施した山形鋼板の合計2種類を採用した。

#### 2. コンクリート硬化前に行う手処理

接合面に諸道具を用いて手作業で粗さを施すもの。左官用さら刷毛を用いた刷毛引きを採用した。

#### (2) 粗さ測定

接合面粗さ測定では、接合面全域についての凹凸の大きさを得ることが困難なため、接合面の長さ方向に引いたある特定の線（以後「測線」

と呼ぶ) 上の凹凸によって接合面全域の粗さを代表できると仮定し、接合面粗さ測定を行った。測線は2本設定した。設定位置を図-2に示す。

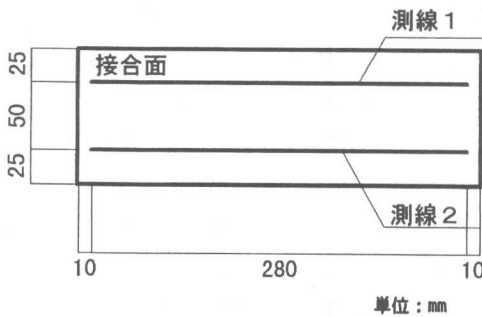


図-2 接合面上の測線位置図

接合面粗さ測定については、レーザー光式変位計を用いた非接触式粗さ測定方法により測定を行った。すなわち、接合面粗さ処理を施した先打ち部分試験体を精密機械工作用旋盤の上に据え付け、試験体の位置を調整した後、試験体の接合面に前もって設定した測線の上にレーザー光式変位計を配置する。この後に旋盤を駆動し試験体を等速度で移動させる。これにより測線上の位置とその位置における凹凸の関係が得られる。

実際の測定では、測線の長さは接合面長さ30cmのうち両側1cmずつを削除した28cmとし、0.1mmごとに凹凸の大きさの測定(測線1本当たり2800点の合計5600点)を行った。

### (3) 接合面粗さの評価

本研究では前項での仮定の通り、測線上の粗さ評価値で接合面全域の粗さを評価できるとする。そして2つの測線上の評価値の平均を、接合面全体の粗さ評価値とする。

接合面の粗さ評価方法に関しては、粗さの凹凸の大きさと同時に凹凸の形状の違いを考慮できる「負荷値 $R_k$  (注および1)~3)」を採用した。測線上の粗さ評価値を表-4に示す。

### 3.2 接合面せん断力载荷実験

表-4 接合面測線上の粗さ評価値

試験体名	負荷値による測線の粗さ評価値 $R_k$ (mm)		試験体名	負荷値による測線の粗さ評価値 $R_k$ (mm)	
	上:測線1	平均		上:測線1	平均
1-1	4.308	3.968	5-2	1.914	1.621
2-1	3.628	4.140	6-1	1.328	1.325
	4.253			0.949	
3-1	4.026	4.068	7-1	1.700	4.305
	4.076			4.235	
3-2	4.060	3.213	7-2	4.376	4.272
	2.416			4.237	
4-1	4.010	0.347	8-1	4.306	0.332
	0.336			0.563	
5-1	0.358	1.633	9-1	0.100	0.049
	1.871			0.048	
	1.394			0.050	

载荷装置図を図-3に示す。本報では、試験体を接合部の微小要素と見なすため、先打ち・後打ち両部分を常に平行な状態でせん断力を载荷する必要がある。そのため、試験体の先打ち・後打ち両部分に緊結するL型鉄製载荷フレームに鉄製平行クランクを表裏1組ずつ取り付けただで、いわゆるS型载荷方法によりせん断力 $Q$ を载荷する様改良を加えた。

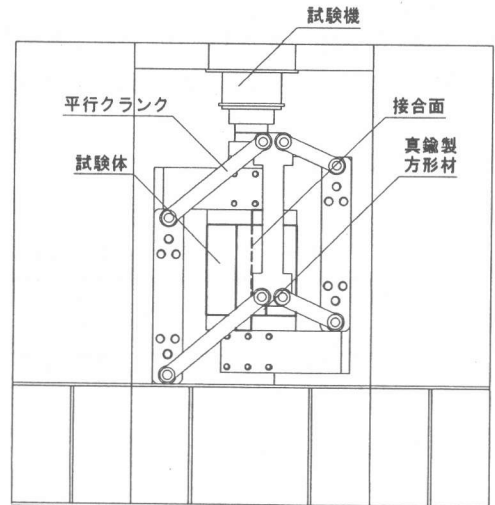


図-3 载荷装置図

変位については、接合面長さ方向の先打ち・後打ち両部分のスタブ間相対変位(滑り変位)と接合面に鉛直の方向の両部分のスタブ間相対

変位（目開き変位）を測定した。測定箇所は合計4か所とした。なお、以下に「平均滑り変位 $\delta_H$ 」とは、上記の4箇所の測定位置での滑り変位の平均を、また「平均目開き変位 $\delta_V$ 」とは、上記の4箇所の測定位置での目開き変位の平均を指す。そして、 $\delta_H$ が概ね1mm以下の範囲を「微小変形時」と、また $\delta_H$ が1mm以上6mm以下の範囲を「中変形時」と定義する。

#### 4. 実験結果・考察

##### 4.1 平均滑り変位の増加にともなう荷重せん断力の推移

表-5に $\delta_H$ の大きさ別の荷重せん断力の指標値を示し、表-6に $\delta_H$ の大きさ別による荷重せん断力と接合面表面粗さ評価値との相関を示す。なおここで、荷重せん断力の指標としては、既報<sup>1)</sup>と同様に、試験体のコンクリート強度の影響を考慮すべく荷重せん断力 $Q$ を接合面面積 $A(=300\text{cm}^2)$ で除した荷重せん断応力度 $\tau$ をコンクリートの代表強度の平方根で除した値 $\tau/\sqrt{\sigma_B}$ を採用した。ただし、7-1試験体については、せん断力荷重実験の最中に2軸変位計が脱落して $\delta_H$ が2.5mmを超える範囲での荷重せん断力と $\delta_H$ との関係が不明であるため、本節では相関の対象から除いた。あわせて、

6-1試験体についても、 $\delta_H$ が1.05mmを超えた時点から4箇所の変位計の滑り変位はほぼ等しかったものの、目開き変位に顕著なばらつきが現れ始めた。よってこの試験体では $\delta_H > 1.05\text{mm}$ で試験体が接合面外方向に振れたものと判断されるので、同様に除外した。

相関係数で比較すると、 $\delta_H$ が大きくなるにつれて相関係数が単調に減少し、荷重せん断力と粗さ評価値との相関が弱くなっていることがわかる。接合面粗さ評価値と接合面コンクリート強度による荷重せん断力の推定の範囲の限界は、仮に相関係数 $r=0.7$ 程度以上を有意とすると、 $\delta_H=1.5\text{mm}$ 程度までと判断される。

##### 4.2 滑り変位と目開き変位との関係

試験体には接合面に垂直方向の圧縮力（面圧縮力）は作用していないので、せん断力荷重により生じる滑り変位と同時に、目開き変位も発生すると考えられる。

図-4に各試験体ごとの $\delta_H$ と $\delta_V$ との関係を示す。図の性状は接合面粗さの処理方法により特徴付けられる。まず1-1試験体を除く山形鋼板押し付けによる試験体（2-1, 3-1, 3-2, 7-2）の各試験体と $\delta_H < 2.5\text{mm}$ に限定した7-1試験体）では、ほぼ $\delta_H < 0.5\text{mm}$ の範囲では、 $\delta_H$ と $\delta_V$ がほぼ等しい状態となっている。すなわち、

表-5 荷重せん断力の指標値（せん断力荷重実験結果）

各 $\delta_H$ 時における試験体ごとの荷重せん断力の指標値 $\tau/\sqrt{\sigma_B}$											
試験体名	1-1	2-1	3-1	3-2	4-1	5-1	5-2	7-2	8-1	9-1	
接合面粗さ 評価値 $R_k(\text{mm})$	3.968	4.140	4.068	3.213	0.347	1.633	1.621	4.272	0.332	0.049	
$\delta_H$ (mm)	0.5	0.472	0.667	0.519	0.566	0.464	0.252	0.263	0.723	0.245	0.0629
	1	0.407	0.544	0.494	0.515	0.456	0.267	0.261	0.610	0.245	0.0866
	1.5	0.402	0.383	0.463	0.509	0.450	0.286	0.279	0.585	0.246	0.0940
	2	0.393	0.376	0.451	0.511	0.453	0.306	0.288	0.563	0.243	0.102
	2.5	0.390	0.371	0.439	0.496	0.460	0.306	0.293	0.550	0.249	0.104
	3	0.376	0.366	0.429	0.498	0.459	0.297	0.286	0.543	0.248	0.104
	3.5	0.356	0.367	0.414	0.472	0.458	0.292	0.279	0.550	0.249	0.109
	4	0.333	0.372	0.412	0.450	0.456	0.286	0.276	0.533	0.258	0.107
	4.5	0.308	0.368	0.409	0.435	0.455	0.285	0.278	0.536	0.261	0.105
	5	0.301	0.370	0.395	0.399	0.457	0.285	0.278	0.538	0.261	0.106
5.5	0.297	0.368	0.380	0.379	0.460	0.287	0.282	0.516	0.266	0.102	

$\tau$ ：各 $\delta_H$ 時の荷重せん断力を接合面面積 $A(=300\text{cm}^2)$ で除した荷重せん断応力度(MPa)

$\sigma_B$ ：使用コンクリートの代表圧縮強度(MPa)

表一六 荷重せん断力と接合面表面粗さ評価値との相関

$\delta_H$ (mm)	回帰式			備考
	傾斜 a	切片 b	相関係数 r	
0.5	0.0987	0.190	0.8206	傾斜値最大 切片値最小
1	0.0743	0.213	0.7848	
1.5	0.0587	0.231	0.7095	
2	0.0540	0.241	0.6891	
2.5	0.0502	0.247	0.6662	
3	0.0486	0.246	0.6493	
3.5	0.0461	0.246	0.6317	
4	0.0430	0.247	0.6120	
4.5	0.0409	0.247	0.5839	
5	0.0385	0.248	0.5619	
5.5	0.0348	0.251	0.5300	傾斜値最小 切片値最大

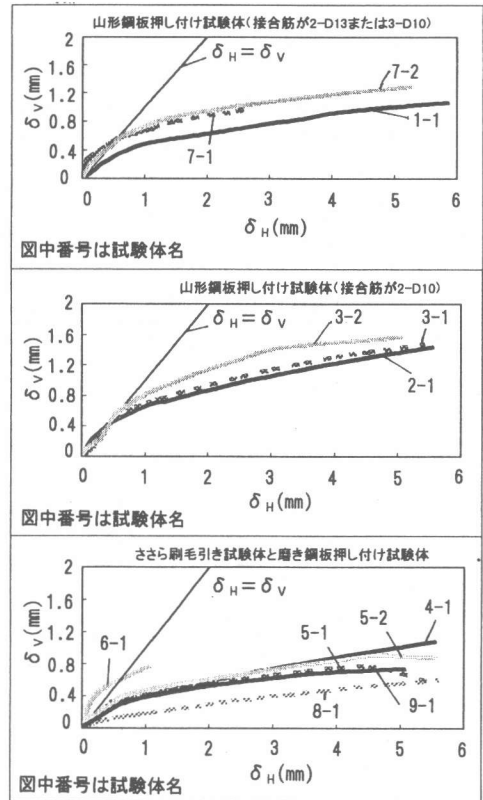
$\tau$ : 各 $\delta_H$ 時の荷重せん断力を接合面面積 ( $A=300\text{cm}^2$ ) で除した値。

$\tau$ 、 $\sigma_B$ の単位はMPa。  $R_k$ の単位はmm。

試験体先打ち部分と後打ち部分が、接合面上の直角二等辺三角形形状の凹凸の側面に乗り上がる様にして相対的に移動している。 $\delta_H$ がほぼ0.5mmを過ぎると $\delta_V$ の増加の割合が鈍り、 $\delta_H$ の増加が卓越し始める。つまり、凹凸側面の乗り上がりによる相対移動から、何らかの形で凹凸を破壊しながら滑り変位が大きくなる相対移動に移行したことがわかる。

一方、6-1 試験体 ( $\delta_H < 1.05\text{mm}$  に限定) を除く磨き鋼板押し付けとささら刷毛引きによる試験体 (4-1, 5-1, 5-2, 8-1, 9-1 の各試験体) では、微小変形時のごく初期の段階から $\delta_V$ は $\delta_H$ を下回っている。そして $\delta_H$ がほぼ0.5mm時点での $\delta_V$ は、山形鋼板押し付けによる試験体のそののほぼ半分になっている。

ささら刷毛引き試験体の接合面粗さは不規則な形状であるが、わずかな滑り変位によって細かい凹凸が消失し、目開き変位により大きな影響を与える凹凸が生じる可能性がある。そこで、この影響の大きい凹凸を抽出すべく、粗さの測定結果をフーリエ変換する。そして、フーリエスペクトルの大きい正弦波 (または余弦波) を各測線につき上位3波抽出し (以下「卓越波」



図一四  $\delta_V - \delta_H$  関係図

と呼ぶ)、表一七に示す。卓越波の側面に沿って試験体が乗り上がるならば、卓越波の傾斜 (表一七欄外) と試験体のせん断力荷重初期の $\delta_H$ に対する $\delta_V$ の比がほぼ等しくなるはずである。

ささら刷毛引き試験体では、 $\delta_H$ に対する $\delta_V$ の比に対して卓越波の傾斜は小さい。卓越波の傾斜は最大でも $\delta_H$ に対する $\delta_V$ の比の1/6程度となり、卓越波の側面に乗り上がる様な挙動が生じたとは判断できない。磨き鋼板押し付け試験体に関しても、一部を除き傾斜と $\delta_H$ に対する $\delta_V$ の比には大きな差が生じている。

以上より、試験体の目開き変位は接合面の粗さの状態によってその挙動が大きく左右されると考えられる。そして、目開き変位の点から見ると、刷毛引き程度の接合面の粗し方と平滑な接合面はとほぼ差がないといえ、山形鋼板押し付け試験体に見られる様な接合面の凹凸側面

表-7 フーリエスペクトル卓越波と傾斜

卓越波順序		試験体名 (ささら刷毛引き試験体と磨き鋼板押し付け試験体)					
		4-1	5-1	5-2	6-1	8-1	9-1
測線 1	最大卓越波	振幅: 0.0953	振幅: 0.339	振幅: 0.589	振幅: 0.123	振幅: 0.256	振幅: 0.00872
		波長: 56.0	波長: 93.3	波長: 140	波長: 70.0	波長: 140	波長: 4.18
	第2卓越波	傾斜: 0.00681	傾斜: 0.0145	傾斜: 0.0168	傾斜: 0.00701	傾斜: 0.00731	傾斜: 0.00835
		振幅: 0.112	振幅: 0.280	振幅: 0.239	振幅: 0.150	振幅: 0.177	振幅: 0.00863
	第3卓越波	波長: 70.0	波長: 35.0	波長: 40.0	波長: 13.3	波長: 46.7	波長: 2.35
		傾斜: 0.00641	傾斜: 0.0320	傾斜: 0.0239	傾斜: 0.0451	傾斜: 0.0152	傾斜: 0.0147
測線 2	最大卓越波	振幅: 0.0848	振幅: 0.248	振幅: 0.221	振幅: 0.0956	振幅: 0.199	振幅: 0.00858
		波長: 25.5	波長: 25.4	波長: 16.5	波長: 40.0	波長: 93.3	波長: 3.04
	第2卓越波	傾斜: 0.0133	傾斜: 0.0390	傾斜: 0.0536	傾斜: 0.00957	傾斜: 0.00852	傾斜: 0.0113
		振幅: 0.0701	振幅: 0.233	振幅: 0.245	振幅: 0.546	振幅: 0.120	振幅: 0.0114
	第3卓越波	波長: 35.0	波長: 93.1	波長: 140	波長: 140	波長: 7.75	波長: 93.3
		傾斜: 0.00801	傾斜: 0.0100	傾斜: 0.00699	傾斜: 0.0156	傾斜: 0.0621	傾斜: 0.000490
せん断力載荷 最初変位	最大卓越波	振幅: 0.0944	振幅: 0.314	振幅: 0.331	振幅: 0.269	振幅: 0.0826	振幅: 0.00856
		波長: 93.3	波長: 93.1	波長: 56.0	波長: 93.3	波長: 9.00	波長: 140
	第2卓越波	傾斜: 0.00405	傾斜: 0.0135	傾斜: 0.0237	傾斜: 0.0115	傾斜: 0.0367	傾斜: 0.000240
		振幅: 0.0482	振幅: 0.230	振幅: 0.149	振幅: 0.345	振幅: 0.120	振幅: 0.00664
	第3卓越波	波長: 93.3	波長: 46.6	波長: 21.5	波長: 70.0	波長: 17.4	波長: 23.3
		傾斜: 0.00207	傾斜: 0.0198	傾斜: 0.0276	傾斜: 0.0197	傾斜: 0.0276	傾斜: 0.00114
せん断力載荷 最初変位		$\delta_H=0.032\text{mm}$	$\delta_H=0.016\text{mm}$	$\delta_H=0.013\text{mm}$	$\delta_H=0.011\text{mm}$	$\delta_H=0.027\text{mm}$	$\delta_H=0.614\text{mm}$
		$\delta_V=0.019\text{mm}$	$\delta_V=0.004\text{mm}$	$\delta_V=0.014\text{mm}$	$\delta_V=0.026\text{mm}$	$\delta_V=0.002\text{mm}$	$\delta_V=0.508\text{mm}$
		$\delta_V/\delta_H=0.59$	$\delta_V/\delta_H=0.25$	$\delta_V/\delta_H=1.1$	$\delta_V/\delta_H=2.4$	$\delta_V/\delta_H=0.074$	$\delta_V/\delta_H=0.83$

卓越波の振幅および波長の単位はmm。傾斜は無名数。

(卓越波の傾斜) = (卓越波振幅の4倍) / (卓越波波長)

の乗り上がりは生じなかったと判断される。

1-1 試験体と6-1 試験体の  $\delta_H$  と  $\delta_V$  の関係が他の試験体と異なる原因は不明である。

### 5. 結論

本研究で下記の知見を得た。

- 1) 接合面粗さ評価値と接合面コンクリート強度による載荷せん断力の推定の範囲の限界については、相関係数  $r=0.7$  程度以上を有意とすると、 $\delta_H=1.5\text{mm}$  程度までと判断される。
- 2) 試験体の目開き変位は、接合面の粗さの状態によってその挙動が大きく左右されると考えられる。目開き変位の観点から考えると、刷毛引き程度の接合面の粗し方と平滑な接合面とはほぼ差がないといえ、あわせてその両者と山形鋼板押し付け試験体では異なる挙動を示すことがわかった。

謝辞: 本研究は、文部省科学研究費補助金、東京工業大学建築物理研究センター全国共同研究、東京工業大学応用セラミックス研究所リーダーシップ支援経費の援助を受けました。

### 参考文献

- 1) 香取慶一, 林 静雄 他: コンクリート打継ぎ面に直交する鉄筋

- の挙動と打継ぎ面粗さの関係に関する研究: コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1263-1268, 1997
- 2) ISO/DIS 13565-2 "Characterization of surface having stratified functional properties, Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve", International Organization for Standardization, 1994.2
  - 3) 麻田 宏, 小原嗣朗: 金属材料表面工学, コロナ社, 1968.12

注: 負荷値 ( $R_k$ )

図-A 1 の様に、粗さ曲線に最小自乗法で求めた基準線と平行な直線を引く、これによって区切られた実質部分の長さの合計  $\Sigma s$  の、測定長さ  $L$  に対する比を図示したものを負荷曲線という。この負荷曲線に、曲線上に40%含まれる様に、かつ勾配が最小になる様な割線を引く。割線が  $\Sigma s/L=0\%$ 、100%の位置に引いた縦軸と交った位置の値を  $R_1$  および  $R_2$  とすると、 $R_1$  と  $R_2$  の差が負荷値  $R_k$  となる。

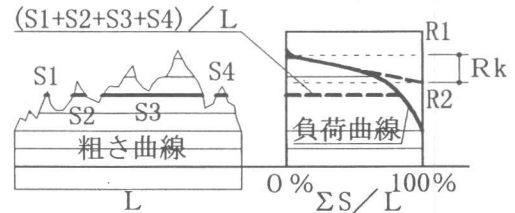


図-A 1 負荷値の求め方