

SSS 工法に関する実験的研究(その1)

——垂直継手部の高応力繰返し曲げ耐力性能——

長澤 保 紀
(技術研究所)

内 田 裕 市
(技術研究所)

岡 田 武 二
(技術研究所)

§ 1. まえがき

最近、上下水道地下施設、地下タンクやシールド立坑などの土木構造物本体に、地中連続壁を利用することが検討されている。

その場合、地中連続壁相互間の垂直継手の構造機能として面外方向の曲げ抵抗が必要であり、SSS工法ではせん断補強された鋼製の仕切板および水平鉄筋の重ね継手を採用することにより、一般部分と同等の曲げ耐力を確保することとした。そして、重ね継手の重ね長さについては、前報までの静的耐力実験により所要の長さを明らかにした。

しかし、昭和57年2月に土木学会から鉄筋継手指針が発行され、その中の設計施工基本指針(案)で鉄筋継手の集中度が $1/2$ を超える場合には継手部の許容応力度を継手の種類・施工状態に応じて適宜低減すること、さらに大地震における繰返し載荷状態を想定して、鉄筋継手の高応力繰返し耐力性能を評価する旨を述べている。

そこで、本実験では地中連続壁を本体構造に組込んだ場合における垂直継手部の高応力繰返し曲げ性能について実験的に検討したので、以下にその概要について報告する。

§ 2. 試験体の種類と形状

地中連続壁を本体構造に組込む構造形式としては図-1に示すように、地中連続壁(以下、先打部と略す)の内面に後打ちコンクリート(以下、後打部と略す)を重ね打って一体化させる形式とした。

試験体は、実際の断面厚を数分の1に縮小した矩形の合成断面はりモデルであり、全高60cm×幅40cm(試験区間)×全長480cm(うち、試験区間は280cm)である(図-2)。試験体の種類は表-1に示すとおりであるが、継手を有する試験体として全高に対する先打部高さの比

(以下、合成断面比と略す)を0.4とし、かつ先打部コンクリートを高強度とした試験体4体(HJシリーズ)と、合成断面比0.5で先打部コンクリートが普通強度である試験体4体(NJシリーズ)とした。さらに、合成断面

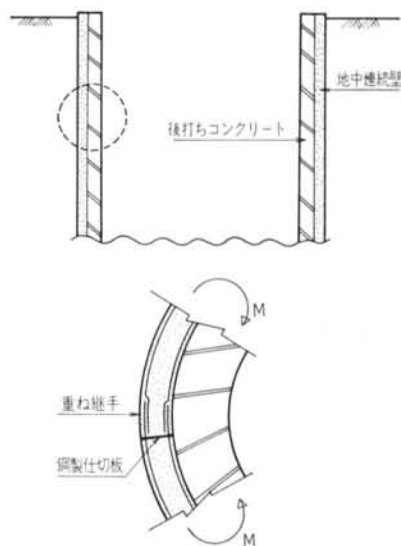


図-1 試験体へのモデル化

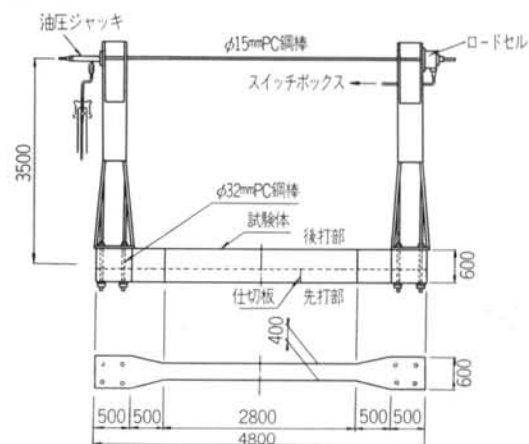
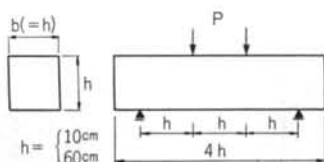
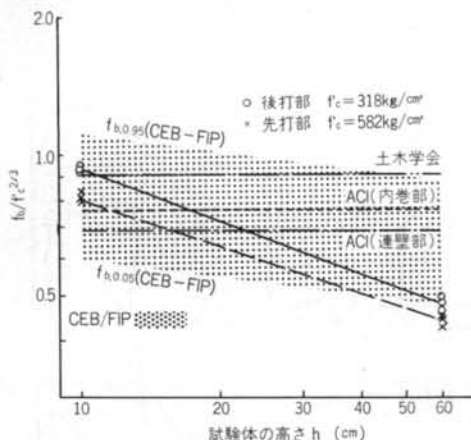


図-2 試験体および曲げ試験装置



図—4 曲げ強度供試体載荷モデル



図—5 曲げ強度試験結果と各国規準

$$f_{b,0.95} = 0.846 f_c^{2/3} \left(0.6 + \frac{1.265}{\sqrt[3]{h}} \right)$$

- ACI コンクリートマニュアル (1981年) 設計式:

$$f_b = 2.0 \sqrt{f_c}$$

- 土木学会限界状態設計法指針(案) (1983年) 設計式:

$$f_b = 0.9 f_c^{2/3}$$

各国の設計式をみても分かるが、曲げ強度の推定に寸法効果を考慮しているものは CEB-FIP のみである。

実験結果では、60cm×60cm×240cm 曲げ供試体の曲げ強度が、10cm×10cm×40cm 曲げ供試体の51～56%に低下する結果を示し、CEB-FIP の寸法効果による低下推定比80%をさらに下回った結果を示している。寸法効果の要因には硬化温度収縮、乾燥収縮、コンクリート内部の欠陥確率の増加などが掲げられており、定式化はかなりむづかしいが何らかの形で寸法効果を考慮することが必要であると考えられる。

4.2 ひびわれ性状

表—3、図—6 に試験体のひびわれ発生状況を示す。

表—3 の目視ひびわれ発生荷重は、引張縁に発生したひびわれが先打部下段鉄筋位置に達するときの曲げモーメントであり、ひびわれ発生荷重計算値は10cm×10cm×40cmの供試体の曲げ強度試験結果に基づいて全断面有効として計算した曲げひびわれ発生モーメントである。ま

	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	曲 げ 強 度 (kgf/cm ²)		寸法効果 $f_{b,60}/f_{b,10}$
			10×10×40	60×60×240	
先 打 部	586	平均 582	33.2	55.5	0.56
	582		42.8	55.8	
	577		44.9	58.5	
後 打 部	310	平均 318	28.3	43.8	0.51
	333		31.8	44.4	
	311		27.4	42.9	

表—2 コンクリート曲げ強度試験結果

た、寸法効果を考慮したひびわれ発生荷重は、表—2 の寸法効果をそれぞれの計算値に乗じた結果である。

これらの結果においても、曲げひびわれ発生モーメントの推定において寸法効果を考慮する必要があることを示している。

ひびわれ伸展状況において、高応力繰返し载荷による変化は見られなかった。すなわち、先打部引張縁に生じたひびわれは、後打部圧縮縁に向ってほぼ真すぐに進展しており、先打部と後打部の打継面で不連続になることはなかった。また、打継面のせん断ずれや重ね継手部の鉄筋に沿う付着割裂ひびわれは観察されなかった。

表—3 に示す平均ひびわれ間隔は、重ね継手部を除く一般部分での実測値であり、計算値は CEB-FIP(1978) の算定式による値である。結果をみると、高応力繰返し载荷によってひびわれ間隔が変化することはなかった。さらに、普通強度の場合 (N シリーズ) は計算値とほぼ一致するが、高強度となった場合 (H シリーズ) は普通強度および計算値よりも多少大きい間隔となった。

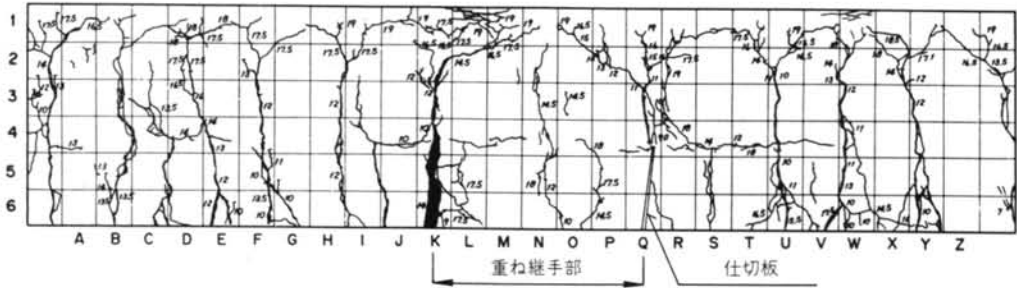
一般に、ひびわれ間隔はコンクリートの引張強度と有効面積に比例し、鉄筋とコンクリートの付着強度と鉄筋の周長に反比例するといわれている。それゆえ本実験結果の場合、高強度化に伴う引張強度の増加割合が付着強度よりも多少大きかったため、平均ひびわれ間隔が大きくなったものと推定される。

CEB-FIP の算定式はコンクリート強度を全く考慮していないため、その点についての今後の検討が必要であると考えられる。

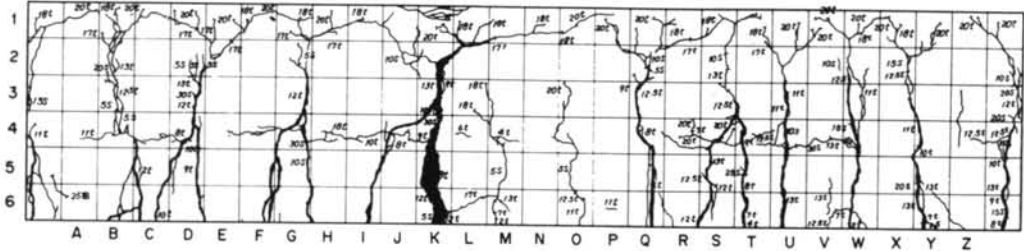
重ね継手部のひびわれの状況をみると、一般部と同様に後打部引張縁にひびわれが発生して圧縮縁方向に進展するが、鉄筋が降伏した後は仕切板位置とオフセット部のひびわれが拡幅・伸展し、重ね継手区間内のひびわれの進展は止まる状況を示した。

初期に拡幅が大きい仕切板位置のひびわれについて、設計曲げモーメント作用時のひびわれ幅を測定した結果 (表—3 参照)、底面ひびわれ幅はいずれの試験体でも、土木学会限界状態設計法指針(案)の腐食環境下の許容ひ

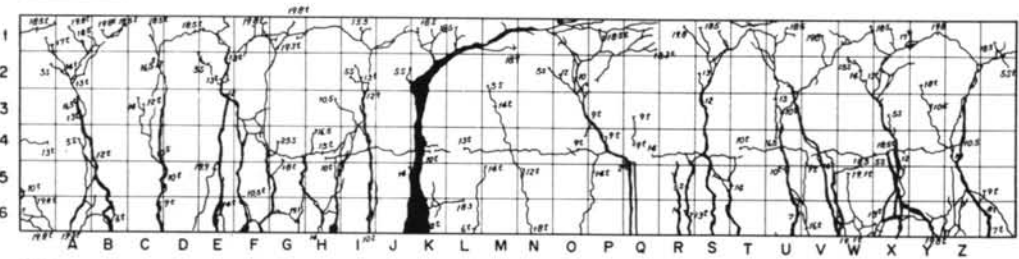
HJS



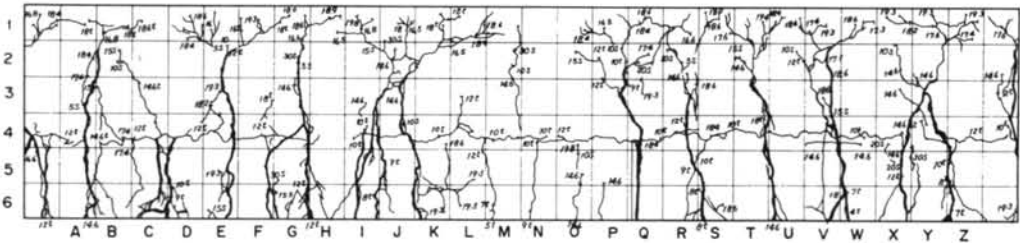
HJ 85



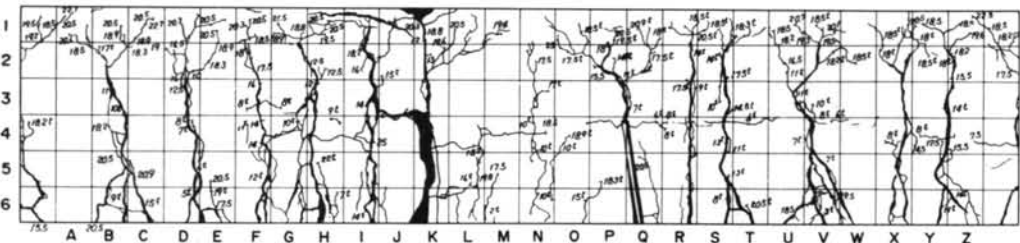
HJ 90



HJ 95



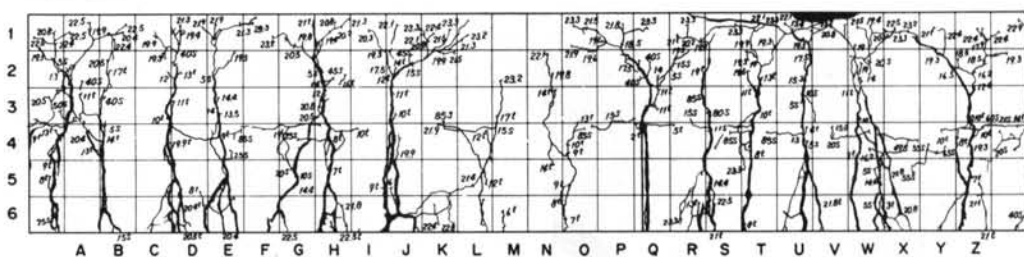
NJS



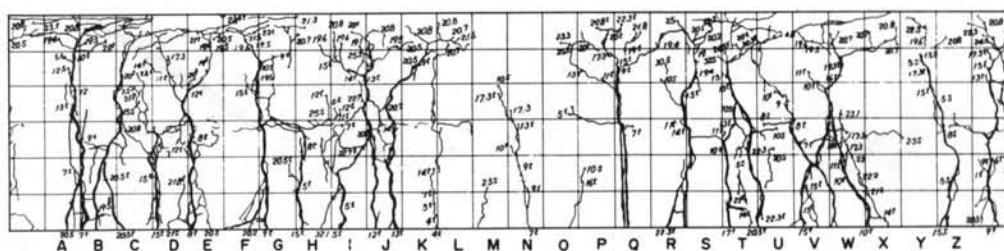
びわれ幅 0.004C (0.17mm)以下の結果を得た。

繰返し载荷におけるひびわれ幅の拡幅と鉄筋応力度の関係は、図-7に示すように繰返し荷重作用によって鉄筋とコンクリートの付着が次第に切れ、かつひびわれが

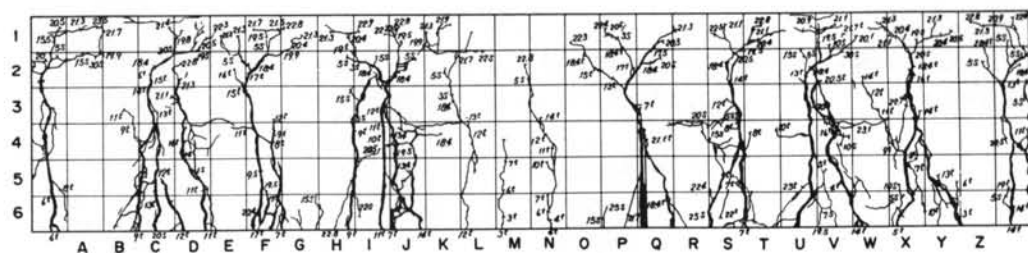
圧縮縁へ伸展するため、ひびわれ幅および鉄筋ひずみが残留する傾向がみられるが、载荷荷重によるひびわれ幅と鉄筋応力度の勾配はGergely-Lutz式とよく一致する挙動を示した。



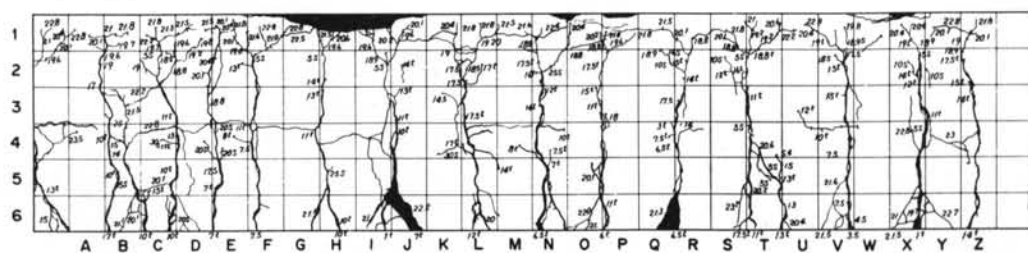
NJ 95



NJ100



NN100

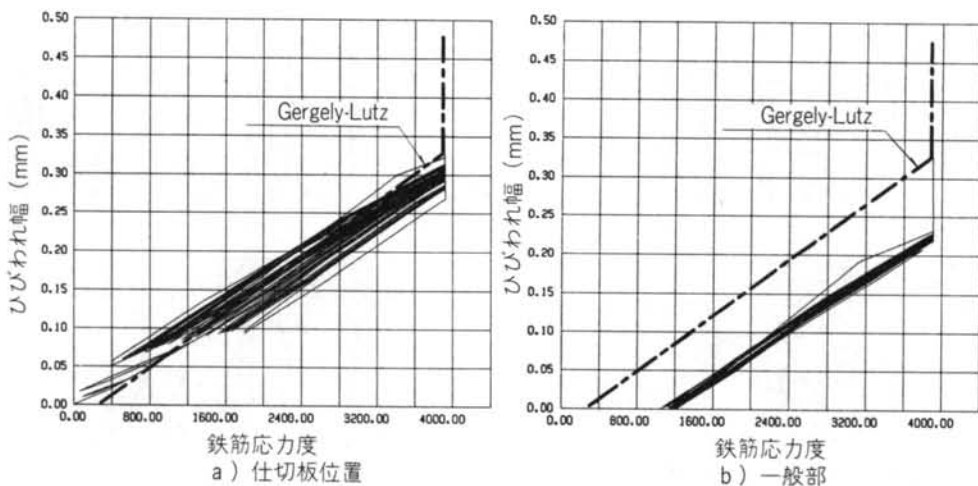


図—6 ひびわれ状況

試験体名称	目視ひびわれ 発 生 荷 重 (tonf・m)	ひびわれ発生 荷重計算値 (tonf・m)	寸法効果を考慮したひ びわれ発生荷重計算値 (tonf・m)	平均ひびわれ間隔(cm)		設計曲げモーメント作用時 仕切板位置ひびわれ幅(mm)	
				実験値	計算値	底 面	鉄筋位置
H J S	10.0	14.1	7.9	23.3	19.0	0.14	0.10
H J 85	7.0			23.9		0.13	0.10
H J 90	7.0			22.7		0.15	0.10
H J 95	7.0			20.7		計測値なし	0.11
N J S	5.0	12.3	6.3	18.5	19.1	計測値なし	0.15
N J 80	6.0			19.0		0.16	0.15
N J 95	5.0			18.0		0.17	0.14
N J 100	6.0			21.9		0.17	0.14
NN100	7.0			20.3		0.10 (注)	0.07 (注)

注) NN100 試験体では仕切板がないので、最大ひびわれ幅測定値を採用した。

表—3 ひびわれ発生荷重・ひびわれ間隔・ひびわれ幅



図一七 ひびわれ幅と鉄筋応力度の関係 (HJ90 試験体の場合)

4.3 耐力性状

試験体は繰返し载荷中に破壊することではなく、すべて先打部の鉄筋が降伏した後に、後打部圧縮縁コンクリートが圧壊する曲げ引張破壊であった。

表一四に、降伏荷重・終局耐力の実測値と計算値を示す。降伏荷重実測値 $M_{y\phi}$ は、曲げモーメント～曲率関係図から求めた部材降伏荷重であり、繰返し载荷による低下はみられない。また、実測値は先打部の鉄筋が上・下段とも降伏に達する上段鉄筋降伏荷重計算値 M_{yucal} とよく一致した結果を得た。

終局耐力については土木学会限界状態設計法指針(案)に基づく終局耐力計算値の1.23～1.26倍の実験結果になっており、終局耐力に対する繰返し载荷ならびに重ね継手の有無による耐力低下はみられなかった。

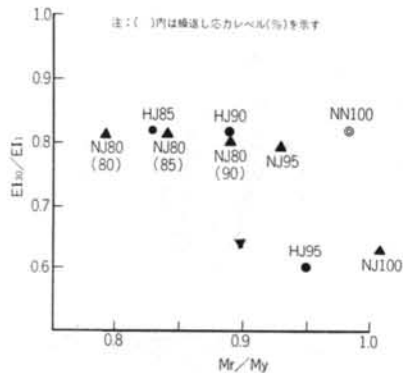
4.4 変形状

表一五にすべての試験体の降伏荷重時の平均曲率(ϕ_y)と終局耐力時の平均曲率(ϕ_u)、ならびに高応力繰返し载荷における1回目と30回目の割線平均曲げ剛性(EI_1 , EI_{30})を示す。

図一八は、高応力繰返し载荷における割線平均曲げ剛性変化率(EI_{30}/EI_1)と高応力繰返し荷重レベル(M_r/M_y)との関係を図示したものである。

同図によれば、重ね継手を有する試験体の(EI_{30}/EI_1)は、先打部の強度に関係なく、繰返し荷重レベル0.79～0.93で79～82%であるが、繰返し荷重レベルが0.95以上となると60～68%に低下する結果を示した。

一方、重ね継手がない NN 100試験体の(EI_{30}/EI_1)は繰返し荷重レベルが0.97で82%となり、重ね継手を有す



図一八 剛性変化率と繰返し荷重レベル

る場合の0.79～0.93の繰返し荷重レベルでの結果と同等の割線平均曲げ剛性変化率を示した。

結果として、いずれの試験体においても土木学会鉄筋継手評価指針(案)4条:高応力繰返し性能に示されている割線剛性変化率85%以上を下回る結果となっている。

図一九は、すべての試験体の曲げモーメントと曲率の関係を図示したものである。図中には、スケール効果によって低減した曲げひびわれ発生モーメントを用いて得た Branson の実験式を示したが、各試験体とも実験結果は Branson 式とほぼ一致した挙動を示している。ただし、重ね継手を有する試験体では、仕切板位置にひびわれを潜在的に有するために初期の平均曲げ剛性が低下した結果となり、初期の勾配は Branson 式よりもゆるやかになっている。

表一五の降伏荷重時の平均曲率をみると、繰返し荷重レベルが0.90以下では HJ シリーズ, NJ シリーズとも動的载荷の試験体と同等の平均曲率であるが、繰返し荷重レベルが0.90以上になると増大する傾向を示し、繰返

試験体 名 称	繰返し荷重実測値 $M_r(\text{tonf}\cdot\text{m})$	$M-\phi$ 曲線から求 めた降伏荷重実測 値 $M_{y\phi}(\text{tonf}\cdot\text{m})$	$M_r/M_{y\phi}$ ($M_r/M_{y\phi \text{ cal}}$)	降伏荷重計算値 ($\text{tonf}\cdot\text{m}$)		終局耐力 実験値 M_{max} ($\text{tonf}\cdot\text{m}$)	終局耐力 計算値 $M_{u \text{ cal}}$ ($\text{tonf}\cdot\text{m}$)
				上 段 $M_{yu \text{ cal}}$	下 段 $M_{yl \text{ cal}}$		
HJS	静的加力	15.5	静的加力	15.5	14.0	19.7	16.0
HJ 85	13.0	15.6	0.83 (0.93)			19.8	
HJ 90	14.0	15.7	0.89 (1.00)			20.0	
HJ 95	14.6	15.4	0.95 (1.04)			20.2以上	
NJS	静的加力	17.0	静的加力	17.8	14.5	22.9	18.4
NJ 80	14.2, 15.2, 16.1	18.0	0.79, 0.84, 0.89 (0.92, 0.98, 1.04)			23.1	
NJ 95	17.2	18.4	0.93 (1.11)			22.7	
NJ100	18.2	18.0	1.01 (1.17)			22.8	
NN100	17.4	17.9	0.97 (1.12)			22.6	

表—4 耐力性状

試験体名称	EI_1 ($\times 10^{10} \text{kgf/cm}^2$)	EI_{30} ($\times 10^{10} \text{kgf/cm}^2$)	EI_{30}/EI_1	ϕ_y ($\times 10^{-6}/\text{cm}$)	ϕ_u ($\times 10^{-6}/\text{cm}$)	曲率の靱性率 ϕ_u/ϕ_y
HJS	静的加力	静的加力	静的加力	52	695	13.4
HJ 85	5.10	4.21	0.82	57	761	13.4
HJ 90	4.25	3.50	0.82	53	769	14.5
HJ 95	3.77	2.29	0.60	87	700以上	8.0以上
NJS	静的加力	静的加力	静的加力	70	970	14.1
NJ 80	4.31	3.50	0.81, 0.82, 0.80	75	850	11.5
NJ 95	2.97	2.36	0.79	85	790	9.3
NJ 100	2.56	1.60	0.63	70~115	650	5.7~9.3
NN 100	2.72	2.23	0.82	95	1200	12.6

EI_1, EI_{30} : 1, 30サイクル目の割線曲げ剛性 ϕ_y, ϕ_u : 降伏荷重時, 終局耐力時の平均曲率

表—5 変形性状

し荷重レベル1.01では50~60%の増大となった。

終局耐力時の平均曲率をみると, HJ シリーズ試験体では静的載荷の場合とほぼ同等の平均曲率を示しているが, NJ シリーズでは繰返し荷重レベルが増すにしたがって平均曲率が小さくなる傾向を示し, 繰返し荷重レベル1.01では静的載荷の場合の約30%減となっている。

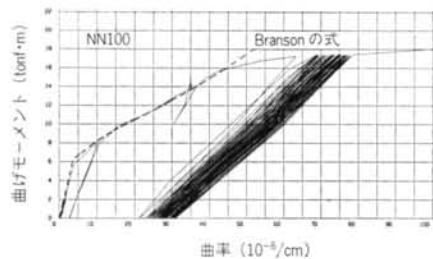
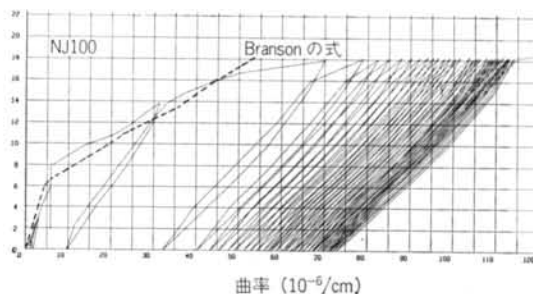
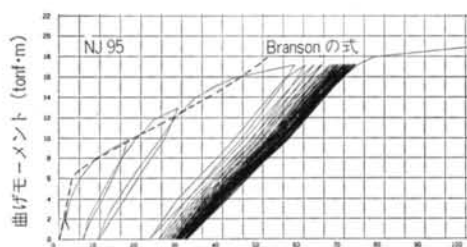
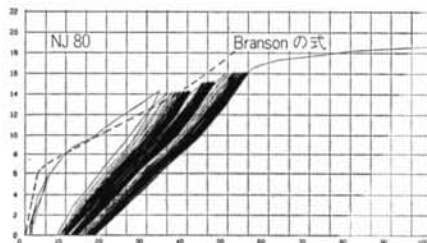
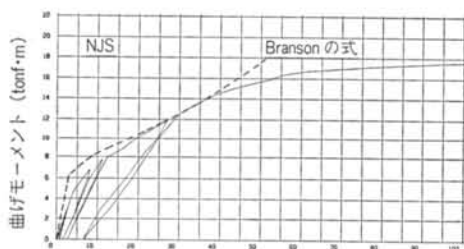
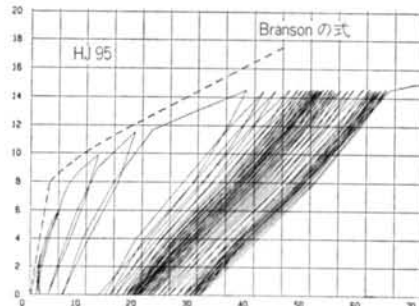
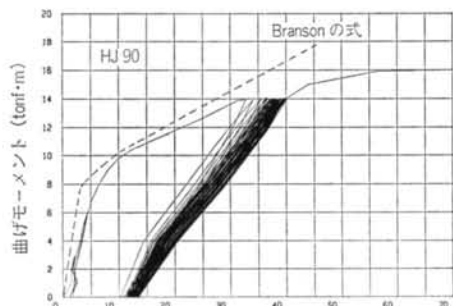
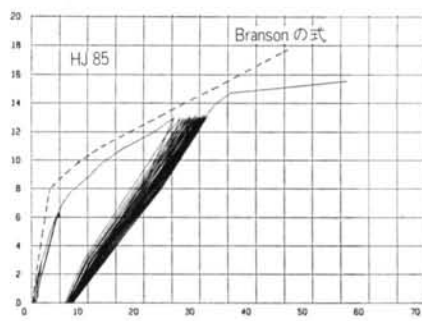
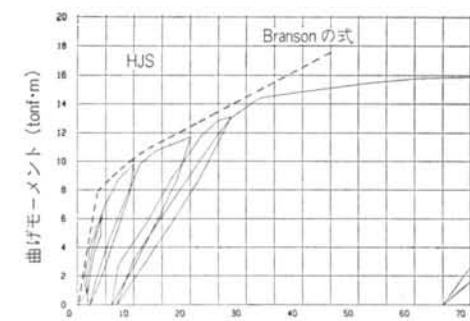
一方, 重ね継手のない試験体 NN 100の終局耐力時の平均曲率は, 重ね継手を有し, かつ静的載荷を行なった試験体 NJS の場合の約1.2倍の結果を得た。

以上の実験結果から, 各試験体の靱性率(ϕ_u/ϕ_y)を単純に算出すると, 繰返し荷重レベル1.01で5.7~9.3に

減少することになる。しかし, 静的載荷の場合の降伏荷重時平均曲率に対する靱性率で表示すると, 繰返し荷重レベル1.01の場合でも9以上の靱性率を有していることとなり, 部材として十分な靱性を有していると考えられる。

§ 5. まとめ

地中連続壁を本体構造に組込んだ場合における垂直継手部の高応力繰返し性能について, 実験的に明らかにな



図—9 曲げモーメントと曲率の関係

った事項をまとめると以下のようである。

1) 試験体はすべて曲げ引張破壊であり、重ね継手鉄筋

に沿う付着割裂ひびわれ発生ならびに打継面のせん断ずれによる重ねばり挙動はまったく観察されなかった。また、降伏荷重での繰返し载荷においても繰返し载荷中に破壊したものはなかった。

2) 重ね継手を有する試験体の荷重ならびに終局耐力は、高応力繰返し载荷によって低下することはなく、重ね継手のないものと同等の耐力を有している。

3) 高応力繰返し荷重作用下での重ね継手を有する試験体の割線曲げ剛性変化率 (EI_{30}/EI_1) は、繰返し荷重が降伏荷重の79~93%の場合には0.8程度であり、降伏荷重の95~100%の荷重で繰返した場合には0.6程度とな

る。一方、継手がない場合でも降伏荷重の97%で繰返すと割線曲げ剛性変化率は0.8程度となり、土木学会の鉄筋継手評価指針(案)で示されている0.85以上の性能をいずれも満足しない。

4)重ね継手を有する試験体の終局耐力時の平均曲率は、高応力繰返し応力レベルが大きくなると小さくなる傾向を示し、降伏荷重レベルで約30%ほど減少となった。一方、降伏時の平均曲率は高応力繰返し応力レベルが0.90以上になると大きくなる傾向を示し、降伏荷重レベルで50~60%増となった。

5)曲げ部材としての靱性については、高応力繰返し応力レベルが大きくなるにつれて小さくなる傾向を示す。

しかし、静的載荷試験体の降伏時の平均曲率に対する靱性率でみると、降伏荷重レベルの高応力繰返し載荷の場合でも9以上の靱性率となり、部材として十分な靱性を有していると判断される。

以上の事項から、本実験で用いた重ね継手は耐力および靱性の観点から十分な曲げ性能を有していると考えられ、土木学会鉄筋継手指針に示されている高応力繰返し耐力性能評価方法を重ね継手に対してもそのまま適用することは実際的でないと考えられる。

最後に、本研究を実施する際にご指導、ご協力をいただいた財電力中央研究所土木技術研究所青柳(征)氏、金津氏、遠藤氏に心からお礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) 土木学会：“コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)”土木学会コンクリートライブラリー 第52号(1983年11月)
- 2) ACI：“ACI Manual of Concrete Practice, Part 3”(1983)
- 3) CEB-FIP：“CEB-FIP Model Code for Concrete”(1978)
- 4) 町田・陸好：“鉄筋継手の性能が鉄筋コンクリート部材の静的曲げ挙動に及ぼす影響に関する研究”コンクリート工学 Vol. 21, No. 4 (1983年4月)
- 5) 榎本・二羽・岡村：“重ね継手の集中度がRC梁の疲労強度に及ぼす影響”第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集(1982年)
- 6) 太田・森田・和田：“重ね継手(D51)における離れの影響について”土木学会第35回年次学術講演会講演概要集(1980年)
- 7) 土木学会：“鉄筋継手指針”土木学会コンクリートライブラリー 第49号(1982年2月)
- 8) 金津・青柳(征)・遠藤・塩尻・青柳(栄)：“連続地中壁の本体構造物への適用に関する検討—重ね継手を有する鉄筋コンクリート合成断面部材の曲げ耐力・変形性状—”電力中央研究所報告, 研究報告384003(1984年8月)
- 9) 遠藤・青柳(征)・金津・内田：“重ね継手を有する合成断面はりの曲げ特性”第6回コンクリート工学年次講演会講演論文集(1984年6月)
- 10) 長澤・内田・岡田：“重ね継手の高応力繰返し曲げ特性”第6回コンクリート工学年次講演会講演論文集(1984年6月)

