

論文 コンクリート打継面における表面粗さの評価とせん断伝達に関する実験的研究

牛垣 和正^{*1}・香取 慶一^{*2}・林 静雄^{*3}

要旨：本研究は、コンクリート打継面のせん断抵抗機構として考えられる、外部圧縮力による摩擦効果(以後“アクティブ摩擦”と呼称)と鉄筋応力による摩擦効果(“パッシブ摩擦”と呼称)を明確にすることを目的に行った。まず、コンクリートの表面粗さをレーザー式変位計で測定し、十点平均粗さ、自乗平均粗さ、中心線平均粗さ、負荷値などの評価方法を用いて表面粗さの数値化を試みた。次に、評価をした上でせん断実験を行った。また、既往の実験データの再検討もを行い、アクティブ・パッシブ摩擦効果について考察した。
キーワード：プレキャスト、摩擦効果、表面粗さ、接合筋、コンクリート付着力

1. はじめに

建設工事の工期短縮や現場労務の省力化、単純化、高品質化をねらいに在来現場打ち工法からプレキャスト工法への移行が盛んに行われている。これらはこの工法の長所でもあるが同時に、この工法では部材間に接合部という力学的に不連続な部分を生じてしまう短所が付随する。水平・鉛直接合部のせん断抵抗機構は、せん断力を負担するメカニズムが定性的には把握されており、種々の耐力式が提案されているが、それらの各耐力式の評価方法がそれぞれ異なっているので定量的な評価には至っていない。本研究は、せん断抵抗機構のうち接合面の摩擦効果に着目し、内力としての鉄筋応力による摩擦効果(パッシブ摩擦)を明確にする事を目的として、新たな知見を加えた表面粗さの数値化と、打継面に接合筋を有するせん断実験を行った。また、アクティブ摩擦に関する既往の実験データの再検討もを行い、打継面における摩擦効果について種々の検討を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体一覧を表1に、試験体形状・配筋図の一例を図1に示す。実験のパラメーターは、打継面の粗さと接合筋の本数、及び接合筋が存在する場合の緩衝材の有無の3つとした。また、実験データのばらつきを考慮して同じパラメーターの組み合わせのものを各々3体ずつ、総計33体製作した。試験体はコンクリート先打ち部分と後打ち部分からなっており、後打ち部分を破線で示した。試験体スタブ部分の主筋及び補強筋と打継面を介する接合筋にはSD295のD10を用い、接合筋には接合面から±1.5Dと±3Dの位置の裏表に歪

表1 試験体一覧

試験体番号	接合面処理方法	接合筋本数	緩衝材の有無	
NO. 1, 2, 3	鉄板あらし	3本	無	
NO. 4, 5, 6			有	
NO. 7, 8, 9			無	
NO. 10, 11, 12			有	
NO. 13, 14, 15	鉄の型枠	2本	無	
NO. 16, 17, 18			有	
NO. 19, 20, 21			無	
NO. 22, 23, 24	刷毛引き		有	
NO. 25, 26, 27	鉄板あらし	0本	無	
NO. 28, 29, 30				鉄の型枠
NO. 31, 32, 33				刷毛引き

*1 (株)エヌ・ティ・ティ ファシリティーズ、工修(正会員)

*2 東京工業大学助手 工業材料研究所、工修(正会員)

*3 東京工業大学教授 工業材料研究所、工博(正会員)

みゲージを貼付した。また、接合筋両端に厚さ 6mm の鉄板を溶接して十分な定着の確保に努めた。緩衝材には粘土を使用し、実験で変形が進行した時、接合筋降伏以前にダボの効果が作用しない程度の厚さ(約 1cm)に粘土を巻いた(図 1 斜線部分)。

2. 2 使用材料

コンクリートの材料特性を表 2 に示す。コンクリートの配合は、W/C=65%、 $F_c=20.6(\text{MPa})$ とした。また、コンクリート圧縮強度は先打ち、後打ち圧縮強度を平均したものを代表値としたが、差が大きい場合は小さい方を代表値とした。また、鉄筋の材料特性は、降伏強度 361.0(MPa)、ヤング係数 $1.82 \times 10^5(\text{MPa})$ である。

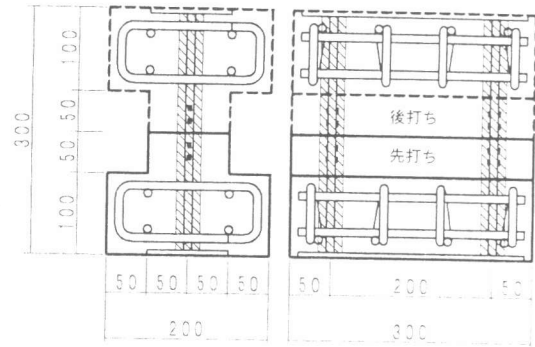


図 1 試験体形状・配筋図

表 2 コンクリート材料特性

試験体番号	先打ちコンクリート		後打ちコンクリート		平均圧縮強度 (MPa)
	材齢 (日)	圧縮強度 (MPa)	材齢 (日)	圧縮強度 (MPa)	
NO. 1~3	65	28.9	31	22.3	22.3
NO. 4~6	31	22.3	23	20.8	21.6
NO. 7~9, 13~15	56	22.7	50	22.2	22.5
NO. 10~12, 16~18	44	25.4	39	21.2	21.2
NO. 19~24	32	22.6	28	25.3	22.6
NO. 25~27	30	23.9	27	27.2	23.9
NO. 28~33	30	23.6	26	20.8	20.8

2. 3 粗さ測定及び評価方法

先打ち試験体(プレキャスト部分)には、コンクリート打設 1 時間後に粗さを施し、打設 3 日後にレーザー式粗さ測定器で、図 2 に示すように試験体両端 10mm ずつ除いた接合面上 280mm を 2 ライン走らせ、0.1mm ピッチで 2800 点の粗さデータを測定した。得られた粗さデータを解析して、十点平均粗さ(Rz)、自乗平均粗さ(Hrms)、中心線平均粗さ(Have)、負荷値(Rk)の 4 つの評価方法で数値化を行い、2 ラインの平均を評価値とした(4 つの評価方法の具体的な説明は文献 [1] 参照)。また、極めて小さい範囲における一部分の大きな凹凸が、評価値に影響を及ぼす場合があり、そうした部分を取り除くことによって、接合面の粗さを更に忠実に評価できるのではないかと考え、4 つの評価方法に修正を加えた。修正の方法は、図 2 に示すように接合面上の 1 ライン毎に 13 区間に分割し、各区間毎に各々の評価値を求め、大小 3 個の値を除いた 7 個の値を平均し、更に 2 ラインの平均を求め修正評価値とした。

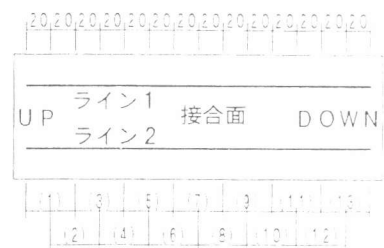


図 2 測定ライン(13分割)

2. 4 加力方法

加力装置を図 3 に示す。逆対称一方単調載加(S 型加力)とし、加力フレーム両側部分に平行クランクを取り付けることで、打継面に純せん断力がかかるようにした。加力には、容量 1471(KN)のコンピュータ計測制御式精密万能試験機を使用した。

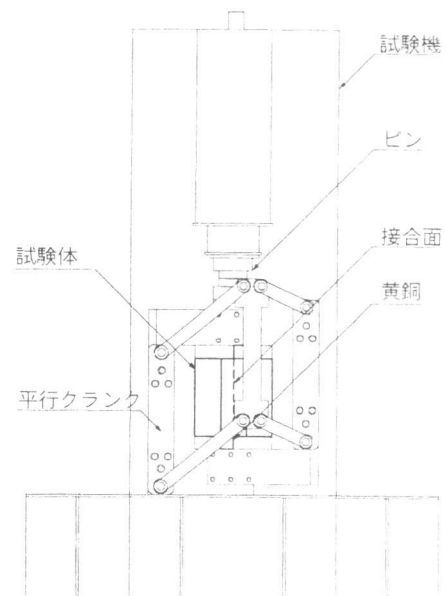


図 3 加力装置

3. 実験結果及び考察

3.1 粗さ評価値出力結果

3種類の接合面処理方法による代表的な粗さ曲線、負荷曲線を図4、5に示し、実験結果一覧を表3に示す。但し、検討の際には、楨谷等の実験データ [1] も用いた。自乗平均粗さと中心線平均粗さの相関係数が 0.996 と限りなく 1 に近く、 $H_{rms} \div 1.29H_{ave}$ という関係が得られ、ほぼ同じ評価方法である事が分かった。負荷値と十点平均粗さの相関係数は 0.821 と低い値を示したが、自乗平均粗さや中心線平均粗さとは 0.951、0.970 と高い値を示したことから、負荷値は十点平均粗さとは全く別の評価方法であり、自乗平均粗さや中心線平均粗さに近い評価方法である事が分かった。また、評価値の修正によって粗さ曲線の山の高さの影響が大きい十点平均粗さと負荷値において、(評価値)/(修正評価値) >1 となる試験体が多数見られた。

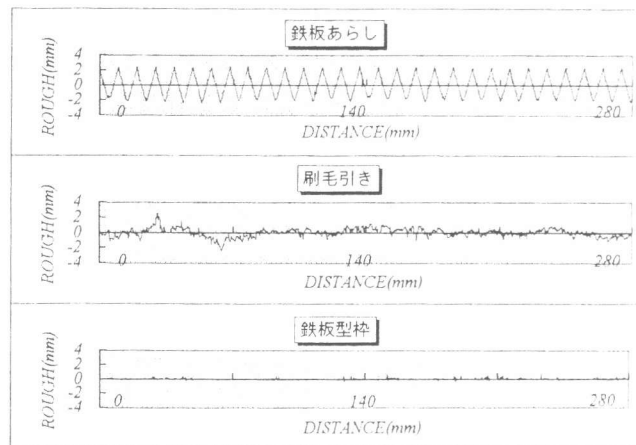


図4 粗さ曲線

3.2 破壊状況

破壊形式には大きく分けて3タイプ確認された。1つ目は、接合面で滑って破壊に至る接合面滑り破壊でほとんどの試験体がこの破壊形式となった。

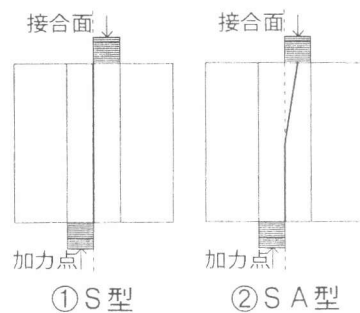


図6 破壊形式

2つ目は、接合面を介して斜めに入ったひび割れと接合面での滑りが合わさって破壊に至る滑りせん断破壊 (NO.2, 11, 12)、3つ目は、接合面以外での破壊 (NO.23, 27)である。1つ目と2つ目の破壊形式を図6に示す。また、緩衝材を有する試験体のNO.6は接合筋の定着プレートへの溶接が切れていたため、加力してすぐに破壊に至った。

3.3 変形状

図7に NO.9, 10, 13, 17, 19, 24 の荷重-滑り

($Q-\delta_{II}$)関係を示す。接合筋の無い試験体では接合面でのコンクリートの付着が切れ、滑り始めたと同時に脆性的に破壊に至る傾向が見られた。それに比べて接合筋を有する試験体では、緩衝材の有無にかかわらず、コンクリートの付着がぎれて滑り始めても耐力が上昇する傾向が見られ、ほと

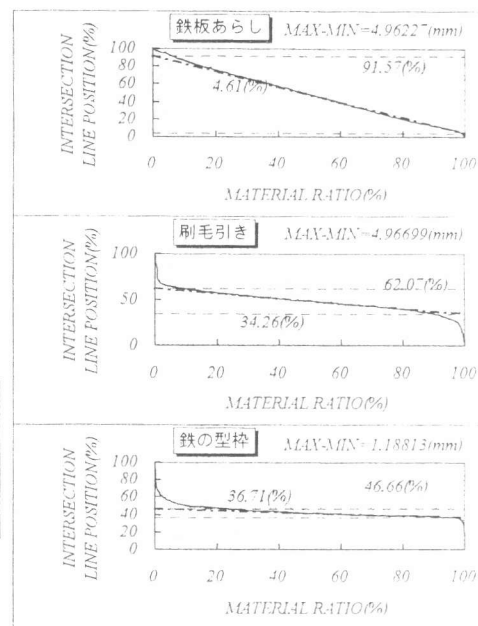


図5 負荷曲線

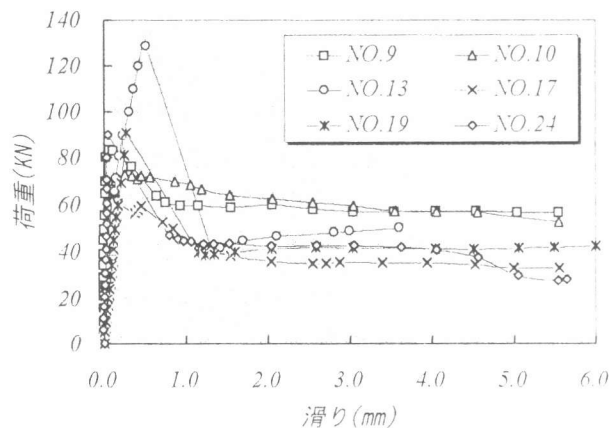


図7 荷重-滑り 関係

んどの試験体で、滑り変形(δ_H)が 0.3~1.0(mm)で最大耐力に達した。例外として試験体 NO.9,15,18,20,21,24 は、コンクリートの付着が切れたと同時に最大耐力に達した。最大耐力以降の変形状について、緩衝材のある試験体と無い試験体とでは 3mm 程度の変形までは有意な差は見られなかったが、粗さ処理方法による有意な差が見られた。型枠処理の鉄板あらしの試験体は、鉄の型枠や刷毛引きの試験体より、数 mm 滑った時の耐力が大きい値を示し、それは粗さの山と山の引っ掛かりによって生じたものと考えられる。

3. 4 接合筋の軸方向拘束力

表 3 実験結果一覧

今回の実験では、緩衝材を巻くことによりダボの効果を取り除いたが、緩衝材を巻かない、ダボが存在するはずの試験体でも、歪みゲージ養生の為に養生テープ及びビニールテープを使用した事によって、変形の小さい最大耐力時には、鉄筋の歪みデータから判断して、ダボの効果が確認されなかった。従って、最大耐力時には緩衝材の有無に関係なく、接合筋には軸方向拘束力だけが作用していると考えられる。また、接合筋の軸方向引張力において、緩衝材を巻かない試験体が、緩衝材を巻いた試験体を上回る傾向が見られた。その原因として、接合筋の定着長さが関係していると考えられる。即ち、緩衝材を巻いた試験体は接合筋全長にわたって緩衝材を巻いたので、定着は端部に溶接したプレートのみで確保しており、接合筋は端部のプレート間距離 30(cm)で引張力を受け、歪みが生じている。それに対して、緩衝材の無い試験体は、同様に接合筋の端部をプレートに溶接してあるが、両端部から約 10(cm)の区間は鉄筋とコンクリートとの間に付着があり、十分な定着が確保され、中心区間約 10(cm)で引張力を受け、歪みが生じている。従って、上記の様な傾向が生じたものと考えられる(図 8 参照)。この軸方向拘束力が接合面の表面粗さとどのような関係にあるのか明確にするために、各評価値における最大耐力時の軸方向拘束力(ΣN)を比較した。どの評価方法においても、評価値の増加により ΣN が増加する傾向が確認されたが、回帰式の当てはまりの指標となる R2 値が小さく、ばらつきが大きかった。その中では十点平均粗さにおける回帰式の R2 値が最も大きな値を示したので $\Sigma N - Rz$ 関係を

試験体 番号	評価値				修正評価値				実験結果			
	Rz (mm)	Hrms (mm)	Have (mm)	Rk (mm)	Rz' (mm)	Hrms' (mm)	Have' (mm)	Rk' (mm)	Qmax (KN)	τ max (MPa)	τ max/ σ_B	破壊 形式
NO. 1	4.512	1.030	0.876	3.219	3.935	1.056	0.907	2.940	90.03	3.00	0.134	S
NO. 2	5.243	1.286	1.111	3.986	4.393	1.289	1.118	3.494	167.11	5.57	0.250	SA
NO. 3	5.175	1.291	1.109	3.960	4.493	1.251	1.081	3.637	169.56	5.65	0.253	S
NO. 4	4.699	1.294	1.126	3.978	4.434	1.296	1.128	3.881	68.55	2.28	0.106	S
NO. 5	5.877	1.245	1.037	3.646	4.158	1.223	1.037	3.081	42.17	1.41	0.065	S
NO. 6	4.865	1.246	1.063	3.895	4.519	1.257	1.067	3.580	32.36	1.08	0.050	S
NO. 7	4.863	1.285	1.108	4.136	4.580	1.305	1.131	3.978	94.44	3.15	0.140	S
NO. 8	5.002	1.286	1.110	4.055	4.648	1.294	1.121	3.837	120.92	4.03	0.179	S
NO. 9	4.866	1.339	1.159	4.385	4.615	1.338	1.158	4.216	83.55	2.79	0.124	S
NO. 10	4.789	1.294	1.124	4.072	4.490	1.291	1.123	3.888	72.77	2.43	0.114	S
NO. 11	5.664	1.449	1.211	3.213	5.337	1.448	1.205	2.894	90.61	3.02	0.142	SA
NO. 12	4.829	1.259	1.089	3.852	4.432	1.248	1.082	3.555	119.05	3.97	0.187	SA
NO. 13	1.426	0.198	0.156	0.404	0.660	0.167	0.139	0.198	128.66	4.29	0.191	S
NO. 14	3.060	0.424	0.270	0.615	1.339	0.315	0.242	0.296	138.96	4.63	0.206	S
NO. 15	2.166	0.254	0.163	0.351	1.005	0.190	0.144	0.253	81.69	2.72	0.121	S
NO. 16	2.037	0.198	0.107	0.220	0.540	0.120	0.096	0.095	53.35	1.78	0.084	S
NO. 17	0.831	0.081	0.056	0.134	0.418	0.073	0.056	0.064	60.41	2.01	0.095	S
NO. 18	0.922	0.126	0.087	0.140	0.507	0.102	0.080	0.060	30.60	1.02	0.048	S
NO. 19	3.001	0.496	0.395	1.257	1.954	0.479	0.387	1.032	90.61	3.02	0.134	S
NO. 20	3.942	0.671	0.524	1.633	2.457	0.640	0.518	1.206	62.76	2.09	0.093	S
NO. 21	3.492	0.629	0.502	1.635	2.170	0.594	0.484	1.099	70.41	2.35	0.104	S
NO. 22	4.321	0.655	0.519	1.664	2.156	0.609	0.498	1.136	119.54	3.98	0.176	S
NO. 23	3.392	0.549	0.433	1.326	1.904	0.536	0.429	0.908	72.28	2.41	0.107	A
NO. 24	2.979	0.464	0.363	1.124	2.004	0.453	0.363	0.947	89.83	2.99	0.133	S
NO. 25	4.749	1.286	1.121	3.755	4.427	1.282	1.119	3.567	98.85	3.30	0.138	S
NO. 26	4.571	1.269	1.108	3.617	4.332	1.274	1.112	3.473	78.55	2.62	0.109	S
NO. 27	4.629	1.233	1.074	3.465	4.213	1.233	1.073	3.300	60.11	2.00	0.084	C
NO. 28	0.862	0.127	0.097	0.261	0.525	0.117	0.095	0.202	75.61	2.52	0.121	S
NO. 29	1.051	0.138	0.107	0.305	0.486	0.117	0.102	0.131	53.15	1.77	0.085	S
NO. 30	0.935	0.126	0.095	0.280	0.557	0.114	0.088	0.157	60.41	2.01	0.097	S
NO. 31	3.396	0.612	0.492	1.624	2.317	0.605	0.484	1.199	89.44	2.98	0.143	S
NO. 32	3.707	0.633	0.510	1.621	2.266	0.630	0.521	1.248	38.74	1.29	0.062	S
NO. 33	2.953	0.529	0.428	1.396	2.107	0.515	0.418	1.106	79.63	2.65	0.127	S

Rz:十点平均 Hrms:自乗平均 Have:中心線平均 Rk:負荷値 *が付いたものは修正評価値
S:接合面滑り破壊 SA:接合面滑りせん断破壊 A:せん断破壊 C:スタブ破壊

図8に示す。

3.5 最大耐力に関する考察

図9に最大せん断応力をコンクリート強度で無次元化した値 τ_{max}/σ_B と ΣN の関係を示す。 ΣN の増加に伴って τ_{max}/σ_B は増加する傾向が見られた。図10に各評価値を代表して十点平均粗さと τ_{max}/σ_B との関係を示す。その結果、評価値の増加に伴って τ_{max}/σ_B は増加する傾向が見られたが、かなりばらついた結果となった。図10及び後述の4.1より、接合筋の軸方向拘束力による摩擦効果(パッシブ摩擦)は、重要なせん断抵抗機構と考えられるが、緩衝材を巻く事によりせん断剛性が低くなったり、実質接合筋が歪む部分が長く軸方向拘束力が小さくなると、接合筋の無い試験体と同等の耐力を示し、コンクリート付着力のばらつきの範囲に分布すると考えられる。

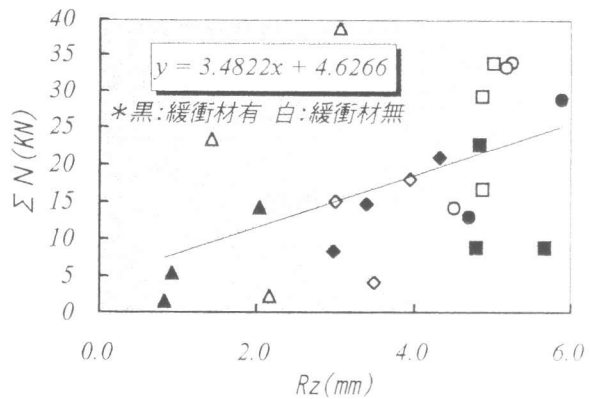


図8 $\Sigma N - Rz$ 関係

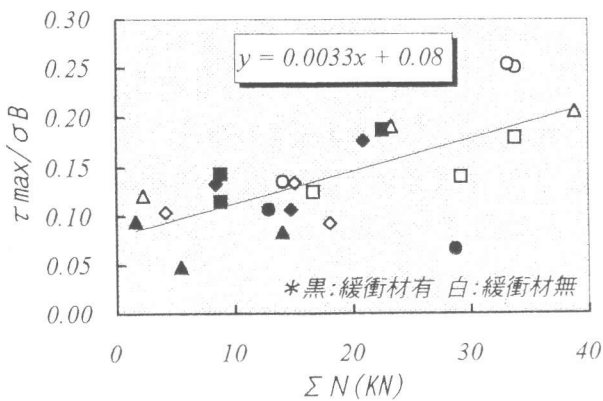


図9 $\tau_{max}/\sigma_B - \Sigma N$ 関係

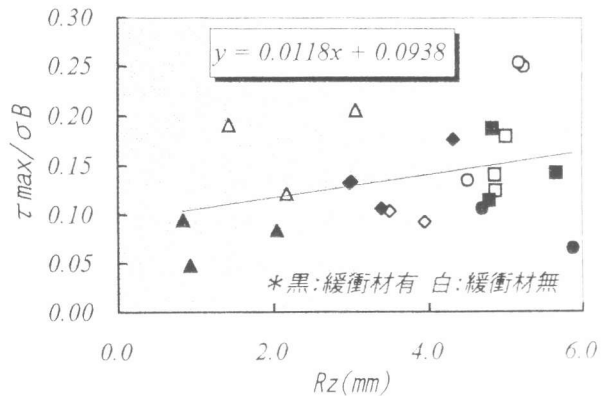


図10 $\tau_{max}/\sigma_B - Rz$ 関係(内部拘束)

4. コンクリート付着力及びアクティブ摩擦に関する考察

粗さ評価の際に新たな知見を加えて評価値を算出し直し、また接合面を13区間に分割して、修正評価値を求めた。このため τ_{max}/σ_B と、各評価値との関係に新たな結果が得られるのではないかと考え、再検討を試みた。

4.1 コンクリート付着力

コンクリートの付着力は、内部及び外部からの拘束が無い時の耐力と考える。従っ

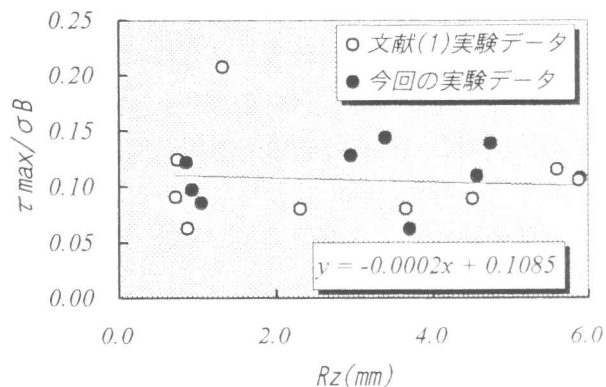


図11 $\tau_{max}/\sigma_B - Rz$ 関係(無拘束)

て、文献[1]における軸力0の試験体と、接合筋の無い試験体の各評価値(8手法)における τ_{max}/σ_B を検討した。その結果文献[1]と異なりどの評価方法においても評価値の増加による耐力の増加が見られず、内部及び外部からの拘束が無い時には、表面粗さの大きさに関係なく付着力はほぼ一定で、 $0.1\sigma_B$ 程度見込めるという結果が得られた(図11参照)。文献[1]

と異なる結果が得られた理由として、文献 [1] の実験データの中で不適切な試験体を除いた事と実験データの蓄積による母集団の増加が考えられる。但し、このことは目粗しの範囲でのことであり、シアキーなどを設けたり、接合面積が増加した場合はこの限りではない。

4.2 アクティブ摩擦

文献 [1] における軸力 1.96、3.92(Mpa)の実験データを用い、新たに数値化した 8 つの評価値と τ_{max}/σ_B との関係と比較した結果、各評価値及び軸応力の増加に伴って τ_{max}/σ_B は増加する傾向が見られた。接合面を 13 区間に分割して、粗さを更に忠実に表わそうとしたが、修正前の評価値と変わらない結果が得られた。従って、8

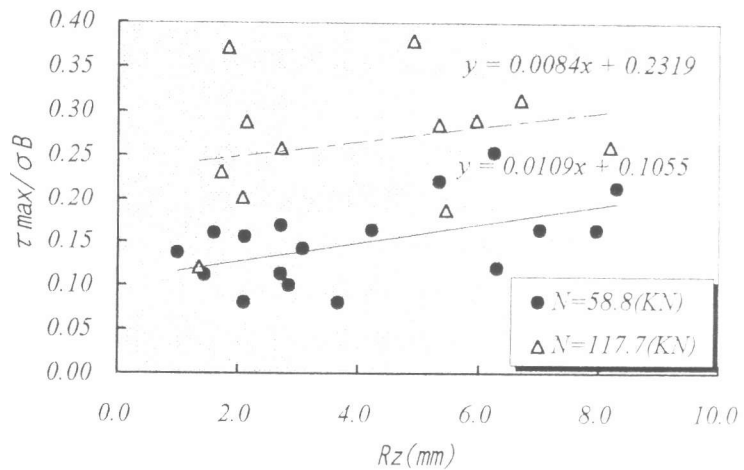


図 1.2 τ_{max}/σ_B - Rz 関係(外部拘束)

つの中で最も良い傾向を示した十点平均粗さを用いて、コンクリート強度、軸応力、粗さ評価値の関数としたせん断耐力式を求める。図 1.2 に (τ_{max}/σ_B) - Rz 関係と、最小二乗法による回帰式を示す。評価値の増加による τ_{max}/σ_B の増加は、軸応力の大きさにかかわらずほぼ一定と考え、図中の 2 式の傾きの平均値 9.65×10^{-3} を代表値とした。また、各々の切片については、軸応力 1(MPa) 当たりの切片効果が 5.38×10^{-2} 、 5.92×10^{-2} と近い値を示している事から、平均値 5.65×10^{-2} を代表値とした。以下にせん断耐力式及び適用範囲を示す。

$$\tau_{max} = \sigma_B \cdot (9.65 \times 10^{-3} \cdot Rz + 5.65 \times 10^{-2} \cdot \sigma_N)$$

$$19.6 < \sigma_B < 29.4(\text{MPa}), 1 < Rz < 8(\text{mm}), 0 < \sigma_N < 3.92(\text{MPa})$$

5. 結論

- 自乗平均粗さと中心線平均粗さは同じ評価方法であり、 τ_{max}/σ_B - 各評価値関係から評価値の修正による影響があまり見られず、そのうち十点平均粗さが良い傾向を示していた。
- 目粗しの範囲では、コンクリート付着力は接合面の表面粗さに関係なく、 $0.1 \sigma_B$ 程度である。
- 内部圧縮力、粗さ評価値の増加に伴い τ_{max}/σ_B は増加する傾向が得られたが、ばらつきが大きく定量的な評価には至らなかった。
- 外部圧縮力による摩擦効果が確認され、コンクリート強度、軸応力、粗さ評価値を考慮したせん断耐力式を求めた。

【謝辞】東工大 塚田忠夫・田中亨二・篠原保二各先生にご教示賜りました。お礼申し上げます。本研究には文部省科学研究費補助金の援助を受けております。関係各位に感謝申し上げます。

■参考文献■

- [1] 榎谷貴光・香取慶一・林静雄：コンクリート打継ぎ面における表面粗さの評価とせん断伝達能力に関する実験研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, NO.2, pp.171-176, 1995
- [2] 武井一夫：コンクリート打継ぎ面の界面粗さの評価方法、日本建築学会構造系論文集、第 455 号, PP.7-16, 1994.1
- [3] 日本建築学会：プレキャスト鉄筋コンクリート構造の設計と施工、1986