

論文 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

河野伊知郎*¹・中嶋清実*²・吉田弥智*³・湯浅晃行*⁴

要旨: 本研究は超速硬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。その結果、本実験条件下での荷重レベル（上限値60%, 下限値15%および上限値70%, 下限値15%）および載荷回数（1, 10, 100万回）のもとでは、疲労による悪影響は受けずに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細孔容積が減少し緻密になることを明らかにした。

キーワード: 超速硬コンクリート, 圧縮疲労強度, 若材齢, 積算温度, 細孔容積

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は阪神地区の高速道路、鉄道橋等に大きな損害を与え、その復旧工事は急務とされている。また、都心部では交通量の増加、交通荷重の増大に伴って道路橋の累積損傷が著しく増加している。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、早急に交通開放をしなければならない。しかしながら、早期交通開放を行った場合、しばしば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り返し荷重が作用することがあり、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が、まだ十分には明らかとなっていないのが現状である。そこで本研究では、補修工事に実績のある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て行った。

2. 実験概要

2. 1 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料は以下に示す通りである。

セメントにはO社製超速硬セメントを使用した。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=2.19%）と三重県長良川産の細砂（比重=2.59, FM=2.18, 吸水率

表-1 コンクリートの配合

スランプ の範囲 (cm)	水セメン ト比 W/C(%)	細骨材 率 s/a(%)	単位量(kg/m ³)					専用凝結 遅延剤 (g/m ³)	高性能減 水剤 (cc/m ³)
			水	超速硬 セメント	細骨材		粗骨材		
					細砂	粗砂			
18.0±2.0	35	41	141	400	252	489	1,090	1,200	8,000

* 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 学 長、工博（正会員）

* 4 小野田ケミコ株式会社 大阪支店、工修（正会員）

(=1.67%)を重量比 6.6:3.4 の割合で混合した混合砂を使用した。混和剤は専用凝結遅延剤：O社製セッターを単位セメント量に対して0.3%添加、高性能減水剤：K社製高性能減水剤（MT-150）をセメント量に対して2.0%添加した。

超速硬コンクリートの配合は試し練りにより決定した。所要のスランブを 18.0 ± 2.0 cm、単位セメント量を 400 kg/m^3 とし、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および最適細骨材率を決定した。その配合を表-1に示す。

2.2 供試体

供試体は直径10cm、高さ20cmの円柱供試体を使用した。コンクリートの練り混ぜには50ℓのパンタイプ強制練りミキサを用い、練り混ぜ時間を3分間とした。今回、強度推定に積算温度法を用いるため、供試体の内部温度を測定する必要がある。そこで、供試体中心部に熱電対を埋め込んだ温度測定用供試体も同時に作成した。また、疲労载荷中の供試体の縦方向および横方向のひずみを測定するため、疲労载荷をかける供試体の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。図-1にこれらの供試体の概要図を示す。

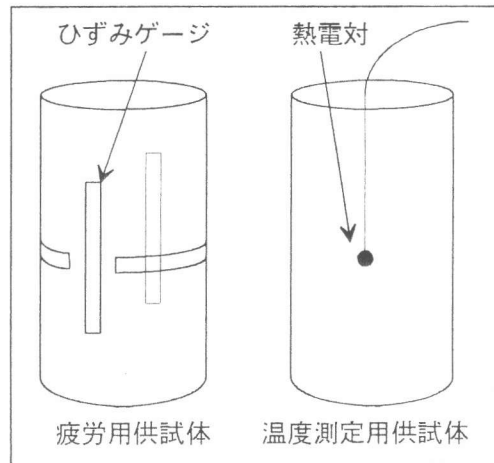


図-1 供試体概要図

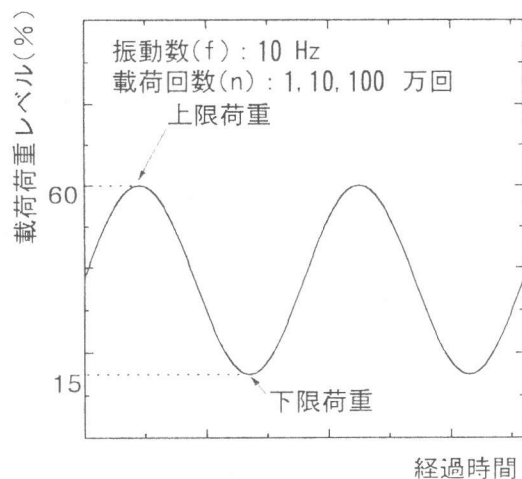


図-2 実験に用いた波形

2.3 疲労試験に用いた波形

図-2に今回用いた疲労試験の波形を示す。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種類である。荷重レベルの上限値、下限値は初期強度の60%、15%および70%、15%の2種類である。以後、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。今回行った疲労試験の回数、応力レベル60については载荷回数が3種類、目標強度が4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、応力レベル70については载荷回数が3種類、目標強度が3種類、一つの実験について2回、合計54回行った。

2.4 実験手順

図-3に本実験の一連の流れを示す。供試体は外気で打設し、圧縮強度が目標強度に達するまで $+20^\circ\text{C}$ の恒温恒湿室で保管した。応力レベル60の目標強度は10.2、20.4、40.8、51.0 MPa (100、200、400、500 kgf/cm^2)の4種類、応力レベル70の目標強度は10.2、20.4、40.8 MPa (100、200、400、 kgf/cm^2)の3種類である。超速硬セメントの早期強度の発現は主としてエトリングガイトの活発な生成によるものであり、その後の強度の発現はエーライトの水和によるけい酸カルシウムの生成に依存している^[1]。その境界が圧縮強度 400 kgf/cm^2 付近であるのでこの点を変曲点とし、目標強度を変曲点まで3点、その後1点設定した。次に、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、その強度を元に荷重レベルを設定し、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

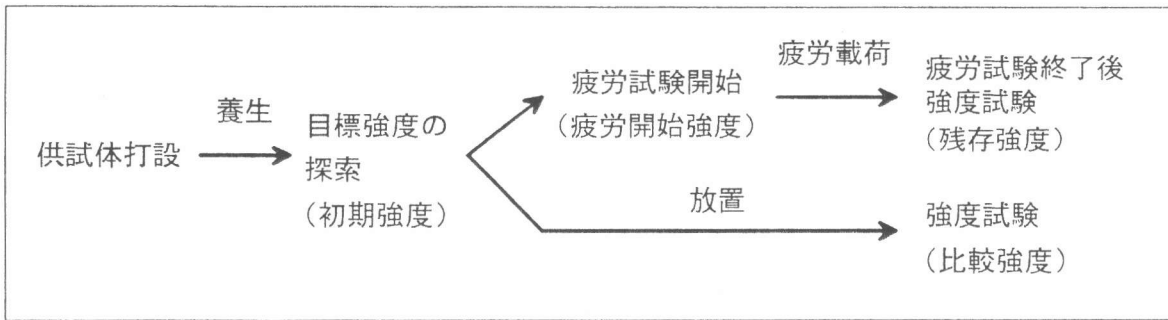


図-3 疲労試験の流れの概要図

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し、残存強度と比較強度の比を圧縮強度比とする。

3. 圧縮強度と積算温度の関係

3.1 積算温度法

図-4は温度測定用供試体で計測した供試体内部の温度履歴の一例である。縦軸に供試体の内部温度をとり、横軸に打設してからの経過時間をとっている。この図から超速硬セメントコンクリートを夏期に打設したため打設直後は供試体の内部温度が約30℃と高温になっているが、20℃の恒温室に供試体を放置しているため、時間の経過とともに内部温度は20℃に落ち着くのがわかる。今回、この内部温度を用いて圧縮強度を推測する積算温度法を用いた。

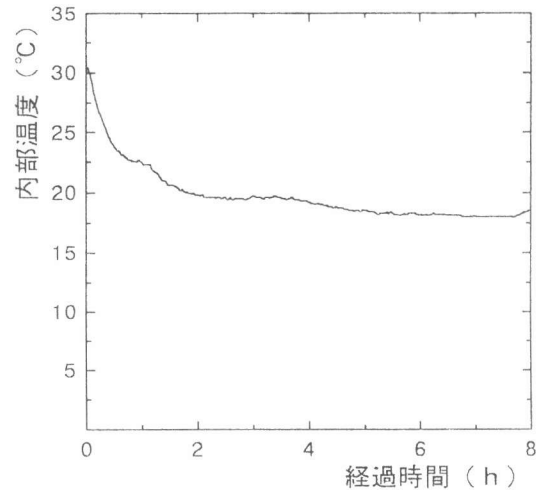


図-4 供試体内部の温度履歴

3.2 積算温度と圧縮強度

図-5、6は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を表した図である。この図は、縦軸に圧縮強度をとり、横軸に積算温度 (M) を対数でとっている。これらの図より強度発現初期に急激に強度が増加する領域と、緩やかに増加する領域が存在しているのがわかる。このように二つの領域が存在するのは超速硬セメントの強度において生成時期を異にする2種類の水和物、すなわちエトリンガイトが変曲点の前半を、けい酸カルシウムが後半を主に受け持っているからである。この境界は積算温度 $M=70^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 付近にあるので、強度と積算温度の関係を積算温度 $M=70^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ を変曲点とし、対数関数で近似すると以下に示す式(1)、(2)のようになる。図-5の実線はこの関係を図化したものである。

$$M < 70 : f_c = -116.8 + 79.5 \log M \quad \dots\dots(1)$$

(R=0.854)

M : 積算温度 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$)

f_c : 圧縮強度 (MPa)

$$M > 70 : f_c = -21.9 + 28.2 \log M \quad \dots\dots(2)$$

(R=0.986)

R : 相関係数

ここで、 $M < 70^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ の区間をべき乗関数で表すと次に示す(3)式のようなになる。図-6の曲線はこの関係を図化したものである。

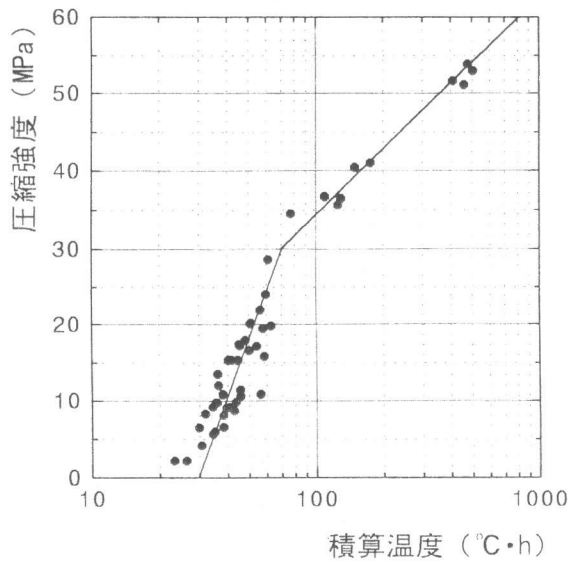


図-5 圧縮強度と積算温度の関係

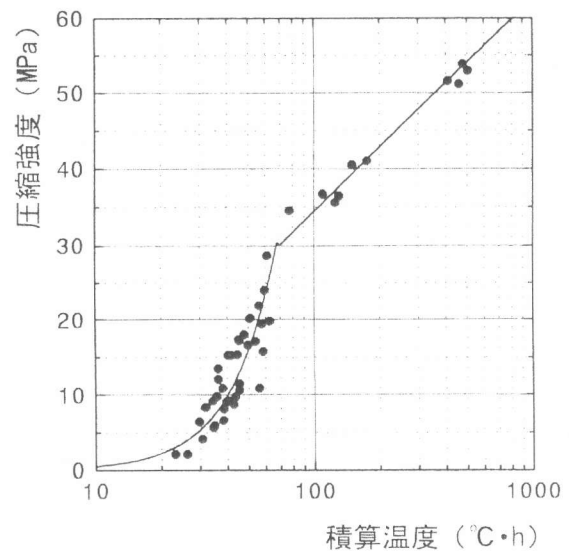


図-6 圧縮強度と積算温度の関係

$$M < 70 : f_c = 3.746 \times 10^{-3} \times M^{2.135} \dots\dots(3)$$

$$(R=0.870)$$

このように、 $M < 70^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ の区間では式(3)に示したように、対数関数ではなく、べき乗関数で表した方が相関係数が高くなっている。しかし、今回は式が簡単で使いやすい式(1)、(2)の対数関数を用いて強度の推定を行った。

4. 実験結果および考察

4. 1 ひずみ

図-7は目標強度が最も高い試験の疲労試験開始および終了直前の縦ひずみおよび横ひずみの平均値を比較しやすいように同一の経過時間上に示した図である。疲労条件は応力レベル60の目標強度51.0MPa、載荷回数100万回である。また、この図に示したひずみの値は、疲労用供試体側面に貼り付けた縦方向2枚、横方向2枚の各ひずみゲージで得られた値の平均値で表している。まず、太線で示した疲労試験開始および細線で示した終了直前の縦ひずみと横ひずみを比較すると、横ひず

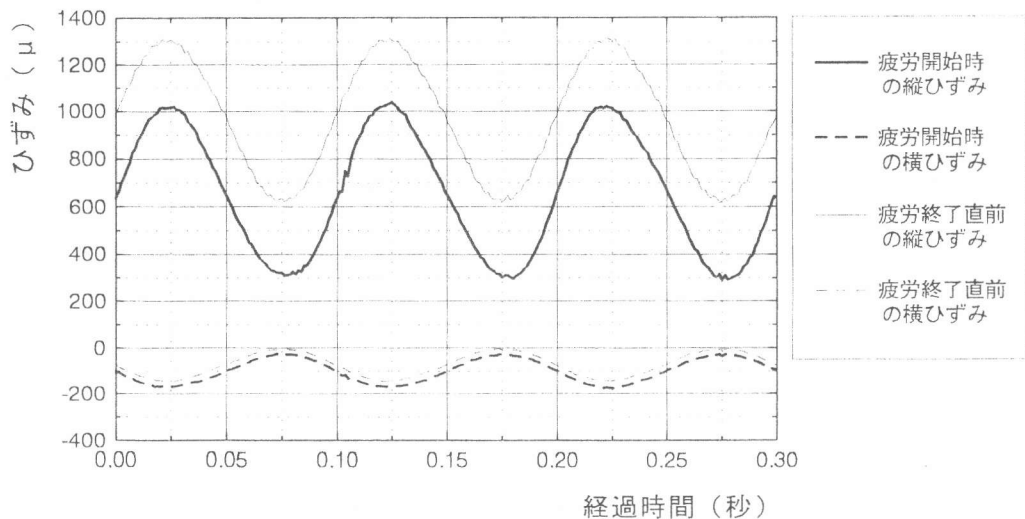


図-7 疲労载荷を受けた供試体の縦ひずみおよび横ひずみ

表-2 荷重レベル60の上下限值

目標強度 (MPa)	上限値の平均 (%)	下限値の平均 (%)
10.2	3.8	1.0
20.4	5.2	1.3
40.8	6.0	1.5
51.0	6.0	1.5

表-3 荷重レベル70の上下限值

目標強度 (MPa)	上限値の平均 (%)	下限値の平均 (%)
10.2	4.8	1.0
20.4	6.3	1.4
40.8	6.9	1.5
51.0	—	—

みに関しては大きな変化が見られないが、実線で示した疲労開始時の縦ひずみは、破線で示した終了直前よりも300 μ 程度増加しているのがわかる。また、縦ひずみに関しては除荷後も300から400 μ 程度の残存ひずみが観測された。

4.2 疲労強度

表-2, 3は疲労試験の荷重レベルの上限値、下限値を示した表である。これらの表の上限値、下限値が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を要するからであり、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式(1), (2)の関係式より求めた。

図-8, 9は応力レベル60, 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。これらの図の値は同じ条件下で行った疲労試験の平均値で示している。まず、図-8の応力レベル60について見てみると、1万回では載荷回数が少ないので残存強度と比較強度に大きな差がみられず、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、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%ほど高い圧縮強度が認められた。100万回については、この傾向がさらに顕著となり、10%ほど高い強度が得られた。

図-9の応力レベル70については応力レベル60の傾向がさらに顕著に現れており、特に載荷回数100万回については疲労回数が増えるにつれて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た。これらの圧縮疲労試験結果より今回行った条件下では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多少ではあるが圧縮強度が上回り、圧縮疲労による圧縮強度低下は見られなかった。また、応力レベル60よりも応力レベル70の方がこの傾向が顕著に見られた。

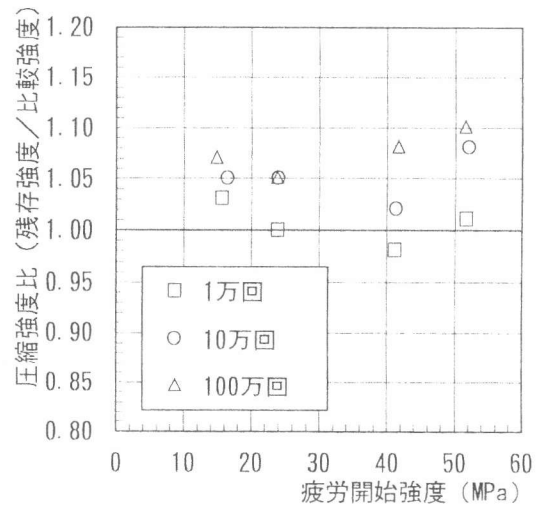


図-8 圧縮強度比と疲労開始強度の関係 (応力レベル60)

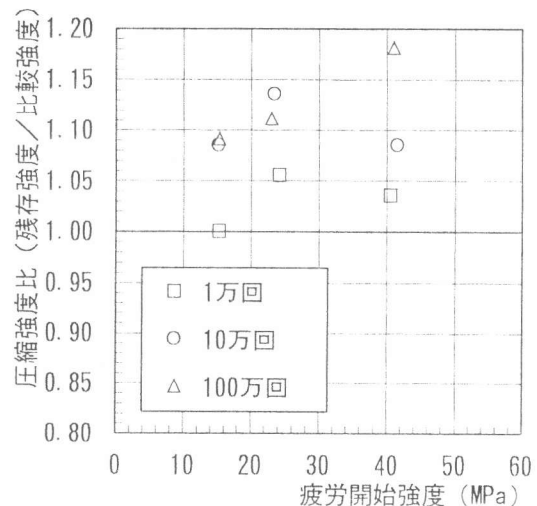


図-9 圧縮強度比と疲労開始強度の関係 (応力レベル70)

次に、表-4に全細孔容積および全空隙率、図-10に細孔直径と細孔容積および累積細孔容積の関係を示す。なお、測定は水銀圧入法で行った。実験にはモルタル供試体を用い、応力レベルの上限値、下限値を70%、15%、目標強度を20.4MPa、载荷回数を100万回とした。表-4より疲労载荷ありの供試体の方が、全細孔容積および全空隙率とも小さくなっていることがわかる。また、図-10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、繰り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破壊され密になったことも、一つの要因と考えられる。

表-4 全細孔容積および全空隙率

	全細孔容積(ml/g)	全空隙率(%)
疲労载荷あり	0.1042	21.67
疲労载荷なし	0.1065	22.41

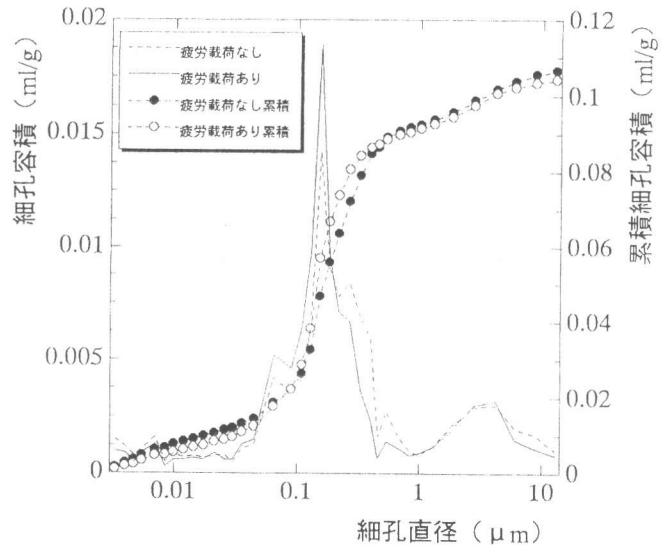


図-10 細孔直径、細孔容積および累積細孔容積の関係

5. まとめ

今回行った圧縮疲労試験より明らかになったことを、以下に簡単にまとめる。

- ①今回行った圧縮疲労試験の応力レベル条件下では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多少ではあるが圧縮強度が上回る傾向が見られ、圧縮強度に関しては、圧縮疲労による悪影響は認められなかった。また、この傾向は応力レベル60よりも応力レベル70の方が顕著に現れた。
- ②強度の増進の要因を検討するためにモルタル供試体を用いて疲労载荷ありおよび疲労载荷なしの供試体で細孔容積および空隙率を調べた結果、疲労载荷ありの供試体の方が全細孔容積および全空隙率とも小さくなった。また、疲労载荷ありの方が、疲労载荷なしの供試体よりも細孔径の直径が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ことが認められた。

参考文献

- [1]中嶋清実：超速硬セメントコンクリートの緊急工事および寒中工事への利用に関する基礎研究、学位論文、pp.38-39、1986.8
- [2]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、土木学会第50回年次学術講演会、V-357、pp.714-715、1995.9
- [3]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
- [4]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