

論文 超速硬増厚コンクリート梁が若材齢で曲げ疲労を受けた場合の一体化に関する研究

河野 伊知郎^{*1}・中嶋 清実^{*2}・梅原 秀哲^{*3}・岡田 光芳^{*4}

要旨：道路橋床版の補強法の1つに、旧コンクリートの上面に新コンクリートを増厚する上面増厚工法があり、早期交通開放が可能な超速硬セメントコンクリートがよく用いられる。しかし、早期交通開放を行った場合、超速硬増厚コンクリートが若材齢で交通による疲労荷重を受けることになる。そこで、本研究は打継面を有する種々の供試体を用いて若材齢における曲げ疲労試験を行った。その結果、若材齢に曲げ疲労を受けた場合の残存曲げ荷重、残存付着強度およびじん性等はショットブラストによる表面処理を行うことで大きく改善されることが明らかとなった。

キーワード：超速硬セメントコンクリート、若材齢、増厚、曲げ疲労荷重、付着強度

1. はじめに

近年、交通量の増加、交通荷重の増大に伴って道路橋等の累積損傷が著しく増加しており、鉄筋コンクリート床版（以下、床版と略称する）の小規模な補強工事から床版全体を打ち替えるような大規模な工事が多く報告されている。特に前者の場合には上面増厚工法がよく用いられる。これらの工事のほとんどは交通規制を伴う場合が多く、短時間に工事を完了し、交通開放を行わなければならない。そのため、短期間で実用強度が得られ、またじん性の向上が期待できる鋼繊維補強超速硬セメントコンクリートがよく用いられ、打設後3～24時間で交通を開放するケースが多い。しかし、これは設計基準強度を満足しているという根拠に基づいているだけである。早期交通開放を行った場合は、セメントの水和が十分進行していないときに交通荷重による疲労荷重が作用することになり、この影響が曲げ荷重、付着強度等にどのような影響を及ぼすかを把握しておくことは重要であるが、既往の研究では行われていない。

そこで本研究では、アウィン系超速硬セメントを用いて、打継面を有する鉄筋コンクリート梁の曲げ疲労試験を行い、若材齢の超速硬増厚コンクリートの曲げ疲労強度特性等を明らかにすることを目的とした。

2. 使用材料およびコンクリートの配合 実験で使用した材料を以下に示す。

旧コンクリート部のセメントには普通ポルトランドセメントを用い、新コンクリート部にはアウィン系超速硬セメントを使用した。粗骨材は旧コンクリートおよび新コンクリートともに静岡県天竜川産の川砂利（表乾密度 2.67g/cm^3 ，吸水率 0.84%，F.M. 6.76，最大寸法 15mm）を使用し、細骨材は三重県員弁川産の粗砂（表乾密度 2.60g/cm^3 ，F.M. 3.05，吸水率 2.27%）と三重県長良川産の細砂（表乾密度 2.59g/cm^3 ，F.M. 2.18，吸水率 1.73%）を質量比 6.6 : 3.4 の割合で混合した混合砂を使用した。混和剤は旧コンクリート部には高性能 A E 減水剤および空気量を調整するために A E 剤を用い、新コンクリート部には高性能

*1 豊田工業高等専門学校 環境都市工学科 博(工) (正会員)

*2 豊田工業高等専門学校 環境都市工学科 工博 (正会員)

*3 名古屋工業大学大学院工学研究科 都市循環システム工学専攻 Ph.D. (正会員)

*4 小野田ケミコ株式会社 営業本部特殊コンクリート部 博(工) (正会員)

表 - 1 新旧コンクリートの配合

コンクリートの種類	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	単位量 (kg/m ³)						高性能AE減水剤 (g/m ³)	AE剤 (g/m ³)	凝結遅延剤 (g/m ³)	高性能減水剤 (g/m ³)
			水	セメント	細骨材		粗骨材	鋼繊維				
					細砂	粗砂						
旧	45	64	184	409	101	937	594	—	818	16.4	—	—
新	38	60	151	420	108	997	749	60	—	—	4200	8400

減水剤と凝結遅延剤を使用した。高性能減水剤はポリアルキルアリルスルホン酸塩系高性能減水剤を、凝結遅延剤は有機カルボン酸系凝結遅延剤とヘプトン酸ソーダの2種類の凝結遅延剤を用いた。鉄筋は異形棒鋼 D10 (SD295A)，鋼繊維には新コンクリート部にインデント型で直径 0.7mm、長さ 50mm のものを用いた。

表 - 1 に新旧コンクリートの配合を示す。旧コンクリートの配合はスランプを 10.0 ± 2.0cm，水セメント比を 45%として試し練りを行い，良好なワーカビリティ（コンシステンシー，材料分離抵抗性）とするために必要な水セメント比，最適細骨材率を決定した。新コンクリートの配合はスランプを 5.0 ± 1.5cm，単位セメント量を 420kg/m³，鋼繊維を 60kg/m³とし，30 分程度のハンドリングタイムを得るために必要な単位水量，最適細骨材率および凝結遅延剤添加量を決定した。

3. 供試体

図 - 1 に各供試体の断面図，図 - 2 に供試体寸法，載荷方法および直接引張試験用供試体採取位置を示す。以後，図に示すとおり各供試体を Type 1 ~ 3 と略す。Type 1 は打継面のレイタンスだけを取り除いた供試体である。Type 2 は打継面をショットブラストで表面処理を行った供試体である。Type 3 は打継面を持たず，全て旧コンクリートで作製した供試体である。

次に Type 1，2 の供試体作製方法を説明する。まず旧コンクリートを高さ 15cm，幅 10cm，長さ 115cm で作製し，温度 20℃，湿度 80%の恒温恒湿室で 28 日間湿空養生を行う。

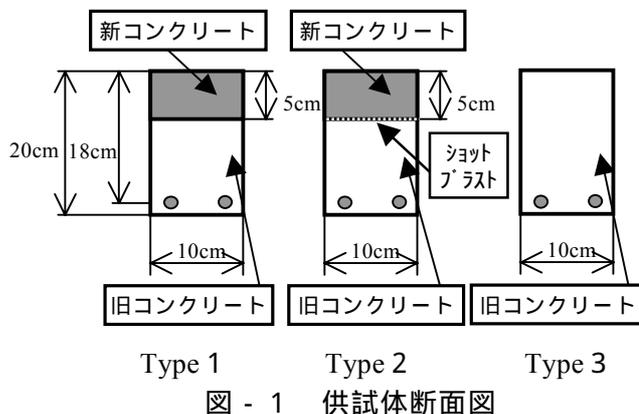


図 - 1 供試体断面図

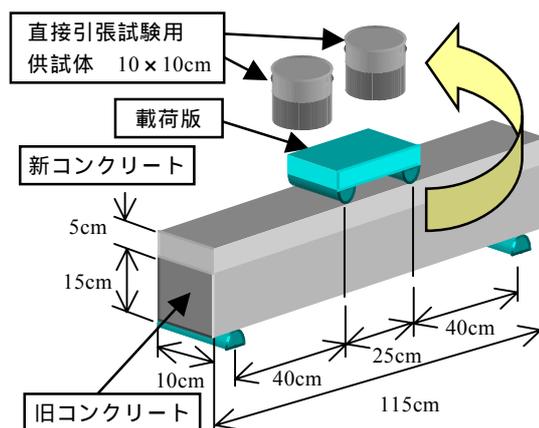


図 - 2 供試体寸法，載荷方法および直接引張試験用供試体採取位置

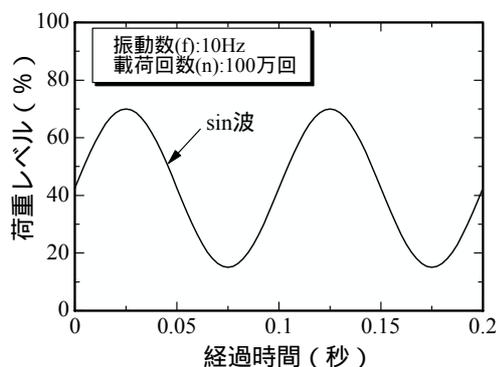


図 - 3 疲労試験に用いた波形

その後，Type 1 は旧コンクリート上面のレイタンスだけを取り除き，Type 2 はショットブラストにより投射密度 1470N/m² で表面処理を行い，実施工と同様に旧コンクリートの上面

を湿潤状態にし、その上面に新コンクリートを打ち継ぎ、所定の材齢になるまで湿空養生を行う。Type 3 は旧コンクリートを打設後、28 日間湿空養生を行ったものである。

また、Type 1、2 については付着強度を求めするために直接引張試験を行う。供試体には図 - 2 に示すように、疲労荷重載荷後に疲労用供試体および比較用供試体の載荷点の間からコアカッターを用いて切込みを入れ採取した 2 本の円柱供試体（10 × 10cm）を用いた。

4. 波形および荷重レベル

図 - 3 に疲労試験に用いた載荷波形を示す。疲労試験に用いた波形は sin 波で、振動数は 10Hz、載荷回数は 100 万回を設定した。振動数をこのように設定したのは、コンクリート圧縮疲労試験方法の JIS 原案¹⁾では、繰返し荷重の載荷速度は 5Hz を標準とし、1~10Hz の範囲内で行うのが適当であるとしているためである。荷重レベルは上限値を疲労開始荷重（疲労試験を開始するときの最大曲げ荷重）の 70%、下限値は 15% に設定して疲労試験を行った。

5. 実験手順

図 - 4 は疲労試験のフローチャートである。まず、新コンクリートを打設してから所定の材齢になるまで温度 20℃、湿度 80% の恒温恒湿室内で湿空養生を行う。疲労試験開始までの材齢は作業時間等も考慮して新コンクリートを打設してから 4 時間とする。材齢に達したら 3 本の供試体を用いて曲げ載荷試験を行い、最大曲げ荷重を測定する。その荷重の平均値を基に、荷重レベルを設定し疲労試験を開始する。所定の載荷回数終了したら、疲労用供試体と比較用供試体の曲げ載荷試験および直接引張試験を行う。曲げ載荷試験で得られた最大曲げ荷重をそれぞれ残存曲げ荷重および比較曲げ荷重とし、これらの荷重の比を曲げ荷重比とする。また、直接引張試験で

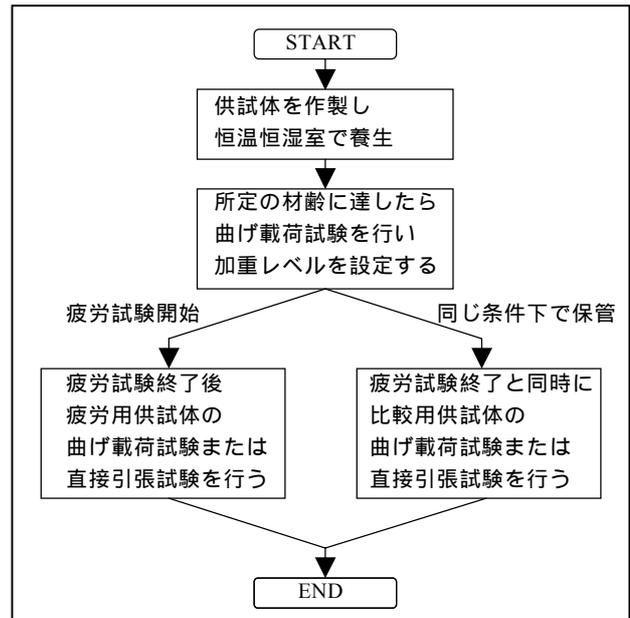


図 - 4 疲労試験のフローチャート

は疲労用供試体と比較用供試体の最大付着強度をそれぞれ残存付着強度および比較付着強度とし、これらの強度の比を付着強度比とする。なお、直接引張試験は供試体の上面および下面にエポキシ樹脂を用いて治具を固定し、万能試験機により測定した。また、疲労試験は供試体のばらつきを考慮して一つの実験について 3 回行った。この論文で示す値はこれらの平均値で示している。

6. 実験結果および考察

6.1 曲げ荷重比

図 - 5 は Type 1 ~ 3 の曲げ荷重比（残存曲げ荷重 / 比較曲げ荷重）を示している。図より Type 1 では 0.83 と曲げ荷重の減少が大きい、Type 2 では 0.95 と減少率が小さくなり、Type 3 の 0.96 とほぼ同程度の値を示している。これらのことより、増厚を行う際にショットブラストによる表面処理を施した供試体は打継面を有しない供試体と同じくらいの曲げ荷重が期待できることがわかる。したがって、ショットブラストにより表面処理を行うことは、若材齢に疲労荷重が作用することによる曲げ荷重低下の抑制に非常に有効であると言える。

6.2 残存付着強度，比較付着強度および付着強度比

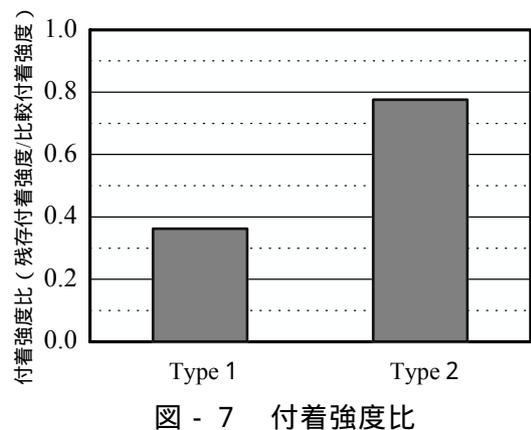
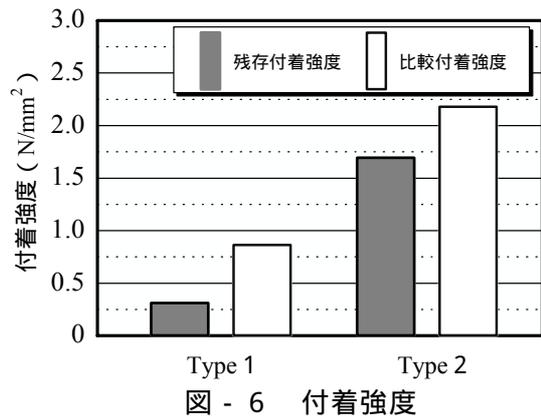
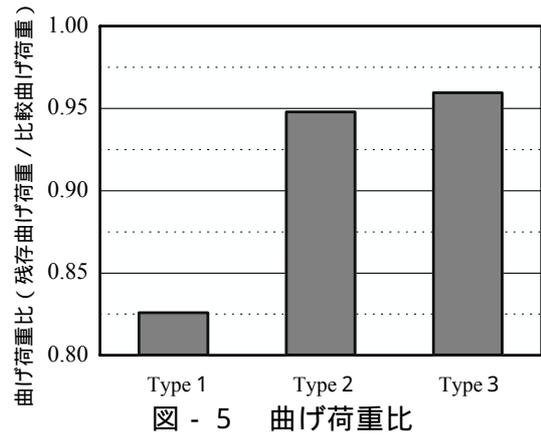
図 - 6 は Type 1，Type 2 の残存付着強度および比較付着強度を示している。図 - 6 より Type 1 の残存付着強度は 0.31N/mm^2 ，比較付着強度は 0.86N/mm^2 となっており，疲労荷重を受けることにより付着強度は 0.55N/mm^2 低下していることがわかる。Type 2 の残存付着強度は 1.69N/mm^2 ，比較付着強度は 2.18N/mm^2 となっており， 0.49N/mm^2 低下しているが，ショットブラストによる表面処理を施しているため Type 1 ほど減少していない。

次に図 - 7 は Type 1，Type 2 の付着強度比（残存付着強度 / 比較付着強度）を示している。図 - 7 より Type 1 の付着強度比は 0.36 ，Type 2 の付着強度比は 0.78 となっている。このことより，ショットブラストによる表面処理を施すことにより，疲労荷重が作用することによる付着強度の減少率が大幅に小さくなっていることがわかる。

6.3 ひび割れの進展

図 - 8 (a) ~ (c) は Type 1 ~ 3 の疲労用供試体および比較用供試体の代表的なひび割れ図を示したものである。図 - 8 (a) の Type 1 の疲労用供試体では，疲労荷重を受けることにより供試体の下縁中央部を中心にひび割れが発生し，打継面に達すると打継面に沿って進展し，その後，打継面で剥離して破壊に至っている。Type 1 の比較用供試体においても同様に，打継面で剥離して破壊に至っている。図 - 8 (b) の Type 2 の疲労用供試体では Type 1 と同様に疲労荷重を受けることにより，下縁中央部を中心にひび割れが発生しているが，ひび割れは打継面に達しても打継面を貫通し，打継面で剥離することなく破壊に至っている。比較用供試体においても同様に打継面で剥離することなく破壊に至っている。図 - 8 (c) の Type 3 の疲労用供試体および比較用供試体のひび割れ進展は Type 2 と類似している。

これらの実験結果より，ひび割れの進展に



においても表面処理の方法が大きく影響していることがわかる。また，ひび割れの進展状況よりショットブラストによる表面処理を行った場合，付着が大きく改善されているものと推測される。

6.4 荷重とたわみの関係，曲げタフネス

図 - 9 (a) ~ (c) は Type 1 ~ 3 の荷重とたわみの関係を示したものである。また，図 - 11 に各供試体の曲げタフネス²⁾を示す。図 - 9 (a) ~ (c) の全ての供試体において，荷重は最大荷重を示してから急激に低下して破壊に至っていることより，曲げタフネスの限界点は

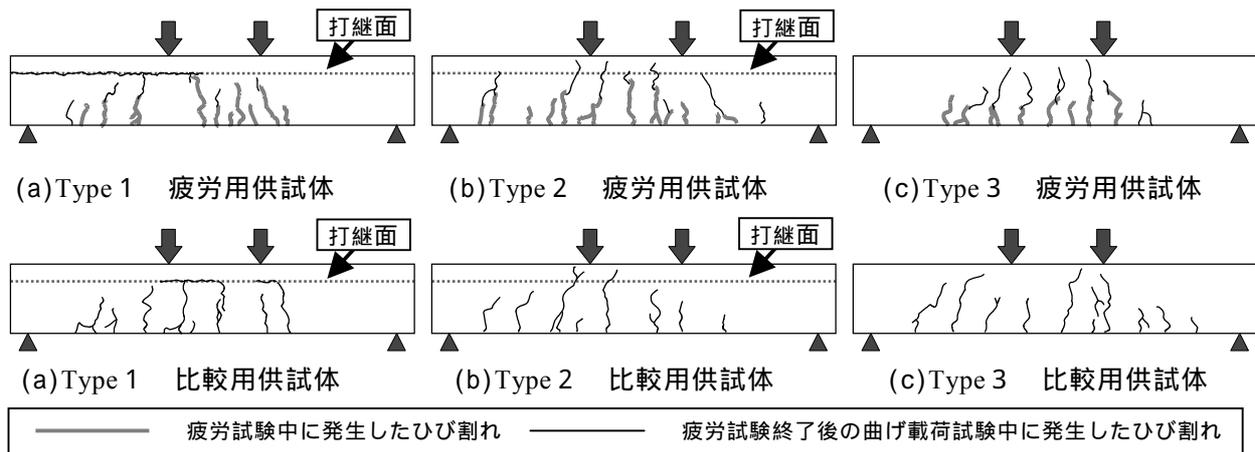


図 - 8 ひび割れ図

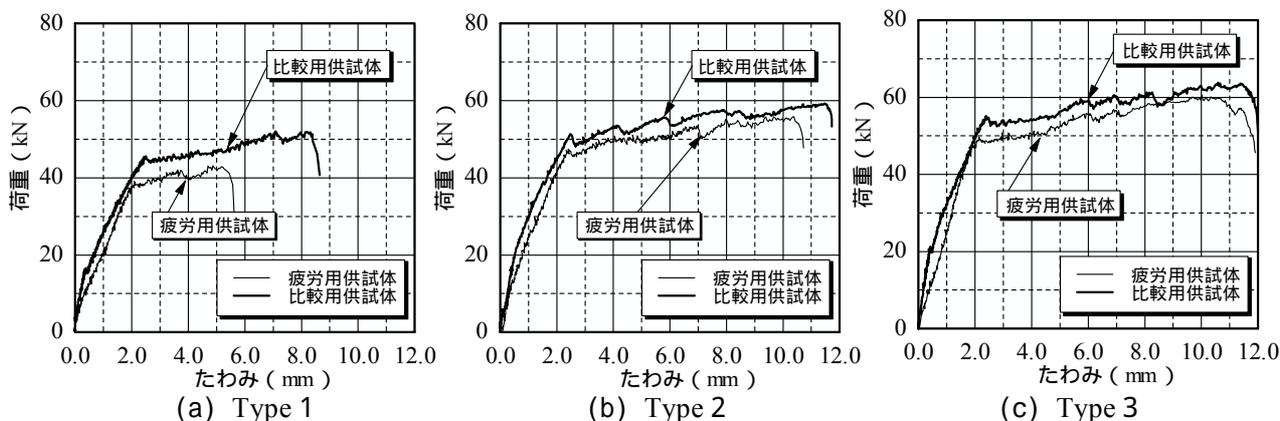


図 - 9 荷重とたわみの関係

この破壊に至るまでの点とした。

図 - 9 (a)の Type 1 では、比較用供試体ではたわみが 2.5mm に達するまでは直線的に曲げ荷重が増加している。その後は曲げ荷重の増加も緩やかとなり、たわみが 8mm 付近で最大曲げ荷重 52kN となり、破壊に至っている。これに対して疲労用供試体は疲労荷重を受けたことにより累積損傷があるため、破壊に至るまでのたわみ量が減少し、また曲げ荷重も小さくなっている。図 - 9 (b)より、Type 2 の比較用供試体ではたわみが 2.0mm に達するまでの曲げ荷重の増加は、Type 1 よりもさらに大きくなっている。その後は曲げ荷重の増加も緩やかとなり、たわみが 11.5mm で最大曲げ荷重 59kN となり、破壊に至っている。これに対して疲労用供試体は比較用供試体よりも破壊に至るまでのたわみ量、最大曲げ荷重が小さくなっているが、Type 1 ほど大きな減少は見られない。図 - 9 (c)より、Type 3 では打継面

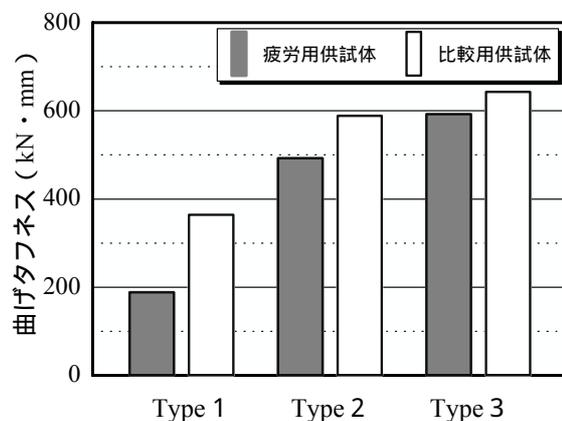


図 - 10 曲げタフネス

を有しないので、比較用供試体ではたわみが 2.0mm に達するまでの曲げ荷重の増加はさらに大きくなっている。その後は曲げ荷重の増加も緩やかとなり、たわみが 10mm を越えたところで最大曲げ荷重 62kN となり、破壊に至っている。これに対して疲労用供試体は比較用供試体よりも破壊に至るまでのたわみ量、最大曲げ荷重が小さくなっているが、Type 2 と同様に大きな減少は見られない。

次に図 - 10 より Type 1 の曲げタフネスは比較用供試体では $365\text{kN}\cdot\text{mm}$, 疲労用供試体では $188\text{kN}\cdot\text{mm}$ となり, 若材齢に疲労荷重を受けることにより曲げタフネスが 52%まで大きく低下している。

Type 2 の比較用供試体では $588\text{kN}\cdot\text{mm}$, 疲労用供試体では $493\text{kN}\cdot\text{mm}$ となり, 疲労荷重を受けることにより 84%まで低下しているが, ショットブラストにより表面処理を施しているため, Type 1 の場合よりも曲げタフネスの低下が抑制されている。

Type 3 の比較用供試体では $643\text{kN}\cdot\text{mm}$, 疲労用供試体では $593\text{kN}\cdot\text{mm}$ となり, 疲労荷重を受けることにより曲げタフネスが低下しているが, 低下率は 92%と全タイプの中で最も低下率が小さい。

6.5 打継面の表面形状および表面積

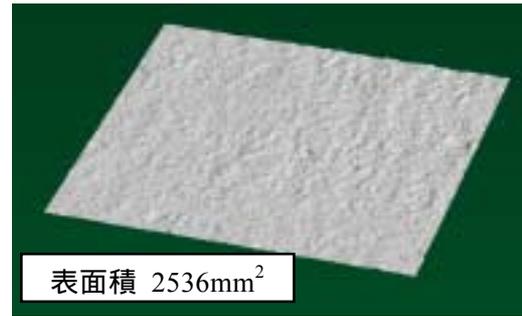
Type 1 , 2 の打継面の表面積を調べるために, 触針式三次元形状測定機を用いて打継面のコンクリート表面形状を計測した。計測範囲は $50\text{mm}\times 50\text{mm}$ である。

図 - 11 (a) , (b) に測定した表面形状および表面積の一例を示す。図 - 11 (a) より Type 1 ではレイタンスだけを取り除いた供試体なので表面の凹凸が非常に小さく, 表面積も 2536mm^2 である。これに対して図 - 11 (b) の Type 2 では, ショットブラストにより表面処理を行っているため表面の凹凸も大きく, 複雑な形状をしており, 表面積は 2849mm^2 となっており Type 1 よりも 10%以上増加している。

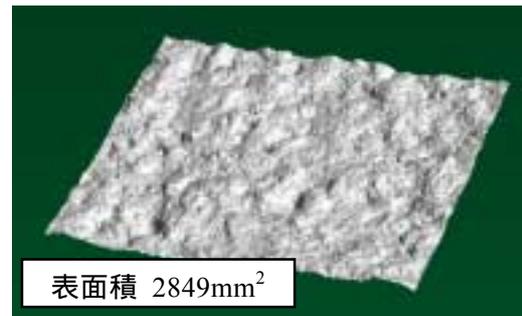
7. まとめ

本研究のまとめを以下に示す。

- (1) ショットブラストによって表面処理を施した供試体は, 打継面を有しない供試体と同様の強度特性を示す。
- (2) ひび割れの進展は, レイタンスを取り除いただけの供試体ではひび割れが打継面に達すると, 打継面に沿って進展し, 破壊に至っているが, ショットブラストによって表



(a) Type 1



(b) Type 2

図 - 11 表面形状および表面積

面処理を施した供試体では, 打継面を有しない供試体と同様に打継面の影響をほとんど受けていない破壊性状を示す。

- (3) レイタンスを取り除いただけの供試体は疲労荷重を受けることによりタフネスが大きく減少するが, ショットブラストによる表面処理を施した供試体および打継面を有しない供試体のタフネスは減少率が著しく小さくなる。
- (4) ショットブラストによる表面処理を行ったコンクリート表面は表面積が増加し, また, 形状も複雑になる。

以上のことより, ショットブラストによる表面処理を行うことは, 若材齢に疲労荷重が作用することによる曲げ荷重低下および付着強度低下の抑制に有効であると言える。

参考文献

- 1) 徳光善治ほか: 繰返し応力によるコンクリート圧縮疲労試験方法(案), コンクリート工学, Vol.23, No.3, pp.38, 1985.3
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 基準編, 平成 11 年度版, 1999