

鋼板コンクリート構造に関する研究 (その2)

隔壁方式による壁定着部の軸引張実験

津田 和明

江戸 宏彰

秋山 和則

田内 健二

(原子力本部技術部)

(同左)

Studies on Steel Plate Reinforced Concrete Wall (Part2)

Axial Pulling Tests of Anchor System for Shear Walls with Partitioning Web Walls

Kazuaki Tsuda

Hiroaki Eto

Kazunori Akiyama

Kenji Tanouchi

Abstract

Steel plate reinforced concrete has higher ductility and allows a shorter construction period than reinforced concrete. To apply the steel reinforced concrete for the shear walls, the anchor system to the base slab constructed with reinforced concrete should be necessary. So, an anchor system with the joint bars and partitioning web walls has been developed. With this system, concrete around the joint bars at the leg portion of the shear walls is confined by the partitioning web walls to avoid bond splitting failure. This report describes axial pulling tests on this anchor system. These tests showed that the bond splitting strength of the single layer and the double layers joint bars could be evaluated with the past evaluation equations, and the failure mode of this anchor system could be controlled.

概要

鋼板コンクリート構造は、鉄筋コンクリート造に比べ靱性能の確保が容易であり、かつ工期短縮が可能な優れた構造形式である。この鋼板コンクリート構造を耐震壁に適用する場合には、鉄筋コンクリート造である基礎への定着システムを開発する必要がある。筆者らは、隔壁を用いた差し筋方式の定着工法を考案した。本工法では、鋼板コンクリート部の表面鋼板の負担する引張力をコンクリートと差し筋との付着により、差し筋を介して基礎に伝達する。この付着力を確保し、付着割裂破壊を回避するため、耐震壁脚部に表面鋼板と直交して隔壁を設けている。本報告は、この定着システムのコンクリートと差し筋との付着特性を把握し、付着割裂強度評価式の誘導を主な目的として行った軸引張実験に関してまとめたものである。実験の結果、差し筋が一段または二段配筋の場合の付着割裂強度は既往の算定式を用いた評価手法で評価可能であり、この定着システムの破壊モードをコントロールできることが確認できた。

1. はじめに

鋼板コンクリート (SC) 構造は、鉄筋コンクリート (RC) 構造に比べ靱性能を容易に確保でき、さらに工期短縮が可能な優れた構造形式である。SC 構造は、2枚の表面鋼板間にコンクリートを打ち込み、鋼板とコンクリートの一体性をスタッドによって確保している。このSC構造の基本的なせん断特性は、平板の純せん断実験によって確認しており、せん断応力度～せん断ひずみ度関係の評価手法を考案し、所報 No.50¹⁾で報告した。

このSC構造による耐震壁を建物に適用するに当たって、RC造の基礎への定着が問題となる。電力共通研究「原子力発電所建屋の鋼板コンクリート構造に関する研究」(以下、電力共通研究と称す)^{2), 3)}において対象とした定着工法を Fig. 1 に示す。考案された定着工法は、

鋼板をそのまま基礎に埋め込む鋼板埋め込み方式、鋼板の負担する力をアンカーボルトを介して直接的に基礎へ伝達するアンカーボルト方式、及び鋼板の負担する力を鋼板内部のコンクリートと差し筋の付着力に期待して差し筋を介し、基礎へ伝達する差し筋方式の三つの方式である。この差し筋方式では、コンクリートと差し筋の付着力を確保するために、表面鋼板間の差し筋定着領域全域にタイバーを設置しており、コンクリートと差し筋の付着割裂強度評価式が提案されている^{2), 3)}。これら三つの方式の内、鋼板埋め込み方式は基礎の鉄筋と鋼板の干渉回避が困難であり、アンカーボルト方式は鋼板脚部に厚いプレートとこのプレートの剛性確保のためのリブプレートを必要とすることから、溶接量が多くやや施工性に難点がある。これらに比べ、差し筋方式は鋼板コンクリート部にタイバーを必要とするものの、基礎と鋼板コ

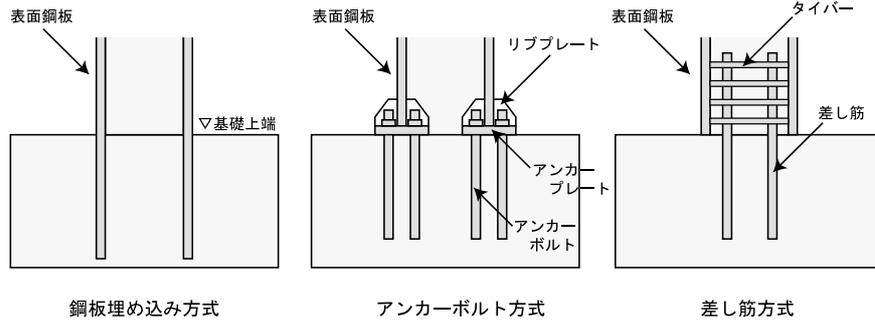


Fig. 1 SC構造の定着工法
Anchor System of SC Walls

Table 1 試験体諸元と材料強度
Specimens and Materials Strength

試験体	断面 (B×D)	ℓ _p	差し筋		隔壁		材料試験結果						
			段数	本数	pw (%)	ℓ _w (mm)	表面鋼板		隔壁鋼板		差し筋		
							t _s (mm)	y (N/mm ²)	t _w (mm)	y (N/mm ²)		y (N/mm ²)	
予備実験	0S-30/9-70	800 × 700	1	6	0.91	700	34.9	5.90	380	5.90	380	531	
	0S-30/5-35				0.45	350		5.90	380	5.90	380		
	0S-40/3-35				0.32	350		5.60	390	5.60	390		
	0S-30/5-38				0.52	380		6.27	384	6.27	384		
本実験	0S-30/5-51	800 × 900	2	12	0.49	513	37.7	6.27	384	4.33	430	529	
	0S-30/5-72				0.49	722		6.18	387	3.08	291		
	1S-30/7-38				8	0.73		380	8.80	381	8.80		381
	2S-30/8-38				10	0.80		380	9.64	338	9.64		338
	2S-40/11-72				10	1.14		722	9.64	338	9.64		338
	3S-30/10-38				12	0.97		380	11.59	386	11.59		386

B: 断面幅、D: 断面せい、ℓ_p: 差し筋定着長、d_b: 鉄筋(D38)の公称径、pw: 隔壁鋼材比、ℓ_w: 隔壁長さ、
σ_c: コンクリート圧縮強度、t_s, t_w: 実測厚、y: 降伏点強度

ンクリート部を差し筋で接合するのみであり、施工性が最も良い。筆者らは、この差し筋方式の施工性をさらに向上させるため、電力共通研究で設置しているタイバーの代わりに、壁脚部のみに隔壁を設ける工法を考案した。同工法をFig. 2に示す。同工法は、壁脚部のみに設置した隔壁によりコンクリートを拘束し、コンクリートと差し筋の付着力を確保するものであり、電力共通研究のタイバーを差し筋定着領域全域に設ける場合よりも施工が簡便である。

本報告は、考案した隔壁を用いた差し筋工法のコンクリートと差し筋の付着特性を把握し、付着割裂強度(付着割裂破壊時応力度)評価式を導くために実施した軸引張実験に関してまとめたものであり、差し筋が二段配筋となる場合も想定し、その検討も行っている。

2. 実験計画

2.1 実験パラメータと試験体形状

試験体の諸元をTable 1に示す。Table 1には、使用したコンクリートと鋼材の材料強度も示した。差し筋は全てD38であり、一段目の差し筋本数は全試験体とも3本とした。今回実施した軸引張実験は予備実験と本実験より構成される。電力共通研究で提案されたタイバーを用いた差し筋方式を対象とした付着割裂強度評価式の隔壁を用いた差し筋方式への適用性を検討するため、先ず

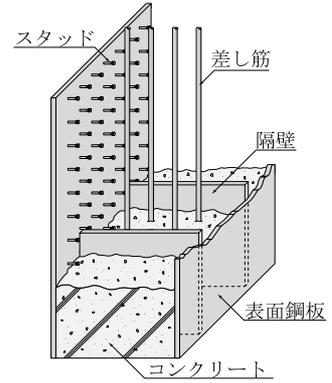


Fig. 2 隔壁を用いた
差し筋定着工法

Anchor System with Joint Bars
and Partitioning Web Walls

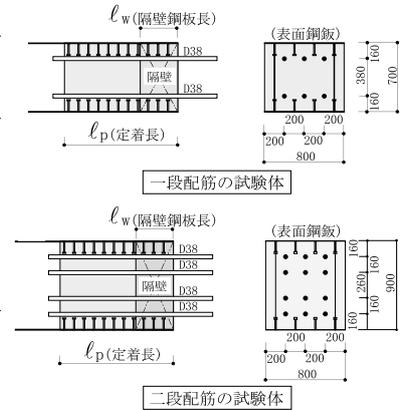


Fig. 3 試験体形状
Shape of Specimens

予備実験(3体)を行った。その実験結果より、電力共通研究の提案式を隔壁を用いた場合にも適用できる可能性の高いことを確認した上で本実験の計画を立てた。予備実験の結果は本実験の結果と併せ後述する。

本実験の主なパラメータは、差し筋の定着長ℓ_p(30d_bと40d_b、d_b: 鉄筋公称径)、隔壁長さℓ_w、及び差し筋の本数と段数(1段と2段配筋)である。隔壁長さは、隔壁の板厚と隔壁の鋼材比(pw:(1)式で算定; 式中の記号はFig. 3を参照)から逆算したものである。(1)式は、局部的に配する隔壁量と差し筋定着領域のコンクリート体積の比を表わしている。このような形で隔壁の鋼材比を評価するのは、電力共通研究のタイバーの鋼材比と対応させるためである。また、本実験での隔壁の鋼材比を0.5%程度以上としたのは、予備実験結果による。

$$pw = 2tw \ell_w / (B \ell_p) \quad (1)$$

ここに、B: 試験体幅、tw: 隔壁板厚

実験の主な目的が付着割裂強度評価式の誘導であることから、2S-40/11-72試験体(試験体名称の説明は後述)以外の試験体は全て付着割裂破壊するよう計画した。一段配筋の付着割裂強度は、電力共通研究の提案式(2式)によって推定した。(2式は実験結果の下限値を評価

するものであることから、本実験計画時の付着割裂強度の推定は、(2)式より求まる値を0.9で除すことにより行った。(2)式は、差し筋の位置が表面鋼板から離れるほど付着割裂強度が低下することを示している。二段配筋の場合は、この影響を考慮して一段目と二段目の差し筋それぞれの付着割裂強度を算定し、一段目の差し筋に関しては「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説」⁴⁾を参考に(3)式で強度を低減させ、一段目と二段目の小さい方の値から各試験体の付着割裂破壊耐力を求めた。今回の二段配筋試験体の付着割裂破壊耐力は、この算定方法により一段目の付着割裂強度で決定するように計画した。鉄筋コンクリート造の場合、例えば二段配筋の梁では主筋に生じる引張力の反力を圧縮側コンクリートで負担するため、二段目の付着割裂強度が一段配筋の場合よりも低下する。これに対し、鋼板コンクリート構造では、差し筋の反力を表面鋼板で負担するため一段目の差し筋の付着割裂強度が一段配筋の場合よりも低下する。(3)式はその傾向を表わしたものである。

$$\tau_u = 0.31m(0.267 - 0.017a + 13.5pw)\sqrt{\sigma_B} \quad (2)$$

ここに、 m ：試験体の幅 / 全差し筋径
 a ：表面鋼板内面と差し筋の距離 / 差し筋径
 pw ：隔壁鋼材比 (式(1)より算定)
 B ：コンクリート圧縮強度

$$\alpha = \frac{\sum T1}{(\sum T1 + \sum T2)} \quad (3)$$

ここに、 α ：一段目差し筋の付着割裂強度の低減係数
 $T1$ ：一段目差し筋の引張力
 $T2$ ：二段目差し筋の引張力

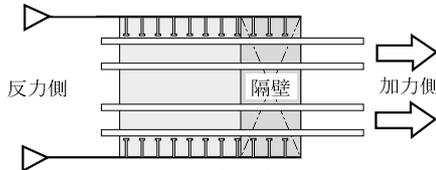
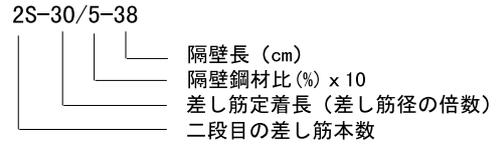


Fig. 4 加力概要
Loading System

試験体名称は、設定したパラメータから以下のように定めた。



試験体形状を Fig. 3 に示す。一段目の差し筋の表面鋼板外縁からの距離は全ての試験体で同じである。二段配筋の場合の二段目の差し筋の一段目からの距離は、一段目の差し筋の表面鋼板外縁からの距離と同じとした。

2.2 加力と測定計画

二段配筋の場合の加力概要を Fig. 4 に示す。加力は表面鋼板端部を反力端とし、差し筋を鋼製ブロックを介して油圧ジャッキで片振りの漸増で引張ることにより行った。

計測項目は、差し筋定着領域両端での表面鋼板と差し筋の相対変位 (定着領域の表面鋼板の伸び量も含む)、差し筋のコンクリートからの抜け出し量、表面鋼板、隔壁、差し筋、スタッドのひずみ度、そして軸引張力である。変位は高感度変位計で、各ひずみ度はひずみゲージで、軸引張力はロードセルでそれぞれ計測した。

3. 実験結果

3.1 諸荷重

実験結果一覧を Table 2 に示す。ひびわれ荷重は、荷重 (T) と相対変位 () の関係において軸剛性が明瞭に低下した時の値である。0S-40/3-35 と 2S-40/11-72 試験体以外の最大荷重は、全てコンクリートの付着割裂破壊で決定した。

0S-30/5-38, 0S-30/5-51 及び 0S-30/5-72 試験体は、隔壁の長さや板厚が異なるが、鋼材比はほぼ等しい ($pw \approx 0.5\%$)。これらの最大荷重はほぼ近似していることが

Table 2 実験結果一覧
Test Results

試験体	実験結果										破壊モード
	ひびわれ荷重 (kN)	表面鋼板降伏荷重 (kN)		差し筋降伏荷重 (kN)		最大荷重 (kN)					
		実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値				
							一段筋	二段筋	付着耐力 (一段筋)	スタッド ^{**} 降伏	
0S-30/9-70	1480	3500	3590	-	3640	3530	3790	-	3790	2270	鋼板降伏 付着割裂
0S-30/5-35	1470	-	3590	-	3640	3330	3070	-	3070	2880	付着割裂
0S-40/3-35	1480	3520	3500	3650	3640	3650	3800	-	3800	4450	鋼板降伏 差し筋降伏
0S-30/5-38	1372	-	3870	-	3620	3220	3120	-	3120	4380	付着割裂
0S-30/5-51	1372	-	3870	-	3620	3050	3070	-	3070	3920	付着割裂
0S-30/5-72	1470	-	3840	-	3620	3140	3070	-	3070	3460	付着割裂
1S-30/7-38	1960	-	5370	-	4820	3920	4900	4330	3680	6620	付着割裂
2S-30/8-38	1764	-	5190	-	6040	3830	6320	5650	3790	6620	付着割裂
2S-40/11-72	2160	5390	5190	-	6040	(5700)	9690	9010	5810	8020	鋼板降伏
3S-30/10-38	2160	-	7160	-	7240	4510	8150	6390	4080	6620	付着割裂

^{**}スタッド降伏荷重: $0.6n(0.5 \cdot s_{ca} / bEc)$ n : スタッド本数
 s_{ca} : スタッドの軸断面積、 Ec : コンクリートのヤング係数

ら、隔壁に関しては、長さや板厚が異なっても鋼材比が同じであれば、ほぼ同じ最大耐力が得られると言える。

0S-30/5-38, 1S-30/7-38 及び 2S-30/8-38 試験体は、差し筋の段数と本数のみが異なる。これらの最大耐力は差し筋本数に応じてやや増大しているが、比例関係にはなく、最大耐力には差し筋段数が影響しているものと思われる。

3.2 荷重 (T) ~ 変位 () 関係

2S-30/8-38 と 2S-40/11-72 試験体の荷重 (T) ~ 相対変位 () 関係を Fig. 5 に示す。

本実験シリーズでは、2S-40/11-72 試験体のみがコンクリートの破壊を生じておらず、靱性に富んだ荷重 (T) ~ 相対変位 () 関係を示している。その他の試験体は最大荷重時にコンクリートが破壊し、急激に荷重が低下した。

3.3 ひびわれ発生状況

0S-30/5-38 と 3S-30/10-38 試験体の外表面で観察された実験終了後のひびわれ発生状況を Fig. 6 に示す。隔壁が設置された部分以外のひびわれは、差し筋に沿って生じるひびわれが支配的であった。二段配筋の場合には、一段目の差し筋に沿ってひびわれが生じており、想定通り一段目の差し筋が付着に対し厳しくなっていたことが分かる。

0S-30/5-38 と 3S-30/10-38 試験体の実験終了後に試験体を材軸方向に切断して観察したひびわれ発生状況を Fig. 7 に示す。同図では、表面と同様に生じていたひびわれは省いた。一段配筋である 0S-30/5-38 試験体の破壊面は、加力側の表面鋼板端部から差し筋に向かって斜

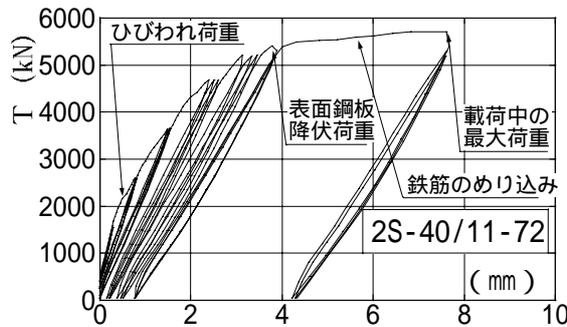
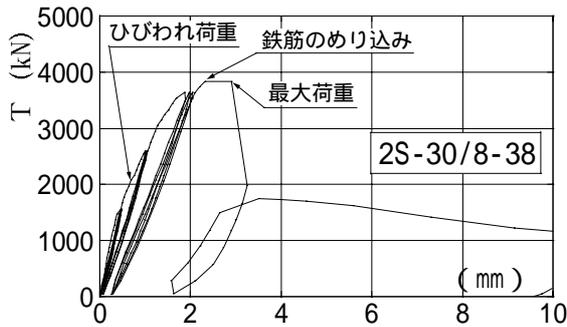


Fig. 5 荷重 (T) ~ 変位 () 関係

Relationships between Load and Displacement

めに生じ、差し筋間ではほぼ差し筋と直交していた。これに対し、二段配筋である 3S-30/10-38 試験体の破壊面は、一段目の差し筋に沿った後、一段目の差し筋間距離を直径とする半円を描いていた。

3S-30/10-38 試験体の荷重と加力側の差し筋の抜け出し変形との関係を Fig. 8 に示す。同図をみると、最大荷重以降において、相対水平変位が増大していないことから、最大荷重以降では加力側のコンクリートと差し筋は一体で鋼板部から抜け出していたことが分かる。この現象は全試験体において確認された。この結果と切断面の観測結果から、隔壁以外の部分で差し筋とコンクリート部の付着が劣化した後、最終的には加力側コンクリートのコーン破壊に至ったと言える。

4. 実験結果の考察

4.1 実験結果からの付着割裂強度の算定法

3.3 項に示したように、コンクリートの破壊で最大耐力が決定した試験体の最終的な破壊モードは、コーン破壊であった。しかし、反力端側から生じた付着割裂に起因するひびわれが生じ、差し筋とコンクリートの付着が喪失したため、応力再配分によりコーン破壊に至ったと考えられる。このことから、真の付着割裂破壊耐力は実験によって得られた最大耐力よりもやや大きいと思われるが、ここではこの最大耐力を付着割裂破壊耐力とみなすことにした。また、Fig. 9 に示した 0S-30/5-38 試験体の表面鋼板と差し筋の材軸方向のひずみ分布は、差し

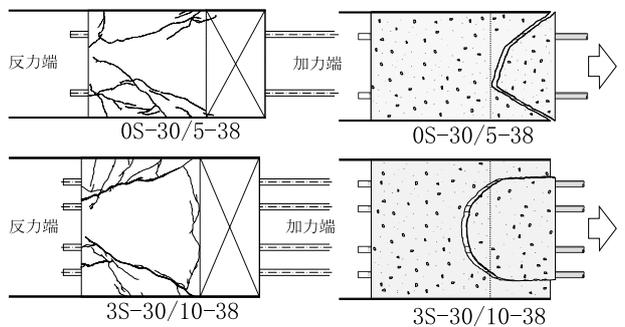


Fig. 6 ひびわれ発生状況 (表面; 実験終了後) Failure State(Surface)
Fig. 7 ひびわれ発生状況 (内面; 実験終了後) Failure State(Inside)

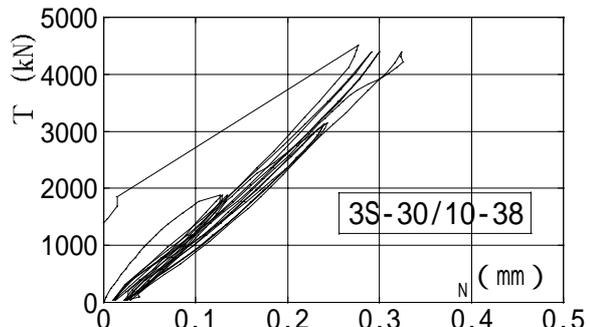


Fig. 8 荷重 (T) ~ 差し筋の抜け出し変形 (加力側)

Relationship between Load and slipping out Displacement (Loading Side)

筋の定着領域において、表面鋼板の場合は加力端側から反力端側に向かって、差し筋の場合は反力端側から加力端側に向かってほぼ直線的に増大する傾向を示していることから、付着応力度は差し筋の負担する引張力をその周長と定着長で除して算定することにした。

4.2 付着割裂強度に対する影響因子の検討

4.2.1 隔壁の影響 OS-30/9-70, OS-30/5-35, OS-30/5-38, OS-30/5-51, 及び OS-30/5-72 試験体の実験から得られた付着割裂強度を Table 3 に示す。付着割裂強度に関して、隔壁の鋼板長が異なる OS-30/9-70 と OS-30/5-35 試験体の比較、及び隔壁の板厚が異なる OS-30/9-70 と OS-30/5-72 試験体の比較から、明瞭ではないが隔壁の鋼板長が長いほど、また板厚が厚いほど付着割裂強度は大きくなる傾向を示す。この結果を受けて隔壁の鋼材比が等しい(隔壁の鋼板長と板厚は異なる) OS-30/5-38, OS-30/5-51, 及び OS-30/5-72 試験体の付着割裂強度を比較すると、3者の値は近似しており、隔壁の鋼材比が同じであれば、付着割裂強度はほぼ等しくなると言える。付着応力度～相対変位関係も Fig. 10 に示す通り、ほとんど差がない。

4.2.2 差し筋の影響 Fig. 11 に差し筋の定着長と隔壁長が異なる 2S-30/8-38 と 2S-40/11-72 試験体の荷重～相対変位関係を比較して示す。2S-30/8-38 試験体はコンクリート部で破壊し最大耐力を決定したが、2S-40/11-72 試験体では表面鋼板降伏後、コンクリート部が破壊することなく靱性に富んだ荷重～変位関係を示した。このことから、隔壁を用いた差し筋方式では破壊モードのコントロールが可能であることが分かる。

二段目差し筋の本数が異なる OS-30/5-38, 1S-30/7-38, 2S-30/8-38 及び 3S-30/10-38 試験体の付着応力度～変位関係を比較して、Fig. 12 に示す。付着応力度～変位関係の剛性と付着割裂強度は、二段目の差し筋本数が多くなるほど低下する傾向を示した。

4.3 付着割裂強度の評価

4.3.1 一段配筋の場合 一段配筋試験体の実験より得られた付着割裂強度をコンクリート圧縮強度の平方根で除して無次元化した値と隔壁鋼材比との関係を Fig. 13 に示す。図中には、既往の実験結果^{2), 3)}も示した。既往の実験では図の横軸はタイバーの鋼材比(差し筋定着領域の全タイバーとコンクリート体積の比)である。また、電力共通研究において提案された付着割裂強度の下限の評価式(2式)も併せて示した。

実験結果は全て(2)式を上回り、隔壁鋼材比に対する変動傾向も同式とほぼ対応した。この結果から、タイバーを対象とした(2)式が隔壁を用いた場合にも適用できることが分かる。

なお、(2)式の係数mは、試験体の幅と差し筋径の合計との比となっており、設計に用いる場合には、係数mを鉄筋間のあきと鉄筋径の比とすれば良い。

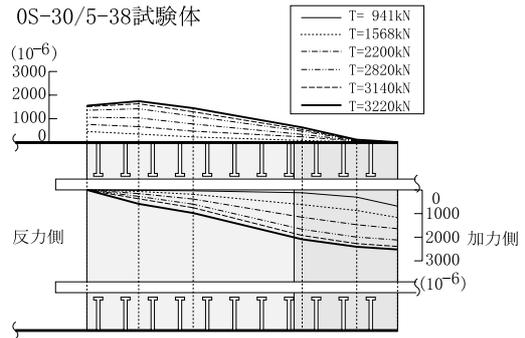


Fig. 9 表面鋼板と差し筋のひずみ分布
Strain Distribution of Surface Plate and Joint Bar

Table 3 付着割裂強度
Bond Splitting Strength

試験体	隔壁の諸元			最大耐力		
	板厚 t (mm)	長さ lw (mm)	鋼材比 pw (%)	Tu (kN)	u (N/mm ²)	u _B
OS-30/9-70	5.90	700	0.91	3530	4.30	2.32
OS-30/5-35	5.90	350	0.45	3330	4.06	2.20
OS-30/5-38	6.27	380	0.52	3220	3.93	2.17
OS-30/5-51	4.33	513	0.49	3050	3.71	2.05
OS-30/5-72	3.08	722	0.49	3140	3.82	2.11

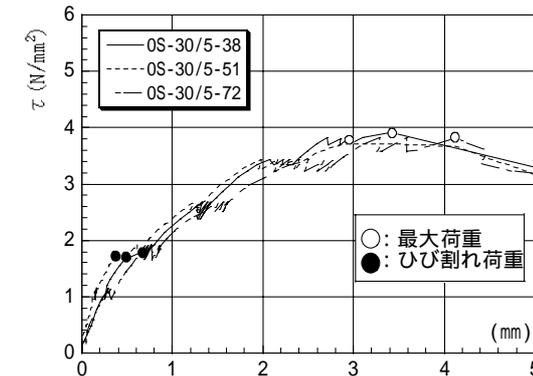


Fig. 10 付着応力度～変位関係の比較 (同隔壁鋼材比)
Comparison of Relationships between Bond Stress and Displacement

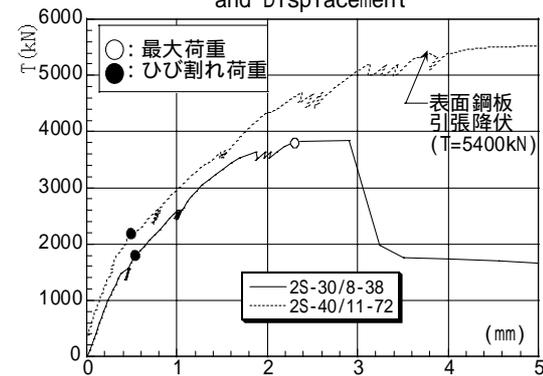


Fig. 11 荷重～変位関係の比較
(差し筋定着長と隔壁長さの違い)
Comparison of Relationships between Load and Displacement

4.3.2 二段配筋の場合 コンクリート部の破壊で最大耐力が決定した二段配筋試験体(1S-30/7-38, 2S-30/8-38, 3S-30/10-38 試験体)及び比較対象となる一段配筋の OS-30/5-38 試験体の付着割裂強度実験値を一段配

筋とみなした場合の計算値 (2)式で求めた結果を0.9で除した値)で除して求めた強度低下率と一段目引張力を全引張力で除した値(今回の試験体の差し筋は全て同じ鉄筋を使用しているため、この値は一段目の差し筋本数を全差し筋本数で除した値と同じである)との関係をFig. 14に示す。二段配筋の場合、2.1項に示したように付着割裂破壊耐力は、二段目の強度と二段目の影響を考慮して低減した一段目の強度の小さい方となる。今回のコンクリート部で破壊した二段配筋試験体は全て一段目の差し筋の強度で付着割裂破壊耐力が決定するよう計画され、実験によるひびわれも一段目の差し筋に沿って生じていたことから、Fig. 14の横軸には、一段目の強度低下の指標となる一段目引張力を全引張力で除した値を採用した。同図には、(3)式による低減率も併せて示した。

Fig. 14をみると、全引張力の増大に伴って実験結果の強度低減率は比例的に減少しており、その傾向は(3)式によって良好にかつ安全側に評価できることが分かる。

5. まとめ

SC構造による耐震壁のRC造の基礎への定着方法として隔壁を用いた差し筋工法を考案した。この場合のコンクリートと差し筋の付着特性を把握し付着割裂強度式の誘導を目的として、軸引張実験を実施した。この実験結果の考察より得られた知見を以下に示す。

- 1) 一段配筋の場合、実験より得られた付着割裂強度はタイバーを対象とした電力共通研究の提案式により評価できる。
- 2) 二段配筋の場合、一段目の差し筋の付着割裂強度の低下傾向は「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説」に示された手法に準じ、一段目の引張力を全引張力で除すことにより良好かつ安全側に評価できることが分かった。

謝辞

なお、本研究は、中山達雄氏が大林組在職中に担当して実施したものである。また、日本大学の青山博之教授より貴重な助言を受けた。実験データを参照させていただいた関係各位と併せて深謝します。

参考文献

- 1) 中山, 山口, 他: 鋼板コンクリート構造に関する研究 (その1), 大林組技術研究所報, NO.50, (1995.2)
- 2) 松本, 他: 鋼板コンクリート構造に関する実験的研究 (その9, 10), 日本建築学会大会梗概集,

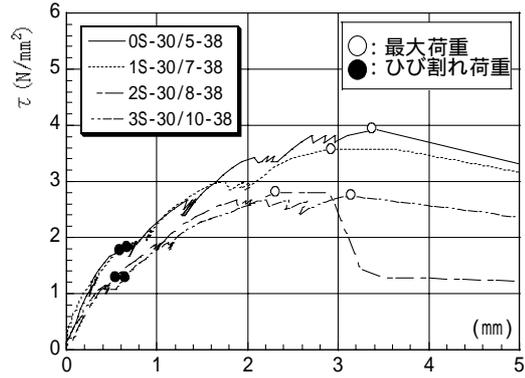


Fig. 12 付着応力度～変位関係の比較 (二段目差し筋本数の違い)

Comparison of Relationships between Bond Stress and Displacement

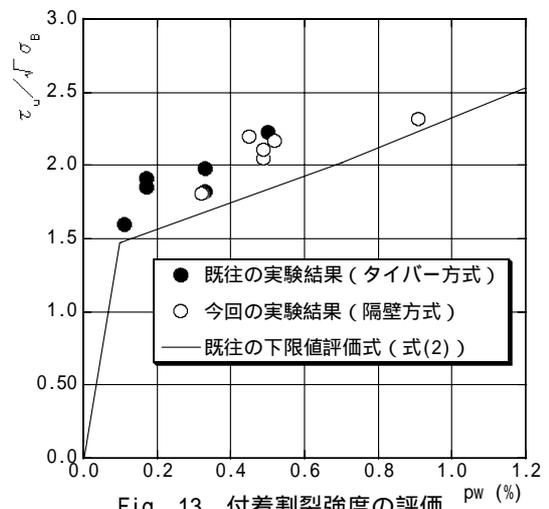


Fig. 13 付着割裂強度の評価

Evaluation for Bond Splitting Strength

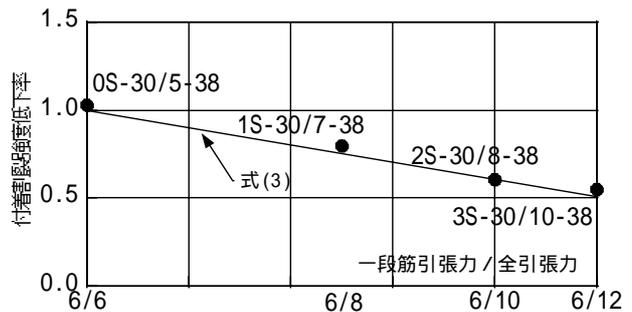


Fig. 14 一段筋の付着割裂強度低下率 (二段配筋の場合)

Damping Ratio of Bond Splitting Strength for first Story Bar (Double Layers)

pp.1067 ~ 1070 ,(1997.9)

- 3) 片山, 他: 鋼板コンクリート構造に関する実験的研究 (その33, 34), 日本建築学会大会梗概集, pp.1247 ~ 1250 ,(1997.9)
- 4) 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 日本建築学会 ,(1999)