

地中壁と後打ち壁からなる合成壁の設計法に関する研究（その3）

——設計条件を考慮した合成壁の面外曲げせん断実験——

古 屋 則 之 津 田 和 明 菊 地 利 武
小 畠 克 朗 武 田 寿 一

Study of Design Method on RC-RC Composite Walls Made of Underground Diaphragm Walls and Inner Walls (Part 3)

——Experimental Studies Assuming Structural Design Conditions of Composite Walls——

Noriyuki Furuya Kazuaki Tsuda Toshitake Kikuchi
Yoshiro Kobatake Toshikazu Takeda

Abstract

The authors confirmed by tests reported in a previous paper¹⁾ that the structural behavior of a composite wall with the joint surface washed by water jet is equal to that of a monolithic wall. This report describes the experimental studies on the structural behavior of a composite wall separated partially at the joint surface due to drying shrinkage and other factors, and the influence on the composite wall of previous stresses sustained in trenching.

As a result, it was found that the structural behavior of a partially jointed composite wall is equal to that of a completely jointed composite wall so long as slippage does not occur at the joint surface, and previous stresses have no influence on ultimate strength.

概 要

前報では、地中壁に後打ち壁を打継いで構成される合成壁は、打継ぎ面全面をウォータージェットで洗浄処理するだけで一体打ちの壁と同等の面外方向構造性能を発揮することを確認した。この報告では、コンクリートの乾燥収縮やその他の要因によって打継ぎ面で肌分れが生じた場合を想定し、部分的に接合した合成壁の面外方向構造性能についての実験的な検討と、根切り時に山止め壁として地中壁に発生した応力（先行応力）が合成壁構築後の面外方向構造性能に及ぼす影響の有無についての実験的な検討を行なった。実験結果から、(1) 部分的に接合された合成壁であっても、接合領域に配慮し、接合面ですべらないようなせん断設計がなされれば、全面を接合したものと同等の構造性能を有すること、(2) 先行応力のある合成壁の終局強度は、先行応力のない合成壁と同等であることなどが判明した。

1. 序

この研究は、仮設山止め壁として用いられる地中連続壁（以下、地中壁と称す）を土圧・水圧と地震時水平力を負担する地下外壁として利用することを目的として、地中壁の内面に後打ち壁を打継いで構築する合成壁を対象とし、その設計方法を検討するために実施しているものである。

前報（その1）¹⁾では、地中壁全面をウォータージェットで洗浄処理して後打ち壁を打継いだ合成壁は一体打ちの壁と同等の面外方向構造性能を有することを報告した。

本報告は、合成壁の面外方向構造性能に対して設計上懸念される二つの点について実験的に検討した結果を述べたものである。実験の一つは、打継ぎ面での肌分れの影響を調べるためのものであり、他の一つは、合成壁構築前の根切り時に地中壁に作用する応力（以下、先行応力と称す）の影響を調べるためのものである。それぞれの実験内容については2章と3章で述べる。

2. 部分的に接合した合成壁の面外曲げせん断実験

この実験は、打継ぎ面全面をウォータージェットで洗

浄処理してコンクリートを打継いだ合成壁が、コンクリートの乾燥収縮やその他の要因によって打継ぎ面の一部で肌分れを生じた場合を想定し、部分的に接合した合成壁を用いて接合領域の大きさが面外方向構造性能に及ぼす影響について把握するために実施したものである。

2.1. 試験体

図一は、階高の高い地下外壁を合成壁で試設計し、打継ぎ面全面のうち、後打ち壁との一体化を特に考慮した接合面（以下、接合面と称す）を意図的に設けた場合をイメージしたものである。図は、接合面の大きさを打継ぎ面の1/4とし、これを曲げモーメントの最大位置や反曲点位置に分散し、設けたものである。

試験体は試設計断面の1/4程度の矩形のはり型断面で計画し、打継ぎ全面積に対する接合面積の割合（接合面積比）を実験パラメーターとした。

試験体断面は図一に示すように、一体壁と考えた場合に曲げ破壊が先行すると考えられる断面と、せん断破壊が先行すると考えられる断面（以下、前者を曲げ設計型、後者をせん断設計型と称す）の2種類とした。壁幅はいずれも80cmとし、壁厚は曲げ設計型が地中壁、後打ち壁部分ともに20cm、せん断設計型が同30cmである。断面の配筋は、地中壁と後打ち壁それぞれに2段ずつ、計4段とし、合成壁としての最外端の軸方向鉄筋のみを考慮した引張鉄筋比は曲げ設計型が0.17%、せん断設計型が0.46%である。

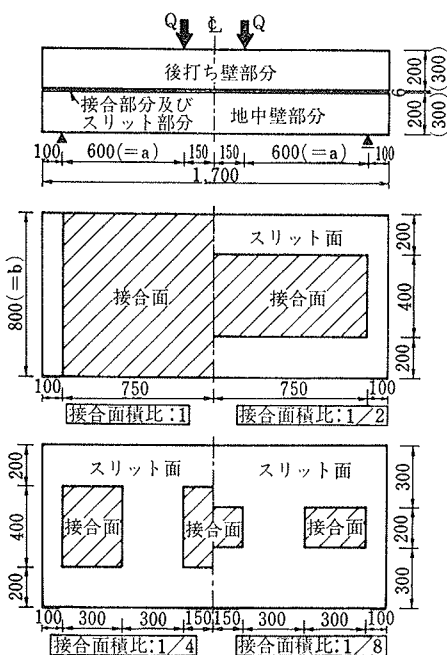
接合面積比としては、図一3に示すようにせん断スパン内の地中壁打継ぎ面積に対する比が1（全面接合）、1/2、1/4、1/8となる4タイプを設定した。実構造物では打継ぎ面全面が打継がれるが、試験体では設定した接合面と、加力による純曲げ区間だけを打継いで接合し、それ以外は肌分れ面を模擬するために6mmのスリットを設けた。

試験体の種類を表一に示す。曲げ設計型の場合は、接合面積比ごとに1体ずつ、せん断設計型の場合は、接合面積比が1と1/2が各1本と1/4が2体、の合計8体である。このうち、せん断設計型で接合面積比が1/2の試験体には接合面に対して0.21%の接合鉄筋（D13）を、また、接合面積比が1/4の試験体2体のうちの1体には0.85%の接合鉄筋（同）を配筋した。

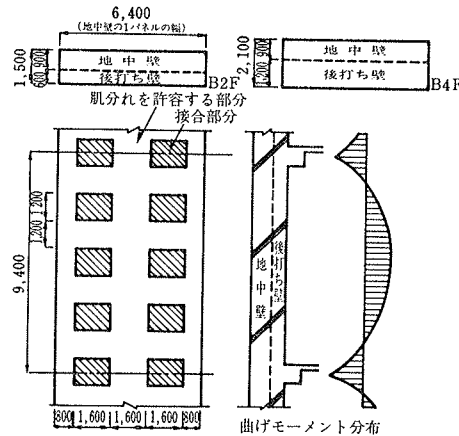
コンクリートと鉄筋の材料定数を表二に示す。

2.2. 製作方法

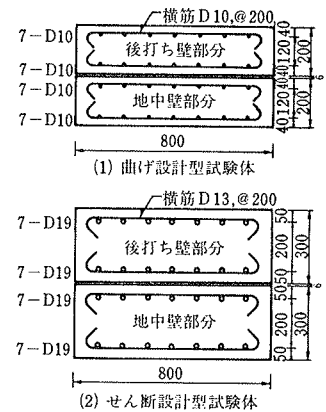
地中壁部分は、接合面が実際の地中壁面を模擬するように、型枠上に砂利、土を敷き、上から泥水を散布して砂利や土の表面に泥膜を形成させた状態でコンクリートを打設して製作した。コンクリートの硬化後には、接合



図一3 加力方法および接合面の形状



図一1 実物接合部の想定



図一2 試験体断面

試験体名称	設計形式	接合面		
		幅 (b=80cm)	長さ (a=60cm)	接合鉄筋 (%)
B1-0	曲げ	b	a	0
B2-0		b/2	a/2	
B4-0		b/4	a/2	
B8-0		b/4	a/2	
S1-0	せん断	b	a	0
S2-2		b	a	0.21
S4-9		b/2	a/2	0.85
S4-0		b/2	a/2	0

表一 試験体の種類

対象部位	圧縮強度 Fc (kg/cm ²)	割裂強度 Ft (kg/cm ²)
地中壁部分	338	28.4
後打ち壁部分	304	26.7

(1)コンクリート

呼び径	弾性係数 Es (10 ⁶ kg/cm ²)	降伏強度 σy (kg/cm ²)
D10	1.93	3830
D13	1.93	3630
D19	1.97	3610

*値は公称断面積を用いて求めたものである
(2)鉄筋

表二 材料試験結果

面の脆弱な部分を落とすために、水圧 150 kg/cm² のウォータージェットで洗淨処理を行なった。後打ち壁部分のコンクリート打設の際には、接合面が鉛直となるように設置して行なった。

2.3. 実験方法

実験は、試験体を単純ばり形式で支持して、図-3に示すように中央の2点から加力することとし、加力による曲げモーメント分布が、図-1の曲げモーメントの反曲点区間の分布に近似するようにした。荷重の加え方は後打ち壁部分からの押し加力による一方向の漸増繰返し载荷である。

2.4. 実験結果および検討

図-4に荷重(せん断力)とスパン中央のたわみとの関係を包絡線で示す。

2.4.1. 破壊性状 曲げ設計型のうち、全面接合および1/4接合の試験体は実験終了まで接合面は健全であり前者は一体化された壁として、後者は接合部分のみで一体化された二枚の壁として、それぞれ圧縮側コンクリートに圧壊を伴って曲げ破壊した。1/2接合および1/8接合試験体は、引張最外端軸方向鉄筋の曲げ降伏後に接合面がすべって荷重が低下した。

せん断設計型の場合は、いずれも曲げ降伏の後に、全面接合および1/2接合試験体は一体化された壁としてせん断破壊し、1/4接合の2本のうち、接合鉄筋を配筋したものは地中壁部分と後打ち壁部分とでせん断破壊し、配筋しなかったものは接合面ですべり破壊して荷重が低下した。

2.4.2. 諸荷重 図-5~8に、実験で得られた諸荷重について実験値どうしの比較、あるいは既往の計算式を用いて一体壁として求めた計算値との比較を示す。

(1) 曲げひびわれ荷重 実験値は、地中壁部分の純曲げ区間における引張最外縁から曲げひびわれが発生した時の値である。接合面積比が小さくなるにつれて強度が低下しており、これは、合成壁としての一体性が減少するにつれて部材としての曲げ剛性が低下し、

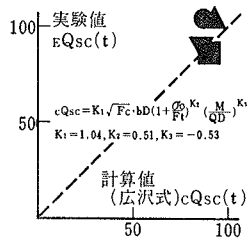


図-7 せん断ひびわれ荷重

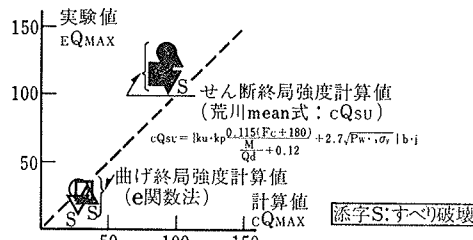


図-8 最大荷重

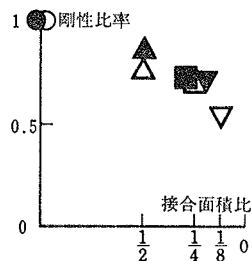


図-5 曲げひびわれ荷重

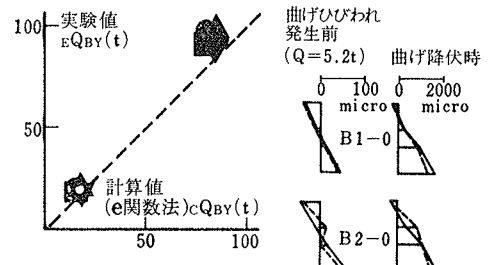


図-6 曲げ降伏荷重

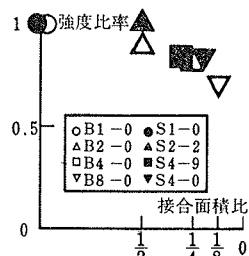
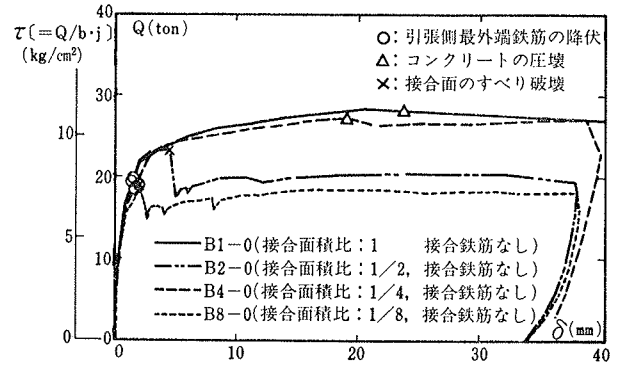


図-9 初期剛性

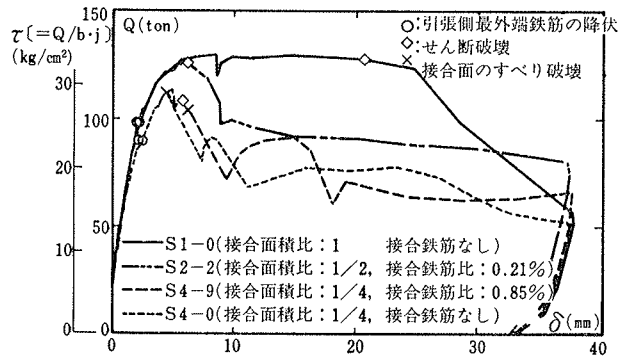
強度が低下したものと考えられる。

(2) 曲げ降伏荷重 曲げ降伏時にはいずれの試験体も接合面は健全であり、実験値どうしの差は小さく、接合面積比の違いが曲げ降伏荷重に及ぼす影響は小さかった。また実験値はいずれも計算値²⁾より若干高かった。

(3) せん断ひびわれ荷重 せん断ひびわれはせん断



(1) 曲げ設計型試験体



(2) せん断設計型試験体

図-4 荷重～たわみ関係

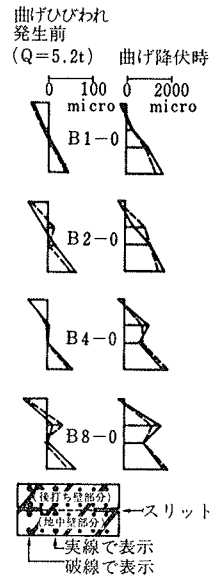


図-10 加力点直下の断面内ひびきみ分布

設計型試験体のみで発生した。せん断ひびわれは、材軸方向の全長にわたって接合されている場合 (S1-0 と S2-2) は曲げ降伏後に後打ち壁部分から地中壁部分にかけて発生したものであり、また、材軸に沿って途中にスリットが入っている場合 (S4-9 と S4-0) は曲げ降伏前に後打ち壁部分に発生したものである。実験値には発生時期や発生部位に違いはあるものの、強度的な差は小さく、また、計算値³⁾に対する比率も0.96~1.14であり、一体と仮定した計算結果とほとんど変わらなかった。

(4) 終局荷重 終局荷重は、破壊によって荷重が低下した時の値である。破壊の種類としては、曲げ破壊、せん断破壊、接合面でのすべり破壊がある。

曲げ破壊したのは、曲げ設計型で全面接合の B1-0 と 1/4 接合の B4-0 である。前者に対する後者の強度比率は0.95、計算値²⁾に対する実験値の比率は前者が0.98、後者が0.93である。接合面積比が異なっても、接合面が健全である限りは曲げ終局強度に大きな差はなく、一体と仮定した計算値ともよく一致するといえよう。

せん断破壊したのは、せん断設計型で全面接合の S1-0、1/2 接合の S2-2、1/4 接合の S4-9 の3体である。前者に対する後の二者の強度比率は、0.97、0.87であり、接合面積比が小さい程、強度が低下しているが、低下の割合はさほど大きくなかった。また、計算値⁴⁾に対する強度比率は、順に1.44、1.40、1.25であり、一体と仮定して求めた計算値は控え目の結果となった。

すべり破壊したのは、曲げ設計型で1/2 接合の B2-0 と 1/8 接合の B8-0、およびせん断設計型で1/4 接合の S4-0 の3体であり、いずれも曲げ降伏後であった。それぞれの全面接合試験体に対する強度比率は、順に0.81、0.64、0.86である。また、計算値 (曲げ設計型の場合は曲げ終局強度計算値²⁾、せん断設計型の場合はせん断終局強度計算値⁴⁾)に対する比率は、順に0.73、0.58、1.24であり、曲げ設計型の場合は一体壁と仮定した計算値に達していないが、せん断設計型の場合は同等以上であった。なお、せん断破壊した S4-9 とすべり破壊した S4-0 は、接合鉄筋の有無の違いがあり、破壊型式は異なったが、終局強度の差はほとんどなかった。

2.4.3. 変位性状 図-9に初期剛性実験値(荷重/スパン中央のたわみ) どうしの比較を、図-10に曲げ設計型試験体の加力点直下の断面内ひずみ分布を示す。

初期剛性は接合面積比が小さくなるにつれて低くなった。これは、曲げひびわれ発生前の断面内ひずみ分布に示されているように、接合面積比が小さいほど二枚の壁が単独で挙動する重ね壁的な性状が強くなるためと考えられる。

断面内ひずみ分布は、曲げ降伏時においても接合面積比が小さいほど重ね壁的な性状を示しているが、初期の荷重レベルを除く変位性状は、荷重〜たわみ関係にみられるように接合面積比の違いによる差は顕著ではなく、特に、接合面が健全であった曲げ設計型で接合面積比が1/4 や、せん断設計型で同1/2の試験体の場合は、最大荷重時まで全面接合の場合とほとんど同じであった。

3. 地中壁部分に先行応力が存在する合成壁の面外曲げせん断実験

この実験は、根切り時に側圧などによって地中壁に生じる先行応力が、その後構築される合成壁の面外方向構造性能に対してどのような影響を及ぼすかを検討するために実施したものである。

3.1. 試験体

試験体は、図-11に示すように幅が50 cm、厚さが地中壁部分、後打ち壁部分ともに30 cmの矩形のはり型断面で、地中壁部分についての曲げ補強筋比が0.51%の場合と2.4%の場合(以下、前者を曲げ型、後者をせん断型と称す)の2種類の断面で計画した。

実験パラメーターは、①地中壁部分の先行応力の有無、②先行応力度レベル、③先行応力時の荷重(以下、先行荷重と称す)および合成壁構築後の荷重(以下、後行荷重と称す)による曲げモーメント方向の組合せとし、曲げ型については①、③の組合せによる3体、せん断型については①、②の組合せによる3体とした。試験体の種類を表-3に示す。

先行荷重の与え方としては、曲げ型の場合には引張側の軸方向鉄筋応力度 σ_t が $2,500 \text{ kg/cm}^2$ (これは、SD30に対する長期許容応力度の1.25倍)に相当する曲げモーメント($M = a_t \cdot \sigma_t \cdot j$)を作用させ、せん断型の場合には、コンクリートのせん断応力度 τ が 6.9 kg/cm^2 と 13.9 kg/cm^2 (これは $F_c = 240 \text{ kg/cm}^2$ の地中壁コンクリートの長期許容せん断応力度の1.25倍と2.5倍)に相当するせん断力($Q = \tau \cdot b \cdot j$)を作用させることとした。

曲げモーメントの符号は、合成壁とした時に曲げに対して地中壁側が引張側となる方向を正、逆を負として、先行荷重時と後行荷重時の曲げモーメントの組合せ方としては、曲げ型の場合には地中壁断面にとって厳しい条件となる〔正+正〕と〔負+負〕の組合せとし、せん断型の場合には、せん断力が最も大きくなる外周より上下の区間の曲げモーメント方向に合わせて〔正+正〕の組合せのみとした。

コンクリートと鉄筋の材料定数を表-4に示す。

3.2. 製作および実験方法

地中壁部分の打継ぎ面は、2章の試験体の接合面と同

様の方法で施工，処理した。

先行荷重は，試験体の材軸方向を水平とし，打継ぎ面を鉛直にして，図-12に示す後打ち壁のうちの加力点あるいは反力点部分をあらかじめ製作した後に，そのままの状態で作荷した。載荷は油圧ジャッキを用いて行ない，曲げ型の場合は中央集中荷重で，せん断型の場合は等分布荷重に近似した荷重で加え，後行荷重を載荷するまでは荷重を一定に保持した。

後打ち壁部分のコンクリート打設は，先行荷重を載荷してから3週間後に行なった。

後行荷重の載荷は，後打ち壁を打設してから5~8週間後に行ない，これで試験体を破壊させた。荷重の加え方は一方向の漸増繰り返し載荷である。

3.3. 実験結果と検討

3.3.1. 破壊性状 先行荷重時には全試験体に曲げひびわれが生じ， $\tau = 13.9 \text{ kg/cm}^2$ の先行応力を与えたS2試験体には曲げせん断ひびわれも生じた。その後，後打ち壁部分のコンクリート打設までの間に，これらのひびわれがやや伸びたもの

の，新たなひびわれは発生しなかった。たわみは，この間にクリープによって全試験体とも約1.5倍に増大したが，後打ち壁コンクリート打設後はたわみの増大はほとんどなかった。

後行荷重によって，曲げ型試験体は，合成壁としての引張最外端軸方向鉄筋が曲げ降伏後，圧縮側コンクリートに曲げ圧壊の徴候が現われた頃に前後してせん断ひび

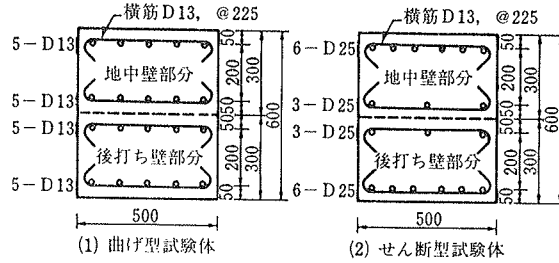


図-11 試験体断面

試験体種別	曲げ型		せん断型	
	なし	有り	なし	有り
先行応力の有無とそのレベル (kg/cm ²)	なし	あり	なし	あり
先行曲げモーメントの有無とその組合せ	なし	$\sigma_t = 2500$	なし	$\tau = 6.9$ $\tau = 13.9$
なし	B0	---	S0	---
有り	正+正	---	BP	S1 S2
	負+負	---	BN	---

表-3 試験体の種類

対象部位	圧縮強度 F_c (kg/cm ²)	割裂強度 F_t (kg/cm ²)	
B O B P B N	地中壁	375	29.2
	加・反力点	339	26.1
	後打ち壁	307	26.9
S 0 S 1 S 2	地中壁	313	27.5
	反力点	298	26.3
	後打ち壁	297	25.4

(1) コンクリート

呼び径	弾性係数 E_s (10^6 kg/cm^2)	降伏強度 σ_y (kg/cm ²)
D 13	1.87	3510
D 25	1.96	3360

*値は公称断面積を用いて求めたものである
(2) 鉄筋

表-4 材料試験結果

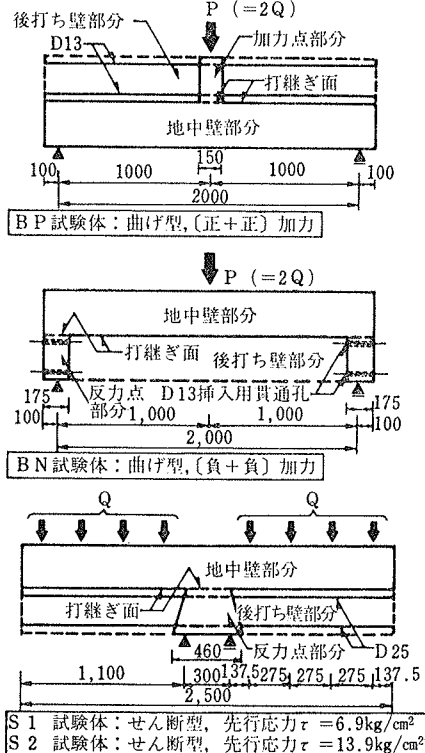
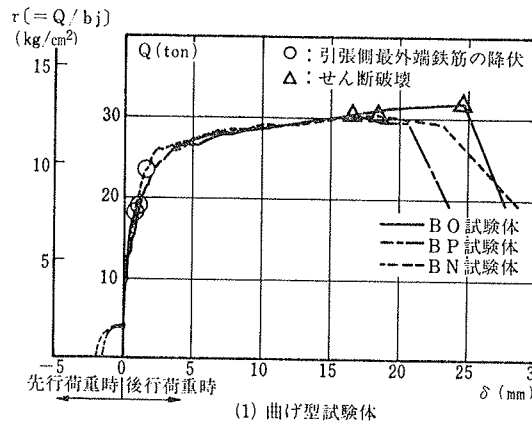
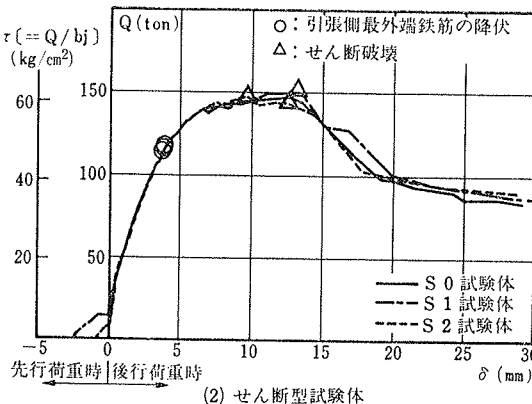


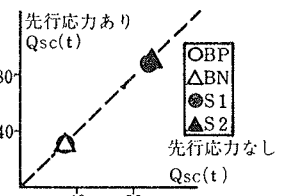
図-12 加力方法



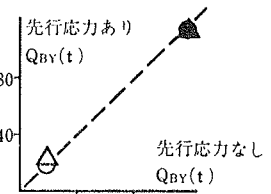
(1) 曲げ型試験体



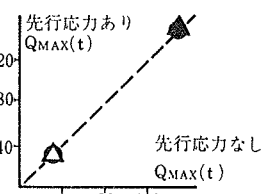
(2) せん断型試験体



(1) せん断ひびわれ荷重



(2) 曲げ降伏荷重



(3) 最大荷重

図-14 先行応力の有無による諸荷重の比較

われが地中壁部分から後打ち壁部分にかけて発生し、それが拡大してせん断破壊した。せん断型試験体は、曲げ降伏前にせん断初ひびわれが発生し、曲げ降伏後にせん断破壊した。曲げ型、せん断型ともに、先行応力の有無によって破壊性状には違いは認められなかった。

3.3.2. 変位性状 図-13に荷重と試験体中央のたわみとの関係を包絡線で示す。荷重は先行荷重と後行荷重との和で表わし、たわみは、後行荷重の載荷開始時点を実原点として描いた。後行荷重時の初期の剛性には、曲げモーメントの組合せ方向によって違いが生じ、〔負+負〕加力の場合は先行応力のない場合とほとんど変わらず、〔正+正〕加力の場合は先行応力によってひびわれが生じている地中壁部分が曲げに対して引張側にくるために低下する傾向にあったが、その後の変位性状は、荷重～たわみ関係にみられるように先行応力の有無にかかわらず顕著な差が現われなかった。

3.3.3. 諸荷重およびひずみ性状 図-14にせん断ひびわれ発生時および曲げ降伏時の荷重と最大荷重を、先行応力のない試験体の値と比較して示す。曲げ型で〔負+負〕加力試験体の曲げ降伏荷重が先行応力のない試験体の24%増となったが、それ以外は先行応力の有無とそのレベルによる違いはほとんどみられなかった。これは、ひびわれ発生や鉄筋降伏後の応力再配分によって先行応力の有無の差が顕著には現われなくなるためと考えられる。

図-15は、曲げ型試験体の軸方向鉄筋のひずみ分布を示したものである。同図の計算値は、コンクリートの応力～ひずみ関係を ϵ 関数法²⁾で表わし、断面内のひずみ分布を先行荷重と後行荷重時のそれぞれのひずみの重ね合わせにより求めたものである。〔負+負〕加力の曲げ降伏荷重が高いのは、実験結果や計算結果に現われているように、地中壁の引張側軸方向鉄筋が先行応力により曲げ降伏時にも大きな引張応力状態にあり、この鉄筋の応力負担によるものである。

4. まとめ

(1) 乾燥収縮や他の要因によって打継ぎ面で肌分れした場合を想定した合成壁の面外曲げせん断実験では、曲げ破壊が先行する断面の場合は接合面積比が1/4でも、また、せん断破壊が先行する断面の場合は同1/2でも、最大強度時には接合面は健全であり、全面接合の場合と同等の構造性能を示すことが確認された。せん断破壊時の部材のせん断応力度は30 kg/cm²強であった。ただし、接合面積比がこれ以上の場合でも接合面がすべり破壊し

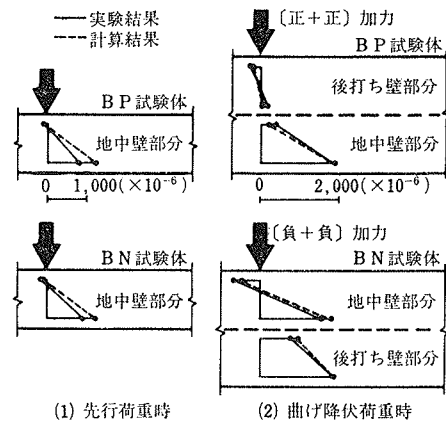


図-15 軸方向鉄筋のひずみ分布

たものがあり、接合面積比とすべり破壊との関係は明確ではないが、全面接合でなくても、接合領域に配慮し、接合面でのすべり破壊を防止するようなせん断設計が行なわれれば、全面接合と同等の面外方向構造性能を有する合成壁として設計できることが分かった。

(2) 根切り時を想定して、地中壁部分にひびわれを伴う先行曲げ・せん断応力を作用させたまま、後打ち壁を打継いだ合成壁の面外曲げせん断実験では、部材の構造性能に対して先行応力は顕著な影響を及ぼさないことが確認され、終局強度的には先行応力の影響を無視した合成壁の設計が可能であることが分かった。

謝 辞

この研究は、東京電力(株)の委託により、東電設計(株)と共同で実施したものであり、関係各位の御協力、御助言に対し、深く感謝致します。

参考文献

- 1) 古屋, 小島, 武田: 地中壁と後打ち壁からなる合成壁の設計法に関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 34, (1986), pp. 92~98
- 2) 梅村: 鋼筋コンクリート梁の塑性変形及び終局強度, 日本建築学会論文報告集, 第42号, (昭和26.2), pp. 59~70
- 3) 広沢: 鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究(その41, せん断ひびわれ発生荷重について), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和51.10), pp. 1425~1426
- 4) 荒川: 鉄筋コンクリートばりの許容せん断応力度とせん断補強について, コンクリートジャーナル, Vol. 8, No. 7, (July 1970), pp. 11~20