

論文

[2035] 鉄筋の離れを考慮した重ね継手部の破壊耐力に関する実験的研究

松尾伸之*1・斎藤俊樹*2・齋藤 誠*3

1. まえがき

地下連続壁に使用されるエレメント間の継手は、これまで各種の構造あるいは施工法が開発され、実用化されている。とくに本体基礎構造物としての地下連続壁では、エレメント間の継手が面内、面外方向の応力を負担する機能を必要とし、現在各種の剛結継手が考案されている。一般的には隣接するエレメントの鉄筋をラップさせる構造形式を取っているが、その条件として「地中連続壁基礎設計施工指針(社)日本道路協会」⁽¹⁾では、水平鉄筋の重ね継手長さ 40ϕ (ϕ :鉄筋径)以上、さらに重ね合う水平鉄筋間隔を100mm以下と設定している。さらに同指針では継手部の許容応力を一般部の80%に低減し、設計することとしているものの、このような鉄筋が間隔を有した場合の重ね継手構造の破壊メカニズムに関しては、未解明な部分が多い。

従来より、重ね継手の破壊メカニズムに関する研究は行われている。そうした過去の研究から、重ね継手は鉄筋と鉄筋を重ねた単純な構造であるものの、その強度に与える因子はかなり多く、またそれらの因子は複合的に作用することが知られている。

一方、土木学会コンクリート標準示方書⁽²⁾には、Orangunらの実験式⁽³⁾を基にした重ね継手強度に関する解説式が掲載されているが、鉄筋が離れを有した場合の重ね継手強度を定式化したものではなく、現在の継手部分の設計が十分な裏付けのもととされているとは言いがたい。

このような背景のもと、筆者らはこれまで鉄筋が離れを有した場合の重ね継手の強度、並びにその破壊性状を評価するため、各種パラメーターを変化させた供試体で荷重試験を行い、その結果を報告並びに考察を行ってきた。^{(6) (7)}

今回は、さらに実験結果を追加し、これまでの検討に加え、鉄筋に作用する応力状態やその破壊形態に関する考察を追加したものである。

2. 試験概要

2. 1 供試体の概要

供試体は図-1に示すような重ね継手構造を中心部に有したモデルである。今回の試験では横方向の効果は考慮していないため、重ね継手部に補強筋を配筋せず、簡略化したモデルで行った。また、試験では土留め壁としての地下連続壁を想定している点から、土圧が作用する方向を考慮し、鉄筋の離れ(S)を荷重が作用する方向にとることになっている。表-1に試験ケースの一覧表を示す。その中、No. 29からNo. 43が今回新たに行った試験ケースである。

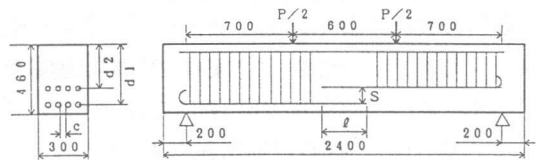


図-1 供試体の形状(フック無し)

*1 東日本旅客鉄道(株)東京工事事務所工事管理室課員 (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株)総合企画本部国際課(前工事管理室担当課長)、工修 (正会員)

*3 東日本旅客鉄道(株)東京工事事務所工事管理室課員

試験ケースの概要は、「重ね継手部の重ね鉄筋の長さ l 」、「重ね継手鉄筋の離れ（上下鉄筋間隔） s 」、「重ね継手水平鉄筋の純間隔 c （鉄筋の種類並びに本数）」の組み合わせとし、さらに、上側鉄筋と下側鉄筋の中央位置を固定し、各パラメーターを組み合わせたものを追加している。また、No. 42とNo. 43は上側の鉄筋にフックを付けたものである。図-2は供試体の隅角部を示したものであり、水平鉄筋の純間隔 c 並びに側面および底面からのかぶり c_1 、 c_2 は表-2のようになる。

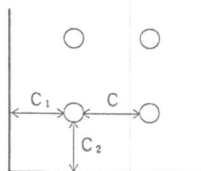


図-2 供試体の隅角部

表-2 鉄筋間隔 c と

かぶり c_1 、 c_2

	c (mm)	c_1 (mm)	c_2 (mm)
No. 1 ~ No. 8 No. 15 ~ No. 28	43.0	60.0	60.0
No. 9 ~ No. 11	18.9	60.0	60.0
No. 12 ~ No. 14	29.1	60.0	60.0
No. 30 ~ No. 37 No. 42 ~ No. 43	38.8	60.0	60.0
No. 38 ~ No. 39	16.9	60.0	60.0
No. 40 ~ No. 41	25.1	60.0	60.0

鉄筋は異形棒鋼SD345を、またコンクリートは設計基準強度 240kgf/cm^2 となるように配合した生コンクリートを使用した。鉄筋の材料試験結果を表-3に、コンクリートの示方配合を表-4に示す。また、実験時の圧縮強度を表-1に示す。

表-3 鉄筋の材料試験結果

種別	降伏強度 (kgf/cm^2)	引張強度 (kgf/cm^2)	ヤング率 (10^8kgf/cm^2)
D10	3677	5400	1.89
D13	3643	4930	1.75
D16	3788	5373	1.91

表-1 供試体の一覧表

No	鉄筋種類 一本数	d1 (cm)	d2 (cm)	l ϕ	s (cm)	コンクリート 強度 (kgf/cm^2)	破壊荷重 P_{max} (tf)	破壊モーメント M_{max} (tf m)
1	D13-4	40	40	10	0	352	14.0	4.9
2	D13-4	40	35	10	5	352	16.0	5.6
3	D13-4	40	30	10	10	352	18.9	6.6
4	D13-4	40	25	10	15	352	11.5	4.0
5	D13-4	40	40	15	0	319	20.8	7.3
6	D13-4	40	35	15	5	319	11.8	4.1
7	D13-4	40	30	15	10	319	15.5	5.4
8	D13-4	40	25	15	15	319	10.4	3.6
9	D10-7	40	40	19.8	0	304	21.0	7.4
10	D10-7	40	35	19.8	5	304	17.2	6.0
11	D10-7	40	30	19.8	10	304	18.5	6.5
12	D13-5	40	40	16	0	278	22.0	7.7
13	D13-5	40	35	16	5	278	13.0	4.6
14	D13-5	40	30	16	10	278	10.0	3.5
15	D13-4	40	40	20	0	281	30.0	10.5
16	D13-4	40	35	20	5	281	17.4	6.1
17	D13-4	40	30	20	10	281	19.3	6.8
18	D13-4	40	25	20	15	281	12.7	4.4
19	D13-4	32.5	32.5	10	0	326	18.5	6.5
20	D13-4	35	30	10	5	326	10.2	3.6
21	D13-4	37.5	27.5	10	10	326	15.0	5.3
22	D13-4	32.5	32.5	20	0	317	26.9	9.4
23	D13-4	35	30	20	5	317	16.9	5.9
24	D13-4	37.5	27.5	20	10	317	20.4	7.1
25	D13-4	40	40	30	0	277	32.0	11.2
26	D13-4	40	35	30	5	277	21.8	7.6
27	D13-4	40	30	30	10	277	19.7	6.9
28	D13-4	40	25	30	15	277	12.5	4.4

No	鉄筋種類 一本数	d1 (cm)	d2 (cm)	l ϕ	s (cm)	コンクリート 強度 (kgf/cm^2)	破壊荷重 P_{max} (tf)	破壊モーメント M_{max} (tf m)
29	D16-4	40	35	10	5	374	21.1	7.4
30	D16-4	40	30	10	10	374	17.0	6.0
31	D16-4	40	25	10	15	374	14.1	4.9
32	D16-4	40	35	15	5	354	21.0	7.4
33	D16-4	40	30	15	10	354	20.6	7.2
34	D16-4	40	25	15	15	354	15.3	5.4
35	D16-4	40	35	20	5	257	23.0	8.1
36	D16-4	40	30	20	10	257	14.0	4.9
37	D16-4	40	25	20	15	257	14.0	4.9
38	D16-6	40	35	20	5	358	23.3	8.2
39	D16-6	40	30	20	10	358	16.5	5.8
40	D16-5	40	35	20	5	364	25.6	9.0
41	D16-5	40	30	20	10	364	20.5	7.2
42	D16-4	40	35	20	5	310	22.0	7.7
43	D16-4	40	30	20	10	310	19.7	6.9

表-4 示方配合

粗骨材 最大寸 法(mm)	スラン プの範 囲(cm)	水セメント 比W/C (%)	細骨材 率s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混合剤
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
20	8±2.5	46.4	41.5	161	347	756	1086	3.90

2. 2 試験方法

試験は荷重能力100tfの静曲げ荷重装置を用い、2点荷重の純曲げ試験を行った。荷重は0.5 tfピッチで供試体が破壊するまで荷重し、測定項目は、重ね鉄筋のひずみ、供試体の変位、荷重荷重、ひびわれ発生荷重、破壊荷重、供試体のひびわれ状況である。

3. 試験結果と考察

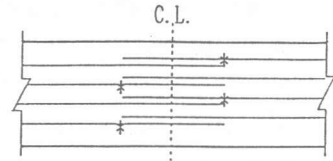
全供試体の試験結果の中から、破壊荷重 P_{max} と破壊荷重から計算した破壊モーメント M_{max} ($M_{ax}=0.35P_{max}$)を表-1に示す。

重ね鉄筋が離れを有する場合、今回の試験では上下鉄筋の離れ間隔 s の増加は、上側鉄筋に着目した場合、断面形状を同一とし、下側鉄筋のかぶりを固定すると、梁断面の抵抗するモーメントを構成するアーム長が減少するため、破壊荷重は上下鉄筋の離れ間隔の増加に伴い、減少することになるが、D13の試験結果では $s=10\text{cm}$ の試験体の破壊荷重が $s=5\text{cm}$ の試験体の破壊荷重を上回る結果が得られた。また、重ね鉄筋が離れを持たない場合($s=0$ の場合)と比較すると、重ね鉄筋が離れを有する場合の破壊荷重は低くなっている。

3. 1 破壊時鉄筋応力度の検出

試験の荷重過程において、図-3に示すような鉄筋位置に上下両鉄筋にそれぞれ2箇所ひずみゲージを取り付け、計測を行った。

表-5に上下両鉄筋の計測位置における破壊時の応力度(最大値)を示す。



* : ひずみゲージ

図-3 ひずみゲージ位置図

表-5 上下両鉄筋の破壊時応力度

No	破壊モーメント M_{max} (tf m)	破壊時応力度 ⁽¹⁾ (kgf/cm ²)	破壊時応力度 ⁽²⁾ (kgf/cm ²)	No	破壊モーメント M_{max} (tf m)	破壊時応力度 ⁽¹⁾ (kgf/cm ²)	破壊時応力度 ⁽²⁾ (kgf/cm ²)	No	破壊モーメント M_{max} (tf m)	破壊時応力度 ⁽¹⁾ (kgf/cm ²)	破壊時応力度 ⁽²⁾ (kgf/cm ²)
1	4.9	2428	712	15	10.5	—	—	29	7.4	2955	1502
2	5.6	2541	1654	16	6.1	—	1419	30	6.0	1907	1082
3	6.6	3244	2513	17	6.8	2353	1946	31	4.9	683	76
4	4.0	—	2092	18	4.4	66	1503	32	7.4	2671	2711
5	7.3	3522	3398	19	6.5	1040	2058	33	7.2	3588	3310
6	4.1	2745	295	20	3.6	2384	370	34	5.4	174	2825
7	5.4	3047	2810	21	5.3	2175	1583	35	8.1	—	—
8	3.6	31	199	22	9.4	—	—	36	4.9	210	2659
9	7.4	—	3636	23	5.9	3555	2269	37	4.9	2465	2816
10	6.0	2727	2144	24	7.1	—	1503	38	8.2	2579	2980
11	6.5	3267	2112	25	11.2	—	—	39	5.8	1751	330
12	7.7	2986	3086	26	7.6	—	3100	40	9.0	3005	3215
13	4.6	1944	820	27	6.9	—	3612	41	7.2	3303	2415
14	3.5	1752	103	28	4.4	523	1704	42	7.7	—	—
								43	6.9	3293	2438

— : 降伏
 破壊時応力度⁽¹⁾ : S-1, S-2(上側鉄筋)の大きい方
 破壊時応力度⁽²⁾ : S-3, S-4(下側鉄筋)の大きい方

重ね長さが 15ϕ 以上の場合、重ね鉄筋が離れを持たない密着型の重ね継手では、上下両鉄筋とも降伏に達している。しかし、重ね鉄筋が離れを有する場合、上下両鉄筋の破壊時の応力度には、ばらつきが生じてくる。また、重ね長さが 30ϕ になると離れ間隔が 10cm までは、およそ破壊時に鉄筋は降伏点に達している。また、全体的に上側の鉄筋の方が、下側の鉄筋に比べて破壊時には大きな応力を受けていることが分かるが、離れ間隔が 15cm の場合には、逆の傾向を示しており、上側の鉄筋に働く応力度は小さい値である。これは、離れ間隔が 15cm では鉄筋とコンクリートとの付着破壊ではなく、重ね長さ l と鉄筋の離れ s の比 l/s が大きくなると、上下両鉄筋間に拘

束されているコンクリート部分に作用する曲げモーメントの影響が大きくなり、付着に先行してコンクリートが曲げ破壊してしまうためであると思われる。また、鉄筋径を変えずその本数を増やした（鉄筋量が増加した）No. 12～No. 14（1断面あたりD13を5本）や、No. 38～No. 41（1断面あたりD16を5本または6本）では、それぞれ1断面あたり4本で構成されているNo. 5～No. 7やNo. 35～No. 36に比べ、破壊曲げ耐力は多少増加する傾向ではあるが、鉄筋は降伏に至らず継手部の破壊が生じている。

3. 2鉄筋のひずみ曲線とその破壊形状

供試体No. 2～No. 4とNo. 16～No. 18 を取り上げ、図-4にその破壊形状、並びに計測位置におけるモーメントとひずみの関係を示す。ひびわれ図中の①から⑤はその進行順序、またモーメント-ひずみ図中のS-1、S-2 は上側鉄筋のひずみ、またS-3、S-4 は下側鉄筋のひずみを表す。

ひびわれの進行は、どの供試体とも①や②のような初期曲げひびわれが発生する。その後は、No. 2, No. 3の③やNo. 16の④にみられるように上側鉄筋に沿って付着破壊が徐々に進む。しかし、No. 4やNo. 18では、初期ひびわれが発生した後、早急に重ね継手部が脆性的な破壊を起こした。これは上下両鉄筋の離れが15cmにした場合に特徴的にみられる。また、No. 17は曲げひびわれが4箇所発生した後、重ね継手部が脆性的な破壊を起こした。

ひずみの履歴と破壊形状との関係を見ると、全般的にどの供試体とも初期ひびわれの発生点において、ひずみが急激に増大する。これは初期ひびわれが発生するまでは、コンクリートと鉄筋の両方で負担していた応力が、初期ひびわれの発生で、それまでコンクリートで負担していた応力を鉄筋が負担するようになる と解釈できる。また、初期曲げひびわれはNo. 2～No. 3, No. 16～No. 18のひびわれ①にみられるように、上側鉄筋に掛かる側に発生する傾向にある。さらに、破壊

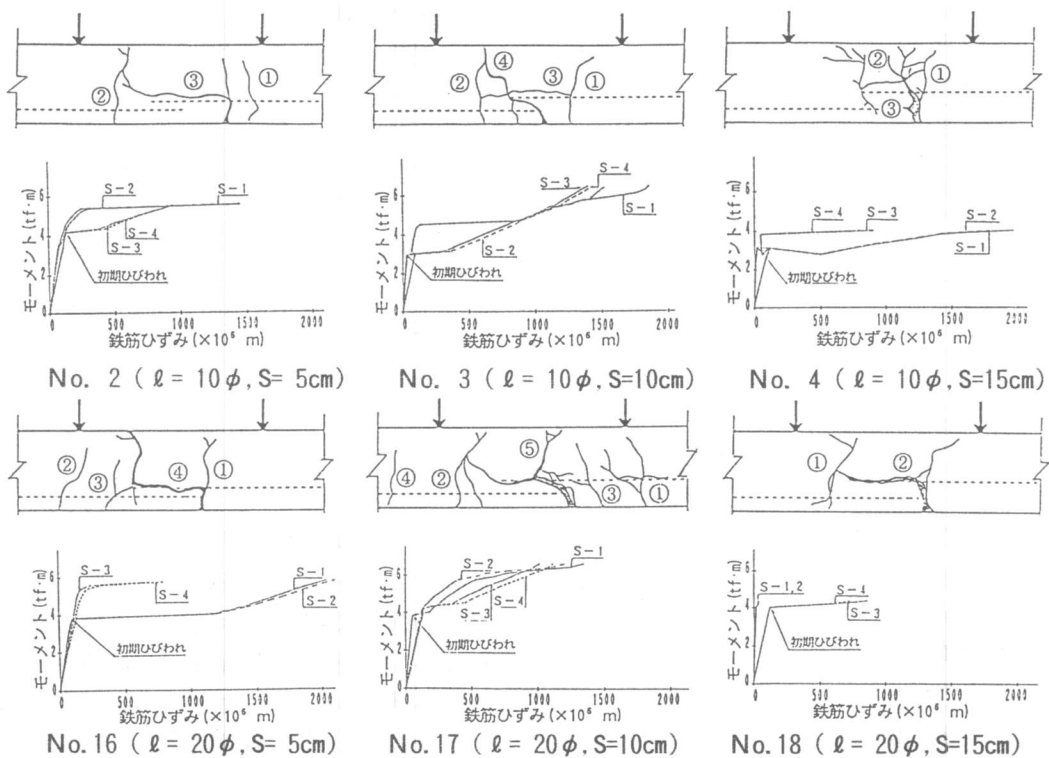


図-4 破壊形状とモーメント-ひずみ関係

形状と曲げ耐力との関係では、曲げひびわれの発生本数とその耐力に影響を与えることが伺える。これは、曲げひびわれの発生本数が増えることが、応力の分散を招き、載荷荷重の増加に対する重ね継手部鉄筋に作用する応力の増加量が低減されるためと考えられる。

3. 3 曲げ耐力算定法の検討

重ね鉄筋が離れを有した継手部の破壊は、その破壊形状から判断して、上側の異形鉄筋とその周囲を囲うコンクリートとの付着割裂破壊で起こるものと考えられることができる。

現在、付着割裂強度の算定式は、前述のOrangunらの算定式や、藤井・森田による算定式⁽⁴⁾があり、いずれも大量の実験結果をもとに統計的に整理、評価した実験式である。

・①Orangun らの算定式

(横補強筋のない場合)

付着強度 τ は

$$\tau = (1.2 + \frac{3c'}{d_s} + 50 \frac{d_b}{l_s}) \times 0.265 \sqrt{f_c'}$$

ただし、 $c' / d_s \leq 2.5$

c' : かぶり厚さと鉄筋間のあきの半分のうち小さい方の値 (cm)
(今回の試験では c' に鉄筋間隔 c の半分を採用)

d_s : 鉄筋径 (cm)

l_s : 付着長さ (cm)

f_c' : コンクリート強度 (kgf/cm²)

・②藤井・森田による算定式

(横補強筋のない場合)

付着強度 τ は (side split mode の割裂モード)

$$\tau = \{0.307 \times (\frac{b}{Nd_s} - 1) + 0.427\} \times \sqrt{F_c}$$

b : はり幅

d_s : 主筋径 (cm)

N : 主筋本数

F_c : コンクリート強度 (kgf/cm²)

今回の試験結果から継手部の破壊が付着割裂破壊で生じていると考えられる離れが 5cm, 10cm の試験結果を取り上げ、上記の 2 式を用い、破壊耐力を計算し、比較検討を行った。計算は、算定式から求まる付着割裂強度を用い、初期ひびわれ発生断面において平面保持が成立すると仮定し、曲げモーメントを算出した。また、計算では付着が作用すると考えられる定着長が大きく影響するが、ここでは上側鉄筋の継手部先端から初期ひびわれが上側鉄筋に掛かった位置までとした。

表-6 にその計算結果を示す。①式 (原式を使用) から求めた曲げ耐力と試験結果との比は、全体で平均値 1.17、標準偏差 0.157、また②式から求めた曲げ耐力と試験結果との比は、平均値 1.38、標準偏差 0.235 であった。No. 10 や No. 11 のように鉄筋間隔 c が小さい場合は、両式から求めた計算値に差がないが、定着長が小さい場合は差が大きくなる。全般的に、①式から求め

表-6 計算結果一覧表

No	実測値M (tf m)	定着長 (m)	計算値M ₁ (tf m)	計算値M ₂ (tf m)	M/M ₁	M/M ₂
2	5.6	0.215	5.1	4.2	1.10	1.33
3	6.6	0.215	4.2	3.4	1.57	1.94
6	4.1	0.190	4.4	3.4	0.93	1.21
7	5.4	0.260	4.4	3.8	1.23	1.42
10	6.0	0.260	4.7	4.7	1.28	1.28
11	6.5	0.320	4.5	4.5	1.44	1.44
13	4.6	0.185	4.1	3.2	1.12	1.44
14	3.5	0.205	3.6	2.9	0.97	1.21
16	6.1	0.255	4.9	4.1	1.24	1.49
17	6.8	0.455	5.7	5.5	1.19	1.24
20	3.6	0.105	2.7	1.7	1.33	2.12
21	5.3	0.255	4.0	3.4	1.33	1.56
23	5.9	0.335	5.1	4.7	1.16	1.26
24	7.1	0.455	5.5	5.3	1.29	1.34
26	7.6	0.500	7.3	7.1	1.04	1.07
29	7.4	0.330	7.3	6.2	1.01	1.19
30	6.0	0.260	5.4	4.2	1.11	1.43
32	7.4	0.290	6.6	5.3	1.12	1.39
33	7.2	0.380	6.4	5.6	1.13	1.29
35	8.1	0.340	6.0	5.1	1.35	1.59
36	4.9	0.265	4.4	3.5	1.11	1.40
38	8.2	0.345	7.7	6.4	1.06	1.28
39	5.8	0.325	6.2	5.1	0.94	1.14
40	9.0	0.355	7.6	6.6	1.25	1.36
41	7.2	0.415	6.8	6.2	1.06	1.16

計算値M₁はOrangun らの式から算定
計算値M₂は藤井・森田の式から算定

た曲げ耐力と今回の試験結果との間の相関が高いことがわかった。また、この検討は、今回試験ケースを追加したNo. 29 ~No. 41 に関してもその適用性を確認することができた。また、②式との関係では、全般的に計算値が小さく評価されているが、これは②式におけるside spilt modeの付着割裂パターンでの強度のほうが、①式から求まる強度に対して、小さく評価されているためである。

この検討においては、定着長の算出に必要な初期ひびわれの発生位置により、計算される耐力が大きく影響されてしまうため、その発生位置を各試験結果で検討を行ったが、各パラメータとの関連を評価することはできなかった。しかし、発生位置は下側鉄筋の継手部先端（カットオフ部）もしくは、その外側であるため、設計に際しては、初期ひびわれが下側鉄筋の継手部先端で発生すると仮定し（定着長を重ね長さ l とし）計算を行えば、ほぼ安全側の耐力を得ることができると思われる。

4. まとめ

今回の試験結果より以下のような結論を得た。

- (1) 今回の試験のように、荷重が作用する方向に鉄筋が離れを有した場合の重ね継手部の破壊形態は、鉄筋の離れ S が15cmの場合では破壊時、上側鉄筋に働く応力度は小さく、付着破壊ではなく、上下鉄筋間に充填したコンクリートの破壊と考えることができる。
- (2) 曲げ耐力の算定にあたっては、上下鉄筋の離れが5cm や10cmを有した重ね継手で、補強筋等による対策が講じられていない場合は、初期ひびわれの発生位置を考慮し、上側に配置した鉄筋の付着割裂強度を用い、ほぼ評価することができる。
- (3) また、その初期ひびわれは、下側に配置した鉄筋の重ね継手部先端より外側に発生することから、設計に際しては、下側鉄筋の重ね継手部先端より初期ひびわれが発生するという仮定のもと、重ね長さ l を定着長に取り、既存の付着割裂強度算定式を用いれば、ほぼ安全側の耐力を得ることができる。

謝辞

本研究をまとめるに当たって御指導いただいた、東京工事事務所石橋忠良次長をはじめ、実験に協力いただいた亀戸試験室、日本鋼弦コンクリート(株)の皆様には謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会編：地中連続壁基礎設計施工指針・同解説，1991.7
- 2) 土木学会編：コンクリート標準示方書（平成3年度版）設計編，1986.11，pp.110-111
- 3) C. O. Orangun, J. O. Jirsa, J. E. Breen: A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices, ACI Journal, Title No. 74-11, March 1977, pp. 114-122
- 4) 藤井 栄、森田司郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究 -第2報 付着割裂強度算定式の提案-，日本建築学会論文報告集，第324号，1983.2，pp.45-53
- 5) 藤井 栄、森田司郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究 -第1報 異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究，日本建築学会論文報告集，第319号，1982.9，pp.47-55
- 6) 齋藤 誠、渡辺明之：鉛直方向に間隔を有した鉄筋の重ね継手強度に関する研究，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集，1992.9，pp.820-821
- 7) 斎藤俊樹、松尾伸之、齋藤 誠：鉄筋の離れを考慮した重ね継手部の破壊メカニズムに関する研究，第20回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，1993.3，投稿中