

[96] 重ね継手を有する合成断面はりの曲げ特性

正会員 ○遠藤 達巳 (電力中央研究所)
 正会員 青柳 征夫 (電力中央研究所)
 正会員 金津 努 (電力中央研究所)
 正会員 内田 裕市 (清水建設研究所)

1. ま え が き

LNG地下タンク、送変電施設をはじめとする地下構造物の施工において仮設構造物として使用されている連続地中壁（以下連壁）を本体構造として用いる場合、円周方向の曲げ耐力を確保する観点から、連壁の各エレメント間に鉄筋重ね継手を設けなければならない。その際、水平継手を有する連壁、さらにはこの連壁と本体壁の合成断面の変形および耐力を適切に評価し、設計に反映させる必要がある。単体の連壁に関しては、継手長さをある程度確保すれば、継手のないものとほぼ同等の性能が得られることを確認している。

本研究は、重ね継手を有する連壁部はりと後打ち部はりを合成したはりの曲げ変形、ひびわれおよび破壊性状を明らかにし、合成断面における重ね継手の存在の影響ならびに連壁に加わる先行圧縮応力を模擬した軸力の影響を明らかにすることを目的として実施したものである。さらに、合成断面はりにおける高応力繰り返しの影響を明らかにすべく、はり部材の曲げ実験を実施し、その結果について考察を加えたものである。また、重ね継手のような弱点を有するRC部材へのFEM解析手法の適用性についても検討を加えた。

2. 実験概要

2.1 コンクリートおよび鉄筋：粗骨材の最大寸法25mm、水セメント比55%、単位セメント量357kg/m³のコンクリートを用いた。試験時の物性の平均値は先打ち連壁部で圧縮強度340kg/cm²、引張強度28.3kg/cm²、および弾性係数24.4×10⁴kg/cm²、後打ち本体部でそれぞれ287kg/cm²、25.7kg/cm²、22.2×10⁴kg/cm²であった。主鉄筋はSD30D13で降伏点は3900kg/cm²であった。

2.2 試験体の製作：泥水中でのコンクリートと鉄筋の付着状態に近づけるため、鉄筋を組立後ベントナイト液に浸した後コンクリートを打設した。

実験に供した試験体は、40×30cmの断面を合成させた、断面40(幅)×60cm(高さ)、試験区間280cmのはりである。鉄筋重ね継手は図-1に示すように、重ね継手長さを45D(D：鉄筋径)とし、継手先端部で折り曲げ、継手部分の鉄筋が平行となるように配置し、連壁の打ち継ぎを模擬できるように仕切鉄板を設けている。先打ち部のコンクリートが材令9日に達した後、表面をチップングしたのち後打ち部のコンクリートを打ち継いだ。

2.3 試験体の種類：試験体は全部で6体で、各試験体の諸元および載荷方法は表-1に示した。パラメタとして、重ね継手の有無、連壁部分での先行軸圧縮力の有無、単調載荷と高応力繰り返し載

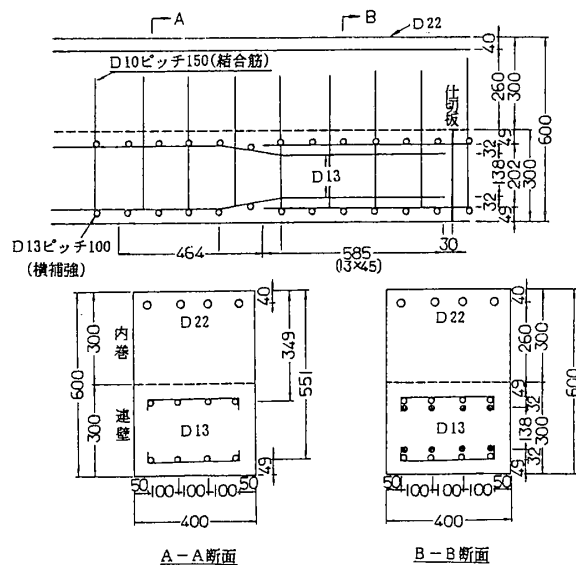


図-1 試験体配筋図 (単位:mm)

表-1 試験体の種類

試験体番号	単調	加力計画				重ね継手		先行軸圧縮力 kg/cm ²
		繰り返し応力レベル*				有	無	
No. 1	○					○		0
No. 2	○					○		5.0
No. 3		○	○	○		○		0
No. 4				○		○		0
No. 5					○	○		0
No. 6				○		○		0

註) 繰り返し応力レベル：降伏荷重に対する比率

荷の相違および繰り返し応力レベルを変化させた。目標繰り返し応力レベルは部材降伏荷重の85,95,および100%の3段階として85%の試験体については、その後に90および95%繰り返し載荷を行なった。

2.4 載荷方法：試験体の両端部に試験体軸と垂直にH型鋼を剛結し、その先端部に荷重を加えることによりはりの試験区間に一様な曲げモーメントを作用させた。¹⁾ 繰り返し試験体 (No.3~No.6) については各応力レベルで30回繰り返し載荷を行なった。No.2はりの先行軸力は、試験中一定に保持した。

3. 合成断面はりとしての重ね継手の影響

3.1 破壊性状：継手を有する単体はりでは、重ね継手の付着破壊による割裂破壊が主要な破壊原因であったが、本実験の合成断面はりにおいては、そのような脆性的な破壊は起きなかった。No.1はりにおいてのみ、コンクリートの圧壊後、引張鉄筋（継手端部）が切断したものの、他の試験体については通常の曲げ引張破壊に至った。これは、継手の形式と継手長さが適切であったこと、ならびに後打ち部のはりを合成したことによるものと考えられる。

表-2に各試験体の降伏および終局荷重を示した。軸力を与えない各試験体の降伏及び終局耐力がほとんど同じであり、継手が耐力に及ぼす影響は全くないものと思われる。また、軸力を与えたNo.2の試験体も含めて、すべての試験体において、単体はりとして計算した降伏荷重とも比較的良く一致しており、合成はりとしての一体性も確保できていると考えられる。ただし、ここでの降伏荷重はモーメント・曲率関係より求めたものである。

3.2 ひびわれ性状：図-2に終局時の各試験体のひびわれ性状を示した。本実験では、はりの端部を圧着し、各断面での相対ずれを起しにくい載荷法を採用していることもあるが、打ち継ぎ部におけるずれせん断ひびわれはいずれの試験体についてもほとんど入っておらず、純曲げに対しては一体性は確保できていると考えられる。

ひびわれの分散性に関しては、継手の有無によって相違が見られた。継手を有する試験体においては、仕切鉄板部と継手端部の間はひびわれ本数が他の部分に比して少なく、かつ間隔が大きい傾向にあった。これは、継手部分の鉄筋量が大きく剛性が高いこと、仕切鉄板部が潜在的なひびわれであること、ならびに継手端部に応力が集中することに起因すると考えられる。この継手部以外の一般部については、継手の

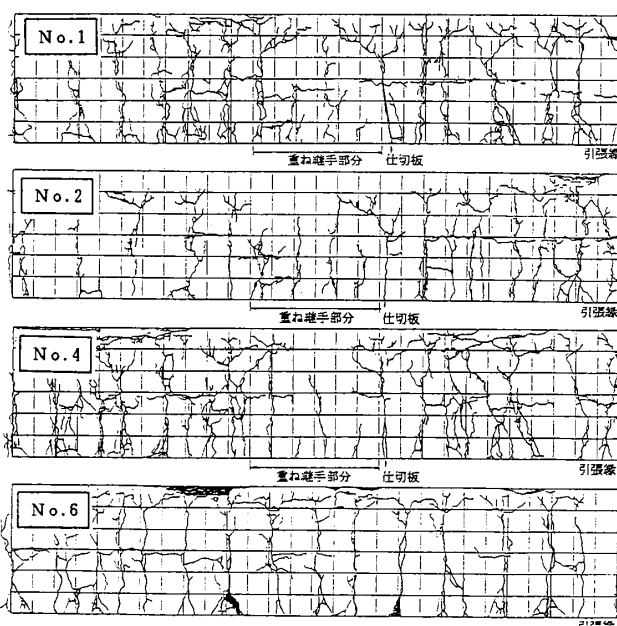


図-2 ひびわれ図

表-2 実験結果一覧

試験体 番号	実際の 高応力繰り返し 応力レベル(%)	最大荷重 (ton-m)	降伏荷重 (ton-m)	$E I_1$ (10^9kgcm^2)	$E I_{30}$ (10^9kgcm^2)	$\frac{E I_{30}}{E I_1}$	降伏時 曲率 (μ/cm)	終局時 曲率 (μ/cm)	靱性率
No. 1	単調載荷	22.9	17.0	—	—	—	70	990	14.1
No. 2	単調載荷	44.7	42.5	—	—	—	120	500	4.2
No. 3	79, 84, 89	23.1	18.0	4.31	3.50	0.81	75	850	11.5
No. 4	93	22.7	18.4	2.97	2.36	0.79	85	790	9.3
No. 5	101	22.8	18.0	2.56	1.60	0.63	70~115	650	5.7~9.3
No. 6	97	22.6	17.9	2.72	2.23	0.82	95	1200	11.5

註) $E I_1$ 、 $E I_{30}$ ；1, 30サイクル目の割線剛性

無い試験体 (No.6) と間隔はほぼ等しく、継手の影響は認められなかった。また、ひびわれははりの高さ方向に連続性を有しており、合成断面としての一体壁として機能していると考えられる。

3.3 変形性能：図-3に代表的なモーメントー平均曲率関係を示す。継手の存在による影響は、初期の剛性低下という形で現れている。これは、仕切鉄板が潜在的なひびわれであること、また初期ひびわれ荷重が小さかったことに起因すると思われる。継手区間の局部曲率は明らかに小さく、一般部と不連続になっている。これはその両端部の仕切鉄板部と継手端部でこれを吸収しているため考えられる。図に Branson の提案式³⁾により求めた曲線を示したが、No.6は良く一致しており、また継手のある試験体についても初期剛性を除いてほぼ一致している。以上のことから、局部的には継手部の剛性が小さいものの全体の平均剛性に関しては、断面合成および継手の存在の影響は構造全体としては無視して差支えないものと思われる。また、塑性変形能の指標として、表-2に降伏時、終局時曲率および靱性率を示した。No.4とNo.6は継手の有無以外の条件は同じであり、両者を比較すると、降伏時曲率はほとんど変わらないのに対し、終局時の曲率は3割程度No.4が低くなっており、それに伴い靱性率も小さくなっている。ただし、いずれの値も十分に大きく、靱性に関しては問題はないと考えられる。

4. 高応力繰返しによる合成断面はりの曲げ特性

4.1 破壊性状：繰返し応力レベルとしては、降伏荷重の85,95,100%および単調載荷の4種類である。表-2に示す様に応力レベルおよび繰返しの有無によって降伏および終局耐力は全く変化せず、また継手の無い試験体についても同様の結果を得た。耐力的には高応力繰返しの影響は無いといえる。

4.2 変形性能：図-3にモーメントー平均曲率関係を示した。高応力繰返しによる残留曲率を勘案するまでもなく、各応力レベルにおけるスケルトンカーブはほぼ一致している。このことは降伏以後についても同様に言えることである。しかし、塑性変形は応力レベルによる影響が見られた。図-4に塑性変形能の応力レベルの関係を示した。応力レベルが高い程塑性変形能は小さくなるが、靱性率の値としては最低でも6程度は確保されている。

重ね継手の高応力繰返しの評価法としては、「鉄筋継手評価指針(案)」²⁾に定められている方法がある。これは、載荷1回目と30回目の割線剛性の比 ($E_{I_{30}}/E_{I_1}$) を判定の基準とするものである。表-2にこの剛性低下率と応力レベルの関係を示したが、応力レベルが95%以上の場合に、大きく値が

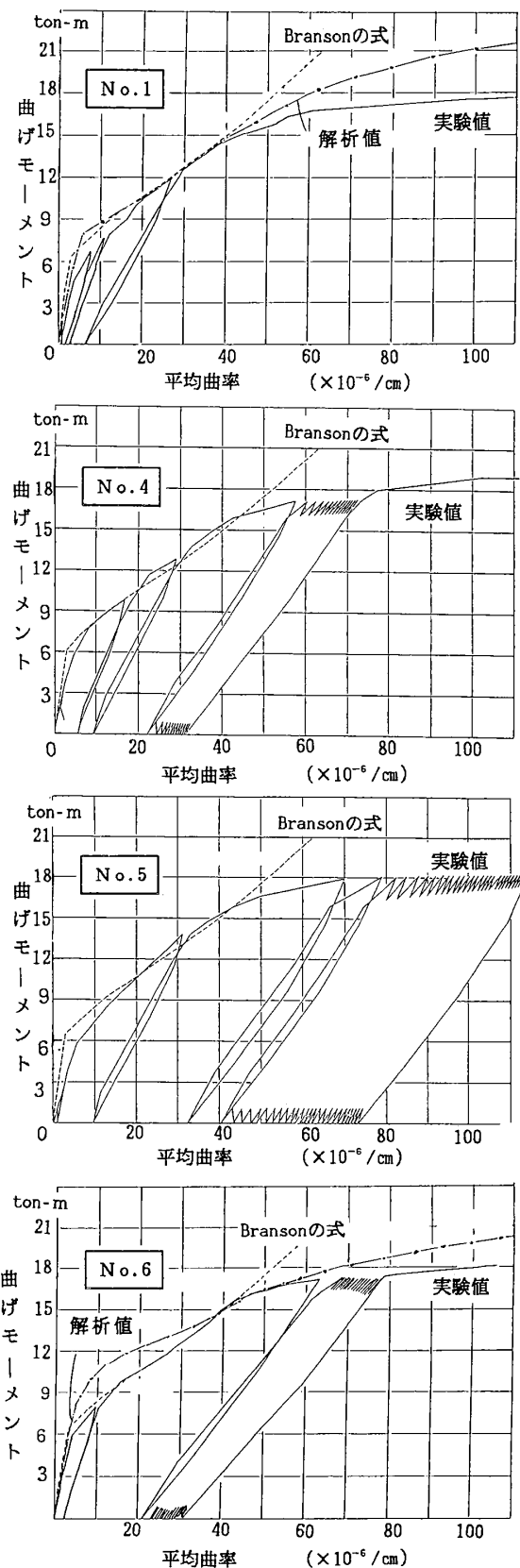


図-3 モーメント・曲率関係

低下することが認められた。また、継手の有無によってはほとんど変化せず、応力レベルが95%の時両者とも剛性低下率は80%前後であった。

5. 実験結果の数値シミュレーション

5.1 解析概要：ひびわれを Smeared Crack としてモデル化したFEM解析で、重ね継手部は、鉄筋とコンクリートの付着を両引試験の結果をシミュレーションすることによって物性を定めた付着要素を用いることにより、また仕切鉄板部は軸方向に引張剛性を有さない要素を用いることによりモデル化した。今回の解析においては、単調荷重とし、解析ケースとしては継手の有無（ケース1、ケース2）の2ケースについて行なった。

5.2 解析結果：図-3にモーメントー平均曲率関係の解析結果を併記したが、初期ひびわれ荷重の差により若干解析値の剛性が高くなっているが、解析値はほぼ実測値を良好に追従しているといえる。破壊モードは、鉄筋がひずみ硬化域に入った後、コンクリートの圧壊による破壊を示しており、降伏及び終局荷重についても表-3に示す様に実測値と解析値がほぼ一致している。また、解析データに基づき重ね継手部の付着要素の破壊の有無について調べた結果、付着領域が残存しており、重ね継手の健全性を表現できているといえる。解析によって得られたひびわれパターンを図-5に示したが、ケース2では、初期に仕切鉄板部でひびわれが発生した後、継手端部にひびわれが集中してゆき、その間の重ね継手部ではひびわれが少なくなっている。また、その部分の曲率も小さ目であった。これらのことは、実験で得られたひびわれ性状と定性的に良く一致しており、仕切鉄板部や鉄筋の不連続部などの弱点にひびわれが集中する問題へのFEM解析の適用の可能性が確かめられたといえよう。

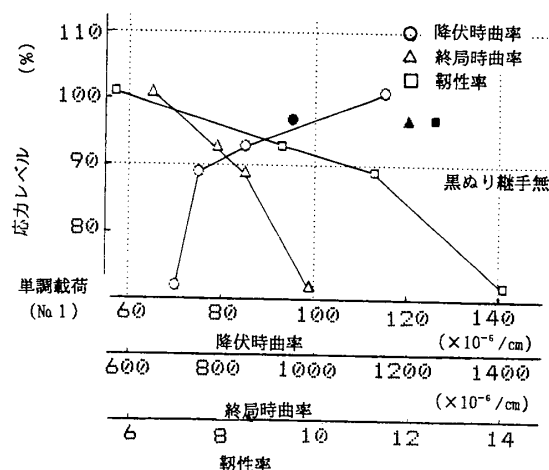


図-4 繰り返し応力レベルと塑性変形能の関係

表-3 実験結果と解析結果の比較

試験体 番号	最大荷重 (ton-m)		中段鉄筋降伏荷重 (ton-m)					
			仕切鉄板部		継手端部		一般部	
	実験	解析	実験	解析	実験	解析	実験	解析
CASE-1	22.9	23.0	15.8	15.0	17.2	18.0	16.8-19.6	16.0-21.0
CASE-2	22.6	23.0	—	—	—	—	17.2-21.4	16.0-21.0

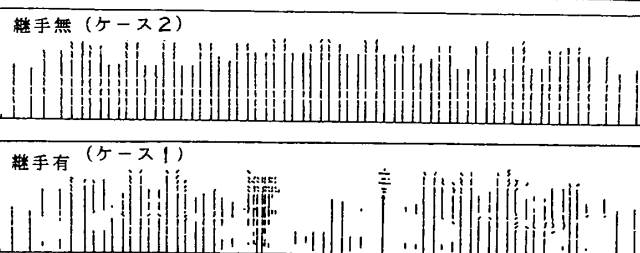


図-5 ひびわれパターン解析結果

6. まとめ

連壁と本体壁の合成壁の曲げ性状を模擬した鉄筋継手を有する合成断面はりの曲げ実験、およびこの部材のFEM解析を行なった結果、次の結論が得られた。

- 1) 本実験で用いた重ね継手方式では、割裂破壊は起さず、耐力的にも継手の無い試験体と同等であった。
- 2) 曲げひびわれは、仕切鉄板部および継手端部に集中する傾向にあった。
- 3) 変形能については、重ね継手の存在による顕著な相違は認められず、塑性変形能については若干の劣化は認められたものの、十分な靱性を保有していた。
- 4) 高応力繰り返しにおいては、応力レベルが高くなるにつれて、塑性変形能が小さくなるが、耐力は単調荷重と同等であり、靱性も単体はりに比べて、特に劣ることはなかった。
- 5) 降伏荷重の95%において30回の繰り返し荷重を行なった結果、初回荷重時に対する剛性残存率は0.8程度であった。
- 6) FEM解析を適用することによって、弱点となる仕切鉄板部および重ね継手部が存在する試験体の曲げ挙動のシミュレーションが可能であることが確かめられた。

＜参考文献＞ 1) 遠藤・塩尻他：連続地中壁継手部曲げ特性に関する研究、第5回J.C.I. 年次講演会論文集、1983年6月 2) 土木学会：「鉄筋継手評価指針(案)」、1982年2月 3) A C I Committee 435: Deflection of Reinforced Concrete Flexural Members, Journal of A C I, June 1966