

論文 実規模 PC スノーシェッドの AFRP シート補強による耐衝撃性向上効果実験

竹本伸一*1・今野久志*2・三上 浩*3・松岡健一*4

要旨: しなやかで高引張強度を有する AFRP シート補強による PC スノーシェッドの耐衝撃性向上効果を検討するため、実スノーシェッド上部工に供されている T 型 PC 桁を実大規模で製作し、無補強および AFRP シート補強した場合に着目して重錘落下衝撃実験を行った。本実験結果より、AFRP シート補強することにより桁の耐衝撃性能が向上し、桁のたわみ量および剛性低下を効果的に抑制できることが明らかとなった。

キーワード: PC スノーシェッド, AFRP シート, 衝撃実験, 耐衝撃補強

1. はじめに

平成 10 年 11 月、北海道南西部の国道 229 号歌棄(うたすつ)覆道にて比較的小規模な落石により主桁フランジ部が損傷し、国道上にコンクリート片が落下する事故が発生した。本覆道は冬期における国道への雪崩および多量の積雪を防止するための PC 製スノーシェッドであり、落石荷重を想定した構造設計となっていない。このことから、今後の落石事故の再発を憂慮し、本覆道の耐衝撃性向上に関する補強工事を行うこととなった。補強工法としては落石荷重の作用する頂版部の緩衝工として三層緩衝構造(以下、TLAS)の設置、フランジ部コンクリートの裏面剝離防止を目的としたウレタン樹脂吹き付けおよび耐衝撃性能に優れたアラミド繊維強化プラスチック(以下、AFRP)シートによる曲げ・せん断補強工法が採用された。また、本補強工事を実施するに当たり、各工法の補強効果に着目した実規模 PC 桁の重錘落下衝撃実験が行われた。

本研究はこれらの実証実験の一環として行われた AFRP シート補強による耐衝撃性向上効果に着目した実験について検討を行ったものである。本実験では AFRP シート補強による耐衝撃性向上効果を効率的に検討するため、TLAS を設置せ

ずに、50 cm 厚の敷砂単層を重錘落下部に設置し、無補強および AFRP シート補強した場合について比較検討を行った。本研究における検討項目は重錘衝撃力、応答変位と実測歪から算定した応答曲げモーメントの分布、桁の剛性特性およびひび割れ分布性状である。

2. 実験の概要

2.1 試験体

図-1 に本実験に用いた試験体の形状寸法、配筋および歪ゲージ貼付位置を示す。試験体は歌棄覆道の上部工 T 型 PC 桁を再現し実大規模で製作したものである。試験体の設計はコンクリートの設計基準強度を 58.8 MPa とし、主鉄筋には SD295A D13、PC 鋼より線には SWPR7A1T-12.4 を用い、鋼より線の緊張力を 84.63 kN / 本として行っている。PC 桁の上下端鉄筋には衝撃荷重載荷時における応答曲げモーメント算定のために、桁中央部から両支点に向かって 1 m 間隔で歪ゲージを貼り付けている。実験時におけるコンクリートは材齢が 31 日で平均圧縮強度 $f'_c = 60.47$ MPa であった。表-1 には軸方向筋の力学的特性を示している。

図-2 に AFRP シート補強の概要を示す。本補

*1 ドービー建設工業(株) 札幌本店 設計部 部長代理(正会員)

*2 北海道開発局開発土木研究所 研究員 構造研究室 工修(正会員)

*3 三井建設(株) 技術研究所 主席研究員 工博(正会員)

*4 室蘭工業大学 教授 工学部建設システム工学科 工博(正会員)

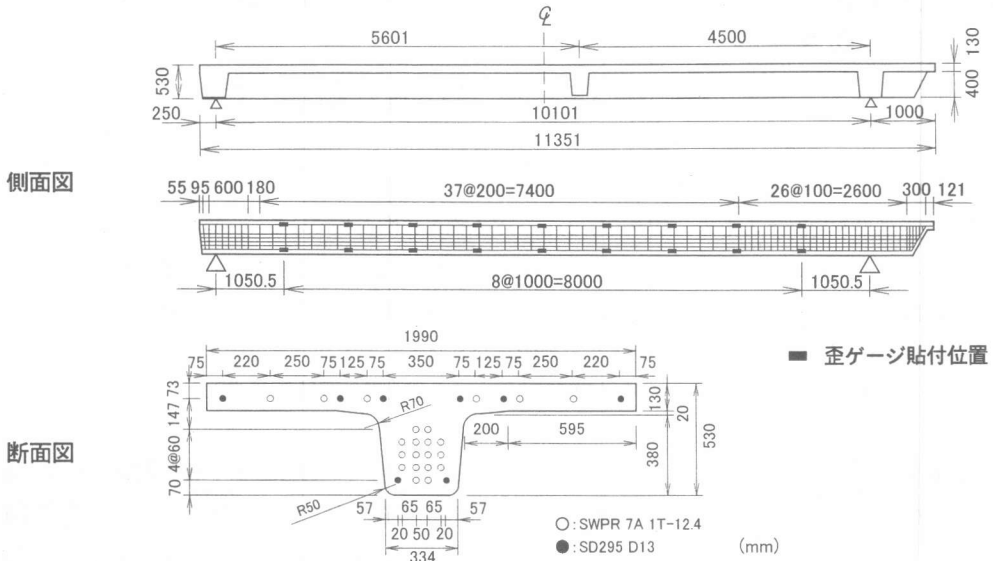


図-1 試験体の概要

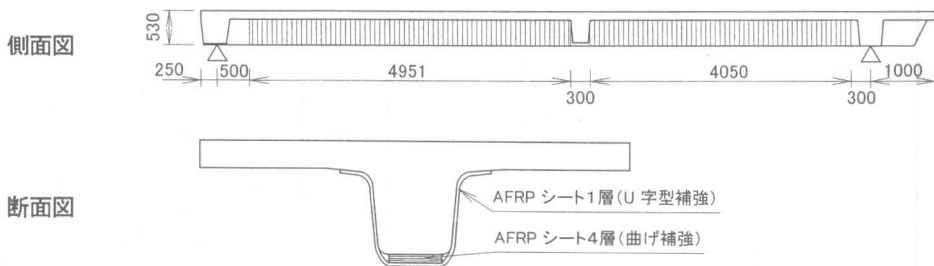


図-2 AFRP シート補強の概要

強工法では、まず桁底面に曲げ補強材として幅 24.3 cm で保証引張耐力 1200 kN/m 程度の AFRP シート (目付量 820 g/m², 厚さ 0.565 mm) を 4 枚貼り付け、さらに曲げ補強シートの剝離防止およびせん断補強を目的としてスパン全長に渡り同シート 1 枚をフランジハンチ部まで巻き付け U 字型補強を施している。AFRP シートの曲げ補強量は TLAS を設置した場合に対して設計することとし、文献 1) に示されている手法の下に、(1) 想定落石エネルギーを 588 kJ (質量 1.5 ton, 落下高さ 40 m の落石エネルギーに相当) として TLAS から桁への伝達衝撃力 P_t を算定し、(2) P_t の分担力を 1 組の覆道骨組構造に作用させた場合の三次元弾性衝撃応答解析結果より求められる断面力を用いて決定した。詳細は文献 2) を参照されたい。

表-1 軸方向筋の力学的特性

| 補強材名 | 弾性係数 (GPa) | 降伏強度 (GPa) | 引張強度 (GPa) |
|---------|------------|------------|------------|
| 鉄筋 | 205.9 | 0.390 | 0.531 |
| PC 鋼より線 | 195.0 | 1.88 | 2.06 |

表-2 各試験体の重錘落下高さ

| 試験体名 | 緩衝材 | 補強材 | 重錘落下高さ (m) |
|------|-------|------|--|
| G-N | 敷砂 | - | 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 13.5, 15.0 |
| G-A | 50 cm | AFRP | 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0, 17.5, 20.0, 22.5 |

2.2 重錘落下衝撃実験

本実験は重錘落下高さを逐次増加させる漸増繰り返し衝撃載荷により行った。表-2には各試験体における重錘の繰り返し落下高さを示している。

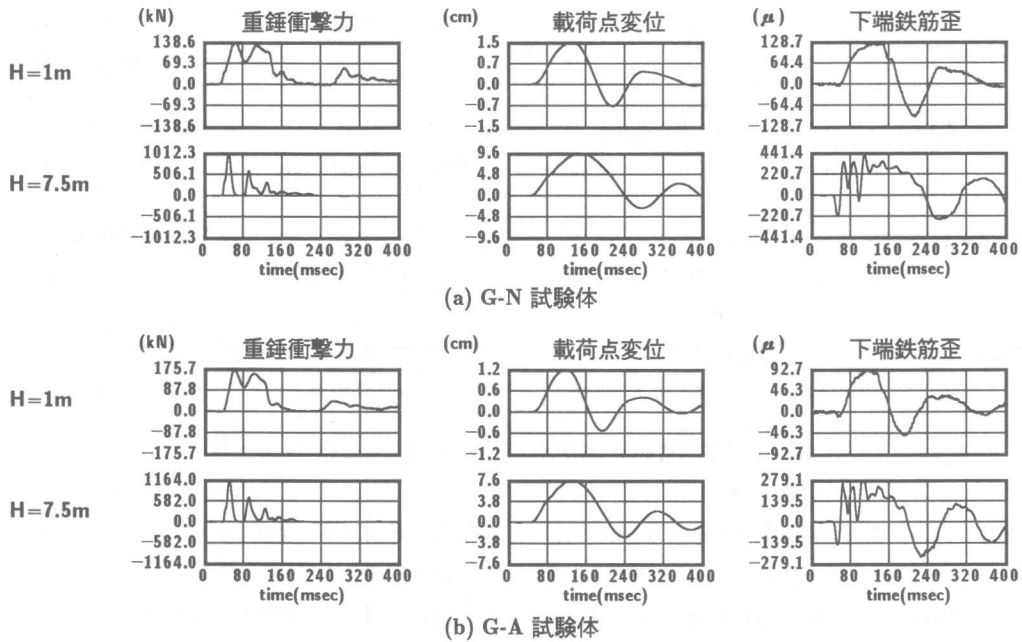


図-3 時刻歴波形分布性状

表中、G-N は現状の覆道と同様の無補強試験体、G-A は AFRP シート補強試験体を意味している。なお、本実験において G-N は荷重点近傍下縁かぶりコンクリート部に割裂ひび割れが発生し、コンクリート片が剥落する状態に至った時点で、G-A は横桁近傍における曲げ補強シートが破断し、桁の健全性が保持されない状態に至った時点で実験を終了している。実験では質量 2 ton の重錘 (直径: 1 m, 高さ: 約 1 m) をトラッククレーンにより所定の高さまで吊り上げ、自由落下させることにより行った。試験体はできるだけ単純支持状態に近づけるように 50 φ の鋼棒上に設置した。また、試験体支点部のリバウンドによる跳ね上がりを防止するため、支点基部に設置している H 型钢と桁上縁に配置した押さえ治具とを PC 鋼棒により緊結した。桁中央部の重錘落下位置には重錘の転倒および桁の局所的な損傷を防止するため木製の枠を設け 200×200 cm, 50 cm 厚の敷砂を設置した。

本実験における測定項目は、重錘加速度、応答変位および上下端鉄筋歪である。なお、応答変位および上下端鉄筋歪は桁中央部から両支点に向か

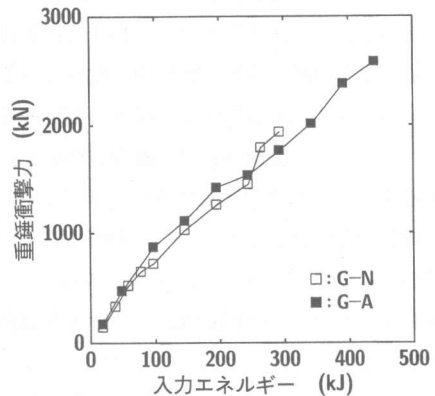


図-4 入力エネルギーと最大重錘衝撃力との関係

って 1 m 間隔で測定することとした。また、変位測定は桁下に設置したレーザ式変位計の破損を考慮し、落下高さ $H=7.5\text{m}$ までの測定とした。

3. 実験結果および考察

3.1 各応答波形分布性状

図-3 には、両試験体に関する落下高さ $H=1, 7.5\text{m}$ の場合の重錘衝撃力、荷重点部の応答変位および下端鉄筋歪の時刻歴波形分布を示している。図より、重錘衝撃力波形の概形は継続時間が若干

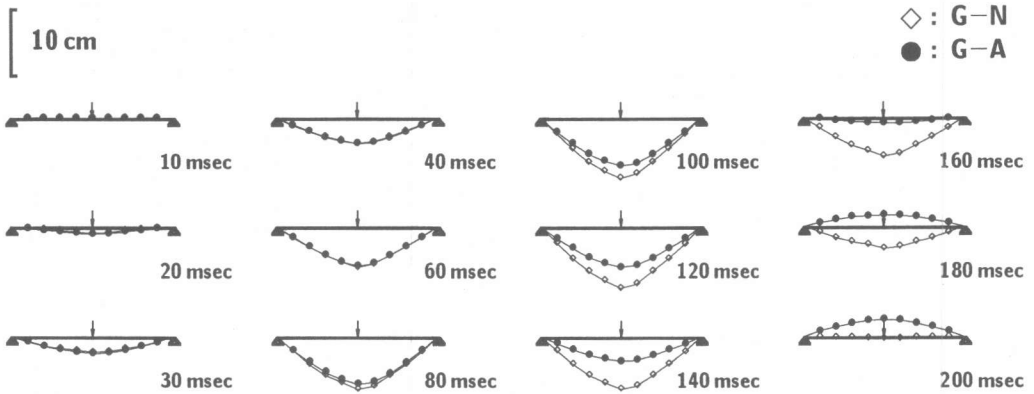


図-5 応答変位分布の経時変化の比較 ($H = 7.5 \text{ m}$ 落下時)

異なるものの、補強の有無にかかわらず類似の性状を示していることがわかる。特に落下高さ $H = 1 \text{ m}$ の場合には、衝突速度が小さいことより、衝突初期における波動が支点到達する前の重錘と載荷点近傍部断面間における相互作用によって発生すると考えられる衝撃力と、桁全体の最低次振動モード下の載荷状態が連続的に起きている。一方、 $H = 7.5 \text{ m}$ の場合には、重錘の衝突速度が大きいと重錘と載荷点近傍部断面との相互作用による衝撃力と桁の最低次振動モード下に発生する衝撃力波形が独立して発生し、継続時間の短い波が孤立して発生している。また、いずれの桁、落下高さにおいても衝撃初期に発生する重錘衝撃力が最も大きい。

載荷点変位波形および下端鉄筋歪波形を見ると、落下高さの小さい段階から AFRP シート補強による各最大振幅の低減効果と振動周期から評価される曲げ剛性向上効果が確認できる。

3.2 最大重錘衝撃力

図-4に入力エネルギーと最大重錘衝撃力(以後、重錘衝撃力)との関係を示す。重錘衝撃力は AFRP シート補強の有無に関わらず入力エネルギーの増加とともにほぼ線形に増大している。このことから、重錘衝撃力は補強の有無にかかわらず、桁の曲げ剛性の劣化の進行に影響されず入力エネルギーに対して線形に推移していることが分かる。これは、図-3からも明らかのように、最大重錘

衝撃力が衝撃初期に発生していることより、いずれの桁も貫通する斜めひび割れの発生がなく載荷点近傍部断面のせん断剛性低下が小さいことや重錘衝突部が敷砂緩衝材によって保護され、圧壊等の劣化が小さいことによるものと考えられる。また、G-A の最大入力エネルギーは G-N に比して 1.5 倍程度大きくなっていることから、AFRP シートの曲げ補強による耐衝撃性向上効果が顕著に現れている。

3.3 応答変位および応答曲げモーメントの分布性状

図-5に $H = 7.5 \text{ m}$ 落下時における応答変位分布の経時変化を示している。図では実験において重錘衝撃力が励起した時刻を 0 ms として 40 ms までは 10 ms 間隔、それ以降は 200 ms まで 20 ms 間隔で各時刻の応答変位分布を示している。図より、両試験体の分布性状は 80 ms 程度までほぼ同様な性状を示しているが、ほぼ最大値を示す 100 ms 以降では両試験体で大きく異なった性状を示している。すなわち、AFRP シート補強した G-A は 160 ms 経過後にほぼ零変位レベルに復元しているのに対し、無補強の G-N は 200 ms 経過後に零変位レベルに復元しており、両者の劣化度に大きな差のあることがわかる。また、 $H = 7.5 \text{ m}$ 落下時の桁中央部の最大応答変位は、前述の図-3より G-N で 9.6 cm、G-A で 7.6 cm となっており、AFRP シート補強によって桁の劣

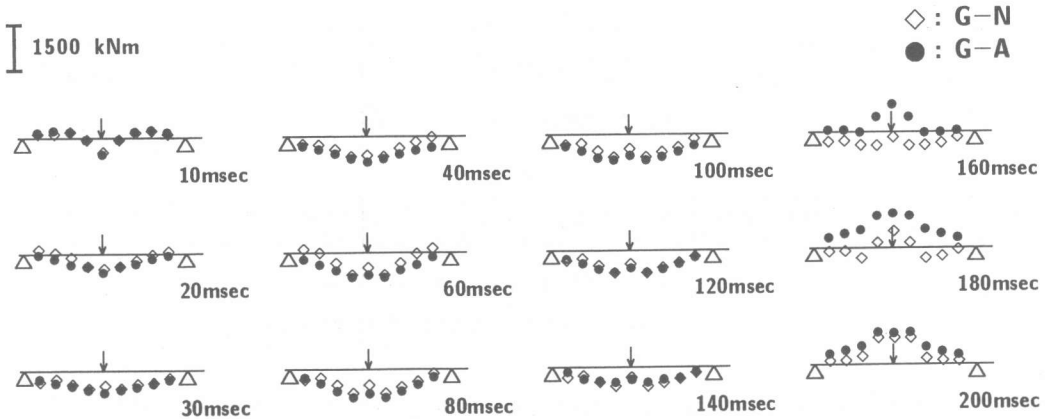


図-6 応答曲げモーメント分布の経時変化の比較 ($H = 7.5 \text{ m}$ 落下時)

化の進行を抑制するとともに桁の曲げ剛性が向上し、変位振幅および振動周期が低減していることがわかる。

図-6には、 $H = 7.5 \text{ m}$ 落下時における応答曲げモーメント分布の経時変化を図-5と同様の時刻歴で示している。なお、各断面の曲げモーメント値は、桁の各構成材料の力学的特性およびPC鋼より線の初期導入プレストレス量を考慮し、上端鉄筋歪と下端鉄筋歪波形をもとに断面内の歪の線型変化および弾性挙動を仮定し、断面分割法を用いて算出している。

図より、両試験体ともに衝撃初期においてスパン方向に3次モードが卓越する分布性状を示した後、最低次振動モードに移行し140ms経過時までこの性状が継続している。その後、G-Nの場合は徐々に負荷荷状態に推移しているが、G-Aの場合は160ms経過後に載荷点において鋭角な不連続となる3次モード状の負荷荷状態となり、時間経過とともに1次モード状に推移している。また、図-5の変位分布では100msから140ms間で両者の分布が大きく異なっているのに対して、図-6の曲げモーメント分布では両試験体で類似の分布を示している。このことは、同一曲げモーメントに対してG-Nはひび割れの発生等により変位振幅が増加しているのに対して、G-AはAFRPシートによって効率よく曲げ補強され、変位量が低減していることを裏付けている。なお、

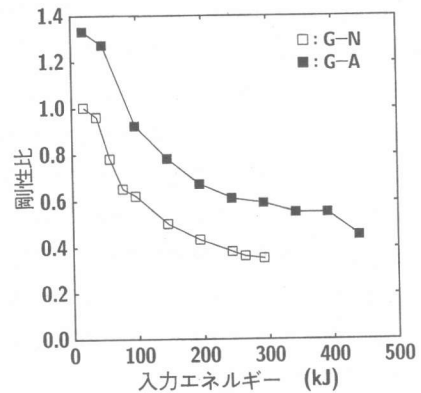


図-7 剛性比と入力エネルギーとの関係

G-Aの160ms経過時における3次モードの状態は、曲げ補強により下縁部が健全であるため載荷点部の負荷荷状態になることによるリバウンド量が大きくなったことによるものと推察される。

3.4 剛性特性

図-7には下端鉄筋歪の衝撃初期における正弦半波の波動継続時間が弾性状態における最低次固有振動状態の半周期に等しいと仮定して曲げ剛性 EI を評価し、両試験体の入力エネルギーに対する曲げ剛性の劣化の状況が無補強試験体G-Nの処女載荷時における値を基準値として無次元化し、剛性比の形で整理して示している。

図より、入力エネルギーの最も小さい場合におけるAFRPシート補強したG-Aは、無補強のG-Nに比較して1.35倍程度の曲げ剛性の向上を

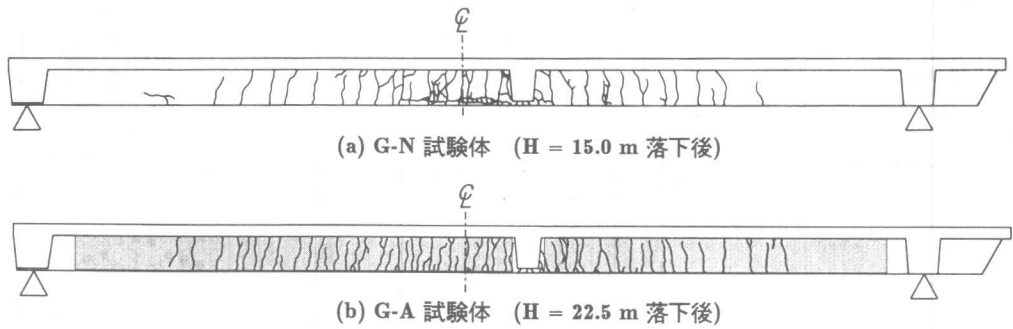


図-8 実験終了後におけるひび割れ分布性状

示していることが分かる。入力エネルギーの増加に伴い、いずれの桁もひび割れの発生等による剛性低下の傾向を示している。この減少割合は両試験体で類似のものとなっており、補強効果は終局近傍まで保持されていることが分かる。また、桁を AFRP シート補強することにより、入力エネルギーを 300 kJ から 400 kJ 程度まで向上させることができ、かつその場合の剛性は無補強 G-N の 100 kJ 前後の入力レベルに保持することができる。なお、本実験結果は繰り返し載荷時のもので、実現象のように単一載荷の場合には本実験以上の補強効果が期待できるものと判断される。

3.5 破壊性状

図-8 には実験終了後のひび割れ分布性状を示している。なお、G-A の場合はシート表面から観察されたひび割れ分布を示している。図より、AFRP シート補強した G-A は無補強の G-N に比してひび割れ間隔は小さく、かつその分布範囲は広がっていることが分かる。これは、RC 梁を用いた静載荷実験結果³⁾と同様の AFRP シート曲げ補強によるひび割れ分散効果であるものと考えられる。また、G-N の載荷点近傍下縁部には部材軸方向に進展する割裂ひび割れや斜めひび割れの発生、およびそれらに伴うコンクリート片の剥落が見られる。一方、G-A では曲げ補強用 AFRP シートの上からさらに U 字型にシートを巻き付けていることより、G-N のような破壊性状は示されていない。このことから、本補強工法において採用した AFRP シートの U 字型補強により、曲げ補強シートの剝離のみならずコンクリートのせ

ん断破壊やかぶりコンクリートの剥落などを効果的に抑制することができるものと判断される。

4. まとめ

本研究は、AFRP シート補強による実規模 PC スノーシェッドの耐衝撃性向上効果に着目して重錘落下衝撃実験を行い、詳細に検討を行ったものである。本実験により得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 本 AFRP シート補強工法により、スノーシェッド用 PC 桁の耐衝撃性能が向上し、桁のたわみ量および剛性低下を抑制することができる。
- (2) 本研究で採用したシートの U 字型補強により、曲げ補強シートの剝離のみならずコンクリートのせん断破壊やかぶりコンクリートの剝離を効率的に抑制することが可能となる。

参考文献

- 1) 土木学会：構造工学シリーズ8 ロックシェッドの耐衝撃設計，1998。
- 2) 岸 徳光，今野久志，三上 浩，川瀬良司，栗橋祐介：実規模 PC スノーシェッドの耐衝撃性向上に関する重錘落下衝撃実験，構造工学論文集，Vol.46A，1875-1885，2000.3
- 3) 栗橋祐介，岸 徳光，三上 浩，松岡健一：RC 梁における載荷点間隔が FRP シートの曲げ付着性状に与える影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.1555-1560，1999。