

疑似若材齢コンクリートを用いた超音波伝播速度に及ぼす骨材の影響の評価

Evaluation of the Influence of Aggregate to Ultrasonic Wave Velocity by Using False Early Age Concrete

函館工業高等専門学校 環境都市工学科 ○学生員 野邊 一宏(NOBE Kazuhiro)
函館工業高等専門学校 環境都市工学科 正 員 澤村 秀治(SAWAMURA Shuji)
函館工業高等専門学校 環境都市工学科 正 員 橋本紳一郎(HASHIMOTO Shinichiro)
アイレック技建(株) 営業開発本部 永島 裕二(NAGASHIMA Yuji)

1. はじめに

コンクリートの弾性係数を推定するために、超音波伝播速度の計測が簡便かつ有効であり、多くの適用事例がある。しかしながら、既往の研究の多くは、十分に材齢が進んだ硬化コンクリートを対象にしたものであり、打設直後からの若材齢コンクリートを対象にした研究事例は少ない。

筆者らは、打設直後からコンクリートの超音波伝播速度の変化を連続自動計測し、この結果より若材齢コンクリートの弾性係数の変化を推定する方法¹⁾を示しているが、このためには、コンクリートの超音波伝播速度と静弾性係数あるいは動弾性係数を結ぶデータ、関係式が必要である。また、超音波伝播速度によって若材齢コンクリートの弾性係数推定法を汎用的なものにするためには、コンクリートの配合設計条件が超音波伝播速度にどのように影響するかを把握する必要がある²⁾。

しかし、若材齢コンクリート、特に材齢1日未満のコンクリートは、超音波速度、弾性係数の値が刻々と変化するので、その時間に追われる実験の中で精度の高い測定データを得ることは困難である^{2),3)}。

そこで本研究では、若材齢コンクリートの超音波伝播速度にコンクリートの配合設計条件が及ぼす影響を評価するための基礎資料を得ることを目的とし、セメントに対する石灰石微粉末置換率の増加によってセメントペーストの強度を意図的に低下させた「疑似若材齢コンクリート」を用い、細骨材・粗骨材の存在、および細骨材率が若材齢コンクリートの超音波伝播速度に及ぼす影響を実験的に検討した。

2. 実験概要

本研究では、セメントペーストの強度が低い若材齢時のコンクリートの状態を再現するために、セメントを石灰石微粉末（以下LSP）で置き換え、石灰石微粉末置換率（以下LSP置換率）によって強度をコントロールした疑似若材齢コンクリートを使用し、骨材の構成が若材齢コンクリートの超音波伝播速度に及ぼす影響を検討した。

2.1 使用材料および配合

実験の要因と水準を表-1に示す。実験の要因はLSP置換率、骨材の存在（PMCシリーズ：骨材の有無）、骨材の構成（saシリーズ：細骨材率）とし、それぞれの要因に対して設定した水準を組み合わせでコンクリートの配合を決定した。実験で使用した使用材料の一覧を表-2

に、コンクリートの配合を表-3に示す。

PMCシリーズは、水セメント比55%、細骨材率42%の基本となるコンクリートの配合Cを基準に、MはC

表-1 実験の要因と水準

実験の要因	実験の水準	
石灰石微粉末の置換率	7水準	0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 75%, 90%
細骨材率	5水準	20%, 30%, 40%, 50%, 60%
骨材の有無	3水準	ペースト、モルタル、コンクリート

表-2 使用材料の一覧

名称	仕様等	密度 (g/cm ³)
セメント	C1:普通ポルトランドセメント	3.16
	C2:石灰石微粉末	2.73
細骨材	S:函館市豊原産天然砂	2.65
粗骨材	G:北斗市義朗産砕石2005	2.70
混和剤	AE減水剤標準型	1.07
消泡剤	micro-air 404(100倍希釈)	1.00

表-3 コンクリートの配合

Name	W/C (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m ³)						
			W	C1	C2	S	G	混和剤	消泡剤
00C	55.0	42.0	168	305		818	1152	4.6	1.8
00M			293	533		1427			
00P			635	1154					
15C			168	260	46	816	1148	4.6	
15M			292	452	80	1419			
15P			629	973	172				
30C			168	214	92	813	1144	4.6	
30M			292	371	159	1412			
30P			624	794	340				
45C			168	168	137	811	1141	4.6	
45M			291	291	238	1404			
45P			619	619	506				
60C			168	122	183	808	1137	4.6	
60M			290	211	317	1396			
60P			614	446	669				
75C			168	76	229	806	1134	4.6	
75M			289	132	395	1389			
75P			609	277	830				
90C			168	31	275	803	1130	4.6	
90M			289	53	473	1381			
90P			604	110	988				
sa0020	55.0	20	305			390	1588	4.6	1.8
sa0030		30				585	1390		
sa0040		40				779	1191		
sa0050		50				974	993		
sa0060		60				1169	794		
sa3020		20	214	92		387	1578		
sa3030		30				581	1381		
sa3040		40				775	1184		
sa3050		50				968	987		
sa3060		60				1162	789		
sa6020		20	122	183		385	1569		
sa6030		30				577	1373		
sa6040		40				770	1176		
sa6050		50				962	980		
sa6060		60				1155	784		
sa9020		20	31	275		382	1559		
sa9030		30				574	1364		
sa9040		40				765	1169		
sa9050		50				956	974		
sa9060		60				1147	779		

から粗骨材を除きモルタル分を取り出した配合、P はさらに細骨材も除きセメントペーストのみを取り出した配合である。これらに対して LSP 置換率を 0% から 90% の範囲で 15% 刻みで 7 水準与え、ペースト強度をコントロールした。P、M、C ではペースト分の組成が統一されているので、それぞれの強度水準において、超音波伝播速度に対する骨材の存在の影響を検討することができる。

wc シリーズは PMC シリーズと同様の基本配合をベースに、細骨材率を 20% から 60% の範囲で 10% 刻みに 5 水準設定し、これらに対して LSP 置換率を 0% から 90% の範囲で 30% 刻みで 4 水準与え、ペースト強度をコントロールした。これらによって、骨材の構成の影響を検討する。s/a=20% のコンクリートは明らかにモルタル分が不足し、また s/a=60% のコンクリートはセメントペーストが不足した状態であった。

2.2 実験方法

疑似若材齢コンクリートの超音波伝播速度を計測するために、表-3 に示した全ての配合について、それぞれ 100mm の立方体供試体を 3 個作成し、20℃±1℃ の水槽で材齢 28 日を超えるまで水中養生を行った。

超音波伝播速度 V_p の計測は、立方体供試体の打設上面に平行な 2 方向について行い、それらの平均値を V_p 値として用いることとした。

LSP 置換率 0%、30%、60%、90% の PMC 配合については円柱供試体 (φ100×200) も 3 本ずつ作成し、28 日間の養生の後、超音波伝播速度、動弾性係数、圧縮強度、および JIS A 1149 による静弾性係数の測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 疑似若材齢コンクリートの力学的性質

LSP を混入した PMC 配合の円柱供試体を用いて、疑似若材齢コンクリートの力学特性について検討した。図-1 に、LSP 置換率と圧縮強度の関係を、ペースト P、モルタル M、コンクリート C のそれぞれについて示す。コンクリート C の圧縮強度は LSP 置換率が大きくなるに伴って低下する。LSP 置換率 90% の場合では供試体が脆く、圧縮試験すらできないものもあった。同等の配合を持ったコンクリートの圧縮強度試験結果²⁾を参照すると、LSP 置換率 30% の場合は標準養生で材齢 15 日程度の圧縮強度、同 60% の場合は材齢 2.5 日程度の圧縮強度、同 90% の場合は材齢 0.5 日程度の圧縮強度に相当する。モルタル M、ペースト P の圧縮強度は、コンクリート C に比べて大きく低下し、その低下率は LSP 置換率が増加するほど大きくなる。

図-2 に LSP 置換率と静弾性係数 E_c の関係、図-3 に LSP 置換率と動弾性係数 E_d の関係を示す。全体的な傾向は圧縮強度と同様であるが、コンクリート C を基準としたモルタル M、ペースト P の E_c 、 E_d の低下は圧縮強度の場合より顕著である。このことより、圧縮強度と比較してコンクリートの弾性係数は、骨材の存在の影響をより強く受けるといえる。同等の配合を持ったコンクリートの動弾性係数試験結果⁴⁾を参照すると、LSP 置換率 60% の場合は標準養生で材齢 2.5 日程度の動弾性係数、

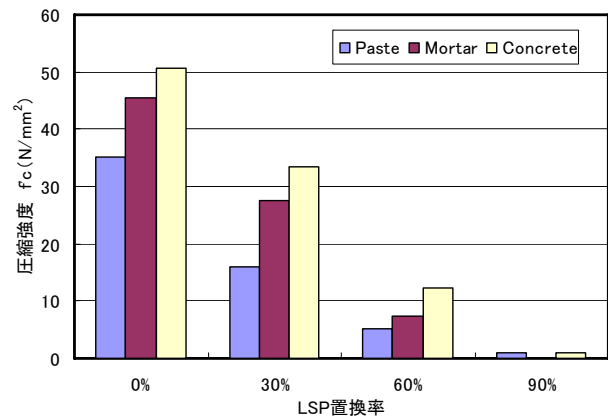


図-1 LSP 置換率と圧縮強度の関係 (PMC)

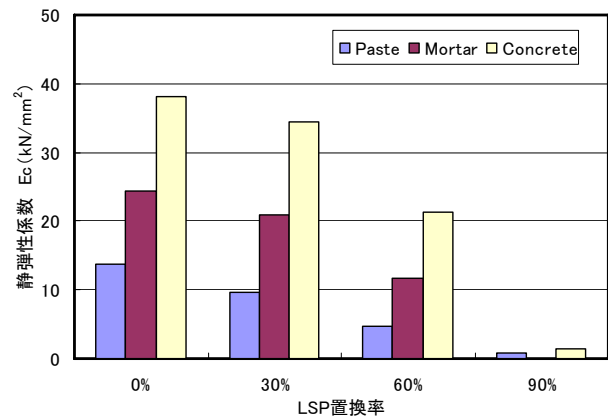


図-2 LSP 置換率と静弾性係数の関係 (PMC)

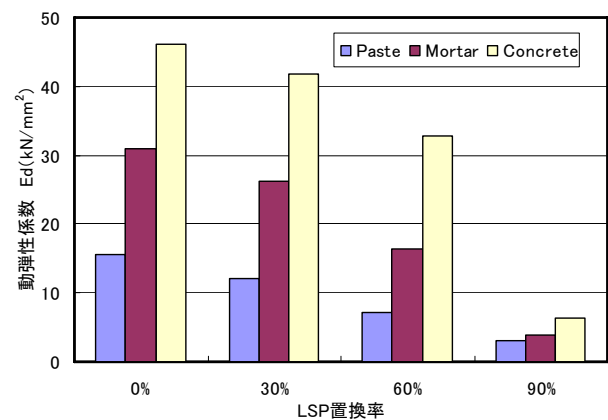


図-3 LSP 置換率と動弾性係数の関係 (PMC)

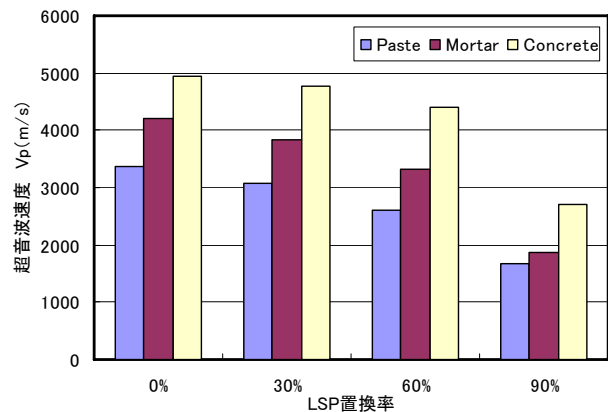


図-4 LSP 置換率と超音波速度の関係 (PMC)

同 90% の場合は材齢 0.5 日程度の動弾性係数に相当し、圧縮強度の場合と同様の結果となった。

図-4 は、LSP 置換率と超音波伝播速度 V_p の関係である。静弾性係数、動弾性係数の場合と異なり、超音波伝播速度はペースト P でも相当の値を示し、モルタル M、コンクリート C との差も小さい。また、LSP 置換率の増加に伴う超音波伝播速度の減少傾向は、弾性係数の場合ほど顕著ではない。このことより超音波伝播速度は、圧縮強度や弾性係数と比較すると、骨材の構成やセメントマトリックスの強度の影響を受けにくいことがわかる。

図-5 に円柱供試体を用いて測定した超音波伝播速度 V_p と静弾性係数 E_c の関係を示す。静弾性係数試験の結果は、特に若材齢時にばらつきが大きい。筆者らの既往の研究³⁾と V_p - E_c 関係は概ね同様の傾向を示した。これらのデータを回帰すると式 1 が得られる。

$$E_c = e^{-2.51 \times 10^{-7} V_p^2 + 2.89 \times 10^{-3} V_p - 4.55} \quad (\text{式 1})$$

図-6 に超音波伝播速度 V_p と動弾性係数 E_d の関係を示す。 V_p - E_d 関係は、静弾性係数 E_c の場合と比べてばらつきが少ない。これらのデータは、ペースト P、モルタル M など骨材の構成が全く異なるもの、LSP 置換率によってセメントマトリックス強度が全く異なるものが含まれているが、全てのデータは概ね同一の曲線上に位置している。これらのデータを回帰すると式 2 が得られる。

$$E_d = e^{-7.63 \times 10^{-8} V_p^2 + 1.36 \times 10^{-3} V_p - 0.982} \quad (\text{式 2})$$

疑似若材齢コンクリートで得られた V_p - E_d 関係は、図

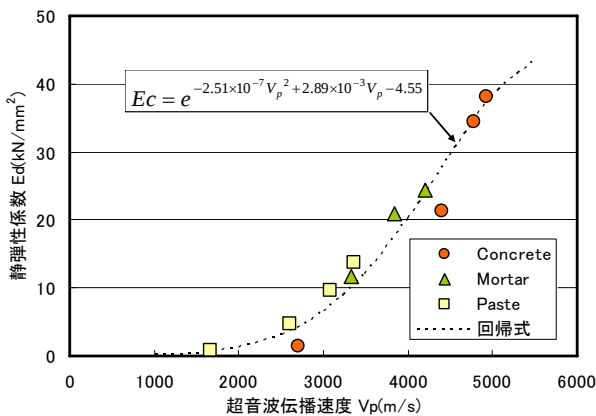


図-5 超音波速度と静弾性係数の関係(PMC)

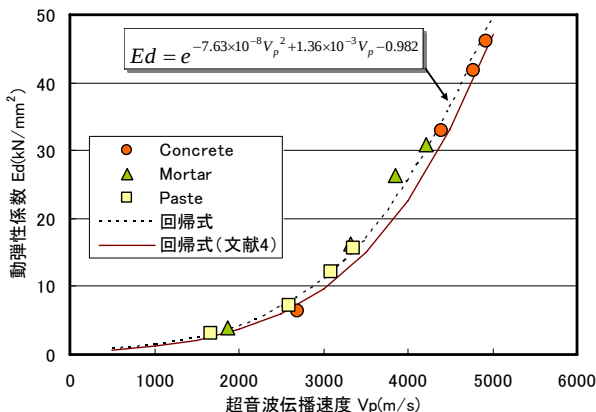


図-6 超音波速度と動弾性係数の関係(PMC)

-7 に示した参考文献 4)において通常のコンクリートに対して求めた V_p - E_d 関係と同様の傾向を示している。参考文献 4)においては、コンクリートの V_p - E_d 関係は骨材の構成の影響を受けるとしているが、今回の疑似若材齢コンクリートを用いた実験データはまだ少なく、それを説明するに十分ではない。

圧縮強度試験結果、静・動弾性係数の測定結果、および超音波伝播速度と静・動弾性係数の関係から、疑似若材齢コンクリートは、一般の若材齢コンクリートの力学特性を、適切に再現していると考えられる。

3.2 骨材の存在が疑似若材齢コンクリートの超音波伝播速度に及ぼす影響

図-7 は、ペースト P、モルタル M、コンクリート C の超音波伝播速度を LSP 置換率の水準別に示したものである。これらの配合では、ペースト分の組成を統一しており、モルタル M では細骨材の体積濃度が 53% 程度、コンクリート C では細骨材と粗骨材を合わせた体積濃度が 73% 程度となっている。超音波伝播速度は、どの水準 LSP 置換率においてもモルタル M、コンクリート C の順、すなわち骨材の体積濃度が高くなるにしたがって上昇し、超音波伝播速度が骨材量の影響を強く受けていることがわかる。LSP 置換率 90% の場合では、ペースト P とモルタル M の超音波伝播速度の値が同程度であるのに対し、コンクリート C の超音波伝播速度はそれらの 1.7 倍程度の値を示した。このことは、材齢 1 日未満の超若材齢時における超音波伝播速度は、粗骨材の影響を特に受ける

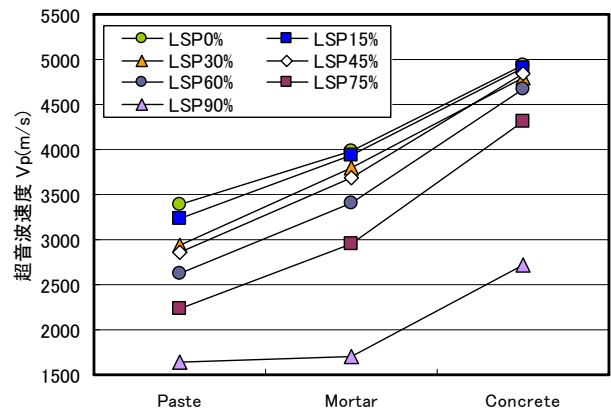


図-7 骨材の構成と超音波速度の関係(PMC)

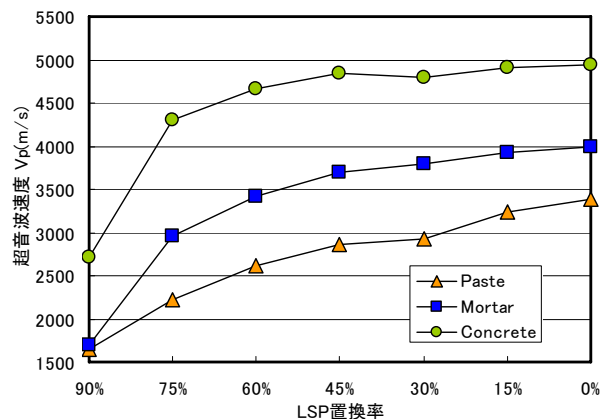


図-8 LSP 置換率と超音波速度の関係(PMC)

ことを示している。

図-8にLSP置換率と超音波伝播速度の関係を示す。この図は横軸のLSP置換率を反転して表示しているため、材齢と超音波伝播速度の関係と同様なイメージとなっている。コンクリートCの超音波伝播速度の値は、LSP置換率90%から60%までの間に、言い換えれば若材齢時に大きく上昇し、それ以降の増加は鈍くなる傾向にある。ペーストPの場合はLSP置換率の減少（＝材齢の進行）に伴って超音波伝播速度は概ね単調に増加し、モルタルMの傾向はそれらの中間にある。このことは、粗骨材を含むコンクリートの超音波伝播速度の変化は、骨材間に存在するセメントマトリックスの強度の変化のみに依存するのではなく、粗骨材とセメントマトリックスが一体化することによる複合効果が含まれることを示している。

3.3 細骨材率が疑似若材齢コンクリートの超音波伝播速度に及ぼす影響

図-9に疑似若材齢コンクリートの細骨材率と超音波伝播速度の関係を示す。超若材齢時に相当するLSP置換率90%の場合の超音波伝播速度は細骨材率の影響をあまり受けないが、LSP置換率が60%未満の超音波伝播速度の値には細骨材率の影響が認められ、細骨材率の増加に伴って超音波伝播速度は低下傾向にある。当初は、細骨材率の影響はセメントマトリックスの強度が低いほど強く表れると考えていたが、それとは反する結果となった。コンクリートの超音波伝播速度は粗骨材の体積濃度 V_g/V の影響を受けるとともに、モルタル中の細骨材体積

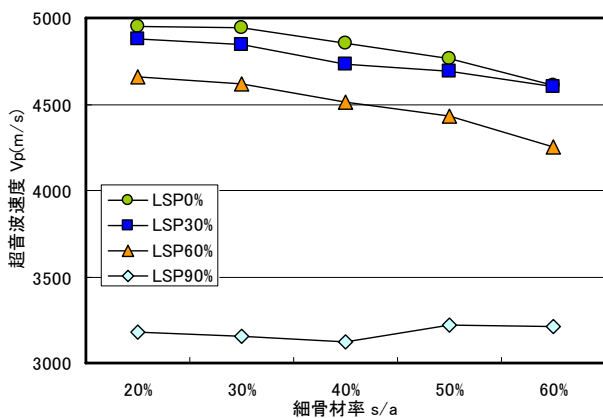


図-9 細骨材率と超音波速度の関係 (sa シリーズ)

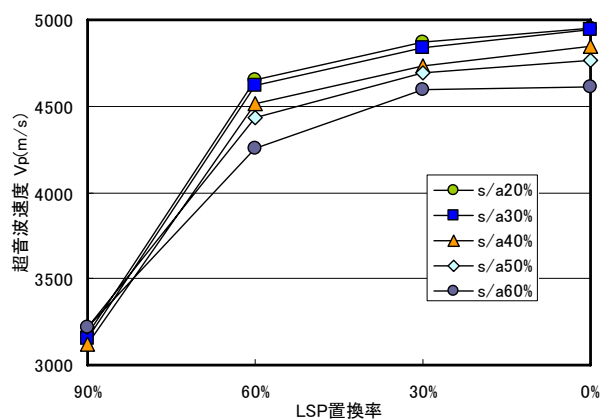


図-10 LSP置換率と超音波速度の関係 (sa シリーズ)

濃度 V_s/V_m の影響も受ける。細骨材率を変えると、例えば細骨材率を大きくすると V_g/V は減少し、 V_s/V_m は増加するので、細骨材率が超音波伝播速度に及ぼす影響は、 V_g/V の効果と V_s/V_m の効果がミックスされたものになっている。今回の実験データにはLSP置換率60%と90%の間のデータが不足しているため、細骨材率の影響についてはさらに実験データを加えた検討が必要である。

図-10は細骨材率を変えたシリーズのLSP置換率と超音波伝播速度の関係である。この図も横軸のLSP置換率を反転して表示しているため、材齢と超音波伝播速度の関係と同等のイメージになっている。これによると、LSP置換率90%（＝超若材齢時）のコンクリートの超音波伝播速度は細骨材率の影響をあまり受けないが、LSP置換率が60%以下、言い換えれば材齢の進行によって強度がある程度増加してくると、超音波伝播速度は細骨材の影響を受けるようになるといえる。

4. まとめ

本研究では、石灰石微粉末の添加で強度をコントロールした疑似若材齢コンクリートを用いた実験によって、若材齢コンクリートの超音波伝播速度に骨材が及ぼす影響を検討した。その結果、以下の知見を得た。

- ① 石灰石微粉末を混入した疑似若材齢コンクリートは、実際の若材齢コンクリートの力学特性を適切に表現することができる。
- ② 骨材の存在や量はコンクリートの超音波伝播速度に強く影響を及ぼし、若材齢時ほどその傾向が著しい。
- ③ 超音波伝播速度の増加は、セメントマトリックスの強度増加のみに依存するのではなく、粗骨材と一体化することによる複合効果が含まれる。
- ④ 細骨材率は若材齢時よりむしろ、ある程度強度が得られたコンクリートの超音波伝播速度に影響する。

謝辞: 本研究は、平成18年度科学研究費補助金 基盤研究(C) 課題番号: 18560456 (代表: 澤村秀治) により遂行したものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 澤村秀治・須藤卓哉・丸山久一・永島裕二: 超音波伝播速度による水和熱抑制型膨張コンクリートの強度発現特性の評価, コンクリート工学年次論文集, 第29巻, 705-710, 2007.7
- 2) 臼井裕規・澤村秀治: 超音波伝播速度による若材齢コンクリートの強度特性評価に関する研究, 平成17年度土木学会北海道支部論文報告集第62号, V-18, 2006.2
- 3) 須藤卓哉・川尻峻三・澤村秀治・永島裕二: 超音波伝播速度を用いた膨張コンクリートの弾性係数推定法に関する研究, 平成18年度土木学会北海道支部論文報告集, E-20, 2007.2
- 4) 門野寛, 澤村秀治, 橋本紳一郎, 永島裕二: 配合条件が若材齢コンクリートの超音波伝播速度と動弾性係数に及ぼす影響, 平成19年度土木学会北海道支部論文報告集, (投稿中), 2008.1