

V-14 低発熱型特殊高炉セメントコンクリートの水中疲労

室蘭工業大学大学院 学生員 信太 一人
 室蘭工業大学 正 員 菅田 紀之
 室蘭工業大学 正 員 尾崎 諒

1. はじめに

高炉セメントの優れた特性として一般的にいえることは、①長期材令になると強度の増進が大きくなること、②水酸化カルシウムの生成が少なく、さらに水酸化カルシウムがスラグと反応した結果、不溶性物質に変化するので化学抵抗性が大きくなること、③ポルトランドセメントの量が少ないことから、水和熱が低いこと、④空隙充填効果が大きいことなどが挙げられる。最近では、高炉セメントの特性を有効に生かしているものとして、セメントの水和熱に起因する温度ひび割れが生じやすいマスコンクリートに対して、高炉スラグ混入率が多い低発熱型特殊高炉セメントが用いられている。低発熱型特殊高炉セメントを用いるようなマッシブなコンクリート構造物としては、長大橋の橋脚・橋台およびこれらの基礎などが挙げられるが、これらの構造物は、立地状況として海上や海中になることが考えられる。このような環境下で繰り返し荷重が作用すると、コンクリートの水中疲労が問題となってくる。これは環境条件、特に湿潤環境によって、コンクリートの疲労が不利に影響することが知られているからである¹⁾。しかしながら、湿潤環境においてコンクリートの疲労強度が低下する原因は、未だ解明されるに至っていないのが現状である。そこで、本研究では、低発熱型特殊高炉セメントを用いることにより、空隙充填効果の増大を期待し緻密な組織構造を得ることによって、湿潤環境下におけるコンクリートの疲労の改善を期待するものである。

以上より、本研究は、低発熱型特殊高炉セメントを用いたコンクリートで水中における圧縮疲労試験を行ない。試験結果から、疲労寿命を求め、繰り返し回数とpHの測定値・体積ひずみ・ヒステリシスループの面積比などの関係を過去に行なった研究結果^{1)~4)}と比較して検討・考察を行なった。

2. 実験材料

本実験に用いた低発熱型特殊高炉セメントは、普通ポルトランドセメントに高炉スラグを60%混入したものであり、ブレン比表面積 $3400\text{cm}^2/\text{g}$ 、比重2.97のものである。また、使用した骨材は、粗骨材としては碎石(最大寸法:20mm、比重:2.65、F.M.:7.11)、細骨材としては海砂(比重:2.64、F.M.:2.65)である。さらに、混和剤としては、AE剤を用いた。

3. 配合および供試体

表-1 配合

実験に用いたコンクリートの配合は、表-1に示すとおりである。練り混ぜは、強制練り混ぜミキサー(公称容量: 0.1m^3)によって行い、46リットルずつ2バッチに分けて行なった。供

水セメント比 W/C(%)	細骨材率 S/a(%)	単 位 量(kg/cm^3)				
		水(W)	セメント(C)	細骨材(S)	粗骨材(G)	AE剤
50	44	150	300	823	1039	0.06

試体は、静的試験用には $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を各バッチ10本ずつ計20本、疲労試験用に $\phi 7.5 \times 15\text{cm}$ を各バッチ29本ずつ計58本の円柱供試体を製作した。

Fatigue of Submerged Concrete Composed of Portland Blast-Furnace Slag Cement with Properties of Low Heat of Hydration

by Kazuhito NOBUTA, Noriyuki SUGATA and Sinobu OZAKI

それぞれのバッチにおけるフレッシュコンクリートの性質は、スランプとしては 7cm と 9cm、空気量としては 4.5% と 4.0% であった。供試体は、24 時間後に脱型し、その後、20℃ の恒温養生水槽内で各試験を行なうまで養生を行なった。材令 28 日における圧縮強度は各バッチそれぞれ 5 本ずつ用いて行い、それらの試験結果は、274kg/cm² および 250kg/cm² であった。

4. 試験方法

疲労試験は、各バッチの材令が 225 日以上および 241 日以上の供試体を用いて行なった。疲労試験の静的基準強度は各バッチそれぞれ 5 本ずつ用いて行い、それらの試験結果は 475kg/cm² (材令：225 日) および 426kg/cm² (材令：241 日) であった。静的強度試験時の応力-ひずみ曲線の一例を図-1 に示す。図より、体積ひずみが減少から増加へと移行する特異点は、応力の 90% 程度の所で現れており、普通コンクリートとあまり変わらない挙動を示している。

疲労試験では、試験時に常に水中に供試体があるように内径 31cm、高さ 29cm の透明な疲労試験水槽内で行なった。疲労試験機としては、構造物疲労試験機(島津サーボバルサ EHF-30 型)を使用し、繰り返し荷重の形式を正限波、載荷速度を 4~9Hz とした。繰り返し荷重は、供試体が破壊するまで連続的に載荷し、破壊までの繰り返し回数を測定した。ただし、繰り返し回数が 200 万回を越えるものに対しては疲労試験を打ち切り、その後、静的試験を行った。繰り返し荷重の上限(最大)応力比 S_u は静的基準強度の 65、55、45% の三応力段階とし、下限(最小)応力比 S_L は静的基準強度の 7% と統一した。

また、繰り返し載荷時に供試体から溶出する水酸化カルシウムに伴って増加する pH の値を測定するために、疲労試験水槽とは別に pH 検出用水槽を設けた。両水槽の水は、水中ポンプにより循環させながら適当な繰り返し回数時に水を採取し、pH

メータを用いて pH の値を測定することにした。さらに、繰り返し回数とひずみの関係を調べるために、あらかじめ縦方向(圧縮)と横方向(引張)に 2 枚ずつ計 4 枚のストレインゲージ(3cm)をアルダイトベースを用いて瞬間接着剤によって接着した。また、ハマタイトにより防水加工を施した。これらの供試体は、ストレインゲージ接着後、24 時間以上水中に保存したものを疲労試験に使用することにした。なお、ひずみの測定にはシグナルコンディショナ、A/D 変換機およびパソコンを用いた。

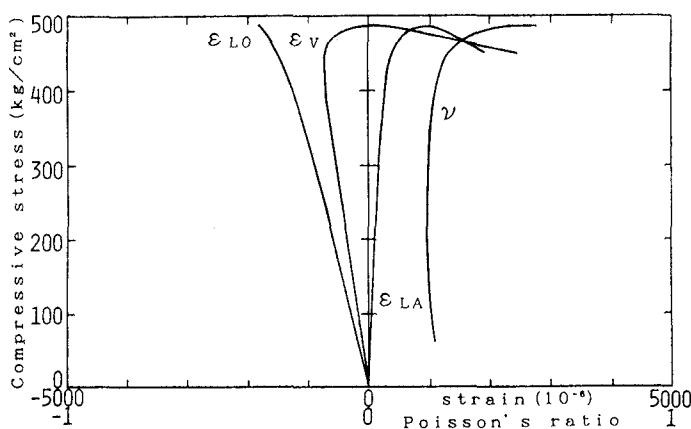


図-1 応力-ひずみ曲線(材令：225 日)

5. P(T)-N 線図および S-N 線図

各上限応力比ごとに、供試体の疲労寿命に対する生存確率の期待値を $P = 1 - r / (n + 1)$ によって、また非破壊の供試体を含む場合には $P = 1 - r / (n + 2)$ によって求めた。ここで、 r ：順序統計量で、疲労寿命 N を小さい順に並べたときの序数、 n ：同一条件で試験した供試体総数である。このようにして求めた生存確率と各上限応力比の疲労寿命のばらつきが対数正規分布に従うと仮定して、直線回帰を行なったものが図-2 に示す P(T)-N 線図である。ここで、図中の縦軸には生存確率 P のほかに回帰直線を表わすのに都合がよい基準正規分布の変数 T の値をあわせて記してある。これらの回帰直線における生存確率 $P = 50\%$

($T=0$) に相当する疲労寿命を各上限
 応力比ごとに求め、上限応力比との関
 係をS-N線図上で直線回帰を行った
 ものが図-3である。この図より求め
 た、繰返し回数 200万回に相当する
 上限応力比は41%であった。この結果
 をさらに修正グットマン線図を利用し
 て、下限応力 0kg/cm^2 の完全片振りの
 式に換算し、他の各種コンクリートの
 S-N線回帰式とあわせて記したもの
 が表-2であり、それらを図示したも
 のが図-4である。ここで、本実験結
 果(B60W)と比較している各種コンク
 リートとは、普通コンクリートの大気

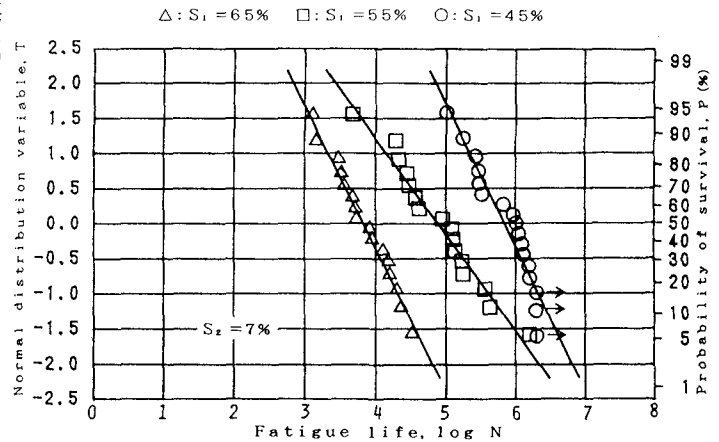


図-2 P(T)-N線図

表-2 各種コンクリートのS-N線回帰式($S_2=0\%$)^{1)~3)}

		回 帰 式	200万回疲労強度(%)
B60W	低発熱型特殊高炉セメントコンクリート(水中)	$S_1=1.040-0.107 \log N$	36
0A	普通コンクリート(大気中)	$S_1=0.984-0.068 \log N$	56
0W	普通コンクリート(水中)	$S_1=0.958-0.105 \log N$	30
BW	高炉スラグ組成物を用いたコンクリート(水中)	$S_1=1.068-0.105 \log N$	41
SBW	シリカ質混和材を用いた高炉スラグコンクリート(海水中)	$S_1=1.152-0.118 \log N$	41

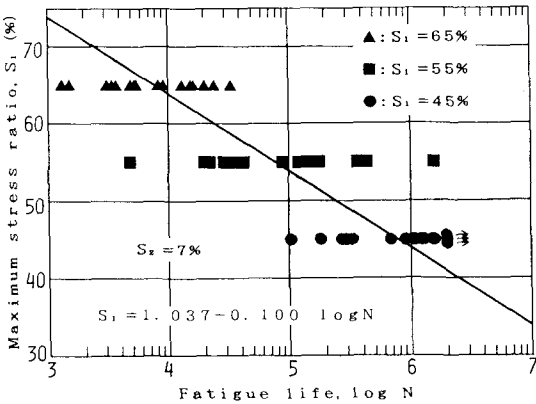


図-3 S-N線図($S_2=7\%$)

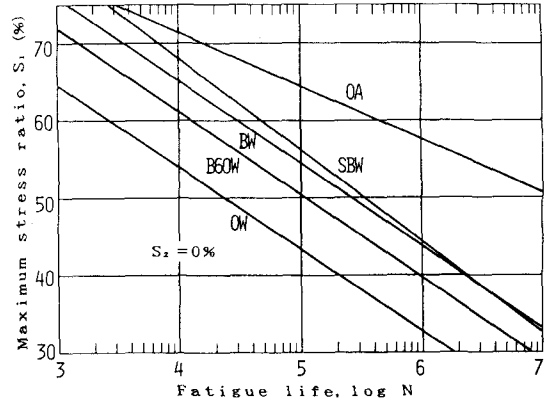


図-4 各種コンクリートのS-N線図^{1)~3)}

中で疲労試験を行なった結果(OA)および水中で疲労試験を行った結果(OW)、高炉スラグ高微粉末と早強ポルトランドセメントおよび高炉スラグ細骨材をプレミックスした高炉スラグ組成物を利用したコンクリートの中における疲労試験結果(BW)、本実験で使用している低発熱型特殊高炉セメントを用いフライアッシュとシリカフュームをそれぞれ10%づつ置換しているシリカ質混和材を用いた高炉スラグコンクリートの海中における疲労試験結果(SBW)である。図-4より、繰返し回数 200万回に相当する上限応力比はそれぞれ、OA=56%、OW=30%、BW=41%、SBW=41%、B60W=36%であった。

以上より、低発熱型特殊高炉セメントコンクリートの 200万回疲労強度は、普通コンクリートに比べて水中疲労強度の改善は23%程度となった。しかしながら、高炉スラグ組成物を利用したコンクリートやシリカ質混和材を用いた高炉スラグコンクリートの 200万回疲労強度に比べると水中疲労強度の改善効果は劣っている。この理由として考えられることは、高炉スラグ粒子の水和層は、ポルトランドセメント粒子の 1/5~1/10とごく薄い層に限られており⁵⁾、高炉スラグを高微粉末化することによりスラグの水和特性を最大限活用している高炉スラグ組成物を利用したコンクリートや、シリカフュームやフライアッシュなどの混和材により、より空隙充填効果があるであろうシリカ質混和材を用いた高炉スラグコンクリートなどに比べ、低発熱型特殊高炉セメントコンクリートでは、高炉スラグが60%混入されていても水和層が薄い層に限られているため、空隙充填効果が不十分であり、水中疲労強度の改善が劣っていたと思われる。

6. pH値の測定結果

疲労試験中、繰返し荷重により供試体から溶出する水酸化カルシウムに伴って増加する疲労試験水槽内の pHの測定の値を測定した。pHの値と繰返し回数の関係を図-5に示す。また、比較のために普通コンクリートの pHの測定結果を図-6に示す。これらより、低発熱型特殊高炉セメントコンクリートでは、普通コンクリートの pHの測定値よりも小さな値を示していることがわかる。これは、低発熱型特殊高炉セメントを用いたことにより、溶出する水酸化カルシウム自体が少なかったことが考えられるが、そのほかの理由としては、低発熱型特殊高炉セメントの空隙充填効果によって水酸化カルシウムが溶出しづらくなっていることも考えられる。また、pHの値の増加傾向は、低発熱型特殊高炉セメントコンクリートの場合、普通コンクリートに比べ幾分破壊直前になってから pHの値が増大している傾向にある。

以上のことより、低発熱型特殊高炉セメントコンクリートでは、普通コンクリートに比べ、ある程度、疲労損傷の開始を遅らせることができたが、その後、ひび割れの拡大は促進され急速に破壊に至っていることを示している。

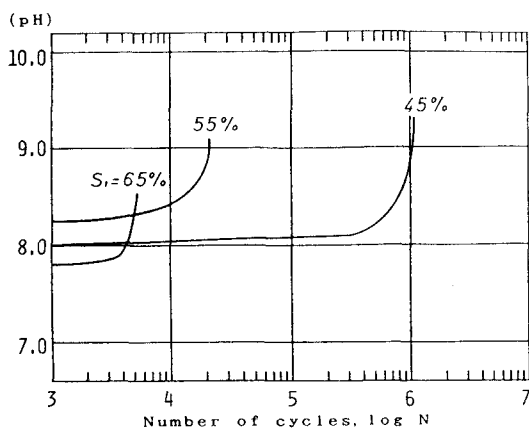


図-5 溶出物による水槽内の pH(B60W)

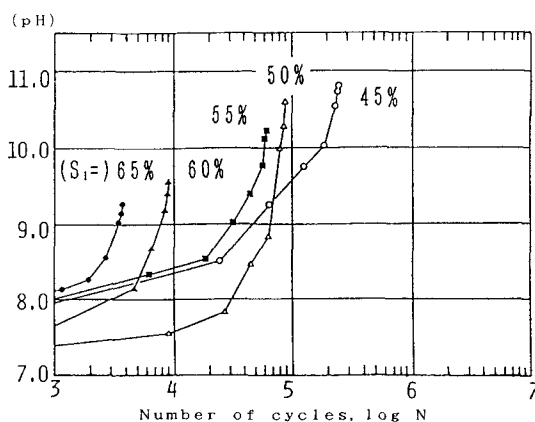


図-6 溶出物による水槽内の pH(OW)⁴⁾

7. ひずみの測定結果

疲労試験中の繰返し回数に伴う縦ひずみ(圧縮ひずみ)および横ひずみ(引張ひずみ)の変化を測定した結果より、(体積ひずみ)=(縦ひずみ)+(横ひずみ) $\times 2$ で近似できる体積ひずみの変化を、図-7に示した。また、比較のために普通コンクリートの大気中における体積ひずみの変化と水中における体積ひずみの変化をそれぞれ、図-8および図-9に示した。これらより、普通コンクリートの場合での大気中と水中における体積ひずみの挙動の相違は、水中における体積ひずみでは大気中に比べ圧縮(収縮)側から引張(膨張)側へ移行する点はより破壊直前になっていることがわかる。

このような水中疲労特有な挙動は、低発熱型特殊高炉セメントコンクリートの体積ひずみの挙動についても同様である。しかしながら、体積ひずみが引張(膨張)側へ移行する点については、普通コンクリートの水中におけるものより、より破壊直前となっている。

以上のことより、低発熱型特殊高炉セメントを用いることにより空隙充填効果が増大し、それによってひび割れの発生がある程度抑制されて疲労寿命が伸びた。しかしながら、ひび割れは水的作用により拡大し、急速に破壊にいたると思われる。

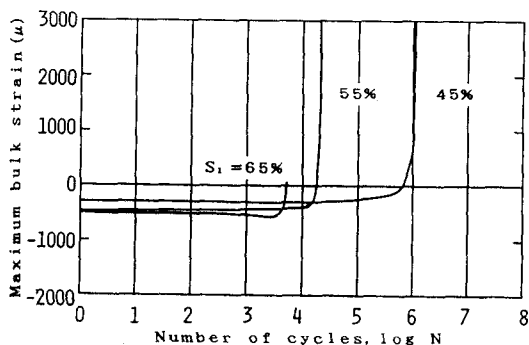


図-7 繰返し荷重による体積ひずみ(B60W)

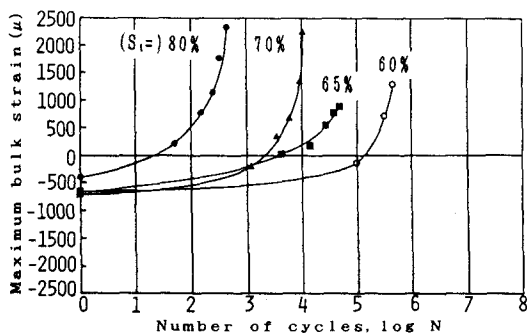


図-8 繰返し荷重による体積ひずみ(OA)⁴⁾

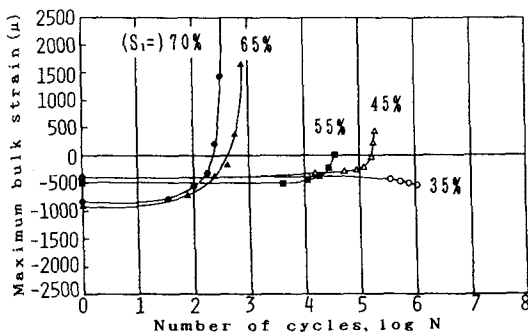


図-9 繰返し荷重による体積ひずみ(OW)⁴⁾

8. ヒステリシスループ

コンクリートの応力-ひずみ曲線は、載荷時と除荷時では違う経路をたどり、曲線はヒステリシスループを描く。ここで、ヒステリシスループの面積は、非回復性の損失エネルギー $E_l = E_{orao} + E_{fric}$ であるといわれている。ここで、 E_{orao} : 構成粒子を引き離す仕事に使われるエネルギー、 E_{fric} : 構成粒子をすべらせる仕事に使われるエネルギーである⁶⁾。つまり、ヒステリシスループの面積とコンクリートの内部破壊とは密接な関係があると思われる。

図-10は、低発熱型特殊高炉セメントコンクリートにおける初回のヒステリシスループの面積 A_1 に対する、各繰返し回数 N におけるヒステリシスループ A_N

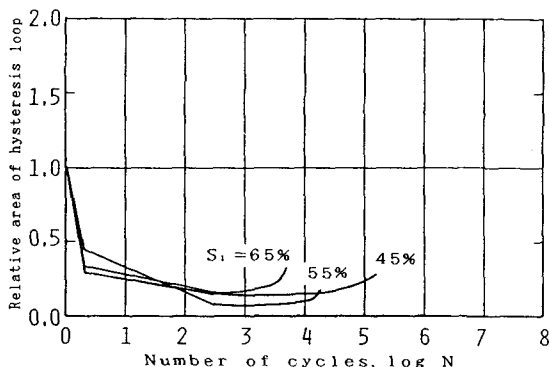


図-10 ヒステリシスループの面積比(B60W)

の面積比(A_N/A_1)と繰返し回数との関係である。また、比較のために普通コンクリートの大気中および水中におけるヒステリシスループの面積比をそれぞれ、図-11及び図-12に示した。図-10より、各繰返し回数におけるヒステリシスループの面積比は、繰返し回数2回目では初回に比べ0.3~0.5程度に減少し、さらにその後、0.1~0.2程度まで減少し、破壊直前まではある程度一定値を保つが、再び増大して破壊に至っている。この様な挙動は、普通コンクリートの場合どちらかというとき水中におけるよりも大気中におけるヒステリシスループの面積比の変化と同様な挙動を示している。

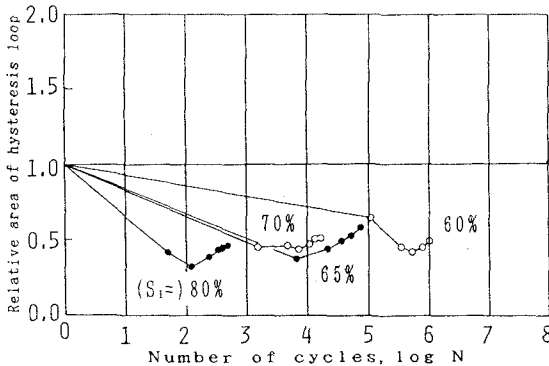


図-11 ヒステリシスループの面積比(OA)⁴⁾

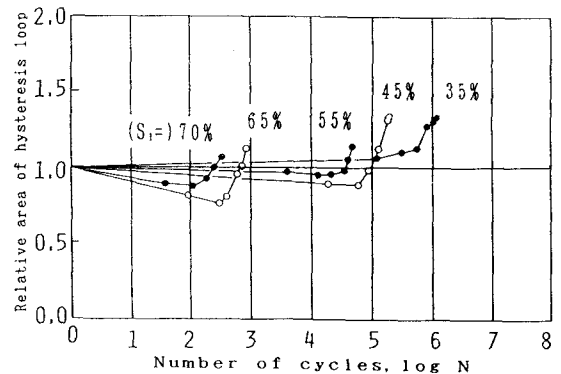


図-12 ヒステリシスループの面積比(OW)⁴⁾

9. 結論

完全片振りを想定した場合、普通コンクリートの200万回疲労強度は、大気中で静的強度の56%であったのに対し、水中では30%に低下したが、低発熱型特殊高炉セメントコンクリートの水中の場合では36%に改善された。しかしながら、高炉スラグ組成物を用いたコンクリートやシリカ質混和材を用いた高炉スラグコンクリートと比べると、改善効果は劣っていた。このことは、空隙充填効果による緻密な組織構造によって幾分、水中における疲労強度は改善されたが、高炉組成物を利用したコンクリートやシリカ質混和材を用いた高炉スラグコンクリートに比べ空隙充填効果が不十分であったために改善効果が劣っていたと思われる。

一方、pHおよびひずみの測定から、ある程度、水中における疲労損傷の開始を遅らせる効果はあったが、疲労損傷がある程度進むと、水の作用による破壊力には抵抗できず急激に破壊に至っている。

【参考文献】

- 1) 尾崎 諒、志村 政雄：水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度、土木学会第35回年次学術講演会講演概要集V、pp.293~294、1980.9.
- 2) 鈴木 嵩、尾崎 諒：水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度の改善について、土木学会第40回年次学術講演会講演概要集V、pp.241~242、1985.9.
- 3) 尾崎 諒、菅田 紀之、下林 清一：高炉スラグを用いたコンクリートの水中疲労、第43回セメント技術大会講演集、pp.440~445、1989.
- 4) 鈴木 嵩、尾崎 諒：コンクリートの圧縮疲労についての一考察、土木学会北海道支部論文報告集、pp.609~612、1984.1.
- 5) 今井 益隆、大橋 猛、小出 儀治、下林 清一：高炉スラグ組成物を利用した高耐久性コンクリートに関する研究、土木試験所月報 No.404、pp.9~18、1987.8.
- 6) 岡田 清、小柳 治、六車 恵哲：含水量の異なるコンクリートの圧縮破壊過程に関するエネルギー的考察、土木学会論文報告集 第248号、pp.129~136、1976.4.