

論文 水中適用型エポキシ樹脂により接着した CFRP グリッドの付着性能に及ぼす補強量の影響に関する研究

根本 正幸*1・坂本 宏司*2・呉 智深*3・岩下 健太郎*4

要旨: 本研究では、水中適用型の高流動性を有するエポキシ樹脂で CFRP グリッドをコンクリート表面に接着した場合の付着性能に対して、実補強工事レベルである補強量を考慮した両引きせん断付着試験を実施し、付着強さおよび有効付着長に対しては既報で提案した簡易算定式に基づく評価を行った。その結果、界面剥離破壊エネルギー G_f は既報における小実験と同等以上のレベルにあることが明らかになり、さらに提案した有効付着長に関する簡易算定式も適用可能であることも明確にでき、この式の実構造物に対する適用性が示唆された。

キーワード: 耐震、曲げ・せん断補強、水中適用型、エポキシ樹脂、FRP グリッド、有効付着長

1. はじめに

水辺や水中にある鉄筋コンクリート構造物を補強する場合には、現段階では函体などで周囲を囲った上で水を排除してドライ空間を作り出してから施工する方法が主流である。しかし、大型重機や多大な労働力を必要とするため、かなり高コストである。既報¹⁾²⁾³⁾⁴⁾では、水中で硬化、接着可能なエポキシパテを用いて CFRP グリッドをダイバーの手作業により接着する技術および、水中適用型高流動エポキシ樹脂を用いて、接着対象の周辺に事前に設置した SUS 型枠とコンクリートの隙間に CFRP グリッドを設置した上でこの樹脂を流し込み、内部の水と置換することにより CFRP グリッドを接着、補強する技術を提案した。また、既報⁴⁾では、高流動エポキシ樹脂接着 CFRP グリッドの隙間厚さや全体樹脂厚さを考慮した両引きせん断試験により、CFRP グリッドの付着挙動を検証した上で、既存の算定式を応用して CFRP グリッドの有効付着長と付着耐力の算定式を提案し、上記の実験結果を用いて提案式の有意性を検討した。既報では、試験体寸法を考慮して、少補強量の CFRP グリッドを用いての実験しか行えなかったが、本研究では、実補強工事レベルにある補強量の CFRP グリッドを用いた試験体による両引きせん断試験を実施し、補強量や接着幅の違いによる付着性能について検証した。さらに、本技術における接着端部の定着長さについて、従来の連続繊維シート接着工法に比べて、大幅に短縮できることを先の提案式により実証した。

2. せん断試験による付着性能

2.1 試験体の水準と製作

実験水準および CFRP グリッドの構成を表-1に、コンクリートおよび高流動エポキシ樹脂の性状を表-2に、試験体の形状を図-1に示す。陸上構造物の補強工事に対して一般的に使用されている補強量の CFRP グリッドを用いた水準を「A」、少ない補強量の CFRP グリッドを重ね合わせることによる影響を検討するための水準として、少補強量の CFRP グリッドを用いた水準を「B」と設定した。また、既報⁴⁾における試験対象と同様の小型試験体(100×100mm)に対して水準「B」と同じ補強量の CFRP グリッドを接着した水準「C」を設定して、本実験の再現性を検討した。ここで、CFRP グリッドの「本工法における換算公称厚さ」として、軸方向1列当りの含まれている炭素繊維の断面積を1列の分担する接着幅で割った値を設定した。断面構成の詳細を図-2に示す。大断面積の CFRP グリッドを用いた両引きせん断試験を実施するために、接着幅 150mm×接着長さ 550mm を可能とする大型のコンクリート試験体を新たに作製した。母材コンクリートの側面に CFRP グリッドと木製の型枠を設置し、高流動性エポキシ樹脂を流し込み接着した。なお、CFRP グリッドの接着にあたり、実施工と同様に、型枠内に入れた水とエポキシ樹脂を置換させて接着した。また固定側 CFRP グリッドは、応力が伝達しないように仕切板を挟んでコンクリートの上に置いた鋼製ジグに圧着して固定した。さらに、エポキシ樹脂の養生条件は室内にて 14 日以上養生とした。

*1 日鉄防蝕(株) 技術部 (正会員)

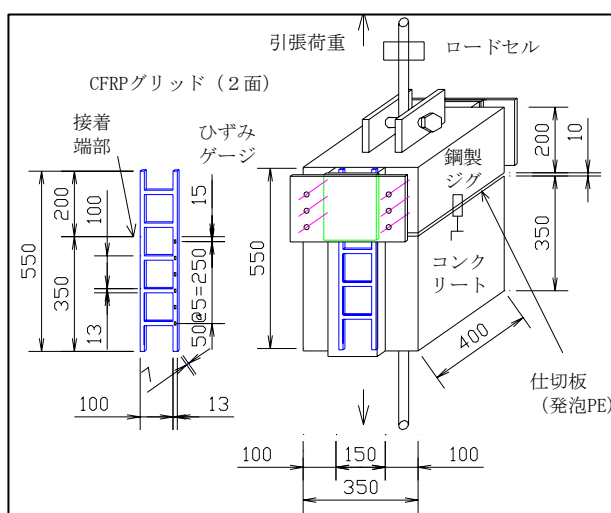
*2 日鉄防蝕(株) エンジニアリング営業部

*3 茨城大学 工学部 都市システム工学科 工博 (正会員)

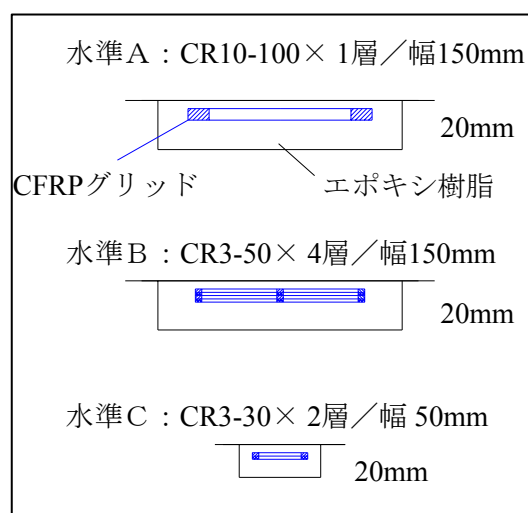
*4 茨城大学 大学院 理工学研究科 VBL 工博 (正会員)

表－1 実験水準およびCFRPグリッドの構成（片面あたり）

水準	CFRP グリッド	補強繊維の構成 (断面積×含有率×列×層)	繊維量 (mm ²)	引張軸 の列数	1列当り の繊維量 (mm ²)	1列当りの 分担幅 (mm)	換算公称 厚さ t (mm)
A	CR10-100	39.2mm ² ×43%×2列×1層	33.712	2	16.856	100	0.169
B	CR 3-50	4.4mm ² ×43%×3列×4層	22.704	3	7.568	50	0.151
C	CR 3-30	4.4mm ² ×43%×2列×2層	7.568	2	3.784	30	0.126



図－1 試験体の形状（水準A）



図－2 各水準の断面構成の詳細

2.2 試験結果

試験時の荷重と変位（鋼製ジグとコンクリート間）の一例を図－3に、試験後の剥離状況を写真－1に示す。図－3より、コンクリート塊とグリッド固定用鋼製ジグ境界（接着端部）近傍のコンクリートにひび割れが発生した後、長手方向に段階的な剥離進展が発生し、最終的にCFRPグリッドの全面剥離に至った。この挙動は既報⁴⁾の試験室レベル寸法の試験体でも同様であり、本実験の再現性を示唆している。次に、日本コンクリート工学協会、補強技術研究委員会報告書⁶⁾に示されるCFRPシートの付着強さの評価式(1)に基づき、付着強さの評価指標として界面剥離破壊エネルギー（以下 G_f と略）を算出した。

$$G_f = P_{\max}^2 / (8b^2 \cdot E_{fip} \cdot t_{fip}) \quad (1)$$

G_f : 界面剥離破壊エネルギー (N/mm)

P_{\max} : 最大荷重 (N)

b : CFRPシート幅の平均値 (mm)

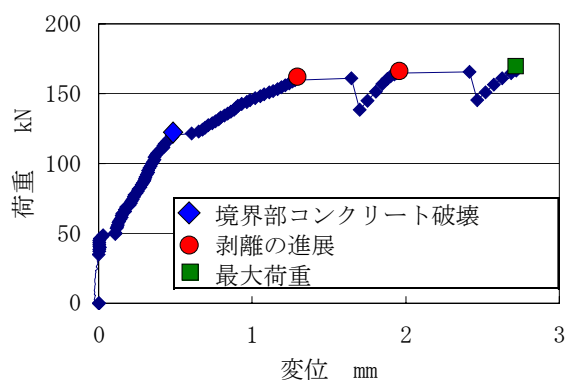
E_{fip} : CFRPシートの引張弾性率 (N/mm²)

t_{fip} : CFRPシートの公称厚さ (mm)

この式は薄膜形状をした炭素繊維シートを用いた場合の評価式であるが、CFRPグリッドは格子状の構造を

表－2 使用材料の性状

コン ク リ ー ト	配合 (24-12-20)	C	286 kg/m ³
	W/C=56 Gmax=20m	W	161 kg/m ³
		S	796 kg/m ³
		G	1,075 kg/m ³
		混和剤	2.85 kg/m ³
	スランブ		10 cm
空気量		5.0 %	
温度		22 °C	
圧縮強度		33.3 N/mm ²	
高流動 エポキシ 樹脂	圧縮強さ	20°C×7日	64 N/mm ²
	弾性係数	20°C×7日	4,600 N/mm ²
	引張強さ	20°C×7日	32 N/mm ²
	密度	20°C	2.05 g/cm ³
粘度	20°C	4,000 mPa・s	



図－3 荷重と変位の挙動の一例

しており引張方向では棒状となっており形状は異なるが、剥離は母材のコンクリート内部でしかも幅方向にも一様に生じており、この式を適用した。エポキシ樹脂の負担応力は、グリッドのそれに比べてかなり小さいため評価においては除外した。なお、下記のように各数値を換算した。bとしては格子間隔である軸方向1列当りの分担幅とする。t_{fp}としては、2.1で記載した「本工法における換算公称厚さ」とする。また、最大荷重をCFRPグリッド内部に含まれている炭素繊維の断面積（両面）で除して、剥離直前における引張応力を求めた。これらの結果を表-3および図-4に示す。

まず、すべての水準において、G_f平均値が3.29N/mm以上（最小値2.85N/mm）であり、既報⁴⁾の試験室レベル寸法の試験体と同等以上のG_fが得られており、本実験の再現性が確認された。また、水準「B」において水準「A」の場合と同等以上のG_fが得られており、小断面CFRPグリッドを重ねて接着しても付着強さにはまったく影響しないことが明らかになった。

一方、CFRPグリッドのコンクリートに対する有効付着長を日本コンクリート工学協会、補強技術研究委員会報告書⁶⁾に示される以下の方法により算出した。なお、補強繊維の断面積は、本工法における換算公称厚さと1列当りの分担幅を乗じた面積とした。まず、各試験体における最大付着応力を以下の式(2)により算出した。なお、左右のばらつきやひずみゲージの設置間隔の影響についてはさらなる検討が必要である。

$$\tau_y = \Delta \varepsilon_F \cdot E_{fp} \cdot AF / S_g / b \quad (2)$$

τ_y: 最大付着応力 (N/mm²)

Δε_F: ひずみ増加区間におけるひずみゲージ値の差 (図-5)

AF: 補強繊維の断面積 (mm²)

S_g: ひずみ増加区間におけるゲージ間隔 (mm)

次に、算出した最大付着応力を用いてCFRPグリッドの有効付着長L_e(mm)を以下の式(3)により計算した⁵⁾。

$$L_e = P_{max} / (2 \cdot \tau_y \cdot b) \quad (3)$$

なお、水準「A」および水準「B」の内一部の試験体では、せん断応力が最も大きくなる接着端部近傍でCFRPグリッドの部分剥離が生じ始めた直後にひずみゲージが破壊してしまったため、上記の方法で有効付着長を算出することは困難であった。そこで、呉らの研究⁹⁾を参照してCFRPグリッドに生じている引張応力の97%を負担している箇所と接着端部の距離を有効付着長と



写真-1 破壊状況の例

表-3 せん断付着試験の結果

No.	CFRPグリッド	分担幅 (mm)	最大荷重 P _{max} (N)	G _f (N/mm)	引張応力度 T (N/mm ²)
A-1	CR10-100	100	187,980	2.85	2,788
A-2			193,150	3.01	2,865
A-3			222,810	4.00	3,305
平均				3.29	2,986
B-1	CR3-50	50	167,770	4.49	3,695
B-2			171,120	4.67	3,768
B-3			161,150	4.14	3,549
平均				4.44	3,671
C-1	CR3-30	30	56,935	3.88	3,761
C-2			53,050	3.37	3,504
C-3			54,275	3.53	3,585
平均				3.59	3,617

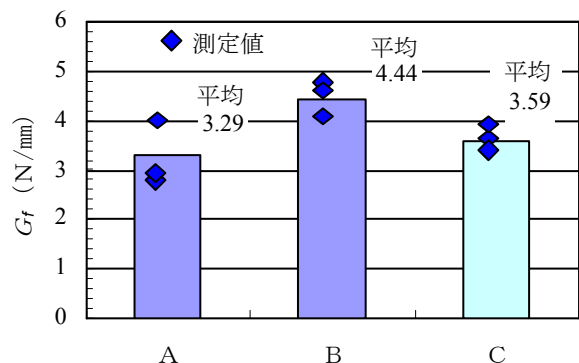


図-4 剥離破壊エネルギー G_f の一覧

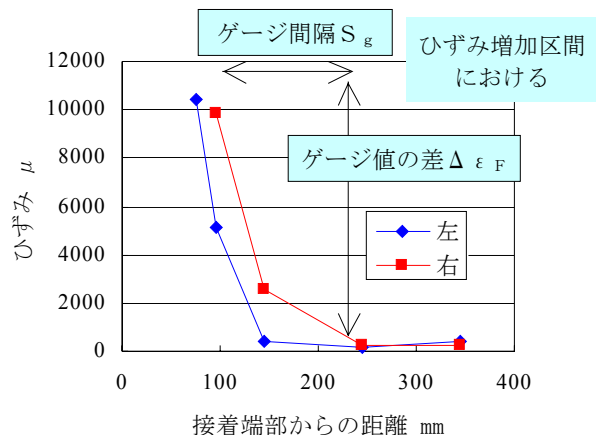


図-5 ひずみ分布の例

表－4 有効付着長の算出結果

No.	CFRP グリッド	最大荷重 P _{max} (N)	最大付着 応力 τ _y (N/mm ²)	有効付着長 L _e (mm)
A-1	CR10-100	187,980	2.29	220
A-2		193,150	2.09	221
A-3		222,810	2.37	217
最大				221
B-1	CR3-50	167,770	2.14	190
B-2		171,120	1.96	182
B-3		161,150	1.61	208
最大			208	
C-1	CR3-30	56,935	3.45	165
C-2		53,050	3.19	166
C-3		54,275	2.79	195
最大			195	

した。算出された有効付着長の一覧を表－4および図－6に示す。各水準での最大の有効付着長は、195～221mmであり、ほぼ同程度の値であった。

3. 補強量を考慮した CFRP グリッドの付着性能の検討

3.1 G_fに関する検討

2.2の図－4より、補強量の少ない水準「C」と、補強量の多い水準「A」および水準「B」でも界面剥離破壊エネルギーG_fは同程度のレベルにあったことから、多い補強量のCFRPグリッドを用いた場合でも同等レベル以上の付着強さが得られることが実験的に明確となった。

3.2 有効付着長の簡易算定式に関する検討

既往の研究⁸⁾において、有効付着長L_eと最大荷重P_{max}の関係式が以下の式(4)のように示されている。剥離はコンクリートの内部(表層部)で生じるため、その圧縮強度が考慮されている。

$$L_e \approx \frac{P_{\max}}{2b\tau_f} = \frac{2b\sqrt{2G_f E_{f_{fp}} t_{f_{fp}}}}{b\tau_f} \quad (4)$$

$$= \frac{0.649\sqrt{E_{f_{fp}} t_{f_{fp}}}}{f_c^{0.095}}$$

τ_f: 最大付着強度 (N/mm²)

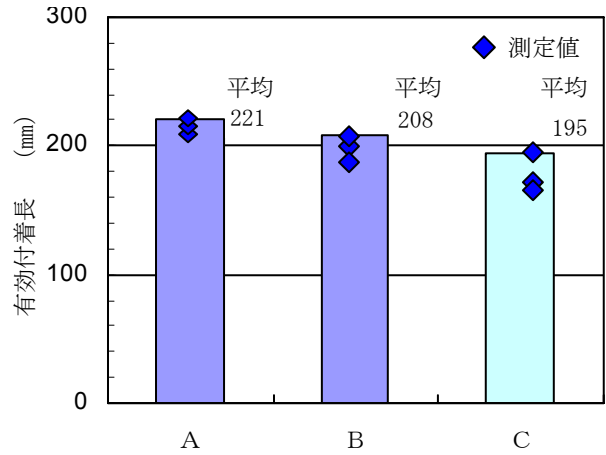
b: 補強繊維の幅の平均値 (mm)

G_f: 界面剥離破壊エネルギー (N/mm)

E_{f_{fp}}: 補強繊維の弾性率 (N/mm²)

t_{f_{fp}}: 補強繊維の換算公称厚さ (mm)

f_c: コンクリート圧縮強度 (N/mm²)



図－6 各水準の有効付着長

ついで、この関係式と実験結果を一致させるための拡大係数aを設定し有効付着長L_e'の評価式を式(5)に示すように仮定した。

$$L_e' \geq a \frac{0.649\sqrt{E_{f_{fp}} t_{f_{fp}}}}{f_c^{0.095}} \quad (5)$$

さらに、既報⁴⁾において少補強量のCFRPグリッドを用いた実験結果から定数aは2.28程度となることが求められ、有効付着長L_e'の簡易算定式を式(6)のように提案した。

$$L_e' \geq \frac{1.479\sqrt{E_{f_{fp}} t_{f_{fp}}}}{f_c^{0.095}} \quad (6)$$

定数aを考慮した有効付着長を計算し、実験値と比較した結果を表－5に示す。実験量は十分とは言えないが、全ての実験ケースに関して、定数aを2.28に設定した評価式(6)から求められる値は実験値とほぼ同程度であり、補強量を考慮してもCFRPグリッドの有効付着長は既提案の評価式でうまく評価できることが実験的に検証された。

さらに、過去の研究⁸⁾において、式(6)から求めた有効付着長を確保することを条件として、接着端部の付着耐力をG_fの試験値から算定する(7)式を提案しており、CFRPグリッドの接着層数を増加させた場合の計算結果を表－6に示す。なお、kは材料や施工に係る部分安全係数である。

$$P_{\max} = \frac{2b\sqrt{2G_f E_{f_{fp}} t_{f_{fp}}}}{k} \quad (7)$$

表－５ 有効付着長の実験値と計算値の比較

水準	有効付着長 実験値の最大 (mm)	引張軸 の列数	1列当り の繊維量 (mm ²)	分担幅 (mm)	換算公称 厚さ t (mm)	弾性率 E_{frp} (N/mm)	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	有効付着長 (mm) L_e' 簡易算定式による計算結果	
								a=1	a=2.28
A	221	2	16.856	100	0.169	230,000	33.3	91.6	209
B	208	3	7.568	50	0.151	230,000	33.3	86.8	198
C	195	2	3.784	30	0.126	230,000	33.3	79.2	181

表－６ 端部付着耐力の算定結果

CFRP グリッド の仕様	接着 層数	分担幅 b (mm)	弾性率 E_{frp} (N/mm)	換算公称 厚さ t_{frp} (mm)	G_f (N/mm)	端部付着耐力の計算結果 P_{max} (N)		
						k=1	k=2	k=3
						CR10-100 断面積： 39.2mm ² 格子間隔： 100mm	1	100
	2	100	230,000	0.337	2.85	133,000	66,500	44,300
	3	100	230,000	0.506	2.85	162,800	81,400	54,300

3.3 定着長の計算例

連続繊維シート接着工法における定着長の計算式として式(8)がよく用いられる⁷⁾。この式は、シート在设计用付着強度を設定し定着長を求めている。一例としてある補強量を設定して計算を行うと、必要な定着長は862mmとなる。一方、高流動性エポキシ樹脂とCFRPグリッドを用いた本技術における有効定着長の式である(6)式により、連続繊維シートのケースと同じ補強量での計算を行うと、209mmである。すなわち、接着端部の定着長に関する提案式を適用することにより、実際の応力状態が設計により大きく反映されるようになるため、これまでの設計式を用いて算出した場合の約1/4に定着長を短縮することが可能になった。

$$h = \frac{\sigma_{CF} \times t_{CF}}{\tau_{CF}} = 862 \text{ mm} \quad (8)$$

h : 定着長 (mm)
 σ_{CF} : 設計用引張強度 (2,300 N/mm²)
 t_{CF} : シート厚さ (0.169 mm)
 τ_{CF} : 設計用付着強度 (0.45 N/mm)

$$L_e' = \frac{1.479 \sqrt{E_{frp} t_{frp}}}{f_c^{0.095}} = 209 \text{ mm} \quad (9)$$

L_e' : 定着長 (mm)
 E_{frp} : 補強繊維の弾性率 (230,000 N/mm)
 t_{frp} : 換算公称厚さ (0.169 mm)
 f_c : コンクリート圧縮強度 (33.3 N/mm²)

4. まとめ

本研究では、実際に使用されている補強量のCFRPグリッドと、水中適用型の高流動エポキシ樹脂を用いて接着した試験体による付着強さおよび有効付着長を実験的に明らかにした。さらに、補強量が多くなっても G_f は同程度のレベルにあり、提案した有効付着長の簡易算定式も適用可能であることが確認された。また、連続繊維シート接着工法における定着長と比較して、大幅に短縮できることを確認した。

本研究で得られた主な知見を以下にまとめる。

(1) 実施工に用いられるレベルの補強量のCFRPグリッドを高流動エポキシ樹脂によりコンクリートに接着した場合の界面剥離破壊エネルギー G_f は2.85N/mm以上であり、既報で実施された試験室レベルの小実験で得られ

た値と同程度の値であることから、本実験の再現性が確認された。また、これらは連続繊維シート接着工法の場合よりかなり高い値であることから、高流動エポキシ樹脂による CFRP グリッドの高度な付着性能が確認された。

(2) 同程度の CFRP グリッド補強量でコンクリート試験体寸法が異なる 9 体の試験体の有効付着長の実験値は 195~221mm とほぼ同程度でありかつ安定していた。ここからも、実験の再現性が確認された。

(3) 有効付着長の実験値と、簡易算定式から求めた値は CFRP グリッド補強量によらずうまく一致していることから、提案式の有意性が確認された。

(4) 本研究で新たに提案した接着端部定着長に関する提案式を適用することにより、実際の応力状態が設計により大きく反映されるようになるため、これまでの設計式を用いて算出した場合の約 1/4 に定着長を短縮することが可能になった。

参考文献

- 1) 芦野孝行ほか：水中適用型 CFRP グリッド接着補強工法の補強効果に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.1，pp.1123-1128，2001 森田司郎ほか：RC 外部柱・梁接合部の耐力と変形性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.2，pp.175-180，1987.6
- 2) 芦野孝行ほか：水中適用型 FRP グリッド接着補強工法のせん断補強効果に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.2，pp.2260-2265，2002
- 3) 芦野孝行ほか水中適用型 FRP グリッド接着補強工法の圧縮補強効果に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.2，pp.1879-1884，2003
- 4) 根本正幸ほか：水中適用型高流動エポキシ樹脂により接着した CFRP グリッドの付着性能，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.30，No.3，pp.1633-1638，2008
- 5) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，コンクリートライブラリー 101，2000.7
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補強技術研究委員会報告書，2003.7
- 7) 日本コンクリート工学協会：連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書 [II]，1998.5
- 8) Nakaba, K., Kanakubo, T., Furuta, T., and Yoshizawa, H.: Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete, ACI Structural Journal, Vol.98 ,No.3 ,pp. 359-367, 2001
- 9) Zhishen WU, Hedong NIU: Prediction of crack-induced debonding failure in R/C structures flexurally strengthened with externally bonded FRP composites, JSCE Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, Vol.63, No.4, pp.620-639, 2007.12