

論文 超速硬軽量コンクリートを打ち継いだ梁の疲労特性

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一つに、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、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、本研究では粗骨材に軽量骨材および川砂利を用いた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，軽量骨材，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）の補強工事が多く報告され、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で補強した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。また、首都高速道路では死荷重軽減のために軽量骨材を用いたコンクリート床版もあ

るが、これについても行われていない。

そこで本研究では、アウィン系超速硬セメントを用いて、粗骨材に軽量骨材および比較のために川砂利を用いた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に軽量骨材（表乾密度 1.14 g/cm³，吸水率 3.00%，F.M. 6.44，最大寸法 15mm）または静岡県天竜川産の川砂利（表乾密度 2.67g/cm³，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/cm³，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/cm³，F.M. 2.18，吸水率 1.73%）を質量

*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

粗骨材の種類	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						
軽量骨材	旧	45	45	185	410	73	677	398		820	16.4		
	新	38.5	55	158	410	99	920	394	60		4100	8200	
川砂利	旧	45	64	184	409	101	937	594		818	16.4		
	新	38	60	160	420	108	997	749	60		4200	8400	

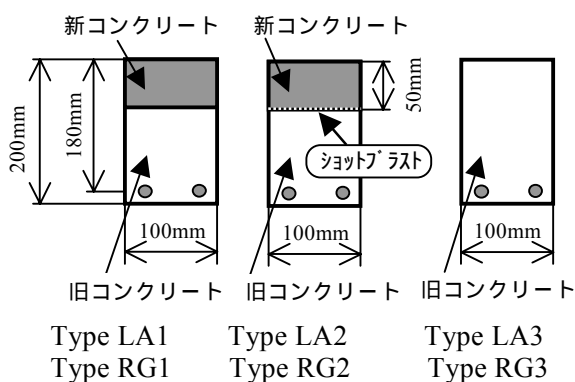


図 - 1 供試体断面図

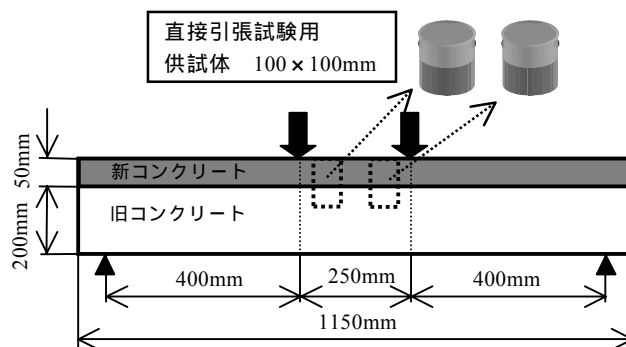


図 - 2 供試体寸法，载荷方法および直接引張試験用供試体採取位置

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 AE 減水剤および AE 剤を用い，新コンクリート部には高性能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。コンクリートの配合は表 - 1 に示すとおりである。

3. 供試体および载荷方法

図 - 1 に各供試体の断面図，図 - 2 に供試体寸法，载荷方法および直接引張試験用供試体採取位置を示す。载荷方法は，2 点集中载荷とし，供試体の支点はピン支持とした。供試体は図に示すとおり軽量骨材を用いた供試体を Type LA1 ~ LA3，川砂利を用いた供試体を Type RG1 ~ RG3 とした。Type LA1, RG1 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 LA2, RG2 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 LA3, RG3 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 LA1, RG1 および Type LA2, RG2 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 150mm，幅 100mm，長さ 1150mm 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。その後，Type LA1, RG1 は旧コンクリート上面のレイタンスだけを取り除き，Type LA2, RG2 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 LA3, RG3 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，打継面を有する Type LA1, RG1 および Type LA2, RG2 については付着強度を求め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，疲労荷重载荷後に疲労用供試体（疲労荷重を受けた供試体）および比較用供試体（疲労荷重を受けていない供試体）の载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（100×100mm）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荷重波形を示す。疲労試験に用いた波形は sin 波で、振動数は 10Hz、荷重回数は 100 万回とした。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、繰返し荷重の荷重速度は 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。

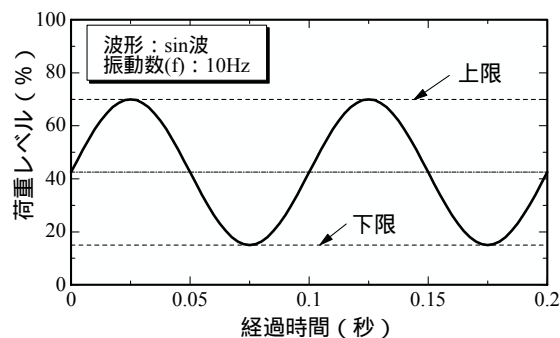


図 - 3 疲労試験に用いた波形

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（疲労開始強度）を基に、荷重レベルを設定し疲労試験を開始する。所定の荷重回数が終了した後、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、直接引張試験で得られた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。

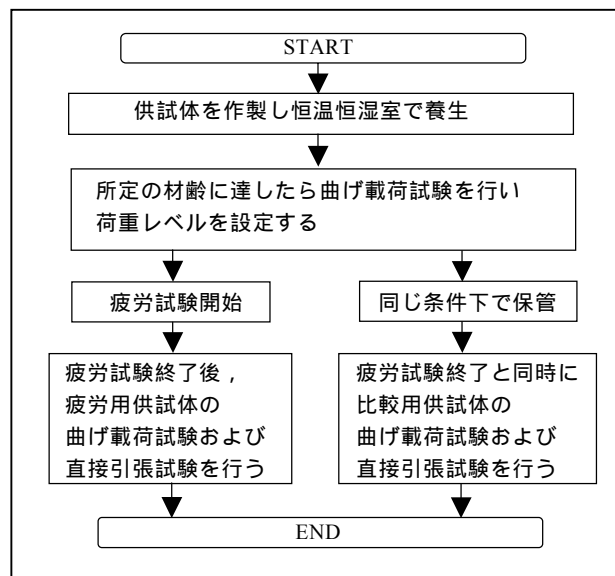


図 - 4 疲労試験のフローチャート

図 - 5 は各供試体の曲げ荷重比（残存曲げ荷重 / 比較曲げ荷重）を示している。レイタンスを取り除いただけの Type LA1, RG1 では 0.85, 0.83 と曲げ荷重の減少が大きいが、ショットブラストによる表面処理を施した Type LA2, RG2 では 0.92, 0.95 と減少率が小さくなり、打継面を有しない Type LA3, RG3 の 0.95, 0.96 とほぼ同程度の値を示している。このことより、軽量骨材を用いた供試体は川砂利を用いた供試体と同様に、増厚を行う際にショットブラストによる表面処理を施すことにより、疲労荷重を受けることによる曲げ荷重の減少を抑制できることが明らかとなった。

6.2 付着強度比

図 - 6 は打継面を有する各供試体の付着強度比（残存付着強度 / 比較付着強度）を示している。この図より Type LA1, RG1 の付着強度比は 0.55, 0.36 となっており、Type LA2,

6. 実験結果および考察

6.1 曲げ荷重比

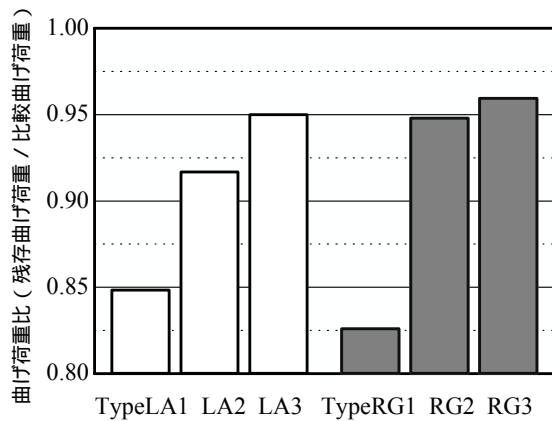


図 - 5 曲げ荷重比

RG2 では 0.78, 0.77 となっている。このことより、軽量骨材を用いた供試体は川砂利を用いた供試体と同様に、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。よって、付着強度においても粗骨材の種類にかかわらず、ショットブラストによる表面処理を施すことは、疲労荷重を受けることによる付着強度の減少を抑制できることがわかる。

6.3 ひび割れの進展

図 - 7 (a) ~ (c) は Type LA1 ~ LA3 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 - 7 (a) の Type LA1 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からひび割れが発生し、打継面に達すると打継面に沿って横方向に進展し、その後、打継面で剥離して破壊に至っている。Type LA1 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 - 7 (b) の Type LA2 の疲労用供試体では Type LA1 と同様に疲労荷重を受けることにより、下縁からひび割れが発生しているが、ひび割れが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 - 7 (c) の Type LA3 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 LA2 と類似している。また、ここでは示していないが川砂利を用い

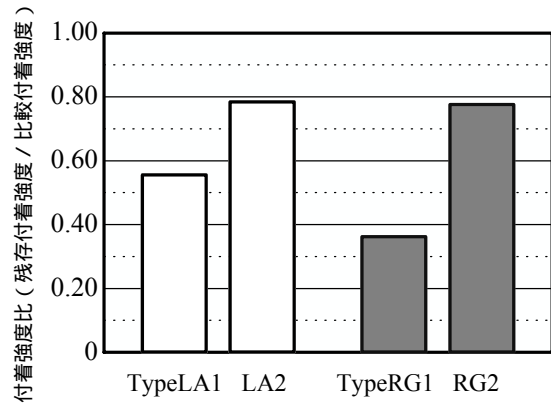


図 - 6 付着強度比

た供試体においても Type RG1 は打継面で剥離して破壊し、Type RG2 は打継面で剥離することなく破壊に至っており、軽量骨材を用いた供試体と同様の破壊性状を示している²⁾。これらの実験結果より、ひび割れの進展においても粗骨材の種類による影響は小さく、表面処理の方法が大きく影響していることがわかる。

6.4 荷重とたわみの関係、曲げタフネス

図 - 8 (a) ~ (c) は Type LA1 ~ LA3 の荷重とたわみの関係を示したものである。また、図 - 9 に各供試体の曲げタフネス³⁾を示す。図 - 8 (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この破壊に至るまでの点とした。

図 - 8 (a) に示した Type LA1 の比較用供試体ではたわみが 2.5mm に達するまでは曲げ荷重は増加しているが、その後は曲げ荷重の増加も緩やかとなり、たわみが 9mm 付近で最大曲げ荷重 46kN 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、また最大曲げ荷重も小さくなっている。図 - 8 (b) より、Type LA2 の比較用供試体ではたわみが 3.0mm に達するまでは曲げ荷重が増加しているが、その後は曲げ荷重の増加も緩やかとなり、たわみが 10mm で最大曲げ荷重 49kN 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、

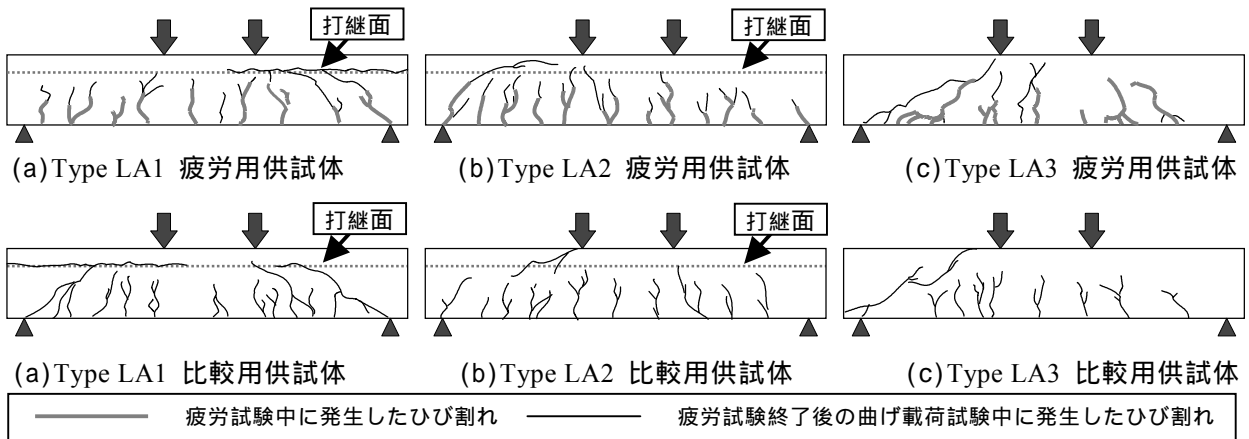


図 - 7 ひび割れ図

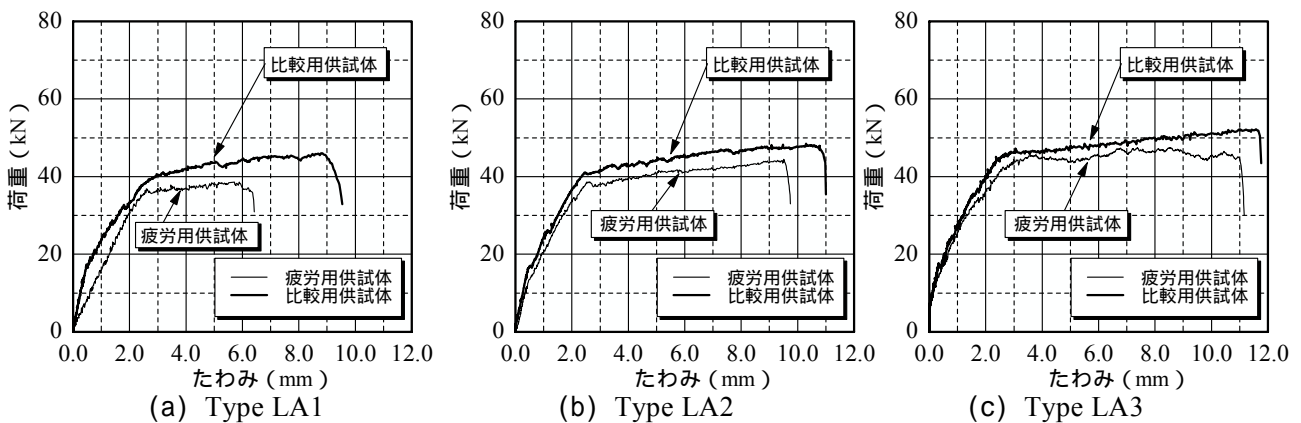


図 - 8 荷重とたわみの関係

最大曲げ荷重が小さくなっているが、Type LA1 ほど大きな減少は見られない。図 - 8 (c) より、Type LA3 では打継面を有しないので、比較用供試体ではたわみが 3.0mm に達するまでの曲げ荷重はさらに大きくなっている。その後は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 51kN 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 LA2 と同様に大きな減少は見られない。

図 - 9 より Type LA1 の曲げタフネスは比較用供試体では 365kN・mm、疲労用供試体では 194kN・mm となり、疲労荷重を受けることにより曲げタフネスが 53%まで大きく低下している。Type LA2 の比較用供試体では 450kN・mm、疲労用供試体では 365kN・mm となり、疲労荷重を受けることにより 80%まで低下しているが、Type LA1 よりも曲げタフネスの低下

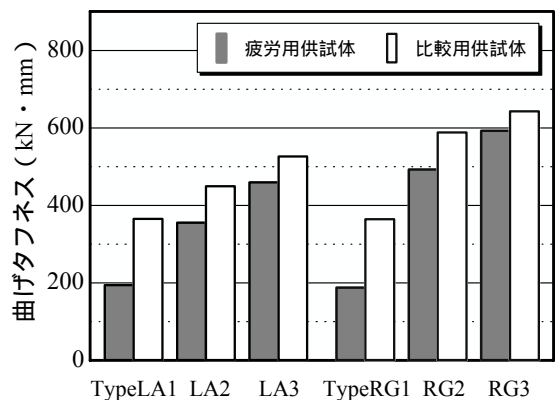


図 - 9 曲げタフネス

が抑制されている。Type LA3 の比較用供試体では 527kN・mm、疲労用供試体では 459kN・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 87%と全タイプの中で最も小さい。川砂利を用いた Type RG1 ~ RG3 についても、疲労荷重を受けることによる曲げタフネスの減少の傾向は軽量骨材を用いた場合と同様の傾向を示している。

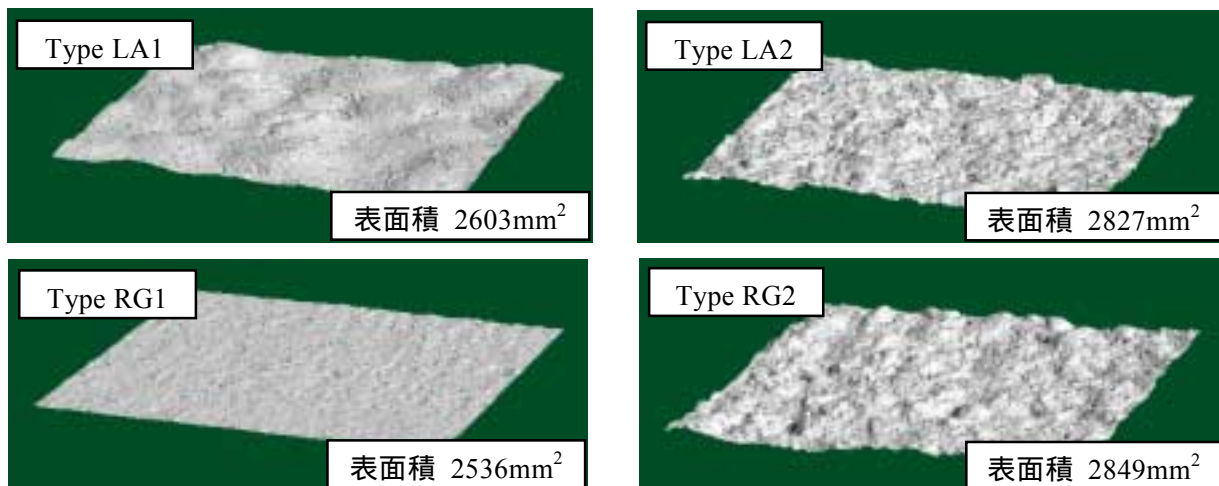


図 - 10 表面形状および表面積

6.5 打継面の表面形状および表面積

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表面形状を計測した。計測範囲は 50mm×50mm である。

図 - 10 に測定した表面形状および表面積の一例を示す。Type LA1 では軽量骨材の浮き上がりにより表面に凹凸があり、表面積は 2603mm² となっている。これに対して Type LA2 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 2827mm² となっており Type LA1 よりも表面積が 8%程度増加している。Type RG1 では表面の凹凸が非常に小さく、表面積も 2536mm² となっているが、Type RG2 では Type LA2 と同様に、表面の凹凸が大きく、表面積は 2849mm² となっており Type RG1 よりも 10%以上増加している。

これらのことが付着強度の増加に影響しているものと考えられる。

7. まとめ

本研究のまとめを以下に示す。

- (1) 軽量骨材を用いた供試体は、川砂利を用いた供試体と同様に、ショットブラストによって表面処理を施すことにより、打継面を有しない供試体と同様の強度特性を示す。
- (2) ひび割れの進展についても、粗骨材の種類にかかわらず、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) 粗骨材の種類にかかわらず、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は疲労荷重を受けることによるタフネスの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軽量骨材を用いた場合、川砂利を用いた場合、どちらも表面積が増加し、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、粗骨材の種類にかかわらず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) 河野伊知郎ほか：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，コンクリート工学年次論文報告集 第25巻 2185，pp.1105-1110，2003.7
- 3) 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