

論文 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力伝達能力に関する実験研究

楨谷貴光*¹・香取慶一*²・林静雄*³

要旨：本研究はコンクリート表面粗さ測定方法と評価方法を提案し、同時に行ったせん断実験から得られた最大耐力と、表面粗さ評価値の関係を導いた。その結果、粗さ評価値に比例して最大耐力も上昇する傾向が認められ、粗さ評価値、軸力、コンクリート強度をパラメータとして付着力、摩擦力に関する式を提案した。

キーワード：プレキャスト、表面粗さ、接合面、コンクリート付着力、摩擦力、軸力

1. はじめに

本研究はプレキャスト接合面に着目し、コンクリート表面粗さをレーザー光線式変位計で測定し、機械の分野などで製品をチェックするために使われている十点平均粗さ、自乗平均粗さ、中心線平均粗さなどで評価し、定量化（数値化）を行ったものである。さらに、プレキャストコンクリート打継ぎ面のせん断実験を行って、コンクリート表面粗さに関するそれぞれの評価法と、軸力の大きさおよびせん断力伝達能力の相互関係について調べ、構造設計に用いるべき表面粗さの評価法の妥当性について考察したものである。

2. 実験概要

2.1 使用コンクリート

コンクリートの材料特性を表1に示す。コンクリートの配合は、W/C=65%、F_c=210(kgf/cm²)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、先打ち、後打ちの差が大きい場合は小さい方の値を代表値とした。

試験体NO.	先打ちコンクリート		後打ちコンクリート		平均圧縮強度(kgf/cm ²)
	材齢(日)	圧縮強度(kgf/cm ²)	材齢(日)	圧縮強度(kgf/cm ²)	
NO. 1~5	81	313	36	206	206
NO. 6~11	52	228	29	232	230
NO. 12~17	46	235	39	192	192
NO. 18~23	35	314	29	291	303
NO. 24~29	27	330	23	289	289
NO. 30~35	45	312	41	336	324
NO. 36~41	39	273	35	255	264

表1 コンクリート材料特性

試験体NO.	十点平均(mm)	自乗平均(mm)	中心線平均(mm)	負荷曲線(mm)	接合面処理方法	せん断耐力(t f)	せん断応力(kgf/cm ²)	破壊形式
1	0.89	0.26	0.15	0.25	杉の型枠	0.00	0.0	SL
2	3.75	0.75	0.59	1.76	鉄板あらし	5.50	18.3	SL
3	5.68	1.05	0.75	1.45	鉄板あらし	6.60	22.0	SL
4	0.99	0.20	0.16	0.41	ベニヤ合板型枠	0.45	1.5	SL
5	4.71	0.99	0.71	1.21	鉄板あらし	6.50	21.7	SH
6	0.90	0.13	0.10	0.29	ワイヤーブラシ	8.55	28.5	SL
7	4.13	0.79	0.62	1.94	鉄板あらし	7.91	26.4	SS
8	0.69	0.12	0.09	0.27	こて仕上げ	4.30	14.3	SL
9	0.80	0.12	0.09	0.31	杉の型枠	6.25	20.8	SL
10	1.97	0.46	0.37	0.80	ノミほり	5.51	18.4	SL
11	2.74	0.79	0.65	1.79	ノミほり	5.50	18.3	SS
12	0.88	0.16	0.12	0.41	杉の型枠	11.87	39.6	SL
13	4.28	0.98	0.73	1.78	鉄板あらし	14.50	48.3	SH
14	5.91	1.18	0.94	2.90	鉄板あらし	6.82	22.7	SH
15	1.02	0.13	0.07	0.19	鉄の型枠	7.83	26.1	SH
16	2.12	0.42	0.33	0.97	刷毛引き	6.48	21.6	SH
17	3.71	0.97	0.69	3.22	刷毛引き	12.62	42.1	SH
18	6.53	1.84	1.50	4.55	鉄板あらし	14.82	49.4	SS
19	1.76	0.57	0.48	1.56	ノミほり	9.06	30.2	SS
20	1.42	0.51	0.42	1.44	ベニヤ合板型枠	15.32	51.1	SS
21	1.55	0.28	0.23	0.72	鉄板あらし	14.53	48.4	SS
22	1.94	0.52	0.44	0.95	杉の型枠	10.08	33.6	SH
23	3.32	0.77	0.62	2.42	刷毛引き	14.83	49.4	SL
24	2.05	0.32	0.22	0.44	鉄の型枠	14.42	48.1	SS
25	5.26	1.44	1.13	1.97	鉄板あらし	15.23	50.8	SL
26	2.96	0.66	0.51	1.50	刷毛引き	7.42	24.7	SL
27	1.28	0.40	0.29	0.85	こて仕上げ	13.11	43.7	SS
28	1.60	0.29	0.20	0.57	ベニヤ合板型枠	7.42	24.7	SL
29	7.74	1.99	1.67	5.64	鉄板あらし	19.71	65.7	SS
30	6.09	1.33	1.03	1.43	鉄板あらし	28.23	94.1	SL
31	6.70	1.73	1.43	4.68	鉄板あらし	25.34	84.5	SL
32	1.06	0.21	0.12	0.28	鉄の型枠	22.43	74.8	SS
33	1.56	0.38	0.32	0.87	ワイヤーブラシ	25.17	83.9	SS
34	4.32	1.06	0.85	2.66	刷毛引き	18.26	60.9	SS
35	0.85	0.16	0.13	0.28	ベニヤ合板型枠	11.76	39.2	SL
36	1.40	0.35	0.25	0.60	こて仕上げ	15.97	53.2	SL
37	1.72	0.37	0.29	0.92	鉄の型枠	22.81	76.0	SL
38	1.12	0.28	0.20	0.38	杉の型枠	29.40	98.0	SL
39	3.56	0.71	0.53	1.81	刷毛引き	30.05	100.2	SL
40	5.41	1.20	0.99	3.36	鉄板あらし	22.60	75.3	SL
41	6.74	1.16	0.86	2.41	鉄板あらし	24.81	82.7	SL

破壊形式 SL: 接合面滑り破壊 SH: せん断破壊 SS: 接合面滑りせん断破壊

表2 試験体一覧及び結果

- * 1 東急建設（株）、工修（正会員）
- * 2 東京工業大学工業材料研究所助手、工修（正会員）
- * 3 東京工業大学工業材料研究所教授、工博（正会員）

2.2 試験体

試験体一覧を表2に示す。実験のパラメーターは、面の粗さと軸応力 ($\sigma_N = 0, 20, 40(\text{kgf/cm}^2)$) で、試験体総数は41体である。試験体断面図を図1に、試験体側面図を図2に示す。接合面積は $300(\text{cm}^2)$ ($30 \times 10(\text{cm})$) である。なお、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。試験体スタブ部に配筋された鉄筋はSD295のD6で、主筋は4本、補強筋は4本となっている。

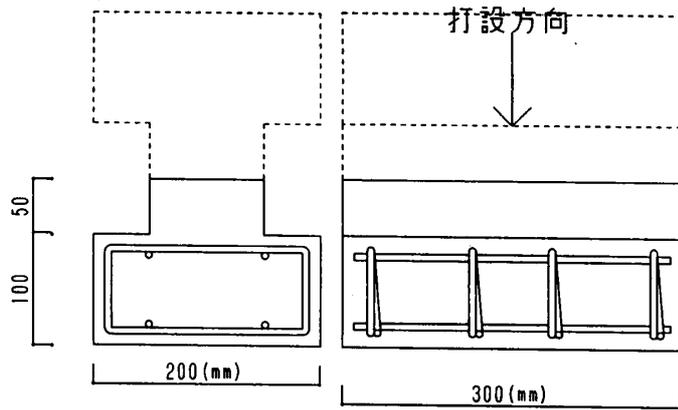


図1 試験体断面

図2 試験体側面

2.3 粗さ測定方法

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た。コンクリート打設3日後に、レーザー式粗さ測定器で、図3、図4に示すように試験体両端1cmずつ除いた接合面上中心28cmを走らせ、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、中心線平均粗さ、自乗平均粗さ、負荷曲線の4つの評価方法でそれぞれ数値化した。4つの評価方法の具体的な説明を以下に示す。[1]

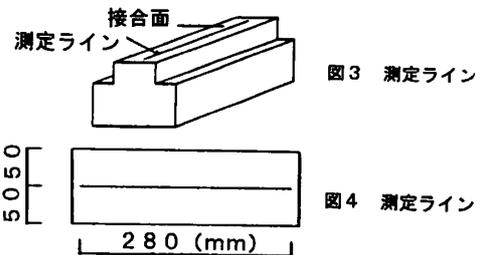


図3 測定ライン

図4 測定ライン

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た。コンクリート打設3日後に、レーザー式粗さ測定器で、図3、図4に示すように試験体両端1cmずつ除いた接合面上中心28cmを走らせ、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、中心線平均粗さ、自乗平均粗さ、負荷曲線の4つの評価方法でそれぞれ数値化した。4つの評価方法の具体的な説明を以下に示す。[1]

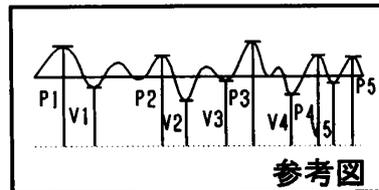
(1) 十点平均粗さ R_z

粗さ曲線に最小二乗法で求めた直線（平行線）から一番大きい山から5番目までの山の頂上の標高の平均と、一番小さい谷から5番目までの谷の底の標高の平均値の差で表面粗さの値を求める。

$$R_z = 1/5 \sum P_i - 1/5 \sum V_i \quad (\text{mm})$$

P_i : 粗さ曲線の平行線から山までの高さ

V_i : 平行線から谷までの高さ



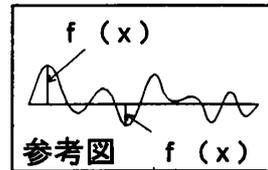
(2) 自乗平均粗さ H_{rms}

粗さ曲線の平均的な方向に最小二乗法で求めた直線を平行移動し、直線と粗さ曲線に挟まれる部分の面積が、直線の上側と下側で等しくなるように中心線を決める。中心線から曲線までの高さを $f(x)$ とすると、 $f(x)$ を二乗した総和を測定点数で除し、それを平方したもので求める。

$$H_{rms} = \sqrt{\int (f(x))^2 dx / L} \quad (\text{mm})$$

L : 測定点数 (= 2800)

$f(x)$: 中心線から粗さ曲線までの高さ



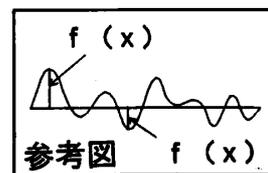
(3) 中心線平均粗さ H_{ave}

中心線から粗さ曲線までの高さを $f(x)$ とすると、 $f(x)$ の絶対値の総和を測定点数で除したもので求める。(図6)

$$H_{ave} = \int |f(x)| dx / L \quad (\text{mm})$$

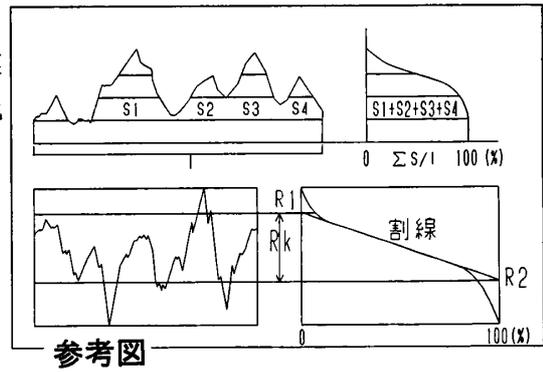
L : 測定点数 (= 2800)

$f(x)$: 中心線から粗さ曲線までの高さ



(4) 負荷値 R_k

粗さ曲線に平行線を引き、これによって区切られた実質部分の長さの合計 Σs の、全体の長さ l に対する比を図示したものが負荷曲線である。この負荷曲線に、曲線上に40%含まれるように、また勾配が最小になるように割線を引く。割線が、Material Ratio縦軸の0、100%と交わった点を、 R_1 、 R_2 とすると負荷値は、 R_1 と R_2 の差で求められる。



2. 4 載荷方法

載荷装置を図5に示す。逆対称一方単調載荷（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、接合面に純せん断力がかかるようにした。加力（せん断力）には、300(ton)アムスラーを用いた。試験体NO. 12~41は、20(ton)オイルジャッキによって軸力をかけ加力点、支点はピンとした。

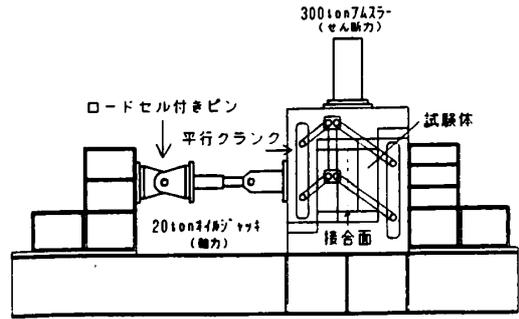


図5 載荷装置

3. 実験結果及び考察

3. 1 粗さ評価値出力結果

代表的な粗さ曲線、負荷曲線を図6、7に示す。粗さ曲線から粗さ評価値の大小はだいたい判別することができるが、負荷値に限ってはその通りではない。

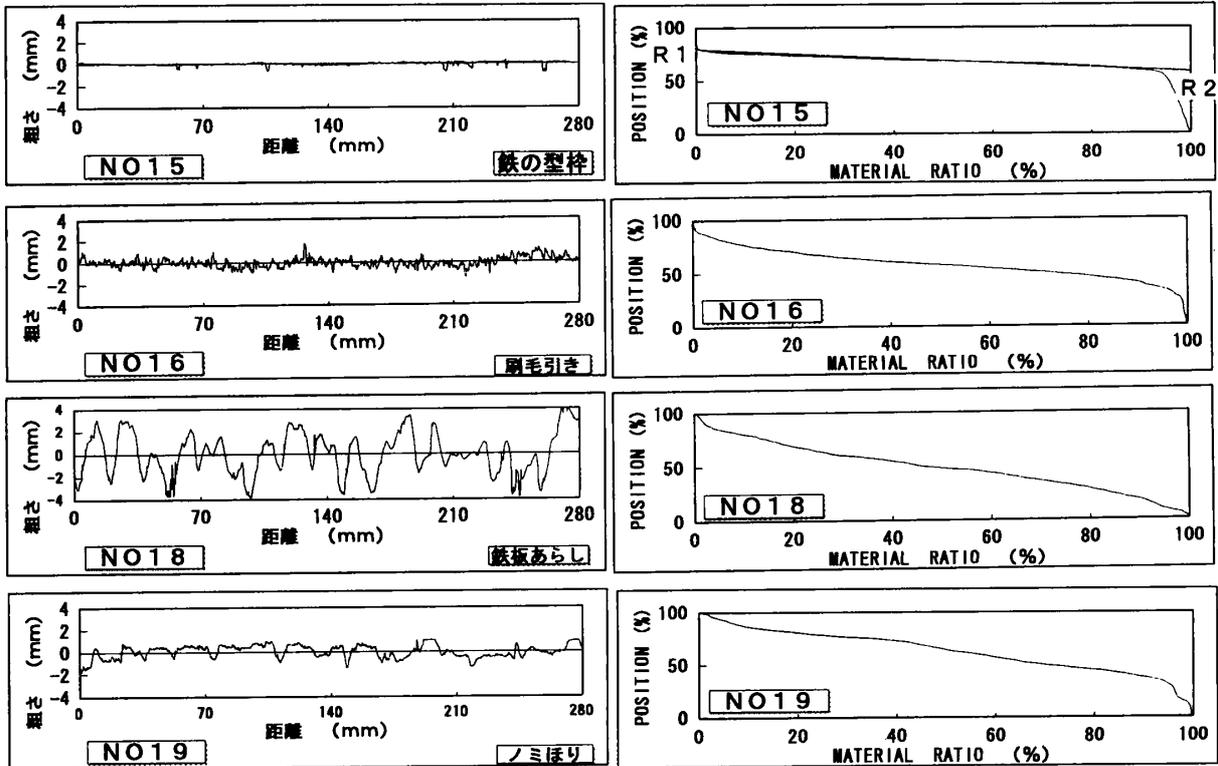


図6 粗さ曲線

図7 負荷曲線

3. 2 破壊状況

大きく分けて3つの破壊形式がある。図に示すように1つは、接合面での滑り破壊（図8）、1つは接合面を界して斜めに入ったひび割れが卓越して破壊に至るせん断破壊（図9）、1つは斜めに入ったひび割れと接合面の滑りが合わさって破壊に至る滑りせん断破壊（図10）である。最も多い破壊形式は滑り破壊であり、粗さ評価値の小さい試験体がほとんどの破壊形式であった。粗さ評価値の大きい試験体の多くは、せん断破壊か、滑りせん断破壊であった。

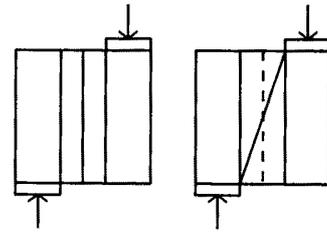


図8 滑り破壊 図9 せん断破壊

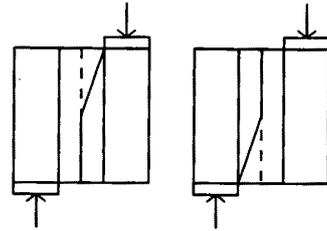


図10 滑りせん断破壊

3. 3 最大耐力-粗さ評価値関係

各試験体の最大耐力と最大せん断応力度を表2に示す。各粗さ評価値- τ_{MAX}/σ_B 関係を軸力ごとに分けプロットして図11～図13に示した。どの評価方法も粗さと耐力の関係をうまく表現している。自乗平均粗さ H_{rms} と中心線平均粗さ H_{ave} は、 $H_{rms} \approx 1.25 H_{ave}$ の関係がありプロット形状がほとんど変わらない。十点平均、負荷曲線は何点か例外はあるものの右上がりのプロット形状になっている。

3. 4 粗さ評価値相関関係

粗さ相関関係図を図14に示す。十点平均は、自乗平均、中心線平均との相関係数が0.96、0.95と大きな値を示しているが、負荷曲線とは0.85と小さな値となっており、負荷曲線とは別の評価方法とみなすことができる。自乗平均と中心線平均は $H_{rms} \approx 1.25 H_{ave}$ の関係があることもあり、相関係数がほぼ1に等しく、粗さ評価方法としてはどちらか一方を採用すれば十分で、2つの評価方法を別々に考えることは意味がない。負荷曲線と、自乗平均、中心線平均は相関係数が0.91、0.92と同一評価方法とするには少し小さい値であり、本研究では負荷曲線は独立した一つの評価方法と考える。今回は4つの評価方法を提案したが、自乗平均と中心線平均はほぼ同一の評価方法として考えることができ、全体として3つの評価方法を採用すれば十分であった。

3. 5 コンクリート付着力

コンクリート付着力は接合面処理方法によって大きく変わるが、型枠処理や無処理のものでも10(kg/cm²)ぐらいは期待できそうである。表面をあらく仕上げた場合には20(kg/cm²)以上を予想しても差し支えないものとする。また、コンクリート付着力は実際の接合面積をパラメータの1つとして考えることができ、すなわち表面粗さが付着力を決定する最重要因子だと考える。

3. 6 コンクリート付着力、摩擦力に関する考察

4つの評価方法で一番相関係数の高かった十点平均を用いて、コンクリート付着応力、摩擦応力を表面粗さ評価値、軸応力、コンクリート強度の関数として一元的に評価する。軸応力=0(kgf/cm²)の時の最大耐力をコンクリートの最大付着力だと考え、最小二乗法で十点平均粗さ評価値-最大付着応力直線を求める。

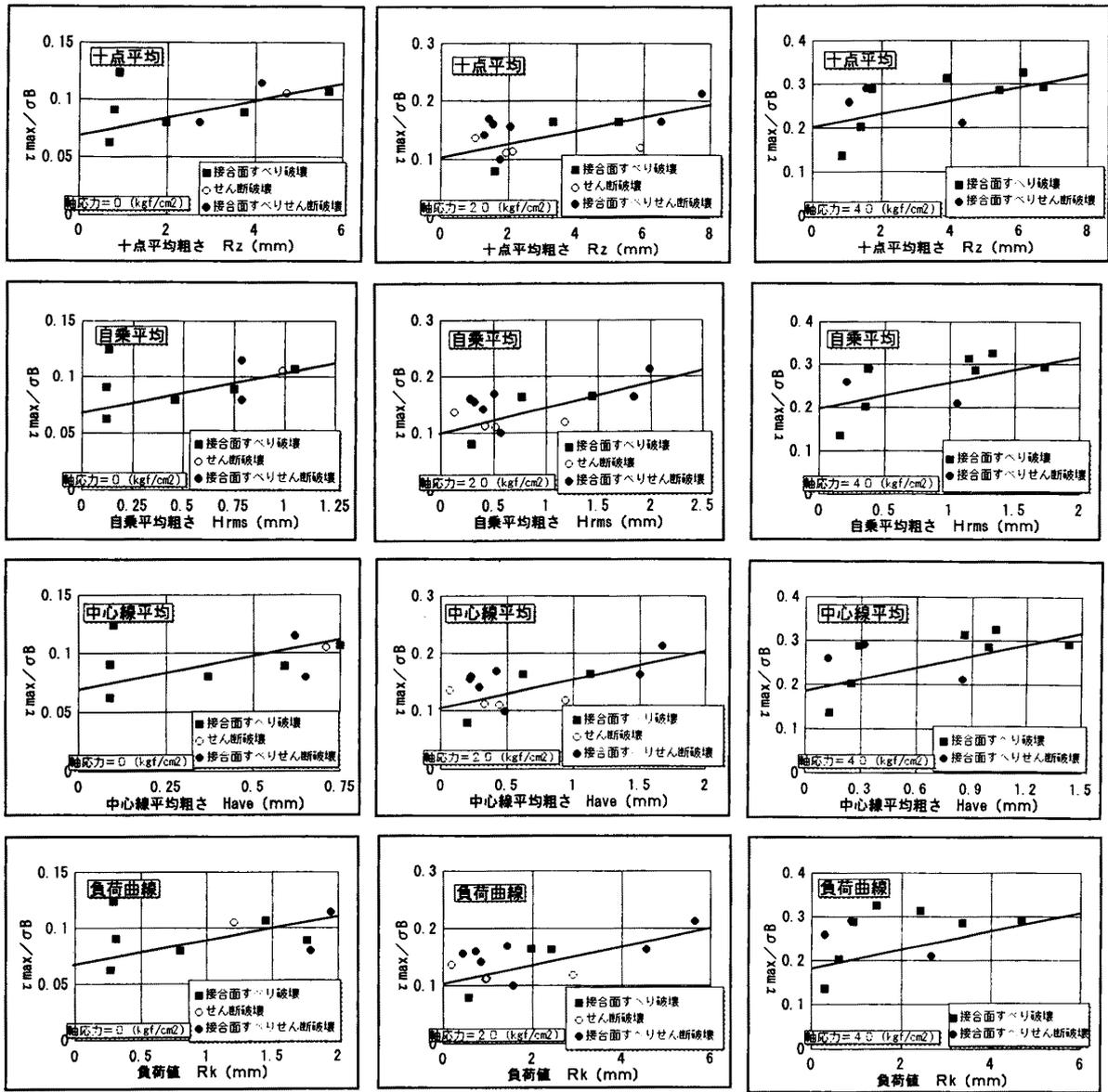


図 1 1 N=0(kgf/cm²)

図 1 2 N=20(kgf/cm²)

図 1 3 N=40(kgf/cm²)

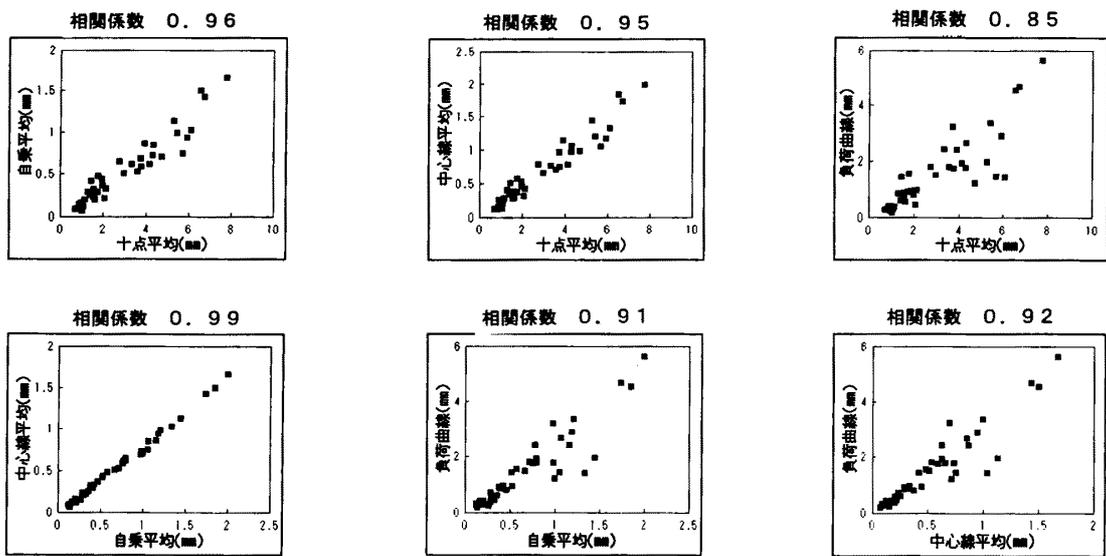


図 1 4 粗さ相関関係

$$\tau_1 = \sigma_B (0.004R_z + 0.0835) \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad \dots (1)$$

τ_1 : コンクリート最大付着応力 (kgf/cm²)

σ_B : コンクリート平均圧縮強度 (kgf/cm²)

R_z : 十点粗さ評価値 (mm)

十点平均粗さ評価値 R_z -軸応力 $\sigma_N = 20(\text{kgf/cm}^2)$ 、 $\sigma_N = 40(\text{kgf/cm}^2)$ 関係から、十点平均粗さ評価値-コンクリート摩擦応力直線を最小二乗法で求める。

$$\tau_2 = \sigma_B (0.0096R_z + 0.0063\sigma_N) \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad \dots (2)$$

τ_2 : コンクリート最大摩擦応力 (kgf/cm²)

また従来までの摩擦係数とは異なり、コンクリート表面粗さによって変化する係数 μ' は以下の式で表される。

$$\mu' = \text{最大せん断応力度 (最大摩擦応力)} / \text{軸応力}$$

$$= \tau_2 / \sigma_N$$

$$= \sigma_B (0.0096R_z + 0.0063\sigma_N) / \sigma_N \quad \dots (3)$$

(3) 式は、ある一定の摩擦係数 ($0.0063\sigma_B$) に粗さによるコンクリートの引っ掛かり分の係数 ($0.0096R_z\sigma_B/\sigma_N$) を足し合わせたものである。ただし図15から、軸力の有無により最大耐力時のすべり変形量が異なっていることからコンクリート付着力とコンクリート摩擦力の足し合わせは成り立たないと考え、コンクリート摩擦力が付着力を下回るときは、下限値を付着力と考える。また(1)、(2)、(3)式は、本研究のデータ範囲から制約を受けることから適用限界を設ける。

$$200 < \sigma_B < 300 \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$1 < R_z < 8 \quad (\text{mm})$$

$$0 < N < 40 \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

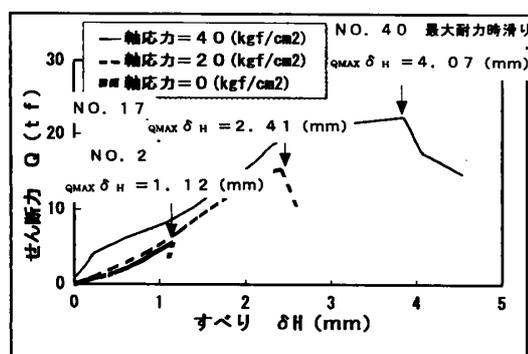


図15 R_z がほぼ等しく軸力の異なる
3試験体の $Q_{\max} - \delta H$ 関係

4. 結論

- (1) コンクリート表面粗さ測定方法、評価方法を提案した。
- (2) 自乗平均粗さと中心線平均粗さはほぼ同一の評価方法であることが分かった。
- (3) コンクリート表面粗さ評価値に比例して最大せん断応力は増加する傾向がある。
- (4) コンクリート付着力とコンクリート摩擦力の足し合わせは成り立たない。
- (5) 摩擦に関する係数式を提案した。

<参考文献>

- [1] 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報告集45
5号1994年1月P7~16