

V-28

鉄筋コンクリート梁の水中せん断疲労特性に及ぼすせん断補強筋比の影響

室蘭工業大学工学部 学生会員 川原 健吾
室蘭工業大学工学部 正会員 菅田 紀之
室蘭工業大学工学部 フェロー 尾崎 訓

1. はじめに

土木学会コンクリート標準示方書設計編¹⁾において、せん断疲労荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の設計は、せん断補強筋の疲労破断に対して行うことが規定されている。しかしながら、これは、大気中における実験結果^{2), 3)}に基づくものであり、水中において疲労荷重を受ける場合に対する合理的な設計法は示されていない。水中環境下における実験では、大気中と比較してせん断疲労強度が著しく低下し、静的載荷時には曲げ破壊する場合においても、繰り返し荷重が載荷するとせん断破壊に至ると報告されている^{4), 5)}。また、著者等も、水中において鉄筋コンクリート梁のせん断疲労実験を行い、せん断疲労耐力、分担せん断力等を検討してきた⁶⁾が、水中における鉄筋コンクリート部材のせん断疲労特性が、十分明らかにされていないといえない。

本研究では、せん断疲労特性に及ぼすせん断補強筋比の影響に着目し、文献6)と異なるせん断補強筋比を持つ鉄筋コンクリート梁の水中疲労試験を行い、せん断疲労耐力、スターラップのひずみの変化、コンクリートの分担せん断力について比較検討を行った。

2. 試験概要

2.1 供試体

実験に用いた鉄筋コンクリート梁の形状寸法および配筋を図-1に示す。供試体の断面は10×20cm、長さは150cmである。軸方向鉄筋にはD19を2本使用し、有効高さを16.5cmとしている。なお、鉄筋比は3.47%である。また、せん断補強鉄筋にはD6を使用し、図のように右スパンに16cm、左スパンに8cm間隔で配置した。なお、せん断補強筋

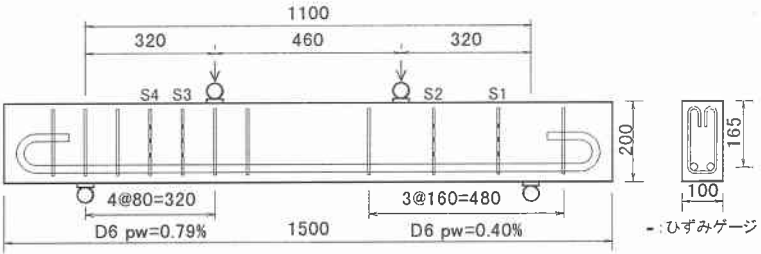


図-1 鉄筋コンクリート梁の形状寸法および配筋

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 剤 AD
55	44	165	300	823	1020	0.06

表-2 鉄筋の降伏点および引張強度

	降伏点応力度 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)
D6	386	533
D19	384	552

比(ρ_v)はそれぞれ0.40%, 0.79%である。文献6)の梁の断面形状は図-1と同様であるが、せん断補強筋比は両スパンともに0.79%である。荷重の載荷は、支間長を110cmとし、せん断スパンを32cm、せん断スパン比(a/d)を1.94として行った。使用したコンクリートの配合を、表-1に示す。鉄筋は、SD295A D19およびD6であり、それらの降伏点応力度および引張強度を表-2に示す。また、公称断面積を用いてD6の弾性係数を求める

と $1.71 \times 10^6 (\text{N/mm}^2)$ であった。疲労試験中におけるひずみの変化を計測するために、4本のスターラップに対して3点ずつ合計12点にゲージ長2mmのひずみゲージを貼り付けてある。ゲージの貼り付け位置は図-1に示すとおりである。ひずみゲージを貼り付けたスターラップをS1～S4で表すこととする。

2.2 疲労試験方法

疲労試験は電気油圧サーボ式、容量30tfの疲労試験機を用いて水中で行った。荷重は、載荷速度が3Hzの正弦波とし、作用最大せん断力 $V_{\max}$ は静的せん断耐力の計算値 V_y の47%、42%、37%、31.6%、27%、作用最小せん断力 $V_{\min}$ は V_y の10%に設定した。荷重の載荷については10回目までを静的載荷とし、それ以後は、連続的な繰り返し載荷として供試体の破壊時まで続けた。疲労試験は材令2ヶ月から3ヶ月の梁を用いて行い、疲労試験開始時における円柱供試体の圧縮強度の平均は、 33.4 N/mm^2 であった。

表-3 試験結果一覧

梁 No.	f'_c (N/m^2)	V_c (kN)	V_s (kN)	V_y (kN)	静的試験結果		疲労試験結果		
					$V_{cr\text{-test}}$ (kN)	$V_{y\text{-test}}$ (kN)	$V_{\max}/V_y$ (%)	$V_{\max}$ (kN)	破壊回数 (回)
1	28.5	33.7	45.2	78.9	15.2	80.2	—	—	—
2	29.6	34.2	45.2	79.4	—	—	37.0	29.4	>2,000,000
3	29.6	34.2	45.2	79.4	26.9	—	42.0	33.3	352,510
4	40.3	37.9	45.2	83.1	—	—	26.7	22.1	>2,000,000
5	40.3	37.9	45.2	83.1	—	—	31.6	26.3	>2,000,000
6	41.4	38.2	45.2	83.4	28.8	—	42.0	35.0	180,520
7	41.4	38.2	45.2	83.4	—	—	37.0	30.9	>2,000,000
8	28.3	33.7	45.2	78.9	30.1	—	47.0	37.1	59,408
9	28.3	33.7	45.2	78.9	29.7	—	42.0	33.1	409,456
10	38.2	37.3	45.2	82.5	—	—	47.0	38.7	76,979
11	38.2	37.3	45.2	82.5	30.7	—	42.0	34.6	1,711,690
12	29.5	34.1	45.2	79.3	32.2	—	47.0	37.3	30,723
13	29.5	34.1	45.2	79.3	18.2	79.2	—	—	—
14	28.6	33.8	45.2	79.0	29.7	—	47.0	37.1	25,522
15	28.6	33.8	45.2	79.0	20.1	—	47.0	37.1	90,325

3. 試験結果および考察

3.1 全試験結果および破壊性状

表-3に試験結果一覧を示す。表中の f'_c は疲労試験開始時における円柱供試体の圧縮強度、 V_c および V_y は、それぞれせん断補強筋を用いない場合のせん断耐力⁷⁾ およびせん断補強筋としてスターラップを用いた場合のせん断耐力であり、次式より求めた。

$$V_c = 0.20 \sqrt[4]{1/d} \sqrt[3]{100 p_w} \sqrt[3]{f'_c b_w d} [0.75 + 1.4/(a/d)] \quad \dots (1)$$

d : 有効高さ p_w : 主鉄筋比 b_w : 腹部の幅
 f'_c : コンクリートの圧縮強度 a : せん断スパン

$$V_y = V_c + V_s = V_c + A_w f_{wy} (z/s_s) / \beta_x \quad \dots (2)$$

A_w : 区間 s_s におけるせん断補強鉄筋の総断面積 z : $d/1.15$
 f_{wy} : せん断補強鉄筋の降伏強度 s_s : せん断補強鉄筋の間隔
 β_x : 支点および載荷点からスターラップまでの距離による低減係数⁸⁾

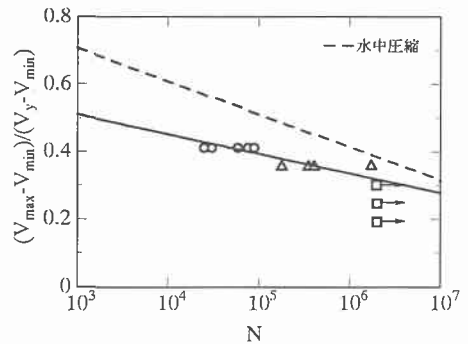
$V_{cr\text{-test}}$ および $V_{y\text{-test}}$ は、静的試験と疲労試験の初載荷時における斜めひび割れ発生せん断力および静的試験におけるせん断耐力である。斜めひび割れ発生時のせん断耐力は、図-1で示す点でのスターラップのひず

みの何れかが増加し始める点とした。斜めひび割れ発生せん断力の実験結果は、疲労試験を行った梁に関しては、せん断補強筋を用いない場合のせん断耐力の計算値より若干小さい値であったが、静的試験を行った梁に関しては、かなり小さな値であった。また、静的せん断耐力の試験は 2 本の梁で行った。それぞれの値は 80.2kN, 79.2kN であり、スターラップを用いた場合のせん断耐力の計算値 78.9kN, 79.3kN とほぼ等しいことがわかる。なお、破壊回数の $>2,000,000$ は 200 万回で破壊しなかったことを意味する。疲労試験を行った梁はすべてせん断補強筋比の小さい右スパンで破壊した。その破壊性状としては、斜めひび割れの発生とともに、多くの梁でせん断スパンの荷点付近の曲げ圧縮部コンクリートに剥離および圧壊が見られた。また、いくつかの梁ではスターラップの降伏がひずみの変化から確認された。

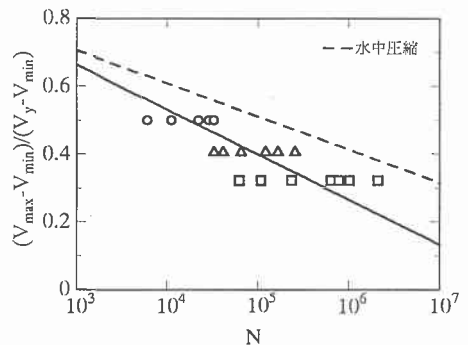
3.2 せん断疲労耐力

各最大せん断力ごとの疲労寿命分布が対数正規分布に従うものと仮定し、各最大せん断力に対する生存確率 50%の疲労寿命を求め、S-N 回帰直線を求めた。これを図-2 に示す。図(a)はせん断補強筋比が 0.40%の梁の結果、図(b)はせん断補強筋比が 0.79%の梁の結果⁶⁾より求めた図である。さらに、せん断補強筋比の違いがわかるように図(a)と図(b)を重ね合わせたものを図(c)に示している。また、これらは、式(2)により求めたせん断耐力 V_y を基準耐力として求めた。なお、図(a), (b)中の破線は、水中におけるコンクリートの圧縮疲労の S-N 回帰直線⁹⁾を示している。さらに、S-N 回帰直線式および 200 万回せん断疲労耐力を表-4 に示す。水中圧縮コンクリートの S-N 回帰式の S_{max} および S_{min} は最大応力比および最小応力比である。図(a)より、せん断補強筋比 0.40%の梁は、水中圧縮コンクリートと比較すると、S-N 回帰直線の傾きが小さいという結果となった。また、200 万回せん断疲労耐力は 31.9%という結果となり、水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度は 38%であるから、6%程度小さくなっていることがわかる。

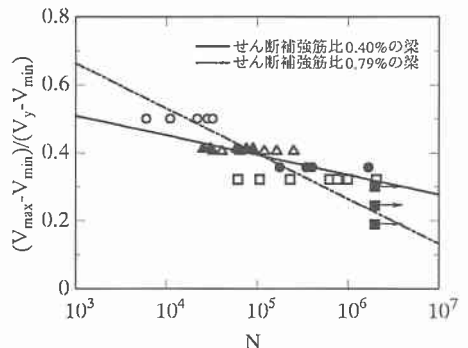
一方、図(b)でせん断補強筋比が 0.79%の梁を見ると、水中圧縮コンクリートより S-N 回帰直線の傾きが大きいという結果となっている。また、200 万回せん断疲労耐力は 22.5%であり水中にお



(a) せん断補強筋比 0.40%の梁



(b) せん断補強筋比 0.79%の梁



(c) (a) と (b) の比較

図-2 S-N 線図

表-4 S-N 回帰式および 200 万回疲労耐力

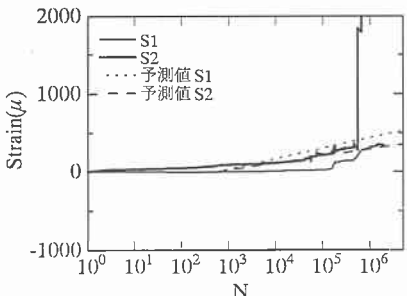
せん断補強筋比	S-N 回帰式	疲労耐力 (%)
0.40%	$(V_{max}-V_{min})/(V_y-V_{min})=0.6831-0.0579\log N$	31.9%
0.79%	$(V_{max}-V_{min})/(V_y-V_{min})=1.0619-0.1328\log N$	22.5%
水中圧縮	$(S_{max}-S_{min})/(1-S_{min})=1-0.098\log N$	38%

るコンクリートの圧縮疲労強度より 15%程度小さくなっている。

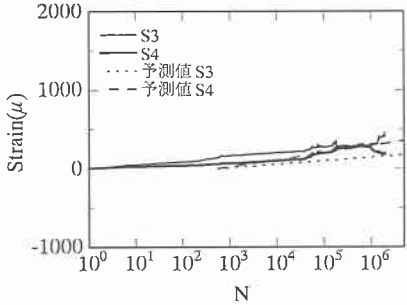
図(c)より、せん断補強筋比 0.40%の梁とせん断補強筋比 0.79%の梁を比較すると、S-N 回帰直線の傾きは大きく異なり、せん断補強筋比が 0.40%の梁の方が小さい結果となった。200 万回せん断疲労耐力については、せん断補強筋比 0.40%の梁の方が 9%程度大きくなっているが、およそ 10 万回以下のところでは、せん断補強筋比 0.79%の梁の方が大きくなっていることがわかる。

3.3 ひずみの変化

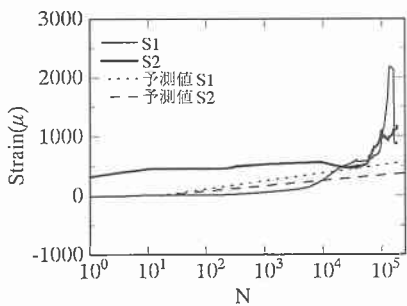
最大せん断力作用時におけるスターラップのひずみの変化を図-3に示す。図(a)および図(b)は V_{max}/V_y が 37.0%の結果である。また、図(a)は右スパン($p_w=0.40\%$)、図(b)は左スパン($p_w=0.79\%$)の結果であり、同一の梁のものである。なお、これは 200 万回载荷したか破壊には至らなかった梁である。また、図(c)は V_{max}/V_y が 42.0%の結果、図(d)は V_{max}/V_y が 47.0%の結果である。図(a)、図(c)、図(d)の細線はスターラップ S1 (支点側) の平均、太線は S2 (载荷点側) の平均である。図(b)の細線は S3 (载荷点側) の平均、太線は S4 (支点側) の平均である。図中の点線および破線は、スターラップの平均ひずみの予測値である²⁾。図(a)の S1 は 20 万回载荷程度までほぼ 0 であり、その後増加している。これは、20 万回载荷程度まで S1 近傍に斜めひび割れが発生しなかったためと考えられる。S2 は 70 万回载荷程度まで徐々に増加しているが、そこでひずみが急激に増加している。これは、スターラップの降伏によるものではなく、ひび割れ部でリード線が断線した結果と思われる。また、S1 は予測値よりもかなり遅れてひずみの増加が始まるが、増加してからの傾きは、計測値の方が大きくなっている。S2 はおおむね予測値と一致していることがわかる。一方、左スパンのせん断補強筋比 0.79%のひずみを図(b)で見ると、S3 および S4 ともに初载荷時より徐々に増加している。これは、図(a)と同様の傾向を示している。また、S3 は予測値とおおむね一致しているが、S4 は予測値よりも計測値の方が大きくなっている。図(c)の S1 は、300 回载荷程度までほぼ 0 であるが、そこから若干の増加傾向を示し、8000 回载荷程度から大きく増加し降伏ひずみ程度まで計測されている。S2 は初载荷時よりひずみが 300 μ 程度記録している。これは、 V_{max} が V_y よりも小さいにもかかわらず、S2 近傍にせん断ひび割れが発生したためと考えられる。そのひずみは、10000 回载荷程度まで徐々に増加し、そこから一旦減少傾向を示すが、



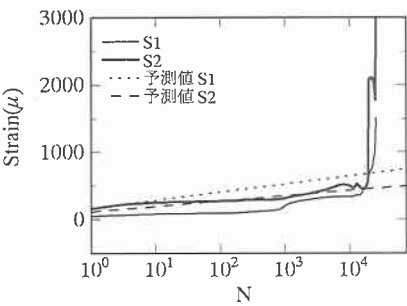
(a) No.7 $V_{max}=30.9\text{kN}$ $p_w=0.40\%$



(b) No.7 $V_{max}=30.9\text{kN}$ $p_w=0.79\%$



(c) No.6 $V_{max}=35.0\text{kN}$ $p_w=0.40\%$



(d) No.14 $V_{max}=37.1\text{kN}$ $p_w=0.40\%$

図-3 ひずみの変化

30000 回載荷程度から増加している。また、S1 は 20000 回載荷程度まで予測値よりも小さいが、それ以後は計測値よりも予測値の方が大きくなり、増加率も大きい。S2 は初載荷時から予測値よりも大きくなっている。図(d)の S1 は 1000 回載荷程度までほぼ 0 であり、そこから増加傾向を示し、破壊直前に急激にひずみが増加している。S2 は、10000 回載荷程度まで徐々に増加し、そこから急激にひずみが増加している。最終的なひずみの値は 2265μ 以上となっており、スターラップは降伏しているものと考えられる。また、S1 は予測値よりも小さいが、S2 は予測値とおおむね一致している。

3.4 分担せん断力の変化

最大せん断力作用時におけるコンクリートの分担せん断力の変化を図-4 に示す。図(a)はせん断補強筋比 0.40%の梁の結果、図(b)はせん断補強筋比が 0.79%の梁の結果⁶⁾である。コンクリートの分担せん断力は次式より求めた。

$$V_c = V_{\max} - \sum A_w E_w \varepsilon_w \quad \dots (3)$$

A_w : 一組のスターラップの断面積

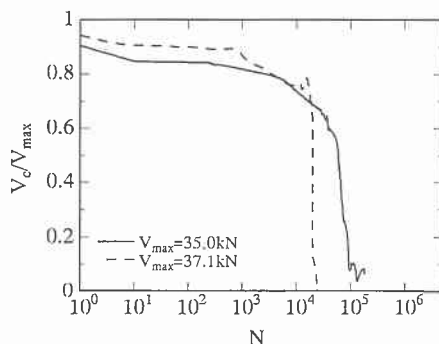
E_w : スターラップの弾性係数

ε_w : スターラップのひずみ

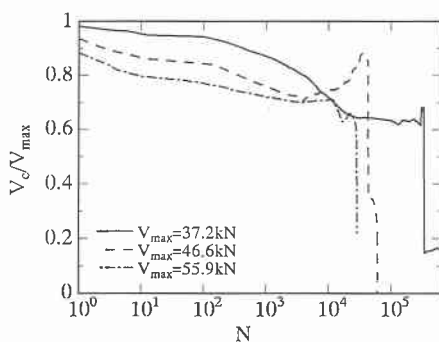
スターラップのひずみには、梁のひび割れ位置から、S1 の下と S2 の上のひずみの計測結果を用いた。ただし、スターラップのひずみが降伏点ひずみを超えている場合には、 $E_w \varepsilon_w$ を降伏点応力度 386 N/mm^2 としている。

図(a)でせん断補強筋比 0.40%の梁の分担せん断力の変化を見ると、 $V_{\max}$ が 35.0kN の場合には、コンクリートの分担せん断力は、8000 回載荷程度まで緩やかな減少傾向を示すが、それ以後は減少率が大きくなっている。そして、破壊直前に急激に減少し分担せん断力がほとんど 0 になっている。 $V_{\max}$ が 37.1kN の場合には、初載荷時より 30000 回載荷程度まで緩やかな減少傾向を示し、破壊直前に急激に減少し分担せん断力が 0 になっている。したがって、梁の破壊直前ではコンクリートの分担するせん断力が 0 になり、スターラップのみでせん断力に抵抗する状態になる場合があると考えられる。一方、図(b)でせん断補強筋比 0.79%の分担せん断力の変化を見ると、 $V_{\max}$ が 37.2kN の場合には、10000 回載荷程度まで減少し、その後ほぼ一定値を示し、破壊直前に急激に減少し分担せん断力が $V_{\max}$ の 15%程度となっている。 $V_{\max}$ が 46.6kN の場合には、5000 回載荷程度まで減少し、その後一旦増加傾向を示すが、破壊直前に急激に減少し分担せん断力が 0 になっている。さらに、 $V_{\max}$ が 55.9kN の場合には、10000 回載荷程度まで徐々に減少を続けるが、その後すぐに急激に減少し $V_{\max}$ の 20%程度になっている。

これらの結果をもとにせん断補強筋比 0.40%の梁とせん断補強筋比 0.79%の梁を比較すると、せん断補強筋比 0.40%の梁の方が、載荷中の分担せん断力の減少率は小さいが、梁の破壊直前に分担せん断力が急激に減少し 0 になる場合があるという結果は、せん断補強筋比が 0.79%の梁と同様の結果を示している。



(a) せん断補強筋比 0.40%の梁



(b) せん断補強筋比 0.79%の梁

図-4 コンクリートの分担せん断力

4. まとめ

本研究の目的は、水中における鉄筋コンクリート梁のせん断疲労特性に及ぼすせん断補強筋比の影響を明らかにすることにある。そこで、有効高さを 16.5cm、主鉄筋比を 3.47%、せん断補強筋比を右スパン 0.40%、左スパン 0.79%、せん断スパン比を 1.94 とする鉄筋コンクリート梁の水中せん断疲労試験を行い、文献 6) のせん断補強筋比が両スパン 0.79% の鉄筋コンクリート梁とせん断疲労耐力、スターラップのひずみの変化、コンクリートの分担せん断力について比較検討を行った。限られた条件による結果ではあるが、まとめると以下ようになる。

- 1) 疲労試験を行った梁の破壊性状は、斜めひび割れの発生とともに多くの梁でせん断スパンの載荷点付近の曲げ圧縮部コンクリートに剥離および圧壊が見られ、スターラップが降伏しているものもある。
- 2) せん断補強筋としてスターラップを用いた場合のせん断耐力 V_f を基準耐力とした場合、せん断補強筋比 0.40% の梁の S-N 回帰直線の傾きはせん断補強筋比が 0.79% の梁よりも小さい。また、200 万回せん断疲労耐力については、せん断補強筋比 0.40% の梁の方が 0.79% の梁よりも 9% 程度大きい。およそ 10 万回以下のところでは、せん断補強筋比 0.79% の梁の方が 0.40% の梁よりも大きい。
- 3) スターラップのひずみの変化は、せん断補強筋比 0.40% の梁、せん断補強筋比 0.79% の梁ともに荷重の繰り返しとともに徐々に増加する。また、破壊直前に降伏ひずみに達することもある。
- 4) コンクリートの分担するせん断力は、せん断補強筋比 0.40% の梁の方が、載荷中の分担せん断力の減少率は小さいが、せん断補強筋比が 0.79% の梁と同様に、梁の破壊直前に分担せん断力が急激に減少し 0 になる場合がある。

参考文献

- 1) 土木学会：[平成 8 年制定] コンクリート標準示方書 設計編，1996。
- 2) H.Okamura, S.A.Farghaly and T.Ueda : Behaviors of Reinforced Concrete Beams with Stirrups Failing in Shear under Fatigue Loading, Proc. of JSCE, No.308, pp.109~122, 1981.
- 3) 上田多門・岡村甫：疲労荷重下のスターラップの挙動，コンクリート工学，Vol.19, No.5, pp.101~116, 1981.
- 4) 西林新蔵・井上正一・大谷公行：水中における鉄筋コンクリートはりの疲労性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9, No.2, pp.633~638, 1987.
- 5) 井上正一・西林新蔵・吉野公・権赫文：水中における RC はりの疲労性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15, No.2, pp.437~442, 1993.
- 6) 菅田紀之・尾崎諤：水中における鉄筋コンクリート梁のせん断疲労特性について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, No.2, pp.819~824, 1997.
- 7) 二羽淳一郎・山田一字・横沢和夫・岡村甫：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，第 372 号 IV-5, pp.167~176, 1986.
- 8) H.Okamura and S.A.Farghaly : Shear Design of Reinforced Concrete Beams for Static and Moving Loads, Proc.of JSCE, No.287, pp.127~136, 1979.
- 9) 菅田紀之・尾崎諤・水吐則行：高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの疲労特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17, No.1, pp.1067~1072, 1995.