

論文 若材齢時に振動作用を受けるコンクリートの残存強度

尾上 幸造^{*1}・中澤 隆雄^{*2}・今井 富士夫^{*3}・黒木 裕貴^{*4}

要旨: 維持管理・補修のためのコンクリートが打設後短時間で交通により振動作用を受ける場合を対象として、若材齢時に気中または水中にて繰返し圧縮応力を受けるコンクリートの残存強度について実験的に検討した。既往の研究および本研究の結果を踏まえると、若材齢コンクリートが気中にて振動作用を受ける場合、残存強度の低下が生じる可能性は低い。また、繰返しの上限応力比を載荷開始材齢における基準強度の35%、下限応力比を5%とした今回の実験条件下においては、水中にて振動作用を受ける若材齢コンクリートの残存強度および残存静弾性係数に関して明確な低下傾向は認められなかった。

キーワード: 若材齢, 振動作用, 繰返し載荷, 残存強度, 残存静弾性係数

1. はじめに

近年、交通量の増加や交通荷重の増大により道路橋等の損傷事例が増加しており、それらの維持管理や補修が盛んに行われている。実際の工事では交通遮断を伴うことが多く、短期間で工事を完了し、交通解放を行わなければならない。しかし、交通を早期に解放した場合、コンクリートは打設後若材齢で振動作用下にさらされることとなり、その振動作用がコンクリートの強度発現に何らかの悪影響を及ぼす可能性がある。

このような状況を対象として、いくつかの研究報告がある。河野ら^{1),2)}は、超速硬コンクリートが硬化過程で圧縮疲労荷重を受けた場合の強度発現について実験的な検討を行い、載荷回数が多いほど、また、繰返し応力の上限応力が高いほど、疲労開始時のコンクリート強度によらず、圧縮強度比（未載荷供試体の圧縮強度に対する載荷後供試体の残存強度の比）が高くなると報告している（図-1 参照）。椿ら³⁾は、振動作用下で硬化する断面修復材の付着強度について実験的な検討を行い、振動による慣性力で20%~37%の付着強度の低下が見られたこと、界面の粗度を上げることにより付着強度が増加すること、振動の影響により低下した断面修復材の付着強度はその後回復しないこと、および付着強度の低下は大部分がごく初期材齢（1日以内）で生じることを報告している。松下⁴⁾は、繰返し圧縮応力を受ける長期材齢コンクリートの残存強度について検討を行い（図-2 参照）、残存強度比（未載荷供試体の圧縮強度に対する繰返し載荷を受けた供試体の残存強度の比）は繰返し回数によらず100%以上となること、また各繰返し回数における疲労強度の約90%程度の上限応力比を受ける場合に残存強度比が最大となることを報告している。Neville⁵⁾は、疲

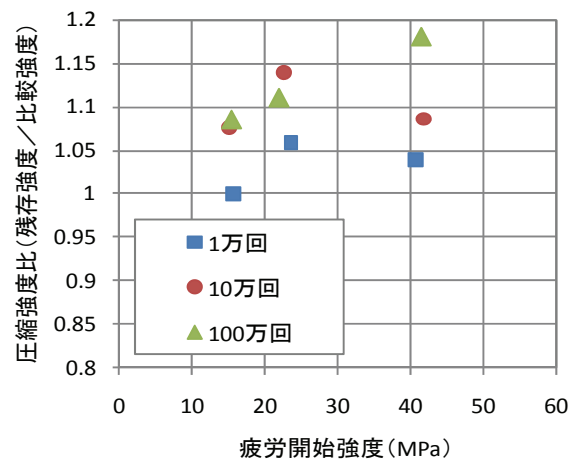


図-1 圧縮強度比と疲労開始強度の関係
(応力レベル 70) (参考文献¹⁾ を元に作成)

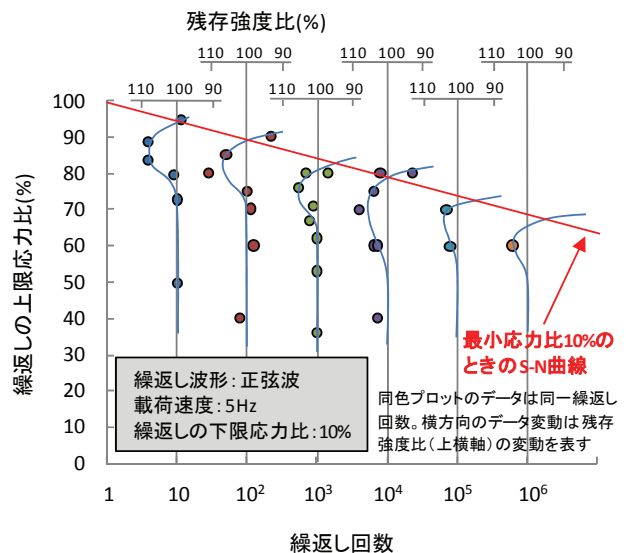


図-2 繰返しの最大応力比と残存強度比の関係
(参考文献⁴⁾ を元に作成)

*1 宮崎大学工学部 土木環境工学科助教 博士 (工学) (正会員)
 *2 宮崎大学工学部 土木環境工学科教授 工博 (正会員)
 *3 宮崎大学工学部 土木環境工学科教授 工博 (正会員)
 *4 宮崎大学大学院 工学研究科 土木環境工学専攻 修士課程 (非会員)

劣限度を下回る荷重を繰り返し負荷されたコンクリートは、その後で限度を上回る荷重をかけると、最初に繰り返し載荷をしなかったコンクリートと比べて高い疲労強度を示すこと、前者の（載荷された）コンクリートの方が5～15%高い静的強度を示すことを紹介し、このような強度の向上は、最初の応力水準の低い繰返し載荷によって、適度な持続載荷で強度が向上する場合と同じようにコンクリートの高密度化が起きることによってと思われる」と述べている。

以上より、コンクリートが若材齢であるか長期材齢であるかにかかわらず、繰返し圧縮応力を受けるコンクリートの残存強度は低下することではなく、むしろ増加する場合の多いこと、一方、若材齢時に振動作用を受ける断面修復材の付着強度は、振動の慣性力によって低下することが明らかとなっている。

ここで既往の研究報告は、コンクリートが気中に置かれた場合についての結果であり、硬化途中のコンクリートが雨水などにより湿潤の影響を受ける場合や、耐久性の向上を目的としてコンクリートを初期養生する場合等についてのデータは不足している。

そこで本研究では、コンクリートが若材齢時に気中または水中にて振動作用（繰返し圧縮応力）を受ける場合の残存強度について、実験的な検討を行うこととした。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合条件

本研究では実橋梁支座の補修に使用された実績のある高強度高流動コンクリートと同じ配合で供試体を作製した。材料として早強セメント（密度：3.12g/cm³）、JIS II種フライアッシュ（密度：2.33g/cm³）、石灰石砕砂（表乾密度2.67g/cm³、吸水率1.56%）、碎石2005（表乾密度2.57g/cm³、吸水率1.71%）、および高性能AE減水剤を使用した。高強度高流動コンクリートの配合条件および単位量を表-1に示す。

2.2 載荷開始材齢および環境条件

表-2に本研究で設定した載荷開始材齢および環境条件を示す。振動作用（繰返し圧縮応力）の載荷開始材齢を18、24、48、72時間の4水準とし、実験環境は気中および水中の2種類とした。今回、同表中○印の付いている実験パターンについて検討を行った。

2.3 供試体の形状寸法

供試体として100×95×93mmの角柱およびφ75×150mmの円柱を作製した。角柱供試体の載荷試験にあたっては、95×93mmの断面を載荷面とした。当初、強度のばらつきを考慮し同一条件でより多くのデータを取得するため、100×95×93mmの角柱供試体を縦方向に2体重ねることによって（後述、図-3参照）実験を行った。

表-1 コンクリートの配合条件と単位量

水結合材比 W/B	細骨材率 s/a	水 W	セメント C	フライアッシュ FA	細骨材 S	粗骨材 G	高性能AE減水剤 SP
(%)		(kg/m ³)					
35	68.5	169	312	168	1174	520	5.76

表-2 載荷開始材齢および環境条件

		載荷開始材齢(時間)			
		18	24	48	72
環境条件	気中		○		○
	水中	○	○	○	○

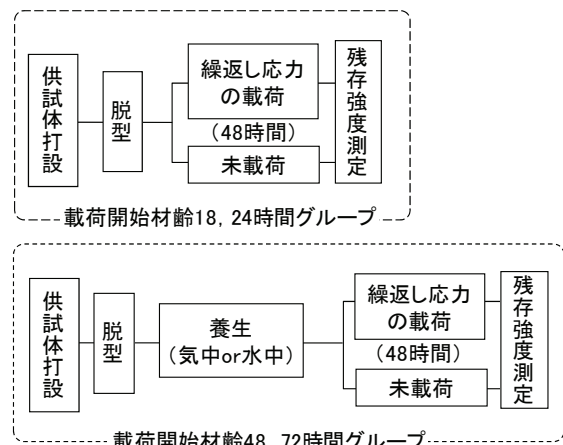


図-2 実験手順

本論文中に示す結果のうち、載荷開始材齢24時間および72時間の気中試験の全部、および水中試験の一部に関するデータはこの方法により得られたものである。その後、圧縮強度試験において一般的に用いられる高さ直径比H/D=2.0の円柱供試体について検討するため、残りの実験パターン（載荷開始材齢18時間および48時間の全部、載荷開始材齢24時間および72時間の水中試験の一部）については1回の実験につきφ75×150mmの円柱供試体を1本ずつ用いて実験を行った。なお、若材齢時の振動作用がコンクリートの残存強度に及ぼす影響の評価にあたっては、同一配合・同一バッチのコンクリートより作製した比較用の未載荷供試体に対する載荷供試体の残存強度比（後述、式(2)）を用い、供試体形状寸法による影響を排除した。

2.4 試験方法

実験手順を図-2に示す。載荷開始材齢18、24時間グループについては、脱型後直ちに試験を実施し、載荷開始材齢48、72時間グループについては材齢24時間で脱型後、所定の材齢まで各環境条件下で養生を施した後に試験を実施した。なお、本文中、若材齢時に振動作用を与えたものを「載荷供試体」、比較用として振動を与えずに載荷供試体と同一の環境条件下に静置しておいたものを「未載荷供試体」と称する。

繰返し載荷方法を図-3 に示す。100×95×93mm 角柱供試体を使用した場合には供試体を縦に2体重ねて繰返し圧縮応力を与えた。φ75×150mm 供試体を使用した場合には1体のみ設置し繰返し圧縮応力を与えた。水中試験では水槽内に水道水を満たして実験を行った。

繰返し応力比の基準となる静的圧縮強度および繰返し載荷試験後の残存強度の測定は 3000kN 耐圧試験機を使用し、JIS A 1108 に準拠して行った。

繰返し載荷試験には電気油圧式サーボパルサ（静的容量300kN）を使用した。図-4 に繰返し応力の概要を示す。載荷波形を正弦波形状、周波数を5Hz、載荷回数を864000回（48時間）とした。今回、繰返し応力比の大きさは、上限応力比を35%、下限応力比を5%で固定した。繰返し応力比の基準値は、同一バッチより別途作製しておいたコンクリート供試体3本より求めた圧縮強度の平均値とした。

2.5 水槽水の pH 測定

水中試験の場合、若材齢時の振動作用により十分に硬化していないコンクリート供試体からカルシウムイオンが溶出し水槽水中の水酸化物イオン濃度が高まって pH が上昇することが想定される。そこで、繰返し載荷試験中および試験後の水槽水を十分かくはんした後に少量を採取し、市販の pH メーターにて pH を測定した。なお、未載荷供試体についても、載荷供試体を浸した水槽水と同量の水中に静置し、同時期に pH を測定した。若材齢時の振動作用が水槽水の pH 変化に及ぼす影響は式(1)で算定される pH 比により評価した。

$$\text{pH 比} = \text{pH}_1 / \text{pH}_0 \quad (1)$$

ここに、 pH_1 は載荷供試体を入れた水槽中の水の載荷試験後の pH、 pH_0 は未載荷供試体を入れた水槽中の水の pH である。試験は各3回行っており、以下の結果はそれらの平均値で示す。

2.6 超音波伝播速度の測定

若材齢時の振動作用により供試体内部に微細ひび割れが発生することが考えられる。一般に、コンクリートが圧縮載荷を受ける場合、載荷軸方向に微細ひび割れが進展し、その結果載荷軸と直角方向の超音波伝播速度が低下する⁴⁾。そこで、100×95×93mm 角柱供試体を用いた実験では、載荷供試体および未載荷供試体のそれぞれについて載荷軸と直角方向の超音波伝播速度を測定した。なお、超音波の種類は縦波、印加電圧は1kV、振動子周波数は50kHzとした。

2.7 若材齢時の振動作用（繰返し圧縮応力）がコンクリートの残存強度に及ぼす影響の評価

式(2)で算定される残存強度比を用いて、若材齢時の振動作用がコンクリートの残存強度に及ぼす影響の評価を行った。

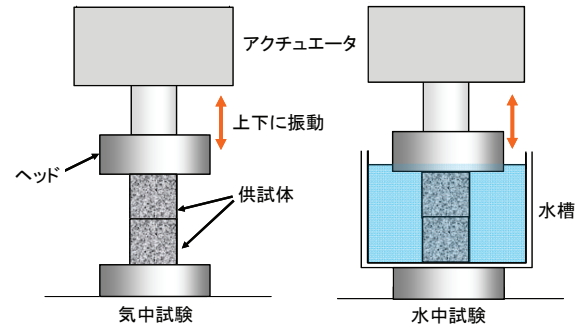


図-3 繰返し載荷方法(100×95×93mmの角柱供試体を使用した場合)

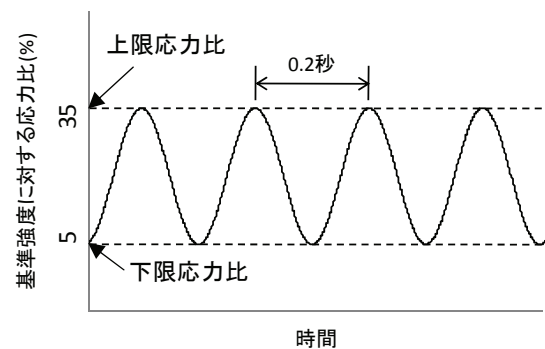


図-4 時間と繰返し応力比の関係

$$\text{残存強度比} = f'_1 / f'_0 \quad (2)$$

ここに、 f'_1 は載荷供試体の残存強度 (N/mm^2)、 f'_0 は未載荷供試体の圧縮強度 (N/mm^2) である。

また、φ75×150mm の円柱供試体を用いて実施した水中における実験シリーズについては、繰返し載荷試験後、残存強度を測定する際にひずみゲージ（検長60mm）を貼付し、応力-ひずみ曲線を取得し、JIS A 1149により残存静弾性係数を求め、式(3)で算定される残存静弾性係数比を用いて若材齢時の振動作用がコンクリートの残存静弾性係数に及ぼす影響の評価を行った。

$$\text{残存静弾性係数比} = E_1 / E_0 \quad (3)$$

ここに、 E_1 は載荷供試体の残存静弾性係数 (kN/mm^2)、 E_0 は未載荷供試体の静弾性係数 (kN/mm^2) である。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度の経時変化

図-5 に今回作製した高強度高流動コンクリートの材齢28日（672時間）までの圧縮強度の経時変化を示す。各材齢の圧縮強度は3本の供試体より求めた値の平均値である。材齢18時間および24時間の供試体については脱型後ただちに試験を行い、その他のものについては脱型後20℃水中にて所定の材齢まで養生を施しその後強度試験を行った。

今回の検討において、繰返し載荷における応力比（上限35%・下限5%）は、載荷開始材齢における圧縮強度を基準強度とし、繰返し載荷期間中の応力レベルは一定

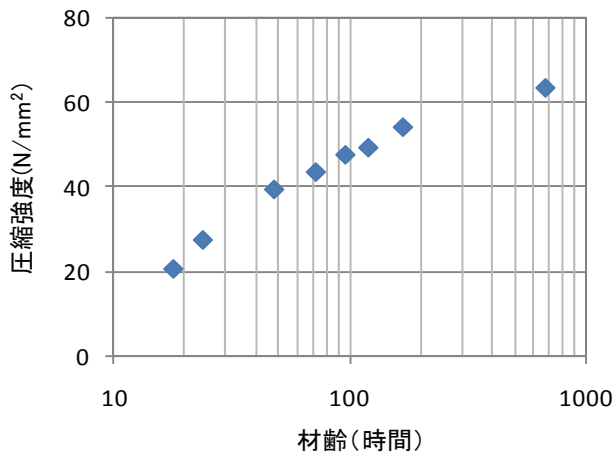


図-5 圧縮強度の経時変化

とした。コンクリートの強度は図-5に示すように増進するため、繰返し荷载の期間中、実際の応力比は図-6に示すように減少していたと考えられる。材齢 72 時間から荷载を開始した場合には、応力比は時間とともに減少するものの、繰返し荷载終了時点において上限が 30.9%、下限が 4.4%となり、初期値からの変化は小さい。一方、材齢 18 時間から荷载を開始した場合には、応力比が時間とともに急激に減少し、繰返し荷载終了時点において上限が 16.9%、下限が 2.4%となり、応力振幅の初期値からの減少が大きく振動条件としては他の実験ケースと比較して緩やかになっていたと考えられる。

3.2 供試体を浸した水槽水の pH 測定結果

図-7に荷载開始材齢と pH 比の関係を示す。荷载開始材齢が 18 時間の場合、pH 比がすべて 1 よりも大きくなっており、この程度の若材齢では繰返し荷载を受けることによって供試体からのカルシウムイオンの溶出が活発になることを示しているものと考えられる。その他の実験ケースにおいては、pH 比の平均値はほぼ 1 となっており、繰返し荷载によるコンクリート供試体からのカルシウムイオンの溶出は未荷载の場合とほぼ同程度であったと考えられる。荷载開始材齢 18 時間では時間が経過するにつれ応力比の振幅が小さくなり振動条件が緩和されていた(図-6)にもかかわらず pH 比が 1 よりも高くなっていることから、材齢 18 時間から 24 時間にかけての振動作用がコンクリートからのカルシウムイオン溶出を促進する可能性があるといえる。このような場合、残存強度比や残存静弾性係数比が 1 よりも低下することが予想される。

3.3 超音波伝播速度の測定結果

図-8に 100×95×93mm 角柱供試体を用いて測定された超音波伝播速度と荷载開始材齢の関係を示す。繰返し荷载の環境条件が気中の場合は 2 データの平均値、水中の場合は 3 データの平均値である。それぞれの試験環境条件について荷载供試体と未荷载供試体の超音波伝播速

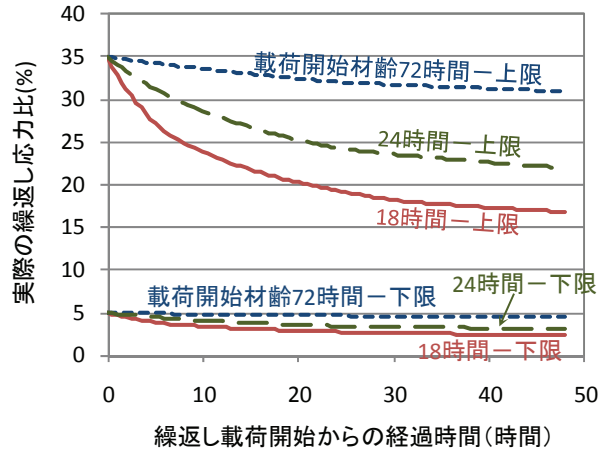


図-6 基準強度の増進にともなう繰返し応力比の経時変化

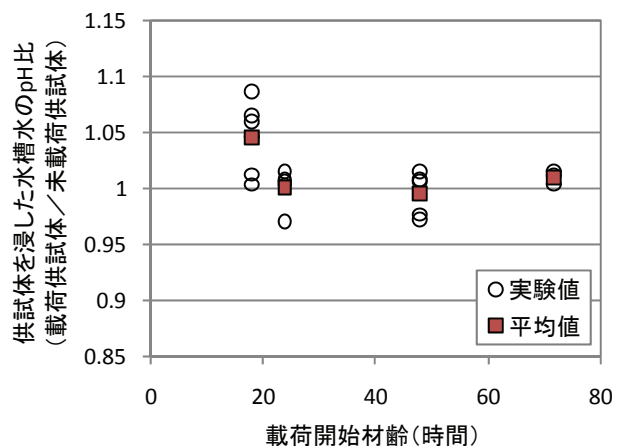


図-7 荷载開始材齢と pH 比の関係

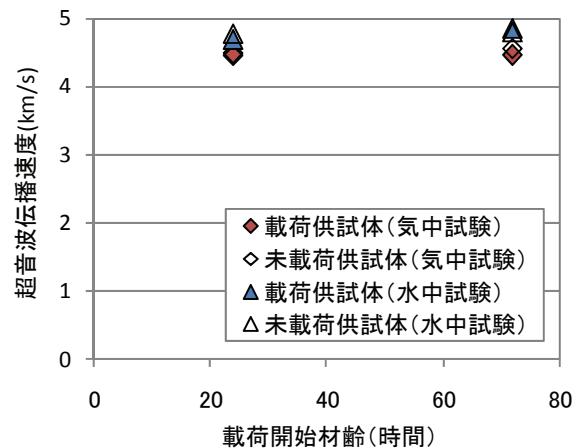


図-8 荷载開始材齢と超音波伝播速度の関係

度を比較すると、両者に顕著な差異は認められない。今回の実験条件下においては、応力比が上限 35%・下限 5% (実際にはそれら以下) と小さかったため、超音波伝播速度の低下に影響するような微細ひび割れは生じなかったものと推察される。なお、縦波の超音波は水中を伝播する性質を有している。そのため、供試体が湿潤状態となる水中試験の場合には、気中試験の場合と比べて超音波伝播速度が大きくなったものと考えられる。

表-3 荷重供試体の残存強度，未荷重供試体の圧縮強度および残存強度比

		荷重開始材齢													
		18時間			24時間			48時間			72時間				
		残存強度(N/mm ²)		残存強度比	残存強度(N/mm ²)		残存強度比	残存強度(N/mm ²)		残存強度比	残存強度(N/mm ²)		残存強度比		
		繰返し荷重	未荷重		繰返し荷重	未荷重		繰返し荷重	未荷重		繰返し荷重	未荷重			
環境条件	気中				47.9, 42.4 (45.1)	47.3, 43.4 (45.4)	0.99				49.0, 48.4 (48.7)	46.8, 48.5 (47.7)	1.02		
					44.6, 45.4 (45.0)	43.9, 45.4 (44.7)	1.01				49.2, 46.2 (47.7)	48.5, 47.5 (48.0)	0.99		
	水中		42.5	44.5	0.96	50.2, 51.5 (50.9)	47.0, 46.2 (46.6)	1.09	48.6	46.5	1.05	52.5, 52.4 (52.5)	53.6, 50.4 (52.0)	1.01	
			42.3	40.4	1.05				46.3	45.2	1.02				
			39.2	34.6	1.13	50.2, 47.3 (48.8)	45.4, 47.2 (46.3)	1.05	49.1	48.6	1.01	52.8, 46.7 (49.8)	51.8, 52.4 (52.1)	0.96	
			33.8	36.1	0.94				45.0	47.8	0.94				
			36.2	41.1	0.88	51.0, 50.4 (50.7)	48.2, 47.5 (47.9)	1.06	46.7	48.0	0.97	48.9, 51.7 (50.3)	51.8, 51.8 (51.8)	0.97	
			39.8	40.6	0.98										
						45.3	44.1	1.03					47.3	47.7	0.99
						45.6	40.7	1.12					51.3	46.6	1.10
				46.1	42.8	1.08					50.6	52.1	0.97		
				45.4	44.1	1.03									
				45.4	42.2	1.08									

※細字：角柱供試体による実験結果（括弧内は供試体2体の平均値），太字：円柱供試体による実験結果

3.4 若材齢時の振動作用がコンクリートの残存強度に及ぼす影響

表-3に荷重供試体の残存強度，未荷重供試体の圧縮強度および残存強度比を示す。同表中，細字で表記されている数値は100×95×93mm角柱供試体による実験値および同一条件にて試験された2データの平均値（括弧内）であり，太字で表記されている数値はφ75×150mm円柱供試体1体より求めた実験値である。未荷重供試体は，荷重開始材齢が同じであればほぼ同じ材齢におけるコンクリートの圧縮強度を表すが，同一配合で作製したにもかかわらず，バッチ間誤差が存在する。この理由として，物質の強度特有のばらつき，計量誤差，試験材齢の若干の相違などが考えられる。

図-9に気中試験について荷重開始材齢と残存強度比の関係を示す。残存強度比の平均値は荷重開始材齢24時間の場合1.00，72時間の場合1.01であった。試行回数が少ないため断言はできないが，既往の研究報告^{1),2)}を併せて考慮すると，若材齢コンクリートが気中において振動作用を受ける場合，強度発現への悪影響はそれほど大きくはないことが予想される。理由として，繰返し荷重が作用することにより供試体の内部温度が上昇し水和反応が促進される²⁾とともに，細孔容積が減少し緻密になる²⁾こと，あるいは水中のケースとは異なりカルシウムイオンの系外への溶出が生じないことなどが考えられる。

図-10に水中試験について荷重開始材齢と残存強度比の関係を示す。同一材齢において残存強度比にはばらつきが存在するが，平均値でみると試験開始材齢18，24，48，72時間でそれぞれ0.99，1.07，1.00，1.00となっており，若材齢時の振動作用によるコンクリートの強度発現への悪影響はそれほど大きくないことが示されている。pH測定の結果（図-7）より，荷重開始材齢18時間

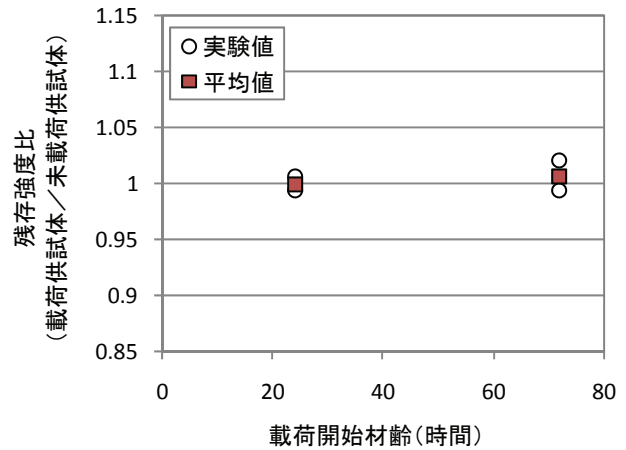


図-9 荷重開始材齢と残存強度比の関係（気中）

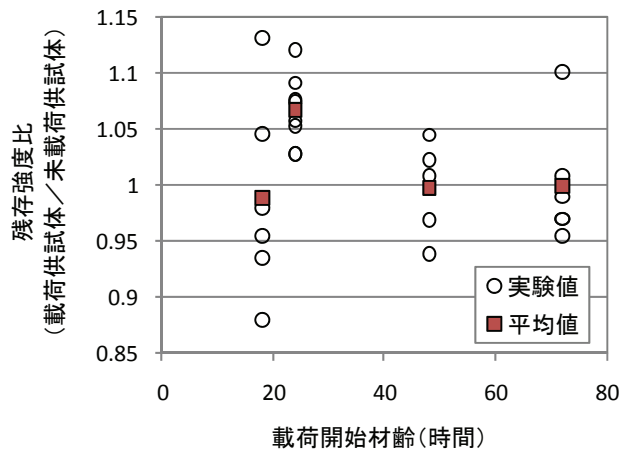


図-10 荷重開始材齢と残存強度比の関係（水中）

の場合には残存強度比が1よりも低下することが予想されたが，本実験の結果からは明確な低下傾向は読み取れない。また，荷重開始材齢24時間では，すべての実験において残存強度比が1以上となっており，若材齢時の繰返し荷重によってコンクリートの圧縮強度が平均で7%増加している。この理由として，繰返し荷重によるコ

ンクリートの高密度化⁵⁾が生じた可能性が考えられる。ただし、他の荷重開始材齢では繰返し荷重によってコンクリートの圧縮強度が増加したケースと減少したケースがあり、現段階ではその原因については明らかでない。ばらつきを考慮した残存強度の評価方法、水中にて繰返し荷重を受けるコンクリートの空隙量の変化などについて、今後検討を行う必要があると考えている。

3.5 若材齢時の振動作用がコンクリートの残存静弾性係数比に及ぼす影響

図-11 に水中試験における荷重開始材齢と残存静弾性係数比の関係を示す。振動作用を受ける若材齢コンクリートの残存静弾性係数が低下する主な要因としては、内部微細ひび割れの発生、カルシウムイオンの溶出が挙げられる。前者について、図-8 の結果より、試験環境が気中・水中のいずれにおいても、今回検討した実験条件においては過大な微細ひび割れは生じておらず、残存静弾性係数への影響は小さかったと推察される。後者について、図-7 の結果より、荷重開始材齢 18 時間の場合に pH 比がいずれも 1 以上となり、残存静弾性係数比が 1 以下に低下することが予想されたが、実際には荷重開始材齢 18 時間で残存静弾性係数比が 1 以上となるケースも存在し、平均値は 0.99 と若干低下するものの明確な低下傾向があるとはいえない。ばらつきを考慮した残存静弾性係数の評価方法、水中にて繰返し荷重を受けるコンクリートのカルシウムイオン溶出による空隙量の変化などについて、今後検討を行う必要がある。

4. 結論

若材齢コンクリートが気中または水中にて振動作用を受ける場合の残存強度について基礎的な検討を行った。本研究の範囲内で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 供試体を浸した水槽水の pH 測定結果より、材齢 18 時間から 24 時間における振動作用がコンクリートからのカルシウムイオン溶出を促進する可能性が示唆された。
- (2) 既往の研究および本研究の結果を踏まえると、若材齢コンクリートが気中にて振動作用を受ける場合、残存強度の低下が生じる可能性は低い。
- (3) 繰返しの上限応力比を 35%、下限応力比を 5%とした今回の実験条件下においては、水中にて振動作用を受ける若材齢コンクリートの残存強度および残存静弾性係数の明確な低下傾向は認められなかった。

5. 今後の課題

維持管理・補修のためのコンクリートが交通により振動作用を受ける場合、低周波数の繰返し応力が若材齢時から長期間にわたり作用する。今回の検討では、若材齢

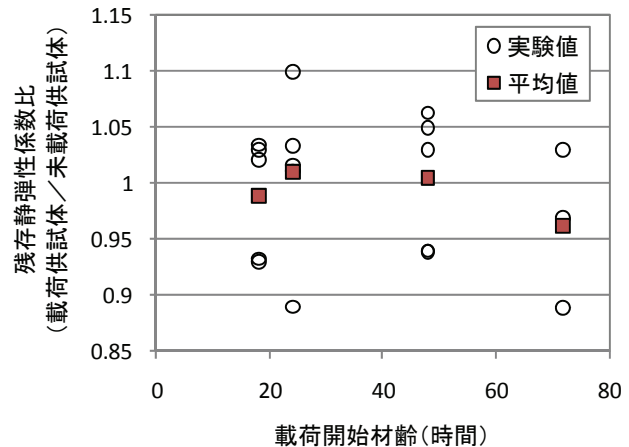


図-11 荷重開始材齢と残存静弾性係数比の関係 (水中)

コンクリートに多数回 (864000 回) の繰返し応力を負荷し、その直後の残存強度を検討しており、実際の交通状況とは様子が異なるが、本実験条件は実際よりも厳しい荷重条件となることから、安全側での検討を行ったものと考えられる。ただし、若材齢時に振動作用を受けるコンクリートの長期的な力学特性については不明であり、また、繰返し応力比の大きさや繰返し荷重期間などの影響、ばらつきを考慮した残存強度の評価方法、振動作用により残存強度・静弾性係数が増減するメカニズムなど、今後さらに検討すべき点は多いと考えている。

謝辞

本研究を実施するにあたり、平成 20 年度 九州建設技術管理協会研究助成金の助成を受けました。また、実験の実施にあたっては宮崎大学工学部 4 年の久保陽平君の協力を得ました。ここに付して謝意を表します。

参考文献

- 1) 河野伊知郎, 中嶋清実, 吉田弥智, 湯浅晃行: 超速硬コンクリートの若材齢における圧縮疲労強度特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.321-326, 1996
- 2) 河野伊知郎, 中嶋清実, 梅原秀哲, 湯浅晃行: 新タイプ超速硬セメントコンクリートの若材齢における圧縮疲労強度特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.1-6, 1998
- 3) 椿龍哉, 狩野周, 林和彦: 振動作用下で硬化した断面修復材の付着強度試験方法, セメント・コンクリート論文集, No.61, pp.168-174, 2007
- 4) 松下博通: 繰返し応力を受けるコンクリートの疲労強度および疲労破壊機構に関する研究, 九州大学学位論文, 1980
- 5) A. M. Neville 著, 三浦尚訳: ネビルのコンクリートバイブル, 技報堂出版株式会社, p.426, 2004