

骨材及び繰返し荷重波形がソイルセメントの
圧縮疲労に及ぼす影響(Effects of Aggregates and Repeated Load Types on
the Compressive Fatigue in Soil-Cement Mixtures)

川 村 満 紀* (Mitsunori Kawamura)

榎 場 重 正** (Shigemasa Hasaba)

小 泉 徹*** (Tohru Koizumi)

キーワード：繰返し荷重／コンクリート／セメント
／土質安定処理／路床・路盤
IGC： K6

1. ま え が き

一般にソイルセメント用として使用される土は粒度が適当な範囲内であれば、所要の圧縮強度を得るために必要なセメント量も少なくなり、経済的なソイルセメント工法の適用が可能となる。この点について、粗粒子分の不足している山砂や粘性土に骨材を加えたソイルセメントは経済的に有利であることが竹下及び田中^{1),2)}によって確かめられている。更にこのような骨材を含むソイルセメントを細粒子ソイルセメント（細粒子土とセメントの混合物）と骨材より成る一種の複合材料と見なすならば、細粒子土とセメントより成る半剛性のソイルセメントマトリックス中に粒径が 15 mm 程度の骨材を混入することによってソイルセメントの種々の力学的性質が改善される可能性が考えられる。すなわち、骨材を含むソイルセメントにおいては、通常コンクリートについて考えられているように、ソイルセメントマトリックス中のき裂伝播に対して抵抗する要素としての骨材の役割を期待することができる。特に、繰返し荷重下における疲労寿命は供試体中のき裂の伝播速度に関係すると考えられるので、ソイルセメント中に存在する骨材はソイルセメントの疲労特性に大きな影響を及ぼすものと思われる。一方、繰返し荷重下におけるソイルセメントの疲労特性は供試体に与える荷重波形、すなわち荷重-時間関係によって影響を受けると考えられるが、従来の研究においては、疲労試験機の構造より荷重-時間関係が決まっ

てくることが多く、荷重波形がソイルセメントの疲労に及ぼす影響について検討するまでには至っていない。また、従来用いられている荷重波形は必ずしも舗装体中においてソイルセメントが受ける応力-時間関係を忠実にシミュレートしたものとはいいがたく、更に実際には路面の凹凸によって衝撃を伴う繰返し荷重を受けることも考慮されねばならない。最近、疲労試験機の発達に伴って種々の形の繰返し荷重を与えることが可能になってきた。例えば Pretorius³⁾ はソイルセメントの疲労試験において舗装体中の応力-時間関係をよく表現する関数として $haver\ sine\left(P(\theta) = \frac{1}{2(1-\cos\theta)}\right)$ を採用している。

本論文においては、通常のソイルセメントに骨材を混入することによって必要セメント量がかなり減少することを示すとともに、進展するき裂の骨材によるアレスト作用が特に重要な意味をもつと考えられる動的荷重下におけるソイルセメントの疲労特性について、コンクリートの疲労特性と関連づけながら実験的検討を加える。更に、従来のソイルセメントの疲労に関する研究において未解決の問題とされている繰返し荷重波形（荷重-時間関係）が疲労寿命に及ぼす影響について、2, 3 の観点から考察した結果について報告する。

2. 実 験 概 要

2.1 使用材料

実験において使用した 2 種類の砂質土 (Sandy Soil I 及び II) 及び粘性土 (Cohesive Soil I 及び II) は金沢市の丘陵地より採取したものであり、それらの物理的性質は表-1 に示すとおりである。砂質土は 4.76 mm ふるいを通過させたものであり、粘性土は室内において約 2 週間乾燥後、粉碎した後、2 mm ふるいを通過させ、有機物や砂利を除去したものである。使用骨材は通常のコンクリート用骨材であり、供試体寸法（直径 7.5 cm、高さ 15 cm の円柱）を考慮に入れて、骨材の最大寸法を 15

* 金沢大学複合材料応用研究センター 教授（金沢市小立野 2 丁目 40 の 20）

** 金沢大学工学部土木工学科 教授（金沢市小立野 2 丁目 40 の 20）

*** 石川高等工業専門学校 講師（石川県河北郡津幡町字北中条）

• この論文に対するディスカッションは昭和 56 年 1 月 1 日までに投稿ください。

表-1 使用土の物理的性質

Properties	Sandy Soil I	Sandy Soil II	Cohesive Soil I	Cohesive Soil II
Size Ranges :				
4.76mm-74 μ (%)	76.5	88.9	40.0	27.4
74 μ -5 μ (%)	17.5	6.8	36.8	44.6
<5 μ (%)	6.0	3.7	23.2	28.0
Liquid Limit (%)	—	—	56.7	59.8
Plastic Limit (%)	—	—	32.1	34.7
Plastic Index	—	—	24.6	25.1
Maximum Dry Density (kN/m ³)	15.19	19.36	13.39	12.68
Optimum Moisture Content (%)	22.0	11.0	30.4	32.5

表-2 骨材の物理的性質

Specific Gravity	Maximum Size	Fineness Modulus	Absorption
2.56	15 mm	7.12	2.02%

mm とした。使用碎石の物理的性質は表-2 に示すとおりである。また使用セメントはN社製普通ポルトランドセメントである。

2.2 供試体の作製法, 実験装置及び方法

供試体は直径 7.5 cm, 高さ 15 cm の円柱であり, 最適含水比において, 動的締固めによって作製したものである。すなわち, コンクリート用円柱型枠を使用し, 2.5 kg のランマーによって JIS A 1210-1970 の規定と同一の締固め仕事量となるように, 1層当たり17回の打撃を与え3層に締固めた。疲労試験における繰返し荷重はサーボバルサによって与えた。骨材がソイルセメントの疲労特性に及ぼす影響に関する実験における載荷速度は5サイクル/秒であり, 荷重波形は正弦関数である。また, 繰返し荷重波形が疲労特性に及ぼす影響に関する実験においては載荷速度は1サイクル/秒とした。繰返し載荷中の供試体の縦方向ひずみは差動トランス型ひずみ計(新光電機株式会社製)によって測定した。繰返し載荷中に供試体から水分が蒸発するのを防ぐために供試体をゴムスリーブによって密封した。応力レベルは応力比(一軸圧縮強度に対する比率)によって表示する。

2.3 平均破壊回数の求め方

ソイルセメントの疲労の寿命は, 金属やコンクリートと同程度あるいはそれ以上のばらつきを示す。金属材料及びコンクリートについては疲労破壊の統計的性質に関する理論が提案されてきたが⁸⁾, ソイルセメントの疲労破壊についてはほとんど解明されていない。しかし, ソイルセメントのS-N曲線及び応力振幅と破壊回数との関係について明らかにするためには, 比較的数少ない供試体(本実験では8個)より平均破壊数を推定する必要がある。そこで, 金属材料の疲労破壊の統計的性質に関する

一理論として提案されている一定の応力振幅に対する疲労寿命の分布は対数正規分布になるとの仮定を適用した。すなわち, ある応力条件下における試験結果から, 総数 n 個の供試体の破壊確率を小さい方から順に並べたときの m 番目の期待値よりその生存確率 $P=1-\{m/(n+1)\}$ を計算し, 片対数確率紙を用いて, 横軸及び縦軸にそれぞれ破壊回数 N 及び P をとって図示すると直線になる。この直線より, $P=0.5$ に対応する N を求めて, そのときの応力条件に対する平均破壊回数とした。例外点はF検定によって処理した。

3. 骨材がソイルセメントの疲労特性に及ぼす影響

3.1 必要セメント量及び最適骨材量の決定法

骨材としては 15 mm~10 mm の粒度範囲の碎石を使用した。日本道路協会編「アスファルト舗装要綱」を参考にして目標強度(7日材令)を $29.4 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ と

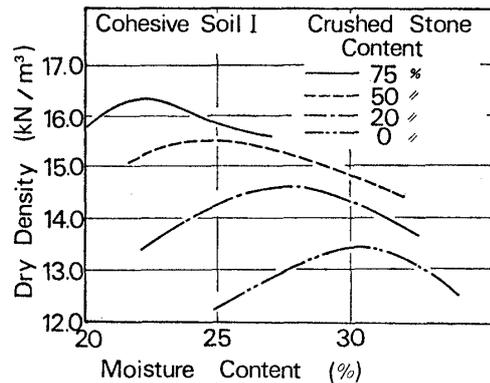


図-1 Cohesive Soil I における種々の碎石混入率に対する締固め曲線

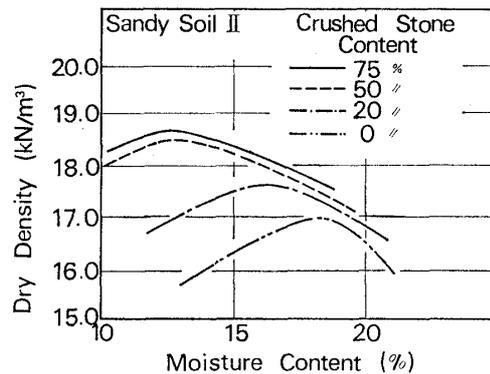


図-2 Sandy Soil II における種々の碎石混入率に対する締固め曲線

表-3 骨材量 50% における各セメント量に対する最大乾燥密度及び最適含水比

Cement Content (%)	Maximum Dry Density (kN/m ³)	Optimum Moisture Content (%)
10	14.84	28.8
20	15.68	24.5
30	16.46	23.0

表-4 骨材含有量の異なるソイルセメントの一軸圧縮強度 (7日材令)

Type of Soil			Cohesive Soil I			Sandy Soil II			
Cement Content (%)			10	20	30	5	10	20	30
Compressive Strength ($\times 10^2$ kN/m ²)	Crushed Stone Content	30%	5.98	27.4	34.0	1.6	17.3	49.5	94.5
		50%	11.0	36.8	46.2	25.3	37.8	95.4	155.1
		75%	16.0	22.7	38.7	11.1	39.5	105.7	213.9

し、混入骨材量として土試料に対する重量百分率で 75%、50% 及び 20% の 3 種類を選び、これらのうちで、最小必要セメント量を与える骨材量を実験によって決定した。各骨材量に対する最適含水比及び最大乾燥密度を求めるための締固め曲線は図-1 及び図-2 のようになる。Cohesive Soil I におけるセメント量に伴う最適含水比及び最大乾燥密度の変化は著しい (例えば骨材量 50% における各セメント量に対する最適含水比及び最大乾燥密度は表-3 に示すとおりである)。しかし Sandy Soil II においてはセメント量の最適含水比及び最大乾燥

密度に及ぼす影響はほとんどみられない。各骨材量と 2、3 のセメント量との組み合わせに対する 7 日材令における一軸圧縮強度試験結果は表-4 に示すとおりであり、ある目標強度を得るために必要なセメント量は Cohesive Soil I 及び Sandy Soil II とともに骨材量 50% において最小となることが分かる。骨材量 50% に対するセメント量と一軸圧縮強度の関係をえがき目標強度 30 kg/cm² に対する必要セメント量を求めると Sandy Soil II 及び Cohesive Soil I に対してそれぞれ 6.6% 及び 17.1% であった。

3.2 初期破壊点ひずみの定義

一般に、ソイルセメントにおいては横軸に対数目盛で繰返し回数をとり、縦軸に普通目盛でひずみをとって図示すると直線関係が得られ、疲労破壊を起こさない範囲内の応力条件下では、応力条件が多少異なってもひずみの進行速度はほぼ等しいが疲労破壊を起こすような応力条件下では、繰返し回数の増加に伴うひずみの進行速度は急に大きくなり⁹⁾、破壊点近くにおいてひずみは急激に増加し、折点が生ずる。この折点におけるひずみを初期破壊点ひずみと定義する。

3.3 骨材が初期破壊点ひずみに及ぼす影響

供試体の縦方向ひずみが急に増加し始めるときのひずみとして定義される初期破壊点ひずみは応力条件に関係なくほぼ一定値を示すことが確かめられている⁴⁾。本実験の結果によると、骨材を含まない Cohesive Soil I 及び Sandy Soil II の初期破壊点ひずみはそれぞれ平均 7.0×10^{-3} 及び 4.0×10^{-3} である。図-3 及び図-4 に示されるように、骨材を含む Cohesive Soil I 及び Sandy Soil II のソイルセメントの平均の初期破壊点ひずみはそれぞれ約 5.6×10^{-3} 及び 6.0×10^{-3} となる。骨材を混入することによって、初期破壊点ひずみのばらつきの範囲はかなり大きくなっている。骨材の存在によって Cohesive Soil I ではひずみ値は多少小さくなり、Sandy Soil II では逆に多少大きくなっているが、ばらつきの範囲から考えて、骨材混入による影響はさほど顕著なものではないようである。

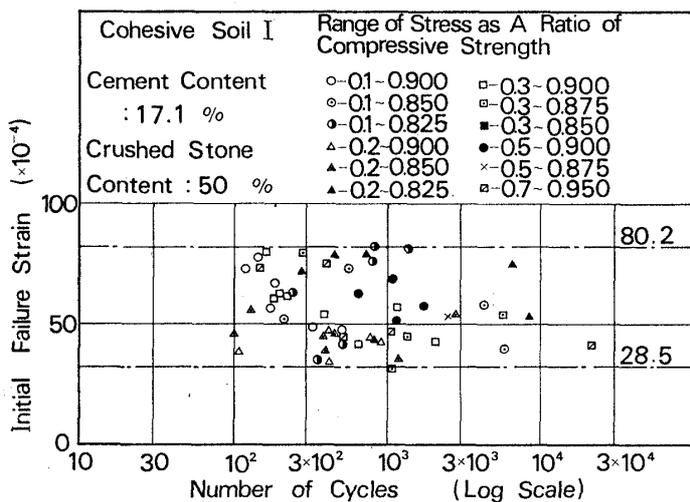


図-3 砕石を含むソイルセメントの初期破壊点ひずみ (Cohesive Soil I)

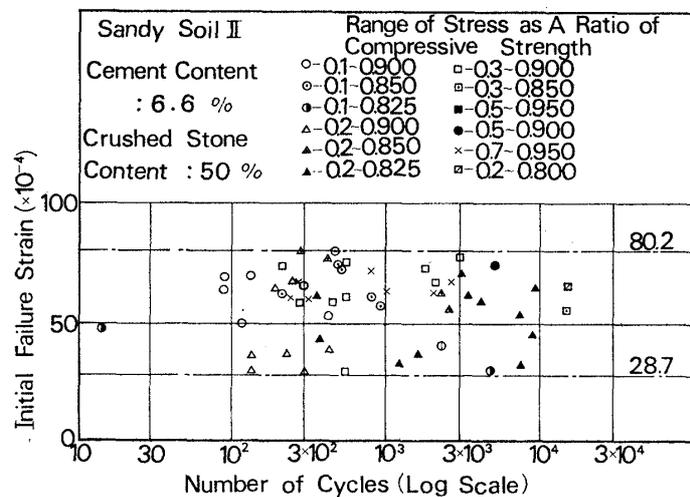


図-4 砕石を含むソイルセメントの初期破壊点ひずみ (Sandy Soil II)

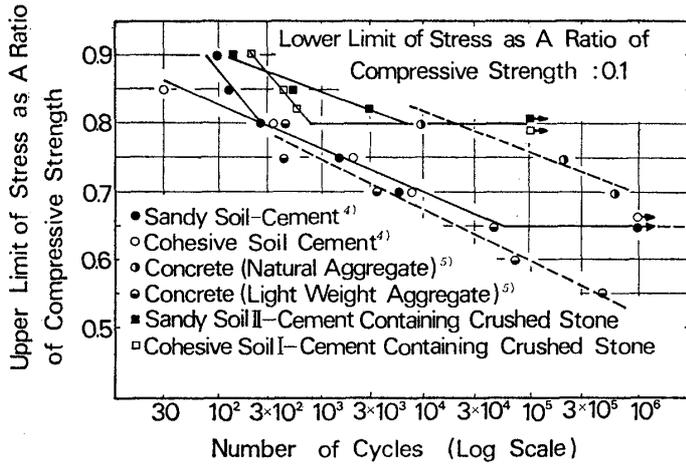


図-5 ソイルセメント及びコンクリートの S-N 曲線

表-5 使用土の物理的性質

Properties	Sandy Soil	Cohesive Soil
Size Ranges :		
4.76 mm-74 μ (%)	76.3	45.0
74 μ-5 μ (%)	15.3	24.0
<5 μ (%)	8.4	31.0
Liquid Limit (%)	—	78.0
Plastic Limit (%)	—	58.3
Plastic Index (%)	—	19.7
Maximum Dry Density (kN/m ³)	18.65	11.15
Optimum Moisture Content (%)	13.6	46.0

3.4 骨材が S-N 曲線に及ぼす影響

下限応力比 0.1 のときの上限応力比 (S) と破壊までの繰返し回数 (N) の関係、すなわち、S-N 曲線は図-5 のようである。ソイルセメント中に存在する骨材が S-N 曲線に及ぼす影響について明らかにするために、図-5 には阪田・木山・西林⁵⁾によって得られた普通及び軽量骨材コンクリートの S-N 曲線もえがいた。図-5 より明らかなように、上限応力比が 0.70 以上の範囲における骨材のないソイルセメントの S-N 曲線は区別しにくい程度に軽量コンクリートの S-N 曲線に類似している。しかし、0.65~0.70 の範囲において耐久限度を示すという点がソイルセメントの S-N 曲線の特徴となっている。一方、普通コンクリートの S-N 曲線は骨材のないソイルセメント及び軽量コンクリートとはかなり異なったものである。骨材を含むソイルセメントの S-N 曲線は図-5 より明らかなように、普通コンクリートの S-N 曲線に近づく傾向を示し、特に、骨材を含む砂質土のソイルセメントの実験値は阪田・木山・西林によって得られた普通コンクリートの S-N 曲線⁵⁾の延長上にある。ただし、骨材を含むソイルセメントは応力比

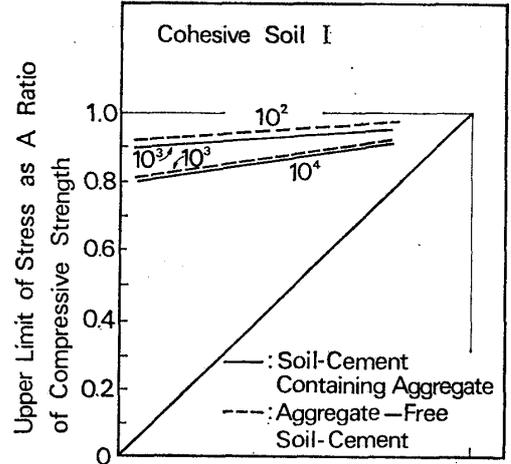


図-6 砕石を含むソイルセメントの修正 Goodman の図 (Cohesive Soil I)

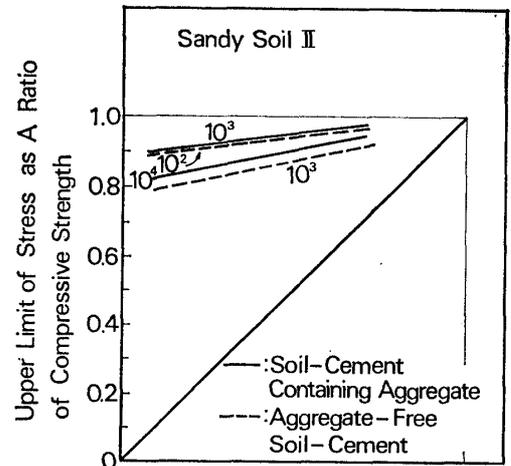


図-7 砕石を含むソイルセメントの修正 Goodman の図 (Sandy Soil II)

0.8 において耐久限度を持つ点が普通コンクリートと異なる。すなわち、ソイルセメントとコンクリートの間で相対的な比較をすると、骨材のないソイルセメントの S-N 曲線は強度の大きいマトリックス (モルタル) と強度の小さい軽量骨材よりなる軽量コンクリートの S-N 曲線に非常によく似ており、また骨材を含むソイルセメントの S-N 曲線は強度の小さいマトリックス (モルタル) と強度の大きい天然骨材よりなる普通コンクリートの S-N 曲線に類似している。このように、ソイルセメントに骨材を混入することによって S-N 曲線には二つの大きな変化が現れる。一つは骨材のないソイルセメントは軽量骨材コンクリートの S-N 曲線に近いという点であり、他の一つはソイルセメント特有の耐久限度は骨材を混入することによって、0.65 から 0.80 へと大幅に上昇するという事実である。いずれにしても、ある応力レベルに対するソイルセメントの疲労寿命は骨材の混入によってかなり大きくなるといえる。これは実用上非常に望ましい現象であり、粗粒子分の不足している

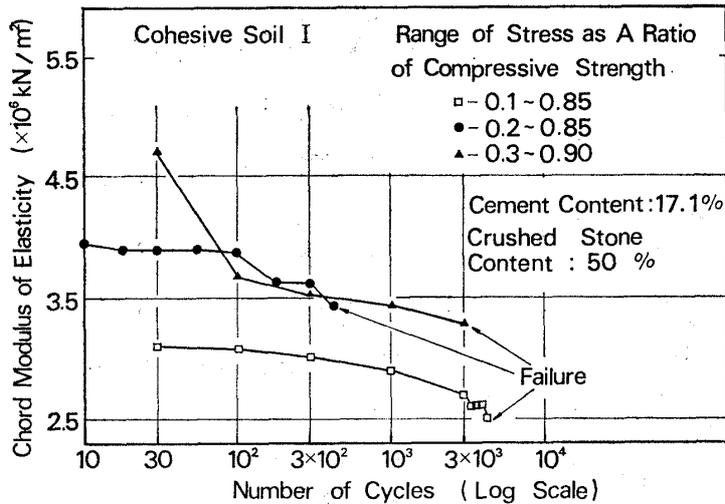


図-8 疲労破壊を示す供試体における繰返し回数に伴う弦弾性係数の変化 (Cohesive Soil I)

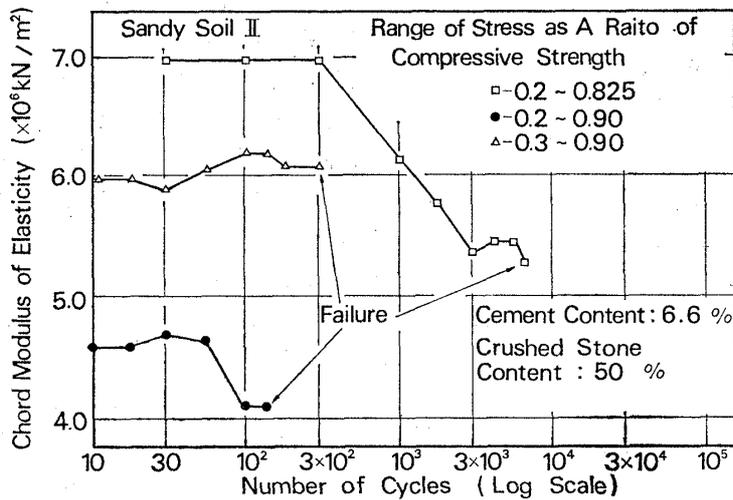


図-9 疲労破壊を示す供試体における繰返し回数に伴う弦弾性係数の変化 (Sandy Soil II)

山砂や粘性土に骨材を加えることによって、ある目標一軸圧縮強度を得るための必要セメント量を低減できるだけでなく、動的荷重下におけるソイルセメントの疲労破壊に対しても抵抗性を著しく改善できる。

ソイルセメントマトリックス（骨材を除いた部分）の實質上のセメント量は Cohesive Soil I 及び Sandy Soil II に対して、それぞれ約 24% 及び 10% であり、図-5 における骨材のないソイルセメントのセメント量 28.0%（粘性土）及び 7.6%（砂質土）⁴⁾ と大差のないことが分かる。また骨材のないソイルセメントの疲労試験に使用した粘性土及び砂質土の物理的性質は表-5 に示すとおりであり、それぞれ本実験に使用した Cohesive Soil I 及び Sandy Soil II とは大きくは相違しない。したがって骨材混入による疲労寿命の上昇の原因はソイルセメントマトリックス自体の疲労寿命の上昇にあるのではなく、むしろ骨材の存在によるものと考えられる。

一般に、コンクリートの疲労試験の結果によると、コンクリートの疲労破壊供試体中の骨材は通常の静的強度試験によって破壊された供試体中の骨材よりも骨材自体の破壊は少ないといわれており⁶⁾、Murdock はコンクリートの疲労破壊は主に骨材とセメントペーストの結合の劣化によると述べている⁷⁾。これらの事実より類推して、骨材を含むソイルセメントにおいても、繰返し载荷中に供試体内に発生したき裂は骨材を迂回して進展し、遂には破壊に至ると考えられる。したがって、本実験においてみられる骨材混入による疲労寿命の増大はき裂の進展を妨げる要素としての骨材の働きによって説明できるようである。

3.5 修正 Goodman の図

修正 Goodman の図は 10², 10³, 及び 10⁴ 回の繰返し回数において破壊する応力条件の点を結んだものである。応力振幅が疲労寿命に及ぼす影響を知るために、修正 Goodman の図をえがくと図-6 及び図-7 のようである。これらの図から明らかなように、骨材を混入することによって1けた程度寿命が増大している。

3.6 繰返し载荷中の変形挙動と疲労破壊

繰返し载荷中のソイルセメント供試体の変形特性と疲労破壊の関係を明らかにするために、上限応力 (σ_u) 及び下限応力 (σ_L) に対応する一種の割線弾性係数 (E_S)（ここでは弦弾性係数と呼ぶ）を求めた。

$$E_S = \frac{\sigma_u - \sigma_L}{\epsilon_u - \epsilon_L}$$

ここで、 ϵ_u , ϵ_L はある繰返し回数における上限及び下限応力に対応するひずみである。

図-8, 図-9, 図-10 及び図-11 は繰返し回数に伴う E_S の変化を示すものである。これらのうち、図-8, 図-9 は最終的に疲労破壊に至るような応力条件下における供試体の E_S の変化を示すものであり、図-10 及び図-11 は本実験における繰返し回数の範囲内では疲労破壊しない応力条件に対するものである。これらの図より、破壊と非破壊の応力条件下では同種のソイルセメントでもかなり異なった変形挙動を示すことが分かる。すなわち、図-8 及び図-9 にみられるように、Sandy Soil II の応力条件 0.3 (σ_L) ~ 0.9 (σ_u) を除いて、疲労破壊に至る供試体の E_S は繰返し回数とともに破壊直前まで徐々に減少し続ける。一方、破壊しない応力条件下では、Sandy Soil II の E_S の値は 3000 回程度までは減少するが、その後一定値を保ち、Cohesive Soil I においては 3000 回程度まで減少し、その後繰返し回数とともに

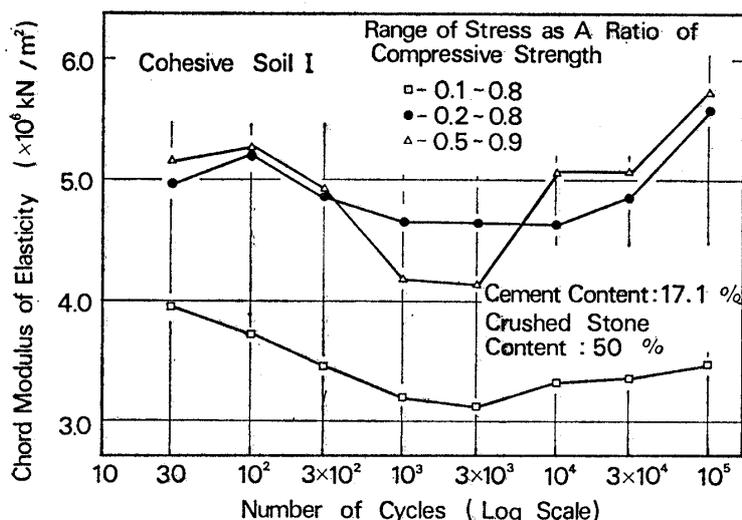


図-10 疲労破壊を示さない供試体における繰返し回数に伴う弦弾性係数の変化 (Cohesive Soil I)

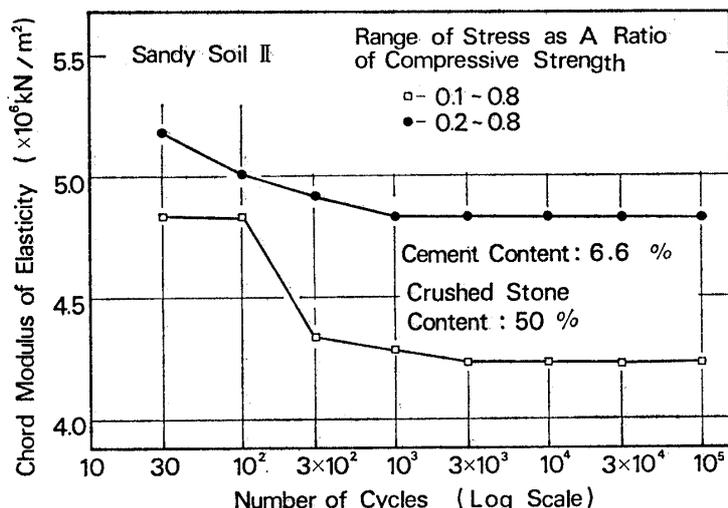


図-11 疲労破壊を示さない供試体における繰返し回数に伴う弦弾性係数の変化 (Sandy Soil II)

にかなり増大する。このように、繰返し荷重初期にはいづれの供試体においても、 E_s は減少する傾向を示すが、その後一種のひずみ硬化現象が生ずるかどうかは破壊及び非破壊供試体間の大きな相違のようである。

4. 繰返し荷重波形が骨材混入ソイルセメントの圧縮疲労に及ぼす影響

本項目の実験において使用した土は Sandy Soil I, Sandy Soil II 及び Cohesive Soil II である。疲労試験用供試体に混入する骨材の割合及び粒度は前節 3. の実験において使用されたものとは多少異なり、15~10 mm, 10~5 mm 及び 5~1 mm の各範囲のものがそれぞれ重量百分率で 15%, 20% 及び 10% である。3.1 で説明した方法によって決定された必要セメント量は Cohesive Soil II, Sandy Soil I 及び II に対してそれぞれ

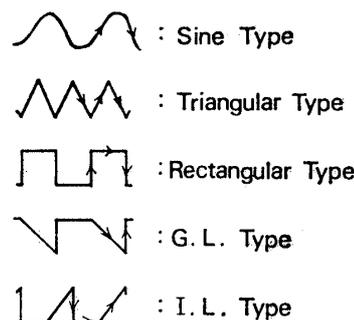


図-12 繰返し荷重波形の模式図

16.8%, 13.5% 及び 5.2% となり、前述の 3.1 において、粒度範囲 15 mm~10 mm の骨材を 50% (重量百分率) 混入した Sandy Soil II (使用土全体としては不連続な粒度となる) の必要セメント量 6.6% と比べ、全体として連続的な粒度曲線が得られるように、混入する骨材の粒度を調整すると、必要セメント量はかなり低減できることが分かる。

供試体に与えた繰返し荷重の型は図-12 に示す 5 種類であり、各種の繰返し荷重に対して図に示すような名称を付す。実際に供試体に与えられた荷重及び供試体の変形応答の型は図-13 のようである。図中、矩形型 (Rectangular Type), 漸次荷重型 (G. L. Type) 及び瞬時荷重型 (I. L. Type) の波形の一部分に見られる乱れは急速な荷重時に生じた記録ペンの振動によるものである。一般に、変形波形と応力波形の相似性は荷重速度、荷重履歴、応力状態 (側圧の有無) 及び応力レベルに依存すると考えられる。図-13 に示す波形は荷重速度 1 サイクル/秒における Cohesive Soil II に対するものであり、

供試体の変形応答における波形は与えた繰返し荷重波形とほとんど同じである。このことは本実験の荷重条件下では骨材混入ソイルセメントは弾性的に挙動することを示しており、一般の土質材料における同種の試験結果とは異なるようである。

表-6 各種繰返し波形に対する S-N 曲線の勾配及び耐久限度

Type of Repeated Load	Sandy Soil I		Cohesive Soil II	
	Endurance Limit	Slope	Endurance Limit	Slope
Sine	0.725	0.11	0.70	0.09
Triangle	0.75	0.10	0.725	0.15
Rectangle	0.70	0.09	0.65	0.13
I. L.	0.70	0.11	0.70	0.09
G. L.	0.75	0.12	0.725	0.11

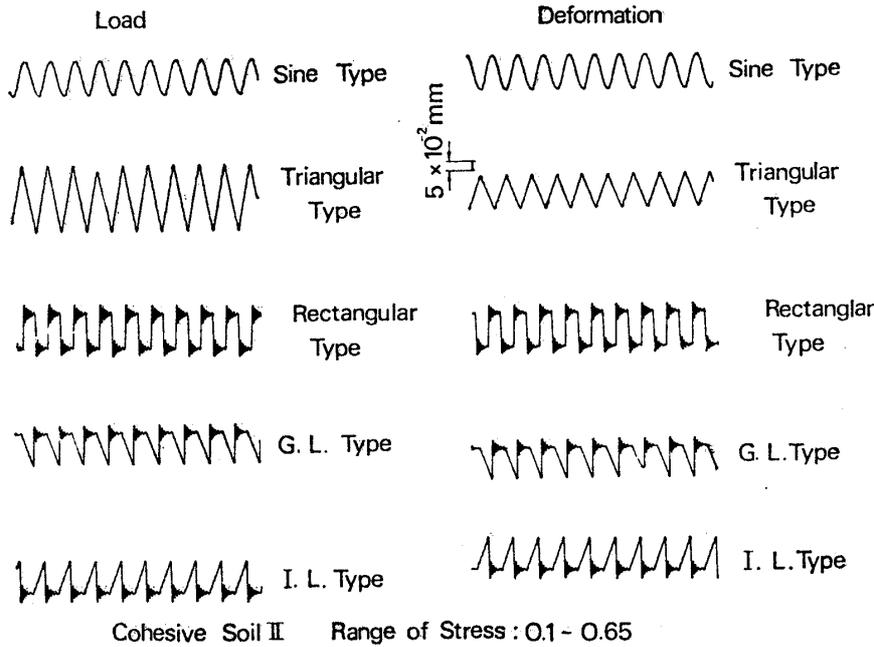


図-13 各荷重波形における荷重及び変形-時間関係

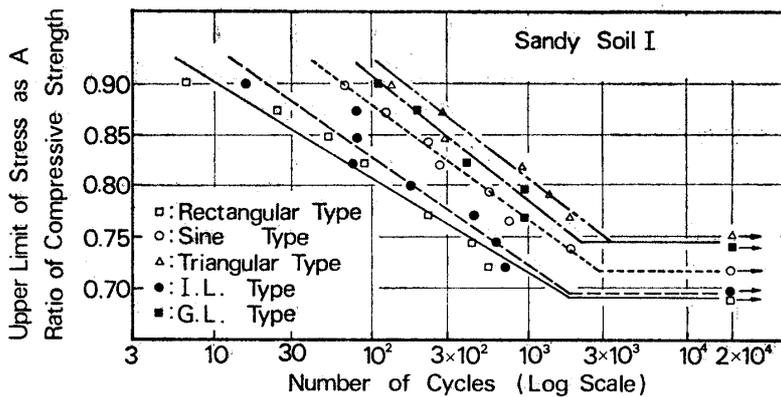


図-14 種々の繰返し荷重波形に対するソイルセメントの S-N 曲線 (Sandy Soil I)

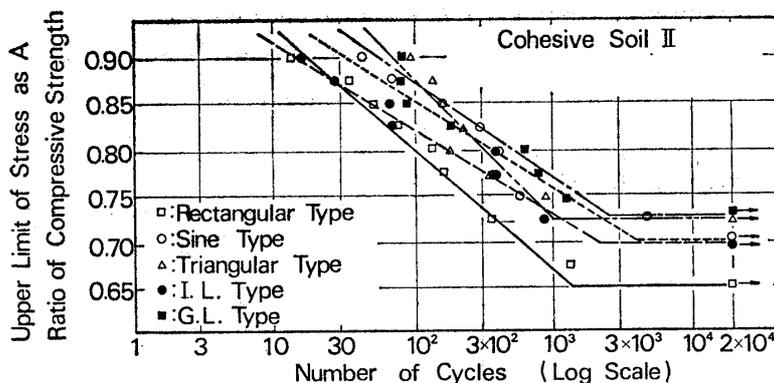


図-15 種々の繰返し荷重波形に対するソイルセメントの S-N 曲線 (Cohesive Soil II)

4.1 荷重波形が S-N 曲線に及ぼす影響

下限応力比が 0.1 のとき上限応力比と繰返し回数との関係を示すと図-14 及び図-15 のようになる。これらの S-N 曲線の特徴を比較するために、それらの勾配と耐

久限度を求めると表-6 のようになる。図-14 又は表-4 より明らかかなように Sandy Soil I のソイルセメントにおいては矩形型 (Rectangular Type \square) 及び瞬時載荷型 (I. L. Type, \cdot) の耐久限度は Sine, 三角型 (Triangular Type, Δ) 及び漸次載荷型 (G. L. Type, $- \cdot -$) よりも 2.5~5% 小さいことが分かる。また、図-15 及び表-4 より Cohesive Soil II においては矩形型の耐久限度は 0.65 であり、特に低い全体としての傾向は Sandy Soil I と同様である。すなわち荷重波形の違いによる耐久限度の大小関係は Sandy Soil I では三角型=漸次載荷型>Sine=瞬時載荷型>矩形型、Cohesive Soil II では三角型=漸次載荷型>Sine>瞬時載荷型=矩形型のようになる。荷重波形が疲労寿命に及ぼす影響を明らかにするために、上限応力比 0.8 に対する疲労寿命を S-N 曲線より求めると表-7 のようになる。表-7 より、Cohesive Soil II においては、漸次載荷型>Sine>三角型>瞬時載荷型>矩形型の順序で、また Sandy Soil I において三角型>漸次載荷型>Sine>瞬時載荷型>矩形型の順に疲労寿命は長くなっていることが分かる。Sandy Soil I の各荷重波形の S-N 曲線は互いに平行であり、Cohesive Soil II では \square と Δ の勾配が他のものと異なっている (図-14 及び図-15)。したがって、Cohesive Soil II においては上限応力比のとり方によっては多少疲労寿命の大小関係は変わるが、全体としていずれの土においても、矩形型や瞬時載荷型のように瞬時に載荷するような荷重波形は

Sine, 三角形型及び漸次載荷型のように徐々に載荷する波形よりも疲労寿命は短くなるといえる。

4.2 荷重波形と弦弾性係数の関係

各種荷重型に対する Cohesive Soil II の上限応力比

表-7 各種繰返し荷重波形に対する応力レベル0.8における疲労寿命

Type of Repeated Load	Sandy Soil I (cycles)	Cohesive Soil II (cycles)
Sine	575	280
Triangle	1300	205
Rectangle	110	98
I.L.	220	180
G.L.	850	500

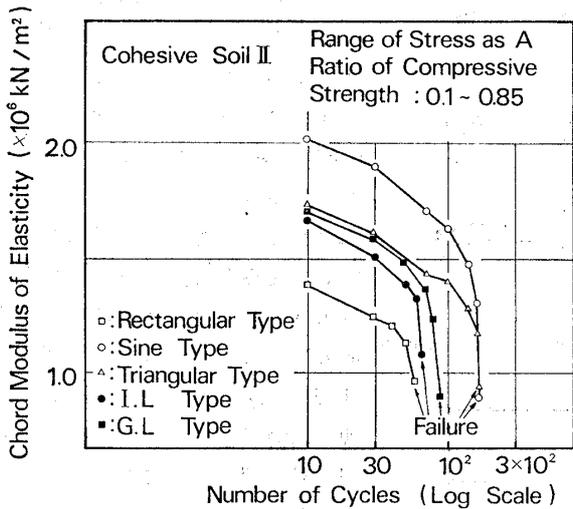


図-16 疲労破壊を示す供試体における繰返し回数に伴う弦弾性係数の変化 (Cohesive Soil II)

0.85 における弦弾性係数の繰返し回数に伴う変化状況を示すと 図-16 のようである。Sine>△>▽>∟>∏の順に弦弾性係数にみられる順序は表-5 に示す疲労寿命の順序とほぼ同様であり、弦弾性係数が大きく現れる荷重波形ほど長い疲労寿命を示すといえるようである。すなわち、同一応力レベルの繰返し荷重をソイルセメントに与えても荷重波形によって供試体のひずみ応答に大きな差があり、ひずみが大きく出る荷重波形ほど疲労寿命は短くなる傾向がある。

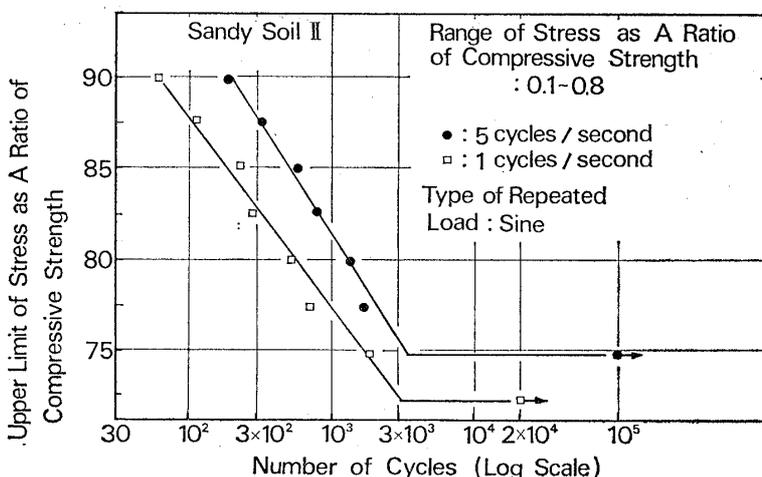


図-17 繰返し荷重速度がソイルセメントの S-N 曲線に及ぼす影響

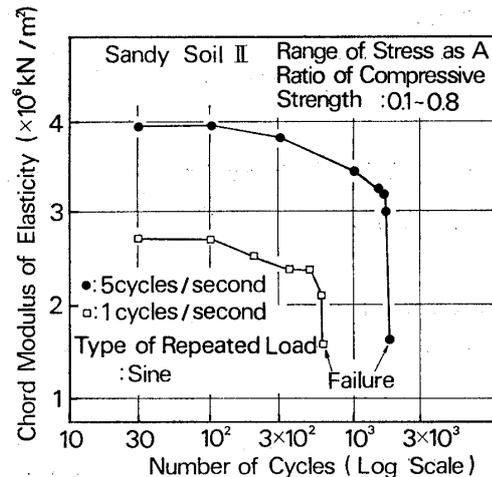


図-18 繰返し荷重速度がソイルセメントの弦弾性係数に及ぼす影響

4.3 荷重波形と骨材混入ソイルセメントの疲労特性

4.2 において述べたように、繰返し荷重下における供試体のひずみの大きさと疲労寿命の間に関係があるように思われる。一方、1サイクルのうちで上限荷重に達するまでの時間の短い荷重波形 (∟, ∏) (荷重速度が大きい) の繰返し荷重を受ける供試体は上限荷重に達するまでの時間の長い荷重波形 (Sine, △, ▽) (荷重速度が小さい) よりも疲労寿命は短く耐久限度も低くなる。一方、荷重速度が疲労寿命に及ぼす影響を明らかにするために、Sine 型について1サイクル/秒と5サイクル/秒の S-N 曲線を比較すると 図-17 のようである。図-17 より、ソイルセメントにおいても鋼の疲労試験より得られる結果⁹⁾と同様に、繰返し荷重速度が速くなるほど耐久限度は増大し、疲労寿命も長いことが分かる。しかし 図-18 に示すように荷重速度1サイクル/秒の弦弾性係数は5サイクル/秒よりも小さく、短い疲労寿命を示す速度1サイクル/秒は5サイクル/秒よりかなり大きなひずみを示す。したがって 図-17 及び 図-18 より判断して、荷重速度よりもむしろ各荷重波形の下で生ずるひず

みの大きさが疲労寿命及び耐久限度と関係が深いようである。以上の結果、矩形や瞬時荷重型のような衝撃的な繰返し荷重の下では他の荷重波形に比べて疲労寿命及び耐久限度が低下するのは一定の応力振幅に対して生ずるひずみが大きい (仕事量が多い) ためであるといえる。

5. 結 論

本研究において、粗粒子分の不足している山砂や粘性土に骨材を加えることによって、ある目標圧縮強度を得るための必要セメント量を低減できるだけでなく、動的

荷重下におけるソイルセメントの疲労破壊に対する抵抗性を著しく改善できること、及びそのような疲労破壊の特徴を評価する疲労試験においては供試体を与える荷重波形が疲労寿命及び耐久限度に大きく影響することが明らかになった。更に、通常のソイルセメント、骨材混入ソイルセメント、普通コンクリート及び軽量骨材コンクリートの $S-N$ 曲線を比較することによって、強度の小さいマトリックス中に存在する強度の大きい骨材はき裂の進展を妨げ、疲労寿命を上昇させるとする考え方の妥当性を示す結果が得られた。主な結果をまとめると次のようである。

(1) 骨材が存在することによって、粘性土の初期破壊点ひずみはやや小さくなり、砂質土では逆にやや大きくなるが、ばらつきの範囲が大きいことから考えて、骨材混入による影響はさほど顕著なものではない。

(2) 骨材を混入したソイルセメントの $S-N$ 曲線は普通コンクリートの $S-N$ 曲線に類似している。

(3) 繰返し荷重中、いずれの供試体の弦弾性係数 (E_s) も繰返し荷重初期には減少するが、その後ひずみ硬化現象が生じて E_s が増大するかどうか、破壊及び非破壊供試体との大きな相違となっている。

(4) 衝撃を伴う繰返し荷重の下では疲労寿命及び耐

久限度が低下する。

参考文献

- 1) 竹下春見 (1963): ソイルセメント, 「コンクリートパンフレット」, 第 71 号, セメント協会, pp. 1~86.
- 2) 竹下春見・田中淳七郎 (1958): 土質改良に関する実験的研究 (第 2 報)—セメント系材料による安定処理について—, 「土木研究所報告」, 102 の 3, pp. 1~32.
- 3) Pretorius, P. C. (1970): "Design considerations for pavements containing soil cement bases," Thesis presented to University of California at Berkeley, California, U.S.A., 1970 in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.
- 4) 榎場重正・川村満紀・大浦 隆 (1976): ソイルセメントの圧縮疲労特性, 「土木学会論文報告集」, 第 252 号, pp. 109~116.
- 5) 阪田憲次・木山英郎・西林新蔵 (1972): 統計的処理によるコンクリートの疲労寿命に関する研究, 「土木学会論文報告集」, 第 198 号, pp. 107~114.
- 6) Neville, A. M. (1971): Hardened Concrete: Physical and Mechanical Aspects, ACI Monograph No. 6.
- 7) Murdock, J. W. (1960): "The mechanism of fatigue in concrete," Ph. D. Thesis, University of Illinois.
- 8) 横堀武夫 (1955): 「材料強度学」, 技報堂.
- 9) 榎場重正・川村満紀 (1978): 繰返し荷重を受けるソイルセメントの変形および強度特性, 「土木学会論文報告集」, 第 231 号, pp. 55~60.

(原稿受付, 1979. 1. 22)