

論文 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

河野伊知郎*¹・中嶋清実*²・梅原秀哲*³・湯浅晃行*⁴

要旨：本研究は超速硬セメントコンクリートが強度発現過程に圧縮疲労を受けた場合、その後の強度発現にどのような影響を及ぼすかを明らかにしようとしたものである。今回の研究では、新たに開発された新タイプ超速硬セメントおよび従来型の超速硬セメントを用いた。その結果、本実験条件下での応力レベルおよび載荷回数のもとでは新タイプおよび従来型のセメントの種類によらず疲労による悪影響は見られず強度が増進することが明らかとなった。また、その原因として、疲労を受けた場合コンクリート供試体の内部温度の上昇、細孔容積が減少し緻密になること等を明らかにした。

キーワード：超速硬セメントコンクリート、圧縮疲労強度、若材齢、積算温度、細孔容積

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、道路橋などの社会資本の維持・管理・補修に関する技術向上が求められている。特に交通荷重が直接作用する床版の損傷は著しいものがあり、多くの補強工事、さらに床版全体を打ち替えるような大規模な工事が多く報告されている。これらの工事のほとんどは交通遮断を伴う場合が多く、短時間に工事を完了し、交通開放をしなければならない。しかし、早期交通開放を行った場合、コンクリートの強度が十分発現していないときに交通荷重による繰返し荷重が作用することになり、この影響がその後の強度発現にどのような影響を及ぼすかを把握しておく必要がある。そこで本研究では、補修工事に実績のある従来型の超速硬セメントおよび現場の作業性、施工性をさらに改善した新タイプ超速硬セメントを用いて若材齢時のコンクリートの圧縮疲労強度特性を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験で使用した材料を以下に示す。セメントは最近開発されたC O社製の新タイプ超速硬セメント（比重 3.02）および従来から用いられている超速硬セメント（比重 3.04）の2種類を使用した。表-1に新タイプ超速硬セメントと従来型の超速硬セメントの鉱物組成、表-2に両セメントの化学成分を示す。表-1より新タイプ超速硬セメントは速硬性鉱物であるアーウィンクリンカー（ $C_4A_3\bar{S}$ ）を、従来型の超速硬セメントはカルシウムフルオロアルミネイト（ $C_{11}A_7CaF_2$ ）を主成分としているのがわかる。これらの鉱物がエトリンガイトを生成し、初期強度を増大させている。粗骨材は静岡県天竜川産の川砂利（比重= 2.66, FM= 6.76, 吸水率= 0.84%）、粗骨材の最大寸法= 25mm）を使用した。細骨材は岐阜県揖斐川産の粗砂（比重= 2.60, FM= 3.05, 吸水率= 2.27%）と三重県長良川産の細砂（比重= 2.59, FM= 2.18, 吸水率= 1.73%）を重量比 6.6 : 3.4 の割合で混合した混合砂を使用した。混和剤は、高性能減水剤と凝結遅延剤を使用した。高性能減水剤は、新タイプ超速硬セメントコンクリート、超速硬セメント

- * 1 豊田工業高等専門学校 助手 環境都市工学科, 工修 (正会員)
- * 2 豊田工業高等専門学校 教授 環境都市工学科, 工博 (正会員)
- * 3 名古屋工業大学 教授 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 特殊コンクリート統括部, (正会員)

表-1 セメントの鉱物組成

セメントの種類	鉱物組成 (%)						
	C_4A_3S	$C_{11}A_7CaF_2$	CS	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
新タイプ超速硬セメント	23.2	—	13.7	23.1	24.1	4.3	6
超速硬セメント	—	20.6	17.3	50.4	1.7	—	4.7

表-2 セメントの化学成分

セメントの種類	化学成分 (%)							
	ig loss	insol.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
新タイプ超速硬セメント	1.1	0.1	14.4	13.7	2.0	54.5	1.4	11.7
超速硬セメント	0.6	0.1	13.8	11.4	1.5	59.1	0.9	10.2

表-3 コンクリートの配合

種類	スランブの範囲 (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					凝結遅延剤 (g/m ³)	高性能減水剤 (cc/m ³)
				水	セメント	細骨材		粗骨材		
						細砂	粗砂			
SJ	18.0±2.0	34	40	135	400	138	551	1134	4000 4800	8000
J	18.0±2.0	35	41	141	400	252	489	1090	1200	8000

コンクリート、どちらもK社製ポリアルキルアリルスルホン酸塩系高性能減水剤 (MT-150) をセメント量の2%添加とし、凝結遅延剤は新タイプ超速硬セメントコンクリートにはC〇社製有機カルボン酸系凝結遅延剤とヘプトン酸ソーダをセメント量の0.5%または0.6%ずつ合わせて1.0%または1.2%添加し、超速硬セメントコンクリートにはC〇社製有機カルボン酸系凝結遅延剤のみをセメント量の0.3%添加した。

2.2 コンクリートの配合

配合は試し練りより決定した。所要スランブを18.0±2.0cm、単位セメント量を400 kg/m³としてスランブ試験を行い、同じワーカビリティを得るために必要な単位水量、最適細骨材率および凝結遅延剤の添加量を決定した。その配合を表-3に示す。新タイプ超速硬セメントコンクリートについては凝結遅延剤として、有機カルボン酸系凝結遅延剤およびヘプトン酸ソーダの2種類を併用した場合のワーカビリティが良好だったため、

混合して使用することにした。以後、新タイプ超速硬セメントコンクリートをSJ、超速硬セメントコンクリートをJと略す。

2.3 供試体

供試体は直径10cm、高さ20cmの円柱供試体を使用した。コンクリートの練混ぜは55リットルのパンタイプ強制練りミキサーを用い、練混ぜ時間は3分間とした。供試体には図-1に示したように、内部温度を測定するために温度測定用供試体の中心部に熱電対を埋め込んだ。また、载荷中の縦方向のひずみおよび横方向のひずみを測定するため、疲労供試体側面にひずみゲージを縦方向2枚、横方向2枚、計4枚貼り付けた。

2.4 疲労試験に用いた波形および応力レベル

図-2に疲労試験に用いた波形を示す。疲労試験に用いた波形はsin波で、振動数(f)は10Hz、载荷回数(n)は1万、10万、100万回の3種類で行った。応力レベルの上限值、下限値は初期強度の60%、15%および70%、15%の2種類である。以

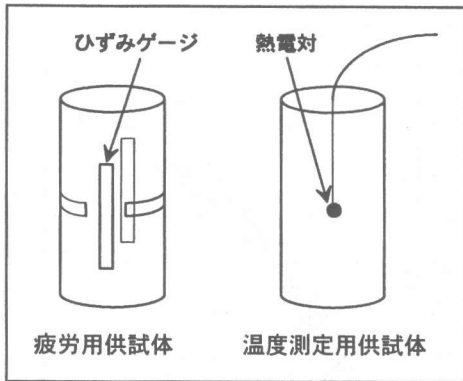


図-1 供試体概要図

後、これらの応力レベルを応力レベル60および応力レベル70と略す。また、疲労荷重が作用することによる内部温度の変化を測定する実験では、外気温の影響を避けるためにそれぞれの供試体を断熱材で覆いながら内部温度を測定した。

疲労試験の回数は、コンクリート種類につき載荷回数が3種類、目標強度が2種類、また供試体のばらつきを考慮して一つの実験について3回以上行った。

2.5 実験手順

供試体は外気で打設してから圧縮強度が目標強度に達するまで+20℃の恒温恒湿室で保管した。目標強度は19.6, 39.2 N/mm² (200, 400 kgf/cm²) の2種類である。目標強度をこの2点に設定したのは予備実験により超速硬セメントコンクリートの圧縮強度と積算温度の関係において圧縮強度40 N/mm²付近で変曲点を持つことが明らかとなっているので、若材齢時の強度を変曲点前に一点、変曲点付近で一点を設定した。供試体が所定の目標強度付近に達した時の実測値を初期強度とし、その強度から応力レベルを設定し、疲労試験を開始した。この時、初期強度を測定してから疲労試験を開始するまでに数分要するので、疲労試験開始時の強度(疲労開始強度)を圧縮強度と積算温度の関係式より算定した。次に、所定の疲労試験終了後、疲労した供試体および同じ条件で放置した供試体の圧縮強度を測定した。これらの圧縮強度をそれぞれ残存強度および比較強度とする。図-3に初期強度、目標強度および疲労開始強度の概念図を示す。

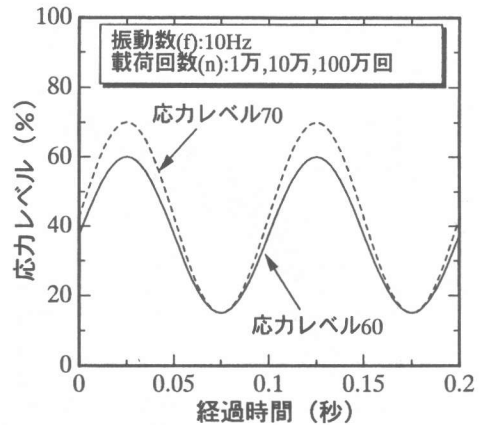


図-2 実験に用いた波形

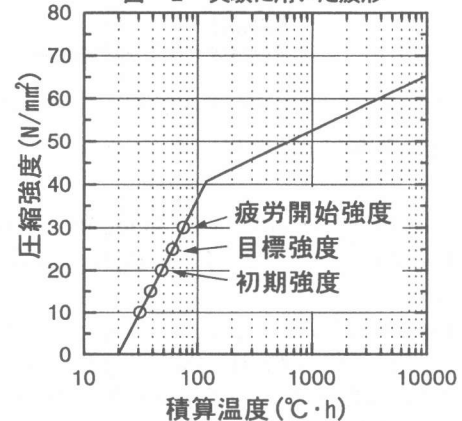


図-3 各強度の概念図

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度と積算温度の関係

図-4、図-5は新タイプ超速硬セメントコンクリート(SJ)および超速硬セメントコンクリート(J)の圧縮強度と積算温度の関係を示した図であり、縦軸に圧縮強度、横軸に積算温度(M)を対数で示している。ここで、積算温度とは養生温度と経過時間の積であり次式のように表される。

$$M = \sum (\theta + A) \Delta t$$

M: 積算温度(℃・時), A: 定数で10℃を用いた

θ : Δt 時間中のコンクリート温度(℃), Δt : 時間

これらの図よりSJ, Jどちらも強度発現初期に急激に強度が増進する領域と、緩やかに増進する領域が存在しているのがわかる。この境界は、SJは積算温度120℃・h付近、Jは210℃・h付近であることがわかる。この境界を変曲点として、2つの対数関数で近似すると以下に示す式(1)、(2)、(3)、(4)のようになる。図中の実線はこの関係を図示し

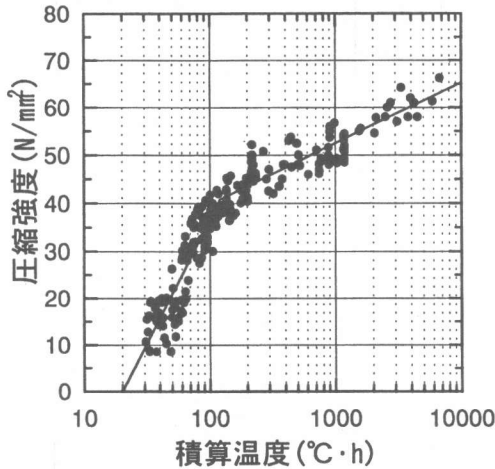


図-4 SJの圧縮強度と積算温度の関係

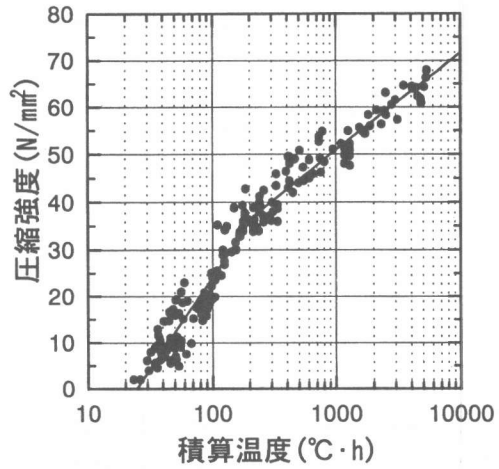


図-5 Jの圧縮強度と積算温度の関係

たものである。これらの図よりSJの方がJより初期の強度発現が明らかに大きいことがわかる。

SJ :

$$M < 120 : f'_c = -68.02 + 52.31 \log M \dots (1)$$

$$M > 120 : f'_c = 14.12 + 12.80 \log M \dots (2)$$

J :

$$M < 210 : f'_c = -55.13 + 39.60 \log M \dots (3)$$

$$M > 210 : f'_c = -11.01 + 20.63 \log M \dots (4)$$

M : 積算温度 (°C·h) f'_c : 圧縮強度 (N/mm²)

3.2 応力レベル

表-4は応力レベル60および応力レベル70の疲労試験開始時の応力レベルを示した表である。この表の上限値、下限値が目標の応力レベルの60%、15%および70%、15%になっていないものがあるのは初期強度を測定してから実際に疲労試験を開始するまでに多少の時間がかかるためであり、この間に強度が発現しているためである。なお、この表の基準となる疲労試験開始時の圧縮強度は先に示した関係式より算定した。

3.3 疲労強度

図-6、図-7は応力レベル60および応力レベル70の圧縮強度比と疲労開始強度の関係を表した図である。縦軸に圧縮強度比(残存強度と比較強度の比)をとり、横軸に疲労開始強度をとっている。また、図中のSJ、Jはコンクリートの種類、その後の60、70は応力レベルを表している。図-6より、応力レベル60の1万回では、荷重回数が少ないこともあり、コンクリートの種類に関わらず残

表-4 荷重レベルの上限値と下限値

種類	目標強度 (N/mm ²)	応力レベル60		応力レベル70	
		上限値の 平均(%)	下限値の 平均(%)	上限値の 平均(%)	下限値の 平均(%)
SJ	19.6	55	14	66	14
	39.2	59	15	68	15
J	19.6	56	14	65	14
	39.2	60	15	69	15

存強度と比較強度に大きな差はみられず、疲労による影響はあまりないといえる。10万回についてはSJ、Jどちらも圧縮強度比が1.05程度であり、疲労を受けた供試体の方が疲労を受けていない供試体よりも5%程度高い圧縮強度が認められた。100万回においては、さらに高い圧縮強度比が得られた。特に目標強度39.2 N/mm²においては圧縮強度比が1.1程度となっており、圧縮強度が10%程度増加している。図-7の応力レベル70の1万回では、応力レベル60と同様にSJおよびJどちらも疲労による影響はあまり受けていない。10万回ではSJ、Jどちらも圧縮強度比が1.1程度、100万回においては圧縮強度比が1.1以上となっている。特に目標強度39.2 N/mm²においては圧縮強度比が1.15程度と高い値を示している。これらの実験結果より、今回の疲労試験条件下では疲労による圧縮強度低下は認められず、逆に圧縮強度が増加していることが明らかとなった。この傾向は荷重回数が多いほど、また応力レベル60よりも応力レベル70の方が顕著に現れている。

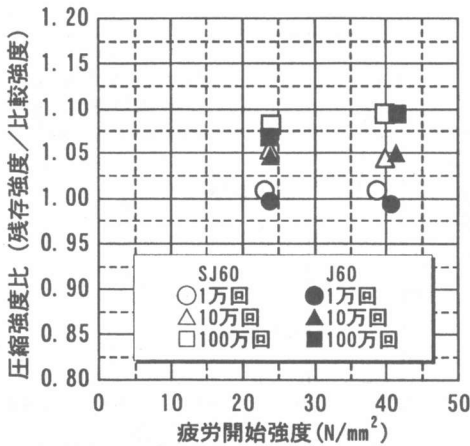


図-6 圧縮強度比と疲労開始強度の関係 (応力レベル60)

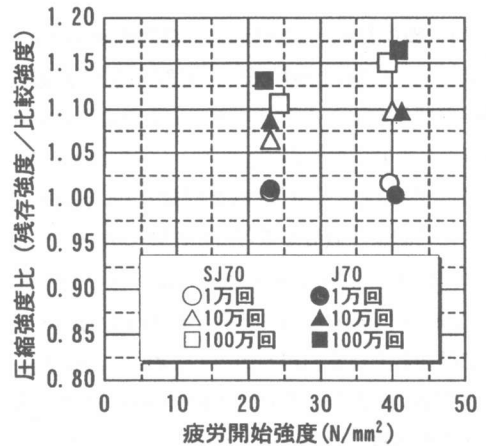


図-7 圧縮強度比と疲労開始強度の関係 (応力レベル70)

3.4 ひずみ

図-8は疲労試験開始と終了直前の縦ひずみおよび横ひずみの値を比較するため同一の経過時間上に示したものである。図中のひずみは無載荷供試体の自己収縮ひずみの補正を行ったものである。疲労条件は目標強度39.2 N/mm²、載荷回数100万回である。太線の実線で示した疲労終了直前の縦ひずみは、太線の破線で示した疲労開始時よりも450μ程度増加している。

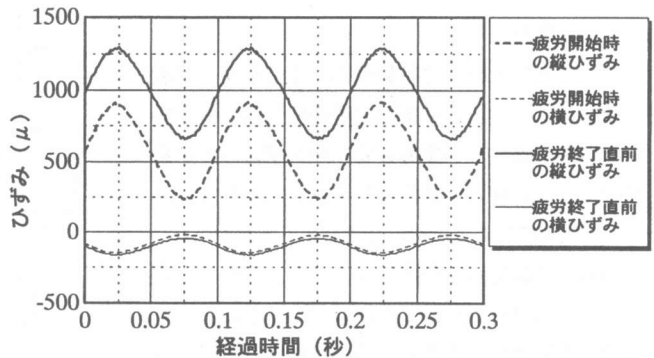


図-8 供試体のひずみ

除荷後も400μ程度の残存ひずみが観測され、疲労載荷により縦ひずみが増加していることがわかる。細線で示した横ひずみに関しては縦ひずみほど大きな差が見られなかった。これらの結果より、繰返し荷重が作用することにより多少ではあるが供試体が緻密になったと考えられる。

3.5 内部温度

図-9、図-10はSJの応力レベル60および応力レベル70の経過時間と供試体内部温度の関係を示したものである。載荷条件は目標強度19.6 N/mm²、載荷回数100万回である。図-9の応力レベル60では打設直後は疲労用供試体および比較用供試体どちらの供試体も水和反応により急激に内部温度が上昇し、その後、時間の経過とともに低下している。疲労試験を開始してから8時間経過した頃から疲労用供試体の内部温度が比較用供試体よりも2℃程度高い値を示している。これは繰返

し荷重が作用することにより内部温度が上昇したためと考えられる。図-10の応力レベル70では応力レベル60と同じような温度変化を示しており疲労試験を開始してから8時間以後では、疲労用供試体の内部温度の方が比較用供試体よりも5℃程度高い値を示しており、応力レベル60よりも内部温度差が大きくなっている。本実験の最終的な積算温度を算定すると応力レベル60では疲労用供試体が772℃・h、比較用供試体が731℃・hとなり、応力レベル70では疲労用供試体が801℃・h、比較用供試体が728℃・hとなった。これらの実験結果より繰返し荷重が作用すると内部温度が上昇すること、応力レベルが高くなるほど供試体の内部温度が上昇することがわかった。Jについても内部温度測定の実験を行ったが同様の傾向が見られた。このような疲労載荷に伴う内部温度の上昇が残存強度の増加に影響している一要因と考えられる。

3.6 細孔直径と細孔容積および累積細孔容積

図-11は細孔直径と細孔容積および累積細孔容積の関係を示したものである。実験には超速硬セメントのモルタル供試体を用い、応力レベル70、目標強度を19.6 N/mm²、载荷回数を100万回とした。この図より疲労を受けた供試体の方が、そうでない供試体よりも、孔の直径が0.2~0.9 μmの範囲で減少し、それよりも細かい0.05~0.2 μmの範囲で増加しているのがわかる。これは、繰返し荷重が作用することにより、供試体内部の比較的大きな孔が閉塞し緻密になったことも一つの要因と考えられる。

4. まとめ

今回行った圧縮疲労試験条件下では新タイプ超速硬セメントおよび従来型の超速硬セメントを用いた場合、どちらも疲労を受けた供試体の方が疲労を受けていない供試体よりも高い圧縮強度が得られ、圧縮疲労による悪影響は認められなかった。この傾向は载荷回数が多いほど、また応力レベル60よりも応力レベル70の方が顕著に見られた。そこでこの原因を調査するための実験も行った。その実験から明らかとなった原因を以下に簡単にまとめる。①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、圧縮強度が高くなること。②新タイプ超速硬コンクリートは初期にアーウィングリンカー (C₄A₃S̄) が、超速硬コンクリートは初期にカルシウムフルオロアルミネート (C₁₁A₇·CaF₂) が水和し、エトリンガイトの粗な水和物を生成するが、繰返し荷重が作用することにより細孔容積が減少し緻密になること。

参考文献

- 1) 河野伊知郎・中嶋清実・湯浅晃行：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，コンクリート工学年次論文報告集，第18巻，第1号，1048，pp.321-326，1996.6
- 2) 小柳川 雅・国府勝郎・福田 正：コンクリート舗装版の曲げ疲労に関する基礎的研究，土木学会論文集，第372号/V-5，pp.131-137，1986

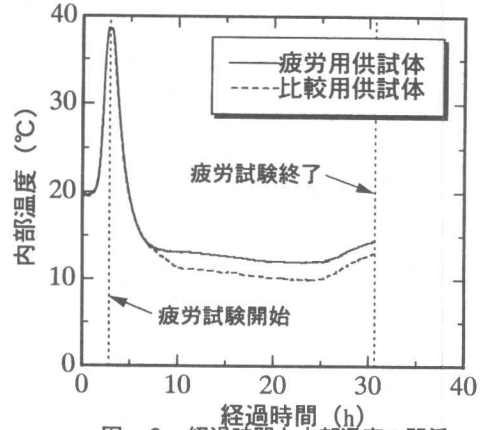


図-9 経過時間と内部温度の関係 (応力レベル60)

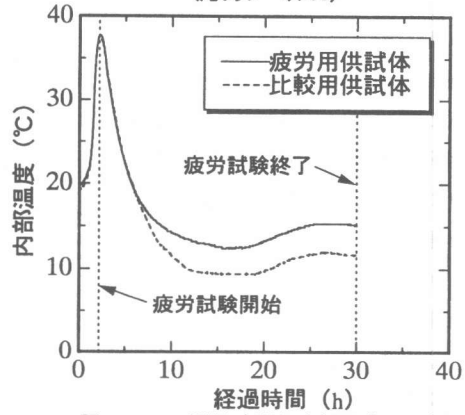


図-10 経過時間と内部温度の関係 (応力レベル70)

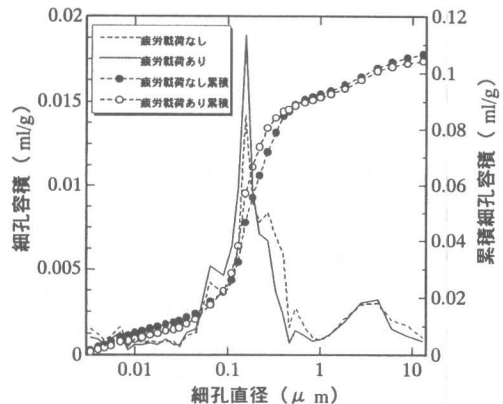


図-11 細孔直径と細孔容積および累積細孔容積の関係

- 3) F. S. OPLE, JR. AND C. L. HULSBOS : Probable Fatigue Life of Plain Concrete With Stress Gradient, JOURNAL OF THE AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, pp.59-81, January 1966