

港湾技研資料

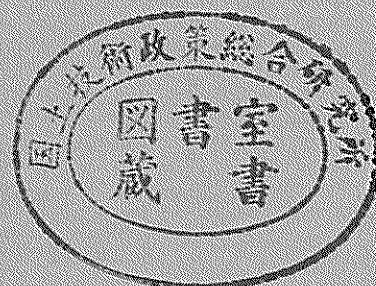
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF LAND, INFRASTRUCTURE AND TRANSPORT, JAPAN

No. 983 Mar. 2001

溶接継手を有する鉄筋コンクリート梁の水中疲労強度

菅	原	亮
横	田	弘
秋	本	孝

国土交通省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 疲労試験の概要	4
2.1 試験体の構造	4
2.2 試験方法と計測項目	6
3. 試験結果	7
3.1 ひび割れ性状	7
3.2 たわみ性状	15
3.3 ひずみ性状	15
3.4 鉄筋破断位置	15
3.5 破壊形態	15
3.6 応力振幅	15
4. まとめ	15
5. あとがき	16
参考文献	16

Fatigue Properties of Submerged Concrete Beams Reinforced by Welded Rebar Mesh

Ryo SUGAWARA *

Hiroshi YOKOTA **

Takashi AKIMOTO ***

Synopsis

Application of welded rebar mesh is suggested for rational and labor saving construction of RC(reinforced concrete) caissons for port structures. It is usually pointed out that fatigue strength of welded rebars is decreased due to thermal effect, therefore welded rebars have been used only for limited cases in construction. Moreover, RC structural members have considerably lower fatigue strength when they are submerged. Experimental fatigue tests were executed on submerged RC simple beams reinforced by the welded rebar mesh. Through the comparison of the test results with those obtained by fatigue tests in air, the applicability of the welded rebar mesh to port construction is discussed. As a result of the study, the test beams were collapsed by crushing of concrete in water while those were collapsed by tensile fracture in air. It was also confirmed that those beams had strength of more than the design fatigue strength considering the effect of welding by 50% reduction in the standard specification for concrete structures by JSCE.

Key Words : RC beam, Fatigue Strength in Water, Welded Rebar Mesh, Arc Welding

* Member of Structural Mechanics Laboratory, Structural Engineering Division

** Chief of Structural Mechanics Laboratory, Structural Engineering Division

*** Former Trainee of Structural Mechanics Laboratory (Wakachiku Construction Co., Ltd.)

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-44-5031 Fax : +81-468-44-0255 c-mail:sugawara_r@cc.phri.go.jp

溶接継手を有する鉄筋コンクリート梁の水中疲労強度

菅 原 亮*
横 田 弘**
秋 本 孝***

要 旨

鉄筋コンクリート製港湾用ケーソン製作の合理化，省力化の方法のひとつにユニット化鉄筋の使用が提案されている．一般には，鉄筋同士を溶接すると熱影響により鉄筋母材の疲労強度が低下することが指摘されている．また，港湾構造物はそのほとんどの部分が水中に没したまま使用されるため，水中での疲労強度の把握が必要となる．そこで，鉄筋コンクリート部材に溶接ユニット化鉄筋を使用した試験体を作成し，疲労試験を行い溶接ユニット化鉄筋を使用した鉄筋コンクリートの疲労性状について検討した．その結果，溶接ユニット化鉄筋を用いた場合，かなりの疲労強度の低下が見られた．また，気中試験の場合は鉄筋の破断により試験体が破断したが，水中試験の場合はコンクリートの圧縮破壊によって試験体が破壊した．水中疲労試験の結果，土木学会コンクリート標準示方書での水中でのコンクリートの設計疲労強度以上の疲労強度を有していることが確認された．

キーワード：ユニット化鉄筋，疲労強度，水中疲労試験，RC 梁

*構造部構造強度研究室研究員

**構造部構造強度研究室長

***元構造部構造強度研究室受託研修生（若築建設株式会社）

1. まえがき

港湾工事の現場作業において、種々の観点から合理化・省力化等の努力が行われている。大量かつ同一規格で製作される防波堤や護岸用の鉄筋コンクリート（RC）製港湾用ケーソンの製作では、配筋作業、型枠組立、コンクリート打設などで現場作業の省力化のための技術開発が進められている。ケーソン製作の省力化の代表的な事例として、鉄骨の骨組みに合成版パネルを取り付けて製作するパネルシステムケーソン工法、隔壁をプレキャスト化してケーソンを組み立てるプレキャストケーソン工法、鉄筋だけをユニット化してケーソンを製作するユニット化鉄筋工法などがあげられる¹⁾。

本資料で対象とするユニット化鉄筋工法は、図-1に示すように、陸上で鉄筋網よりなる鉄筋ユニットを製作し、クレーンを用いてケーソンの所定位置に建て込む工法である。鉄筋工が高所で1本ずつ鉄筋を搬入、配置、結束する従来の作業を大幅に低減することを目指した工法である。ユニット化鉄筋工法における鉄筋の結合には、結束線を用いる方法、特殊な結束治具による方法、溶接による方法などがある。結束線を用いる方法は、運搬時にユニットが変形しやすいこと、特殊な結束治具を用いる場合には、施工が複雑で、工費が高いなどの短所を有する。また、溶接による方法は、ユニット鉄筋製作のために必要な強度を得やすく、ユニット自体の変形も少ないなどの長所を有する。しかし、溶接鉄筋網は鉄筋同士を点溶接するため、鉄筋の伸び性能が低下し、かつ疲労強度の低下が懸念される。

土木学会のコンクリート標準示方書では、鉄筋を溶接あるいは機械加工すると静的強度はほとんど低下しないが疲労強度が低下するとされている²⁾。既往の研究では、その低下率について様々な値が報告されており、直線棒鋼では疲労強度が最大 50%まで低下する可能性がある³⁾と指摘されている。これまで行ってきた一連の過去の研究でも、アーク溶接により作製されたユニット化鉄筋を使用した RC 梁の場合、設計疲労強度と比較すると疲労強度が 25%程度低下することが分かっている³⁾。

また、溶接鉄筋網をコンクリート部材に使用することにより接合部（重ね継手部）が存在する。この接合部では一断面に溶接鉄筋網同士が接合されるため、現行の基準類に適合しない。現行の基準⁴⁾では、

- (1)鉄筋を同一断面内でつながない。
- (2)隣接する部材軸方向の継手位置を鉄筋径の 25 倍以上離した位置にする。

(3)重ね継手長は鉄筋径の 20 倍以上とする。

などが規定されている。これらは、原則的に 1 断面内に重ね継手箇所を集中した場合に懸念される疲労強度の低下、じん性の低下などの観点に基づくものである。

これに対しても、過去の研究から、1 断面に重ね継手を有する場合と、そうでない場合 RC 梁の疲労強度がほぼ同程度であることが分かり、継手の有無による疲労強度の低下はないものと考えている³⁾。

上記の研究は全て気中における試験から得られたものであるが、港湾構造物の場合、そのほとんどが水中に没しているため、特に水中環境での疲労強度について検討する必要がある。これは、RC 構造物は、水中に置かれた場合に疲労強度が低下することが知られているためである⁵⁾。

そこで、溶接鉄筋網により補強した RC 梁の水中疲労試験を行い、過去に報告した気中での疲労試験結果と比較した。なお、本資料では鉄筋単独ではなく、コンクリート中に埋設され鉄筋コンクリート梁としての疲労強度に着目している。

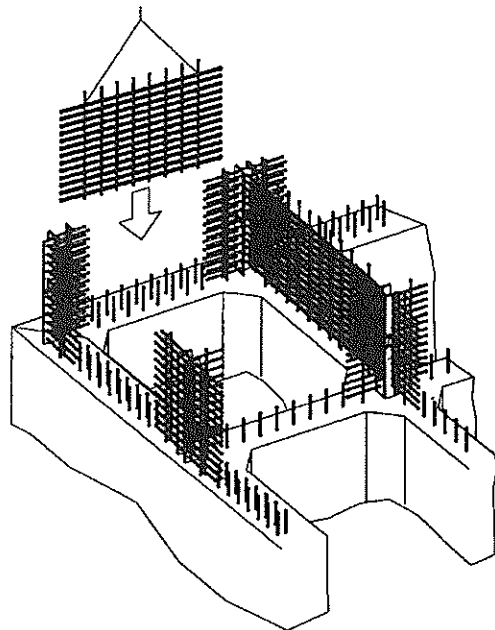


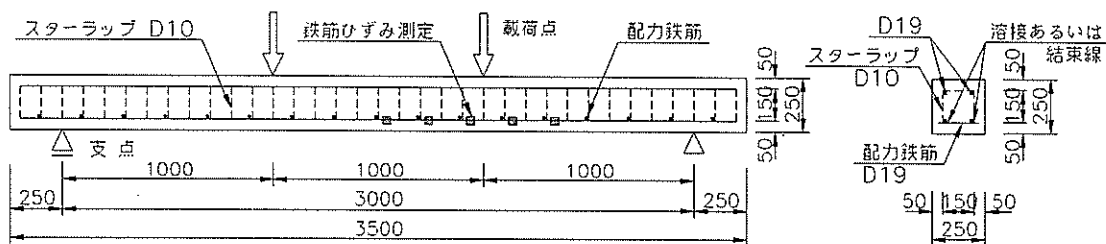
図-1 ユニット化鉄筋によるケーソンの施工例

2. 疲労試験の概要

2.1 試験体の構造

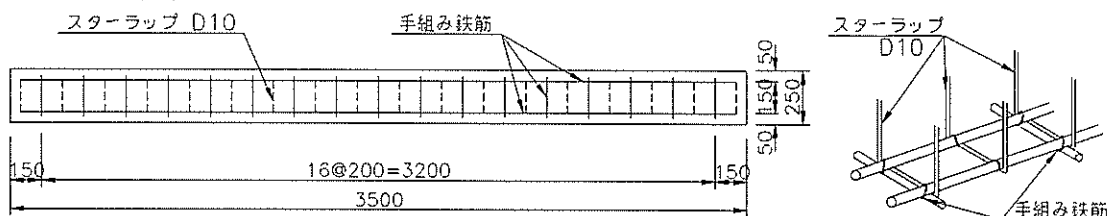
試験に使用した試験体は、図-2に示すように、長さ 3500mm、幅 250mm、高さ 250mm の RC 梁で、使用したコンクリートは、表-1に示すとおり、設計基準強度 24N/mm²、スランプ 12cm、空気量 4.5%、粗骨材最大寸

(側面図)

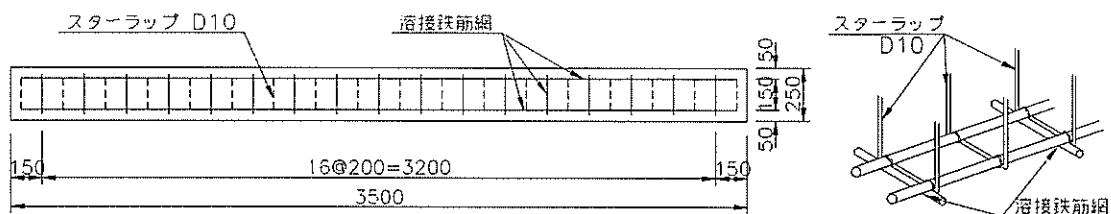


(平面図)

TYPE-NN(W)



TYPE-NM(W)



TYPE-C(W)

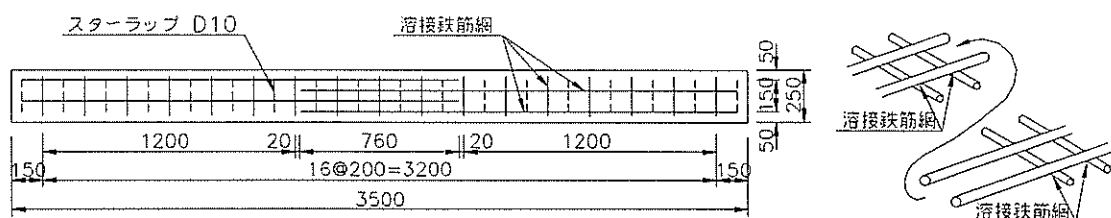


図-2 試験体概要図

表-1 コンクリートの示方配合

セメントの種類	設計基準強度 (N/mm ²)	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量(kg/m ³)				
							水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AE
早強	24	20	12±2.5	4.5±1.5	55.0	43.0	160	297	772	1086	0.594

表-2 円柱管理供試体の試験結果

試験名	材 齢	No.1	No.2	No.3	平 均
圧 縮 強 度 (N/mm ²)	7日	26.0	26.7	26.4	26.4
	試験時	35.0	34.9	35.0	35.0
引 張 強 度 (N/mm ²)	7日	2.28	2.71	2.39	2.46
	試験時	2.72	2.41	2.82	2.65
曲 げ 強 度 (N/mm ²)	7日	5.38	5.06	4.94	5.13
	試験時	4.60	5.50	5.69	5.26
ヤ ン グ 率 (kN/mm ²)	7日	27.0	26.9	26.1	26.7
ポ ー ソ ン 比	7日	0.179	0.227	0.133	0.180

表-3 単鉄筋および鉄筋網の引張試験結果

供試体	試験体 No.	公称直径 (mm)	最高荷重 (kN)	上降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	ヤング率 (kN/mm ²)
単鉄筋	1	19.1	158.8	393.0	553.7	21.6	147.0
	2	19.1	160.3	392.0	559.6	21.3	163.7
	3	19.1	159.2	394.9	555.7	22.0	169.5
	4	19.1	158.8	391.0	553.7	21.7	162.7
	5	19.1	158.8	391.0	553.7	21.8	213.6
	平均	19.1	159.2	392.0	555.7	21.7	171.3
鉄筋網	1	19.1	161.3	395.9	562.5	21.7	214.6
	2	19.1	160.9	395.9	561.5	19.8	203.8
	3	19.1	159.5	394.9	556.6	14.4	221.5
	4	19.1	160.9	394.9	561.5	22.2	220.5
	5	19.1	160.5	394.9	560.6	20.7	226.4
	平均	19.1	160.6	395.9	560.6	19.8	217.4
SD345規格値				345.2~439.3	490.3以上	18以上	

表-4 単鉄筋および鉄筋網の曲げ試験結果

供試体	試験体 No.	公称直径 (mm)	最終曲げ半径 (mm)	最高荷重 (kN)
単鉄筋	1	19.1	146	22.2
	2	19.1	145	21.9
	3	19.1	146	21.6
	4	19.1	146	22.0
	5	19.1	147	21.6
	平均	19.1	146	21.8
鉄筋網	1	19.1	149	22.1
	2	19.1	148	22.6
	3	19.1	147	22.0
	4	19.1	148	22.4
	5	19.1	149	22.3
	平均	19.1	148	22.3

法 20mm を満たすように決定した。また、材齢 7 日および疲労試験時における直径 10cm、高さ 20cm の円柱管理供試体による強度などの試験結果を表-2 に示す。ユニット化鉄筋の主鉄筋および配力鉄筋はすべて SD345-D19 を使用し、せん断補強筋は SD345-D10 を 100mm 間隔で配置した。鉄筋の引張試験結果を表-3 に、曲げ試験結果

を表-4 にそれぞれ示す。

試験体は、溶接方法および継手方法を変化させた TYPE-NN、TYPE-NM、および TYPE-C の 3 種類とした。これらの構造、寸法および配筋状況を図-2 に示す。また、同図中の W の文字は水中を表す。

TYPE-NN は、通常の配筋方法で結束された鉄筋網を用い、かつ接合部の無い試験体である。この試験体は溶接鉄筋網との比較のため溶接は行っておらず、鉄筋の交差部は結束線により固定したものである。つまり、通常の RC と同じ方法による標準的な試験体である。TYPE-NM は主鉄筋と配力鉄筋の交点すべてにアーク溶接を用いたもので、かつ接合部のない試験体である。TYPE-C は、図-2 に示したとおり、アーク溶接による鉄筋網を配置した後、その反対側から張り出し部分のある鉄筋網を重ね、重ね継手を行った試験体である。その際、重ね継手長は、 D を鉄筋の公称直径として、 $40D$ (760mm) とした。同図からも分かるように、接合部の主鉄筋同士はユニット化鉄筋の製作および施工時の容易さを考慮し、少し距離を置いて配置した。アーク溶接後の溶接部の状態を図-3 に示す。

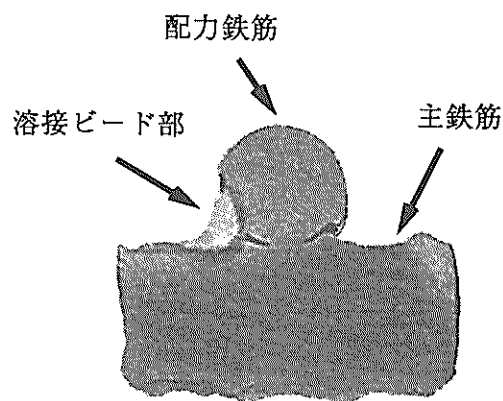


図-3 アーク溶接後の溶接部の状態

2.2 試験方法と計測項目

疲労試験は、当所が所有する 200kN の能力を有する疲労試験機を用いて行った。疲労試験の状況は図-4 および写真-1 に示すとおりである。コンクリート打設後気中養生を行い、試験開始前 1 日程度水中で湿潤させた後に疲労試験を行った。疲労試験は部分片振り载荷とし、载荷周波数は 0.5Hz とした。下限荷重は各ケースとも 5kN とした。上限荷重は初回静的载荷時に計測される鉄筋ひずみの最大値が降伏ひずみに達する荷重 (P_1) の 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5 倍となる荷重を基本とした。繰り返し载荷

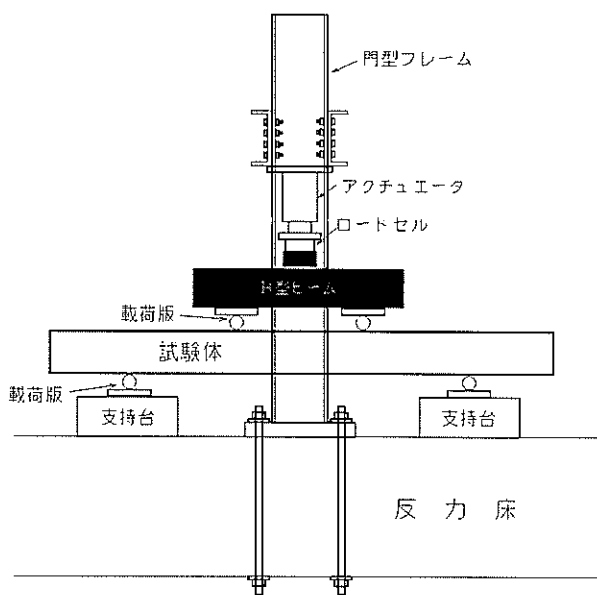


図-4 疲労試験概要図

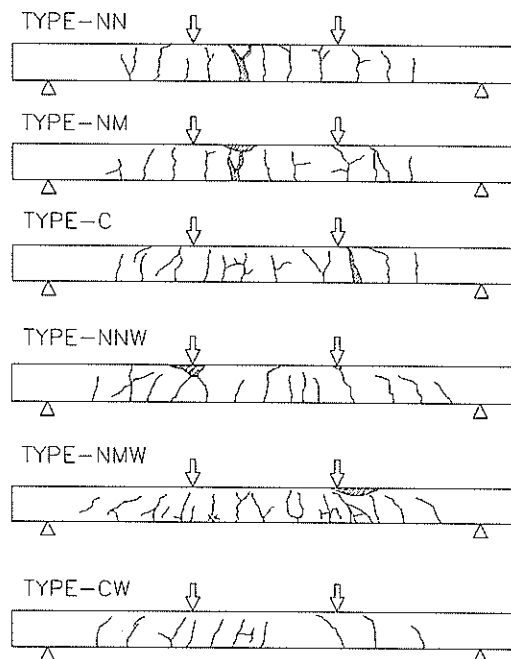


図-5 試験体のひび割れ状況（側面）

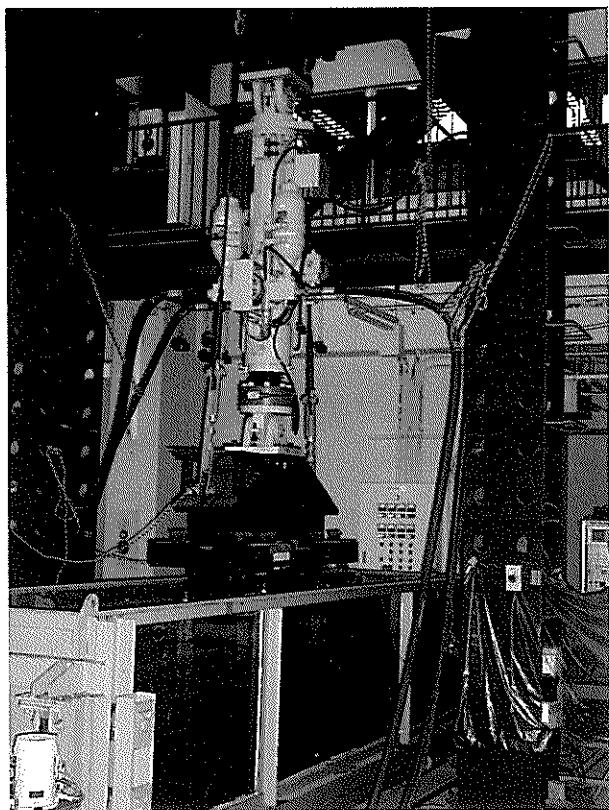


写真-1 水中疲労試験

回数が 200 万回に達しても破壊が生じない荷重振幅を確認するため、試験体のタイプによっては上限荷重を P_u の 0.4 または 0.3 倍となるように設定した試験体もある。

計測項目は、主鉄筋ひずみ、コンクリートひずみ、コンクリートひび割れ幅、試験体たわみ、および荷重値で、それぞれ所定の繰返し载荷回数に達した時点で静的载荷を行って測定した。その際、5kN 毎に荷重制御により荷重を载荷し、各試験ケースの上限荷重まで载荷を行った。主鉄筋のひずみは図-2の■で示した 5 カ所で計測を行った。各測定点では、主鉄筋の上面、および下面にひずみゲージ（ゲージ長：3mm）をそれぞれ 1 枚ずつ貼り付け、この平均値を鉄筋ひずみとした。コンクリートひずみは、試験体圧縮縁の中央部にコンクリートひずみゲージを 1 枚貼り付けて計測した。ひび割れ幅は試験体の側面の主鉄筋位置において、コンタクトゲージ（測定精度：1/1000mm）により測定した。

3. 試験結果

3.1 ひび割れ性状

図-5に終局時のひび割れ発生状況を示す。いずれの試験体においても曲げひび割れがほぼ等間隔に発生していた。また、ほとんどの試験体で、载荷点近傍でのコンクリートの圧縮破壊が確認された。図-6～8に上限荷重 $0.9P_u$ 、 $0.7P_u$ 、および $0.5P_u$ 時の最大ひび割れ幅と繰返し載

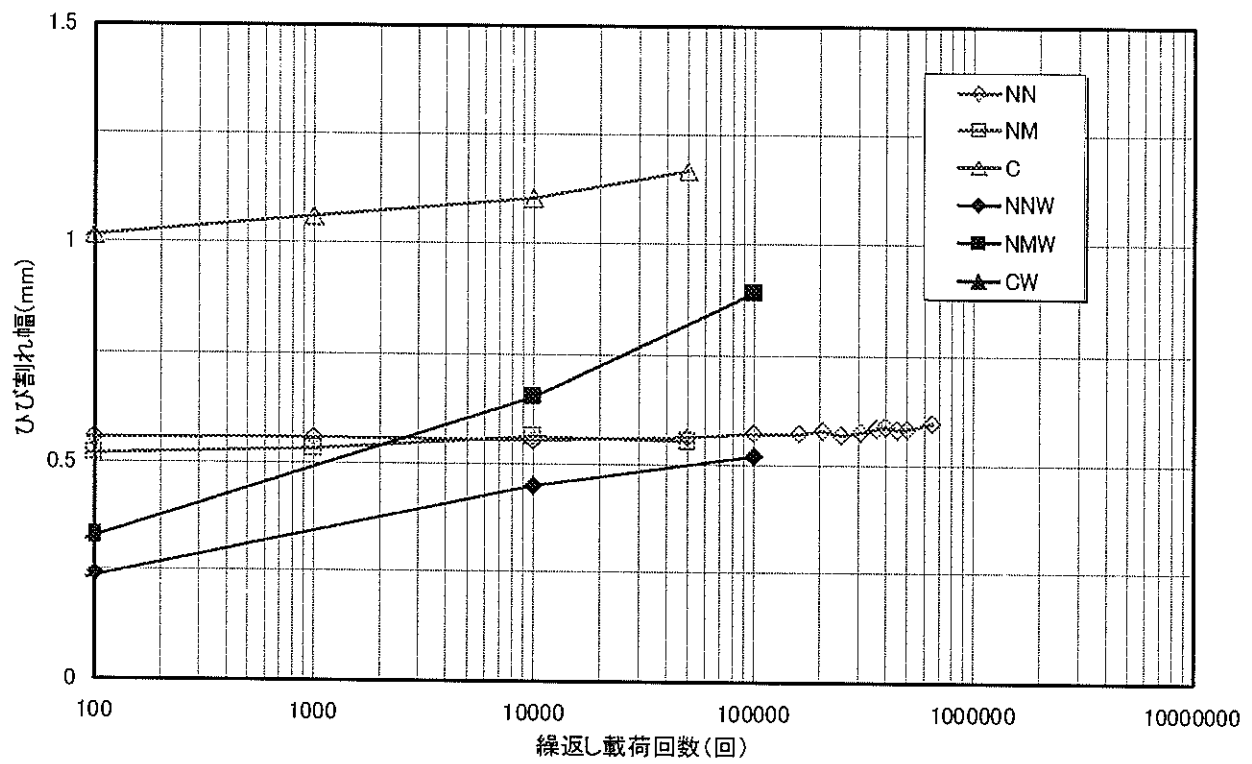


図-6 0.9P, 時の最大ひび割れ幅と繰返し载荷回数の関係

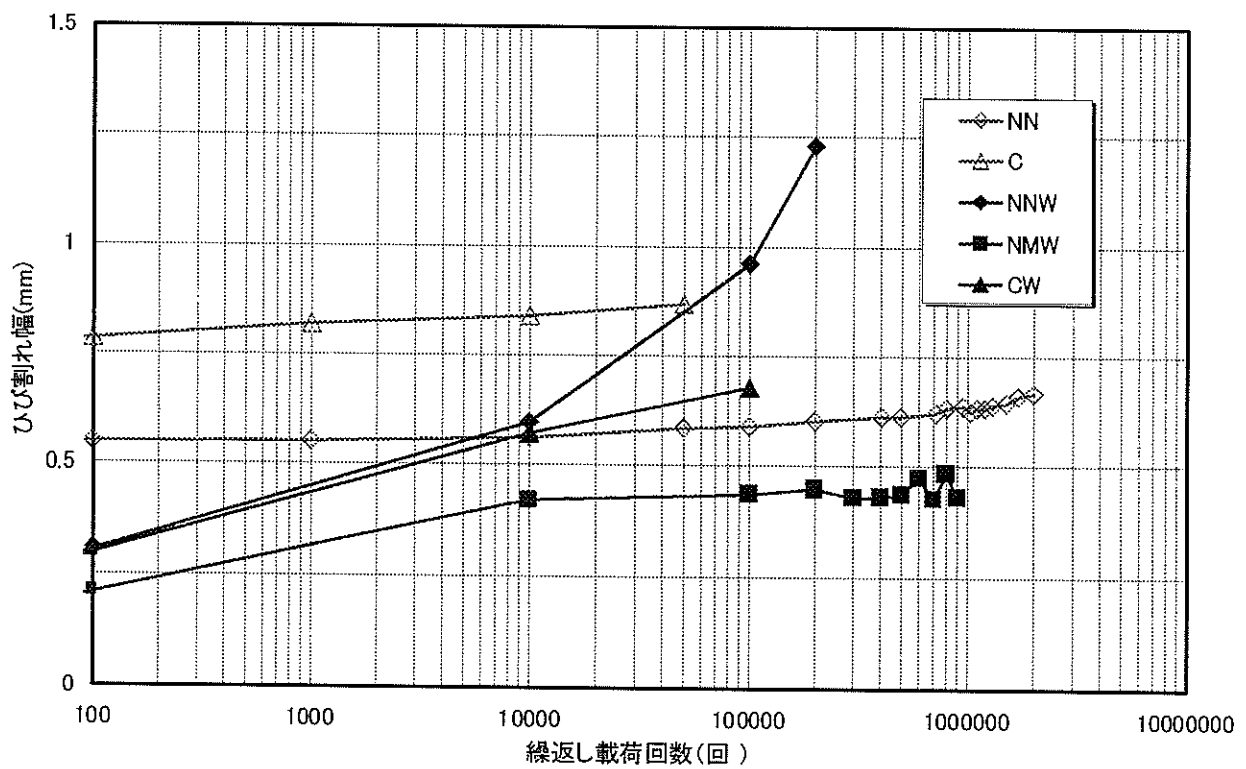


図-7 0.7P, 時の最大ひび割れ幅と繰返し载荷回数の関係

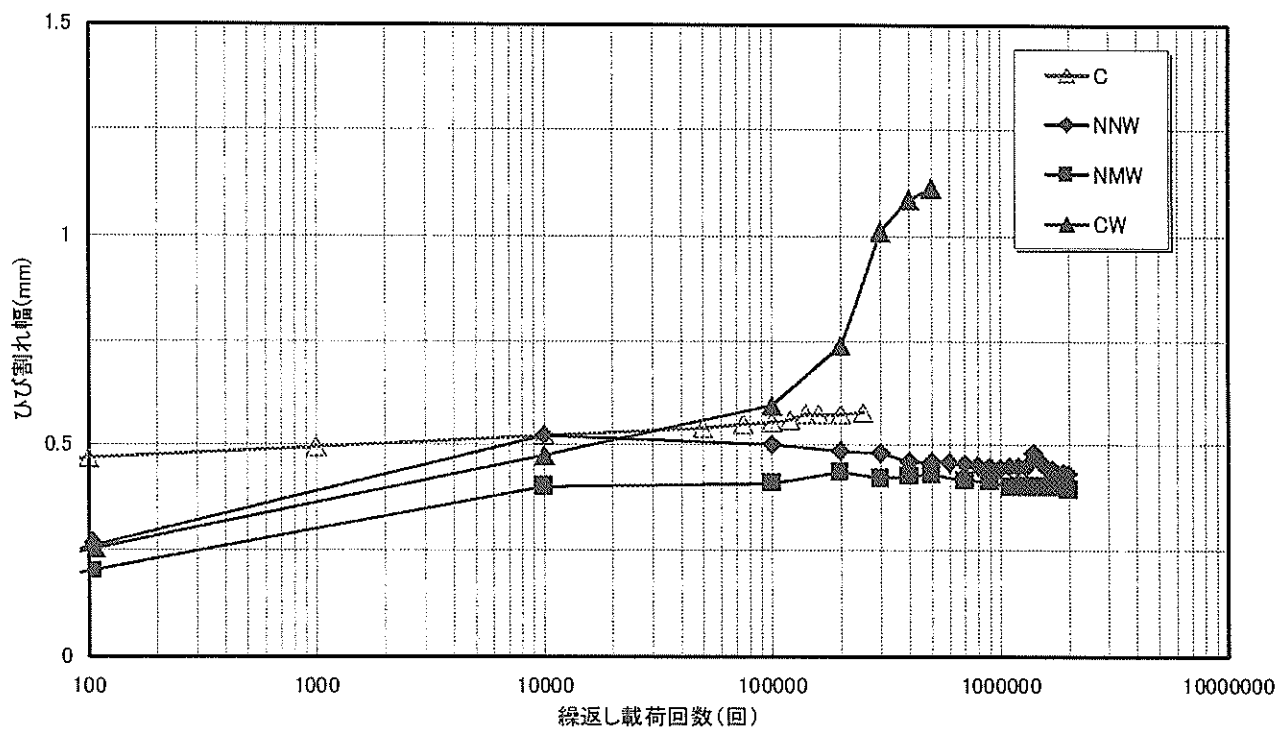


図-8 0.5P, 時の最大ひび割れ幅と繰返し载荷回数の関係

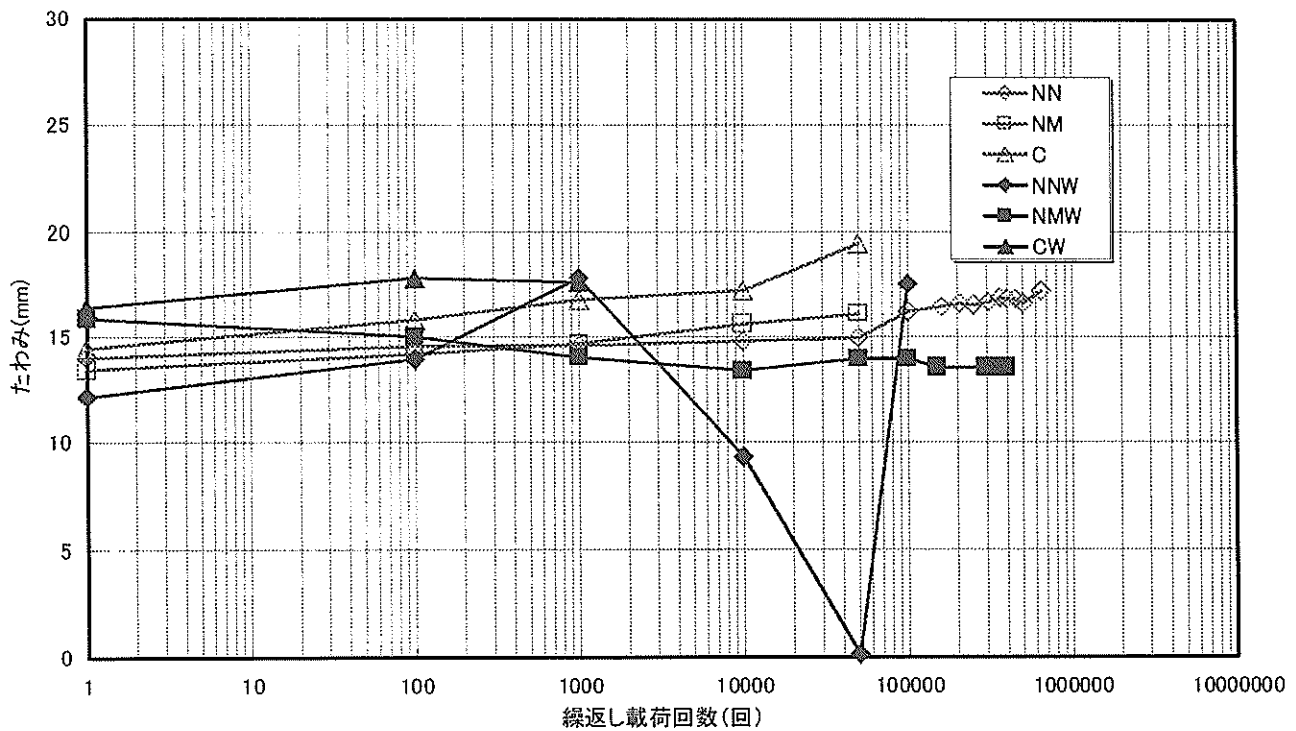


図-9 0.9P, 時のたわみと繰返し载荷回数関係

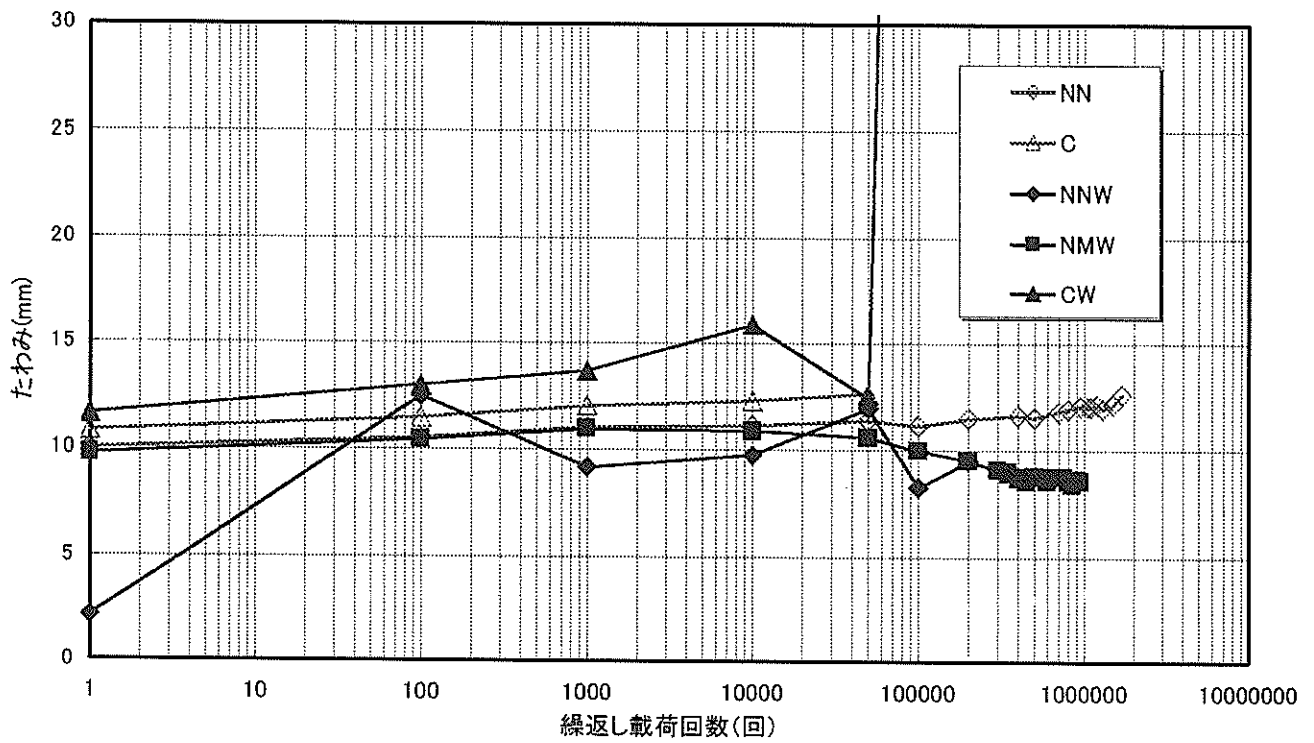


図-10 0.7P, 時のたわみと繰返し载荷回数(回)の関係

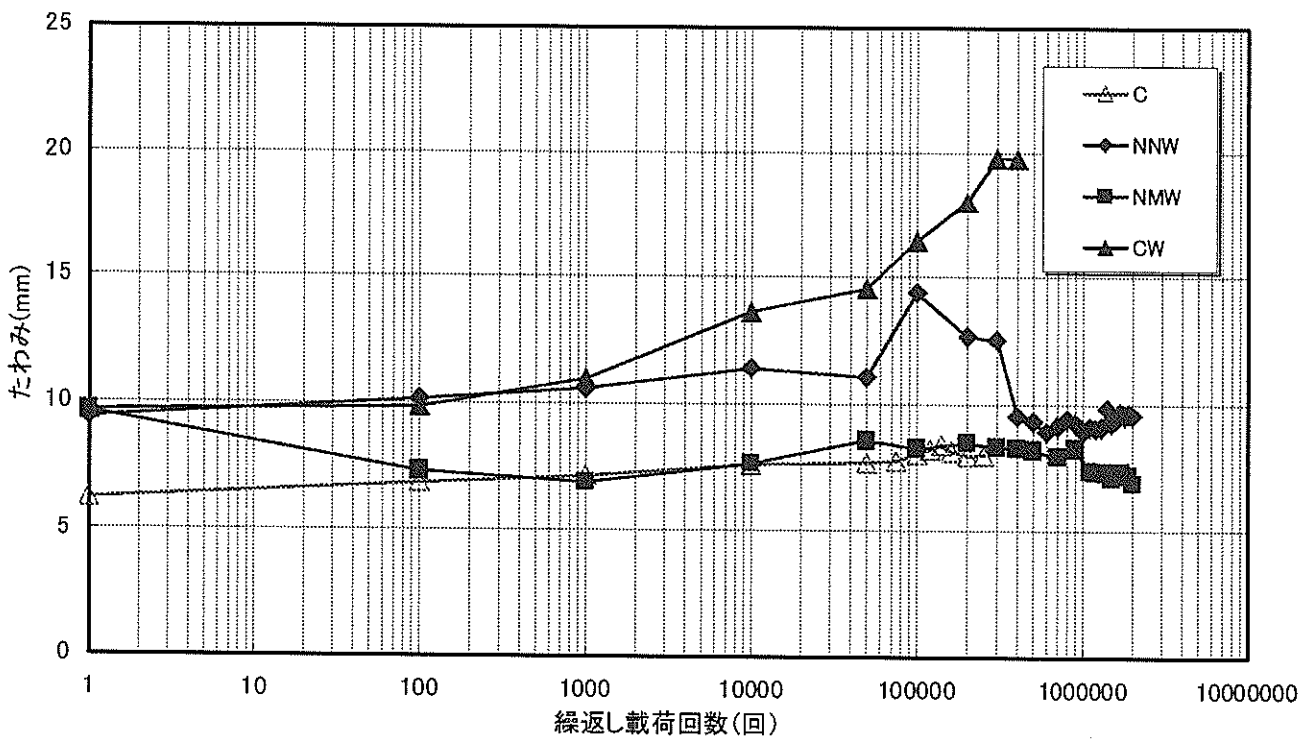


図-11 0.5P, 時のたわみと繰返し载荷回数(回)の関係

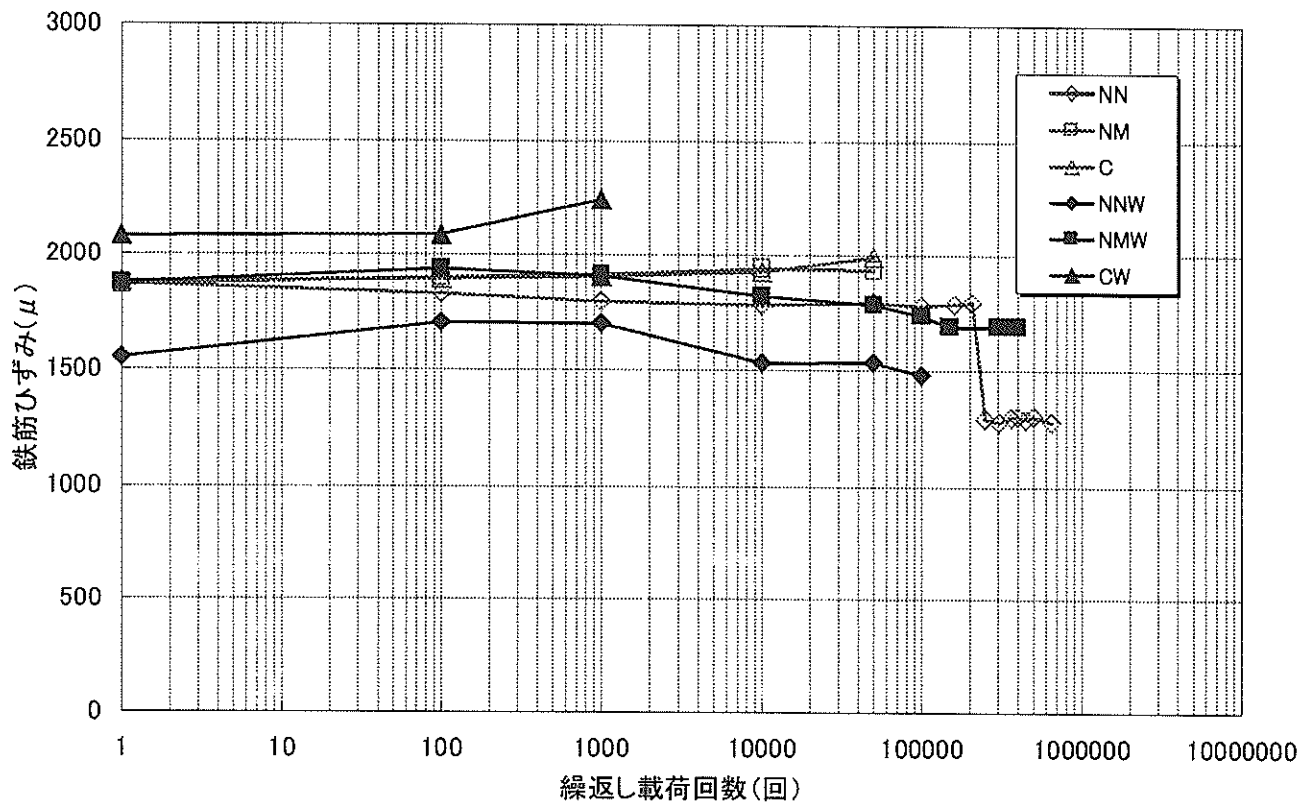


図-12 0.9P, 時の最大鉄筋ひずみと繰返し载荷回数の関係

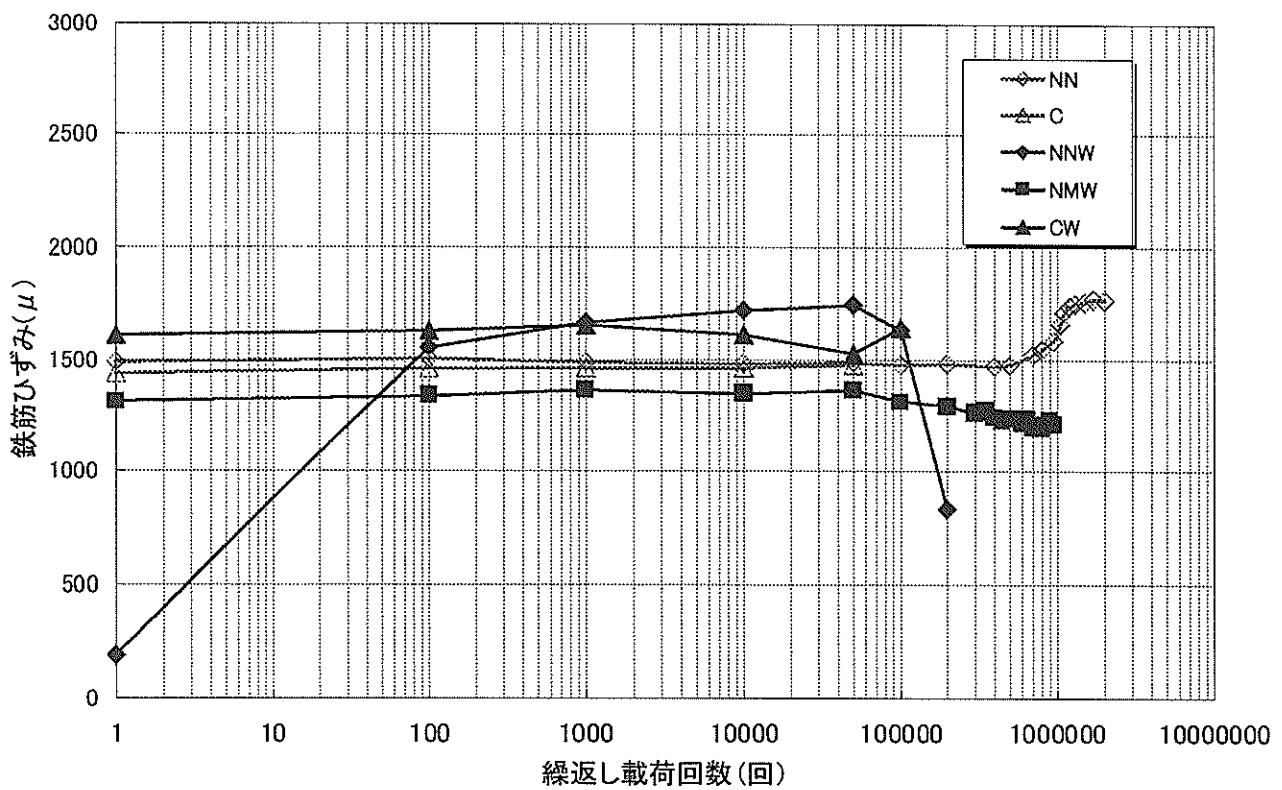


図-13 0.7P, 時の最大鉄筋ひずみと繰返し载荷回数(回)の関係

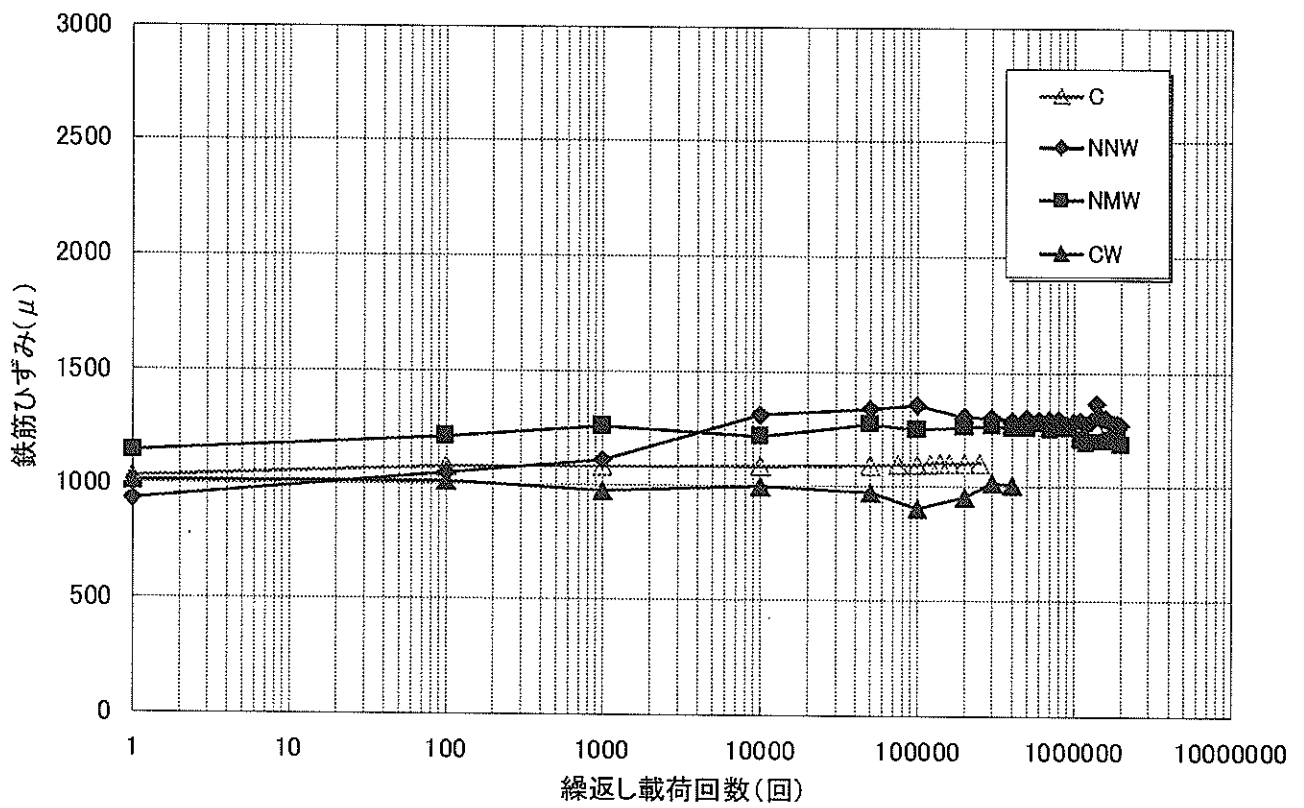


図-14 0.5P, 時の最大鉄筋ひずみと繰返し载荷回数の関係

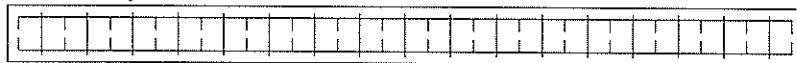
TYPE-NN 0.9Py



TYPE-NN 0.8Py



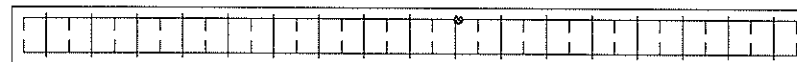
TYPE-NN 0.7Py



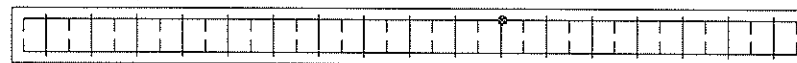
TYPE-NN 0.6Py



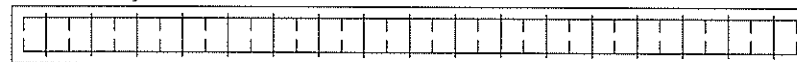
TYPE-NM 0.9Py



TYPE-NM 0.8Py



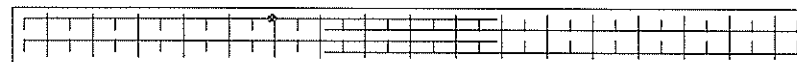
TYPE-NM 0.7Py



TYPE-NM 0.6Py



TYPE-C 0.9Py



TYPE-C 0.8Py



TYPE-C 0.7Py



TYPE-C 0.6Py

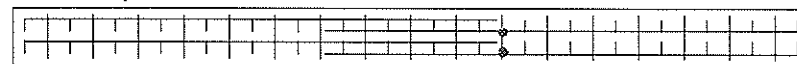


図-15 気中疲労試験による主鉄筋の破断位置（平面図）

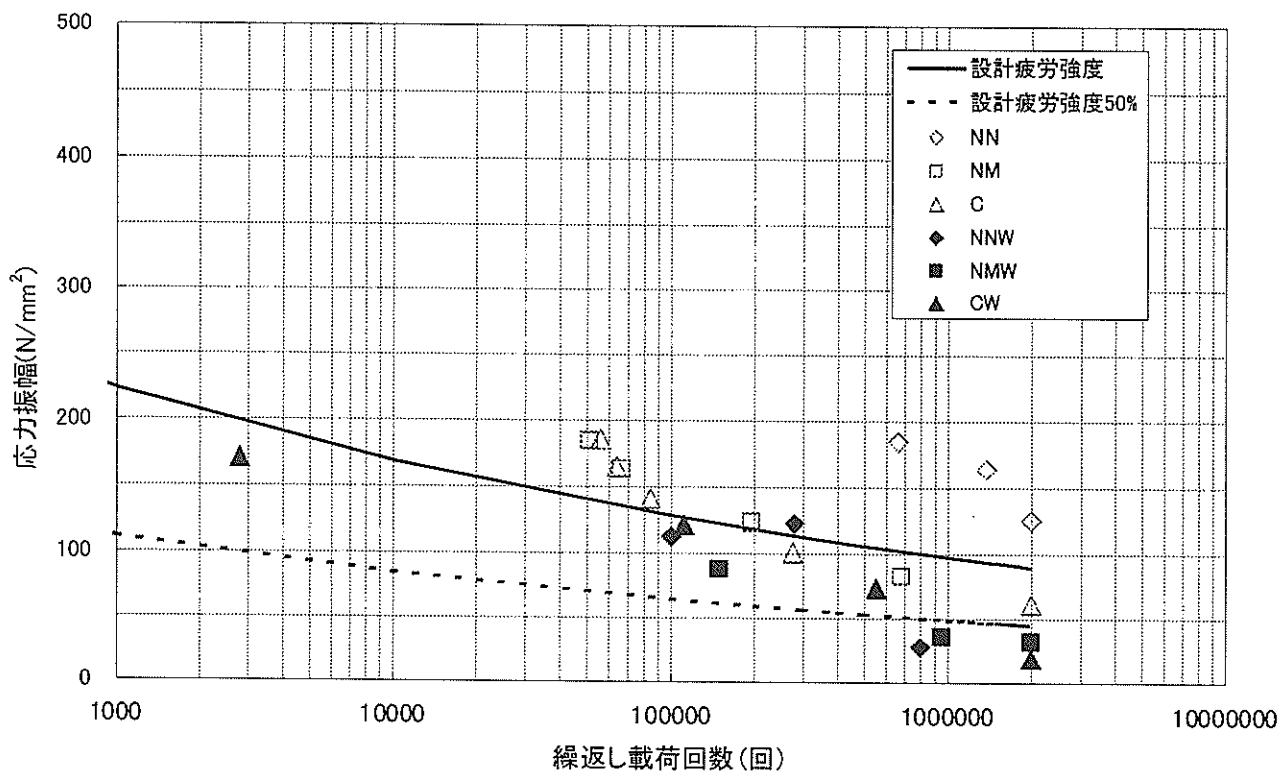


図-16 主鉄筋の応力振幅と破壊時の繰返し载荷回数の関係

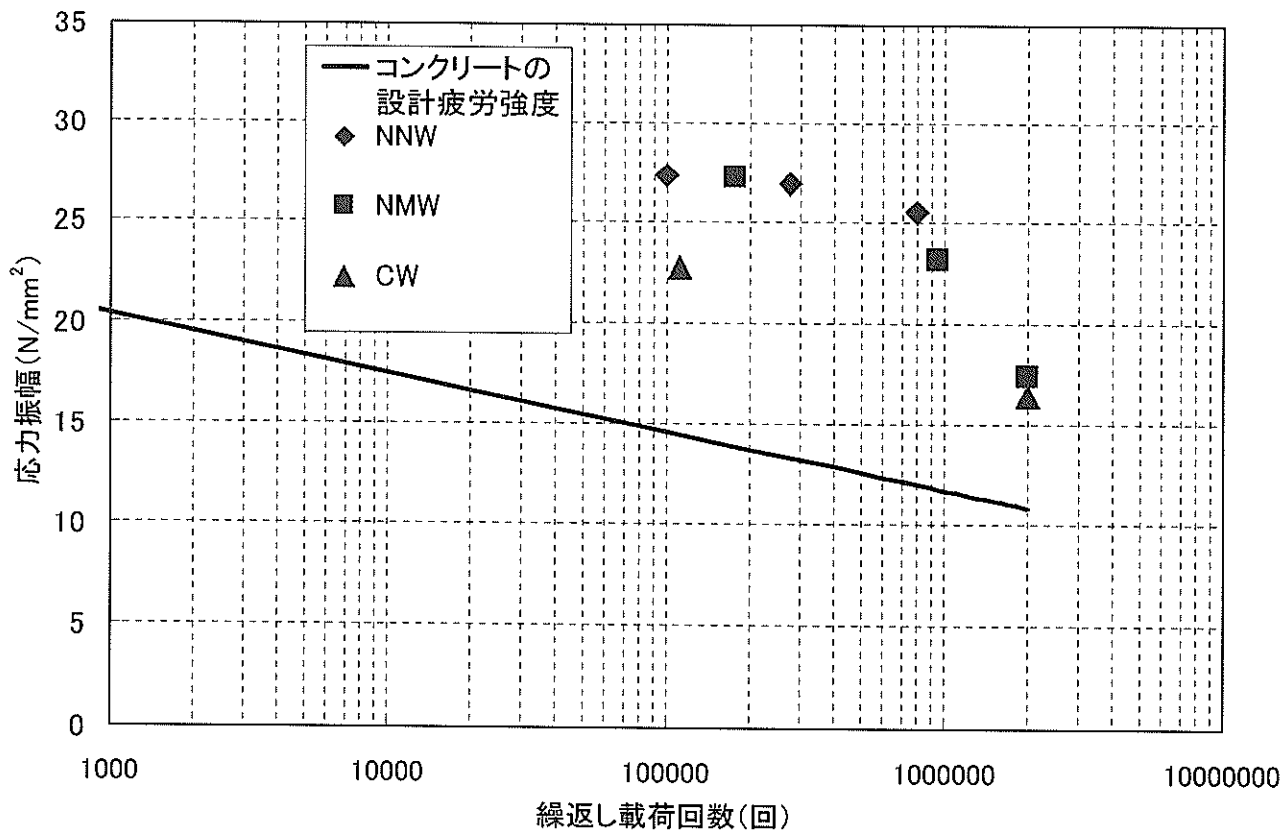


図-17 水中でのコンクリートの応力振幅と破壊時の繰返し载荷回数

荷回数の関係を示す。ひび割れ幅は気中試験の場合、繰返し載荷回数の増加に伴って緩やかに増加したが、水中試験の場合、気中試験に比べるとひび割れの進展が早かった。これは、どの試験体においても同様の傾向を示した。水中試験の場合、試験体のひび割れ面に水が進入することで局所的な水圧が上昇し、ひび割れの開口を早めたものと考えられる。

3.2 たわみ性状

図-9～11に上限荷重 $0.9P_u$ 、 $0.7P_u$ および $0.5P_u$ 時の試験体中央部のたわみと繰返し載荷回数の関係を示す。繰返し載荷回数の増加に伴い、たわみ量も緩やかに増加した。また、TYPE-C が他の試験体と比べるとたわみが大きくなった。

3.3 ひずみ性状

図-12～14に $0.9P_u$ 、 $0.7P_u$ および $0.5P_u$ 時の最大鉄筋ひずみと繰返し載荷回数の関係を示す。鉄筋ひずみは、引張鉄筋に貼り付けてある鉄筋ひずみゲージのうち最大値を示したものを整理したものである。鉄筋ひずみは載荷開始から試験体破壊時までほとんど増加が見られなかった。これは、破壊が急激に生じたことにより破壊直前でひずみが計測しきれなかったためと思われる。気中試験の場合、同一荷重比における試験タイプの違いによる鉄筋ひずみの差はあまり見られなかったが、水中試験の場合は試験タイプの違いによる鉄筋ひずみに差が現れた。

3.4 鉄筋破断位置

図-15に鉄筋の破断状況を示す。試験体のタイプにより破断位置が異なった。TYPE-NN の場合、載荷スパン中央付近の配力鉄筋の交差部とは直接関係のないところで主鉄筋が破断した。TYPE-NM の場合、載荷スパン中央付近の配力鉄筋との溶接部分で主鉄筋が破断した。また、TYPE-C の場合は重ね継手部外側の配力鉄筋との溶接部分で主鉄筋が破断した。これは載荷点付近の主鉄筋量が減少している箇所であり、応力集中などにより継手部よりも大きな鉄筋応力が発生したためと思われる。

3.5 破壊形態

前述のとおり気中試験においては載荷スパン近傍の主鉄筋が破断して試験体が破壊に至ったが、水中試験の場合はコンクリートが圧縮破壊し、試験体が破壊に至った。これは水中の場合、ひび割れの進展が早いことから、コンクリートが負担する圧縮応力が大きくなったためと思われる。

3.6 応力振幅

図-16に主鉄筋の応力振幅と破壊時の繰返し載荷回数の関係を示す。ここで、応力振幅とは、上限荷重時と下限荷重時に計測された鉄筋ひずみの差にヤング係数を乗じた値の $1/2$ と定義した。また、図中の実線はコンクリート標準示方書に従って求めた設計疲労強度を示しており、破線はその 50% の値を示している。気中試験の場合、タイプ NN については、応力振幅が 145N/mm^2 以下の場合には繰返し載荷回数が 200 万回に達しても破壊しなかった。タイプ NM とタイプ C については同程度の疲労強度を示した。気中試験の場合は溶接により疲労強度は低下したが、設計疲労強度 50% 下限値よりも 25% 程度上回っていた。水中試験では一部疲労強度を下回っている結果もあるが、これは鉄筋の破断が生じず、コンクリートが破壊して終局に達したためである。

水中試験の場合では、全てのケースにおいて気中の結果よりも疲労強度が低下していることが確認された。また、気中試験の場合では鉄筋が破断して終局に至るケースがほとんどであったのに対し、水中試験の場合はコンクリートの圧縮破壊で終局に至るケースがほとんどであった。

そこで、水中試験の結果を土木学会のコンクリート標準示方書に従って求めた水中でのコンクリートの設計疲労強度曲線と比較した。図-17にコンクリートの応力振幅と破壊時の繰返し載荷回数の関係を示す。図中の実線はコンクリート標準示方書に示される水中でのコンクリートの設計疲労強度曲線を示す。同図に示すように、全てのケースにおいて設計疲労強度を上回っていることが確認できた。今回の試験結果では、同設計疲労強度曲線を 10N/mm^2 程度上回っている結果となったが、コンクリート標準示方書で示される疲労強度の算定式は多数の圧縮疲労試験の結果のほぼ下限値から規定されたものであることを考えれば、ほぼ妥当な結果を示していると言える。

4. まとめ

ユニット化鉄筋を用いた RC 梁の気中疲労試験および水中疲労試験を行い、次のような結果を得た。

- 1) 鉄筋を溶接することによって RC 梁の疲労強度は大きく低下した。
- 2) 気中試験では鉄筋の破断により試験体が破壊し、水中試験ではコンクリートの圧縮破壊によって試験体が破壊した。

3) 気中試験の結果、溶接ユニット化鉄筋を用いた RC 梁の疲労強度は土木学会コンクリート標準示方書の設計疲労強度 50%下限値よりも 25%程度上回っていた。

4) 水中試験の結果、気中試験と比べるとひび割れの進展が早いことが確認された。

5) 水中試験の結果、コンクリートの疲労強度は、土木学会コンクリート標準示方書の水中でのコンクリートの設計疲労強度を上回っていた。

4) 土木学会：鉄筋継手指針，コンクリート・ライブラリー 第 49 号，1982 年 2 月

5) 西林新蔵ほか：海水中における RC はりの疲労性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14, No.2, 1992 年 pp.279-284

5. あとがき

今回の水中疲労試験で、省力化工法の一つとして取り上げた溶接鉄筋網を配筋したコンクリート部材の力学性能に関する一連の研究が終了し、基本的な性状の解明がなされた。溶接により疲労強度の低下が懸念されたが、鉄筋網単体、およびコンクリートはりに用いた場合の気中および水中での疲労強度は、いずれもコンクリート標準示方書での設計式を上回っていることが確認された。

これまでの研究から、鉄筋を溶接することにより水中、気中に関わらず疲労強度は低下する。また、コンクリートについては水中においては疲労強度が低下が著しい。今回の試験では、気中と水中の場合で RC 梁の破壊形態が異なることになった。しかし、これはコンクリート強度、鉄筋量などによりコンクリート、あるいは鉄筋のどちらが破壊に支配されるかが決まることになる。いずれにせよ、今回の試験結果を見る限りでは現行の設計式を用いて計算したものよりも疲労強度は上回っていることから、溶接ユニット化鉄筋を使用してケーソンなどを製作する場合の疲労設計においても、現行の設計式で十分対応可能であると判断できる。この結果を基に、特に繰り返し荷重の作用が顕著な場合には、疲労破壊に対する十分な検討がなされて、本工法が適用されていくことを期待している。

(2000 年 11 月 15 日受付)

参考文献

- 1) 鈴木雄三ほか：ケーソン製作の省力化施工技術，港湾技研資料，No.903，1998 年 6 月，77p.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編），平成 8 年度版，pp.35-36
- 3) 菅原亮ほか：溶接鉄筋網の溶接方法の相違がコンクリート梁の疲労性状に及ぼす影響，港湾技研資料，No.937，1999 年 6 月，pp.7-9

港湾技研資料 No.983

2001.3

編集兼発行人 国土交通省港湾技術研究所

発行所 国土交通省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 アベイズム株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyright ©(2001)by P.H.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。