

交差溶接接合を用いた
鉄筋コンクリート造基礎梁の組立配筋工法に関する研究

2021年 3月

岡田健良

交差溶接接合を用いた
鉄筋コンクリート造基礎梁の組立配筋工法に関する研究

岡田健良
システム情報工学研究科
筑波大学

2021年 3月

目 次

第 1 章 序論.....	1
1-1 研究の背景	1
1-2 研究の目的	2
1-3 論文の構成	3
第 2 章 既往の研究.....	5
2-1 異形鉄筋の歴史と主な既往の研究.....	5
2-2 溶接接合の歴史と主な既往の研究.....	5
2-3 溶接金網と鉄筋格子に関する既往の研究.....	8
2-4 溶接組立配筋工法に関する既往の研究	9
2-5 本研究の位置づけ.....	9
第 3 章 異形鉄筋の交差溶接接合性能に及ぼす溶接条件の影響.....	12
3-1 目的	12
3-2 異形鉄筋と抵抗溶接の溶接条件	12
3-3 試験体の種類と実験シリーズの内容	15
3-4 第 1 シリーズの溶接点接合強度試験	18
3-5 第 1 シリーズの溶接点接合強度試験の結果.....	19
3-6 第 2 シリーズの溶接点接合強度試験	25
3-7 第 2 シリーズの溶接点接合強度試験の結果.....	26
3-8 第 3 シリーズの溶接点接合強度試験	29
3-9 第 3 シリーズの溶接点接合強度試験の結果.....	30
3-10 まとめ	33
第 4 章 基礎梁の実大実験	35
4-1 目的	35
4-2 溶接組立配筋工法の詳細.....	35
4-3 基礎梁実験の概要.....	37
4-4 シリーズ 1 基礎梁実験	37
4-5 シリーズ 1 基礎梁実験の結果	44
4-6 シリーズ 2 基礎梁実験	54
4-7 シリーズ 2 基礎梁実験の結果	62
4-8 まとめ	71
第 5 章 溶接組立配筋工法による施工事例	73
5-1 評定制度と溶接組立配筋工法	73
5-2 2 階建て戸建て住宅の施工事例	73
5-3 2 階建て保育園の施工事例.....	84
第 6 章 結論.....	100
6-1 総括	100
6-2 交差溶接接合部の接合強度と溶接条件	100
6-3 基礎梁の実大実験.....	101
6-4 今後の課題	101

付 本研究に関する発表論文.....	103
謝辞	105

図 目次

図 1-1 布基礎の配筋工法	1
図 1-2 複筋溶接組立配筋工法	2
図 3-1 スポット溶接機によるシーケンス制御のイメージ ^[3.4]	13
図 3-2 マクロ試験の事例	14
図 3-3 ナゲット、コロナボンド、熱影響部、据込寸法	15
図 3-4 溶接点せん断試験用治具	16
図 3-5 交差溶接部の鉄筋と電極位置	16
図 3-6 2次通電時間と最大荷重の関係（破壊形式ごと）	20
図 3-7 2次通電時間と最大荷重の関係	22
図 3-8 2次通電時間と最大荷重の中央値 あばら筋 D10	23
図 3-9 2次通電時間と最大荷重の中央値 あばら筋 D13	23
図 3-10 積算電流と最大荷重の関係	24
図 3-11 積算電流と最大応力度の関係	24
図 3-12 温度上昇曲線 ^[3.4]	25
図 3-13 加圧力-最大荷重関係（第2シリーズ）	26
図 3-14 2次通電電流値、加圧力と破壊パターンの関係（第2シリーズ）	27
図 3-15 あばら筋の引張試験結果	28
図 3-16 2次通電電流値、加圧力と合格率の関係（第2シリーズ）	29
図 3-17 加圧力-最大荷重関係（第3シリーズ）	31
図 3-18 2次通電電流値、加圧力と破壊パターンの関係（第3シリーズ）	31
図 3-19 2次通電電流値、加圧力と合格率の関係（第3シリーズ）	32
図 4-1 U字ユニットの製作と組立・配筋	35
図 4-2 配筋指針に基づくキャップタイの仕様 ^[4.1]	36
図 4-3 キャップタイ形状	36
図 4-4 シリーズ1基礎梁実験の試験体の断面と配筋	38
図 4-5 シリーズ1基礎梁実験の試験体の配筋	39
図 4-6 実験に使用したキャップタイの寸法	40
図 4-7 シリーズ1基礎梁実験の加力点の位置とせん断力の関係	41
図 4-8 シリーズ1基礎梁実験の計測装置位置図	42
図 4-9 シリーズ1基礎梁実験のひずみゲージ位置図	43
図 4-10 シリーズ1基礎梁実験のせん断力 - 部材角関係（Fc18）	44
図 4-11 シリーズ1基礎梁実験のせん断力 - 部材角関係（Fc30）	45
図 4-12 シリーズ1基礎梁実験のせん断力 - 部材角関係	46
図 4-13 シリーズ1あばら筋ひずみ(Fc18)	51
図 4-14 シリーズ1あばら筋ひずみ(Fc30)	52
図 4-15 シリーズ2フェーズ 基礎梁実験の試験体断面と配筋	55
図 4-16 シリーズ2フェーズ 基礎梁実験の試験体の断面と配筋	55
図 4-17 シリーズ2フェーズ 基礎梁実験の試験体配筋	56

表 4-9 シリーズ2 フェーズ 基礎梁実験の鉄筋の材料強度試験結果	64
表 4-10 シリーズ2 フェーズ 基礎梁実験の鉄筋の材料強度試験結果	64
表 4-11 シリーズ2 フェーズ 基礎梁実験のコンクリートの材料試験結果	65
表 4-12 シリーズ2 フェーズ 基礎梁実験のコンクリート材料試験結果	65
表 4-13 シリーズ2 基礎梁実験の終局耐力計算値の共通条件	65
表 4-14 シリーズ2 あばら筋の降伏位置	68
表 4-15 シリーズ2 基礎梁実験の経過	68

写真 目次

写真 3-1 溶接点せん断試験	16
写真 3-2 破断形式	19
写真 3-3 母材の破断荷重近傍で溶接部剥離した試験体	21
写真 3-4 母材の破断荷重近傍で熱影響部破壊した試験体	21
写真 4-1 キャップタイの形状	36
写真 4-2 シリーズ1 基礎梁実験の加力装置全景	42
写真 4-3 シリーズ1 基礎梁実験ひび割れパターン(No.1～No.6)	49
写真 4-4 シリーズ1 基礎梁実験ひび割れパターン(No.7～No.10)	50
写真 4-5 No.0-1 1/50 加力時ひび割れパターン	69
写真 4-6 No.1-1 1/50 加力時ひび割れパターン	69
写真 4-7 No.3-1 1/50 加力時ひび割れパターン	69
写真 4-8 No.3-3 1/50 加力時ひび割れパターン	69
写真 4-9 No.0-2 1/50 加力時ひび割れパターン	70
写真 4-10 No.1-4 1/50 加力時ひび割れパターン	70
写真 4-11 No.3-2 1/50 加力時ひび割れパターン	70
写真 4-12 No.3-4 1/50 加力時ひび割れパターン	70
写真 5-1 施工事例1 戸建て住宅の基礎梁	83
写真 5-2 施工事例2 保育園の基礎梁	99

第1章 序論

1-1 研究の背景

近年、戸建て住宅や工場などの小規模建築物の鉄筋コンクリート造布基礎の立上り部分とベース配筋、またはべた基礎の立上り部分（基礎梁）には、配筋に使う異形鉄筋を予め工場で溶接接合させて作るユニットを用いた組立配筋工法によることが多く見られるようになった。これらの立上り部分は、図 1-1 に示すように、縦の補強筋が梁の上下端の主筋の片側だけにある、所謂シングル配筋となっていることが特徴である。建築基準法施行令第 38 条の第 3 項及び第 4 項の規定に基づき、平成 12 年建設省告示第 1347 号には、具体的な立上りの形状や必要最低限の寸法および配筋方法が詳細に規定されている。そこには、主筋と縦の補強筋は、「緊結したものであること」と示されているが、上記のユニットは、この緊結を溶接することで、より信頼性の高いものへ実現したと言える。

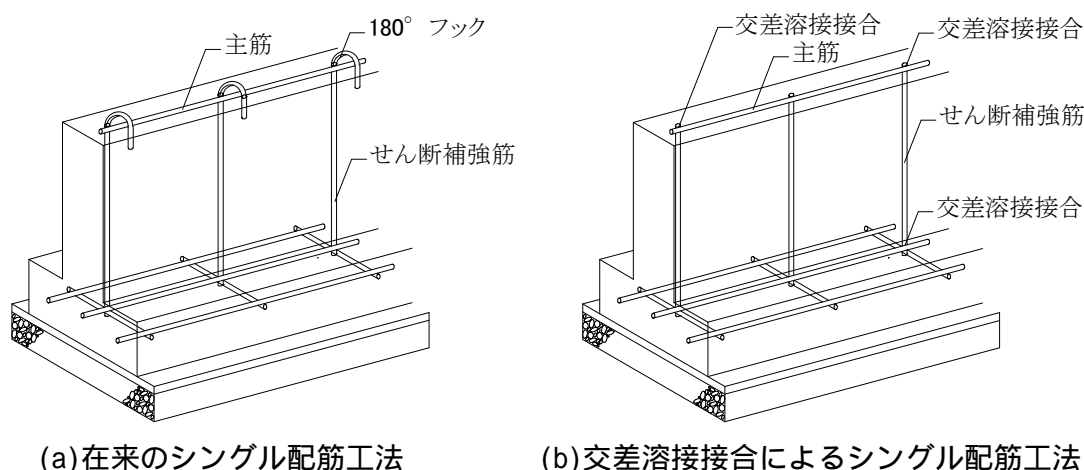


図 1-1 布基礎の配筋工法

ここで使用されている交差溶接は、JIS Z 3001 溶接用語におけるクロスワイヤ溶接の意味であり、JIS では、ワイヤ、丸棒などを互いに交差させて溶接するプロジェクション溶接の一種と定義されているのに対して、異形鉄筋を交差させて抵抗溶接により接合する方法である。緊結する異形鉄筋の交点へ電気抵抗による自己発熱と圧力を加えて熔融接合させる方法であり、溶接棒を用いずに瞬時に接着し、高い強度が得られるとされている。

鋼材の溶接は、紀元前より行われてきており現代に至るまで様々な進化を遂げているが、それに較べると鋼棒などの線材を溶接接合させる技術が実用化されてからは僅か 90 年程度であり、わが国において異形溶接鉄筋格子として規定されてから 60 年ほどでしかない。また、建築基準法では、鋼材やアルミニウムといった建築材料を溶接接合する場合の使用材料、溶接材料、溶接方法、溶接部の基準強度および許容応力度は、詳細に規定されているが、鉄筋の溶接に関する規定は見当たらない。前記のユニットを使用した基礎の立上り部分の工法については、2003 年ごろから大学の協力を得た民間会社で研究開発が進められて実用化し、建築基準法第 38 条の特殊の構造方法又は建築材料として(一財)日本建築センターより認定を受けて、限られたメーカーにより普及してきた技術である。

今日我が国では、建築並びに建設工事に係る技能労働人口は減少の一途をたどり、平成 9 年の 455 万人と比較して平成 30 年までに約 130 万人減少した。特に 55 歳以上が約 3 割で 29 歳以下は 1 割となっており、高齢化が今後さらに進行していく^[1.1]。施工現場では、機械化やロボットの導入が一部で実施され始めているようであるが、配筋作業は複雑であり、変更も多いため人手に頼ることが多いという環境には、変化が無い。このためにも、合理化、省力化は、避けられない。このような背景で施工現場の負担を減らすには、配筋量を減らす、作業を容易にして工数（手間）を減らす、完成までの時間を減らす、といった方法が考えられる。については使用材料の高強度化や部材そのものを減らすなど設計段階での工夫に直接影響することから、コストとのバランスをとることが困難である。と については、配筋工程を工場で行う工数を増加させることで実行可能である。これまでも住宅建築は、量産型のプレファブ化が進められてきたが、さらなる工夫が必要である。配筋をユニット化し、それを現場で組立てる工法も同様である。主筋と補強筋を溶接接合する技術に対してもさらなる進化が必要であると考える。

1-2 研究の目的

溶接により緊結された組立配筋工法の適用範囲を一般の梁へも拡張するための研究および開発が 2015 年頃から開始され、筆者も当初より参加してきた。開発の目標は、単に、前記のシングル配筋ユニットを並べただけの断面に基づく組立配筋工法ではなく、在来の 135°フック付きあばら筋と同等か、若しくはそれ以上の構造性能を持つ、図 1-2 に示すフックを付けずに溶接により主筋とあばら筋を緊結させた「複筋溶接組立配筋工法」の確立である。この工法の特徴は、予めあばら筋の位置が固定されることから、継手や主筋の定着部において却って現場での組立て作業に支障が生じることが無いように、U 字型あばら筋とキャップタイ

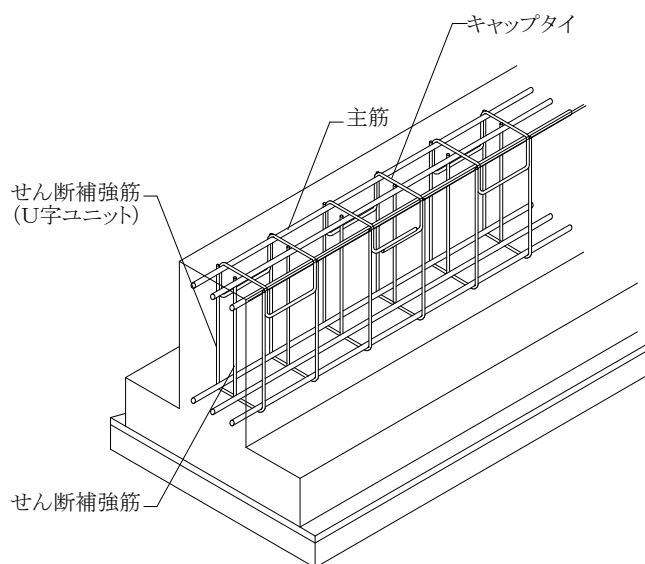


図 1-2 複筋溶接組立配筋工法

イを用いることである。U 字型あばら筋の四隅を抵抗溶接（スポット溶接）により主筋と接合させて、運搬や建物の平面形状などの条件を考慮して長さを決めてユニットにする。個々のユニットを現場へ搬入し、接続させて組み立てる。この工法を RC 構造一般の梁へ適用するまでには、数多くの解決する必要のある問題が多いが、当面は、建物の規模、構造種別、構造形式を絞って基礎梁へ適用していくこととした。しかしながら、鉄筋加工メーカーによる抵抗溶接の条件というのは、過去に行われた試作の試験結果を元に経験的に決定された条件の組合せであり、異形鉄筋の接合性能にどのような影響を及ぼしているか、どの程度のばらつきがあるかなど、基本的な情報は一般に明らかにされていない。本研究の目的は、組立配筋工法技術の基礎となる、U 字あばら筋と主筋の交差溶接部の強度と溶接条件の関係を把握するためにせん断試験を行うこと、さらに接合強度が RC 造梁のせん断性能に及ぼす影響を検討するため、接合強度を意図的に変化させた実大試験体の加力

実験を実施し、それらの結果に基づき、本組立配筋工法を用いた実用設計法、施工方法についても示すことである。

1-3 論文の構成

本論文は、全 6 章構成である。各章の概要を示す。

第 1 章 序論

本研究では、在来工法と同等の構造性能を満足する新しい「複筋溶接組立配筋工法」の確立を目的とすることを述べる。

第 2 章 既往の研究

国内外の異形鉄筋の開発の歴史、また溶接接合技術の歴史や研究について概観し、我が国で特に鉄筋の溶接について集中的に研究がなされた溶接金網について概説する。さらに本研究の位置づけを述べる。

第 3 章 異形鉄筋の交差溶接接合性能に及ぼす溶接条件の影響

現在利用されている溶接組立配筋工法では、過去に行われた試験結果を元に経験的に決定された溶接条件の組合せに基づいて、工場において溶接工程が行われている。溶接された異形鉄筋の接合性能は、設計上および現場監理上重要であり、RC 造の基本的な構造性能を発揮させる前提条件となる。本研究で行った、交差溶接部の強度と溶接条件を把握するために、電流値、通電時間、加圧力をパラメトリックに変化させて作製した試験片の交差溶接部のせん断実験を行った結果を述べる。

第 4 章 基礎梁の実大実験

住宅の複筋基礎梁で多く見られる寸法で、135°フック付き閉鎖型あばら筋を用いた従来の配筋方法で作製した試験体と新規に開発したキャップタイを用いた溶接組立配筋工法で作製した梁試験体について、一方向および建研式正負交番繰返し曲げせん断実験を行い、両者はほぼ同等の構造性能を有していることを確認できたことを述べる。

第 5 章 溶接組立配筋工法による施工例

本研究で筆者が提案したキャップタイと U 字形あばら筋ユニットを使用した複筋梁を実案件で施工した事例を 2 例報告する。1 例目は筆者が構造設計を担当した戸建て住宅に適用した事例で、現場での設計監理も行っている。2 例目は、鉄骨造保育園の基礎梁で、在来形式で設計された基礎梁を工期短縮とコストカットを目的にキャップタイと U 字形あばら筋ユニットを使用した複筋梁へ設計変更した結果、従来の配筋に較べて 4 日以上工期短縮を成功させている。筆者は、設計変更の際に設計協力を行った。

第 6 章 結論

本研究で得られた知見を総括して述べる。

第 1 章の参考文献

- [1. 1] 国土交通省：建設業の現状について，広報資料，2017

第2章 既往の研究

2-1 異形鉄筋の歴史と主な既往の研究

鉄の精錬技術が紀元前 1400 年ごろに発見されて以来、製鉄技術は主にヨーロッパで発展してきた。紀元前 2～3 世紀ごろには低シャフト炉が作られ人力ハンマーによる鍛錬が行われていた。中世になると、圧延を機械的に行う方法が考案され、18 世紀の産業革命においてイギリスで丸鉄、丸鋼、船釘および圧延針金を製造する機械が発明され大きく広がった。19 世紀中ごろになると欧米で圧延機が一般的になり 6.5～11.2 の丸鉄が製造され普及した。19 世紀後半にアメリカで異形棒鋼が数多く考案され、それらを用いたコンクリート構造の建物や橋は、1903 年のサンフランシスコ地震でその有効性が証明された^[2.1]。

我が国では、明治時代になり官営の製鉄所で丸鋼の生産が開始されたが、当初は輸入品の方が安価であったため、なかなか普及しなかった。異形棒鋼は、大正初期にアメリカから輸入され使用され始めたが、1923 年の関東大震災で建築中の内外ビルが倒壊した。震災豫防評議会の報告^[2.2]では、当時アメリカから輸入した異形鉄筋を使用した（リップバーとカーンバーを用いた）工法が問題とされ、戦後まで使用されることは無くなった。戦後、駐留軍向けに国産の異形鉄筋が使用され始めるようになり^{[2.3][2.4]}、1951 年に日本鉄鋼連盟内に異形鉄筋の試作と規格の検討のための研究会が発足し、本格的な部材実験の研究が進められた。小倉、武藤は、これを受けて国内向けの異形鉄筋の試作と形状寸法の提案を行った^[2.5]。また小倉らは、降伏点が 3.0tf/cm^2 から 5.0tf/cm^2 の高強度丸鋼を用いて梁の曲げ実験を行い、実験結果と e 関数を用いた終局強度の計算値がよく一致したことを報告した^{[2.6][2.7]}。1953 年に JIS G3110 異形丸鋼の規格が制定されると、以降急速に普及が始まった。その後も冷間または熱間絞り加工を施した鉄筋の研究などもあり^[2.8]、1964 年に JIS G3112 鉄筋コンクリート用棒鋼において、熱間圧延棒鋼として SR24、SR30、SD24、SD30、SD35、SD40、SD50 と規格降伏点で分類された。当時は、最小降伏点が 35kgf/mm^2 以上の鉄筋を高強度鉄筋と呼んでいた。1971 年に発刊された異形鉄筋コンクリート設計法^[2.9]では、異形鉄筋の機械的性質、部材実験を通じた付着・定着性能、梁、柱の曲げ及びせん断性能、フレーム及び耐震壁の性能、さらには具体的な設計例が示され、今日に至る普及の礎となった。

2-2 溶接接合の歴史と主な既往の研究

溶接の歴史は古く、紀元前 4000 年ごろ銅鉱石から銅が抽出され、紀元前 2500 年ごろの銅製の柱を銀ろう付けした墳墓の天蓋が出土したことから始まると言われている。そして、紀元前 1500 年ごろ錫の製法の確立を経て紀元前 1400 年ごろ鉄の精錬法が発見されると鉄器時代と呼ばれるようになり、紀元前 1000 年ごろには鉄製の武器のため、鉄の鍛接が行われていた^[2.10]。以下、国内・国外における溶接接合の開発の変遷を列記する。

- ・紀元前 600 年ごろ 鉄のろう付けが鉄製の台座に使われていた。
- ・紀元前 100 年ごろ ローマの鉛管では、はんだ付けされていた。
- ・はんだ材料は、1700 年ごろには現在とほぼ同じ鉛と錫の配合量で製造されていた。
- ・1800 年にアレッサンドロ・ボルタが銀と亜鉛を使った電池を発明。
- ・1807 年 SIR HUMPHREY DAVY が 2000 個のボルタ電池を使って連続した放電火花を継続させること

に成功 Electric Arc (弧状の放電光) と呼んだ。アークの語源。

- ・ 1840 年ジュールの法則 (電流と発熱量の関係)
- ・ 1856 年ジュール (J.P. JOULE) は、電気抵抗と熱に関係する実験をしていた時に、電気炉でワイヤの束を加熱していて、偶然に抵抗溶接が行われたことを知ったとされている。
- ・ 1862 年ウェーラ (F. WOEHLE) アセチレンの製造の実用化。
- ・ 1865 年ウイルデ (WELDE) アーク溶接の特許 (イギリス)
- ・ 1895 年シャンテリエ (LECHANTELIER) アセチレンと酸素の混合ガス (1:1) の火焰が、高温を出すことを発見する。
- ・ 1897 年ロビンソン (ROBINSON) が一方の板に突起を付けて通電加圧して接合する、プロジェクション溶接法を発明する。(アメリカ)
- ・ 1897 年ゴールドシュミット (H. GOLDSCHMIT) が、アルミニウムの微粉末と酸化鉄の混合物を開先内に入れ、点火剤を加えて接合するテルミット溶接法について特許を取る。これ以後、点火の問題が解決されたので、この方法は線や棒状の鉄をつなぐのに多く利用されることになる。
- ・ 1904 年 三菱長崎造船所が、英国のパーソンズ・マリン・スチーム・タービン社から、タービンの製作権を得て、鑄造設備一式を輸入したが、その中に鑄造用具として、カーボン・アーク溶接機が入っていたらしい。
- ・ 1905 年スタンダード溶接社が、はじめてシーム抵抗溶接機を使い、純ニッケルチューブを溶接する。(米)
- ・ 1907 年芝浦製作所が米国のジェネラル・エレクトリック社と技術提携した折に、輸入した生産設備の中に、わが国はじめての銅線接合用 (3mm まで) のバット溶接機が入っていたらしい。
- ・ 1907 年チェルベルヒ (OSCAR K JELLBERG) が、被覆アーク棒について特許を取る (スウェーデン)
- ・ 1909 年芝浦製作所が、米国トムソン社のものをモデルに国産ではじめてのバット溶接機 2 台を製作する。
- ・ 1910 年スエーデンのアガガス社から大日本アガ瓦斯製造所が燈台装置を輸入し、逓信省広島航路標識管理局に納入されているが、その中に溶解アセチレン・ポンペが入っている。これがわが国ではじめての溶解アセチレンである。そして、二年後に広島に溶解アセチレン工場が設立され、自給できることになる。
- ・ 1910 年フランスのエアリキッド社が、切断・溶接の普及を目的とし、日本オキシジェン及アセチレン会社を神戸に設立し、社長に日本海軍の戦艦 (松島、橋立、厳島) 設計者のベルダン (E. BERTIN) を任命する。そしてフランス領事館内で、日本ではじめての溶接技術講習会を三ヶ月を一期として開催する。このとき初参加した鐵道院新橋工場の 5 名が中心となり、後刻工場内に溶接部を設ける。
- ・ 1914 年 三菱長崎造船所が、スエーデンのチェルベルヒ社より被覆アーク溶接法について特許権を購入、その技術習得に現場から 3 名が大戦下のヨーロッパに出かける。そして、翌年から主として鑄物の補修にアーク溶接の適用をはじめめる。

現代の鋼材の溶接方法は、以下の表 2-1 のように大まかに分類される。

表 2-1 溶接方法による分類

溶接法	融接	アーク溶接	非消耗電極式	ティグ溶接 Tungsten Inert Gas (国際的には Gas Tungsten Arc) 放電用電極にタングステン、不活性ガスでシールド ほとんどの金属に適用
				プラズマアーク溶接
			消耗電極式	被覆アーク溶接
				マグ溶接 Metal Active Gas 溶接棒の代わりに溶接ワイヤを電極にした酸化性ガス中(化学反応し易い)でアーク溶接する 炭酸ガスもある 高品質、風に弱い
				ミグ溶接 Metal Inert Gas アルゴン、ヘリウムなど不活性ガスシールド 大半はアルミ用、ガスが高価
				セルフシールドアーク溶接
				サブマージアーク溶接 Submerged Arc Welding 粒状フラックスを噴霧した中でアーク溶接 (submerged 浸水した)
		ガス溶接		可燃性ガス(アセチレン、水素、プロパン、ブタン、LP、メタン、石炭ガス、都市ガス)と酸素を使って溶接
		レーザービーム溶接		レーザー光線を母材に当てて発熱させる 入熱量が少なく、エネルギー密度が高く制御もしやすい 微少な溶接や精密な溶接に適している
		電子ビーム溶接		電子を高速化して電磁コイルで収束させ母材に当てて高熱を発生させる
	エレクトロスラグ溶接		立て向き自動溶接法(1951 ソ連) 溶融スラグ(細粒の鉱物)の電気抵抗発熱を熱源 消耗ノズル式と非消耗ノズル式がある	
	圧接	抵抗溶接	重ね抵抗溶接	スポット溶接
				プロジェクション溶接 異なる厚さの板の厚板に突起を付けて溶接する
				シーム溶接
			突合せ抵抗溶接	アプセット溶接
				高周波誘導溶接
				突合せプロジェクション溶接
				フラッシュ溶接
				バットシーム溶接
		ガス圧接		アセチレンと酸素を使い、溶接部を加圧して溶接する
		摩擦圧接		加圧させながら摩擦熱で溶接する
		拡散接合		母材を密着させ、母材の融点以下の温度条件で、塑性変形をできるだけ生じないように加圧して接合面間に生じる原子の拡散を利用して接合する方法
		超音波圧接		母材を音極間に支持し、加圧しながら超音波を与え、その超音波振動を利用して行う固相接合 超音波溶接ともいう
		爆発圧接		火薬の爆発による衝撃圧力を利用して行う固相接合 爆発溶接ともいう。
		ろう接	ろう付け	
	はんだ付け		450 未満の低い融点をもつはんだを用いて母材をできるだけ溶解しないで行う接合方法 ソルダーリング(soldering)ともいう	

それぞれの溶接方法は、対象物の材料や位置によって組合せて使用される例が多い。例えば、水槽タンク本体の場合では、手溶接は被覆アーク溶接とTIG溶接、自動溶接はサブマージアーク溶接、半自動アーク溶接は、炭酸ガスアーク溶接が使用されているようである。^[2.10]

2-3 溶接金網と鉄筋格子に関する既往の研究

溶接金網(Welded Wire Fabric)とは、十字形に交差させて重ねた鋼線を重ね抵抗溶接で溶接接合させて製造する技術であり、1930 年ころからアメリカでの試験・研究が始まりである。1936 年 ASTM A 185-36 において初めて規格化され、1951 年 ACI Building Code 318-51 にも制定された。1960～1964 年 Kesler, Siess, Atlas 等が行なった丸鋼線溶接金網を使った部材の一連の研究を受けて、1963 年 ACI Code 318-63 が改定された。1965～1969 年 Lloyd, Kesler 等は、異形線溶接金網の定着・継手・曲げ補強性能・きれつ分散性能などの研究を行った。その後 1964 年 ASTM A-497 異形線溶接金網が初めて制定され、1971 年 ACI Code 318-71 においても改定された。

日本では、1958 年～1960 年頃に日本建築学会の有孔ばり小委員会において溶接金網による補強法が検討されはじめ、JIS G3551-1960 溶接金網・鉄筋格子が制定され本格的な普及が始まると、1968～1970 年に日本建築学会に溶接金網研究小委員会が設けられ、精力的に研究が進められた。黒正、滝口等は、溶接金網をスラブに適用した場合の曲げモーメントに対する実験を通じ、断面算定の方法は、一般のスラブと同様に可能であることを示した^[2.11]。狩野、青山、伊藤、岡田、菅野らは、線径 4mm～6mm の溶接金網の溶接点強度の試験方法について検討し、当時の JIS G3551 に規定された試験治具の場合、横筋の支持点と加力作用軸および縦筋の材軸がそれぞれ偏心しているため、縦筋に偏心曲げが付加されるなどの問題点が見つかり、試験治具の改良が必要であること^[2.12]、溶接点での鉄筋相互の溶込み深さが 20%以上必要であることを示した^{[2.13][2.14][2.15]}。さらに、定着性能について、破壊形式は 引張破壊、溶接破壊、溶接引張破壊の 3 パターンがあり、加力方向の鉄筋(縦筋)が引張破壊するためには、a)縦筋と横筋との径差を 2mm 以内とし、b)横筋を 2 本以上、c)埋込長を横筋間隔の 1.5 倍以上とすることが望ましいとした。また継手に関しては、幅 203mm、高さ 102mm、長さ 1524mm と扁平な梁に線径 4mm と 6mm の溶接金網をシングル配筋し、純曲げ区間に重ね継手を 1 力所設けて 4 点曲げ試験を行った。その結果、横筋 1 コマ+15cm の重ね長さがあれば継手外での母材破断が生じ、一般の丸鋼より伸び能力がかなり小さいため注意が必要であるとしている^[2.16]。なお、JIS の試験治具については、1980 年に加力作用軸を縦筋の材軸に合わせるように改定された^[2.17]。

1971 年の日本建築学会 RC 規準に丸鋼線溶接金網に関する規定、許容応力度が初めて示され、一般的に設計が行われるようになった。その後も継手や定着に関する文献が今日までに散見されている。それらは主にスラブや壁用であるが、梁のせん断補強へ利用する場合の研究もある。

RC 規準 2018 年版^[2.18]では、第 4 条の 4. 溶接金網として以下の規定があり、適切な定着方法をとれば、あばら筋への利用も認めている。

4. 溶接金網

溶接金網は、スラブ筋として利用され、また、適切な定着法をとれば、あばら筋・壁筋などせん断補強筋として利用できる。鉄線には降伏点の規定はなく、引張強さが 490 N/mm^2 以上と規定されているが、これは降伏点として約 390 N/mm^2 に相当する。品質として、交点溶接部のせん断強度の確保は重要であり、1 溶接点あたりのせん断強度は主筋方向の鉄線の断面積あたり 250 N/mm^2 以上が必要である。

2-4 溶接組立配筋工法に関する既往の研究

建築の世界で、鉄筋コンクリート造梁へ応用した溶接組立配筋工法としての体系的な研究が行われ始めたのは、2000 年ごろからである。これらは、梁の主筋は上下 1 本づつが主で、軸方向にあばら筋を縦に 1 列に等間隔で並べて主筋と溶接接合する、所謂シングル配筋の梁である。松崎らは、組立鉄筋ユニットの構造性能を曲げ実験、せん断実験、継手実験から、シングル配筋した梁は、耐力評価に関しては従来の梁の設計式を適用できるが、靱性能評価には最大耐力後の脆性的な耐力低下を考慮する必要があるとしている^{[2.19][2.20][2.21]}。また、千田等は、主筋がシングルに配筋された梁の上面割裂破壊と補強方法の提案^[2.22]、開口を有する場合の補強方法の提案^[2.23]、割裂破壊と補強方法の評価^[2.24]、既存のシングル配筋梁の耐震補強方法の提案^[2.25]、靱性能に関する実験^[2.26]、割裂補強効果と付着割裂強度について^[2.27]、提案式の検証と割裂補強効果に関して^[2.28]、また独自の評価式が提案されている^{[2.29][2.30]}。

2-5 本研究の位置づけ

本研究の位置づけは、

現場施工の合理化、省力化を目的として、異形鉄筋同志の溶接接合技術とキャップタイを用いた複筋溶接組立配筋工法を提案する

これまで鉄筋加工メーカーが過去の経験に基づいて行ってきた異形鉄筋のスポット溶接の諸条件を明確にする

キャップタイの形状を新たに提案する

さらに複筋溶接組立筋工法が現実利用されるように、

これまで行われた一連の実験結果に基づき、実物件に適用させる

建築基準法の特別な調査研究に基づく工法としての認定を受け、広く設計手法を公開すること

以上の全てに対応することが、本研究の成果であると考えている。

第2章の参考文献

異形鉄筋の歴史と主な既往の研究

- [2. 1] 大内俊二：小形棒鋼概論，毎日新聞社，1977. 5
- [2. 2] 震災豫防評議會：震災豫防調査會報告第百號丙下 pp.211～401 1926 10.13
- [2. 3] 豊島光夫：コンクリートと施工法その移り変り(その6 材料における移り変り 鉄筋) コンクリート工学，Vol.18，No.11，pp.75～83，1980.11
- [2. 4] 池田尚治：鉄筋の高強度化・太径化への歩み コンクリート工学，Vol.31，No.4，pp.89～94，1993.4 田中健治郎：鉄筋コンクリート構造の黎明(豆知識) コンクリート工学，Vol.40，No.9，pp.17～21，2002.9
- [2. 5] 小倉弘一郎、武藤清：新形異形鉄筋のあり方 日本建築学会関東支部研究報告14号、pp.175～178、1951.9
- [2. 6] 小倉弘一郎、武藤清、梅村魁：強化鉄筋コンクリート梁の実験的研究その1 実験結果 日本建築学会論文報告集45号、pp.64～69、1952.12
- [2. 7] 小倉弘一郎、武藤清、梅村魁：強化鉄筋コンクリート梁の実験的研究その2・実験結果の検討 日本建築学会論文報告集46号、pp.37～43、1953.3
- [2. 8] 武藤清、小倉弘一郎、亀田登与三郎、池田昭男：捩り強化鉄筋の機械的性質および付着強度に及ぼす捩り加工度の効果 日本建築学会論文報告集66号、pp.465～468、1960.10
- [2. 9] 異形鉄筋コンクリート設計法研究会編：異形鉄筋コンクリート設計法 技法堂，1971.8

溶接接合の歴史と主な既往の研究

- [2.10] 手塚敬三：溶接のおはなし 日本規格協会、1981

溶接金網と鉄筋格子に関する主な既往の研究

- [2.11] 黒正清治、滝口克己、深井豊、萩野英也、平岩研三：溶接金網を用いた鉄筋コンクリートスラブの曲げ性状に関する実験報告、日本建築学会関東支部研究発表会、1968.6
- [2.12] 狩野芳一、青山博之、伊藤勝：溶接金網を使用する鉄筋コンクリート部材の力学的性状に関する研究(その1 溶接金網の強度) 日本建築学会関東支部第39回研究発表会、pp.199-202、1968.11
- [2.13] 岡田恒男：溶接金網を使用せる鉄筋コンクリート部材の力学的性状に関する研究(その2 定着強度) 日本建築学会関東支部第39回研究発表会、pp.203-206、1968.11
- [2.14] 青山博之、伊藤勝、菅野忠：溶接金網を使用せる鉄筋コンクリート部材の力学的性状に関する研究(その3 継手の強度) 日本建築学会関東支部第39回研究発表会、pp.207-210、1968.11
- [2.15] 狩野芳一、大西紀正：溶接金網で補強した梁のせん断破壊性状 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1357～1357、1973.10
- [2.16] 竹本俊雄：型枠と鉄筋のユニット化を中心とする鉄筋コンクリート構造物の構造性能改善と生産性向上に関する研究(その2 ラーメン構造に於ける溶接金網配筋モデル) 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.171～172、1974.10
- [2.17] 狩野芳一：溶接金網を用いた鉄筋コンクリート構造(主として定着と継手について) コンクリート工学、Vol.13、No.10、pp.1～14、1975.10

[2.18] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2018、2018.12

溶接組立鉄筋工法に関する既往の研究

- [2.19] 松崎育弘、中野克彦、金子順一、太田勤、田嶋光春、園部泰寿：組立鉄筋ユニットを用いた RC 造基礎梁の構造性能に関する実験的研究（その 1. 曲げ実験） 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.281～282、2001.9
- [2.20] 金子順一、中野克彦、松崎育弘、太田勤、田嶋光春、園部泰寿：組立鉄筋ユニットを用いた RC 造基礎梁の構造性能に関する実験的研究（その 2. せん断実験） 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.283～284、2001.9
- [2.21] 平野直人、中野克彦、松崎育弘、小杉雅男、田嶋光春、園部泰寿：組立鉄筋ユニットを用いた RC 造基礎梁の構造性能に関する実験的研究（その 3. 継手実験） 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.285～286、2001.9
- [2.22] 千田啓吾、鈴木美奈子、杉山智昭、中野克彦、松崎育弘：主筋がシングルに配筋された RC 梁部材の構造性能に関する実験的研究（その 1 上面割裂破壊とその補強方法） 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.203～204、2004.8
- [2.23] 杉山智昭、千田啓吾、鈴木美奈子、中野克彦、松崎育弘：主筋がシングルに配筋された RC 梁部材の構造性能に関する実験的研究（その 2 開口が存在する場合の補強方法に関して） 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.203～204、2004.8
- [2.24] 千田啓吾、武藤剛、鈴木美奈子、杉山智昭、中野克彦、松崎育弘：主筋がシングルに配筋された RC 梁部材の構造性能に関する実験的研究（その 3 割裂破壊とその補強方法に関して） 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.91～92、2005.9
- [2.25] 武藤剛、千田啓吾、鈴木美奈子、杉山智昭、中野克彦、松崎育弘：主筋がシングルに配筋された RC 梁部材の構造性能に関する実験的研究（その 4 既存シングル配筋部材に対する耐震補強工法に関して） 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.93～94、2005.9
- [2.26] 宮川欣也、武藤剛、鈴木美奈子、杉山智昭、松崎育弘：主筋がシングルに配筋された RC 梁部材の構造性能に関する実験的研究（その 5 せん断・靱性実験の概要及び結果） 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.317～318、2006.9
- [2.27] 武藤剛、宮川欣也、鈴木美奈子、杉山智昭、松崎育弘：主筋がシングルに配筋された RC 梁部材の構造性能に関する実験的研究（その 6 割裂補強効果と付着割裂強度） 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.319～320、2006.9
- [2.28] 武藤剛、宮川欣也、杉山智昭、松崎育弘：主筋がシングルに配筋された RC 梁部材の構造性能に関する実験的研究（その 7 提案式の検証と割裂補強効果に関して） 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.279～280、2007.8
- [2.29] 松崎育弘、中野克彦、杉山智昭：主筋がシングルに配筋された RC 梁部材の構造性能に関する実験的研究 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1013～1014、2008.9
- [2.30] 中野克彦：シングル配筋された RC 梁部材の構造性能評価に関する研究 新潟工科大学研究紀要第 9 号 2004,12

第3章 異形鉄筋の交差溶接接合性能に及ぼす溶接条件の影響

3-1 目的

溶接接合による鋼材の接合部には、母材と同等かそれ以上の強度が期待される。溶接接合の強度は、鋼材の材質や形状、溶接方法の種類、それぞれの溶接方法に応じたパラメータ、作業場の環境などに影響を受けるとされている。

現行の溶接組立配筋工法においては、過去に行われた試作の試験結果を元に経験的に決定された条件の組合せに基づいて溶接工程が行われており、前述の要因の組合せが異形鉄筋の接合性能にどのような影響を及ぼしているか、どの程度のばらつきがあるかなど、基本的な情報は一般には明らかではない。

溶接された異形鉄筋の接合性能は、設計上および現場監理上重要であり、鉄筋コンクリート（以下、RC）造の基本的な構造性能を発揮するための前提条件となる。本研究では交差溶接部の強度と溶接条件の関係を把握するために、電流値、通電時間、および加圧力をパラメトリックに変化させて作製した交差溶接部のせん断試験を行った。

溶接部の強度と伸び性に係る溶接条件に影響を示す資料や文献は、材軸方向の突合せ溶接に関するものが多く、異形鉄筋を交差させて抵抗溶接により接合する場合の文献は極めて少ない。

本章では、異形鉄筋を交差させて溶接する場合の溶接条件と接合部の強度との直接的な関係について、溶接条件をパラメトリックに変化させて製作した試験体の接合点せん断試験を通じて明確にすることを目的とする。

3-2 異形鉄筋と抵抗溶接の溶接条件

異形鉄筋は、鉄筋コンクリート構造の大規模化、使用材料の節減を目的として、丸棒の付着力を補う方法として考案された。異形鉄筋に要求される性能としては、引張強度・降伏点、伸び性、切欠き靱性、曲げ加工性、溶接性、付着性能である。丸棒では、曲げ加工性については問題は少なかったが、異形鉄筋では現場施工性にも影響を及ぼす。異形鉄筋の引張強度・降伏点を実現するためには、化学的な成分調整をして熱間圧延するか、熱間圧延したものにさらに冷間加工を行うか何れかである。化学的な成分調整として、炭素含有量を増加させると溶接性、切欠き靱性、曲げ加工性を損なうことになり限界があるので、さらにフェライトに Si、Mn、Al の 3 元素を固溶させて調整している。

一般的に鉄筋の耐力及び剛性上の危険温度は 450℃ 内外が標準とされており、この程度では除熱すると元に戻ると言われている^[3.1]。ところが、アークストライク（瞬間的にアークを飛ばし直ちに切ること）などのような、不用意に鉄筋の一部を 450℃ を超えて加熱し急冷させると、引張強度・降伏点、伸び性は、著しく損なわれる。したがって、鉄筋を溶接する場合には、鉄筋の自身の温度管理が重要となる^[3.2]。

溶接組立配筋工法において広く利用されている方法は抵抗溶接であり、このうちの接合界面スポット溶接である。これは、重ね合わせた鉄筋の接触する交点へ加圧しながら大電流を通電し、電気抵抗による自己発熱（抵抗発熱と呼ぶ）で火花を発生させて母材の接合界面を溶融し接合する方法であり、溶加材（アーク溶接で使用する溶接棒など）を用いないという特徴がある。近年、多用さ

れている高強度せん断補強筋として利用されている溶接方法はアブセット溶接（突合せ抵抗溶接）であるが、これは、加熱、加圧させる点は同じであるが母材の接合界面が未溶融のまま接合される方法であり、スポット溶接とは異なる。

スポット溶接の接合強度を支配する要因として、一般的には、

電流量

通電と冷却時間

溶接点への加圧力

電流密度

入熱と放熱のヒートバランス

であるとされている^[3.3]。

これらのうち、接合強度に大きな影響を与える要因は、電流量、通電と冷却時間、および加圧力の組み合わせであるとされている。特に、スポット溶接機を用いた自動溶接の場合には、加圧、入熱、通電量、冷却（放熱）を時間的に制御して行う。このような動作順序と時間を自動的に制御することをシーケンス制御と呼んでいる。一般的なシーケンス制御のイメージを図 3-1 に示す^[3.4]。図の(a)シングルインパルス通電は、一般的な方法で特に予熱のための過熱を行わない特徴がある。(b)パルセーション制御は、ほぼ同程度の電流量を繰り返し通電する方法で厚板の溶接や多数枚重ねた積層板の溶接を行う場合に適用される。(c)上昇・徐冷制御は、スローブコントロール通電とも呼ばれ、アップスローブ（波頭制御）およびダウンスローブ（波尾制御）のように電流量を制御する方法で被溶接材の表面状態が悪い場合に表ちりや中ちり、割れ防止のために行う方法である。(d)焼き戻し制御は、加熱後に一旦冷却して再び過熱し溶接部の焼き戻し(テンパ)処理を行う方法で、高炭素鋼や靱性の回復のために行う。本研究は、(d)の 3 回通電による焼き戻し制御による方法を対象とした。

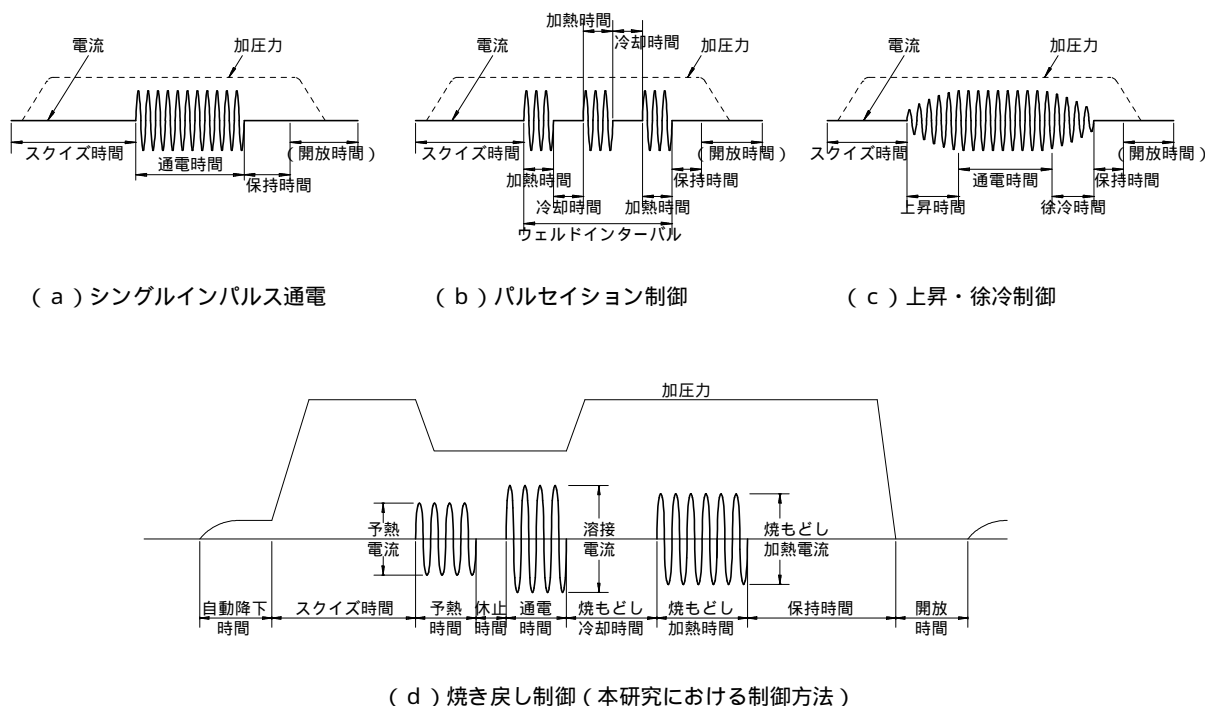


図 3-1 スポット溶接機によるシーケンス制御のイメージ^[3.4]

ここに、予熱は、溶接点温度の急上昇および急冷による低温割れの防止、硬化組織の生成防止、延性・靱性など機械的性質の向上、変形・残留応力の低減およびブローホールの発生防止などを目的に行うとされている。また、焼き戻しは、入熱により不安定化した組織を安定化させて脆化を防ぎ、溶接部の強度と伸びを母材に近づけることが可能であるとされている。予熱のための通電を「1次通電」、その後は「2次通電」、「3次通電」と呼び、それぞれの時間と放電を「1次通電時間」「1次放電」、「2次通電時間」「2次放電」・・・と呼んで区別する。このように通電と冷却を繰り返すことをマルチインパルス制御とも呼ぶ。本研究では、特に2次通電を主通電と呼び、溶接接合部を溶融させるために行う。3次通電は、後熱通電と呼び、焼き戻しのために行う。

溶接点への加圧は、表散りや中散りを発生させずに電極から母材へ電流を供給する役目と通電後、溶融金属を加圧しながら冷却することで、溶融部の内部欠陥を減少させる役目がある。散りはJIS Z3001 溶接用語では、「重ね抵抗溶接において、母材が局部的に過熱されて溶融飛散する現象又はその金属。電極チップ及び接する母材の外表面に生じる表散りと、母材間に生じる中散り」とされている。図3-2は、マクロ試験の事例である。接合部が十分に溶け込んでおり、ナゲットの状態やあばら筋の左右には表散りが見られる。

マクロ試験 D19-D10 (三栄商事資料)

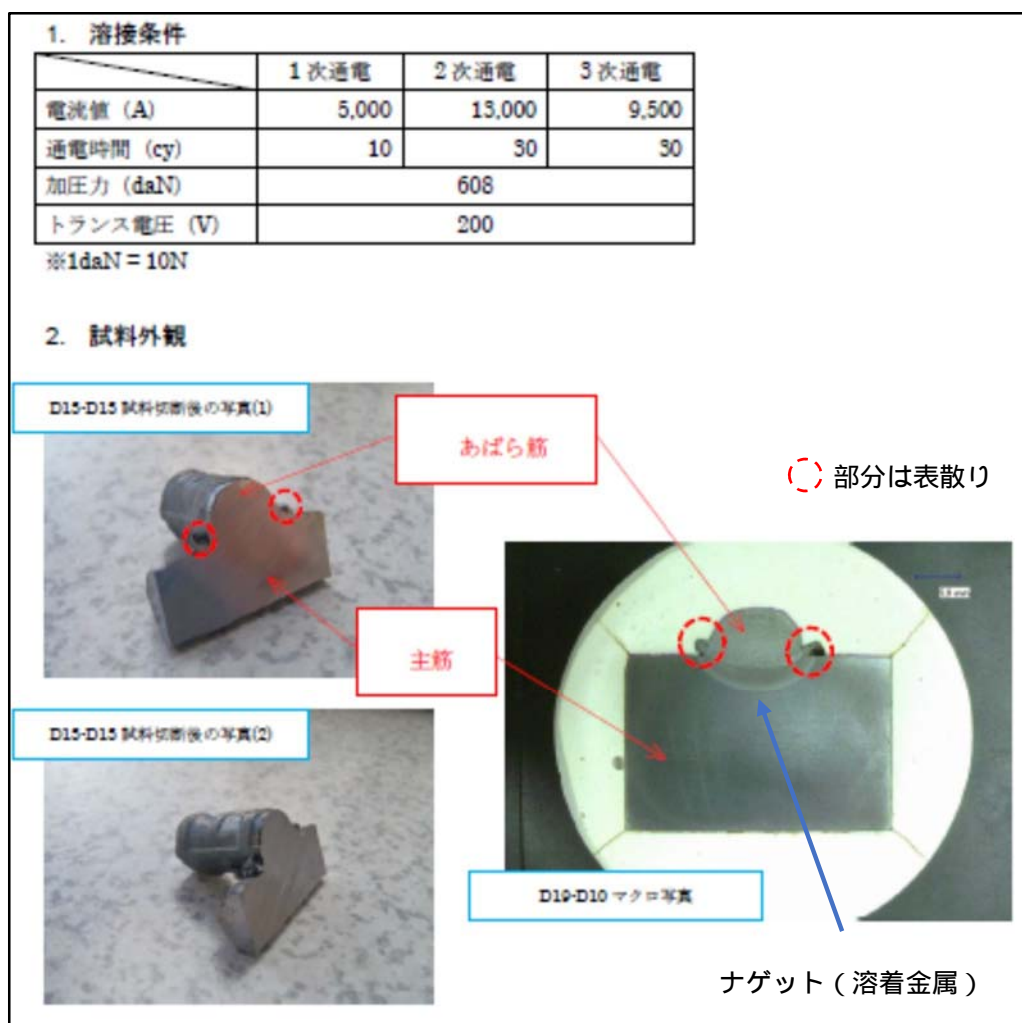


図 3-2 マクロ試験の事例

母材とナゲット（溶融凝固部）および熱影響部の位置を図 3-3 に示す。溶接電流は、加圧力が作用した部分の接合面を通して流れる。通電の初期では、鉄筋同志の接触する範囲は狭く電流密度も高いが、発熱温度の上昇と共に溶融部分が膨張し、この部分での加圧力と被溶接部の耐力とのつり合いに依って通電回路の面積が決まってくる。一般的に加圧力が大きいほど接触面積が増えるので、溶接電流が一定ならば、電流密度が低くなり、ナゲットが小さくなり接合強度が低下するとされている。加圧力を上げてそれに見合うように電流量を増加させると強度も増加するとされている。中散りが発生するような場合は、主に電流値に対して加圧力が少ないか、あるいは電流値と加圧力のバランスがとれていても通電時間が長すぎる場合に発生するとされている。表散りは、電極に接する側にできる散りで母材表面の塗料などの不純物が原因とされ、接合強度には影響しない。

熱影響部は、ナゲットの周囲で溶接時の熱による膨張と収縮による塑性変形を受けて残留応力を生じる部分である。高温で発生した溶接欠陥などの先端部は、冷却途上で鋼の青熱脆性温度域における残留応力の影響で局所的に著しい塑性ひずみを受けることになる。このひずみが冷却後の材質を劣化させることがあり、高温予歪脆化（こうおんよわいぜいか）と呼ばれている。特にナゲットのすぐ周囲にあるコロナボンドでは、ナゲットが十分に形成された場合でもこの部分で破壊する場合がある。^[3.2]

母材同士が接触した際の外径位置から相互に溶け込むことにより寸法が減じることを「据込」と呼ぶ。図 3-3 は、あばら筋が溶け込む際の据込寸法を示している。据込寸法の入熱前の外形寸法の比を「据込度」または「据込率」と呼ぶ。据込度は、約 15～25%程度を目標に溶接条件を決めるとよいとされている。

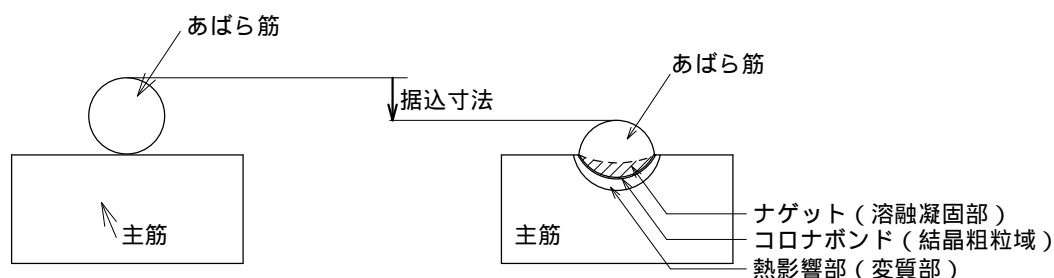


図 3-3 ナゲット、コロナボンド、熱影響部、据込寸法

3-3 試験体の種類と実験シリーズの内容

鉄筋の交差溶接部の接合強度は、JIS G 3551-2005「溶接金網及び鉄筋格子」^[3.5]の溶接点せん断試験方法に準じた試験により求めることが多い。本研究においても、異形鉄筋を十字に溶接した試験片を治具と共に引張試験機へセットして引張加力を行い（写真 3-1、図 3-4）最大荷重の計測および破壊状況（溶接点の剥離、破断または母材の破断）の観察を行った。実験は、溶接条件および対象とする鉄筋径を変化させて 3 シリーズ行った。

第 1 シリーズは、電流値と加圧力の大きさを一定にして通電時間を変化させた場合、第 2 シリーズは、通電時間を一定にして電流値と加圧力を変化させた場合とした。なお通電時間は、交流電源のサイクル数（例えば、50Hz で 0.2 秒の場合は 10 サイクル）で表す。それぞれのシリーズで対象とした主筋とあばら筋の組合せは、主筋が D16、D19、D22、あばら筋が D10、D13 で、第 1 シリーズ

合計 360 体、第 2 シリーズ合計 1350 体である。D10、D13、D16 の鋼種は SD295A、それら以外の鉄筋の鋼種は SD345 である。第 3 シリーズでは、主筋を D22、D25、あばら筋を D13 として第 2 シリーズと同じく通电時間を一定にして電流値と加圧力を変化させた場合とし、合計 450 体である。第 3 シリーズの鉄筋は第 1、第 2 シリーズとは別ロットの製品である。

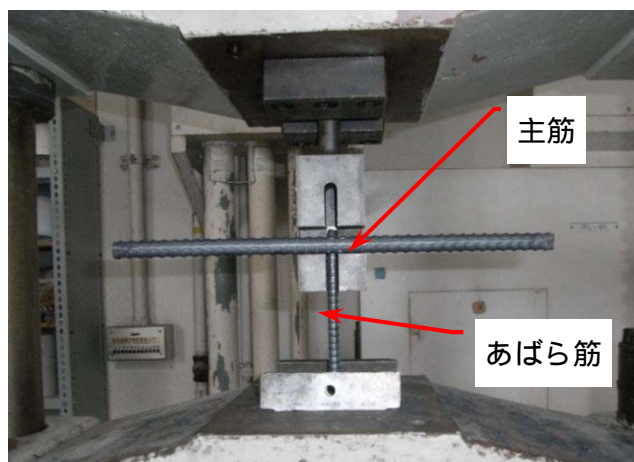


写真 3-1 溶接点せん断試験

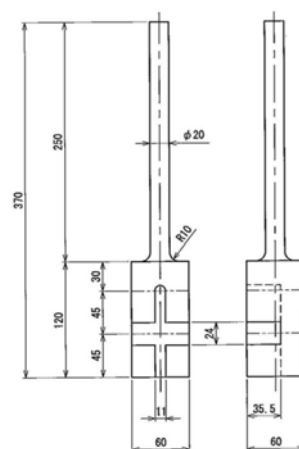


図 3-4 溶接点せん断試験用治具

各シリーズ共通の溶接条件を説明する。1 次通电は予発熱温度が約 300 以上となるように、使用するスポット溶接機の仕様から経験的に電流値 5,000A で 10 サイクルとした。3 次通电の電流値は 2 次通电の約 75%とした。2 次通电の電流値の設定方法を説明する。抵抗溶接における目標温度を、鉄筋の熔融温度である 1530 および電極チップへの放熱ロスを考慮して、1800 と仮定した。単位体積当たりの発熱量 q は、目標温度 に鉄筋比熱 c と鉄筋密度 を乗じて求められ、目標発熱量 Q は、単位体積当たりの発熱量 q に加熱体積 V を乗じて求められる。加熱体積は、2 本の鉄筋の交差点に集中する電流経路の面積 S に電極チップ間距離となる平均鉄筋径を乗じて求めた（図 3-5）。電流経路の面積 S は、通電路を直径 $d_c = 0.5\text{cm}$ の円と仮定した。通電路の径は、加圧力 P と溶接部の降伏応力度 σ_y のつり合いから求められるとされており^[3,3]、加圧力を 5kN、降伏応力度 $\sigma_y = 295\text{N/mm}^2$ とすると 0.66cm となる。加電圧 E を 1.0V、標準の 2 次通电時間を 10 サイクル（0.2 秒）とし、ジュールの法則から電流値 I を(1)～(5)式より求めた。

制御電流の目標値 I_e は、100A の位を 500A きざみの近い値で丸めた。なお、あばら筋が D10 の場合は、電流値を過度に大きくするとナゲットの周囲に中散りと呼ぶ欠陥が発生して溶接強度が低下する懸念があったため、14000A を超えない範囲で設定した。

$$q = \theta \cdot c \cdot \sigma \quad (1)$$

$$Q = q \cdot V \quad (2)$$

$$V = S \cdot d = d_c^2 \cdot \pi / 4 \times d \quad (3)$$

$$I = 4.19Q / E / t \quad (4)$$

$$d_c = \sqrt{\frac{8P}{\pi \cdot \sigma_y}} \times 10^{-1} \quad (5)$$

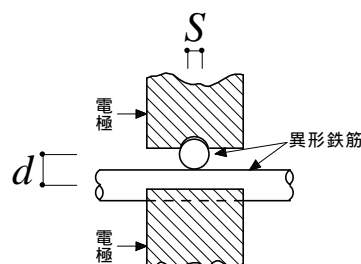


図 3-5 交差溶接部の鉄筋と電極位置

ここで、

q : 単位体積当たりの発熱量 (cal/cm³)
 θ : 目標溶融温度 1800 (°C)
 c : 比熱 0.16 (cal/ g)
 σ : 密度 7.6 (g/cm³)
 V : 加熱体積 (cm³)
 S : 加熱面積 電流路面積 (cm²)
 d : 鉄筋の呼び径の平均 (cm)
 E : チップ間実効電圧の基準値 1.0 (V)
 t : 2次通電時間の標準値 0.2 (sec)
 H : 抵抗発熱エネルギー = 4.19Q (J)
 d_c : 通電路の直径
 P : 加圧力= 3.0(kN)
 σ_y : あばら筋の降伏応力度=295N/mm²

表 3-1 発熱量計算の諸元

チップ間実効 電圧基準値 $E(V)$	固有抵抗 ρ_o ($\mu \cdot \Omega/cm$)	比熱 c (cal/°C/g)	密度 σ (g/cm ³)
1.0	15	0.16	7.6
降伏応力度 $\sigma_y(N/mm^2)$	加圧力 $P(N)$	通電経路直径 $d_c(cm)$	加熱面積 $S(cm^2)$
295	3000	0.50	0.196
2次通電時間 標準値 $t(sec)$	目標溶融温度 $\theta(^{\circ}C)$	単位体積当たり 発熱量 $q = \theta \cdot c \cdot \sigma$ (cal/cm ³)	
0.2	1800	2700000	

これらの計算結果を、主筋およびあばら筋の組合せごとに表 3-2 に示す。また今回の試験片に使用した鉄筋の引張試験結果を表 3-3 に示す。試験片の製作時期により使用鋼材のロットが異なるため試験結果に幅がある。

表 3-2 鉄筋の組合せごとの目標発熱量と 2 次通電 基準電流値

主筋呼び径	dm	mm	16	19	22	16	19	22	25
あばら筋呼び径	dw	mm	10	10	10	13	13	13	13
平均径 $d = (dm+dw)/2$	d	cm	1.30	1.45	1.60	1.45	1.60	1.75	1.90
加熱体積	V	cm ³	0.255	0.285	0.314	0.285	0.314	0.344	0.373
目標発熱量	Q	cal	559	623	688	623	688	752	817
抵抗発熱エネルギー	H	J	2347	2617	2888	2617	2888	3159	3430
2次通電電流	I	A	11733	13086	14440	13086	14440	15794	17148
2次通電採用値	I_e	A	11500	13000	13500	13000	14500	16000	17000

表 3-3 使用鉄筋の引張試験結果

鉄 筋	呼び径	降伏点 (kN) <MPa>	引張強さ (kN) <MPa>	伸び (%)
主筋	D16	70.4~74.9 <354~376>	99.0~108.3 <497~544>	22.2~23.8
	D19	111.2~114.3 <400~411>	159.3~163.7 <573~589>	20.6~23.0
	D22	149.2~160.7 <395~425>	217.3~229.2 <575~606>	21.4~22.4
あばら筋	D10	24.3~27.2 <341~381>	34.7~37.0 <487~519>	—
	D13	44.1~45.0 <347~354>	61.9~63.4 <487~489>	—

3-4 第1シリーズの溶接点接合強度試験

第1シリーズの対象鉄筋は、あばら筋がD10、D13の2種類、主筋がD16、D19、D22の3種類、2次および3次通電時間をそれぞれの実験パラメータとした。通電時間は、標準の10サイクルに対して5サイクルから30サイクルまで、5サイクル刻みの6通りとした。加圧力は、5kNで一定とした。同一実験因子で各10体の供試体を作製し、合計360体の実験を行った。第1シリーズの実験パラメータの一覧を表3-4に、共通因子を表3-5にそれぞれ示す。

表 3-4 第1シリーズのパラメータ

呼び径		電流値 (A)			2次および3次 通電時間 (サイクル)
肋筋	主筋	1次	2次	3次	
D10	D16	5,000	11,500	8,625	5
	D19		13,000	9,500	10
	D22		13,500	10,125	15
D13	D16	5,000	13,000	9,700	20
	D19		14,500	10,800	25
	D22		16,000	12,000	30

表 3-5 第1シリーズの共通要因

共通要因	仕 様
主筋材料	SD295A(D16), SD345(D19, D22)
あばら筋材料	SD295A(D10, D13)
1次通電の電流値と通電時間	5,000 A 10 サイクル



(a) 溶接部破断
(溶着金属の破断もしくは剥離)

(b) 熱影響部破断
(溶接部近傍の脆化破断)

(c) あばら筋の母材破断
(溶接部以外の破断)

写真 3-2 破断形式

交差溶接部のせん断試験における典型的な破壊状況は、(a)溶接部破断（溶着金属の破断もしくは剥離）(b)熱影響部破断（溶接入熱による溶接部近傍の脆化破断）(c)あばら筋の母材破断（溶接部以外の破断）である。これらの破壊の例を写真 3-2 に示す。溶接部破断は、ナゲット（溶着金属）それ自体が破断する場合かあるいは母材への溶け込みが不十分なために剥離する場合である。熱影響部破断は、ナゲット周辺の溶接部で破断する場合である。熱影響部は、高温から冷却する間に材料特性が変化して脆化し、膨張と冷却による収縮で塑性変形を受けて残留応力が生じているため、溶接欠陥となり、引張強度の低下および柔軟性が喪失している部分である。いずれにせよ、あばら筋の母材破断以外は、不安定な性能となる。

3-5 第 1 シリーズの溶接点接合強度試験の結果

交差溶接部の各試験体の 2 次通電時間と最大荷重の関係を図 3-6 に示す。全体的に通電時間が長くなるに従って最大荷重値のばらつきが減少し、あばら筋の破断荷重値へ収束する。図の水平破線は、あばら筋の降伏点を示す。母材以外の破壊形式でも降伏点を超える荷重を示しているが、あばら筋 D10 のシリーズでは、それらはほとんどがナゲット近傍の熱影響部で破断している。一方 D13 では、25 サイクル以上になると、母材の破断荷重に近い値で母材以外の位置で破壊する試験体が見られた。例えば主筋が D19 では、表 3-3 に示す D13 の降伏点 44.1kN に対して、写真 3-3 のように 57.3kN で溶接部剥離したものや、D22 では、写真 3-4 のように 64.0kN で熱影響部破断したものがあつた。これらはあばら筋の降伏点を大きく超過しているものの絞りや局所的な伸びが見られないことから破断位置に応力が集中し、大きな変形を伴わずに脆性的に破壊したと考えられる。

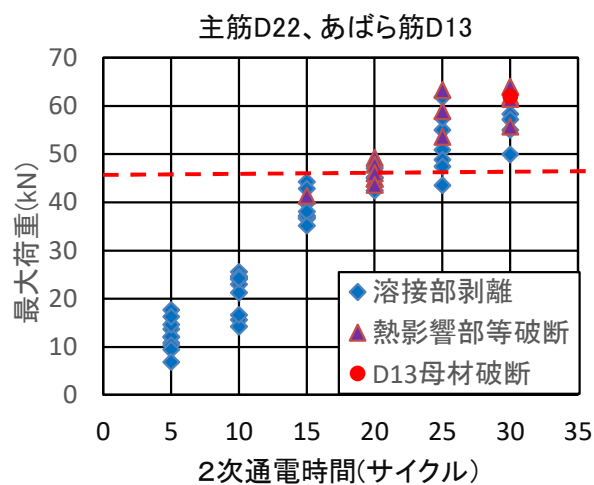
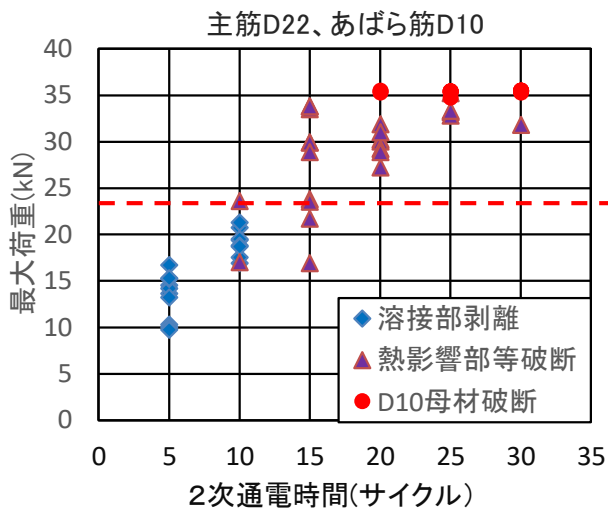
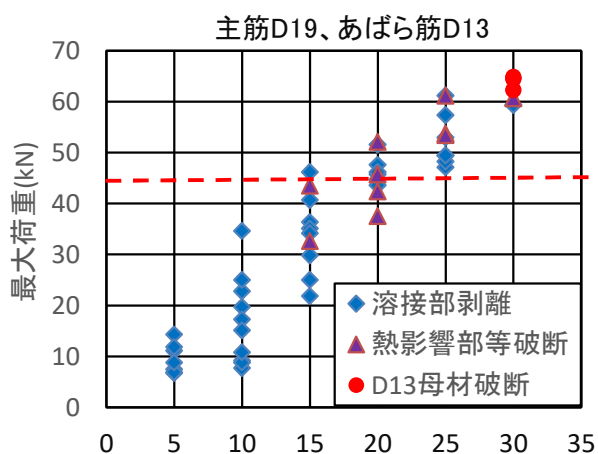
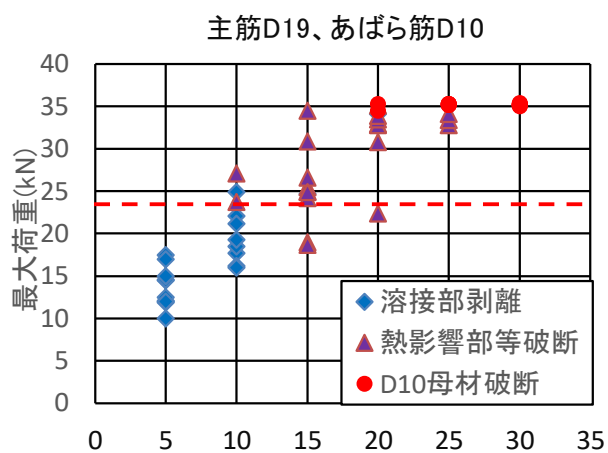
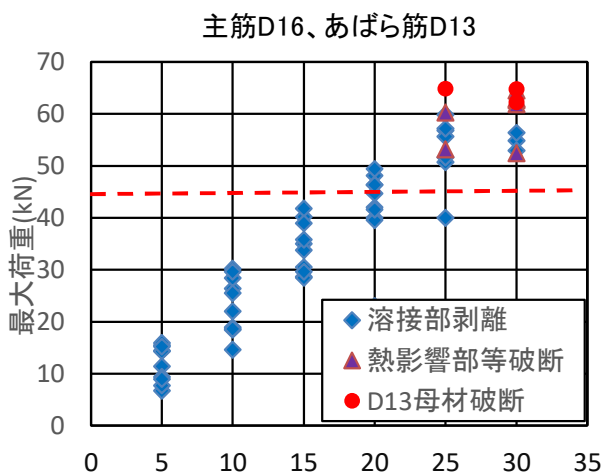
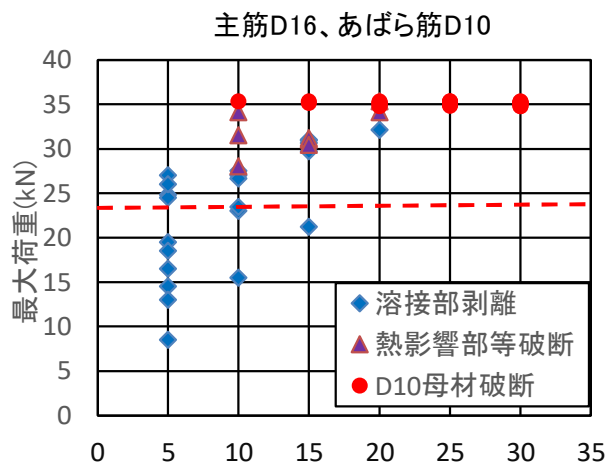


図 3-6 2次通電時間と最大荷重の関係（破壊形式ごと）



写真 3-3 母材の破断荷重近傍で溶接部剥離した試験体

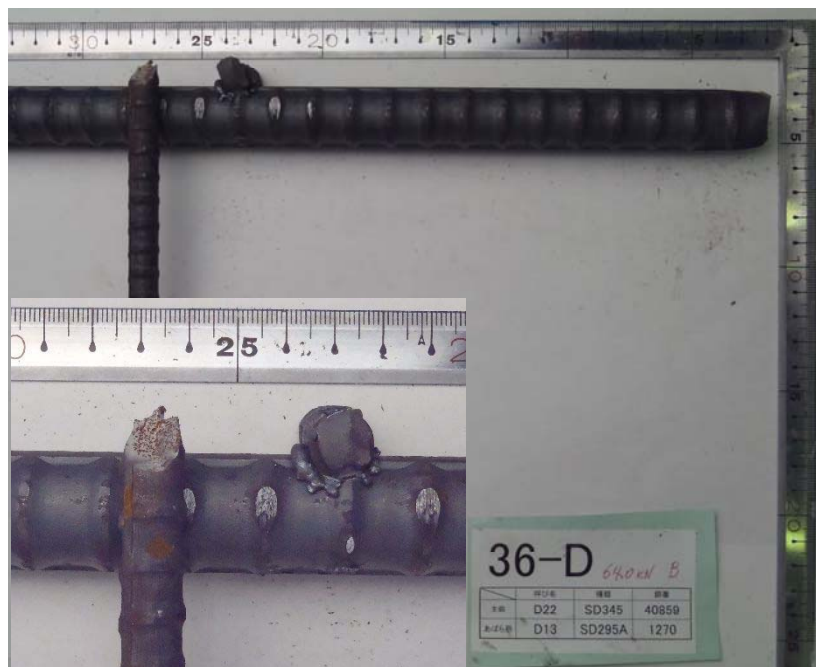


写真 3-4 母材の破断荷重近傍で熱影響部破壊した試験体

破壊形式に依らず、2 次通電時間と最大荷重の関係を図 3-7 に示す。各通電時間毎に試験体 10 本ずつ、実験値の 95%信頼区間の下限値と上限値を求め、その中央値をプロットした。信頼区間は太線で示している。それぞれの中央値を実線で結んだ。信頼係数 t は、JIS Z9041-2 データの統計的解釈方法の付属書 A 表 2 t 分布の分位点より求めた。

中央値の計算方法

標本数	$n = 10$
標本平均	x
信頼係数	$t = 2.262$ (自由度 9)
標本標準偏差	$\sigma = \sqrt{s}$
信頼区間	$CI_{\text{上下}} = x \pm t \cdot \sigma / \sqrt{n}$
中央値	$(CI_{\text{上}} + CI_{\text{下}}) / 2$

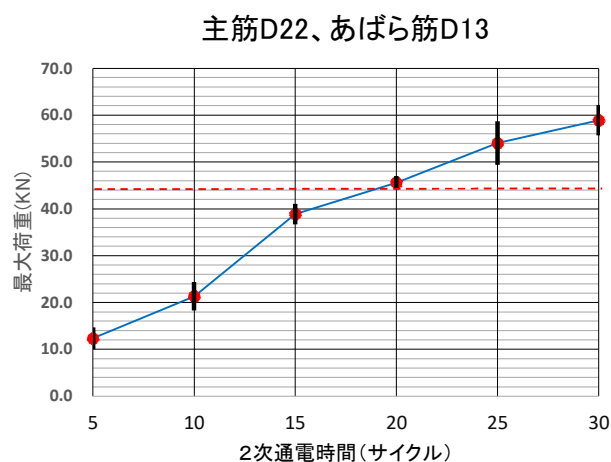
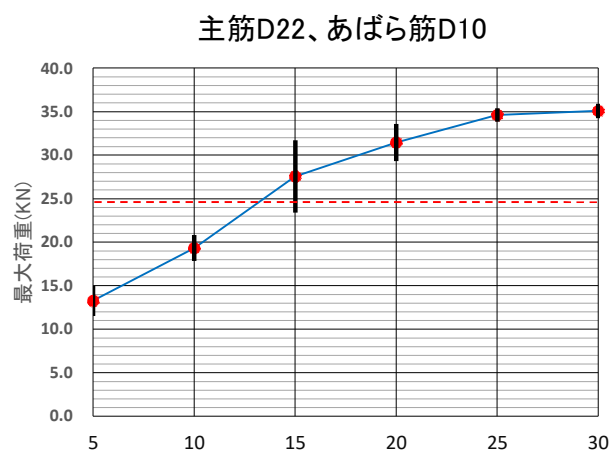
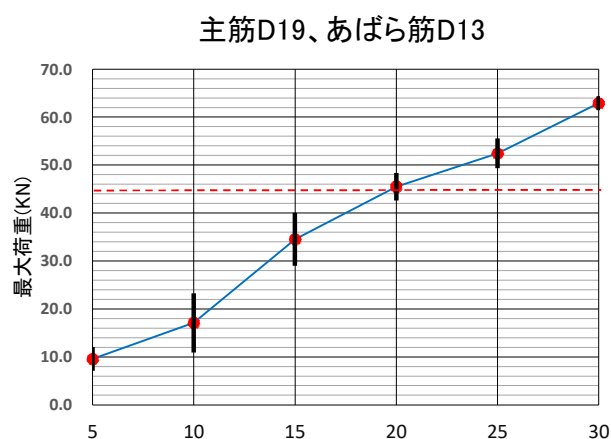
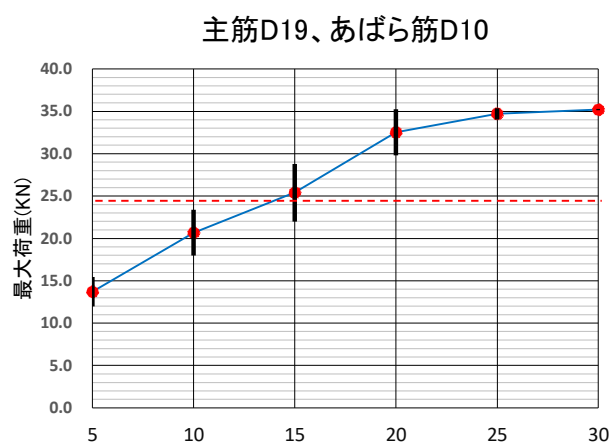
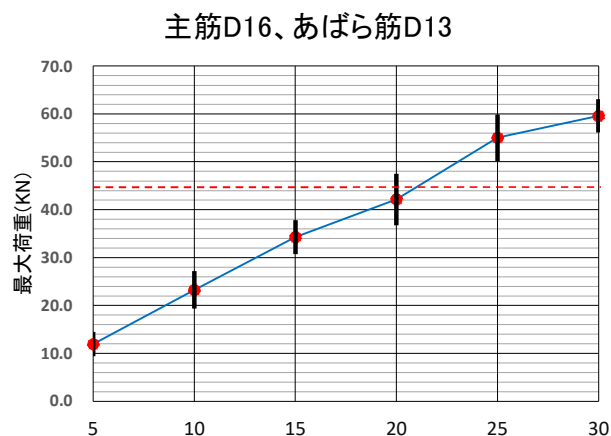
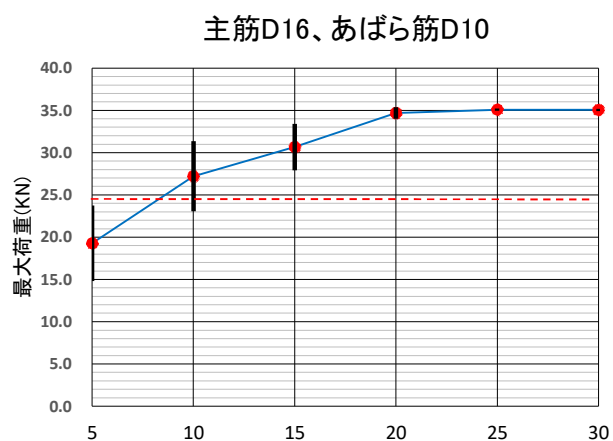


図 3-7 2 次通電時間と最大荷重の関係

主筋とあばら筋のすべての組合せにおいて通電時間と最大荷重には、明確に正の相関が認められる。最大荷重があばら筋の降伏点を上回るためには、2 次通電時間は、あばら筋 D10 では 20 サイクル以上、D13 では 25 サイクル以上必要であると考えられる。

2 次通電時間と最大荷重の中央値の関係をあばら筋 D10 の関係について図 3-8 に、あばら筋 D13 について図 3-9 に示す。2 次通電時間による最大荷重の差異は、主筋径よりもあばら筋径の違いによる影響が大きい。

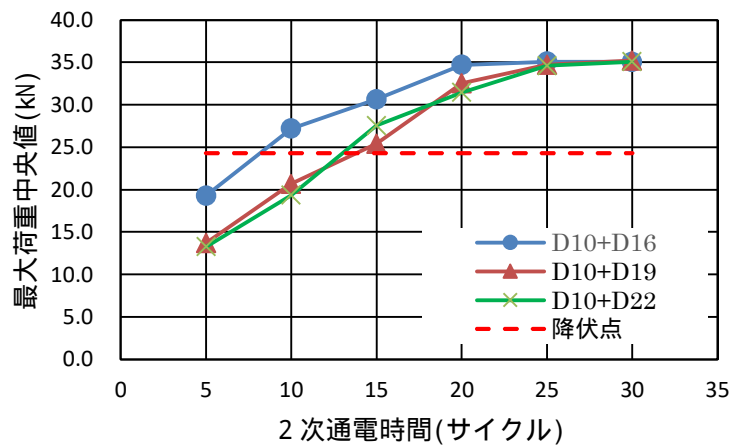


図 3-8 2次通电時間と最大荷重の中央値 あばら筋 D10

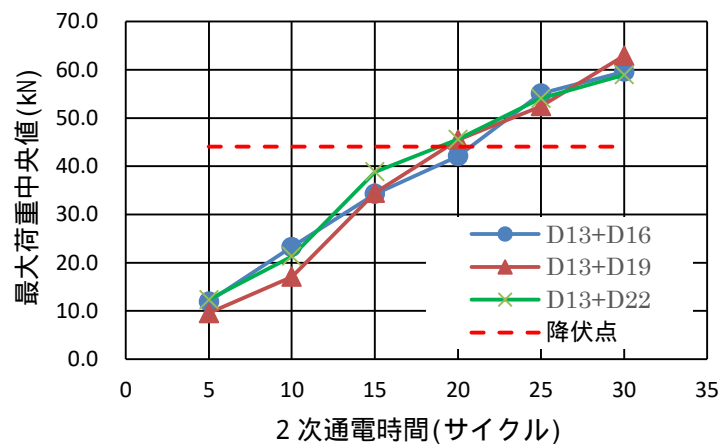


図 3-9 2次通电時間と最大荷重の中央値 あばら筋 D13

(4)式は、交差溶接部に入力する基準電流値 I を求める式であるが、電圧 E および通电時間 t を右辺から左辺へ移項すると抵抗発熱エネルギー $4.19Q$ ジュールとなる。チップ間電圧は $1.0V$ なので、電流値と通电時間の積が発熱エネルギーと等しくなる。この電流値と通电時間の積は「積算電流」と呼ばれる。主筋とあばら筋の組合せに応じて2次電流値を変化させたため、鉄筋径および通电時間のパラメータに依存しない要因で示すように、積算電流と最大荷重の関係を図 3-10 に、積算電流と最大荷重をあばら筋の断面積で除した最大応力度の関係を図 3-11 に示す。あばら筋 D10 の場合、積算電流が $4000A \cdot s$ を超えると最大荷重はあばら筋の降伏点を超え、 $6500A \cdot s$ 以上では母材破断となる。あばら筋 D13 の場合は、 $5000A \cdot s$ を超えると降伏点を上回る。両者ともに正の相関が認められるが、あばら筋径が異なると、積算電流に対する最大強度の増加の程度も異なる。これは、熱的相似則が関係していると考えられる。

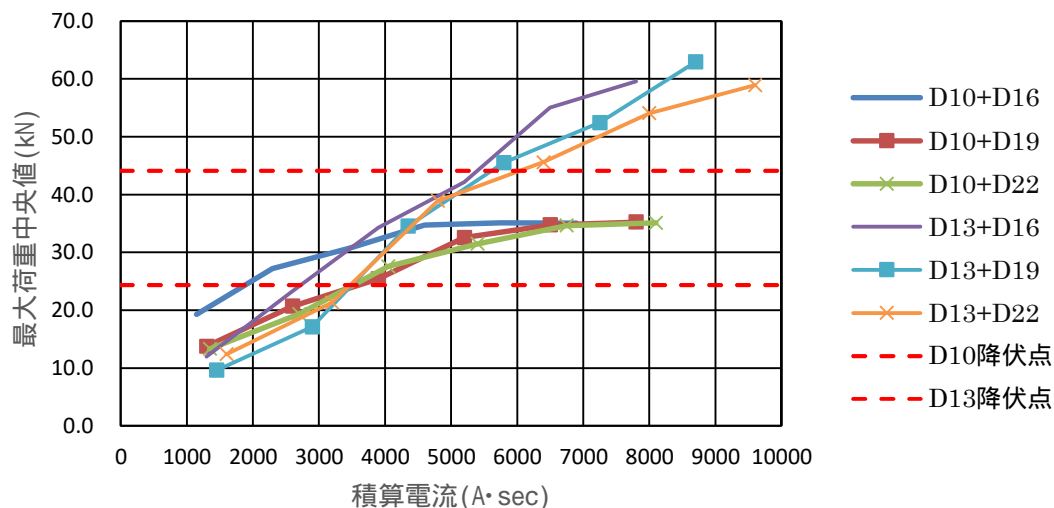


図 3-10 積算電流と最大荷重の関係

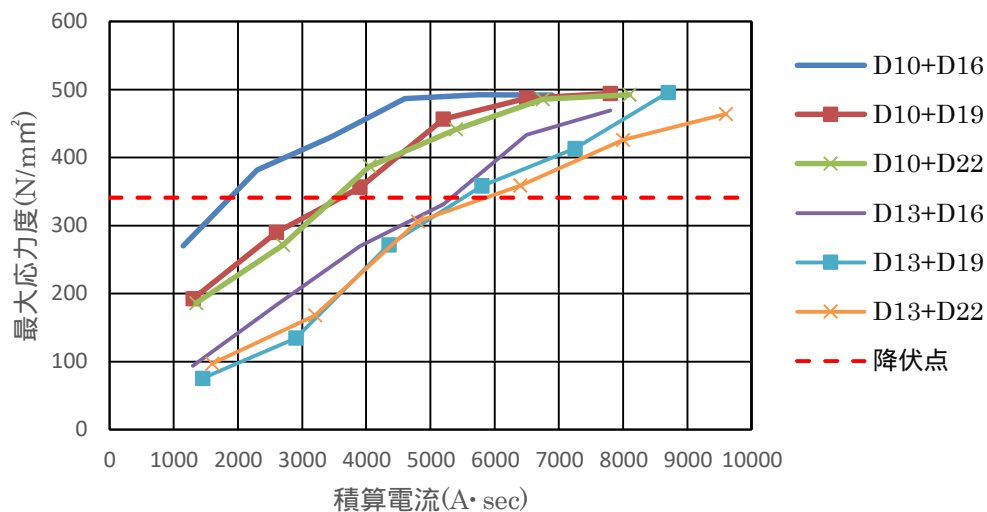


図 3-11 積算電流と最大応力度の関係

板材同士の溶接における接合面の温度を求める式を(6)～(8)式に示す^[3,4]。図 3-12 に通電時間と接合面の温度の関係の概形を示す^[3,4]。通電時間の増加に応じて温度が増加するが、ある時間の経過とともに次第に温度変化が飽和する(定常状態)。この飽和温度が m で、電流密度が一定ならば板厚 h の 2 乗に比例する。板厚を n 倍した場合、電流密度を $1/n$ 倍、あるいは通電時間を n^2 倍するとその温度分布は相似的になることを「熱的相似則」と呼ぶ。本実験では、あばら筋径に拘わらず通電路を直径 0.5cm の円と仮定して電流値を設定したため熱的相似則を考慮しておらず、あばら筋種により積算電流に対する強度の増加の程度が異なっていると考えられる。

$$\theta = \theta_m \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (6)$$

$$\theta_m = \frac{\rho_o \cdot \delta^2 \cdot h^2}{2J \cdot K} \quad (7)$$

$$\tau = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{c \cdot \sigma \cdot h^2}{K} \quad (8)$$

ここで、

t : 時間(sec) J : 仕事当量(4.2J/cal)
 ρ_o : 抵抗率($\Omega \cdot \text{cm}$) K : 熱伝導率(cal/cm/sec/ $^\circ\text{C}$)
 δ : 電流密度(A/cm²) c : 比熱(cal/g/ $^\circ\text{C}$)
 h : 板厚(cm) σ : 密度(g/cm³)

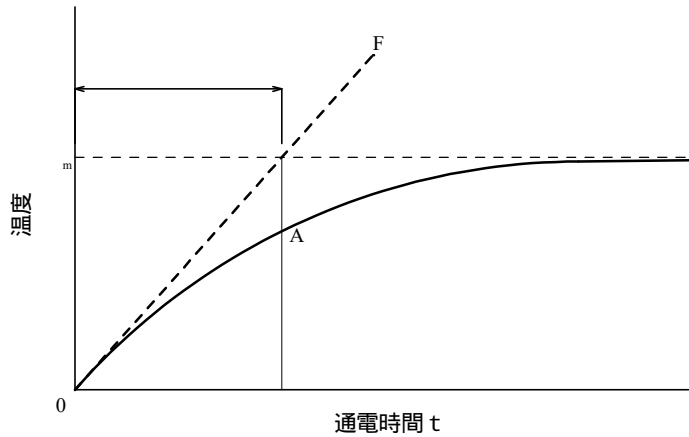


図 3-12 温度上昇曲線^[3.4]

3-6 第 2 シリーズの溶接点接合強度試験

第 2 シリーズでは、加圧力の効果を確認することを目的とした。第 2 シリーズの実験パラメータの一覧を表 3-6 に、共通要因を表 3-7 に示す。対象鉄筋は、第 1 シリーズと同じくあばら筋が D10、D13 の 2 種類、主筋が D16、D19、D22 の 3 種類、加圧力が 3.0～7.0kN の 5 種類、2 次および 3 次通電電流値をそれぞれの実験パラメータとした。入力電流値は、あばら筋 D10 の場合 10,000A～15,000A の 5 通り、D13 の場合 14,000A～18,000A の 4 通りである。基準電流値は、2 次通電時間を主筋 D16 については 20 サイクル、D19、D22 については 26 サイクルに固定して(1)～(5)式に基づいて求めた。3-2 節で述べたように、一般的に加圧力の増加に応じて接触面積は増大する。溶接電流が一定ならば電流密度は低下し、ナゲットが小さくなり接合強度は低下する。したがって、電流値を大きくしてバランスさせる必要がある。

表 3-6 第 2 シリーズのパラメータ

呼び径		加圧力 (kN)	電流値 (A) 上段：2 次通電 下段：3 次通電				
肋筋	主筋						
D10	D16	3.0	10,000 7,500	12,000 9,000	13,000 9,750	14,000 10,500	15,000 11,250
	D19	4.0					
		5.0					
		6.0					
	D22	7.0					
D13	D16	3.0	14,000 10,500	16,000 12,000	17,000 12,750	18,000 13,500	—
	D19	4.0					
		5.0					
		6.0					
	D22	7.0					

表 3-7 第 2 シリーズの共通要因

共通要因	仕 様
主筋材料	SD295A(D16), SD345(D19, D22)
あばら筋材料	SD295A(D10, D13)
1 次通電の電流値と通電時間	5,000 A、10 サイクル
2 次通電時間	20 サイクル(D16)、 26 サイクル(D19,D22)

3-7 第 2 シリーズの溶接点接合強度試験の結果

加圧力と最大荷重の関係をあばら筋の径ごとに図 3-13 に示す。(a)あばら筋 D10 では、2 次通電の電流値が 12000A (積算電流 4800A・s) 以下の場合に加圧力が大きくなると最大値が低下する傾向がみられるが 13000A (同 5200A・s) 以上になると加圧力の効果は認められなくなった。(b)あばら筋 D13 ではばらつきが多いが、やや加圧力の増加に応じて最大荷重が増加する傾向が若干み

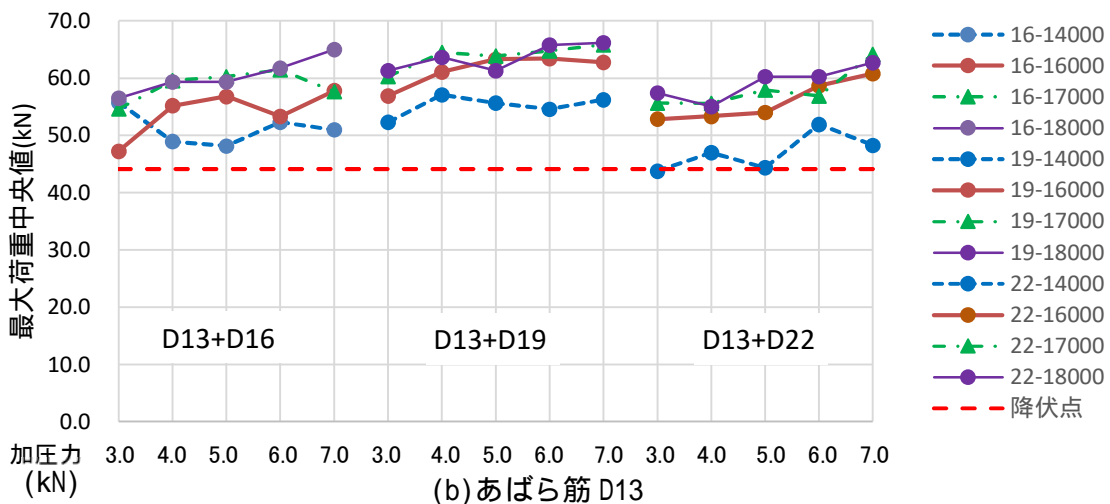
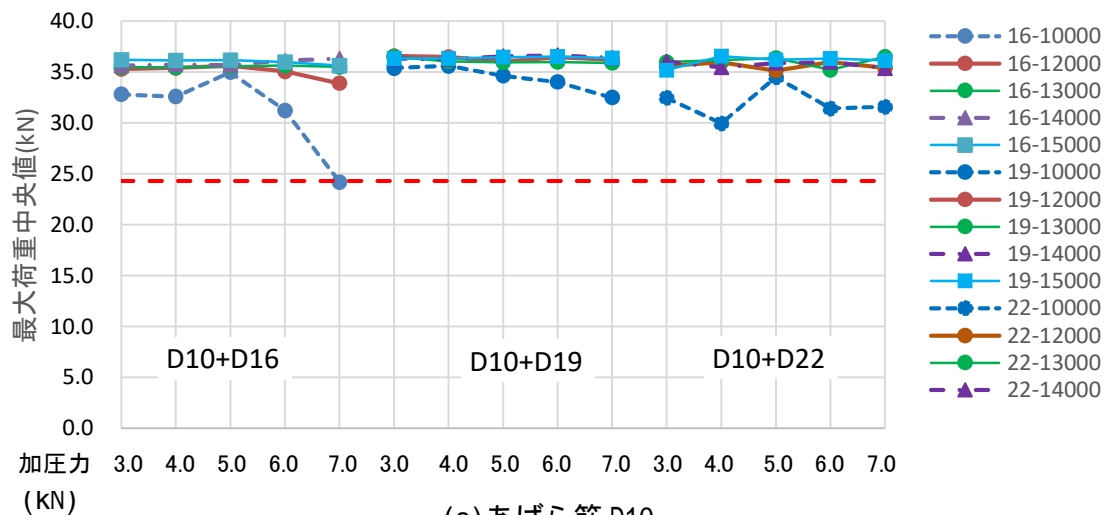


図 3-13 加圧力-最大荷重関係 (第 2 シリーズ)

られるが、主筋 D22 の場合は、D19 と比べると増加傾向が小さく最大荷重全体も低いことから、明らかに電流値が不足していると考えられる。あばら筋 D10 では、12000A 以上になると、加圧力に依らずすべての試験片の最大荷重が母材の降伏点を上回る。あばら筋 D13 でも 16000A 以上になると同様に母材の降伏点を上回るが加圧力によりばらつきがある。

2 次通電の電流値、加圧力と破壊パターンの関係を主筋とあばら筋の組合せ毎に図 3-14 に示す。縦軸は、それぞれの破壊パターンごとに集計した試験体の数である。加圧力の影響を考察すると、ある組合せの場合（例えば、D13 と D19 または D22 における電流値 14,000A 《積算電流にして 7280A・s》 の場合）において、加圧力が大きくなると破壊状況が溶接部破断から熱影響部破断に移行していく様子が伺えるが、総じて、加圧力の影響は明瞭ではない。あばら筋が D10 の場合は、電流値が 13,000A (5200A・s) 以上になると加圧力に依らず母材破断する傾向が見られる。D13 の場合は、D19 との組合せにおいて電流値が大きくなるにつれて母材破断が多くなる傾向にあるが、D13 と D16 および D22 との組合せにおいては明確ではなく、通電時間が 20 サイクルまたは 26 サイクルでは積算電流が不足している影響と考えられる。

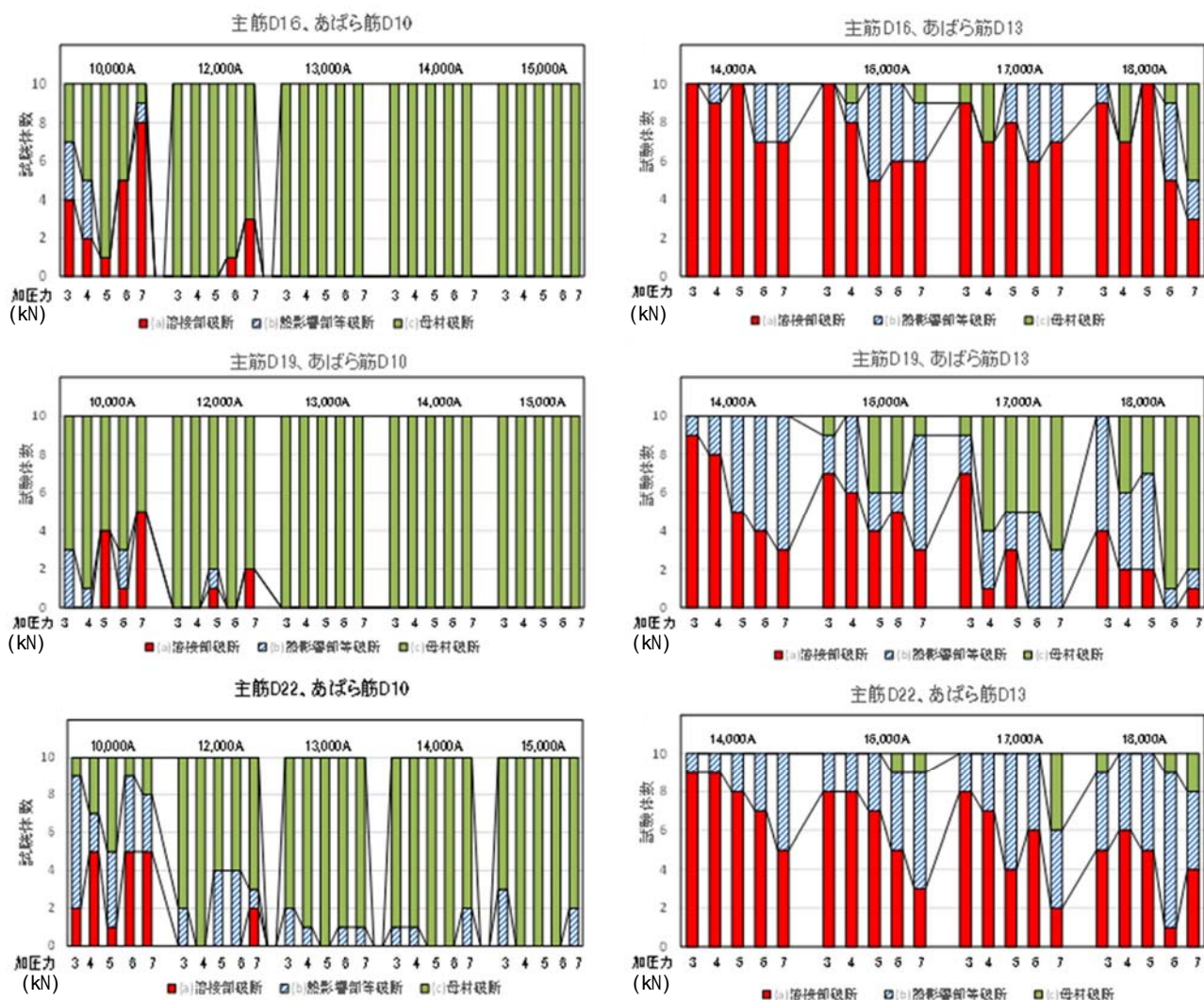


図 3-14 2 次通電電流値、加圧力と破壊パターンの関係（第 2 シリーズ）

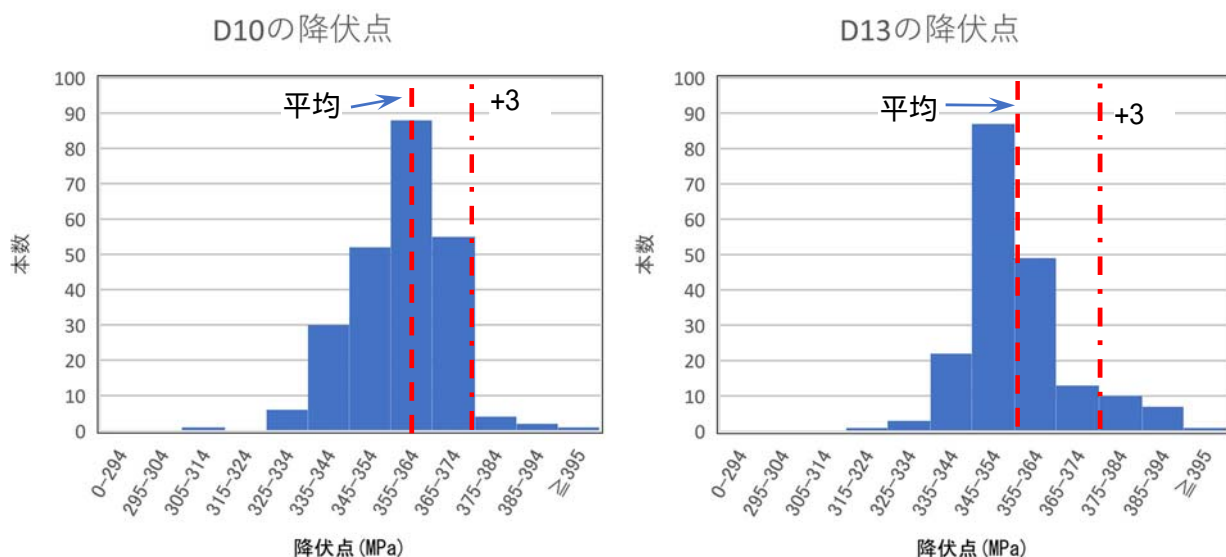


図 3-15 あばら筋の引張試験結果

図 3-13 と図 3-14 を比較すると、特に D13 では母材以外で破壊した場合でも最大荷重が大きく、母材の降伏点の数割増しとなる試験片が多く見られる。したがって母材破断せずともあばら筋の降伏までを担保する接合強度を設定することが可能である。しかしながら、母材の降伏点が高い方へばらつく場合には、溶接部で脆性破断する場合が生じる。これを避けるためには、降伏点のばらつきの範囲の上限値で判別すればよい。

あばら筋の引張試験の結果の例を図 3-15 に示す。それぞれ降伏点を確認したもので D10 が 239 本、D13 が 192 本のヒストグラムである。この結果から、降伏点の平均（図中の破線）は D10 が 357MPa、D13 が 355MPa で、3 の範囲の上限値（図中の一点鎖線）は D10 および D13 共に約 374MPa で規格値の約 1.27 倍であった。接合部の強度がこれらの値以上有れば、母材の降伏が先行する可能性が大きくなる。したがって、母材の規格降伏点の 1.3 倍以上の接合強度を有する場合を「合格」とすることを提案する。

母材破断した試験体とそれ以外で破壊した試験体のうち合格した試験体をプロットした、電流値、加圧力と合格率の関係を図 3-16 に示す。縦軸は総数 10 体に対する合格試験体数を百分率で示す。あばら筋 D10 では、2 次通電電流値が 14000A（積算電流値 5600A・s）以上であれば加圧力に依らず合格率は 100%となる。あばら筋 D13 では、いずれの主筋の場合でも 2 次通電電流値が 18000A（同 7200A・s）以上で加圧力が 5kN または 7kN の場合に合格率 100%となる。

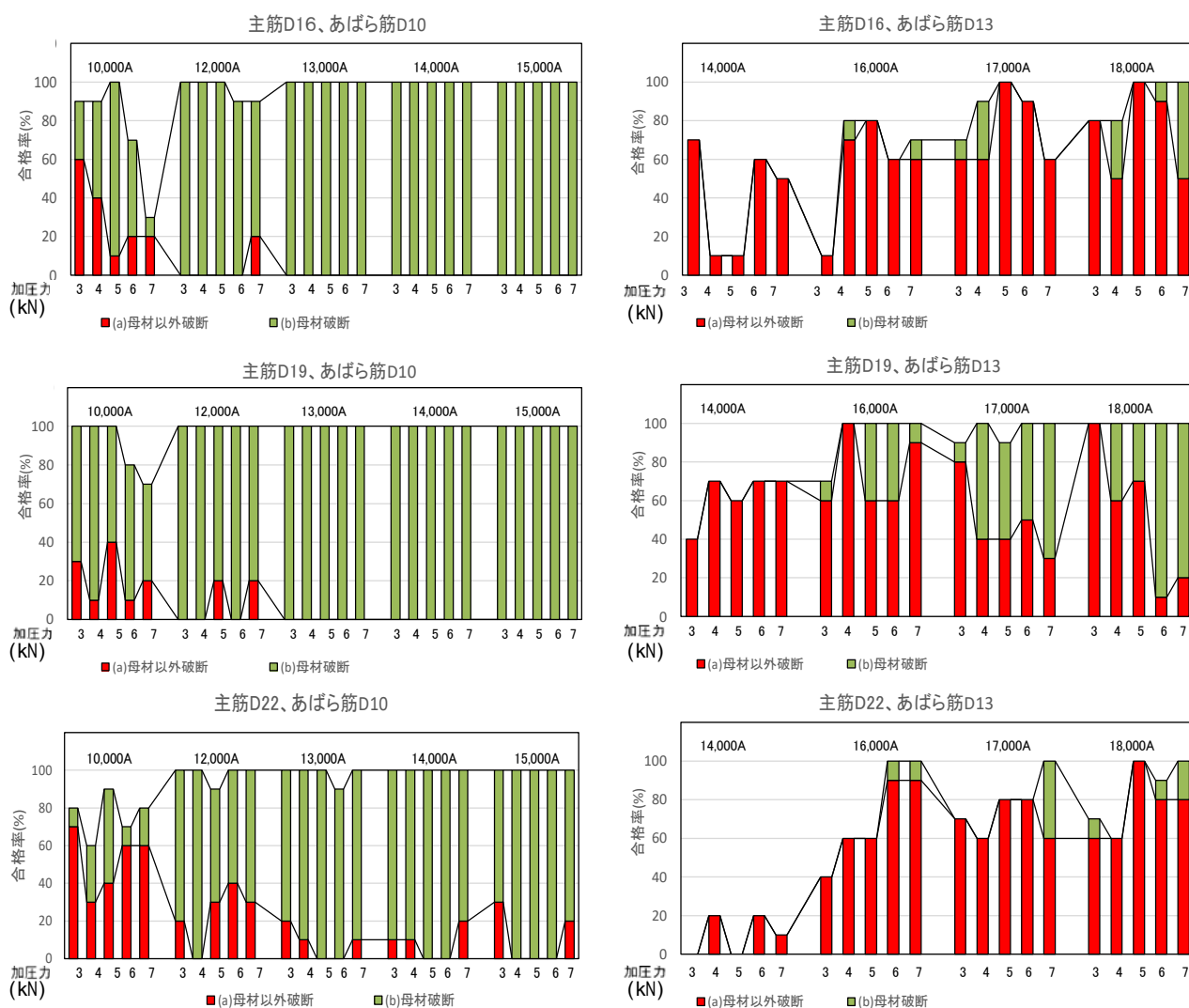


図 3-16 2次通電電流値、加圧力と合格率の関係（第2シリーズ）

今回の実験ではひずみおよび破壊時の伸びを測定していないため、試験体ごとの降伏点を明確に確認していない。したがって、降伏点付近の荷重において母材破断以外で破壊した場合には、それが母材の降伏直後に発生したのか加工硬化の途中なのか脆性的なのかが把握できない。通常、接合部が脆性破壊する場合には、設計では十分に信頼できる余裕度を決めておく必要がある。将来、終局強度設計に溶接組立配筋工法を用いる場合を念頭に、規格降伏点に対する接合強度の余裕度を1.3とすると、あばら筋の降伏を保証する意味合いからも合理的であると思われる。

3-8 第3シリーズの溶接点接合強度試験

第3シリーズでは、第2シリーズと同じく加圧力の効果を確認することを目的とし、あばら筋をD13とし、主筋にD25を追加した。ただし、試験片の製作時期が異なり、鉄筋のロットが異なるので比較のためD22についても再度試験を行った。第3シリーズの実験パラメータの一覧を表3-8に、共通要因を表3-9に示す。対象鉄筋はあばら筋がD13の1種類、主筋がD22、D25の2種類、加圧力はD22で3.0～7.0kNの5種類、D25では5.0～8.0kNの4種類、2次および3次通電電流値をそれぞれの実験パラメータとした。2次通電電流値は、主筋D22の場合14,000A～18,000Aの4通りで

いずれも通電時間は 26 サイクル、したがって積算電流値は、 $7280\text{A}\cdot\text{s} \sim 9360\text{A}\cdot\text{s}$ とした。ただし 18000A では、第 2 シリーズでは積算電流が不足した可能性があったことから 30 サイクルも追加した。D25 の場合は 14,000A \sim 18,000A の 5 通りでいずれも通電時間は 30 サイクルである。積算電流値は、 $8400\text{A}\cdot\text{s} \sim 10800\text{A}\cdot\text{s}$ で、試験体数は各 6 体ずつ合計 450 体である。

表 3-8 第 3 シリーズのパラメータ

呼び径		加圧力 (kN)	電流値 (A) 上段：2 次通電 下段：3 次通電				
肋筋	主筋						
D13	D22	3.0					
		4.0					
		5.0	14,000	16,000	17,000	18,000	18,000
		6.0	10,500	12,000	12,750	13,500	14,000
		7.0					
	D25	5.0					
		6.0	14,000	15,000	16,000	17,000	18,000
		7.0	11,200	12,000	12,000	13,500	13,500
		8.0					

表 3-9 第 3 シリーズの共通要因

共通要因	仕 様
主筋材料	SD345 (D22, D25)
あばら筋材料	SD295A (D13)
1 次通電の電流値と通電時間	5,000 A、10 サイクル
2 次通電時間	26 サイクル(D22) 30 サイクル(D22, D25)

3-9 第 3 シリーズの溶接点接合強度試験の結果

加圧力と最大荷重の関係を図 3-17 に示す。入力電流値との関係を主筋とあばら筋の径ごとに示す。主筋 D22 では、2 次通電の電流値が 14000A ($7280\text{A}\cdot\text{s}$) 以下の場合に最大荷重があばら筋の降伏点を下回る組合せがあるが、概ね加圧力が大きくなると最大値が上昇する傾向がみられる。18000A の場合 2 次通電時間が 26 サイクルと 30 サイクルではほとんど差は無い。第 2 シリーズで行った D22 の結果と若干傾向が異なるのは、鉄筋のロットが異なること、および通電電流や加圧力のばらつきによる差であると考えられる。主筋 D25 でも同様に加圧力が上昇すると最大荷重が増加する傾向が見られた。

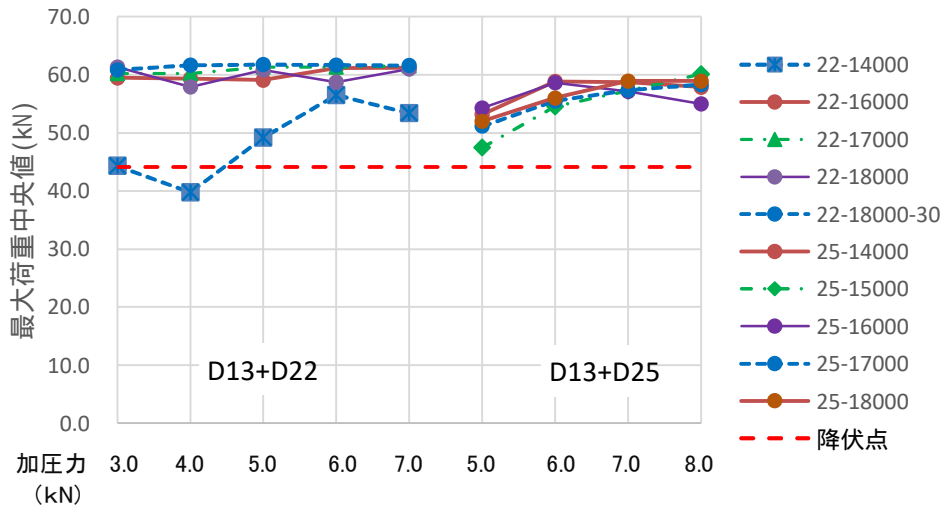


図 3-17 加圧力-最大荷重関係 (第3シリーズ)

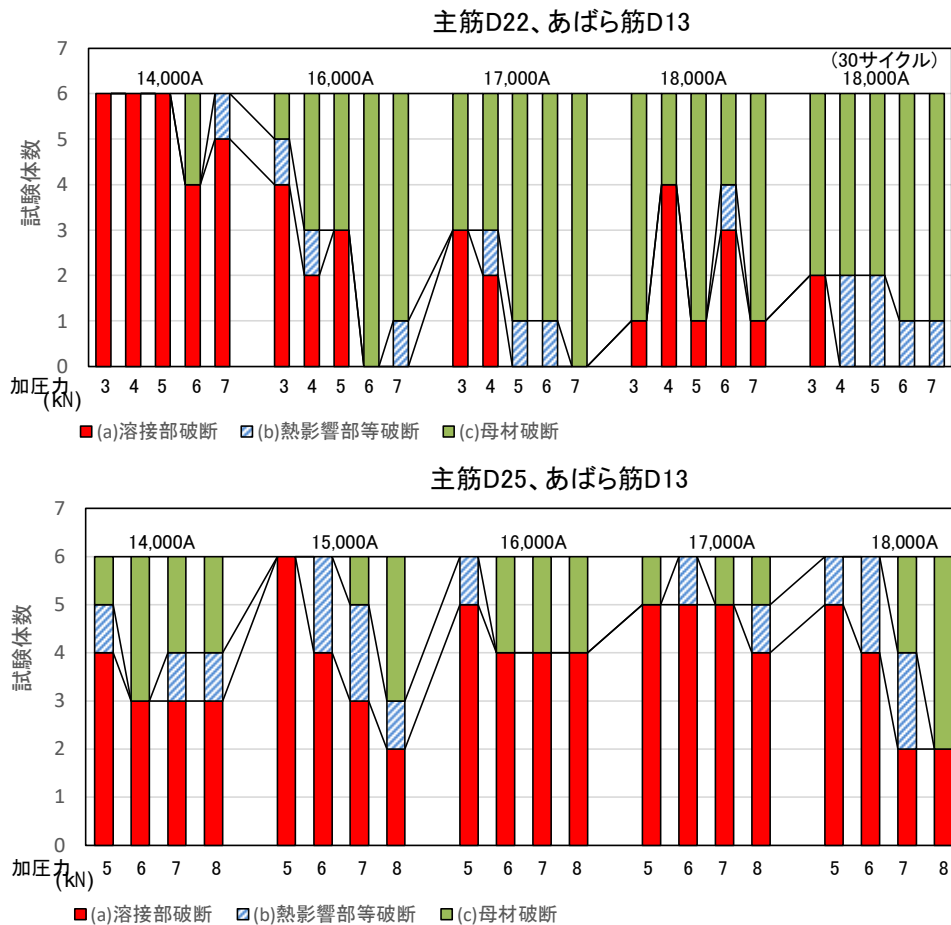


図 3-18 2次通電電流値、加圧力と破壊パターンの関係 (第3シリーズ)

2次通電の電流値、加圧力と破壊パターンの関係を、主筋とあばら筋の径毎に図 3-18 に示す。縦軸は、それぞれの破壊パターンごとに集計した試験体の数である。加圧力の影響を考察すると、全体的に加圧力が大きくなると破壊状況が溶接部破断から熱影響部破断に移行していく様子が伺えるが、総じて、加圧力の影響は明瞭ではない。主筋 D22 の場合は、電流値が 18,000A で 30 サイク

ルとすると、溶接部破断となる試験体が大幅に減少した。

母材破断した試験体とそれ以外で破壊した試験体のうち、母材の規格降伏点の 1.3 倍以上となった試験体をプロットした電流値、加圧力と合格率の関係を図 3-19 に示す。縦軸は総数 6 体に対する合格率を示す。主筋 D22 では、2 次通電電流値が 17000A (8840A・s) で加圧力に依らず、強度および破壊形式が安定的になり合格率は 100%となる。電流値が 18000A、26 サイクル (9360A・s) で合格率 80%以上であるが若干不規則な結果となっているが通電時間を 30 サイクルと若干長くすると 100%となった。一方主筋 D25 では、合格率のばらつきが大きく、明確な規則性が把握できない。2 次電流値と加圧力を同じ組み合わせとして、通電時間を増加させた場合を検討してみる必要があると思われる。

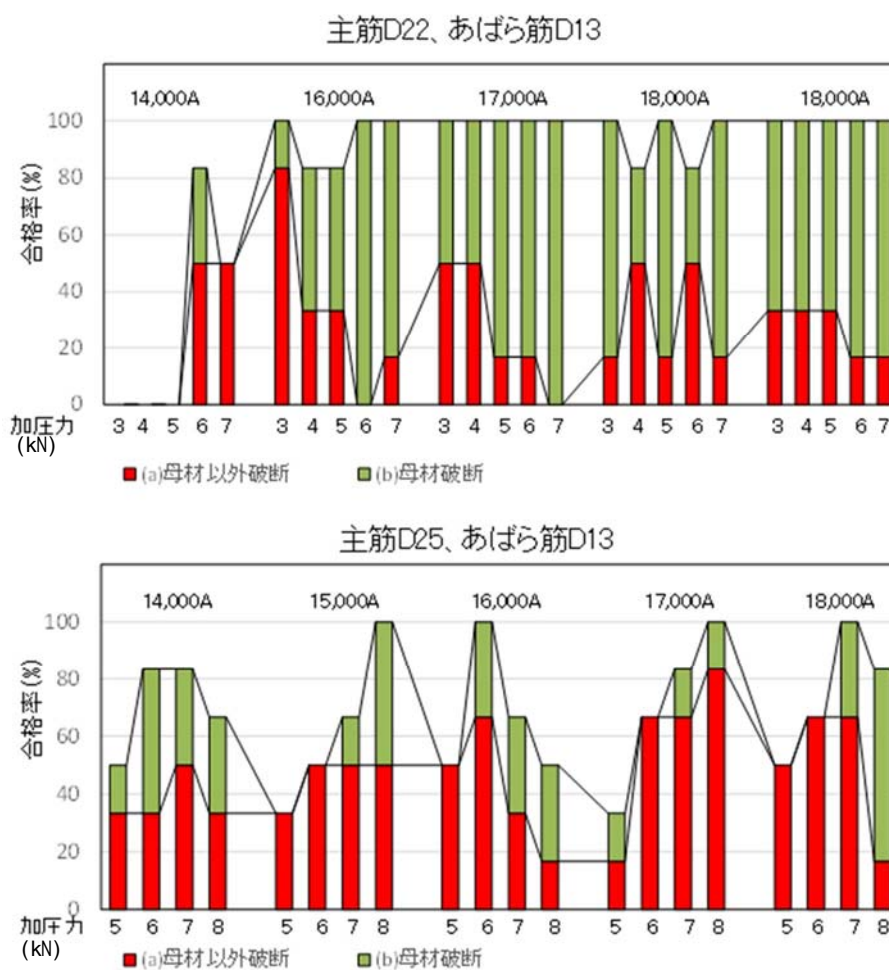


図 3-19 2 次通電電流値、加圧力と合格率の関係 (第 3 シリーズ)

3-10 まとめ

第1シリーズの交差溶接部の接合強度試験の結果より、主筋及びあばら筋径の組合せに依らず、通電時間と破壊状況および最大荷重には一定の関係性が見られる。積算電流（電流値と通電時間の積）と最大荷重の関係より、あばら筋 D10 では、積算電流が $4000\text{A}\cdot\text{s}$ を超えるとあばら筋の降伏点を上回り、 $6500\text{A}\cdot\text{s}$ 以上で母材破断となる。あばら筋 D13 では $5000\text{A}\cdot\text{s}$ を超えると降伏点を上回る。あばら筋径が異なると積算電流に対する最大強度の増加割合が異なる。これは、積算電流が同じで、電極から接合面までの厚さが異なる場合には、電流密度が関係してナゲットが形成される際の温度分布に差が生じ、ナゲットの体積が D13 の方が D10 よりも相対的に小さくなることが原因と考えられる。鉄筋の組合せ毎に十分な接合強度が得られる溶接条件は異なり、主筋とあばら筋の平均径に対応して、積算電流値（2 次通電電流値と通電時間の積）および電流密度を決定する必要があると考える。

加圧力は、一般的に重ね合わせ鋼板の場合には、加圧力を高くしてそれに見合うだけの溶接電流を流すと接合強さが大きくなるとされているが、第2シリーズの結果から、交差鉄筋ではその影響は明瞭ではないことが分かる。全数が母材破断した試験体があるいはそれ以外で破壊した試験体のうち母材の規格降伏点の 1.3 倍以上となる場合は、十分な接合強度が得られた試験体と考えられ、これらの溶接条件は、あばら筋 D10 では加圧力に依らず 2 次通電電流値が 14000A （積算電流値 $5600\text{A}\cdot\text{s}$ ）以上であること、あばら筋 D13 ではいずれの主筋の場合でも 2 次通電電流値が 18000A （積算電流値 $7200\text{A}\cdot\text{s}$ ）以上で加圧力が 5kN または 7kN の場合である。

第3シリーズの結果より、上記と同じ条件としては、あばら筋 D13 と主筋 D22 では加圧力に依らず、2 次通電電流値が 17000A （積算電流値 $6800\text{A}\cdot\text{s}$ ）である。一方、あばら筋 D13 と主筋 D25 では、ばらつきが大きく明確な規則は把握できなかった。

第 3 章の参考文献

- [3. 1] 川上暢夫、堀直之、小浦光男、福井唱一：電気抵抗溶接による鉄筋の接合に関する一考察 山口大学工学部学報、第 4 巻第 1 号、pp.102～107、1953
- [3. 2] 佐藤邦彦：溶接・接合工学概論第 2 版 オーム社、2014
- [3. 3] 松山欽一、高橋靖雄、長谷川和芳：抵抗溶接の基礎と実際 産報出版、2011
- [3. 4] 奥田滝夫：スポット溶接入門増補版 産報出版、2014
- [3. 5] 異形鉄筋コンクリート設計法研究会編：異形鉄筋コンクリート設計法 技法堂、1971.8
- [3. 6] 日本規格協会：日本工業規格 JIS G3551:2005 溶接金網及び鉄筋格子 2005.11

第4章 基礎梁の実大実験

4-1 目的

交差溶接接合技術を RC 造基礎梁へ応用した「溶接組立配筋工法」は、工場において、予め位置決めしたあばら筋の 4 隅を主筋へ溶接接合して組立てた配筋ユニットを現場へ運搬し、架構を構成させる。溶接組立配筋工法の基礎となる、U 字形あばら筋（U 字ユニットと呼ぶ）と主筋による交差溶接部の強度と梁の構造性能の関係を把握するために RC 造梁の曲げせん断実験を行う。

4-2 溶接組立配筋工法の詳細

梁のあばら筋は、斜めひび割れを抑制し、せん断破壊耐力を向上させると共にコアコンクリートを拘束し、部材に靱性を与える。従来の 135° フックに替わり、あばら筋端部を主筋に溶接接合させることにより、現場での結束作業は省略でき、あばら筋端部を確実に定着することが可能となる。ただし、予めあばら筋の位置が固定されることから、継手や主筋の定着部では却って現場組立て作業に支障が生じることが考えられるので、U 字ユニットの上部にキャップタイを用いることとした。

U 字ユニットの製造方法と組立を図 4-1 に示す。図のように、主筋とあばら筋をそれぞれのピッチで格子状に並べて、主筋とあばら筋を交差溶接接合する、温度が冷めた後に U 字になるまで折り曲げてユニットとする、キャップタイと共に現場へ運搬し、ユニットを所定の位置へ配置し、キャップタイを被せて組立・配筋する、主筋の定着寸法を確認し、継手筋を配置して完成となる。

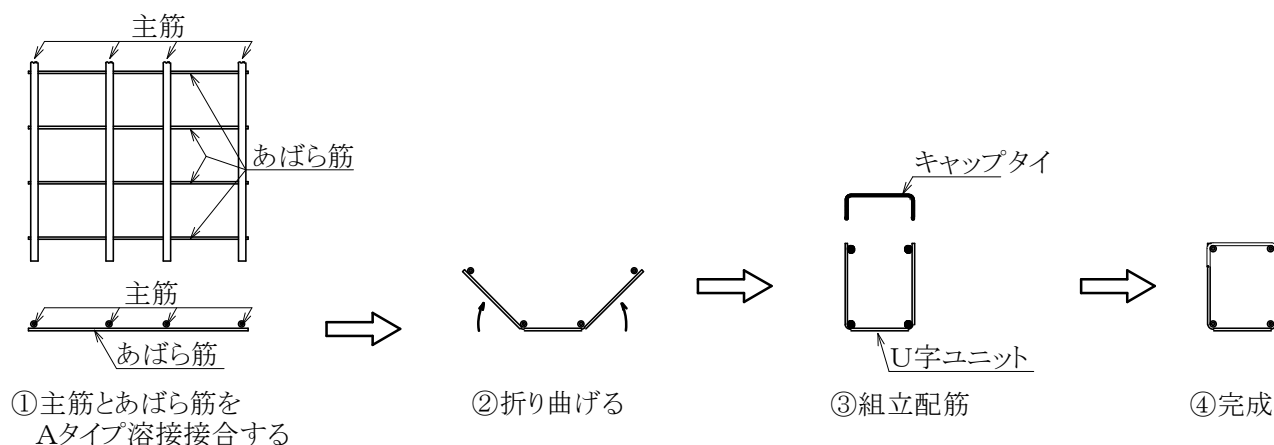


図 4-1 U 字ユニットの製作と組立・配筋

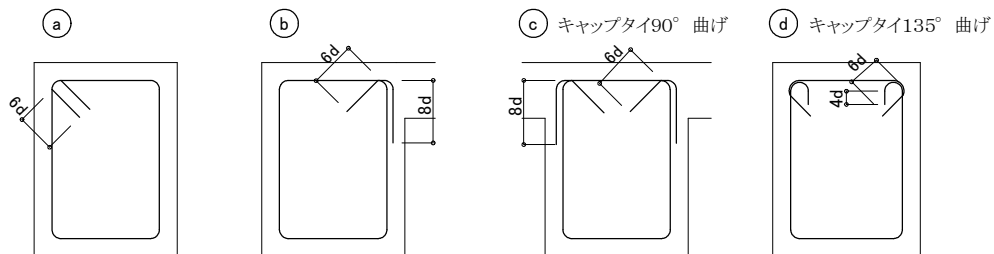
日本建築学会の鉄筋コンクリート構造配筋指針・同解説^[4.1]では、図 4-2 に示すようなキャップタイの仕様が定められている。キャップタイは、図の㉔端部 90° フックと㉕端部 135° フックの 2 通りである。㉔端部 90° フックは、スラブが取り付け側にのみ用いることができるとされている。

基礎梁の場合は、スラブ床版または基礎底部が梁の下側に取り付け、いわゆる逆梁であり、梁上部のキャップタイに端部 90° フックのみの定着を用いることができない。そのため 90° フック端部をさらに部材軸方向に 90° 折り曲げ、3 次元的に 90° フックを 2 段設けた新たなキャップタイ

の形状を提案する。新たに提案するキャップタイの形状を写真 4-1 および図 4-3 に示す。

タイプ は、 字形に折り曲げた端部を繋ぐように溶接接合した形状である。タイプ は、1 本の鉄筋を一筆書きのようにして鞍形に折り曲げた形状である。タイプ は、タイプ を分割するようにした形状である。

(4) あばら筋の型(床版がない場合は135° 以上のフックとする)



原則として (a) のフック先曲げとする。

片側床版付 (L型) 梁で (b)

両側床版付 (T型) 梁で (b) 又は (c) とすることができる。

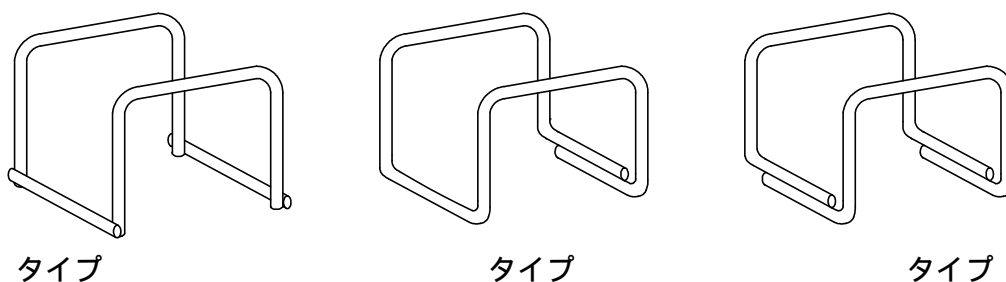
梁せいの大きい場合や SRC 造のあばら筋の納まりに使用することができる。

フックの位置は (a) にあっては交互、(b) にあってはスラブ付側とする。

図 4-2 配筋指針に基づくキャップタイの仕様^[4.1]



写真 4-1 キャップタイの形状



タイプ

タイプ

タイプ

図 4-3 キャップタイ形状

4-3 基礎梁実験の概要

基礎梁の実大実験は、十分な交差溶接接合強度を有する試験体において、提案するキャップタイの形状が構造性能に及ぼす影響を検討するシリーズ 1、および、交差溶接部の強度とキャップタイの有無が構造性能に及ぼす影響を検討するシリーズ 2 の 2 シリーズから成る。

シリーズ 1 の実験は、通常配筋した在来型を含め、3 種類のキャップタイ（タイプ からタイプ ）を用いた試験体の一方向加力の大野式曲げせん断実験である。

シリーズ 2 の実験はさらに、通常配筋した在来型およびあばら筋が母材破断するように溶接条件を設定（ここでは A タイプ溶接と呼ぶ）したフェーズ 、A タイプ溶接しキャップタイを設けない試験体と A タイプ溶接の約 1/3 程度の接合強度となるように溶接条件を設定（B タイプと呼ぶ）した試験体を含むフェーズ から成る、正負交番加力の建研式曲げせん断実験である。

本研究では、キャップタイと溶接接合強度が部材の耐力に及ぼす影響に着目するため、その影響が大きいせん断耐力についてまとめる。

4-4 シリーズ 1 基礎梁実験

実験のパラメータの一覧を表 4-1 に示す。試験体は 10 体で、うち 2 体は 135°フック付きあばら筋を用いた通常配筋である。コンクリート目標強度を 18MPa と 30MPa の 2 水準、3 種類のキャップタイをそれぞれ各ピッチの 1 箇所置きに配置する（シングル）。タイプ のみ各ピッチすべてに配置したものを用意した（ダブル）。共通因子として、主筋は、D16(SD490)を上下 6 本ずつ、引張鉄筋比は 1.55%、あばら筋は 2-D10 を 200 ピッチ、せん断補強筋比は $\rho_w=0.32\%$ である。使用した鉄筋の引張試験結果を表 4-2 に示す。コンクリートの材料試験結果を表 4-3 に示す。部材加力日に合わせて、材令 33 日から 42 日にテストピースの圧縮強度、割裂強度および弾性係数を計測した。

表 4-1 シリーズ 1 基礎梁実験の試験体一覧

試験体名	共通事項	コンクリート 目標強度 (MPa)	キャップタイ	
			タイプ	配筋
No.1	断面 $b \times D$ (mm) $=220 \times 420$ せん断スパン比 1.5 主筋 6-D16(SD490) $\rho_f=1.55\%$ 肋筋 2-D10@200(SD295) $\rho_w=0.32\%$	18	(通常配筋)	
No.2			I	シングル (1 つ間隔)
No.3			II	
No.4			III	
No.5			III	ダブル
No.6		30	(通常配筋)	
No.7			I	シングル (1 つ間隔)
No.8			II	
No.9			III	
No.10			III	ダブル

表 4-2 シリーズ 1 基礎梁実験の鉄筋の引張試験結果

鉄筋	降伏点 (MPa)	弾性係数 (GPa)	降伏歪 (%)	引張強度 (MPa)	破断伸び (%)
主筋 D16 SD490	540	194	0.279	705	18.2
あばら筋 D10 SD295	335	189	0.177	471	24.7

表 4-3 シリーズ 1 基礎梁実験のコンクリートの材料試験結果

目標強度	圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)	試験体
18MPa	19.7	22.1	2.02	No.1～5
30MPa	36.8	31.0	2.96	No.6～10

各試験体の断面寸法と配筋図を図 4-4 に示す。主筋およびあばら筋はすべて共通の径、本数とピッチとした。隅筋の重心位置は上下左右共に 50mm とした。キャップタイの配置を図 4-5 に示す。No.5 と 10 は、タイプ のキャップタイを 100mm ピッチで配置した(ダブル)。キャップタイのタイプ別の寸法を図 4-6 に示す。

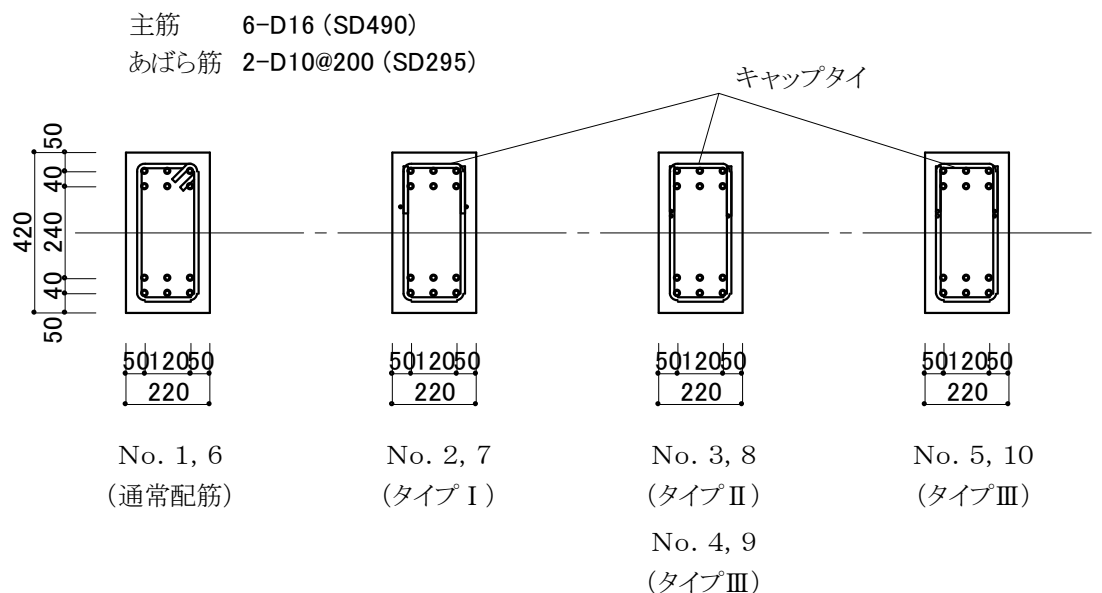


図 4-4 シリーズ 1 基礎梁実験の試験体の断面と配筋

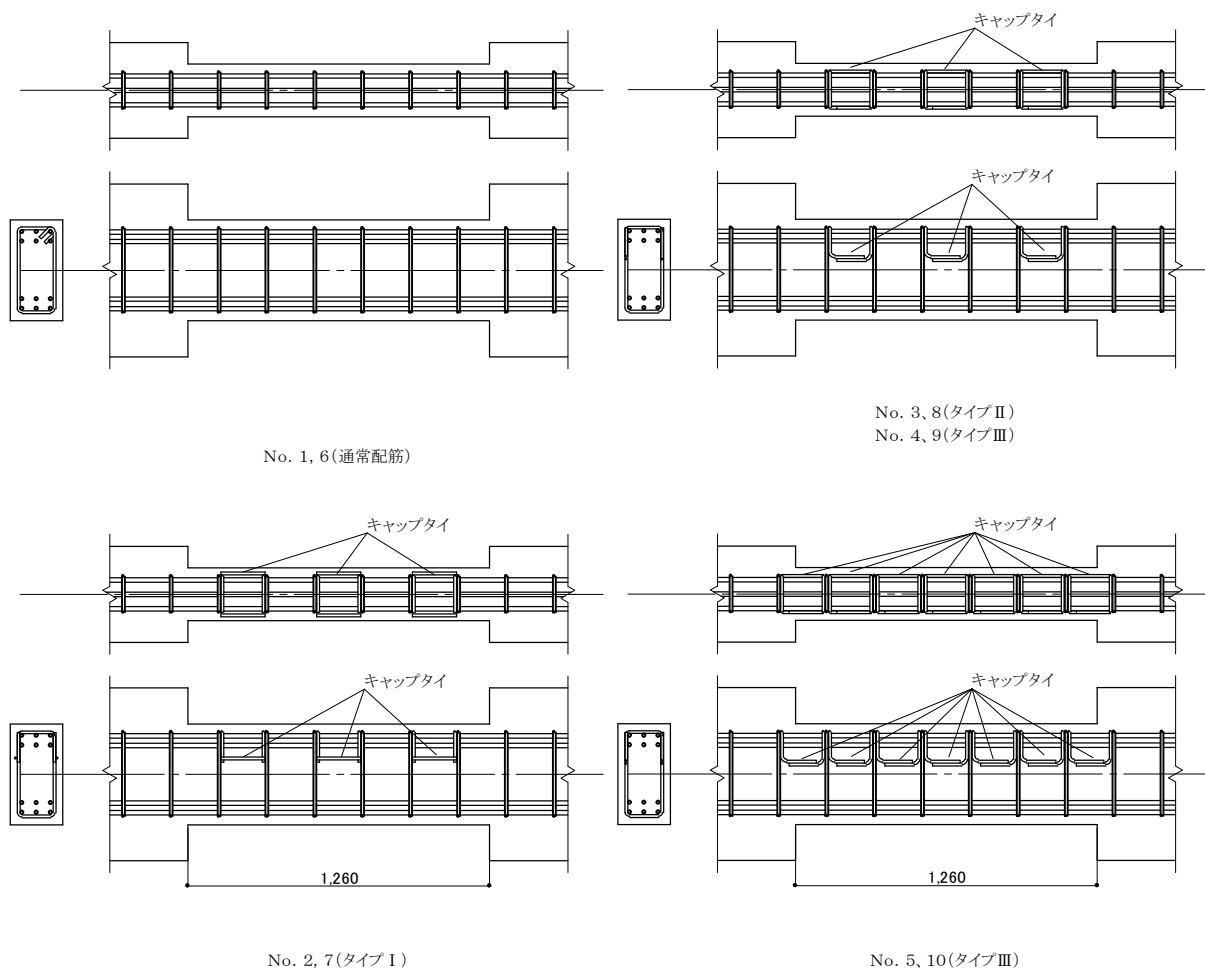
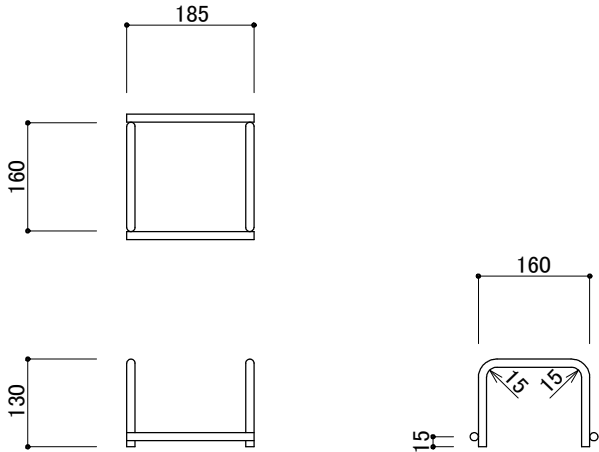


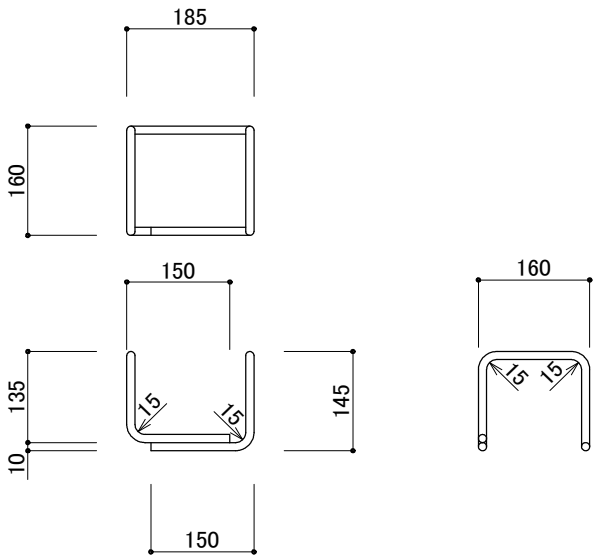
図 4-5 シリーズ1 基礎梁実験の試験体の配筋

キャップタイ形状図

タイプ I



タイプ II



タイプ III

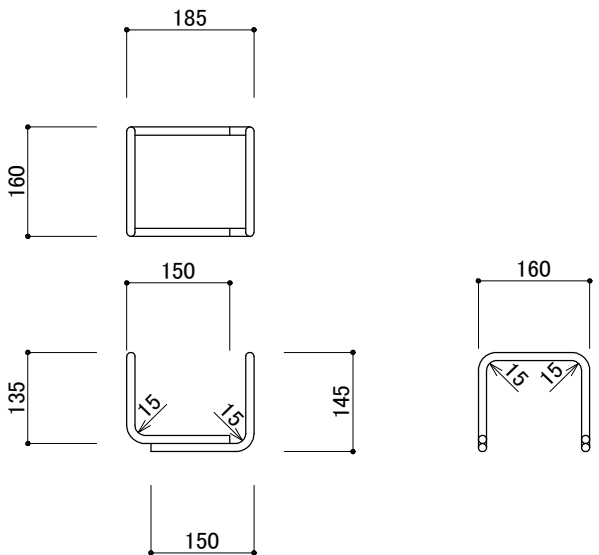


図 4-6 実験に使用したキャップタイの寸法

加力点の位置（図の 印）および荷重と試験区間のせん断力の関係を図 4-7 に示す。逆対称曲げモーメント下の一方向単調加力とした。試験区間に生じるせん断力の大きさと試験機が示す荷重との関係は、図に示すように $Q = 0.376P$ となる。加力装置の全景を写真 4-2 に示す。計測装置の位置を図 4-8 に示す。変位計 D1 と D2 の平均値を用いて部材角を求める。ひずみゲージの位置を図 4-9 に示す。

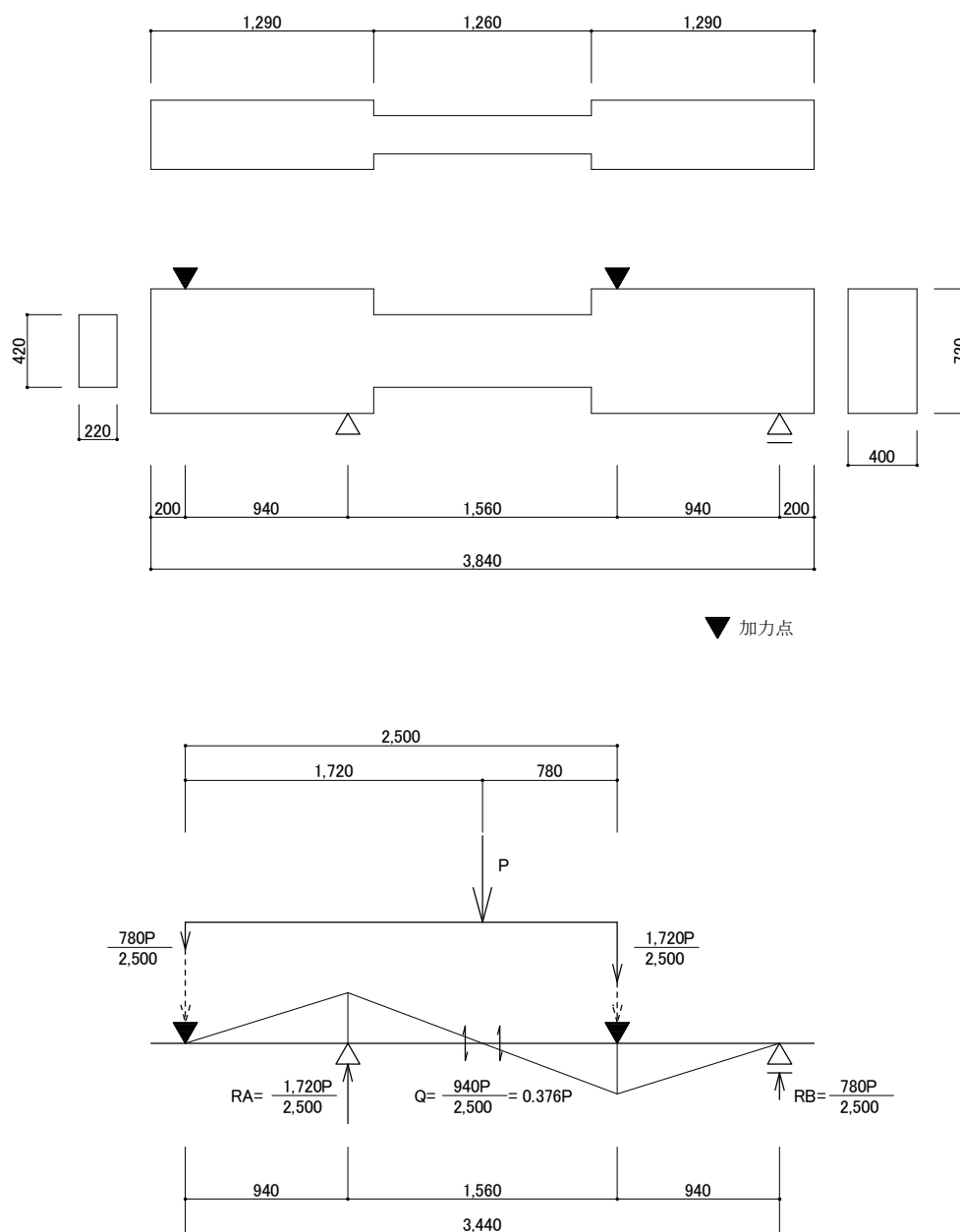
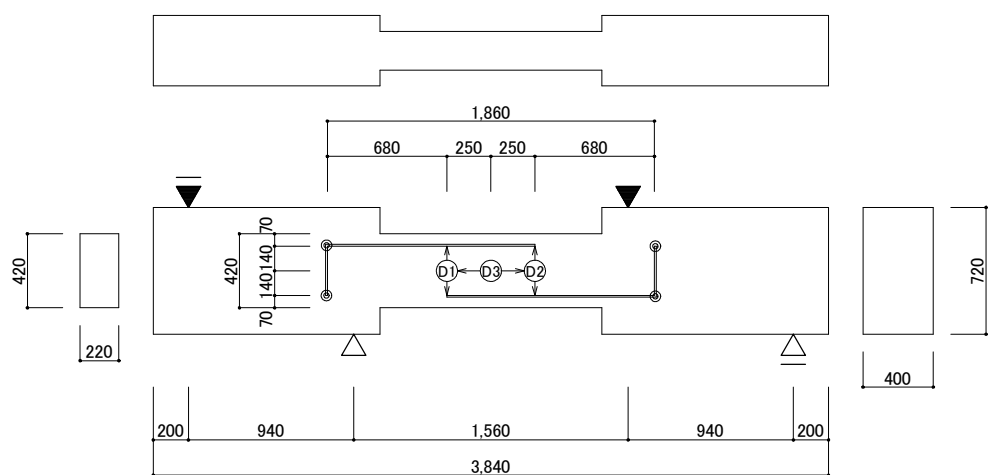


図 4-7 シリーズ 1 基礎梁実験の加力点の位置とせん断力の関係

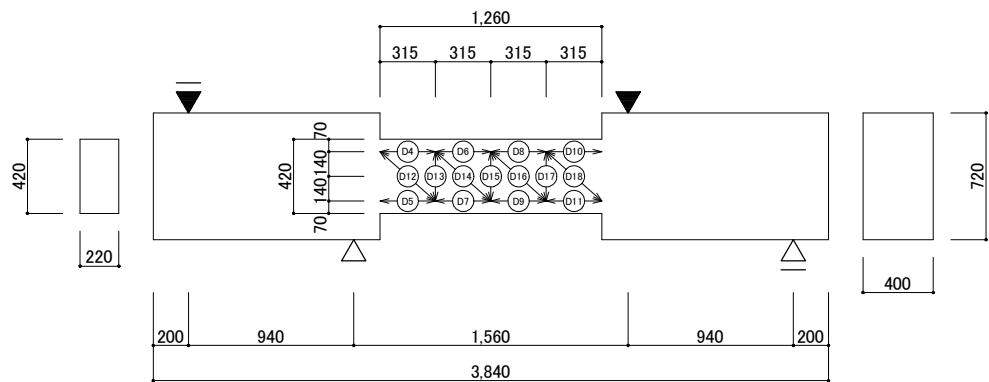


写真 4-2 シリーズ1 基礎梁実験の加力装置全景



(a) 試験区間相対変位測定位置

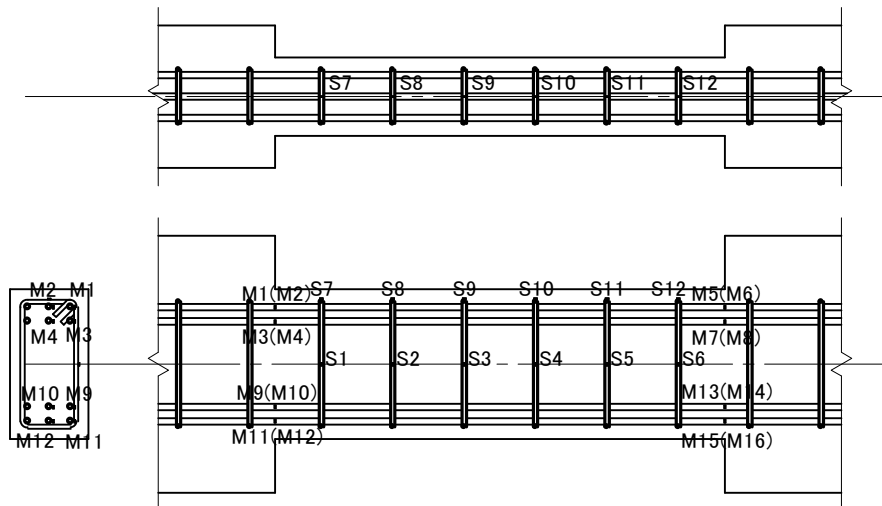
▼ 加力点



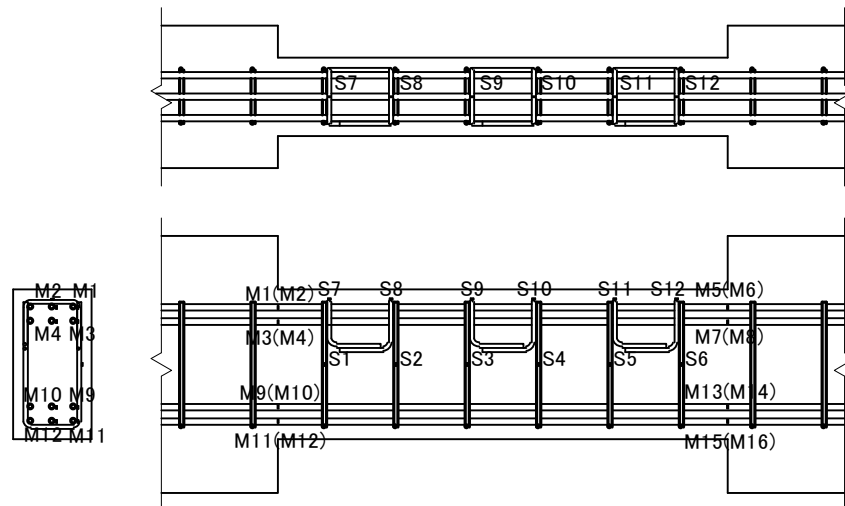
(b) 試験区間局変位測定位置

図 4-8 シリーズ1 基礎梁実験の計測装置位置図

No. 1、6



No. 2、3、4、7、8、9



No. 5、10

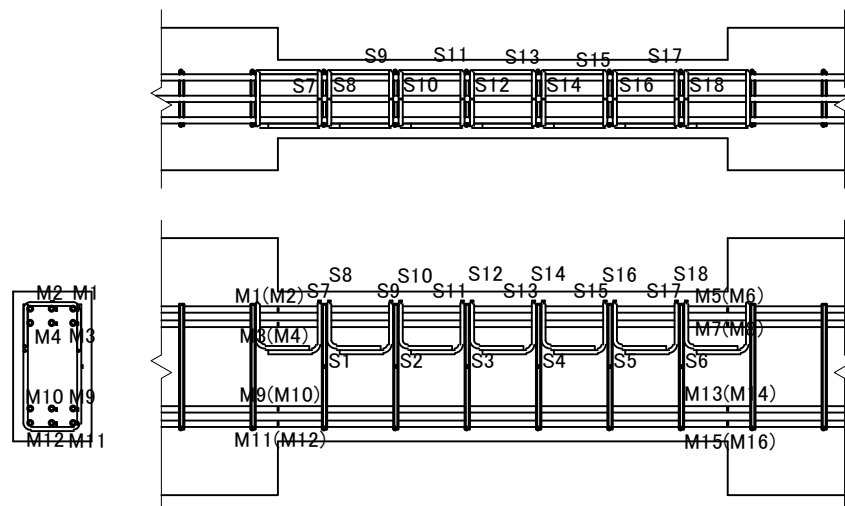


図 4-9 シリーズ1 基礎梁実験のひずみゲージ位置図

4-5 シリーズ1 基礎梁実験の結果

全試験体のせん断力 部材角関係のうち、No.1～No.5 (Fc18) を図 4-10 に、No.6～No.10 (Fc30) を図 4-11 に、それぞれを合成したグラフを図 4-12 に示す。

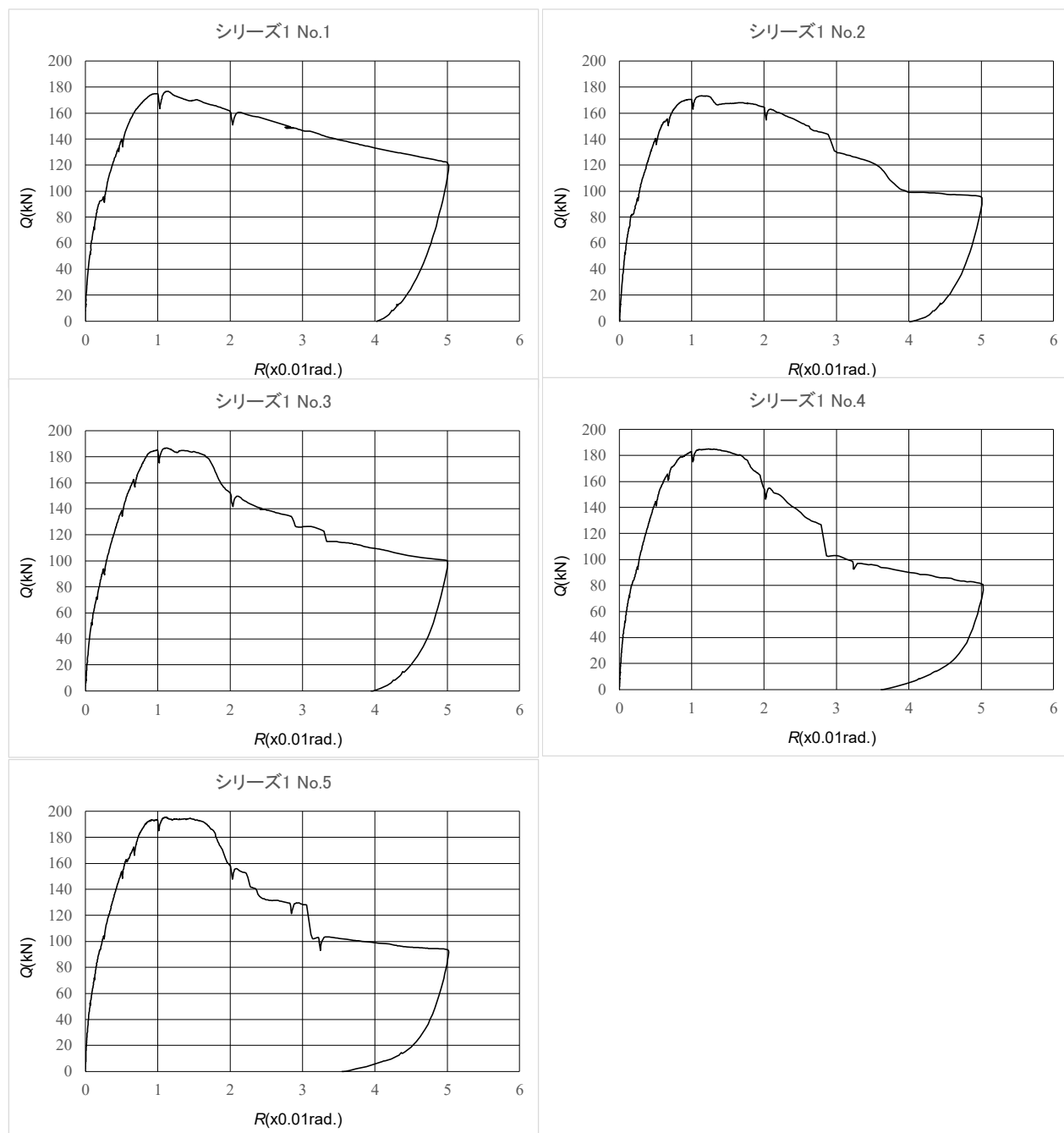


図 4-10 シリーズ1 基礎梁実験のせん断力 - 部材角関係 (Fc18)

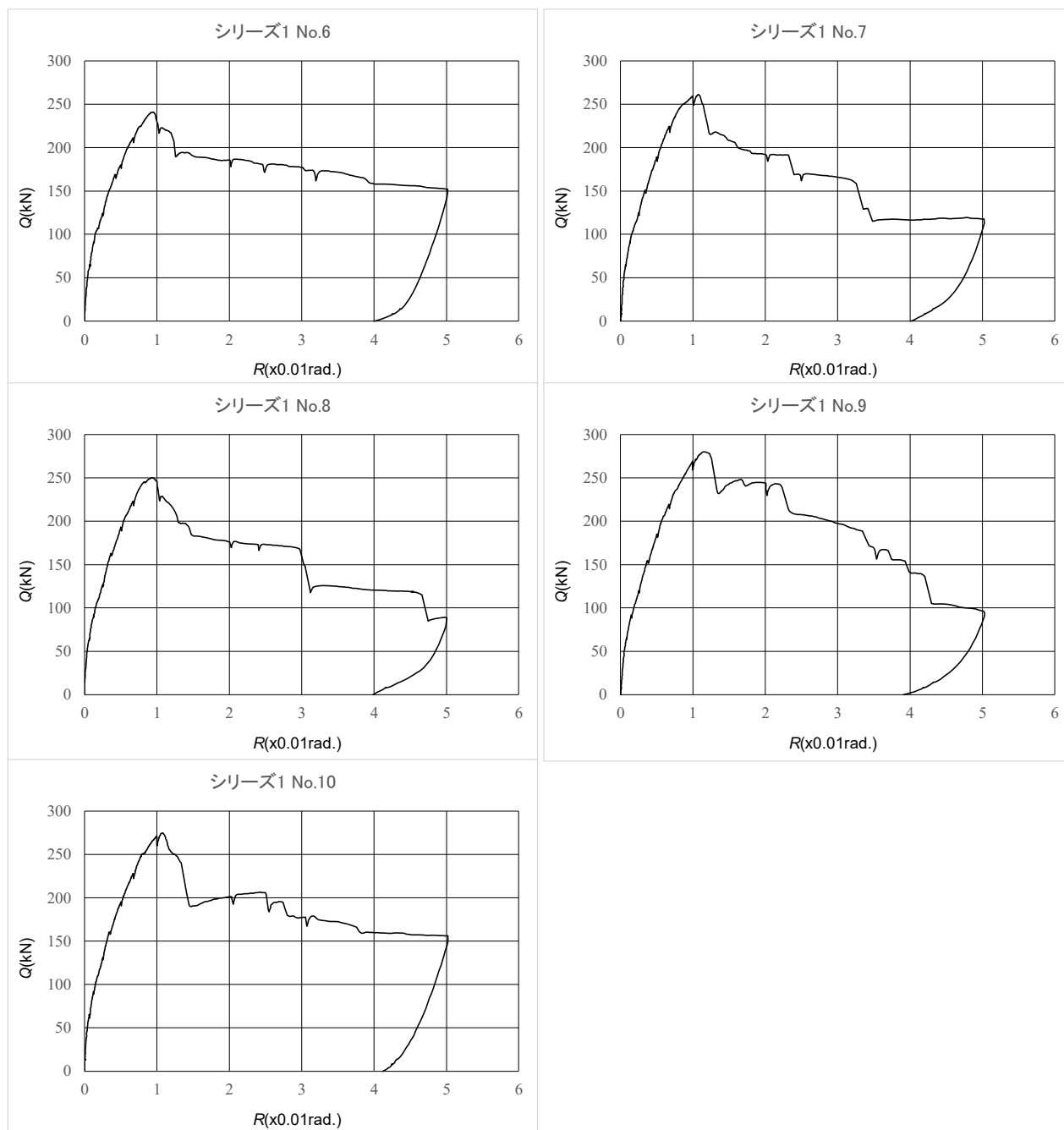


図 4-11 シリーズ1 基礎梁実験のせん断力 - 部材角関係 (Fc30)

図 4-12 について、上側は、コンクリートの目標強度 $F_c=18\text{MPa}$ 試験体、下側は $F_c=30\text{MPa}$ 試験体を示す。No.1、No.6 (太実線) が在来型配筋の結果である。いずれの試験体においても、あばら筋側辺降伏(S2~S5) キャップタイ(またはあばら筋上部 S8~S12)降伏 最大荷重の経過を示した。No.9 のみ、あばら筋降伏 最大荷重 キャップタイ上部降伏となった。ひび割れ性状についても、在来型とキャップタイ試験体はほぼ同様であった。No.2 のみ主筋に沿った付着割裂ひび割れが多数発生していたがその他のキャップタイ試験体では少ない。また No.3、No.4 では部材角 $1/33$ 付近で破裂音とともに急激な荷重低下がみられた。実験後に斫りを行った結果、No.1、6、10 以外であばら筋と主筋の溶接の剥離を 1~3 ヶ所確認した。

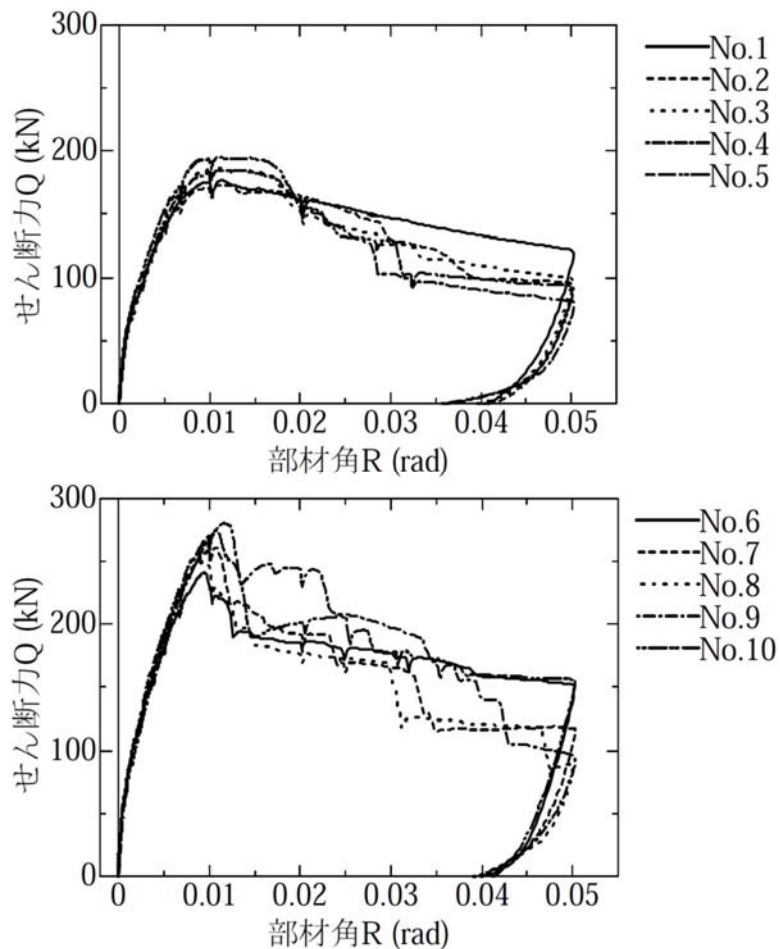


図 4-12 シリーズ1 基礎梁実験のせん断力 - 部材角関係

実験結果一覧を表 4-4 に示す。表中の大野荒川 mean 式^[4.2]および終局強度型指針^[4.3]による終局せん断耐力の計算値には、表 4-2 および表 4-3 に示す材料強度試験の結果、および表 4-5 に示す諸元を用いている。いずれの実験値も計算値との差は少なく、大野荒川 mean 式の場合、計算値に対して 1.14 から 1.43 倍の範囲、終局強度型指針 A 法の場合は、0.99 から 1.23 倍の範囲である。したがって、どの種類のキャップタイを用いた溶接組立配筋工法の場合にも通常配筋と全く同様に適用可能であり、設計に反映可能であると言える。各試験体の 1/50 加力時点のひび割れパターンを写真 4-3 と写真 4-4 に示す。コンクリート強度が大きい試験体の損傷が激しい。

キャップタイの種類別毎のひび割れの状況、荷重 - 変形関係の経過は、ほぼ同様であった。

表 4-4 シリーズ 1 基礎梁実験の結果一覧

試験体 符号	最大荷重実 験結果 eQmax(kN)	計算結果			
		荒川mean式 $c Q_{sumean}$ (kN)	$e Q_{max} / c Q_{sumean}$	終局強度型指針 A法 $c Q_{suA}$ (kN)	$e Q_{max} / c Q_{suA}$
No.1	177	153	1.16	175	1.01
No.2	173		1.14		0.99
No.3	187		1.22		1.07
No.4	185		1.21		1.06
No.5	195		1.28		1.12
No.6	241	196	1.23	227	1.06
No.7	261		1.33		1.15
No.8	250		1.28		1.10
No.9	280		1.43		1.23
No.10	275		1.40		1.21

表 4-5 シリーズ 1 基礎梁実験の終局耐力計算値の共通条件

変数	単位	使用値	備考
b	mm	220	梁幅
D	mm	420	梁せい
d	mm	342.5	主筋重心位置=(3×50+3×105)/6= 77.5mm
j	mm	300	= $d \times 7/8$
jt	mm	265	= $420 - 2 \times 77.5$ 主筋重心間距離
a_t	mm ²	1191.6	= 6本 × 198.6
a_w	mm ²	142.7	= 2本 × 71.33
p_t	%	1.5814	$p_t = a_t / b \cdot d$
p_w		0.00324	$p_w = a_w / b \cdot d$
L	mm	1260	内法スパン
$M / (Q \cdot d)$		1.839	= $L / 2 / d$

(1) 終局せん断耐力 大野・荒川式による

$$Q_{sumin} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (F_c + 18)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} \right\} b \cdot j$$

$$Q_{sumean} = \left\{ \frac{0.068 p_t^{0.23} (F_c + 18)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} \right\} b \cdot j$$

(2) 終局せん断耐力 終局強度指針 A 法による

$$V_{uA} = b \cdot j_t \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \varphi + \tan \theta (1 - \beta) \cdot b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B / 2$$

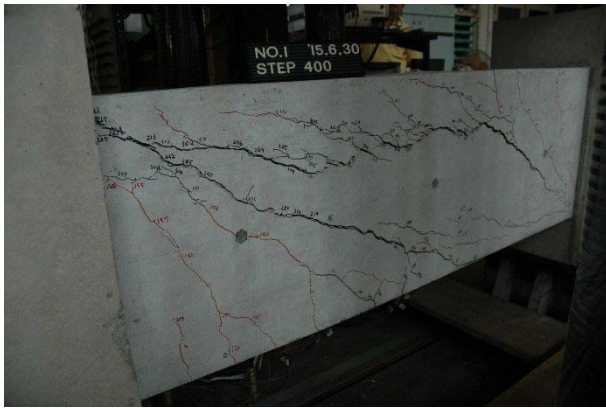
$$\tan \theta = \sqrt{(L/D)^2 + 1} - L/D$$

$$\beta = \frac{(1 + \cot^2 \varphi) p_w \sigma_{wy}}{v \cdot \sigma_B}$$

$$v = v_0 = 0.7 - \frac{\sigma_B}{2000} \quad (\sigma_B \text{の単位: kgf/cm}^2)$$

$$\cot \varphi = \min \left\{ 2.0, j_t / (D \cdot \tan \theta), \sqrt{v \cdot \sigma_B / (p_w \cdot \sigma_{wy})} - 1 \right\}$$

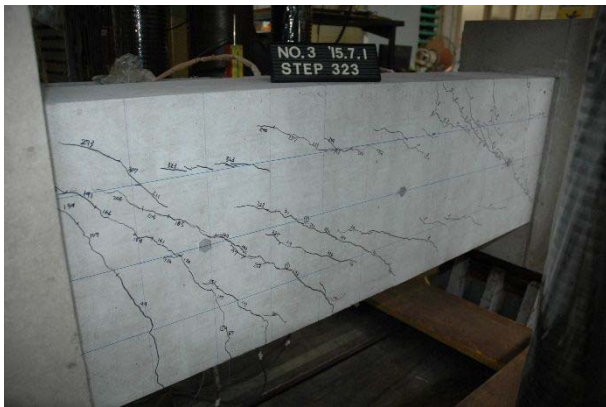
σ_B	コンクリートの圧縮強度
σ_y	引張鉄筋の降伏強度
σ_{wy}	せん断補強筋の降伏強度
b	梁幅
D	梁せい
L_0	内法スパン
d	梁の有効せい
j	梁の応力中心距離
j_t	主筋中心間距離
a_t	引張鉄筋断面積
φ	トラス機構のコンクリー圧縮束角度
v	有効強度係数



(a)No.1 1/50 加力時



(b)No.2 1/50 加力時



(c)No.3 1/50 加力時



(d)No.4 1/50 加力時



(e)No.5 1/50 加力時

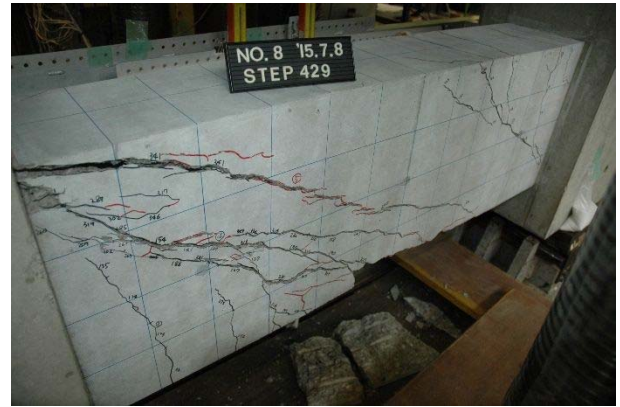


(f)No.6 1/50 加力時

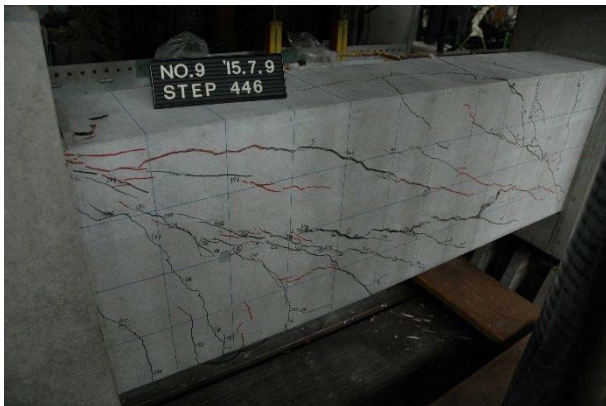
写真 4-3 シリーズ1 基礎梁実験ひび割れパターン(No.1~No.6)



(g)No.7 1/50 加力時



(h)No.8 1/50 加力時



(i)No.9 1/50 加力時



(j)No.10 1/50 加力時

写真 4-4 シリーズ1 基礎梁実験ひび割れパターン(No.7～No.10)

あばら筋およびキャップタイのひずみ測定結果を図 4-13 および図 4-14 に示す。何れも左側列はあばら筋の側辺のひずみを、右側列はあばら筋の頂部(No.1, No.6)またはキャップタイの頂部のひずみを示している。横軸は、あばら筋位置(試験区間の左端からの距離)を表す。あばら筋に用いた D10 の降伏歪は 0.177% である。各試験体の初降伏位置とその際の部材角、最大荷重における降伏位置を表 4-6 に示す。あばら筋の位置は、左から側辺が S1～S6、頂部またはキャップタイを S7～S18 とする。

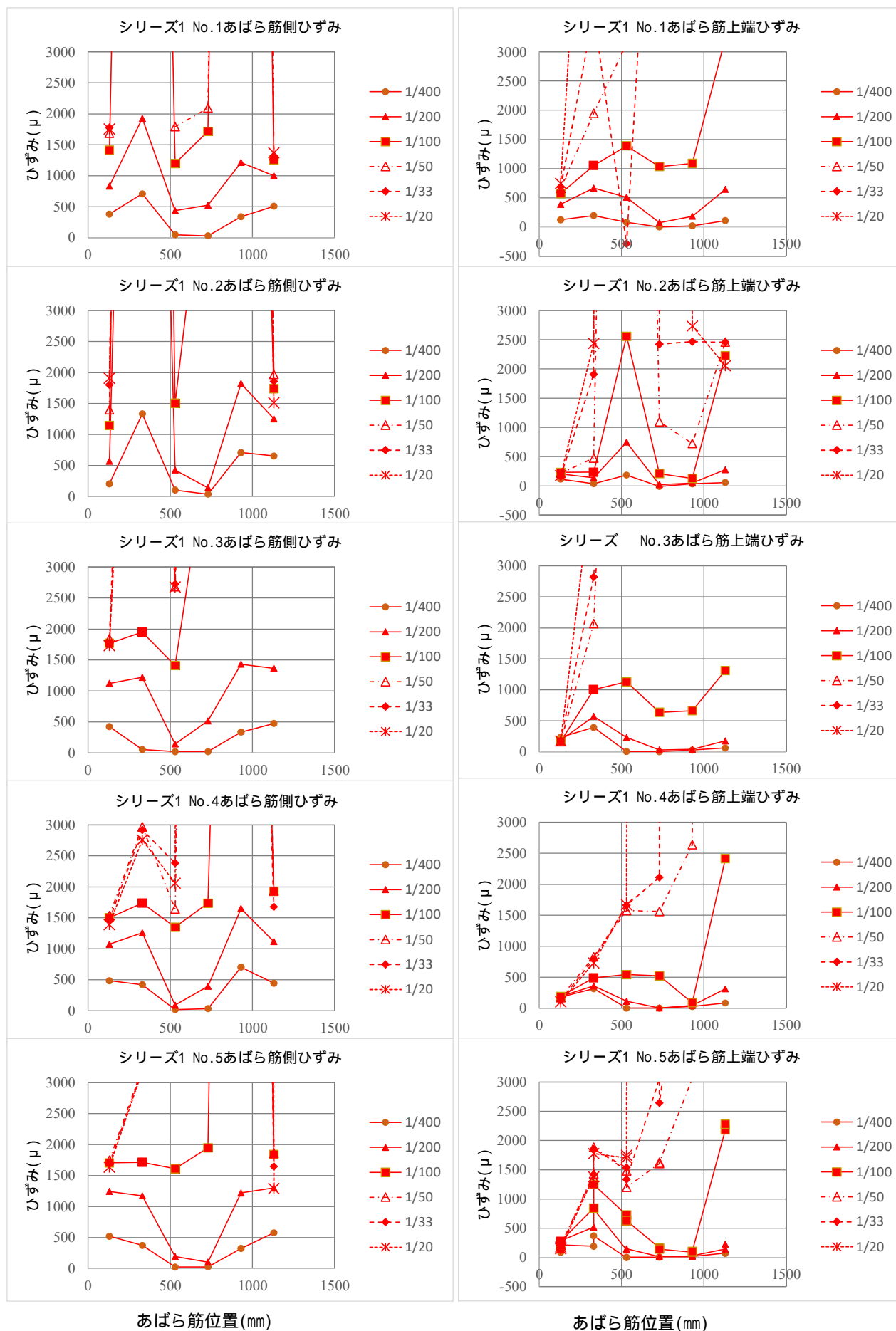
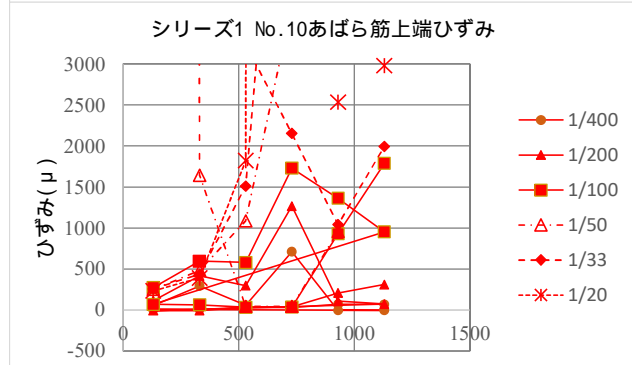
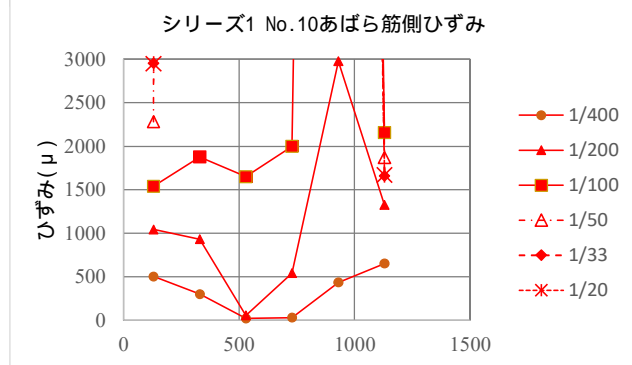
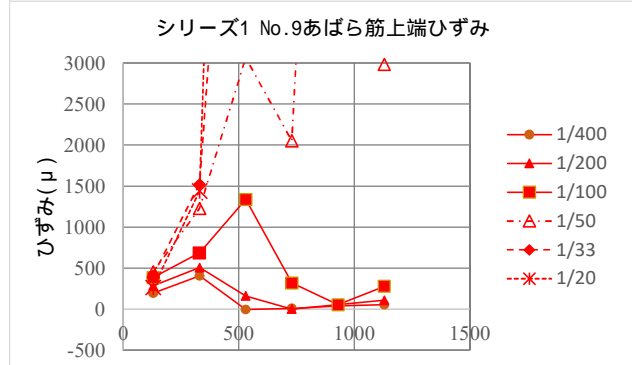
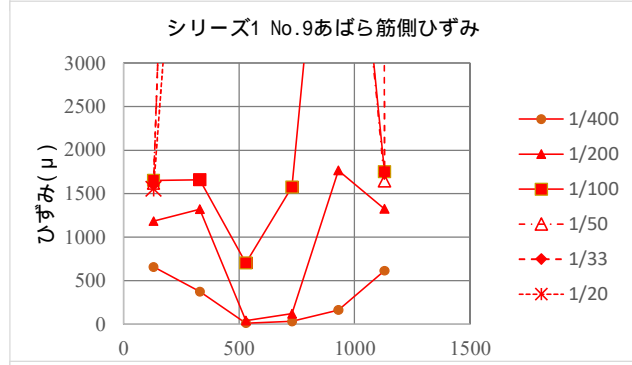
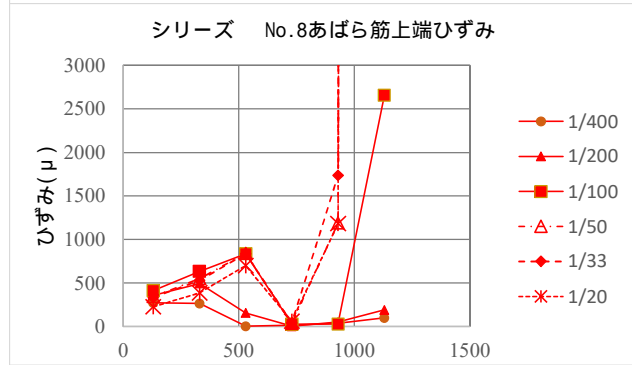
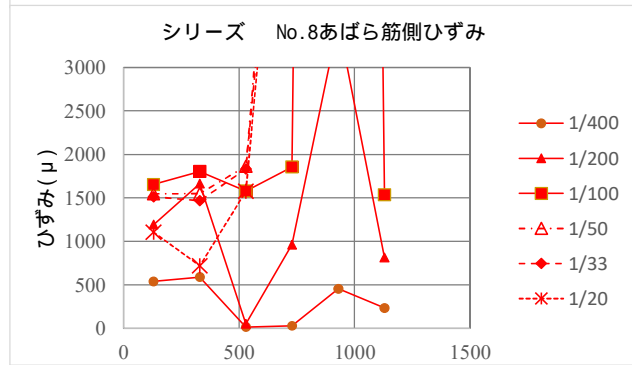
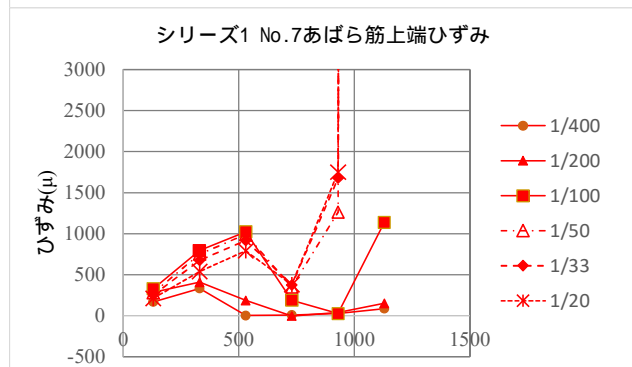
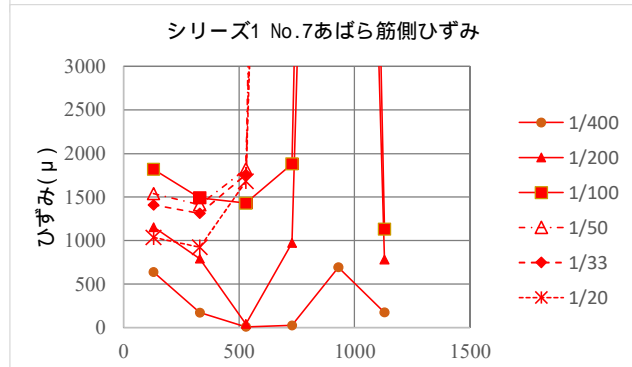
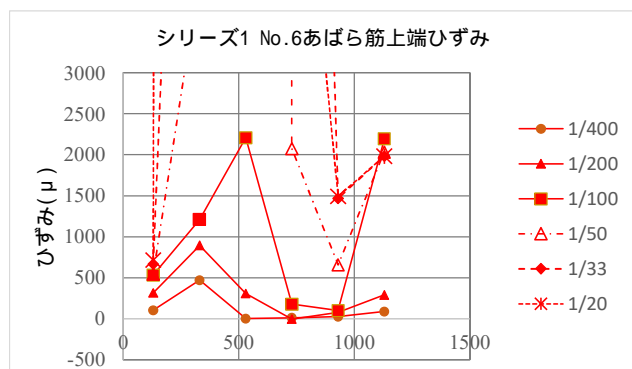
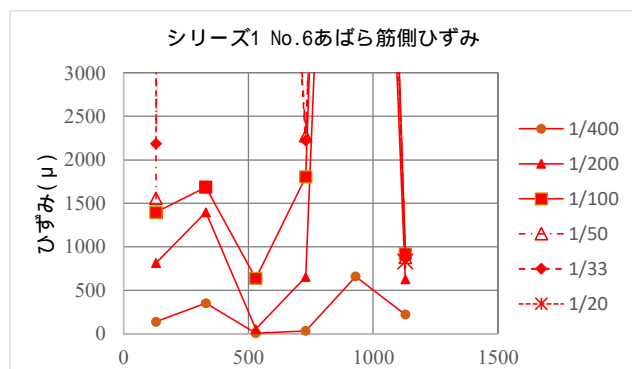


図 4-13 シリーズ1 あばら筋ひずみ(Fc18)



あばら筋位置(mm)

あばら筋位置(mm)

図 4-14 シリーズ1 あばら筋ひずみ(Fc30)

表 4-6 シリーズ 1 あばら筋の降伏位置

試験体 No.	Fc	最初の降伏位置	最大荷重時降伏位置
1	18	R=1/213 S5	R=1/88 S2,S5,S10,S11,S12
2		R=1/312 S5	R=1/88 S2,S5,S3,S4,S9
3		R=1/173 S5	R=1/89 S4,S5,S6,S9,S10,S11,S12
4		R=1/186 S5	R=1/81 S5,S12
5		R=1/170 S5	R=1/92 S2,S3,S4,S5,S6,S15,S16,S17,S18
6	30	R=1/230 S5	R=1/106 S2,S3,S5,S8,S9
7		R=1/272 S5	R=1/94 S5,S12
8		R=1/249 S5	R=1/107 S5,S12
9		R=1/197 S5	R=1/86 S5,S9,S10,S11,S12
10		R=1/228 S5	R=1/93 S2,S3,S4,S5,S6,S7,S15,S16,S17,S18

あばら筋は、全ての試験体共に部材角 1/200 前後において、あばら筋の側辺で降伏した。試験区間の 2 番目の位置（300mm 中心側）で生じる点も同様であった。最大荷重時には、No.1 と No.6 ではあばら筋の頂部において 2～3 ヶ所が降伏した。キャップタイは、コンクリート強度の違いに依らず端部から 1～2 ヶ所の位置で降伏した。

4-6 シリーズ 2 基礎梁実験

シリーズ 2 実験のパラメータの一覧を表 4-7 に示す。試験体名 0-1、0-2、1-1、1-4 をフェーズ、3-1、3-2、3-3、3-4 をフェーズ とする。フェーズ のうち 0-1 と 0-2 の 2 体は在来形式の 135° フック付きあばら筋を用いた通常配筋である。1-1 と 1-4 は、A タイプ溶接で接合しキャップタイを取り付けた試験体である。3-1 と 3-2 は、キャップタイの有無の影響を把握するため、A タイプ溶接で接合しキャップタイを設置していない。また、3-3 と 3-4 は、溶接強度の影響を把握するため、A タイプ溶接に較べて約 30%程度、意図的に強度が低くなるように溶接条件を調整した試験体である。コンクリート目標強度は 18MPa と 30MPa の 2 水準、キャップタイはいずれもタイプとした。共通因子として、主筋は、D16(SD490)を 2 段、上下 6 本ずつ、引張鉄筋比は 1.55%、あばら筋は 2-D10 を 200 ピッチ、せん断補強筋比は $p_w=0.32\%$ である。

No.0-1、No.0-2、No.1-1、No.1-4 の断面寸法と配筋を図 4-15 に示す。また No.3-1、3-2、3-3、3-4 の断面寸法と配筋を図 4-16 に示す。キャップタイの配置位置を、それぞれ図 4-17 および図 4-18 に示す。フェーズ の加力方向を図 4-19 に、建研式正負交番逆対称加力装置を図 4-20 に示す。

フェーズ の加力方向を図 4-21 に示す。フェーズ と同じく建研式正負交番逆対称加力装置を図 4-22 に示す。なお、加力方法を変更せずに試験体の交換を容易にするため、一体のスタブの替わりに鋼製のブラケットを用いてスタブの替わりとした。ブラケットの間隔と試験区間長さを揃えて 1260mm とした。加力履歴を図 4-23 に示す。部材角 1/400、1/200、1/100、1/50、1/33 までは、各 2 サイクルずつとし、1/20、1/15 は、1 サイクルとした。変位計および計測位置を図 4-24 に示す。ひずみゲージの位置をフェーズ は図 4-25 に、フェーズ は図 4-26 に示す。

表 4-7 シリーズ 2 基礎梁実験の試験体一覧

試験体名	共通事項	コンクリート 目標強度 (MPa)	溶接タイプ	特記事項	
No.0-1	断面 $b \times D(\text{mm})$ =220×420 せん断スパン比 1.5 主筋 3,3-D16 (SD490) $p_t=1.58\%$ あばら筋 2-D10@200 (SD295A) $p_w=0.32\%$	18	-	在来型	フェーズ I
No.1-1			Type-A	キャップタイ タイプ II	フェーズ I
No.3-1			Type-A	キャップタイ無し	フェーズ II
No.3-3			Type-B	キャップタイ タイプ II	フェーズ II
No.0-2		30	-	在来型	フェーズ I
No.1-4			Type-A	キャップタイ タイプ II	フェーズ I
No.3-2			Type-A	キャップタイ無し	フェーズ II
No.3-4			Type-B	キャップタイ タイプ II	フェーズ II

主筋 6-D16 (SD490)
あばら筋 2-D10@200 (SD295)

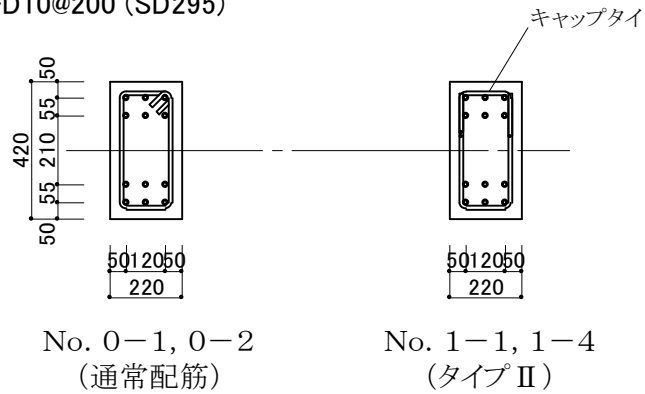


図 4-15 シリーズ 2 フェーズ 基礎梁実験の試験体断面と配筋

主筋 6-D16 (SD490)
あばら筋 2-D10@200 (SD295)

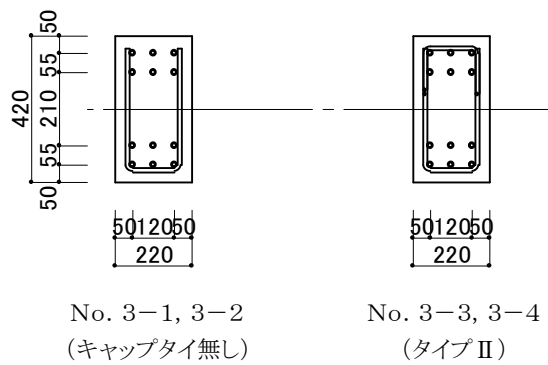
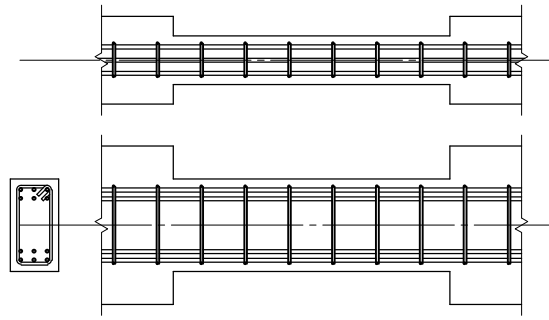
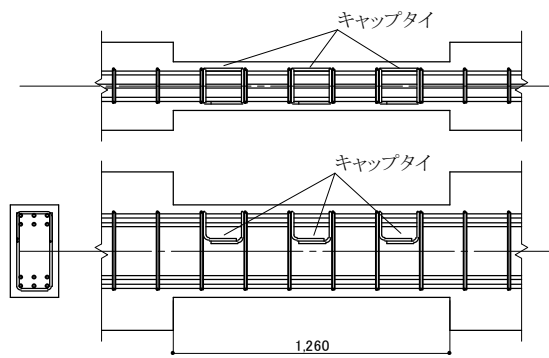


図 4-16 シリーズ 2 フェーズ 基礎梁実験の試験体の断面と配筋

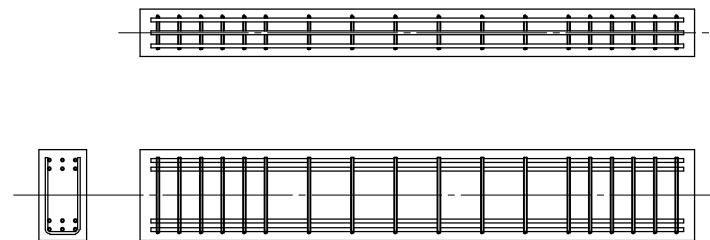


No.0-1, 0-2 (通常配筋)

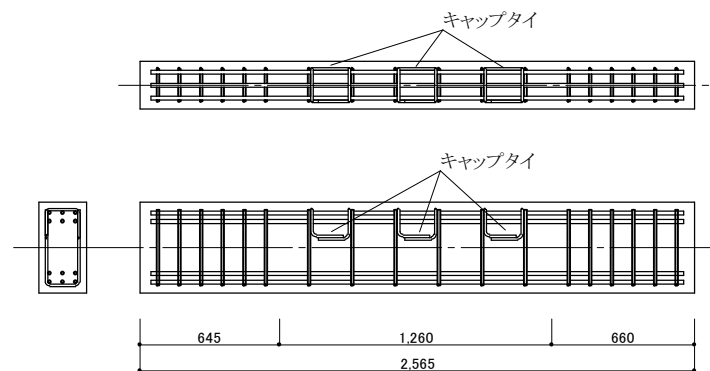


No.1-1, 1-4 (タイプⅡ)

図 4-17 シリーズ2 フェーズ 基礎梁実験の試験体配筋



No.3-1, 3-2



No.3-3, 3-4

図 4-18 シリーズ2 フェーズ 基礎梁実験の試験体の配筋

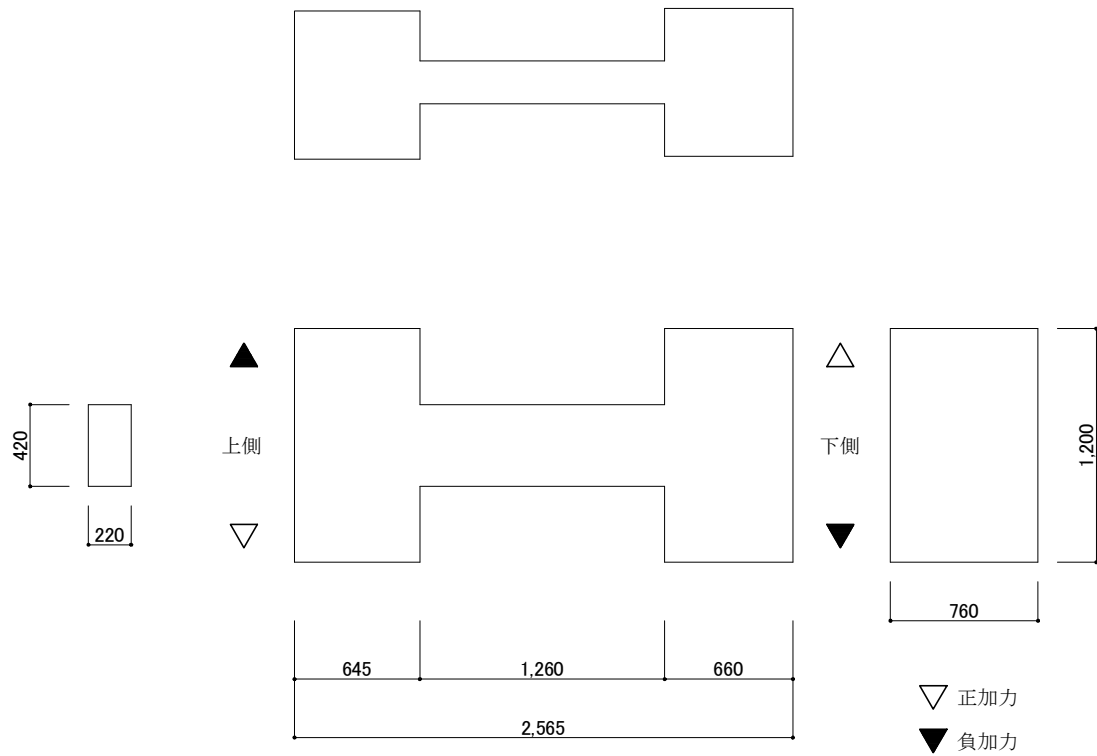


図 4-19 シリーズ 2 フェーズ 基礎梁実験の加力方向

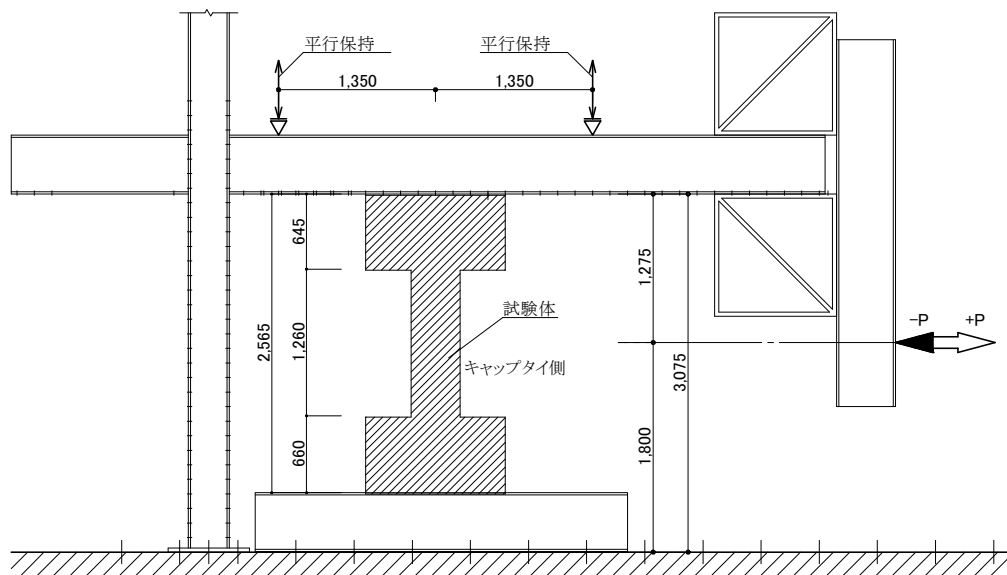


図 4-20 シリーズ 2 フェーズ 基礎梁実験の加力装置

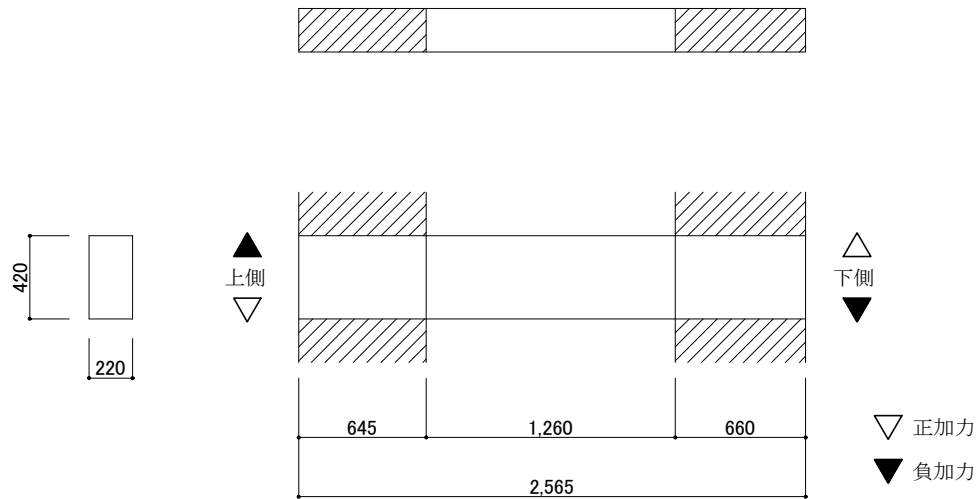


図 4-21 シリーズ2 フェーズ 基礎梁実験の加力方向

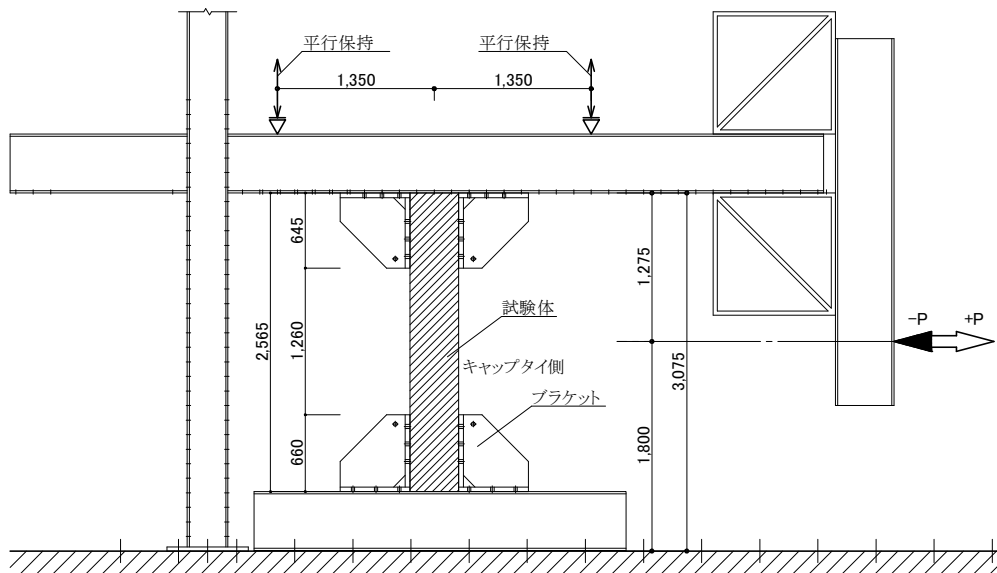


図 4-22 シリーズ2 フェーズ 基礎梁実験の加力装置

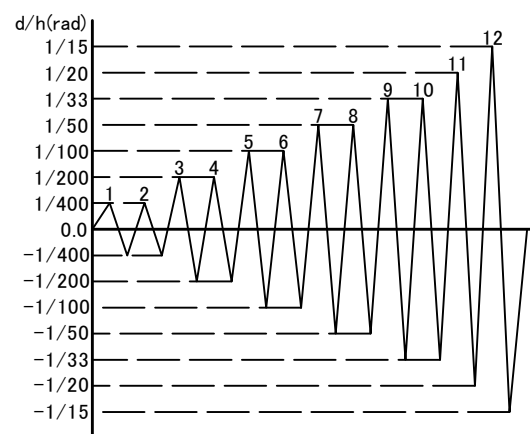


図 4-23 シリーズ2 基礎梁実験の加力履歴

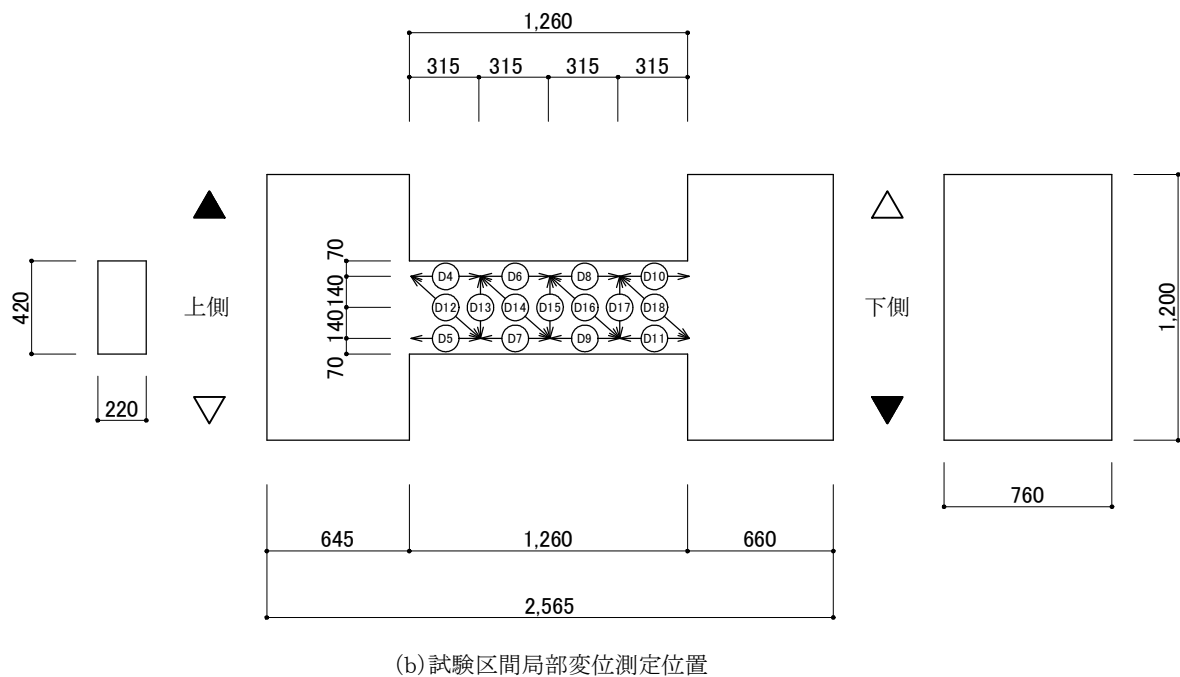
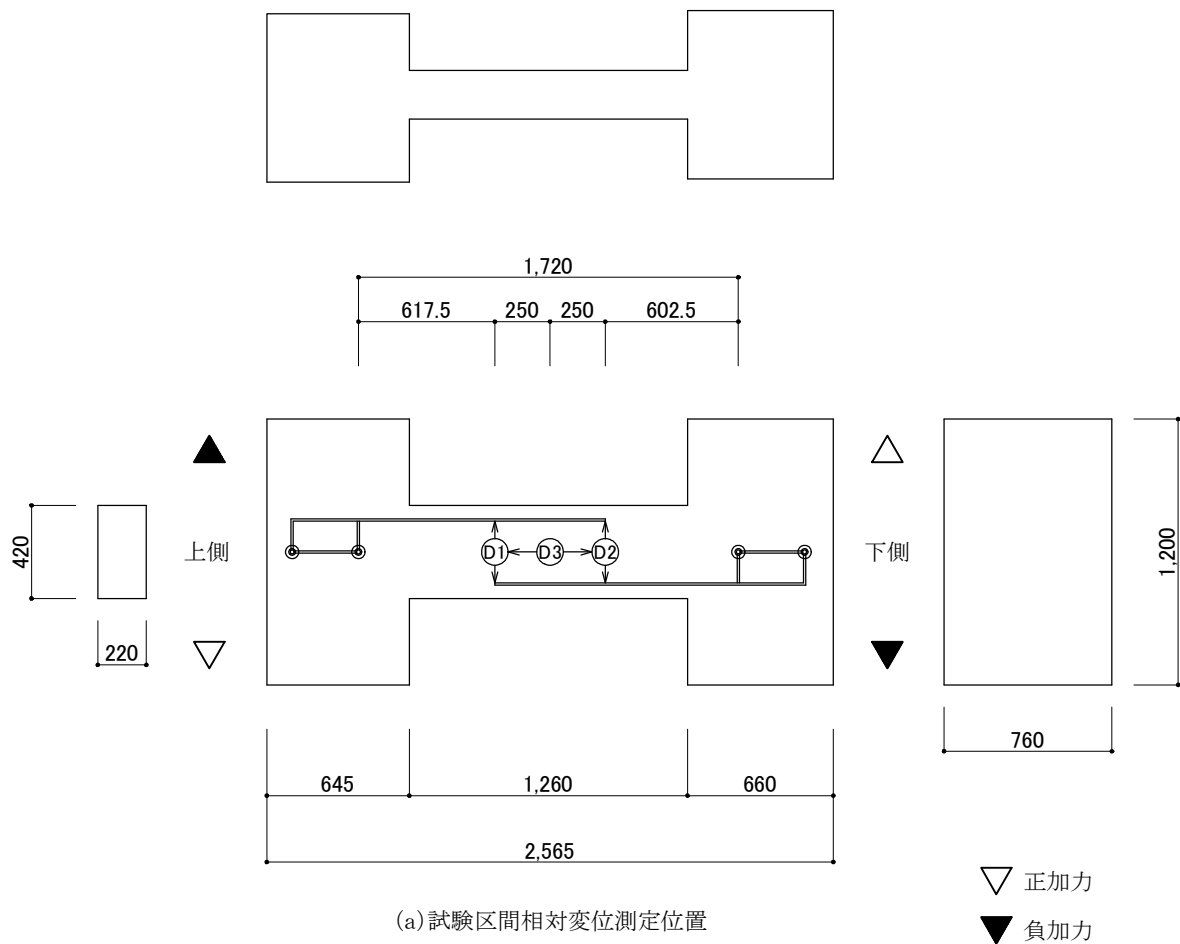
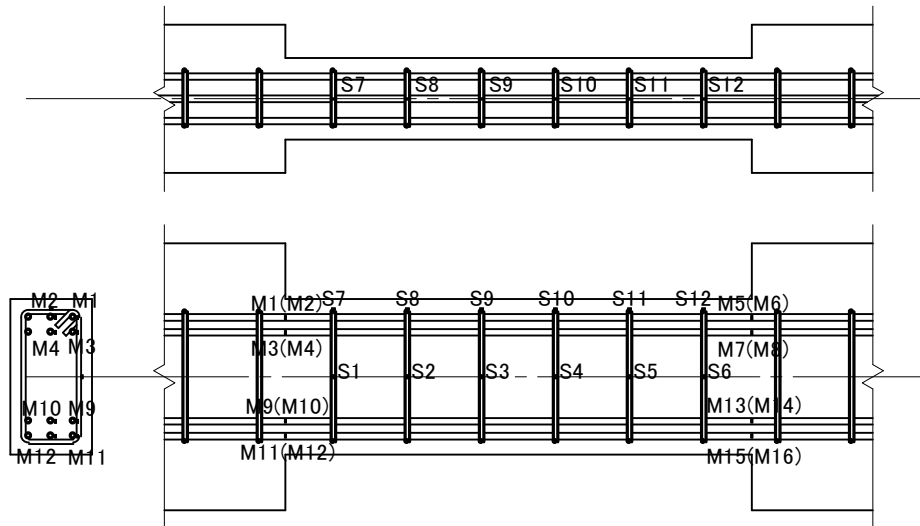


図 4-24 シリーズ 2 基礎梁実験の計測装置位置図

No. 0-1, 0-2



No. 1-1, 1-4

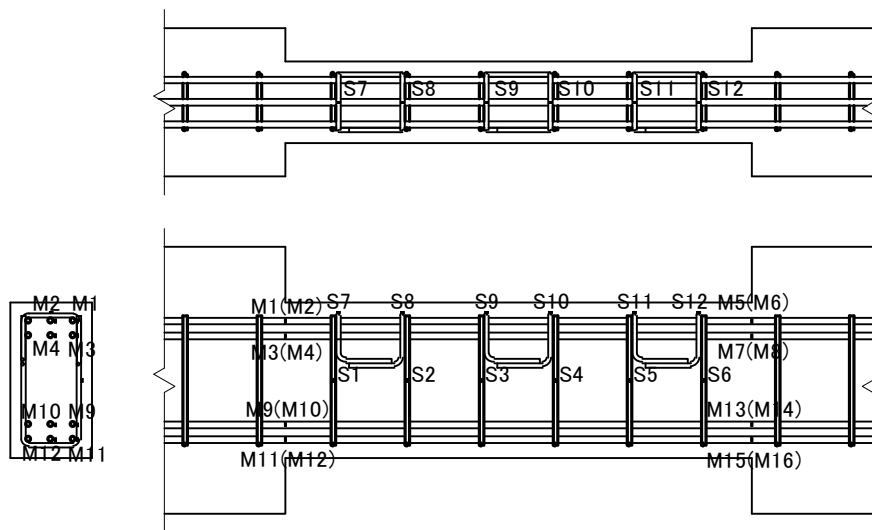
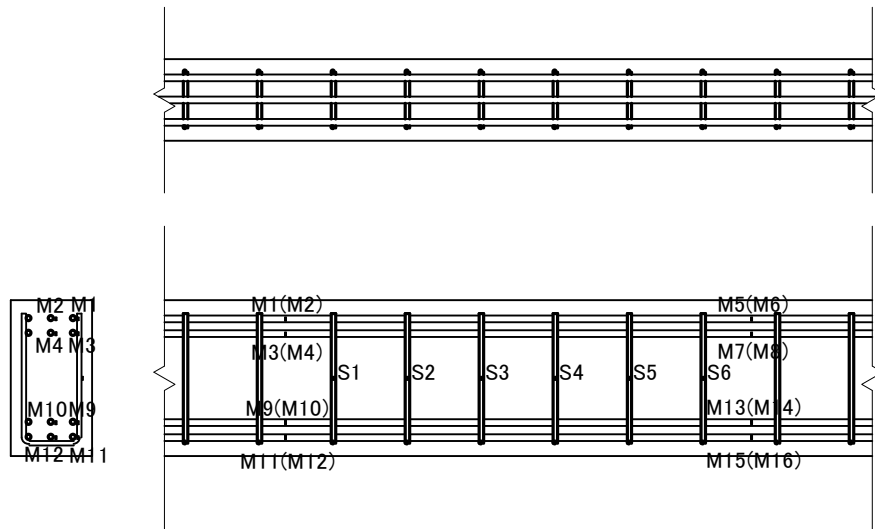


図 4-25 シリーズ2 フェーズ 基礎梁実験のひずみゲージ位置図

No. 3-1、3-2



No. 3-3、3-4

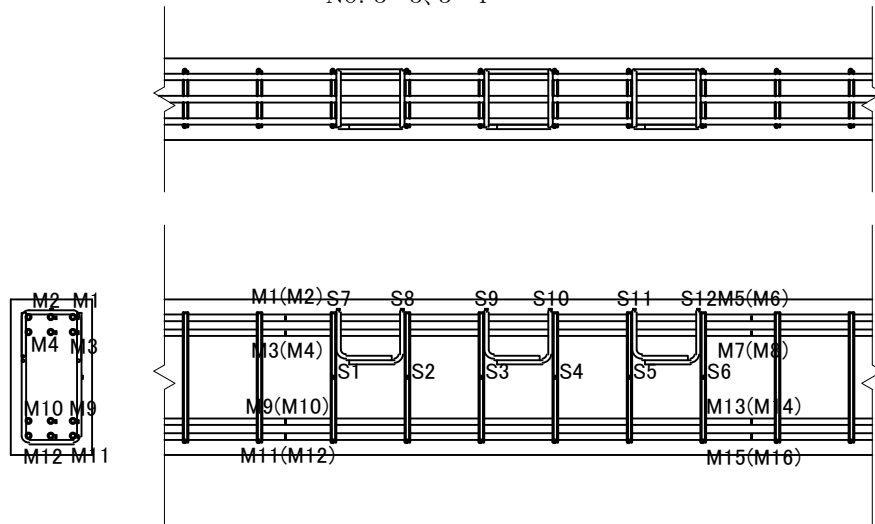


図 4-26 シリーズ2 フェーズ 基礎梁実験のひずみゲージ位置図

4-7 シリーズ 2 基礎梁実験の結果

シリーズ 2 実験のせん断力 - 部材角関係を図 4-27 に、包絡線をコンクリート強度別に図 4-28 に示す。

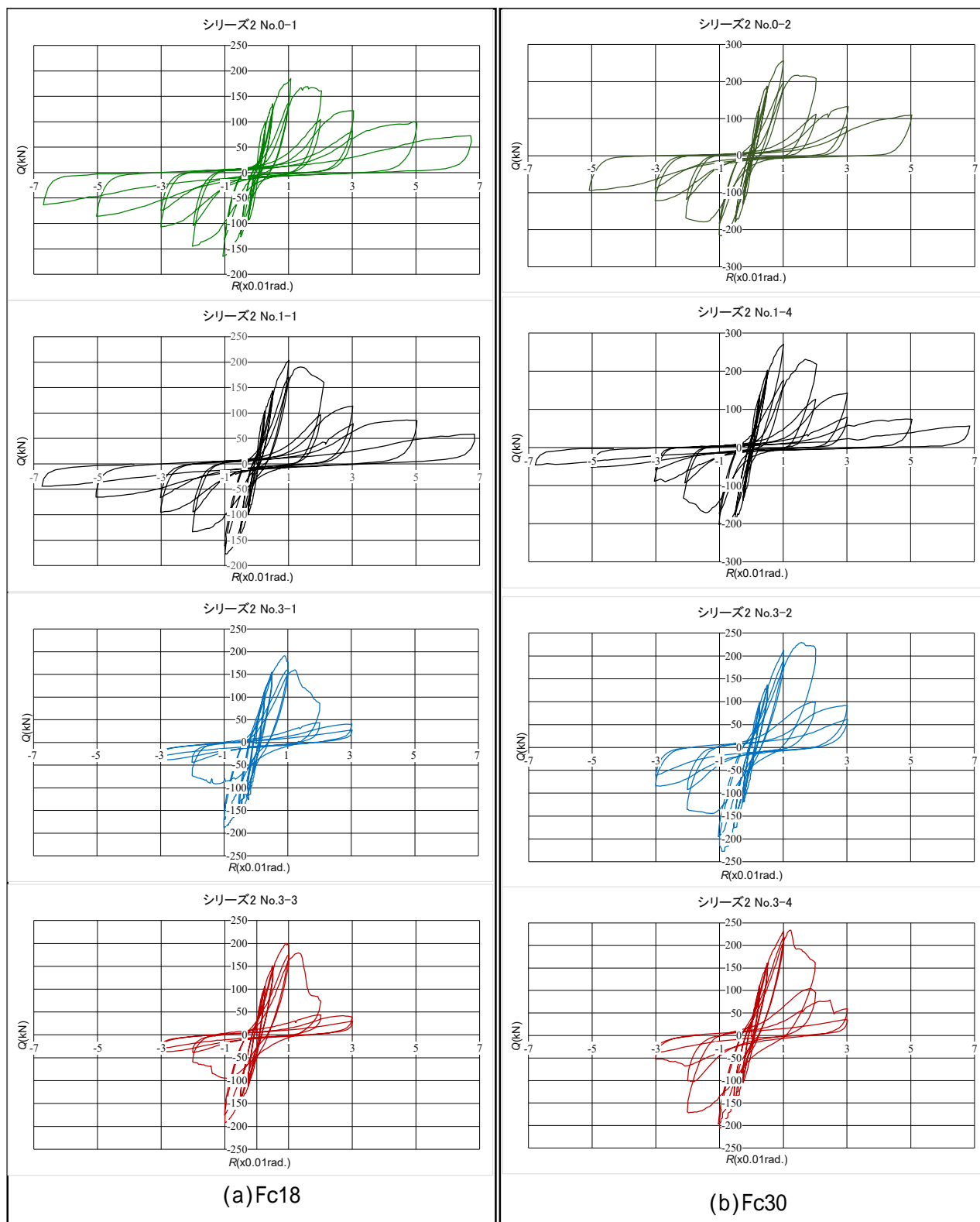
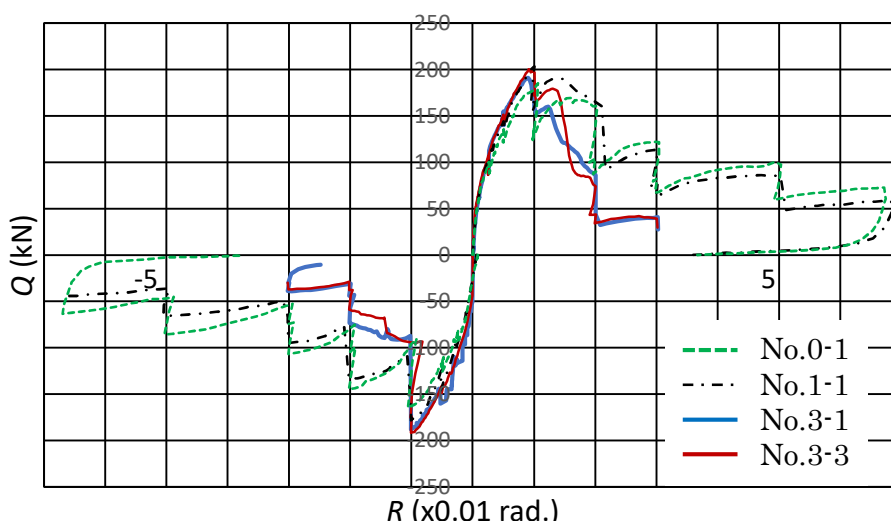


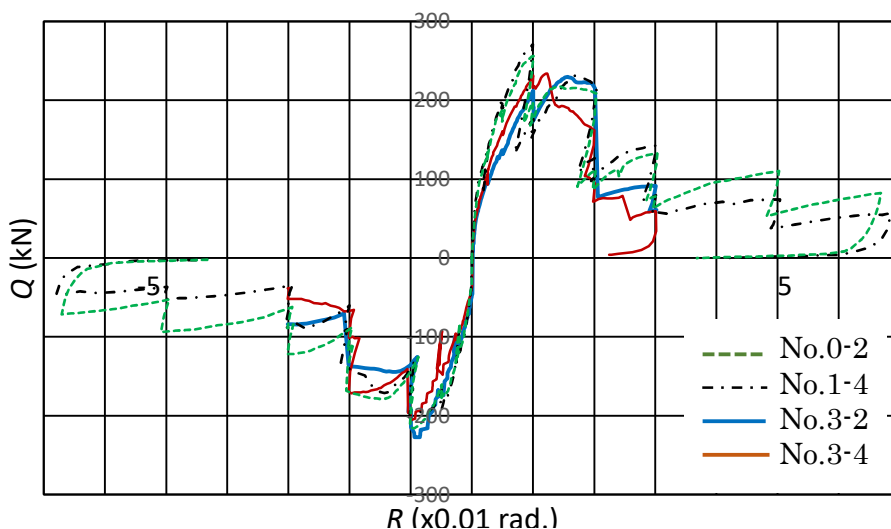
図 4-27 シリーズ 2 試験体のせん断力 - 部材角関係

Fc18MPa 試験体では、正負それぞれの最大せん断力までは、ほぼ同様な剛性とせん断力を示しており、キャップタイの有無、溶接強度の違いによらず通常配筋試験体と同等以上の耐力を有している。1/100 を超えるとキャップタイのない No.3-1、溶接強度の小さい No.3-3 の耐力低下が著しい。Fc30MPa 試験体の場合、No.1-4 では最大せん断力までは通常配筋試験体と同等であるが、キャップタイのない No.3-2、溶接強度の小さい No.3-4 の耐力低下が最大せん断力に至る前からみられる。一方、1/50 の正側では No.3-4 の耐力低下が、1/50 の負側では No.3-2 の耐力低下が著しい。

シリーズ 2 実験の結果一覧および大野荒川 mean 式^[4.2]、終局強度型指針^[4.3]による終局せん断耐力の計算値を表 4-8 に示す。計算に使用した材料強度試験の結果を表 4-9 から表 4-12 に示す。また計算に使用した諸元を表 4-13 に示す。フェーズ、フェーズ のいずれの計算値も実験値と差は少なく、大野荒川 mean 式の場合、計算値に対して 1.14 から 1.25 倍の範囲、終局強度型指針 A 法の場合は、0.99 から 1.04 倍の範囲である。せん断強度に関しては、キャップタイの有無、溶接強度の大小は関係ないといえる。



(a) Fc18MPa 試験体のせん断力 - 部材角関係 (包絡線)



(b) Fc30MPa 試験体のせん断力 - 部材角関係 (包絡線)

図 4-28 シリーズ 2 基礎梁実験のせん断力 - 部材角関係

表 4-8 シリーズ2 基礎梁実験の結果一覧

No.	実験最大値(kN)		曲げ強度時 (kN)	せん断強度(kN)		備 考			
	加力方向別	正負平均		cQ _{mu}	cQ _{sumin} cQ _{sumean}	終局強度型 A法	Fc (MPa)	溶接	キャップタイ
No.0-1	正	185	175	299	135	177	18	通常配筋	
	負	165			153				
No.1-1	正	204	191	299	135	177		A	有り
	負	178			153				
No.3-1	正	191	190	303	140	188			無し
	負	188			160				
No.3-3	正	200	196	303	140	188		B	有り
	負	192			160				
No.0-2	正	256	236	299	167	227	30	通常配筋	
	負	216			192				
No.1-4	正	271	237	299	167	227		A	有り
	負	202			192				
No.3-2	正	230	228	303	160	220			無し
	負	227			185				
No.3-4	正	234	220	303	160	220		B	有り
	負	206			185				

表 4-9 シリーズ2 フェーズ 基礎梁実験の鉄筋の材料強度試験結果

鉄筋	降伏点 (MPa)	弾性係数 (GPa)	降伏歪 (%)	引張強度 (MPa)	破断伸び (%)
主筋 D16 SD490	513	192	0.267	715	16.6
あばら筋 D10 SD295	359	188	0.191	503	28.9

表 4-10 シリーズ2 フェーズ 基礎梁実験の鉄筋の材料強度試験結果

鉄筋	降伏点 (MPa)	弾性係数 (GPa)	降伏歪 (%)	引張強度 (MPa)	破断伸び (%)
主筋 D16 SD490	520	186	0.280	699	17.5
あばら筋 D10 SD295	358	186	0.192	486	24.5

表 4-11 シリーズ2 フェーズ 基礎梁実験のコンクリートの材料試験結果

目標強度	圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)	試験体
18MPa	18.8	18.4	1.86	No.0-1 No.1-1
30MPa	34.4	24.1	3.02	No.0-2 No.1-4

表 4-12 シリーズ2 フェーズ 基礎梁実験のコンクリート材料試験結果

目標強度	圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)	試験体
18MPa	21.8	19.0	2.26	No.3-1 No.3-3
30MPa	31.7	21.6	2.59	No.3-2 No.3-4

表 4-13 シリーズ2 基礎梁実験の終局耐力計算値の共通条件

変数	単位	使用値	備考
b	mm	220	梁幅
D	mm	420	梁せい
d	mm	342.5	主筋重心位置 $= (3 \times 50 + 3 \times 105) / 6 = 77.5 \text{ mm}$
j	mm	300	$= d \times 7/8$
jt	mm	265	$= 420 - 2 \times 77.5$ 主筋重心間距離
a_t	mm^2	1191.6	$= 6 \text{ 本} \times 198.6$
a_w	mm^2	142.7	$= 2 \text{ 本} \times 71.33$
p_t	%	1.5814	$p_t = a_t / b \cdot d$
p_w		0.00324	$p_w = a_w / b \cdot 20$
L	mm	1260	内法スパン
$M / (Q \cdot d)$		1.839	$= L / 2 \cdot d$

あばら筋およびキャップタイのひずみ測定結果を図 4-29 および図 4-30 に示す。何れも左側列はあばら筋の側辺のひずみを、右側列はあばら筋の頂部 (No.0-1, No.0-2 またはキャップタイの頂部のひずみを示している。横軸は、あばら筋位置 (試験区間の左端からの距離) を表す。

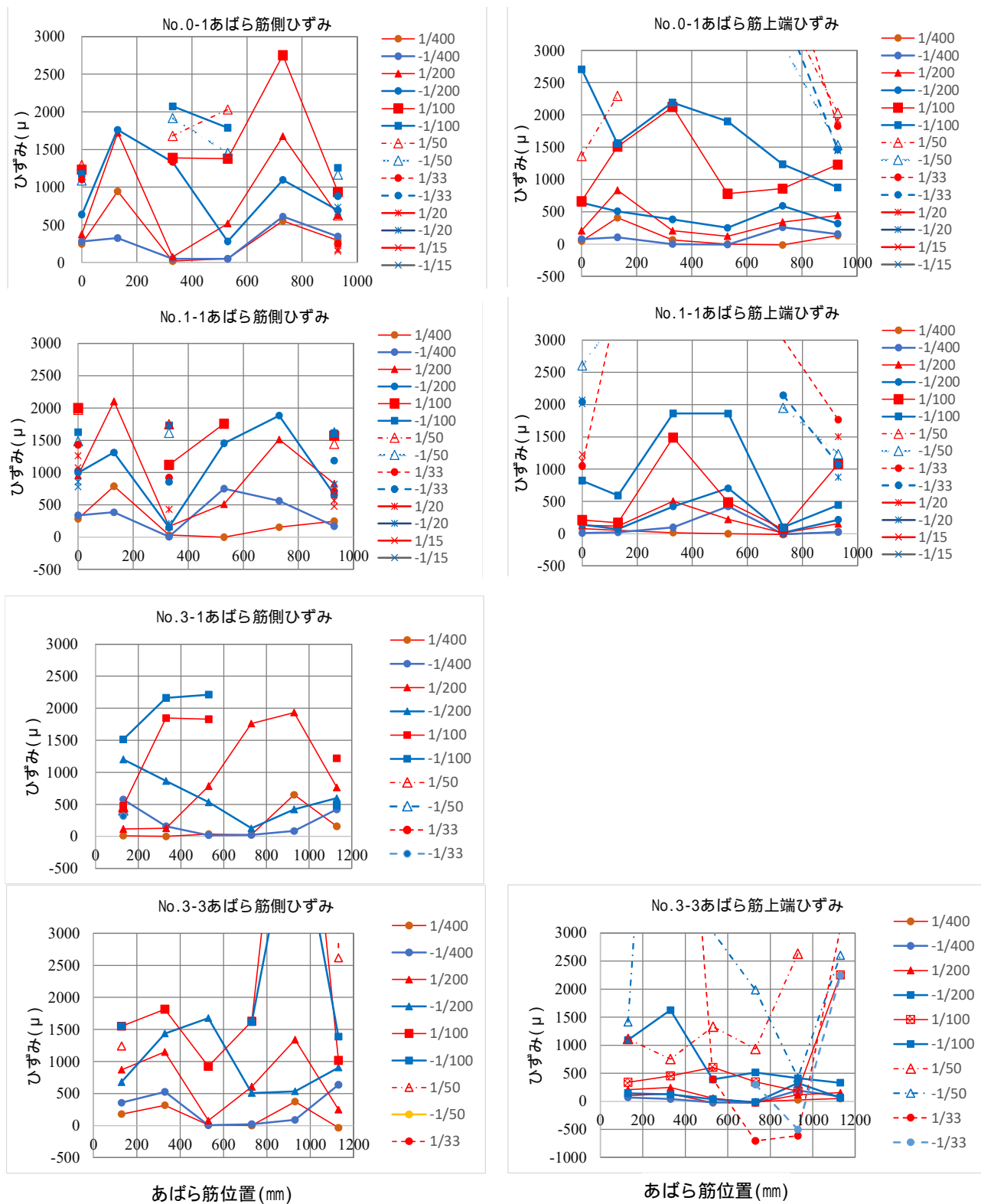


図 4-29 シリーズ 2 あばら筋ひずみ(Fc18)

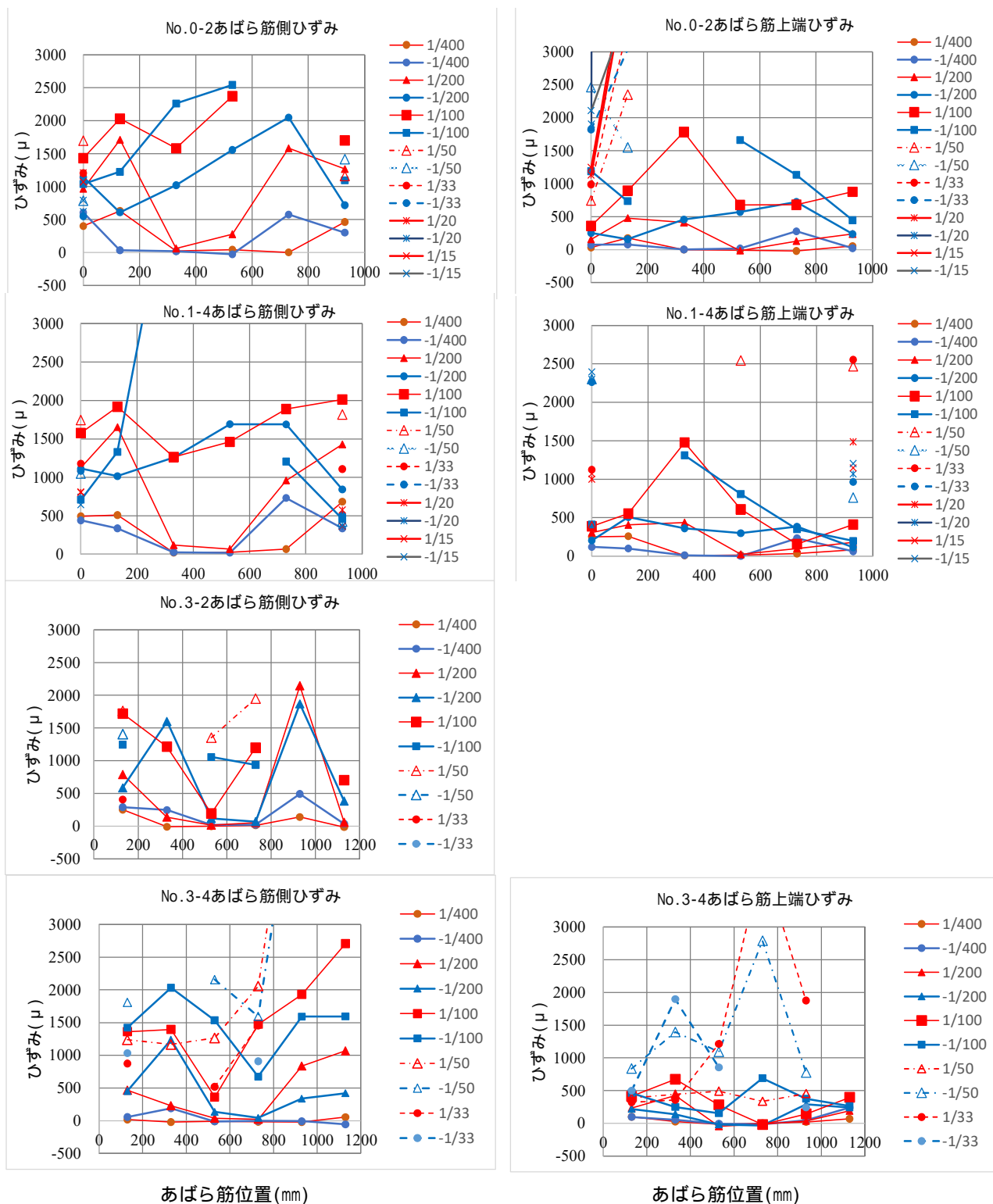


図 4-30 シリーズ2 あばら筋ひずみ(Fc30)

あばら筋に用いた D10 の降伏歪は 0.191% である。各試験体の初降伏位置とその際の部材角、最大荷重時における降伏位置を表 4-14 に示す。あばら筋の位置は、左から側辺が S1～S6、頂部またはキャップタイを S7～S12 とする。

あばら筋は、在来形の No.0-1 と No.0-2 を除き、キャップタイ無しの試験体 No.3-1 と No.3-3 で部材角 1/200 前後、B タイプ溶接の試験体 No.3-2 と No.3-4 の試験体で部材角 1/120 前後で、それ

ぞれあばら筋の側辺で降伏した。試験区間の左右の2番目の位置(300mm 中心側)で生じる点はほぼ同様であった(No.3-4のみ端部より1番目)。最大荷重以降キャップタイ無しのNo.3-3ではあばら筋の降伏は2~4個所であるが、Bタイプ溶接のNo.3-3とNo.3-4ではキャップタイの2~6ヶ所の位置で降伏した。

表 4-14 シリーズ2 あばら筋の降伏位置

試験体 No.	Fc	最初の降伏位置	最大荷重時降伏位置
0-1	18	R=1/180 S2	R=1/94 S2,S3,S4,S5,S7,S8,S9,S10
1-1		R=1/214 S2	R=1/99 S2,S5,S9,S10
3-1		R=1/229 S5	R=1/110 S2,S3,S4,S5
3-3		R=1/128 S5	R=1/109 S2,S3,S5,S6,S7,S8,S9,S10,S11,S12
0-2	30	R=1/900 S5	R=1/99 S2,S4,S5,S9,S10
1-4		R=1/143 S2	R=1/99 S2,S5,S6,S9
3-2		R=1/231 S5	R=1/118 S1,S5
3-4		R=1/119 S6	R=1/100 S2,S3,S4,S5,S6,S10,S12

実験経過を表 4-15 に示す。No.0-1 があばら筋側辺降伏(S2,S5) あばら筋の上部降伏(S7~S11)と最大荷重に到達となるのに対し、No.1-1 では、あばら筋降伏(S2,S4,S5) あばら筋の上部降伏(S8~S12) 最大荷重に到達する。No.3-1 では、あばら筋降伏(S2,S4,S5) 最大荷重に到達となる。No.3-3 では、あばら筋降伏(S2,S3,S5) 最大荷重に到達 キャップタイ降伏(S8,S12)となる。No.3-2 では、3-1 と同様にあばら筋降伏 最大荷重に到達となる。No.3-4 では、あばら筋降伏(S2,S3,S5,S6) 最大荷重とキャップタイ降伏(S10,S12)であった。部材角 1/50 の1サイクル目のひび割れパターンを写真 4-5~写真 4-12 に示す。このうち写真 4-7 のNo.3-1 のキャップタイの無い試験体でひび割れ幅が最も大きい。No.3-2 もキャップタイが無いが、Fc18 の試験体よりひび割れ幅が少なく見える。

表 4-15 シリーズ2 基礎梁実験の経過

No.	パラメータ	Fc (MPa)	主筋 溶接タイプ	あばら筋 降伏時 部材角	キャップタイ 降伏時 部材角	最大荷重時 部材角	溶接剥離	破壊形式	正負最大 耐力差(kN)
0-1	在来工法	18	—	1/180	1/94	1/94	—	せん断破壊	20.0
1-1	キャップタイ タイプⅡ		Aタイプ	1/214	1/116	1/99	無	同上	26.0
3-1	キャップタイ無し			1/229	—	1/98	無	同上	3.1
3-3	キャップタイ タイプⅡ		Bタイプ	1/125	1/99	1/110	有	同上	8.0
0-2	在来工法	30	—	1/900	1/263	1/99	—	せん断破壊	40.0
1-4	キャップタイ タイプⅡ		Aタイプ	1/143	1/140	1/99	1/31	同上	69.0
3-2	キャップタイ無し			1/231	—	1/118	無	同上	2.4
3-4	キャップタイ タイプⅡ		Bタイプ	1/257	1/79	1/81	有	同上	28.2

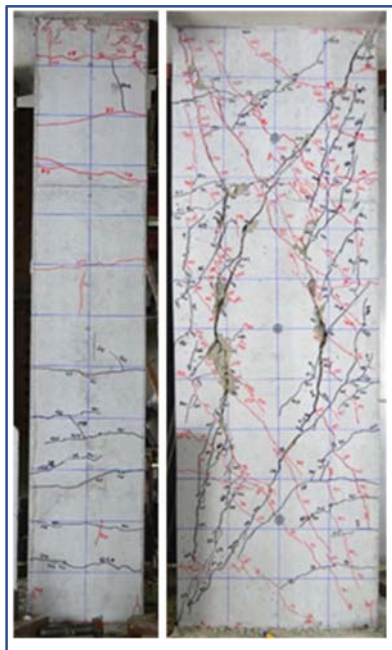


写真 4-5 No.0-1 1/50 加力時
ひび割れパターン

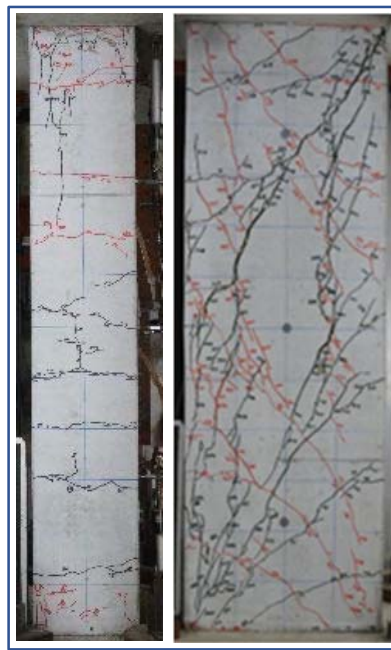


写真 4-6 No.1-1 1/50 加力時
ひび割れパターン

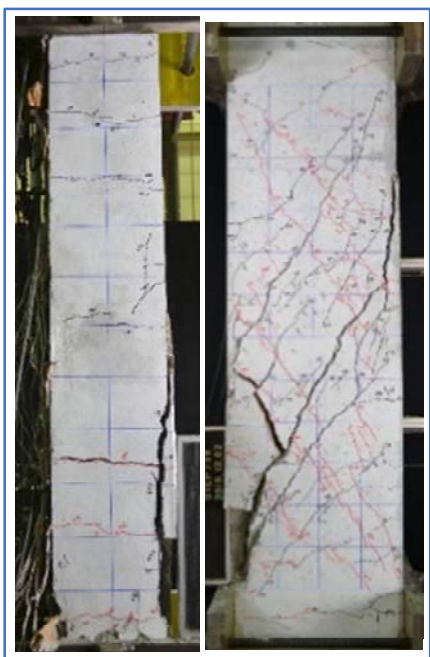


写真 4-7 No.3-1 1/50 加力時ひび割
れパターン

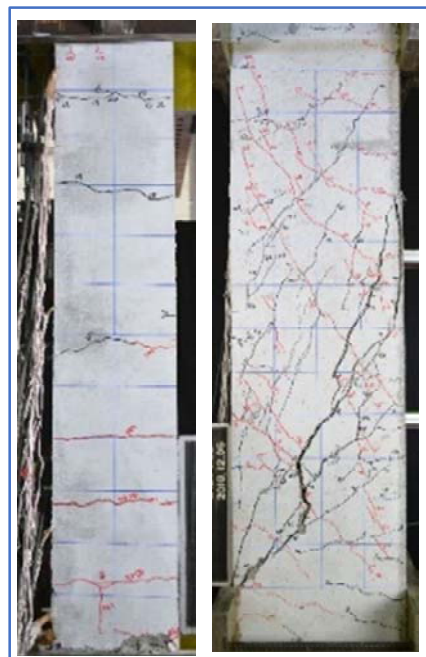


写真 4-8 No.3-3 1/50 加力時ひび
割れパターン

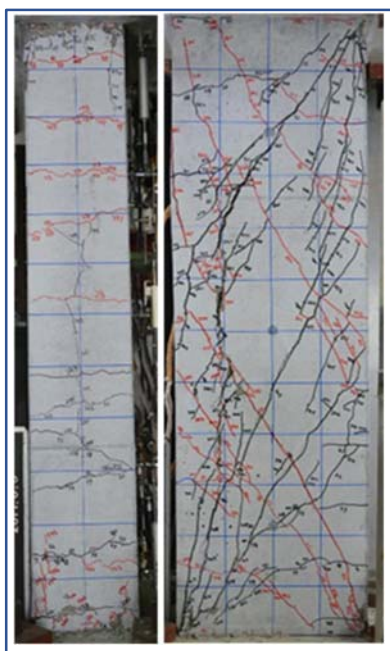


写真 4-9 No.0-2 1/50 加力時
ひび割れパターン

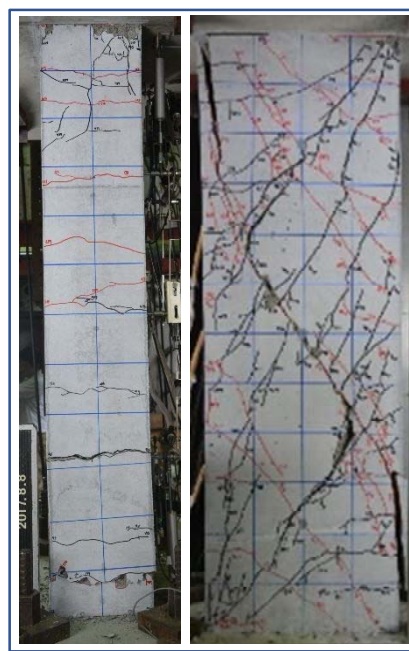


写真 4-10 No.1-4 1/50 加力時ひ
び割れパターン

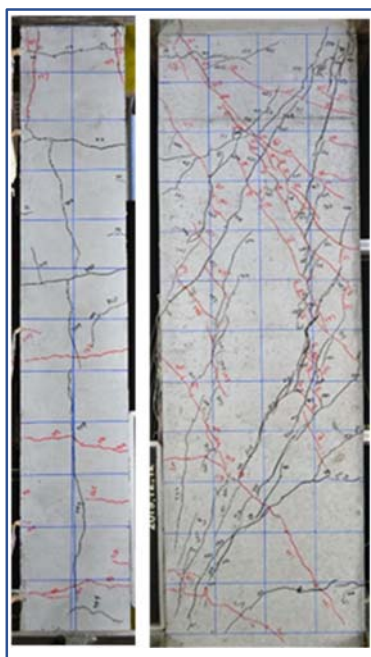


写真 4-11 No.3-2 1/50 加力
時ひび割れパターン

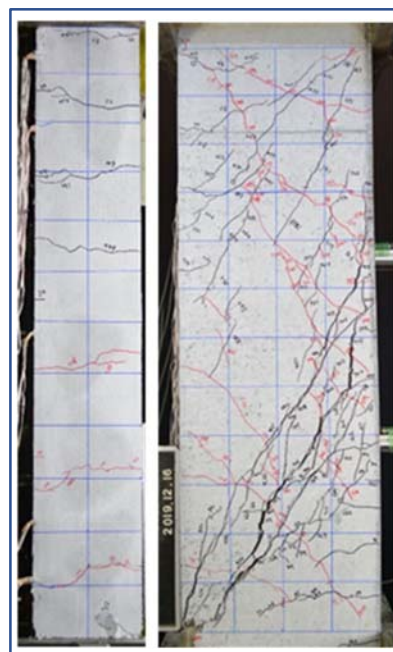


写真 4-12 No.3-4 1/50 加力時
ひび割れパターン

4-8 まとめ

戸建て住宅の基礎梁を想定した実大サイズの試験体を対象とした曲げせん断実験の結果のまとめは、以下の通りである。

シリーズ1実験の結果より、

- (1) 一方向加力実験では、キャップタイを用いた溶接組立配筋工法による試験体の最大耐力と135°フック付きあばら筋による在来型工法による試験体の最大耐力を比較した結果は、ほぼ同等である。
- (2) せん断力 - 部材角関係の包絡線の形状も初期剛性も含めて、ほぼ同様である。
- (3) 3種類のキャップタイの違いによる差はほとんど見られない。
- (4) U字筋の側辺の降伏が先行し、キャップタイの一部も降伏した。

シリーズ2実験の結果より、

- (5) 正負交番繰返し加力実験においても、キャップタイを用いた溶接組立配筋工法による試験体の最大耐力と135°フック付きあばら筋による在来型工法による試験体の最大耐力を比較した結果は、ほぼ同等である。
- (6) キャップタイを取付けずU字ユニットのみの場合、最大耐力以降の性能の低下が著しい。
- (7) 溶接接合強度を意図的に約30%程度と低下させた試験体では、最大耐力以降の性能の低下が著しい。
- (8) せん断耐力に及ぼすキャップタイの有無、溶接接合強度の影響は小さい。

第 4 章の参考文献

- [4. 1] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説、2010.11
- [4. 2] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2018、2018.12
- [4. 3] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990.11

第5章 溶接組立配筋工法による施工事例

5-1 評定制度と溶接組立配筋工法

溶接組立配筋工法を現実に使用するためには、設計者が建築物の安全性を構造計算などで確かめたことを公的機関等において建築基準法第 6 条で規定された建築確認の手続きを経なければならない。その際に特別な調査研究に基づく工法を用いた設計または施工による場合には、事前に国土交通大臣が認定した機関により建築基準法第 38 条に基づく技術評価あるいは評定を経なければならないとされている。キャップタイを用いた溶接組立配筋工法として、筆者と組立鉄筋製造者である三栄商事株式会社は、2016 年 3 月に日本建築センターの BCJ 評定「コンクリート系住宅構造評定」へ申請し、2016 年（平成 28 年）4 月に個別構造評定を、2018 年（平成 30 年）2 月に名称を「MB キャップタイ基礎梁工法」として、一般構造評定を取得した（番号：BCJ 評定-LC0147-01）。筆者は、個別評定では、実案件の構造設計と評定申請資料全般の編集を担当した。また、一般評定では、申請資料の設計要綱の作成・編集を担当した。

評定終了後に確認申請を経て施工した実案件を 2 例報告する。ただし、いずれも個人所有の案件で、平面図などの具体的な資料を示すことができないため、基礎および配筋に関する部分のみを示す。1 例目は、木造 2 階建て戸建て住宅で、MB キャップタイ基礎梁工法として最初の案件であり、筆者が構造設計と構造に関する現場監理を行った。2 例目は鉄骨造 2 階建て保育園であり、当初の設計では、基礎梁は在来型配筋を予定していたが、工期短縮を目的として、確認申請の際に MB キャップタイ基礎梁工法へ変更した。その際に筆者は、基礎梁の構造設計に関する協力を行った。

5-2 2 階建て戸建て住宅の施工事例

(1) 建物概要

建物名称：K S 邸

建設場所：東京都板橋区

用 途：戸建て住宅

建物規模：木造 2 階建て

延べ床面積 117 m²

基礎構造：直接べた基礎

竣 工 年：2017 年

工 期：12 人日（シングル配筋部分、べた基礎を含む）

概 要：

木造軸組構造として建築基準法施行令第 46 条の必要壁量規定に従って構造用合板を用いた耐力壁をバランスよく配置した所謂 4 号建築物である。建築主は、耐力壁の一部に鋼製制振ブレースを設置することを希望したため、当初シングル配筋の基礎梁としていたが、複筋梁とする必要が生じたため、MB キャップタイ基礎梁工法により施工することとなった。

(2)設計方針及び現場監理について

設計方針及び現場監理の注意点は、以下の通りである。

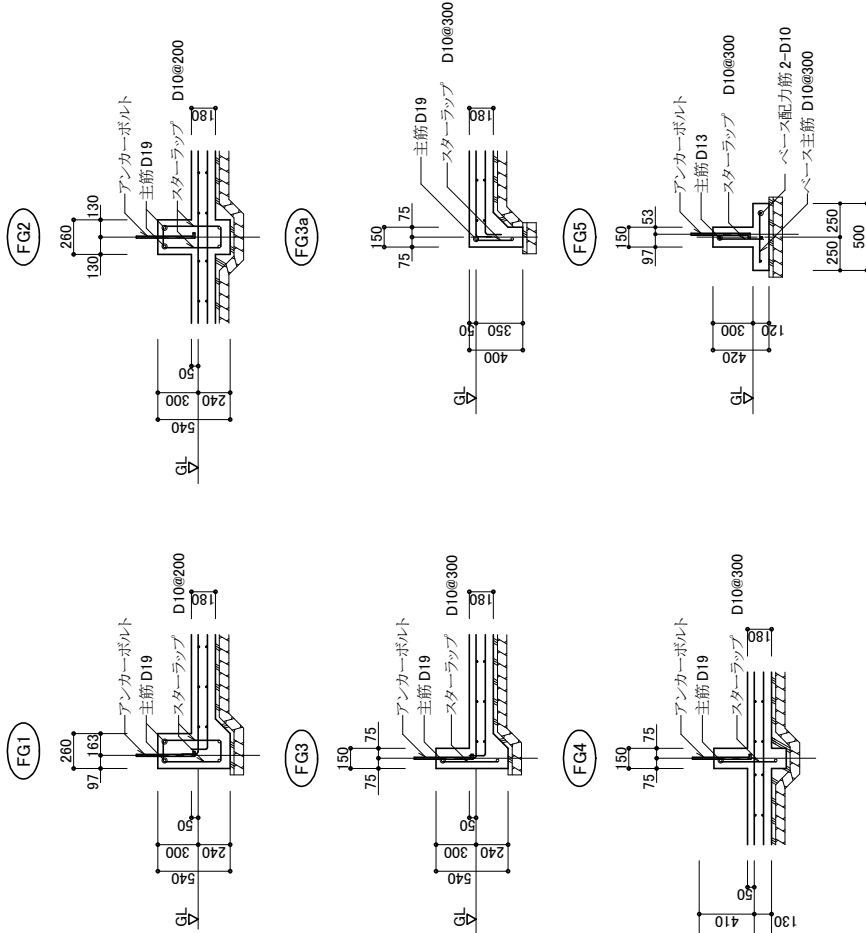
- ・キャップタイ基礎梁工法による部分およびシングル配筋に依る部分は、いずれも1次設計に基づく許容応力度設計とする。
- ・断面算定は、RC規準に従って行う。
- ・吊り上げ重機が敷地内へ進入できないため、現場への搬入を人手に依ることとなった。そのため1ユニットの長さを2500mm以下とした
- ・継手は、すべての個所で添え筋継手とし、定着長さを40d以上とした。
- ・端部定着は、継手と同じ方法とした。
- ・スパンが短い個所では、出入隅部に設けるコーナー継手筋が両方向から伸びて重なり、多段状態とらないように、継手筋の形状をZ形とするなど工夫した。
- ・ダブル筋ユニットを使った初めての配筋作業となるため、作業員を増員して工期を守った。
- ・制振ブレースの定着アンカーと干渉しないようにキャップタイの配置を考慮した。

(3)基礎伏図、割付図、詳細図

基礎伏図、配筋詳細図、割付図、詳細図を次ページ以降に示す。

基礎梁リスト

SCALE1:40

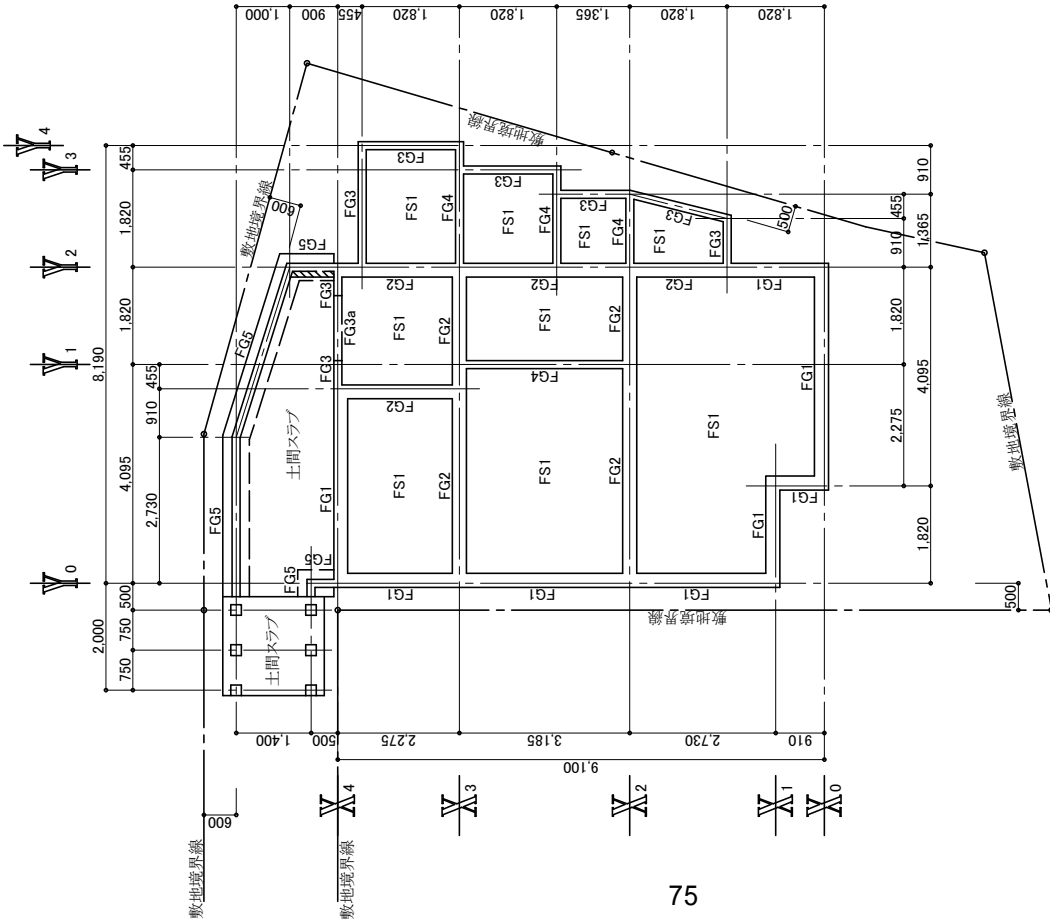


床版リスト

符 号	版 厚	位 置	短 辺 方 向		長 辺 方 向		備 考
			端 部	中 央	端 部	中 央	
FS1	180	上 端 筋	D10@300		D10@300		
		下 端 筋	D10@300		D10@300		
土間コンクリート	120	シングル	D10@300		D10@300		

基礎伏図

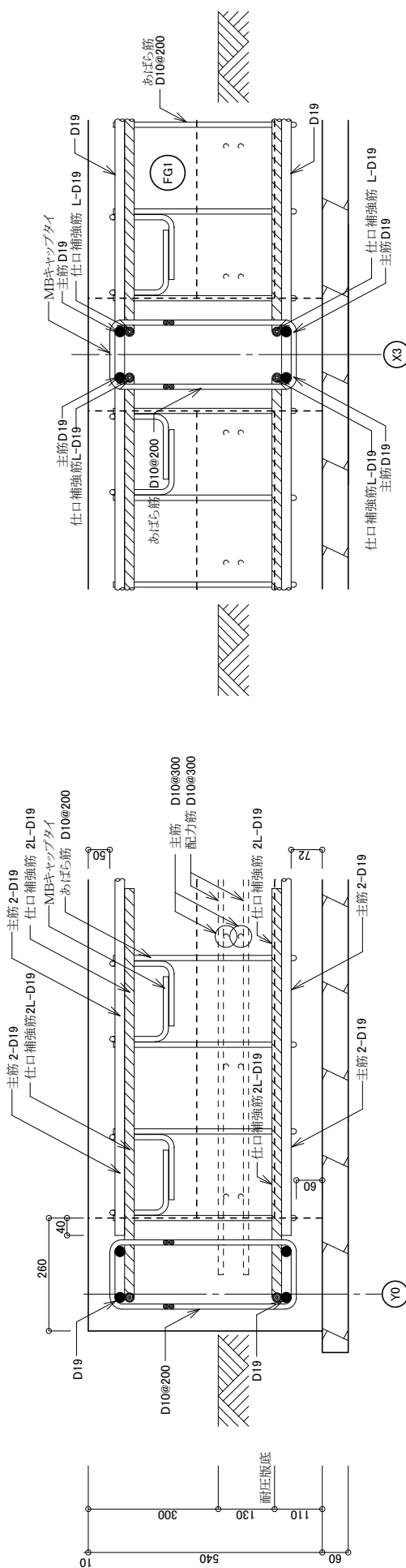
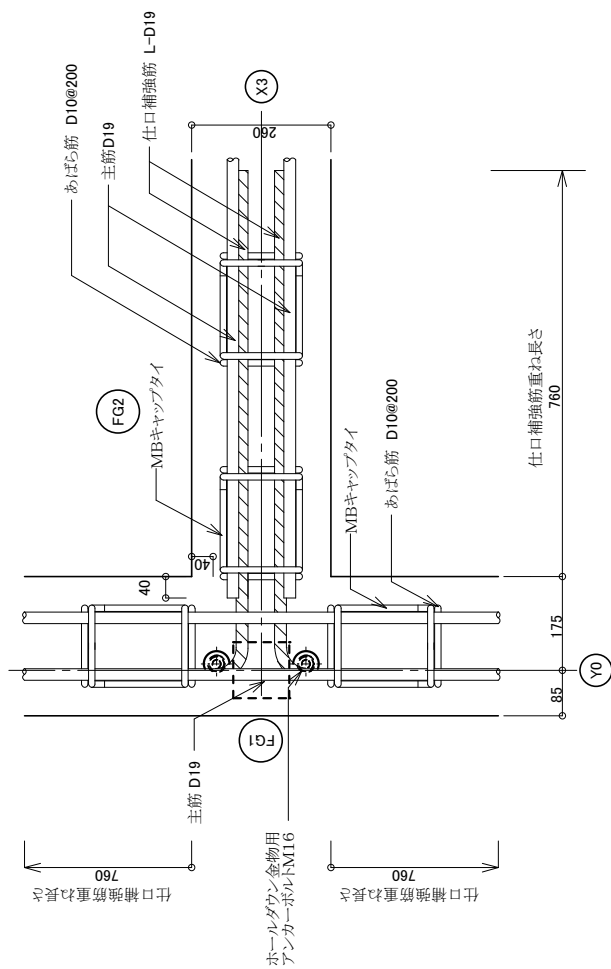
SCALE1:100



【基礎伏図特記事項】

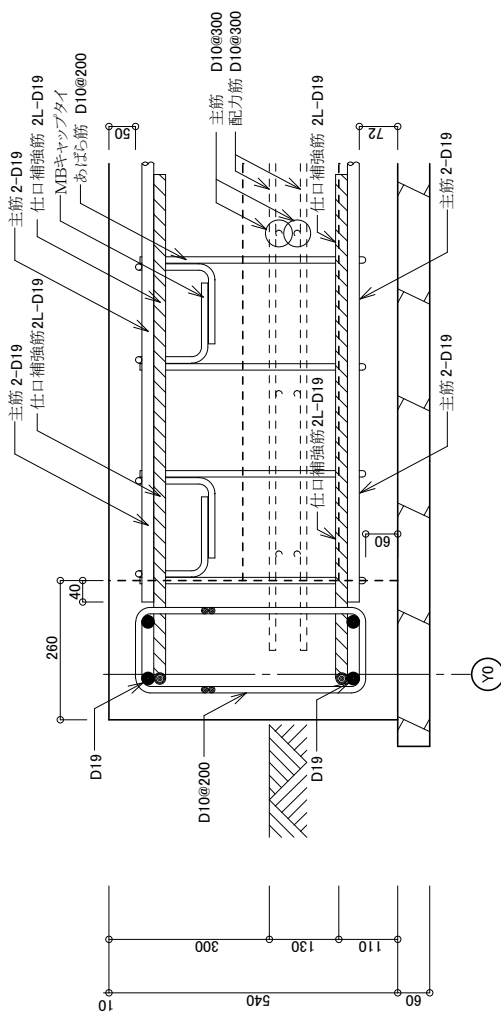
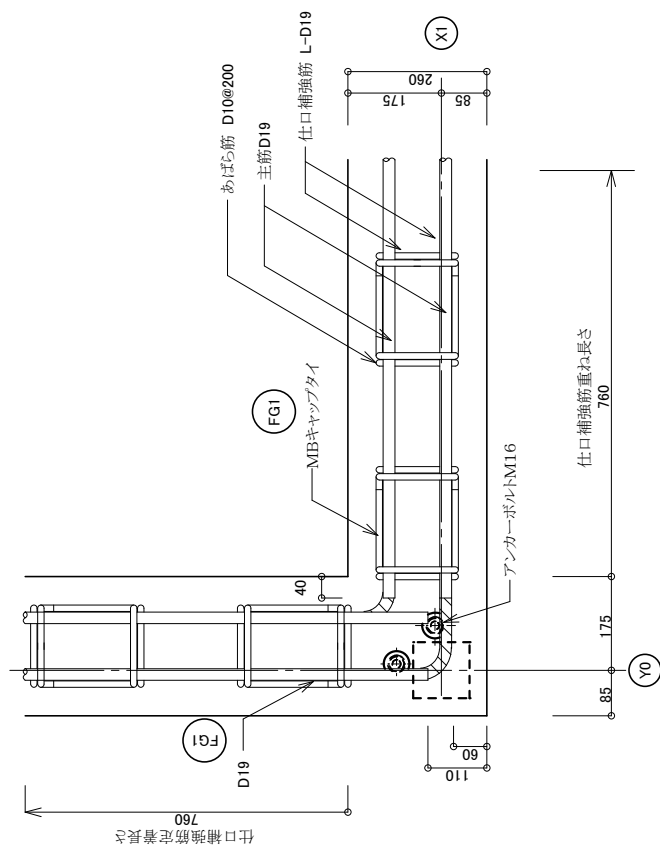
- 1)特記以外の寸法は意匠図による。
- 2)特記以外の1階土台、大引き天端は GL+450 とする。
- 3)は梁ふかしを示す。
- 4)「詳細1」は、配筋詳細図の図面位置を表す。

特 記 事 項	基礎伏図・基礎リスト		図面名称		新築工事		構造
	基礎		基礎		基礎		
	基礎		基礎		基礎		
	基礎		基礎		基礎		
	基礎		基礎		基礎		
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	
基礎		基礎		基礎		基礎	



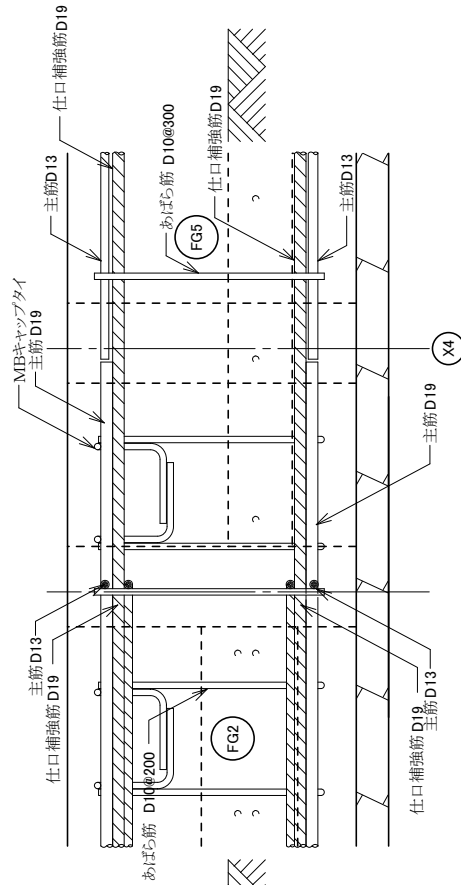
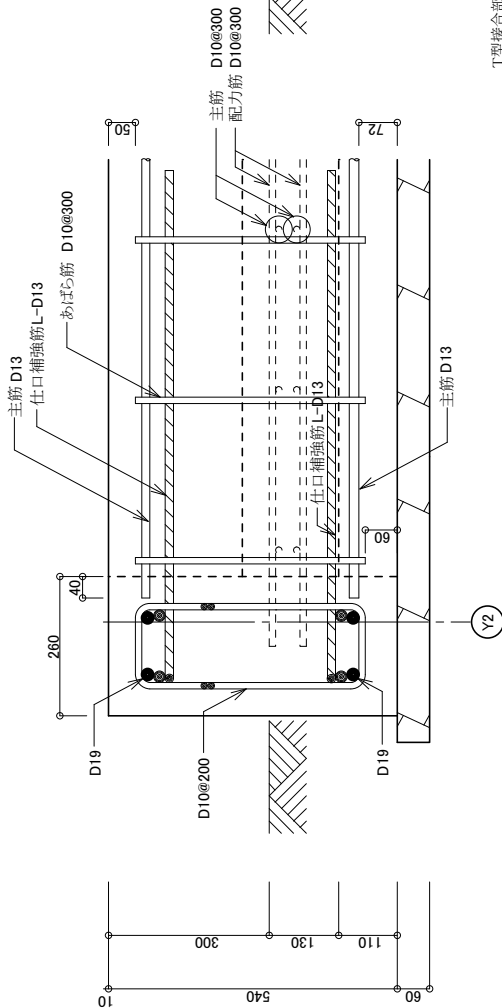
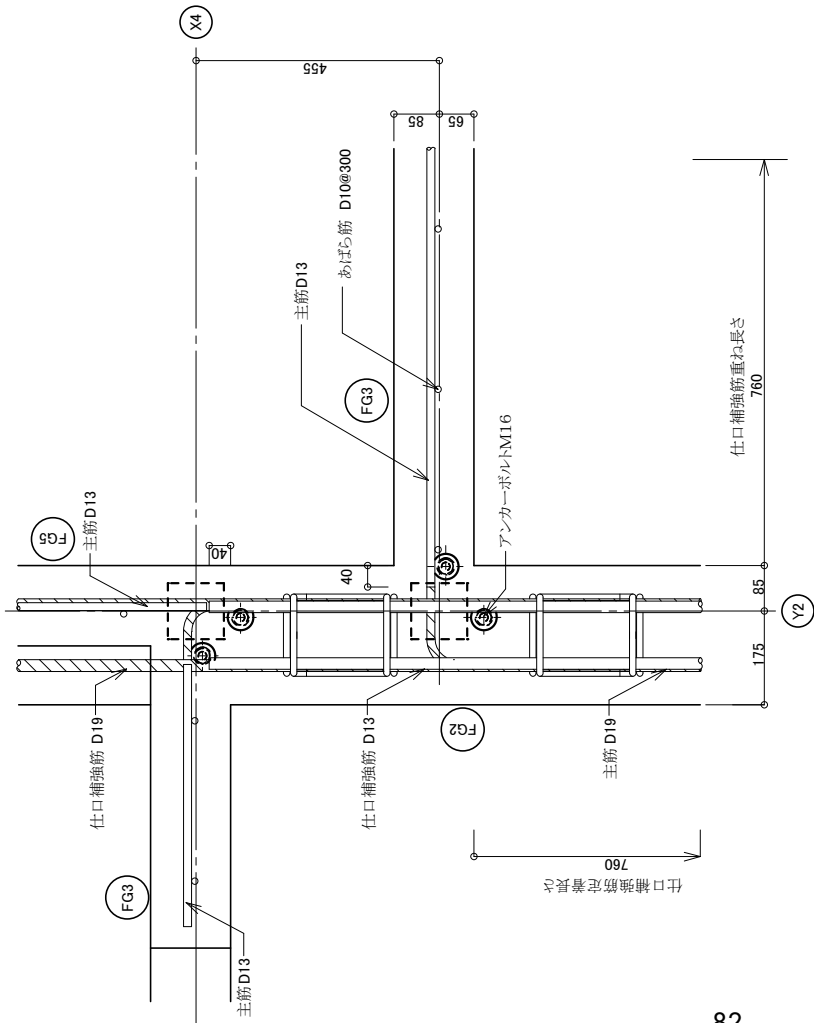
T型接合部

[illegible]



L型接合部

特 記 参 照 項		承認	検図	製図	設計年月日	H28.7.28	工事名称		0000 02 000141 配管工 取組作業工 第1 0000000001
					変更年月日		図面名称	接合部断面詳細図2	



T型接合部

特 定 建 築 事 項		承認	捺印	製図	設計年月日	H28.7.28	工事名称	構造
					変更年月日		図面名称	
				開 田			接合部断面詳細図-4	

(4) 施工写真



(a) 現場全景



(b) U字ユニットと継手筋の配置



(c) キャップタイの配置



(d) 基礎梁配筋完成

写真 5-1 施工事例 1 戸建て住宅の基礎梁

5-3 2 階建て保育園の施工事例

(1) 建物概要

建物名称：T 保育園

建設場所：埼玉県深谷市

用 途：保育園

建物規模：鉄骨造 2 階建て

延べ床面積 117 m²

竣 工 年：2019 年

工 期：14 人日（基礎梁部分）在来工法に較べて 2 人日短縮できた

概 要：

角形鋼管柱を認定品の露出形式柱脚で支持するため、基礎柱内に基礎梁主筋の定着部が配置される。そのため、アンカーボルトと主筋または定着部が干渉しないように U 字ユニットの寄りを検討する必要があった。

(2) 設計方針及び現場監理について

設計方針及び現場監理の注意点は、以下の通りである。

- ・ キャップタイ基礎梁工法による部分および在来工法による部分は、いずれも 1 次設計に基づく許容応力度設計とする。
- ・ 断面算定は、R C 規準に従って行う。
- ・ 基礎柱と基礎梁の天端レベルを揃え、ベースプレート底のレベルを統一させた。
- ・ 吊り上げ重機を使用して搬入し、人手に依り据え付けを行うため 1 ユニットの長さを 1350mm ~ 3500mm とした
- ・ 貫通孔が複数ある個所は、在来工法によることとした。
- ・ 継手は、すべての個所で添え筋継手とし、定着長さを 40d 以上とした。
- ・ 配筋ユニットはすべて基礎柱手前までとし、梁が連続しない T 形、L 形の交点では、一方の端部を 90° に折り曲げた定着補強筋を主筋に添えて、基礎柱内で定着する。
- ・ 梁が連続する交点では、基礎梁を貫通する継手補強筋を用いる。
- ・ 鉄骨造の柱脚が露出形式であり、アンカーボルト M30 が 4 本ないし 8 本基礎柱内で定着するため、定着補強筋との干渉を考慮し、すべての柱位置で詳細図により十部な検討を行った。
- ・ キャップタイの配置は、必ず基礎柱の端から割り付ける。
- ・ 基礎柱の帯筋はなるべく割らずに、定着補強筋をセットする順序を検討して位置決めを行った。

(3) 基礎伏図、割付図、配筋詳細図

基礎伏図、割付図と配筋詳細図を次ページ以降に示す。

1. 適用範囲

MBキャップタイ基礎梁工法による梁の配筋設計及び施工を行う場合は、本標準配筋要領に従うこと。
ここに示す以外の事項は、別途構造特記仕様書による。

- (1) 構造形式
- | | | | |
|-----|--|--|--|
| 木造 | <input type="checkbox"/> 木造在来軸組構造法 | <input type="checkbox"/> 木造外装組工法 | <input type="checkbox"/> 集成材持壁梁構造 |
| 鉄骨造 | <input checked="" type="checkbox"/> 鉄骨ラーメン構造 | <input type="checkbox"/> 鉄骨ラーメン付ラーメン構造 | <input type="checkbox"/> 鉄骨ブレース付ラーメン構造 |

- (2) 建物規模

- 山道 3 歳以下 6 歳以下

- (3) MBキャップタイ基礎工法の使用箇所

- 基礎梁 □ 布基礎の立上り □ ベタ基礎の立上り、基礎梁

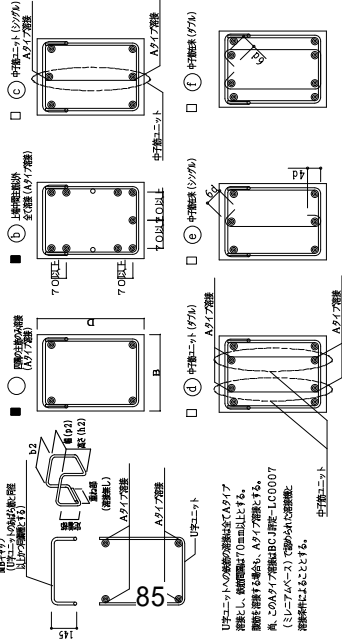
- | コンクリート | 普通コンクリート | Fc18~36N/mm ² |
|--------|--|--------------------------|
| 鋼材規格 | D10・D13・D16(SD295A)・D16・D19・D22(SD345) | |

- (5) 構造設計

- 基礎の立上り及び基礎の断面設計は、上部構造の設計ルートに依らず、許容応力度設計とすること

2. 主筋およびあら筋の配筋

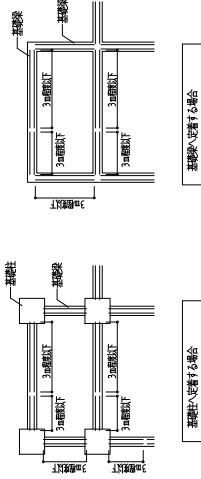
- (2-1)MBキャップユニットの断面形状
(床板がない場合でも同じ形状とする)



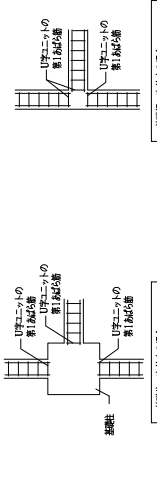
- [illegible]

- (2-2)U字ユニットおよび中子筋ユニットの分割

- ① U字ユニットおよび中子銃ユニットの選定にクレーンなどを用いない場合、U字ユニットおよび中子銃ユニットの長さは3m以下とする



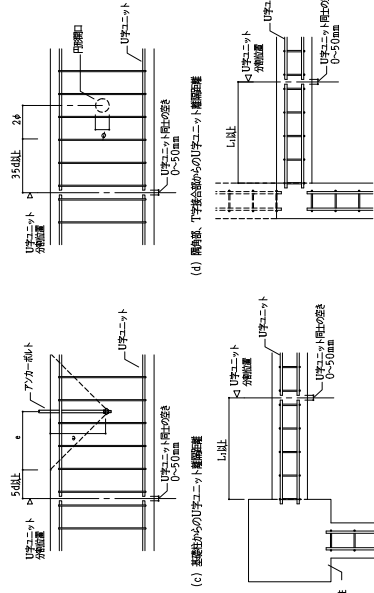
- ① 接合部（仕口部）ではU字ユニットを分割する（中子筋ユニットもU字ユニットと同じ位置で分割する）



- ① U字ユニット分密位置はアンカーボルト、円形開口部、仕口部から以下の距離両端を確保し決定する

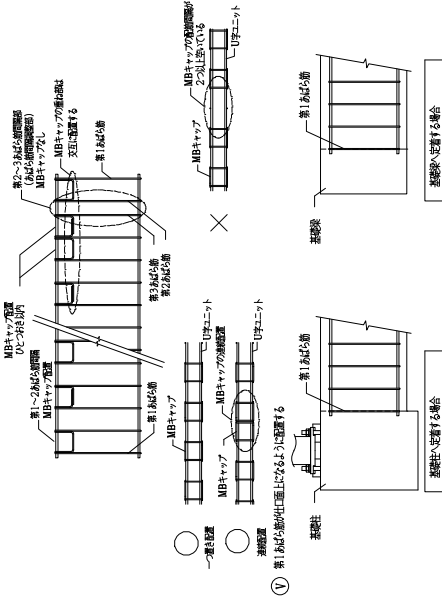
- (d:主筋の呼び名、e:有効埋込み長さ)

- (a) アンカーボルトからのU字ユニット離隔距離

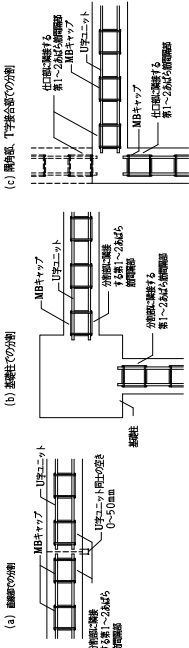


- (2-3)MBキヤップの配置基準

- ① MBキヤップはU字ニット編織の第1は第2と第3は第4の順に必要とする
- ② MBキヤップはU字ニットの第1は第2は第3編織に対して、ひつづき以内になるよう編む
- ③ あはらニットの編織はU字ニット 2両の第1は第2と第3は第4の順で行う
- ④ あはらニットを2両したとき、第2は第4と、第3は第4の順にMBキヤップを編まない



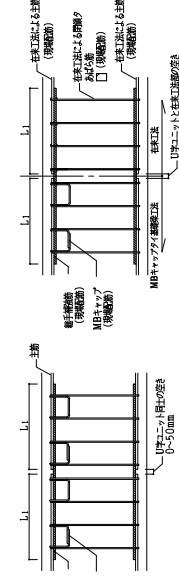
- ② 分割型に隣接するU字ユニットの第1および第2筋には必ずMBキャップを配置する



3. 主筋の継手

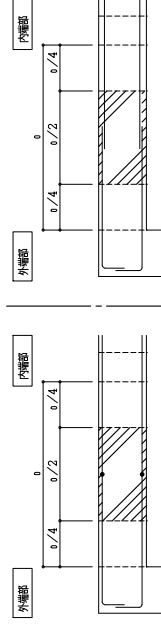
- ### (3-1) 継手部詳細

- U字ユニット (中子筋ユニット) 同士の継手

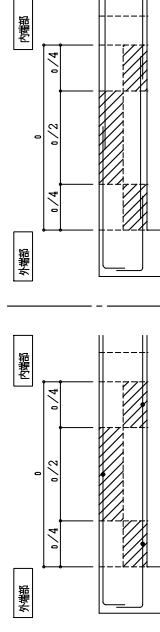


- (3-2)U字ユニットおよび中子筋ユニットに溶接されていない主筋の継手位置 (■ガス圧接 □重ね継手)

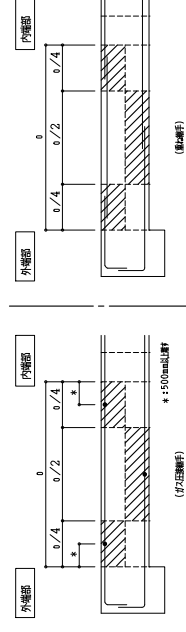
- ☐ (a) 其建築(一般部)



- ⑥ 基礎梁（スラブなどの上載荷重を受ける場合）



- ③ 基礎沈下（基礎沈下の下より抵抗力（抵抗力）を受ける場合）



- 好きな言葉：『手は洗って、箸は洗って、心は洗って。』

[illegible]

MBキヤップタイ基礎梁工法 標準配筋要領 2

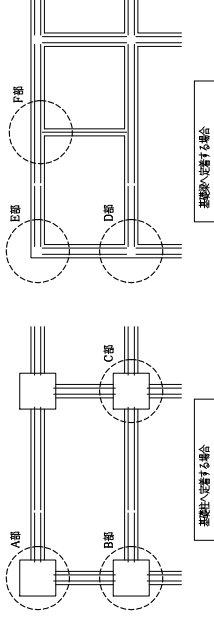
BCJ評定-LC0147-01

三栄商事株式会社 〒370-1201 群馬県高崎市後宮町3304
TEL 027 (346) 1100/FAX 027 (346) 1102

本社支店・駐在 日本建築学会「建築工事標準仕様書・解説編」JASS5「基礎コンクリート工事」
「建築工事標準仕様書・解説編」JASS6「鉄筋工事」、「鉄筋コンクリート構造設計」に準拠する。

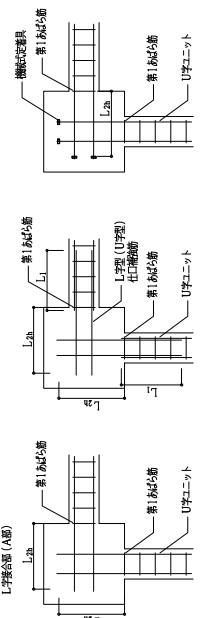
要領 ■ もしくは の 配筋とする。修正箇所は線付で示す。

4. 定着

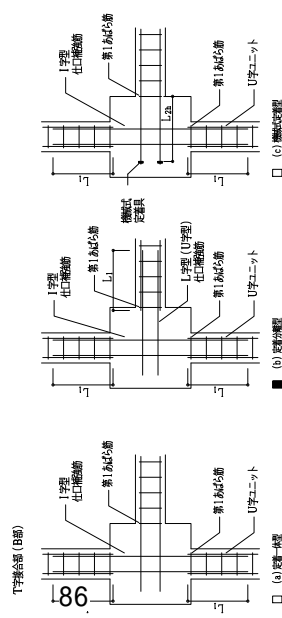


4.1 基礎梁の定着

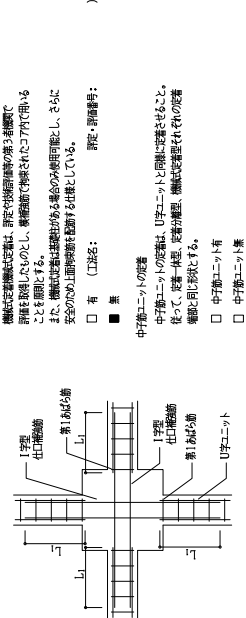
(4.1) 概要



(4.1) 概要

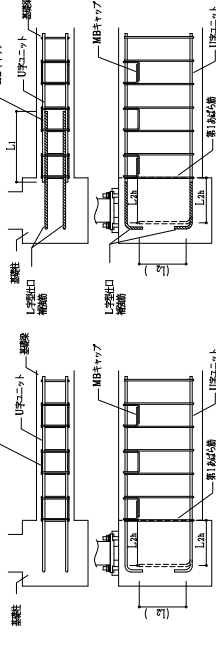


(4.1) 概要

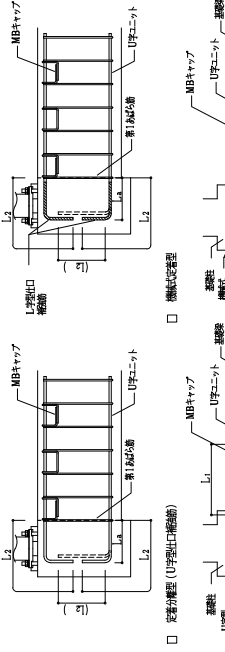


(4.1-2) 定着部詳細

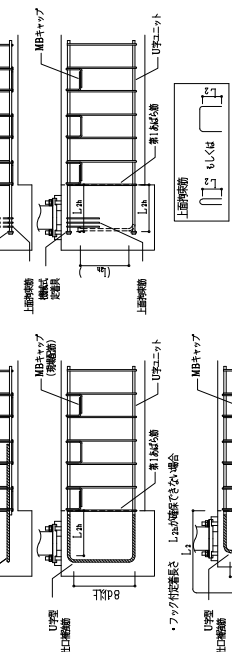
■ 定着部詳細 (L型型口補筋)



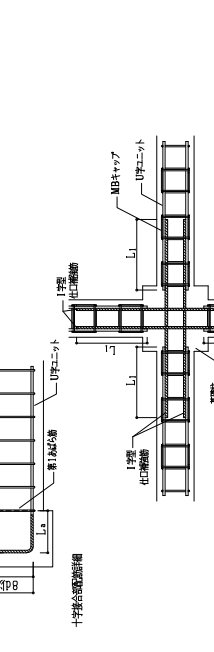
・フック付定着部 L₁が短縮できない場合



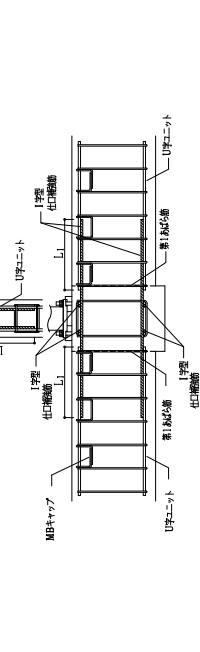
□ 定着部詳細 (U型型口補筋)



・フック付定着部 L₁が短縮できない場合

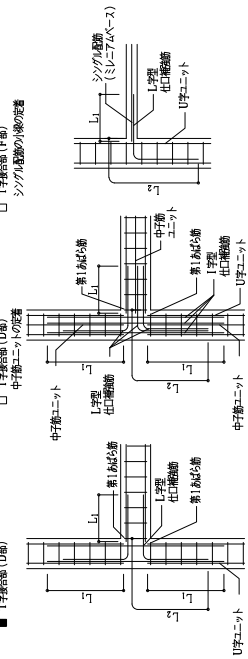


十字接合部詳細

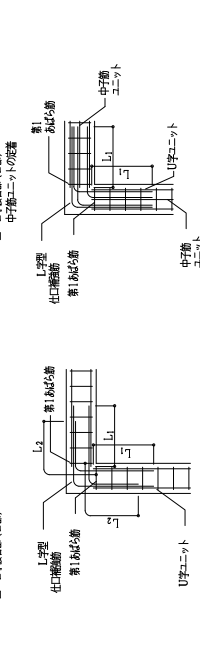


4.2 基礎梁の定着

(4.2) 概要



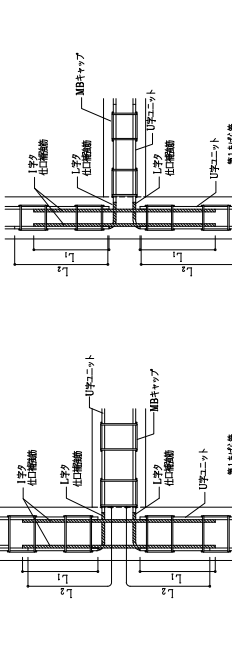
□ L型型口補筋 (E部)



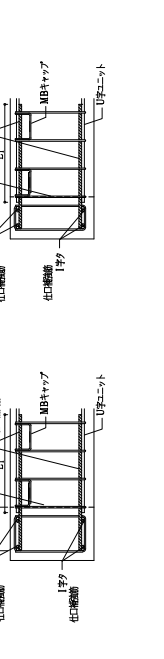
(4.2) 概要

(1) U型型口補筋

□ 1-1) 接合部長 L₁が短縮できる場合

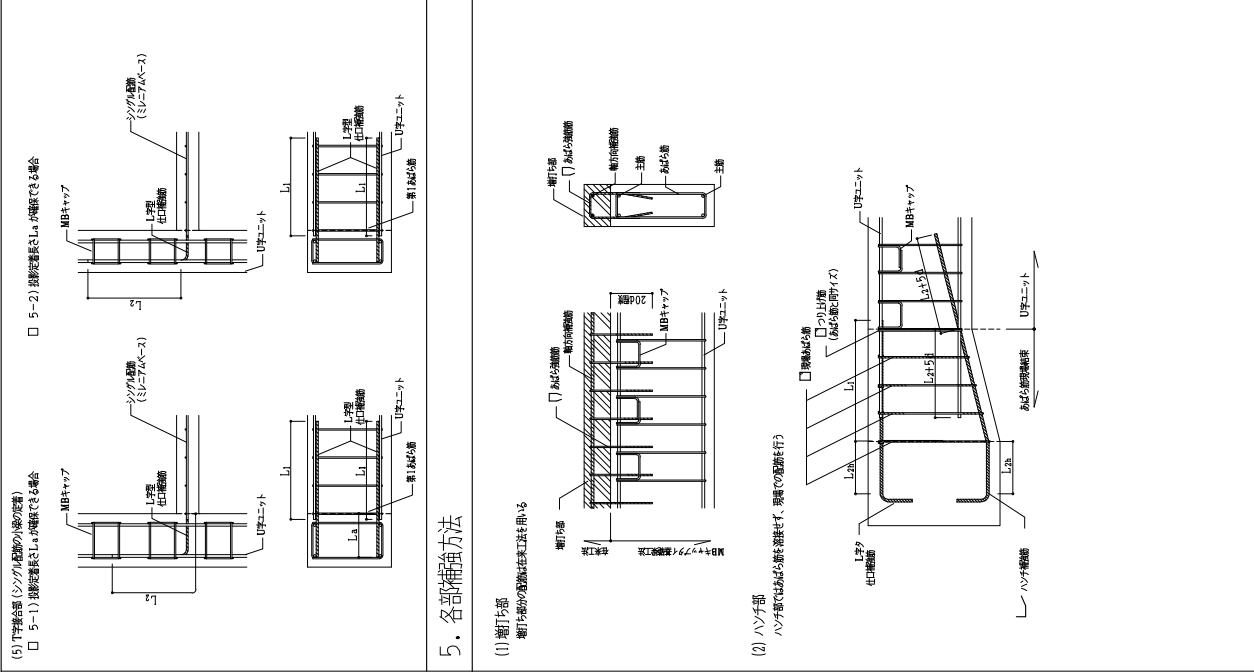
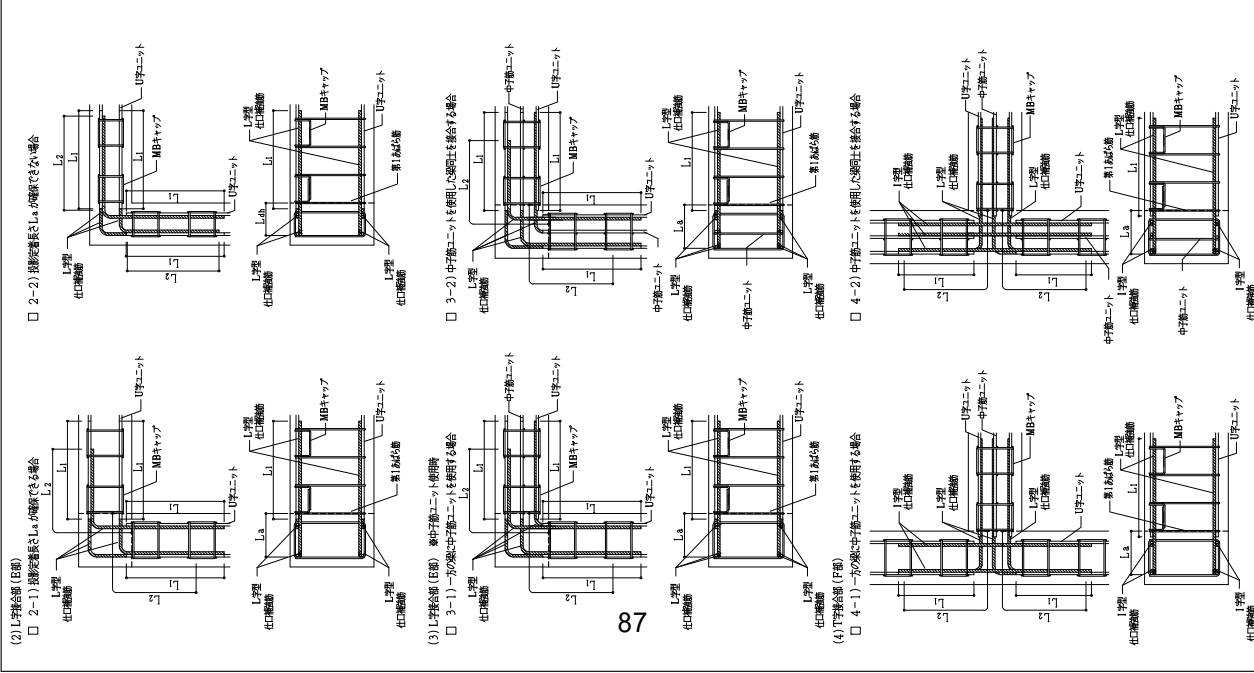


□ 1-2) 接合部長 L₁が短縮できない場合



特記事項	工事名称	図面名称	縮尺	製図者	校核者	承認者	日付	ページ	総ページ	構造
	MBキヤップタイ基礎梁工法	標準配筋要領2	1:100							10

適用は ■ もしくは □ 印を記入する。修正箇所は下線を引くこと。



5. 各部補強方法

[illegible]

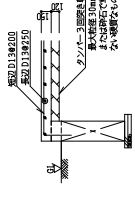
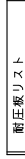
基本仕リスト		SCALE 1:4.0		仕様事項 : D19以下は BD145、D19未満は BD25A とする。	
特 号	FC1	FC2	FC3		
断面					
D×D×Dy	700× 700	600 × 600	500 × 500		
主 筋	16 - D22	8 - D19	8 - D16		
HCOP	<input type="checkbox"/> -D134100	<input type="checkbox"/> -D134100	<input type="checkbox"/> -D134100		

基礎梁リスト

SCALE 1:40

料 号	FC1	FC2	FC3
面			
Dx×Dy	700x 700	600 x 600	500 x 500
主 筋	16 - D22	8 - D19	8 - D16
材 質	□-D134100	□-D134100	□-D134100

料号	FG1	FG1a	FG1b
位置	全断面	全断面	全断面
断面			
	340 × 1000	340 × 1000	340 × 1000

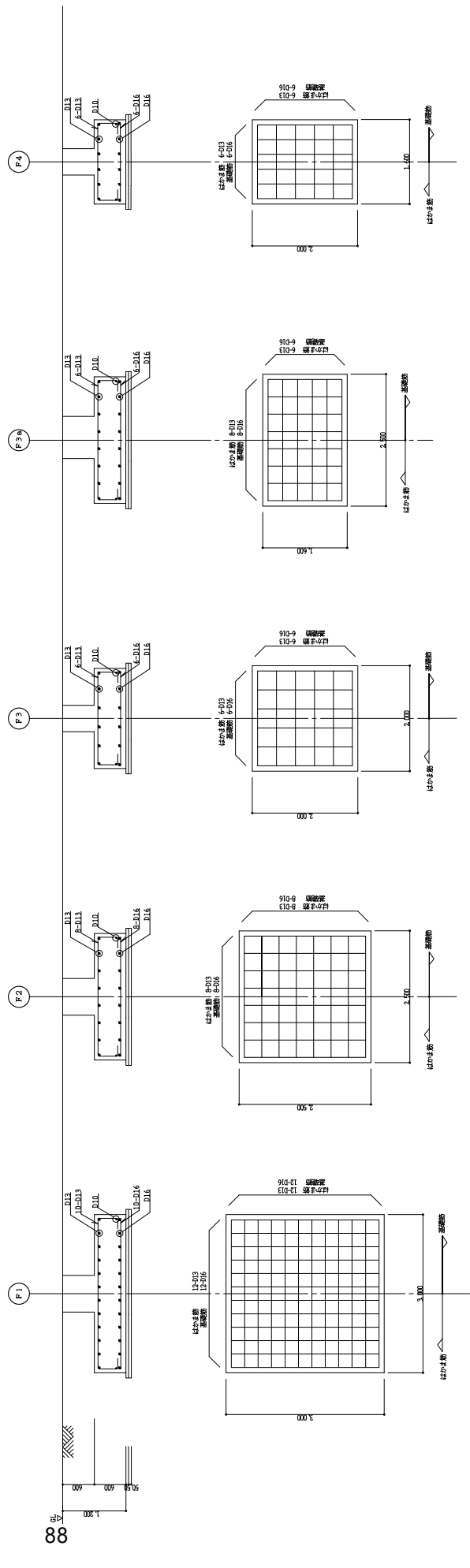
[illegible]

土間スラブ配筋詳細図

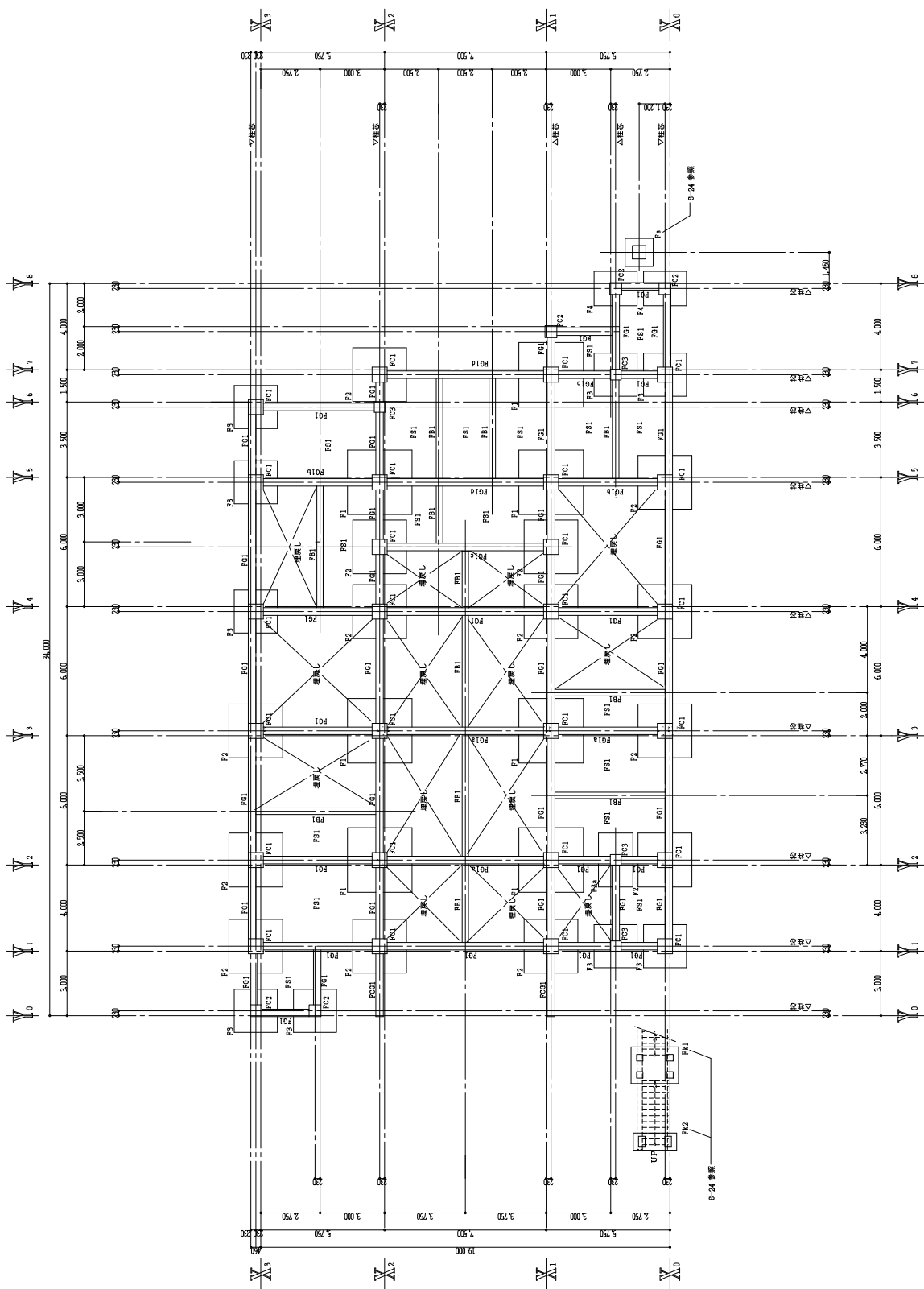
SCALE 1 : 40

(註) 断面図は短辺方向を示す。

基礎リスト
SCALE 1:40

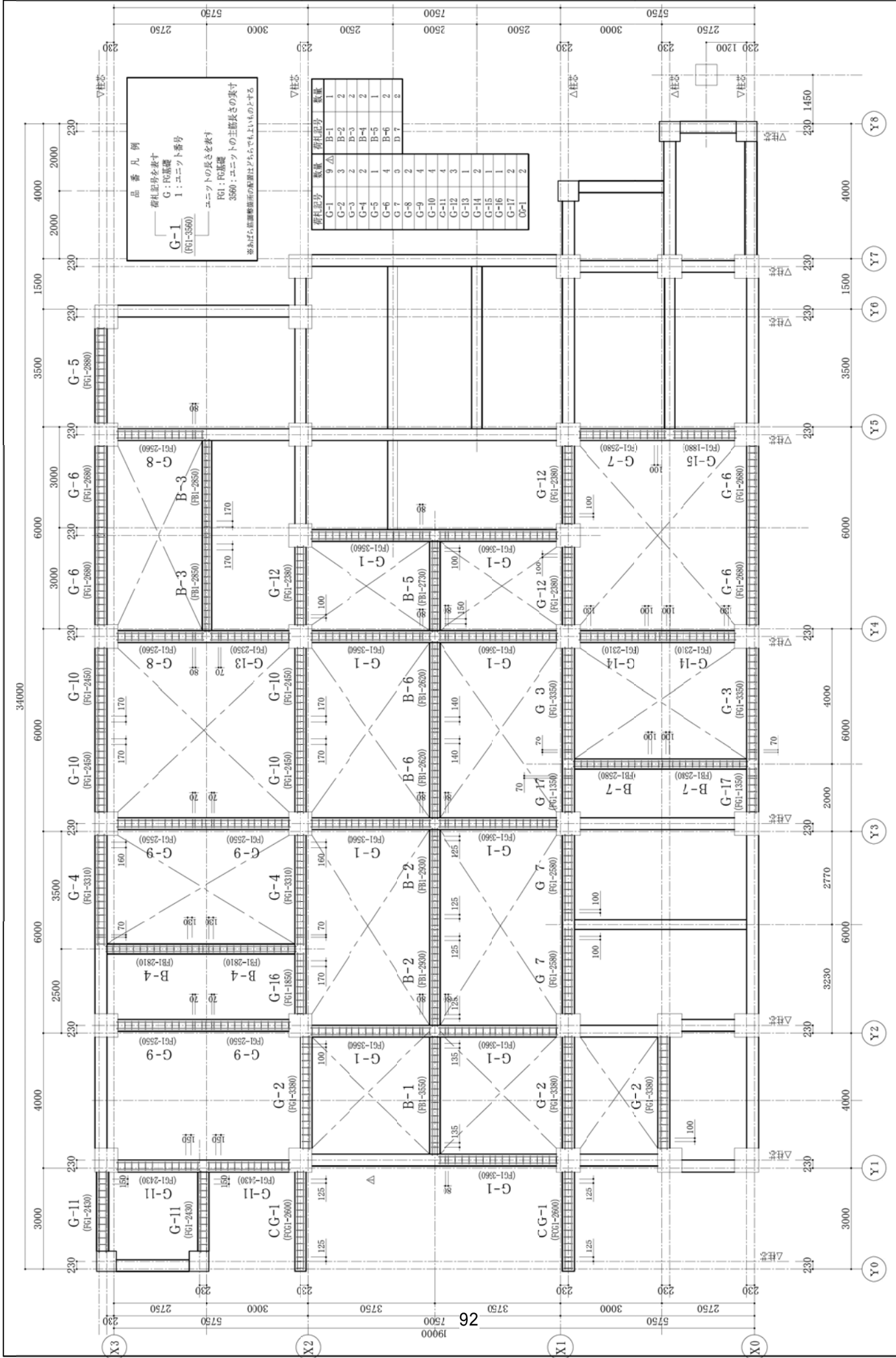


	特 記	来 函	来 函	来 函	来 函	送達年月日	工事名称	図 面	製 作	構 造	
	事 項										
							縮 尺 1 : 4 0	図面名称	基礎リスト		1 2



基礎伏図 SCALE 1:100

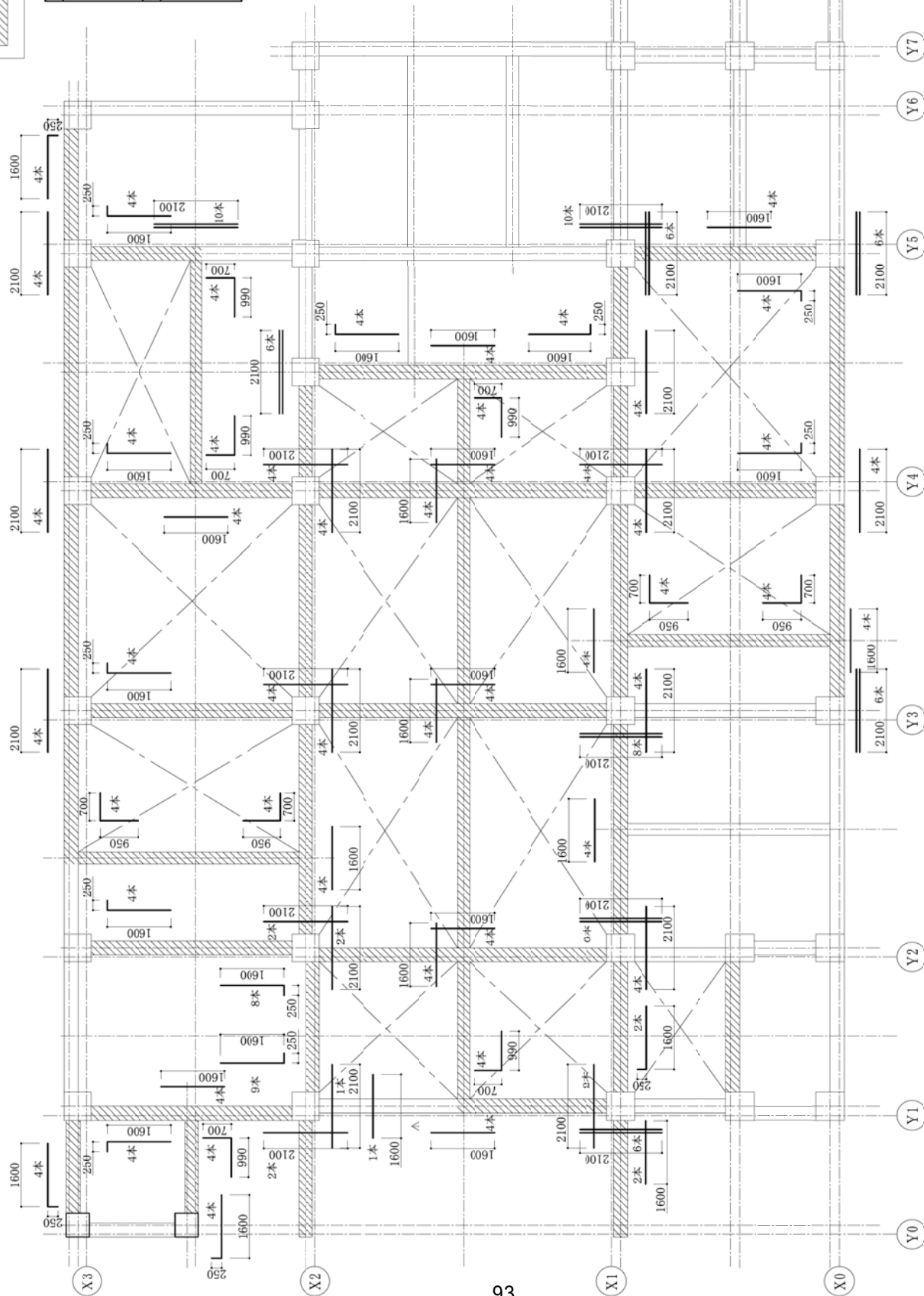
特記事項	承認	設計	校核	監理	設計年月日	工事名称	図面名称	構造
					縮尺 1:100	基礎伏図	基礎伏図	1 3



MBキヤップタイプ基礎梁工法
による基礎梁を表す

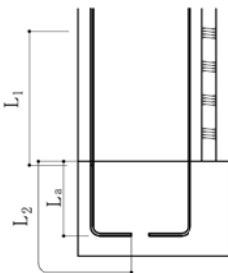
直線部1字ユニット相互の主筋用離手筋	1600	12	全所
1ヶ所必要数量:4本			
直線部1字ユニット相互の縦筋用離手筋	600	12	全所
1ヶ所必要数量:4本			

ユニットと在来配筋の連結筋を表す



定着・重ね長 (主筋D22、 $F_c = 21 \text{ N/mm}^2$)
 $L_1 = 30d = 30 \times 22 = 660 \text{ mm}$ 以上 (別途、構造根拠有)
 $L_2 = 35d = 35 \times 22 = 770 \text{ mm}$ 以上

定着・重ね長 (主筋D22、 $F_c=21\text{N/mm}^2$)
 $L_1=40d=40\times22=880\text{mm}$ 以上
 $L_2=35d=35\times22=770\text{mm}$ 以上
 $L_a=20d=20\times22=440\text{mm}$ 以上



柱脚:露出型固定柱脚工法
 ハイベース (EB300-8-30)

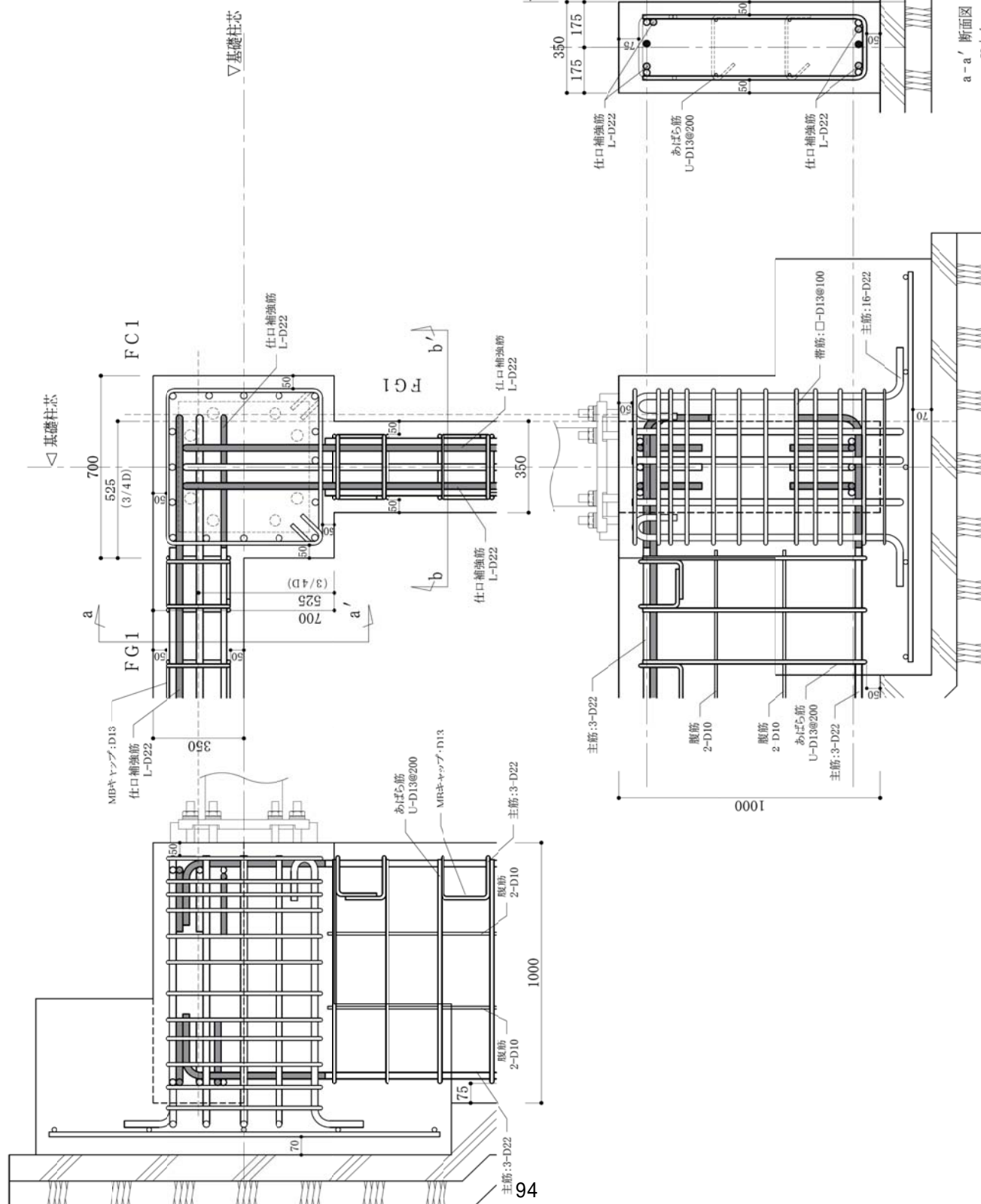
●は現場結束の主筋を表す

▽基礎柱芯

▽基礎柱芯

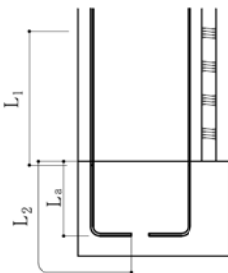
b-b' 断面図
 Y方向

a-a' 断面図
 X方向



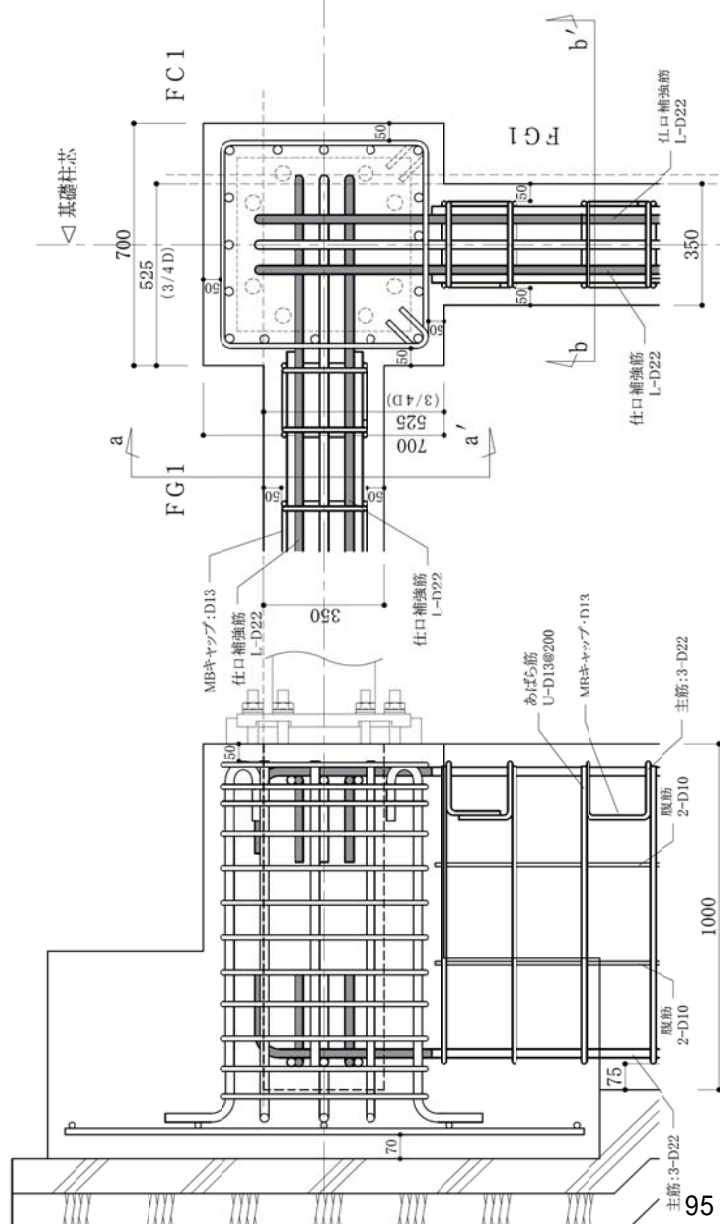
図面番号	図面名称	工事名称	作成	確認	承認	作成年月日	承認年月日	配詳	9
FC1	L型仕口部(片芯すれ) 配筋詳細図							1/15	

定着・重ね長 (主筋D22、 $F_c=21\text{N/mm}^2$)
 $L_1=40d=40\times22=880\text{mm}$ 以上
 $L_2=35d=35\times22=770\text{mm}$ 以上
 $L_a=20d=20\times22=440\text{mm}$ 以上



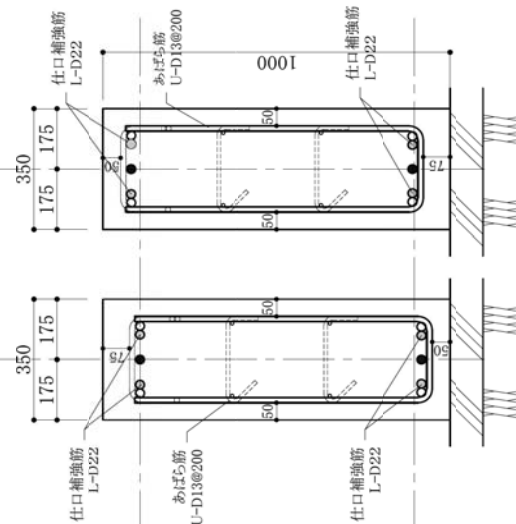
柱脚:露出型固定柱脚工法
 ハイベース (EB300-8-30)

▽基礎柱芯



●は現場結束の主筋を表す

△基礎柱芯



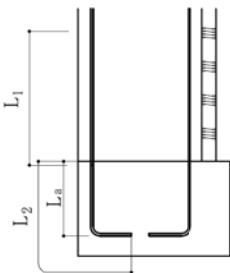
a-a' 断面図
 X方向

b-b' 断面図
 Y方向

設計者	承認	確認	作成	作成年月日	工事名称	番号	配詳	10
						図面名称	縮尺	1/15

FCI L型仕口部 配筋詳細図

定着・重ね長 (主筋D22、 $F_c=21\text{N/mm}^2$)
 $L_1=40d=40\times22=880\text{mm}$ 以上
 $L_2=35d=35\times22=770\text{mm}$ 以上
 $L_a=20d=20\times22=440\text{mm}$ 以上

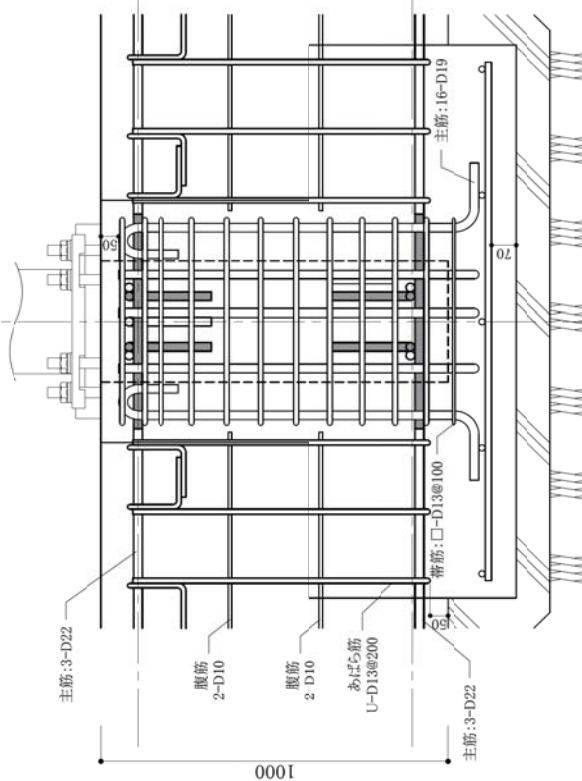
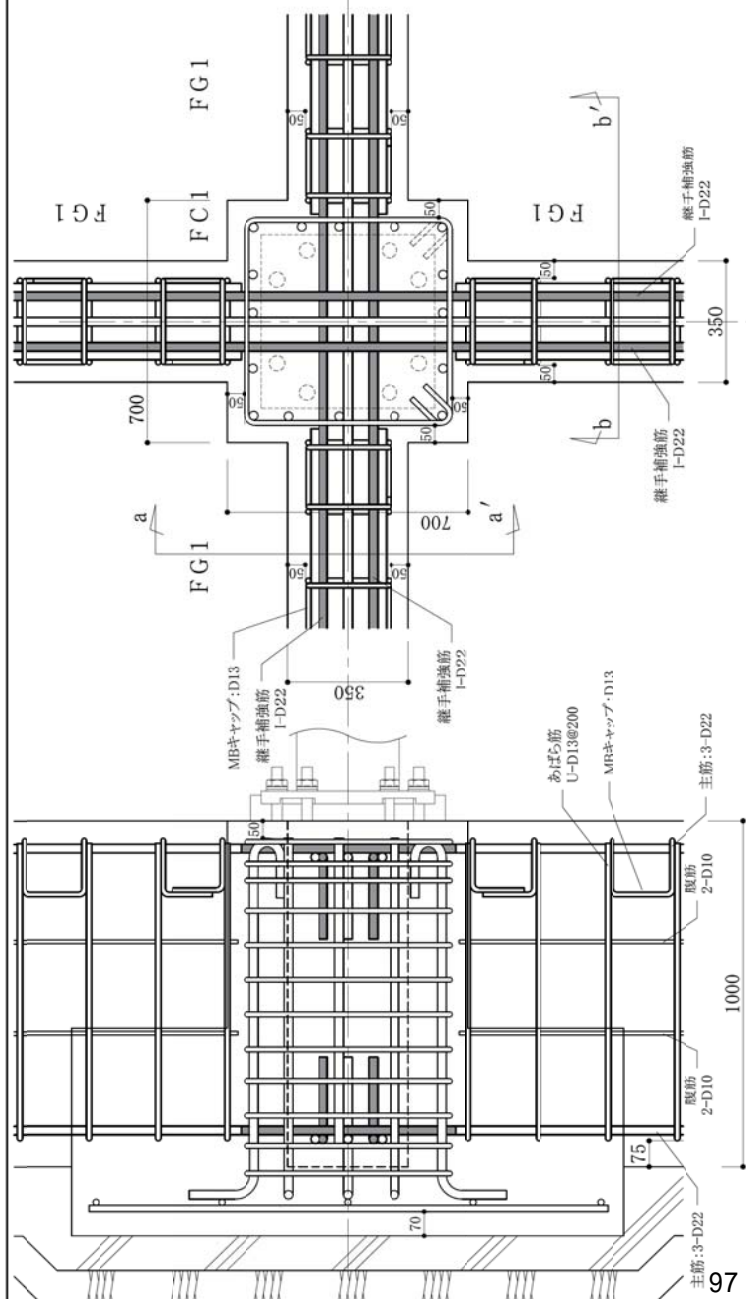


柱脚:露出型固定柱脚工法
 ハイベース(EB300-8-30)

●は現場結束の主筋を表す

△基礎柱芯

△基礎柱芯



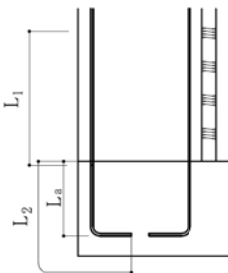
a-a' 断面図
X方向

b-b' 断面図
Y方向

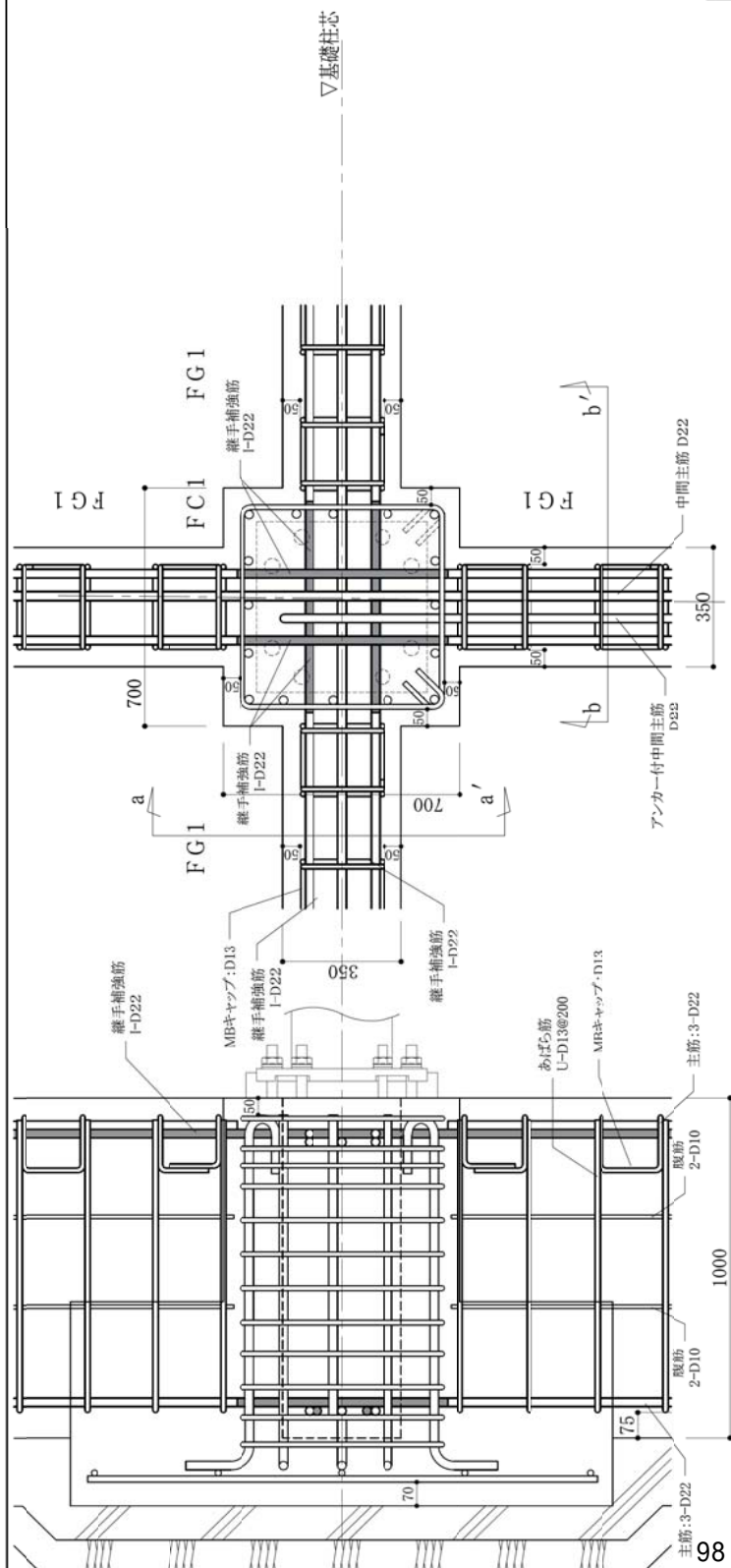
△基礎柱芯

設計者	承認	確認	作成	作成年月日	工事名称	図面名称	FCI 十型仕口部 配筋詳細図	番号	配詳 18
設計者	承認	確認	作成	作成年月日	工事名称	図面名称	FCI 十型仕口部 配筋詳細図	縮尺	1/15

定着・重ね長 (主筋D22、 $F_c=21\text{N/mm}^2$)
 $L_1=40d=40\times22=880\text{mm}$ 以上
 $L_2=35d=35\times22=770\text{mm}$ 以上
 $L_a=20d=20\times22=440\text{mm}$ 以上



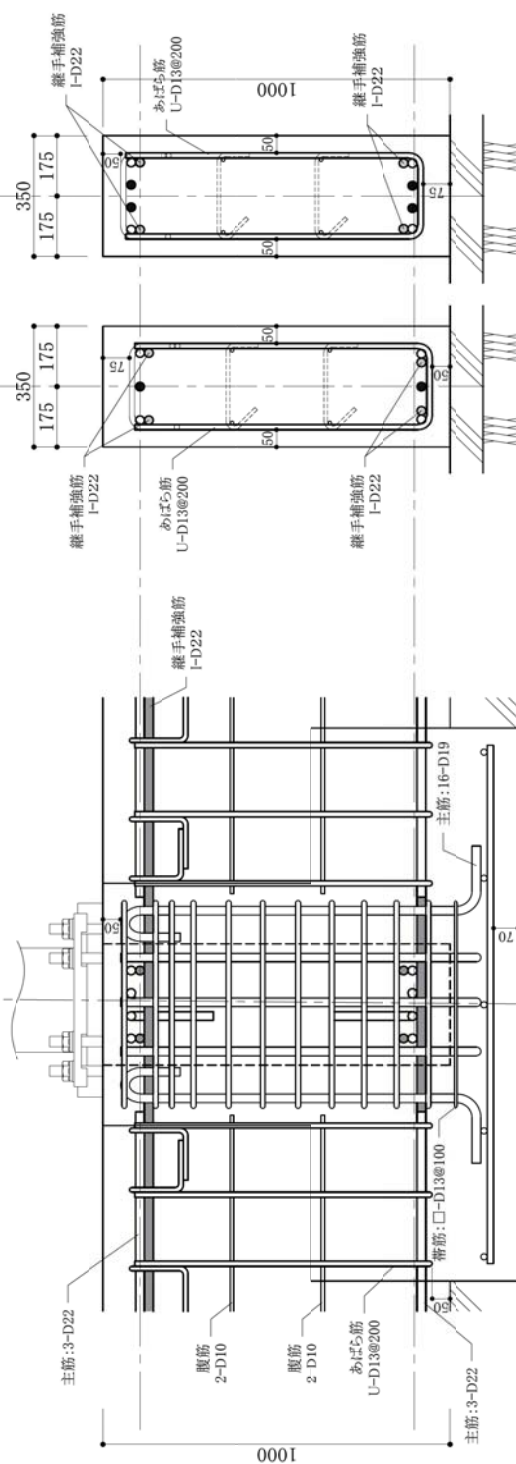
柱脚:露出型固定柱脚工法
 ハイベース(EB300-8-30)



●は現場結束の主筋を表す

△基礎柱芯

△基礎柱芯



a-a' 断面図
 X方向

b-b' 断面図
 Y方向

△基礎柱芯

設計者	作成	確認	承認	作成年月日	配筋詳細図	図面名称	FCI 十型仕口部 配筋詳細図	工事名称	FCI 十型仕口部 配筋詳細図	番号	配筋	19
				建築年月日							縮尺	1/15

(4) 施工写真



(a) 現場全景



(b) キャップタイの配置



(c) 主筋の継手とキャップタイ



(d) 竣工後建物全景

写真 5-2 施工事例 2 保育園の基礎梁

第6章 結論

6-1 総括

本研究では、現場施工の合理化、省力化を目的として、異形鉄筋の交差溶接接合技術とキャップタイを用いた複筋溶接組立配筋工法を提案した。交差溶接接合は、これまで鉄筋加工メーカーの過去の経験により決定した溶接条件に基づいて行われており、諸条件が接合性能にどのような影響を及ぼしているか、どの程度のばらつきがあるかなど、基本的な情報は一般に明らかにされていない。溶接された異形鉄筋の接合性能は、設計上および現場監理上重要であり、RC 造梁の基本的な構造性能を発揮するための前提条件となる。

第 1 章では本研究の背景と目的を述べ、第 2 章において溶接接合技術の歴史や研究について概観するとともに、本研究の位置づけを述べた。

第 3 章では、異形鉄筋の交差溶接部の強度と溶接条件の関係を把握するために、鉄筋径、電流値、通電時間、および加圧力をパラメトリックに変化させて作製した交差溶接部の試験片、合計 2160 体のせん断試験を行い、せん断強度および破壊パターンと溶接条件の関係性を示した。

第 4 章では、U 字形あばら筋と主筋との交差溶接部の接合強度およびキャップタイの有無の差が梁のせん断性能に及ぼす影響を把握するために、RC 造梁の曲げせん断実験を行い、在来型で通常配筋した試験体の剛性、最大耐力および最大耐力以降の変形状態と比較して、同等の構造性能であることを示した。

第 5 章では、溶接組立配筋工法を実案件に適用した 2 例を報告した。溶接組立配筋工法を用いて設計・施工する場合、建築確認審査の前に特別な調査研究に基づく建築技術として、公的機関による評定審査を受ける必要があった。そこで、実験データ、設計要綱、施工要領などを提出し、審査の結果、一般構造評定を取得することができた。それを受けて 1 例目として筆者が構造設計を担当した 2 階建て戸建て住宅の基礎について、2 例目として、鉄骨造 2 階建て保育園の基礎梁について示した。

6-2 交差溶接接合部の接合強度と溶接条件

あばら筋として D10 と D13、主筋として D16、D19、D22、D25 を接合した試験の結果を次にまとめて示す。

- (1) 異形鉄筋の交差溶接部は、積算電流の増大に伴い溶接部の接合強度が増加する。
- (2) あばら筋 D10 では、積算電流が $4000\text{A}\cdot\text{s}$ を超えるとあばら筋の降伏点を上回り、 $6500\text{A}\cdot\text{s}$ 以上で母材破断となる。あばら筋 D13 では $5000\text{A}\cdot\text{s}$ を超えると降伏点を上回る。鉄筋の組合せ毎に十分な接合強度が得られる溶接条件は異なり、主筋とあばら筋の平均径に対して積算電流値を決定する必要がある。
- (3) 接合強度及び破壊状況に及ぼす加圧力の影響は明瞭ではない。

- (4) 十分な接合強度を表現する値として、規格降伏点の 1.3 倍の接合強度を提案した。

6-3 基礎梁の実大実験

戸建て住宅規模の基礎梁（複筋梁）の断面を想定して、U 字ユニットの上部を拘束するキャップタイの形状、キャップタイの有無および交差溶接部の強度を因子とした梁試験体の曲げせん断実験を行った結果を次にまとめて示す。

- (1) あばら筋が十分な接合強度を有する RC 梁試験体の破壊性状、剛性、せん断強度は、在来配筋の試験体と同程度以上である。
- (2) キャップタイの形状の違いによる差はみられない。
- (3) キャップタイを取付けず U 字ユニットのみの場合、最大耐力以降の性能の低下が著しい。
- (4) 溶接接合強度を意図的に約 30%程度と低下させた梁試験体では、在来配筋試験体と比較して、最大荷重以降の耐力低下が顕著である。
- (5) RC 規準に示された終局せん断耐力を求める大野荒川 mean 式に依る計算値により、キャップタイを用いた試験体の耐力を安全側に評価することが可能である。
- (6) RC 造建物の終局強度型耐震設計指針に示された終局せん断耐力を求める A 法に依る計算値により、キャップタイを用いた試験体の耐力を比較的精度よく評価することが可能である。
- (7) 溶接組立配筋工法による基礎梁の設計において、RC 規準に従って、135°フック付きあばら筋の梁と同様に梁のせん断に対する算定を行うことが可能であると考えられる。

6-4 今後の課題

本研究では未検討であった問題点を以下に列記し、今後の研究課題とする。

交差溶接接合の溶接条件に関して

本研究では、あばら筋 D10 および D13 のそれぞれについて、降伏点を超える接合強度や母材破断となる場合の溶接条件を積算電流によって表現した。接合強度と積算電流には正の相関が認められたが、あばら筋径が異なると積算電流に対する接合強度の増加の程度も異なり、熱的相似則を考慮した説明が可能であると考えられる。熱的相似則に従うと仮定すると、あばら筋 D13 では D10 と比較して主筋を含めた平均径が 1.1 倍となるため、通電時間を $1.1^2=1.21$ 倍すれば溶接部に与えられる熱量が等価となり、十分な接合強度が得られる可能性がある。今後、あばら筋 D13 に対して、よ

り長い通電時間で溶接を行った場合の接合強度を確認する必要がある。

上記の実験を通して、本研究の実験では十分なデータが得られなかったあばら筋 D13 の場合の母材破断となる溶接条件を、積算電流によって評価できると考えられる。

キャップタイの形状に関して

本研究で提案したキャップタイは、キャップタイ鉄筋そのものの定着のみを考慮し、90°フックの余長を確保して形状を決定した。あばら筋ピッチが 200mm の場合には、あばら筋間に無理なく配筋することが可能であるが、ピッチがそれよりも小さい場合には余長が足りなくなる可能性があり、キャップタイの十分な定着に配慮した新たなキャップタイ形状の提案が必要になると考えられる。また、梁せいが大きい場合には、キャップタイ 1 次折り曲げ部の余長を大きく取ることが可能であり、その場合に梁の構造性能に与える影響は未解明である。引き続き、キャップタイ形状の検討が必要であるとともに、それにあわせた部材実験を行って部材の構造性能を確認する必要がある。

付 本研究に関する発表論文

査読付き論文、国際会議

- [付. 1] 掛川萌子、金久保利之、岡田健良、高橋辰弥：溶接組立鉄筋を用いたキャップタイ工法による RC 基礎梁のせん断性能 日本コンクリート工学年次論文集、vol 38、No.2、pp.217-222、2016.
- [付. 2] M. Kakegawa, T. Kanakubo, T. Okada, T. Takahashi, Shear Performance of RC-Footing Beams by Cap-Tie System using Welded Stirrups, Asian Concrete Federation 2016, The 7th International Conference of Asian Concrete Federation, 3. Concrete structures, Paper No.80, 2016.10
- [付. 3] 岡田健良、金久保利之、掛川萌子、高橋辰弥：溶接組立鉄筋を用いたキャップタイ工法による RC 基礎梁の曲げおよび交差部の構造性能 日本コンクリート工学年次論文集、vol 39、No.2、pp.1363-1368、2017.
- [付. 4] 高橋拓也、金久保利之、岡田健良、高橋辰弥：溶接組立鉄筋を用いたキャップタイ工法による RC 基礎梁の繰返し荷重下におけるせん断性能 日本コンクリート工学年次論文集、vol 40、No.2、pp.127-132、2018.
- [付. 5] 上山泰輝、金久保利之、岡田健良、高橋辰弥：溶接組立鉄筋を用いた RC 有孔梁の構造性能に関する研究 日本コンクリート工学年次論文集、vol 41、No.2、pp.175-180、2019.
- [付. 6] 岡田健良、高橋辰弥、金久保利之：異形鉄筋の交差溶接接合性能に及ぼす溶接条件の影響、日本建築学会構造系論文集 第 86 巻 第 779 号、2021.1 (掲載決定)

口頭発表

- [付. 7] 掛川萌子、金久保利之、岡田健良、高橋辰弥：溶接組立鉄筋を用いたキャップタイ工法による RC 基礎梁のせん断破壊性状 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.101-102、2016.8
- [付. 8] 岡田健良、金久保利之、高橋辰弥：異形鉄筋のスポット溶接接合性能に及ぼす溶接条件の影響 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.281-282、2017.8
- [付. 9] 高橋拓也、掛川萌子、金久保利之、岡田健良、高橋辰弥：溶接組立鉄筋を用いたキャップタイ工法による RC 基礎梁交差部の構造性能、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.35-36、2017.8
- [付.10] 掛川萌子、高橋拓也、金久保利之、岡田健良、高橋辰弥：溶接組立鉄筋を用いたキャップタイ工法による RC 基礎梁端部の曲げ破壊時の構造性能、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.57-58、2017.8
- [付.11] 高橋辰弥、掛川萌子、高橋拓也、金久保利之、岡田健良：溶接組立鉄筋を用いたキャップタイ工法による RC 基礎梁 L 形交差部の構造性能、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.219-220、2018.8
- [付.12] 高橋拓也、掛川萌子、上山泰輝、金久保利之、岡田健良、高橋辰弥：溶接組立鉄筋を用いた RC 梁のせん断破壊性状、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.213-214、

2018.9

- [付.13] 上山泰輝、高橋拓也、金久保利之、岡田健良、高橋辰弥：溶接組立鉄筋を用いた RC 梁の曲げ降伏後の破壊性状、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.487-488、2019.9
- [付.14] 高橋辰弥、上山泰輝、金久保利之、岡田健良：溶接組立鉄筋を用いた RC 有孔梁のせん断性能、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.131-132、2020.9

謝辞

本論文は、筆者が筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻在学中に行なった研究をまとめたものであります。本論文を執筆するにあたり、数多くの方々からのご協力、ご指導、ご鞭撻を賜ることができました。ここに厚く御礼申し上げる次第であります。

筑波大学大学院 金久保利之教授には、研究の方針、実験計画、実験の実施、本論文の取りまとめに至るまで、誠に懇切、丁寧なご指導を頂戴いたしました。何とか学位論文の形として整いましたのも、先生のお力に依りますもので、感謝の念に堪えません。

筑波大学大学院 境 有紀教授（現 京都大学防災研究所教授）には、大学院入学時より在籍中には、研究目的や研究の進め方についての貴重な助言を頂戴しました。大変感謝申し上げます。

筑波大学大学院 庄司学教授には、本研究のさらなる深化を促す助言を頂戴しました。感謝の極みであります。

筑波大学大学院 八十島章准教授には、在学中及び実験の際には的確なご指摘、ご意見を頂戴いたしました。心より感謝申し上げます。

千葉工業大学大学院 中野克彦教授には、予備審査をご担当いただきました。中野教授にはこれまでも建築センターの評定では度々審査をご担当いただくことが有り、言葉に言い尽くせないほどの御礼を申し上げる次第であります。

金久保研究室所属中には、小島篤志氏、掛川萌子氏、高橋拓也氏、上山泰輝氏には、実験の遂行に当たり、貴重なご協力を得ました。ここに感謝申し上げます。

三栄商事株式会社 星野寿市会長、星野祐介社長、平岡芳樹常務取締役には、本研究の貴重な機会を与えていただきました。心より深く感謝申し上げます。同社 高橋辰弥技術部長には、長年に渡る本研究の遂行に当たり、惜しめない協力と助言を幾度となく頂戴してまいりました。深謝申し上げます。同社 穴戸翔太氏には、あばら筋及び主筋の交差溶接試験体の製作並びに試験結果の整理について、協力を得ました。ここに謝意を申し上げます。

ケイアイ総合研究所の吉敷武男所長、並びにフォートリア設計の由利隆之所長には、実施例の作成にあたり、貴重な資料をご提供頂きました。吉敷所長には、実施設計では度々ご指導も賜りました。心より感謝申し上げます。