

コンクリート打継部の表面粗度の計測・定量化と 曲げ・せん断付着特性に関する研究

Measurement and evaluation of roughness of concrete joint surface and bond property

松田浩*, 牧野高平**, 山下務***, 中島朋史****

Hiroshi MATSUDA, Kouhei MAKINO, Tutomu YAMASHITA, Tomohito NAKASHIMA

*長崎大学教授 工学部構造工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

**長崎大学大学院 生産科学研究科 (〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

***長崎大学工学部 工学部構造工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

****長崎大学大学院 生産科学研究科 (〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

In repair and strengthening work of concrete structures, newly added concrete is treated to unify with the existing concrete surface. But the roughness of concrete surface treatment is hitherto judged empirically not quantitatively. We have developed a non-contact and portable type 3D measurement system by using a personal computer, CCD cameras and a spot laser projector, based on a simple measuring theory. Using by 3D measurement system, concrete surface are measured three dimensionally. And indexes of roughness of concrete surface are calculated. In this paper, the relationships between roughness of concrete surface and bond strength are studied.

Key Words: 3D measurement system, construction joint of concrete, roughness of concrete surface, bending bond strength, shear bond strength

キーワード: 三次元計測システム, コンクリート打継部, コンクリート表面粗度, 曲げ付着強度, せん断付着強度

1. はじめに

コンクリート構造物の打継部,あるいは劣化コンクリート構造物の補修において,打継コンクリートや補修材料は下地コンクリートと強く付着し,その後生じる応力が付着を損わずに構造物が一体となって機能しなければならない。

コンクリート標準示方書¹⁾には水平・鉛直打継目の施工について,「(水平打継目)既設コンクリートの表面のレイタンス,品質の悪いコンクリート,緩んだ骨材粒などを完全に除き,十分に吸水させなければならない」,「(鉛直打継目)既設コンクリートの打継面は,ワイヤブラシで表面を削るか,チップング等によりこれを粗にして十分吸水させ,セメントペースト,モルタルあるいは湿潤面用エポキシ樹脂などを塗った後,新コンクリートを打ち継がなければならない」と規定されている。これらの記述は,昭和25年の國分の新旧コンクリートの打継目の研究論文²⁾の基本的な成果の域を越えていないよう

である。

下地表面の処理方法と処理程度が,構造物の一体化に大きく影響を及ぼすため,使用用途,目的に応じた処理方法と処理程度を規定する必要がある。しかしながら,コンクリート表面処理面の粗度については,前述のようにコンクリート標準示方書には,打継目処理に関する規定はあるものの,表面凸凹の程度については定量的に定められておらず,そのため旧コンクリートの表面のレイタンスや緩んだ骨材粒などの除去などが経験的に行われているのが現状である。

コンクリート表面凸凹形状の計測法として,目視計測³⁾,触針式変位計による3次元計測⁴⁾,レーザ変位計をXYプロッターに取り付けた3次元計測法⁵⁾などの計測法が用いられている。和田ら⁶⁾は,レーザとCCDカメラを併用したレーザビーム光線反射法(スリットレーザ光線法)を用いて計測を実施し,スリットレーザ光線法は大量の座標値を必要とするコンクリート亀裂面の形状測定に最適である

と指摘している。しかし、計測には試験体をスライディングテーブル上に設置する必要がある、実験室での計測の域を出ないようである。

筆者らは、過去にコンクリート表面の粗さを定量的に評価するために、新コンクリート打設前に旧コンクリートの打継面の表面形状をシリコンゴムで型取りし、触針式三次元形状計測器と3Dレーザ計測器を用いて計測を実施したところ、シリコンゴムで型取した場合には破壊強度が1割程度減じる傾向が出た⁷⁾。したがって、本研究では前もって型取りしない計測法の開発、すなわち現場計測への展開を目標とし、筆者らが試作開発したCCDカメラとレーザ投光器を組合せた3Dレーザ計測器を用いた。一体化されているので、一度キャリブレーションしておけばそのまま計測が可能である。本計測は対象物をカメラやレーザで見たときの透視変換理論⁸⁾に基づき、指定座標系から既知点を抽出し、透視変換行列によりカメラやレーザの位置関係パラメータを算出して、三次元計測を行なうもので、ステレオ画像法、スポットレーザ投光法、スリットレーザ投影法で三次元計測することができる⁹⁻¹²⁾。本研究では照射されたスリットラインをカメラで撮影し、スリットラインの投影部分の画像座標値を取得して三次元座標を求めるスリットレーザ投影法を用いた。

本論文は、コンクリート打継部の表面粗度と付着強度との関係を明らかにすることを目的として、まず、種々の表面処理工法により施工されたコンクリートの打継部表面を触針式計測器と3Dレーザ計測装置を用いて計測し、いくつかの指標を用いて凸凹形状を定量化し、本計測装置のコンクリート表面の凸凹計測への適用性を検討した。次に、付着曲げ試験、付着傾斜せん断試験の2種類の付着強度試験を実施し、これらの結果から、最適な粗度指標を見出すとともに、表面粗度と付着強度との関係を明らかにした。さらに、付着強度試験に際しては、全視野で変位計測が可能な、電子スペックル干渉法(ESPI)¹³⁾を用いて計測を行い、打継部付近の挙動の確認を行うものとした。

2. 表面粗度の定量化

2.1 表面粗度の定量化方法

本研究で使用した三次元計測器を図-1に示す。本計測装置は、計測器自体を移動して計測を行うので、対象物のサイズ・重量に制限がなく、また、天井、壁、床などの多様な面の凸凹形状を直接現場計測可能となる。本計測装置の計測速度は、5000点の座標値の場合、自動スポット計測で約40分、自動スリット計測で約10秒であった。

計測された三次元座標データをもとに、表面粗度の定量化を行なう。機械工学の材料加工分野で用いられているように、表面粗さの評価法には、JISやISO規格に準じて算術平均粗さ、最大高さ、十点平均粗さ、凹凸の平均間隔、局部山頂の平均間隔、平均傾斜角、X表面積の増加率、平均深さ、表面積の増加率、山数などの種々の評価法¹⁴⁾が提案されている。ここでは、使用したレーザ計測装置の性能

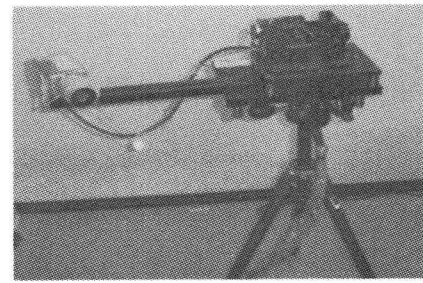


図-1 3Dレーザ計測装置

の検討結果、および筆者らの過去の実験による各定量化方法と付着強度の相関関係結果⁷⁾より、算術平均粗さ、凹凸の平均間隔、平均傾斜角、X表面積の増加率、平均深さの5つの定量化方法を採用し、その中から最適指標を検討する。図-2(a)~(e)にそれぞれの定量化方法について示す。

(1) 算術平均粗さ (Ra)

Raは、粗さ曲線からその平均線の方に規準長さだけ抜取り、この抜取り部分の平均線の方にx軸を、縦倍率の方にy軸を取り、粗さ曲線を $y=f(x)$ で表したときに、次の式によって求められる値をマイクロメートル(μm)で表したものをいう(l :規準長さ)。

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx$$

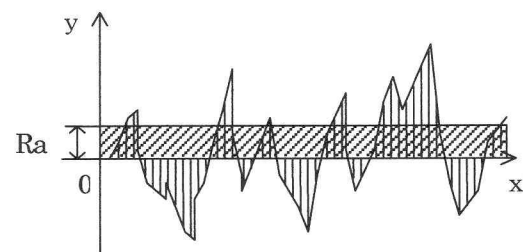


図-2(a) 算術平均粗さ (Ra)

(2) 凹凸の平均間隔 (Sm)

Smは、粗さ曲線からその平均線の方に規準長さだけ抜取り、この抜取り部分において一つの1山及びそれに隣り合う一つの谷に対応する平均線の長さの和(以下、凹凸の間隔という)を求め、この多数の凹凸の間隔の算術平均値をミリメートル(mm)で表したものである。Sm_iは凹凸の間隔、Nは規準長さ内での凹凸の間隔の個数である。

$$Sm = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Sm_i$$

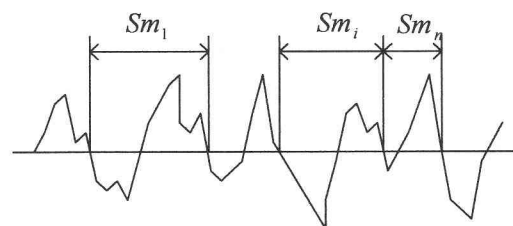


図-2(b) 凹凸の平均間隔 (Sm)

(3) 平均傾斜角 (T)

T は、折れ線の平均線に対する傾斜の平均を表したものをいう。

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\tan \theta_i|$$

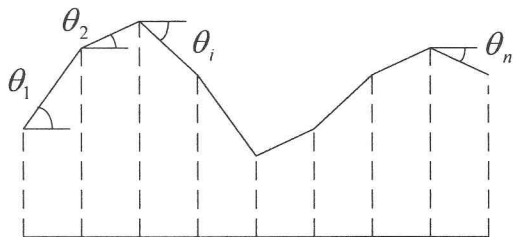


図-2 (c) 平均傾斜角 (T)

(4) X 表面積の増加率 (r)

r は、凹凸線の長さ (R) を水平距離 (L) で除したものをいう。

$$r = \sum R_i / \sum L_i$$

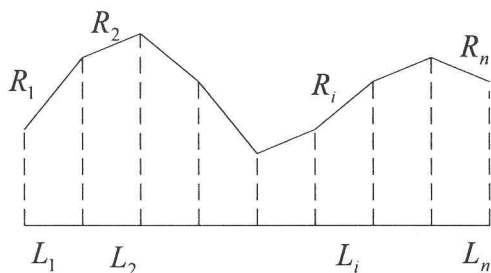


図-2(d) X 表面の増加率 (r)

(5) 平均深さ (d)

d は、最も高い山の頂部を通る水平線からの深さの平均を表したものをいう。

$$d = \frac{\sum d_i}{n}$$

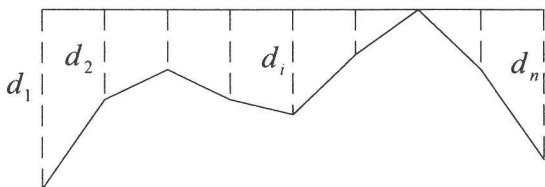
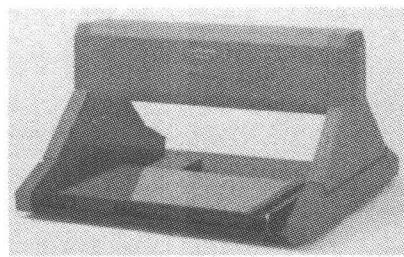


図-2(e) 平均深さ (d)

2.2 非接触 3D 形状計測器の有用性の確認

打継部の表面形状をレーザ計測装置を用いて計測するにあたり、触針式計測装置との比較により本試験装置の有用性について検討した。比較に使用した図-3 に示す触針式計測装置は、高精度で正確な計測が可能ではあるが、計測時間が非常に長く、計測対象物の寸法、重量に制限があるため、今回の付着強度試験において試験体の計測が不可能であった。



最大スキャン領域 (mm)	304.8(X), 203.2(Y), 60.5 (Z)
テーブル載荷最大荷重	5 kg
スキャンピッチ	X/Y 軸 0.05mm, Z 軸 0.025mm

図-3 触針式計測装置

モルタルを使用して規則的な凸凹を有する試験体を製作し、その凸凹面をレーザ計測装置および触針式計測装置を用いて計測した。計測により得られたそれぞれの三次元座標データを種々の粗度定量化方法を用いて定量化し、算出された粗度定量化値を比較することにより、レーザ計測装置の有用性の確認を行うものとした。また、算出されたそれぞれの粗度定量化方法別に、レーザ計測と触針式計測との相関分析を行い、相関関係の有無を検討した。比較に使用したモルタル試験体の計測面の凸凹形状を表 1 に示す。なお、試験体は、各タイプ別に 3 体ずつ製作し計測を行った。

表-1 モルタル試験体の凸凹形状寸法

A-type	凸凹なし
B-type	5mm × 5mm の凸凹, 間隔 5mm
C-type	3mm × 5mm の凸凹, 間隔 5mm
D-type	7mm × 5mm の凸凹, 間隔 5mm
E-type	5mm × 10mm の凸凹, 間隔 10mm
F-type	5mm × 5mm の凸凹, 間隔 10mm
G-type	5mm × 10mm の凸凹, 間隔 5mm

一例として、算術平均粗さ (Ra) を指標とした定量化により得られた定量化値を比較した結果を図-4 に示す。同図より、レーザ計測が、触針式計測による値と概ね一致していることが確認できる。他の場合でも同様に一致した結果が得られた。

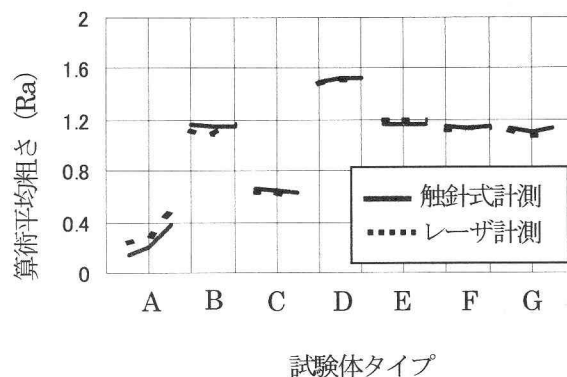


図-4 比較結果(算術平均粗さ)

また、それぞれの定量化方法ごとに、レーザ計測と触針式計測による粗度定量化値の1%有意水準の相関関係を検討した結果を表-2に示す。さらに、一例として、算術平均粗さ(Ra)の指標による相関関係(1%有意水準)を図-5に示す。他の指標の場合も同様の高い相関関係が得られた。したがって、全ての定量化方法において、触針式と非接触式による粗度の定量化に高い相関関係が認められたことにより、非接触式による計測の有効性を確認できた。なお、図において、定量化値はそれぞれの平均値で割って正規化して表示している。

表-2 両計測法の相関関係評価の結果

定量化方法	相関係数
算術平均粗さ (Ra)	0.99
凹凸の平均間隔 (Sm)	0.75
平均傾斜角 (T)	0.99
X 表面積の増加率 (r)	0.99
平均深さ (d)	0.65

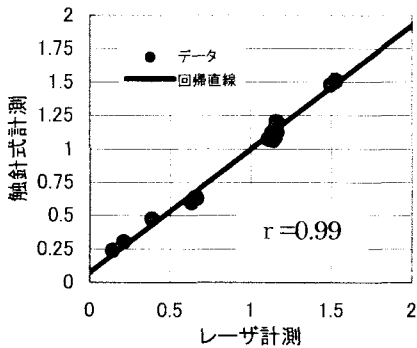


図-5 相関関係(算術平均粗さ)

3. 曲げ試験

3.1 試験概要

引張応力下における打継部の付着強度を評価することを目的とし、曲げ試験を採用した。使用したコンクリートの配合を表-3に、強度を表-4に示す。試験体の寸法および荷重方法を図-6に示す。断面寸法は100×100mmとし、荷重方法は2点荷重とした。試験体の製作には、通常の圧縮試験または曲げ試験に用いられる角柱試験体の型枠を使用した。試験中は試験体中央下面の垂直変位を計測し、ESPIを用いて打継部付近のひずみ分布を計測した。

試験体の種類を表-5に示す。試験体は、処理方法別に3体ずつ製作し、試験を計3回行った。ただし、遅延材処理(F-type)の試験体については、3回目の試験(3シリーズ)においてのみ製作した。

表-3 コンクリート配合表

粗骨材 最大寸法 (mm)	水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
			水	セメント	粗骨材	細骨材
20	50	44	175	350	985	760

表-4 試験体強度

試験体	圧縮強度(kN)		
	1シリーズ	2シリーズ	3シリーズ
旧	26.9	35.7	25.2
新	22.7	21.1	20.2

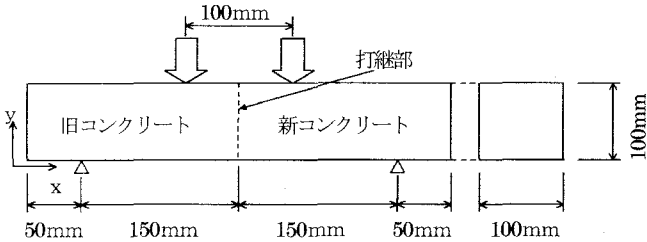


図-6 荷重方法

表-5 試験体種類

A-type	無処理のもの
B-type	打継部をブラッシング処理
C-type	打継部をチップング処理
F-type	打継部を遅延材処理
Z-type	一体化試験体

3.2 試験結果

曲げ試験の試験結果を表-6および図-7に示す。打継部無処理のA-typeの試験体に比べ、打継部に処理を施したB、C、F-typeの試験体において付着強度が向上していること確認できる。また試験体は全て打継部で破壊した。

表-6 試験結果

試験体	破壊荷重 (kN)		
	1シリーズ	2シリーズ	3シリーズ
A-type	1.8	2.9	2.9
B-type	6.3	9.1	8.9
C-type	7.6	7.4	9.6
F-type	—	—	10.4
Z-type	16.1	13.9	—

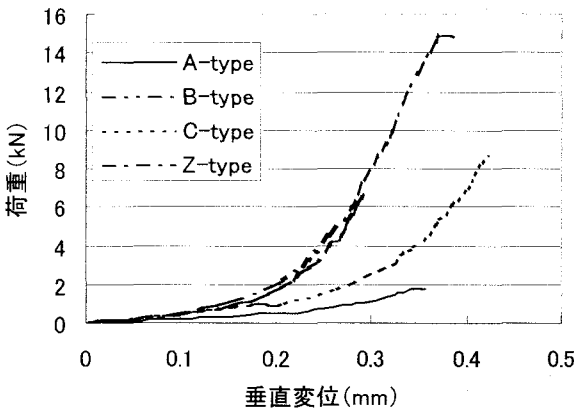


図-7 荷重・垂直変位曲線 (1シリーズ)

3.3 相関関係評価

三次元計測によって得られた、3シリーズの各処理方法別の平均定量値と平均破壊荷重を表-7に示す。

表面粗度と付着強度の関係を評価するため、相関分析を行った。算出された表面粗度の定量値と載荷試験により得られた付着強度の相関分析による評価結果を表-8に示す。評価結果より、曲げ試験においては、表面粗度の定量化方法として、平均深さ(d)に付着強度との高い相関関係が確認された。

さらに、1, 3シリーズにおいて、平均深さ(d)を指標とした表面粗度の定量値と付着強度との関係を図-8に示す。なお、2シリーズにおいては打継部表面を計測する際に不具合が生じたため、1, 3シリーズのみ記載している。これらの結果から、平均深さが大きくなれば、付着引張強度が直線的に大きくなることがわかる。

表-7 各処理方法別の定量値と破壊荷重

	A-type	B-type	C-type	F-type
Ra	511	596	2394	1530
Sm	9.068	8.673	14.22	12.21
T	0.112	0.169	0.253	0.306
r	1.012	1.024	0.788	1.082
d	0.830	1.233	5.849	3.439
破壊荷重	2.9kN	8.9kN	9.6kN	10.4kN

表-8 相関関係評価結果

定量化方法	相関関係		
	1シリーズ	2シリーズ	3シリーズ
算術平均粗さ (Ra)	×	×	○(1%)
	0.68	0.15	0.71
凹凸の平均間隔 (Sm)	○(1%)	×	×
	0.89	0.58	0.30
平均傾斜角 (T)	○(1%)	×	○(1%)
	0.87	0.74	0.82
X 表面積の増加率 (r)	○(1%)	○(5%)	○(1%)
	0.84	0.78	0.74
平均深さ (d)	○(1%)	×	○(1%)
	0.71	0.29	0.69

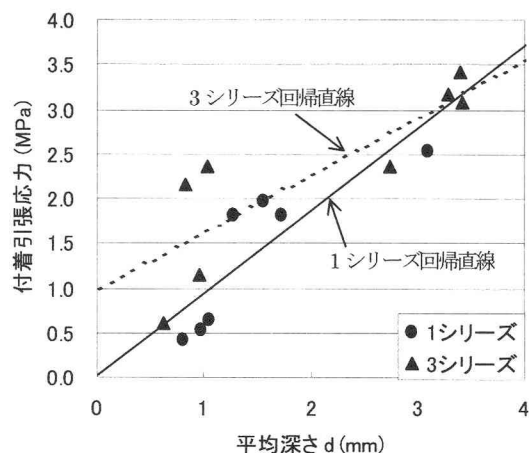


図-8 相関関係 (平均深さ)

3.4 ESPI 計測

載荷試験の際、ESPIを用いて、試験体側面の計測を行った。その結果、打継部を持つ全ての試験体において、打継部におけるひずみの集中が生じていた。それぞれの試験体の破壊直前の最大主ひずみ分布を図9に示す。また、図10にC-typeの試験体の①破壊直前および②ひずみ発生時のひずみ分布を示す。

この試験体では、破壊荷重が約11kNであったのに対し、打継部におけるひずみの集中開始が約5kNであった。他の試験体においても、それぞれの試験体の破壊荷重に対し、約3~5割の荷重載荷時にひずみの集中が始まっていることが確認できた。なお、ESPIの計測精度は1~20 μ mである。図-9のCtypeで左部分が斑模様になっているが、大差ないひずみ値である。

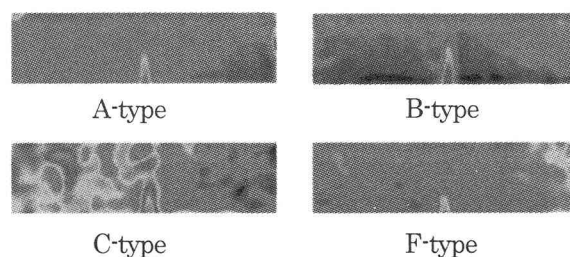


図9 最大主ひずみ分布

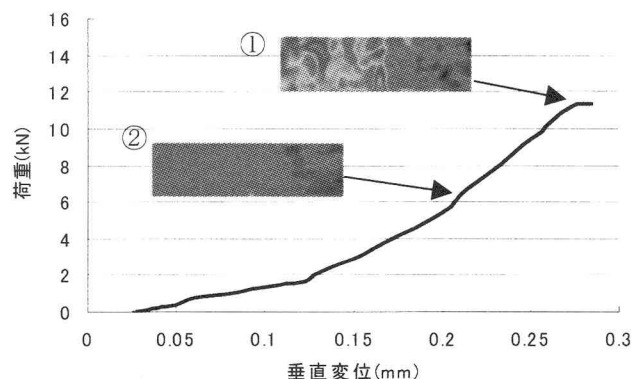


図10 荷重-垂直変位曲線 (C-type)

4. 傾斜せん断試験

4.1 試験概要

打継部の表面粗度がせん断付着強度に与える影響を評価するための簡易的な試験法について検討した。そのための試験法として、傾斜角の異なる打継部を有する角柱試験体(断面寸法:100×100mm)に、軸圧縮力を与えることにより、打継部に圧縮直応力とせん断応力を作用させる一軸圧縮試験方法を採用した。

使用したコンクリートは曲げ試験で使用したコンクリートと同一配合とし、その強度を表-9に示す。試験体の寸法および載荷方法を図-11に示す。

試験中は、図に示すように、変位計を取付け垂直変位を計測し、ESPIを用いて打継部付近のひずみ分布を計測した。試験体製作には、3節の曲げ試験と同様の型枠を使用し、試験体の打継部周辺には、打継部での破壊を誘発するために、切欠きを設けた。また、打継部の傾斜角は、45°、60°とした。

試験体の種類を表-10に示す。なお、試験体は、各処理方法別に3体ずつ製作した。

表-9 材料強度

試験体	圧縮強度 (MPa)	
	45°	60°
旧	26.6	21.3
新	6.8	11.7

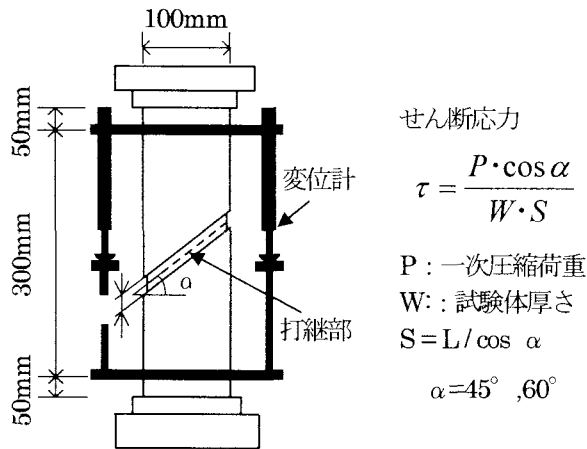


図-11 載荷方法

表-10 試験体種類

A-type	無処理のもの
B-type	打継部をブラッシング処理
C-type	打継部チップング処理
D-type	打継部を遅延材処理
E-type	打継部をエアセル処理
Z-type	一体化試験体

4.2 試験結果

傾斜せん断試験の試験結果を表-11および図-12に示す。打継部を処理しないA-typeの試験体に比べ、打継部に処理を施したB、C、D、E-typeの全ての試験体において、付着強度が向上していることが確認できる。また、ほぼ全ての試験体は打継部で破壊していたが、一部の試験体が母材で圧縮破壊していた。これは、打継部の付着強度が高かったことが原因であると考えられる。なお、表-11においては、母材で圧縮破壊したものは除いて表示している。

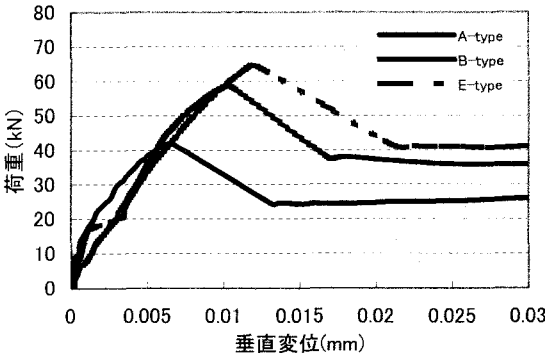


図-12 荷重-垂直変位曲線

表-11 試験結果

α	試験体	破壊荷重 (kN)	せん断応力 (MPa)
45°	A-type	46.7	2.60
	B-type	57.2	3.18
	C-type	58.6	3.26
	D-type	65.4	3.63
	E-type	62.1	3.45
	Z-type	174.8	—
60°	A-type	68.2	3.28
	B-type	99.9	4.80
	C-type	78.7	3.79
	D-type	74.0	3.56
	E-type	98.4	4.73
	Z-type	142.4	—

4.3 相関関係評価

三次元計測によって得られた、各処理方法別の平均定量値と平均破壊荷重を表-12に示す。

せん断力を受ける打継部における表面粗度と付着強度の関係を明らかにするために、各種指標を用いて算出された表面粗度の定量値と載荷試験により得られた付着せん断強度を用いて相関分析を行った。相関分析による評価結果を表-13に示す。その結果、傾斜せん断試験では、平均傾斜角 (T)、x 表面積の増加率 (r)、平均深さ (d) の3種類の定量化方法において、表面粗度と付着せん断強度との相関関係が認められた。最も相関関係の評価の高い平均深さ (d) と付着強度との関係を図-13に示す。

表-12 各処理方法別の定量値と破壊荷重

	A-type	B-type	C-type	D-type
Ra	400	757	1394	1298
Sm	6.162	8.756	14.08	9.228
T	0.194	0.234	0.205	0.388
r	1.029	1.043	1.032	1.106
d	1.196	2.308	2.537	2.646
破壊荷重	45°	46.7kN	57.2kN	58.6kN
	60°	68.2kN	99.9kN	78.7kN

表-13 相関関係評価結果

定量化方法	相関関係	
	45°	60°
算術平均粗さ (Ra)	○ (5%) 0.49	× 0.33
凹凸の平均間隔 (Sm)	× 0.25	× 0.17
平均傾斜角 (T)	○ (5%) 0.55	○ (5%) 0.55
X 表面の増加率 (r)	○ (5%) 0.52	○ (5%) 0.55
平均深さ (d)	○ (1%) 0.59	○ (1%) 0.56

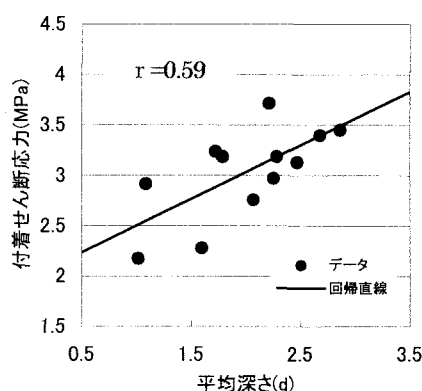


図-13 相関関係(平均深さ)

4.4 ESPI 計測

ESPI 計測による破壊直前の試験体の最大主ひずみ分布を図 14 に示す。打継部で破壊した試験体 (A, B-type) では、打継部にひずみの集中が見られたのに対し、母材で圧縮破壊した試験体 (C-type) では、そのような集中は見られなかった。C-type に見られるひずみの集中は、母材が圧縮破壊した際の、ひび割れ部におけるものである。また、打継部でのひずみの集中は、各試験体の破壊荷重に対して、約 3~5 割の荷重載荷時に発生が確認された。

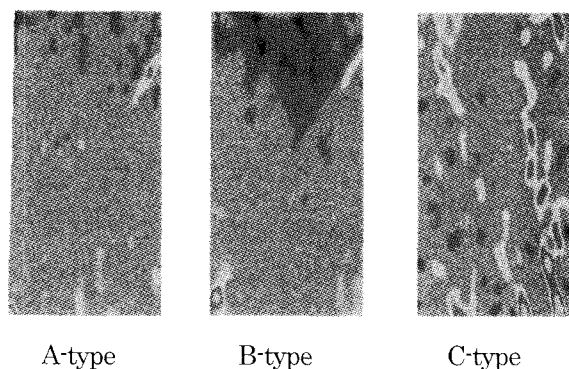


図-14 最大主ひずみ分布

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめて示す。

(1) 触針式計測装置との比較により、可般式・非接触レーザ計測装置の凸凹形状計測への有用性を確認することができた。

(2) 各種定量化方法による定量値と、付着強度試験による付着強度との相関分析の結果、定量化方法として、曲げ試験では、x 表面積の増加率 (r)、傾斜せん断試験では、平均傾斜各 (T)、x 表面の増加率 (r)、平均深さ (d) が付着強度への影響が大きいことがわかった。

(3) 付着強度への影響が認められる全ての定量化方法において、算出された定量値は、付着強度に対して正の比例関係を持つと考えられる。

(4) ESPI を用いて計測を行った結果、打継部で破壊した試験体において、打継部でのひずみの集中を全視野で確認することができた。

(5) 曲げ試験、傾斜せん断試験の両試験において、打継部でのひずみの集中は、各試験体の破壊荷重に対して、約 3~5 割の荷重載荷時に発生していた。

6. あとがき

今後の予定として、デジタルカメラを用いた三次元写真計測システムにより、コンクリート表面粗度の定量化のより簡易化と現場計測への適用を検討するとともに、さらに実験を重ねてデータを蓄積し、表面粗度と付着特性の関係をより明らかにしていく予定である。

なお、本研究は科学研究補助金、基盤研究 (B) (2) (課題番号: 14350246) 及び萌芽研究 (課題番号: 16656138) の補助により行なわれたことを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書—施工編—, 2002 年版, 土木学会
- 2) 國分正胤: 新旧コンクリートの打継目に関する研究, 土木学会論文集, 第 8 号, pp.1-24, 1950.
- 3) 武井一夫: コンクリート打継ぎ面の界面粗さの評価方法—界面粗さの形状とせん断伝達—, 日本建築学会構造系報告書
- 4) 栗原哲彦, 西田好彦, 鎌田敏郎, 六郷恵哲: コンクリート打継部における表面処理粗さの定量化と付着性状の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1093-1098, 1999.
- 5) 香取恵一, 林静雄, 槇谷貴光, 牛垣和正: コンクリート接合面の粗さを用いた接合面せん断耐力の推定の滑り変位挙動—プレキャスト接合部のせん断挙動に関する研究—, 日本建築学会構造系報告書, 第 455 号, pp.7-16, 1998.

- 6)和田俊良, 佐藤龍司, 石川千温, 上田正生: レーザビーム光線による亀裂面形状測定手法の開発とデータの 2 次元分析手法の提案, ―コンクリート亀裂面の形状特性分析に関する基礎研究 (その 1) ―, 日本建築学会構造系論文集, 第 490 号, pp.179-188, 1996
- 7)松田浩: 3 次元形状計測による境界適合型 3 次元ソリッド・シェル複合解析システムの開発, 平成 11・12 年度科学研究費補助金(基盤研究 B)研究成果報告書, 2001
- 8)井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990
- 9) 杉原太郎, 森山雅雄, 松田浩: 小規模三次元計測システムの開発, 日本写真測量学会秋季学術講演会論文集, pp59-62, 1998
- 10)杉原太郎, 森山雅雄, 松田浩, 山本晃, 和田眞禎: 長さ基準における校正手法を導入した 3 次元画像計測システムの開発, 日本写真測量学会平成 11 年度年次講演会発表論文集, pp299-302, 1999
- 11)和田眞禎, 森山雅雄, 松田浩, 杉原太郎: レーザ光を用いた三次元画像計測システムの開発, 日本写真測量学会平成 11 年度年次講演会発表論文集, pp297-298, 1999
- 12)和田眞禎, 松田浩, 森山雅雄, 樋野勝巳, 山本晃: レーザと CCD カメラを用いた三次元計測装置の開発とその適用例, 土木学会第 54 回年次学術講演会, 1999
- 13)松田浩, 神原天鳴ほか: スペックル干渉法による非接触全視野ひずみ計測法, 土木学会, 応用力学論文集, Vol.6, pp.1081-1088, 2003.
- 14)山口克彦, 沖本邦郎: 材料加工プロセス ―ものづくりの基礎―, pp.145-149, 共立出版, 2000

(2004年9月17日 受付)