

論文

[2177] 曲げ・軸力を受けるサンドイッチ構造と RC 構造の隅角接合部の挙動

塩屋俊幸*1・滝本和志*2

1. はじめに

鋼・コンクリート合成構造はじん性・施工性・経済性に優れているため、各種構造物へ適用しようとする試みが活発に行われている[1][2]。土木構造物では、合成構造沈埋トンネル、海洋プラットフォーム、防波堤、連続地中壁などがその代表例である。合成構造そのものは現在開発段階にあり、設計基準も完備していない[3][4]。上記の構造物の設計において特に問題となる点は、合成構造と鉄筋コンクリート構造との接合部であるが、隅角部で接合される場合も多く、その設計法が問題となる。そこで、本論文では隅角部のモデル試験体を用いて加力実験を行い、その挙動を調べた結果について報告する。

2. 実験概要

2. 1 形状寸法および鋼材配置

(1) 試験体設計の基本

圧縮および引張鋼材比は曲げ破壊させるためと実際の構造物に近い鋼材比である1%とした。また、鋼材の厚さについては溶接の限界である6mmとした。したがって、部材高さは60cmとなる。鋼材は鋼板がSS400、鉄筋がSD345とした。鉄筋の定着長は土木学会コンクリート標準示方書[5]にしたがって計算し、主筋のD19で60cmとした。なお、主筋以外の補強筋は全てD10とした。鋼板側の定着板はChuah等の実験結果[6]を回帰して耐力を算定し、フラットバー（厚さ6mm、幅32mm）14枚を10cmピッチに配置した。鋼板の端部には降伏荷重の1/3程度の荷重に耐える鉄筋を溶接した。

(2) 試験体

試験体の形状寸法と鋼材配置を図-1~4に示す。なお、以降サンドイッチ構造の合成部材をコンポジット部材と呼ぶ。

- ① CP-RC 試験体：コンポジット（CP）部材とRC部材の接合部で接合部の補強無し。
- ② CP-RC-R 試験体：コンポジット（CP）部材とRC部材の接合部で接合部の補強有り。
- ③ RC-RC 試験体：RC部材とRC部材の接合部で接合部の補強無し。
- ④ CP-CP 試験体：コンポジット（CP）部材とCP部材の接合部で接合部の補強無し。

2. 2 使用材料

(1) コンクリート

コンクリートの配合を表-1に示す。粗骨材は青梅・嵯峨混合碎石($G_{max}=20\text{mm}$ 、比重2.66、FM6.60)を用い、細骨材は木更津産山砂と葛生産砕砂を6:4の割合で混合したもの(比重2.62、FM2.50)を使用した。

(2) 鋼材

*1 清水建設(株)技術研究所 主任研究員、工博(正会員)

*2 清水建設(株)技術研究所 研究員、工修(正会員)

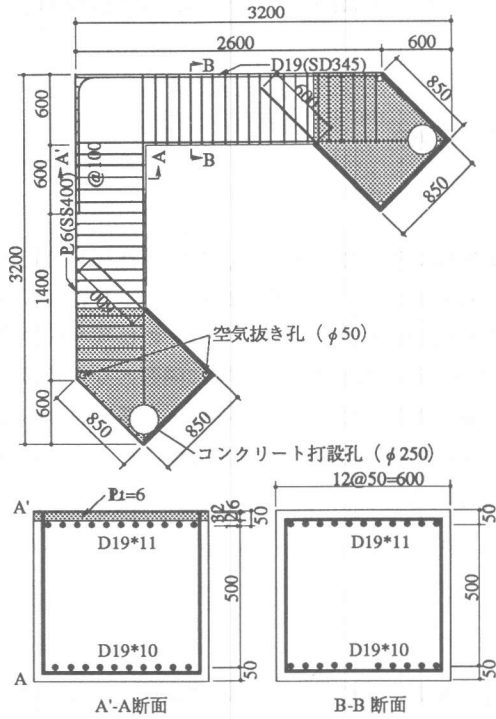


図-1 CP-RC試験体

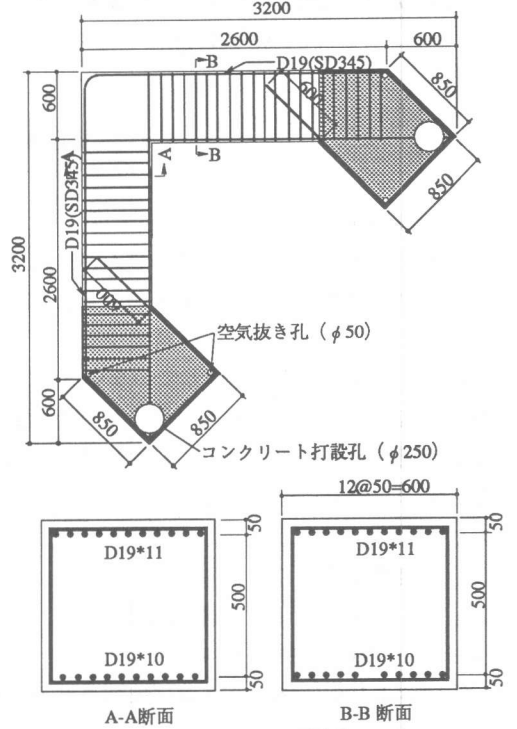


図-3 RC-RC試験体

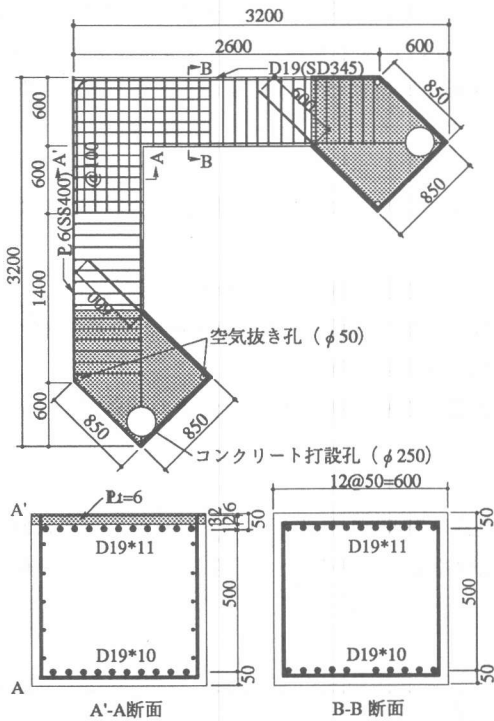


図-2 CP-RC-R試験体

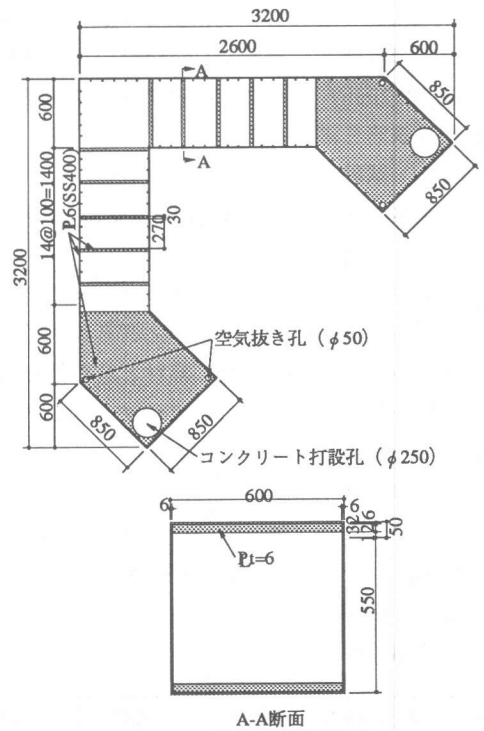


図-4 CP-CP試験体

表-1 コンクリートの配合

| 設計基準強度 f_{ck7} kgf/cm ² | セメント種別 | スランプ cm | 水セメント比 W/C % | 細骨材率 s/a % | 単位量(kg/m ³) | | | | 混和剤 AE剤 g |
|--------------------------------------------|--------|------------|--------------------|------------------|-------------------------|-----------|----------|----------|-----------------|
| | | | | | 水 W | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | |
| 300 | 早強 | 15 | 48.5 | 40.9 | 181 | 374 | 708 | 1038 | 0.935 |

注：粗骨材（碎石）の最大寸法 $G_{max}=20mm$ 、空気量の範囲 $4 \pm 1\%$

鋼板：SS400（降伏点 245N/mm²以上、引張強さ 402～510N/mm²）

鉄筋：SD345（降伏点 345～440N/mm²以上、引張強さ 490N/mm²以上）

2. 3 製作・養生方法

- (1) 材令3日まで湿布養生とした。
- (2) 材令3日から試験体は現場気中養生としたが食品包装用ラップを用いて乾燥を防いだ。

2. 4 載荷方法

支持条件は両端単純支持とし、一軸圧縮載荷とし 600ton試験機ベッド
た。加力方法を図-5 に示す。

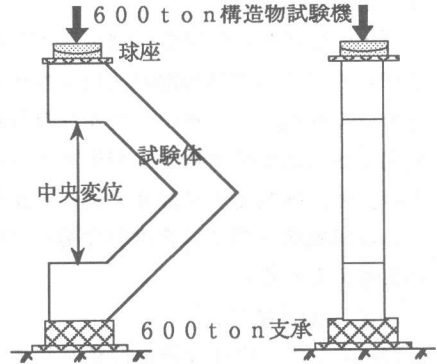


図-5 加力方法概念図

表-2 実験結果の一覧

| 試験体名 | 試験体寸法 | | コンクリート | | 主鋼材 | | | せん断補強鋼材 | | |
|---------|-------------------|-------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|----------------|-------------------------------|------------|---------|-------------------------------|------------|
| | 有効高さ d (cm) | 試験体幅 b (cm) | 圧縮強度 f_c (kgf/cm ²) | 引張強度 f_t (kgf/cm ²) | 種類 | 降伏点 (kgf/cm ²) | 鋼材比 (%) | 種類 | 降伏点 (kgf/cm ²) | 鋼材比 (%) |
| CP-RC | 59.7 55 | 60 | 393 | 31.0 | SS400 SD345 | 2991 4040 | 1.005 | SD345 | 4137 | 0.238 |
| CP-RC-R | 59.7 | 60 | 393 | 31.0 | SS400 SD345 | 2991 4040 | 1.005 | SD345 | 4137 | 0.238 |
| RC-RC | 55 55 | 60 | 429 | 33.5 | SD345 | 4040 | 0.955 | SD345 | 4137 | 0.238 |
| CP-CP | 59.7 | 60 | 428 | 32.3 | SS400 | 2991 | 0.955 | SD345 | 4137 | 0.238 |

注) 上段数字はコンポジット部、下段数字はRC部

| 試験体名 | 実験結果 | | | |
|---------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|
| | ひびわれ荷重 Pcr (tonf) | 降伏荷重 Py (tonf) | 最大荷重 Pu (tonf) | 破壊モード |
| CP-RC | 0 | 58 | 64.6 | 曲げ降伏後、曲げせん断破壊 |
| CP-RC-R | 5 | 69 | 74.8 | 曲げ降伏後、曲げせん断破壊 |
| RC-RC | 5 | 54 | 54.0 | 曲げ破壊 |
| CP-CP | 0 | 57 | 57.0 | 曲げ降伏後、曲げ引張部の コンクリート局部圧壊 |

3. 実験結果

3.1 実験結果一覧表

表-2に実験結果の一覧を示す。なお、各実験結果には自重分の荷重は含まれていない。

3.2 破壊過程

図-6にひびわれ状況の一例を示す。主要なひびわれはすべて隅角部の圧縮部コーナーへ向かって伸張する。その主要なひびわれは有効高さ d の約半分の間隔で発生する。ひびわれの発生、伸長とも試験体下部の方が早い。これは試験体下部には自重が作用しているためと考えられる。

3.3 変位挙動

図-7に荷重と中央変位の関係を示す。最大荷重は大きい順からCP-RC-R試験体、CP-RC試験体、CP-CP試験体、RC-RC試験体の順であった。CP-RC-R試験体、CP-RC試験体で最大荷重が大きいのは接合部で相対的に鋼材量が多いためである。立ち上がりの剛性は全試験体ほぼ同じであるが荷重が大きくなるにつれて最大荷重の小さい順に剛性が小さくなっていく。部材降伏後の変形はなだらかであり曲げ破壊であったことがわかる。実験は最大荷重を確認した後除荷したが除荷時の剛性も全試験体ほぼ同じであった。

3.4 鋼材のひずみ挙動

図-8に荷重と主鋼材ひずみの関係を示す。鋼材は各所で降伏しており、試験体の最大荷重は主鋼材の降伏で決定されていることが確認された。

3.5 コンクリートのひずみ挙動

図-9にコンクリート表面の3軸ひずみ測定結果から計算した主応力とその方向を示す。主応力は試験体の圧縮隅角部に向かっており、隅角部では図-10に示すようなトラス機構が明瞭に形成されていることがわかる。この圧縮ストラットの幅を計算してみると表-3のようになる。ストラットの幅は約 $d/6$

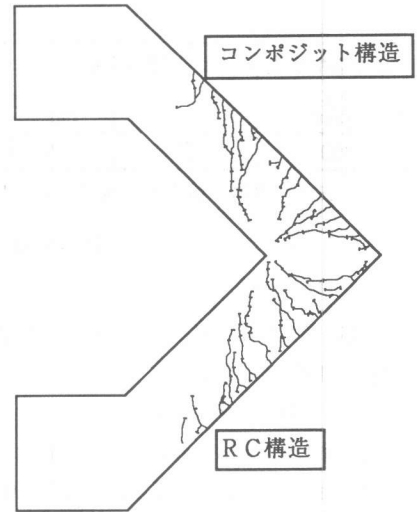


図-6 ひびわれ状況(CP-RC試験体)

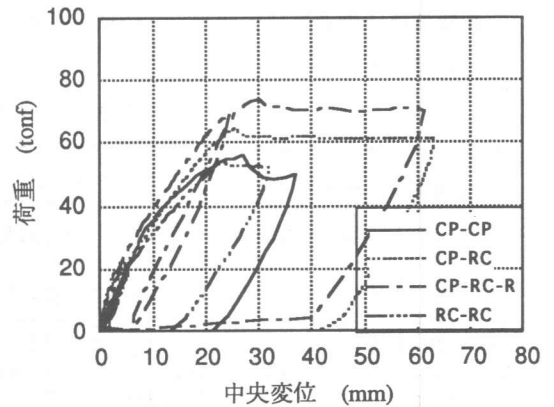


図-7 荷重と中央変位の関係

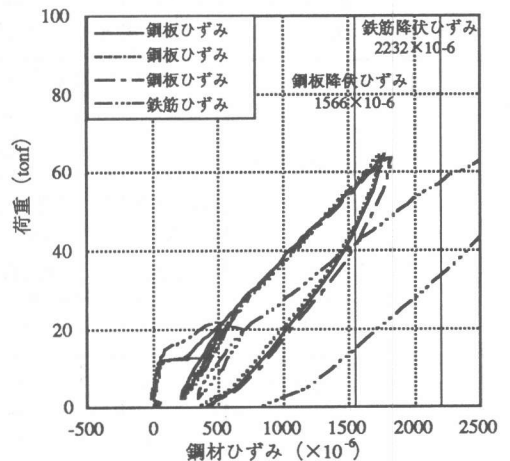


図-8 荷重と主鋼材ひずみの関係 (CP-RC試験体)

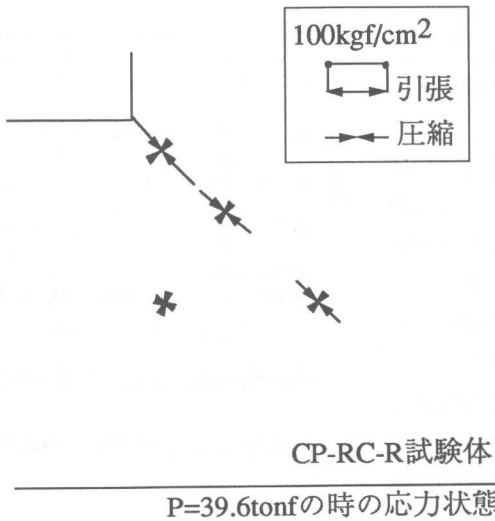


図-9 コンクリート表面の主応力

(10cm)であり、設計においても $d/6$ 程度の値をとってよいものと考えられる。

3. 6 接合部の耐力評価

図-11にトラス解析の要素図を示す。トラス解析結果によれば荷重 1 tonfあたりの引張弦材の力は2.36tonfであるから、応力度にして

$$2360\text{kgf}/60\text{cm} \cdot 6\text{cm} = 65.56\text{kgf}/\text{cm}^2$$

鋼材の降伏点は2991kgf/cm²であるから部材の降伏荷重比は次式となる。

$$R_y = (2991\text{kgf}/\text{cm}^2) / (65.56\text{kgf}/\text{cm}^2) = 45.6$$

すなわち45.6tonfで降伏する。実験値は57tonfであるから2割強の差はあるがトラス解析で接合部の耐力は評価できるものと考えられる。また、接合部の詳細については

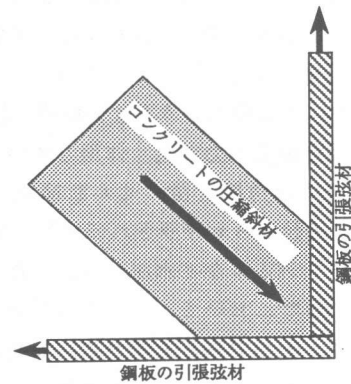


図-10 隅角部のトラス機構

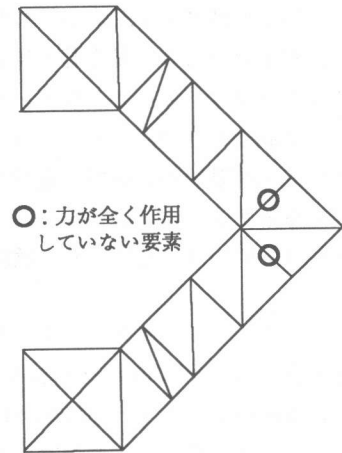


図-11 トラス解析の要素図

表-3 圧縮ストラット幅

| 試験体 | 鋼板降伏荷重 P_y (tonf) | 鋼板降伏時の コンクリート主応力 σ_2 (kgf/cm ²) | 1tonあたりの コンクリート主応力 σ_2 / P_y (kgf/cm ² /tonf) | 圧縮ストラット幅 b_s (cm) |
|------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| CP-RC | 58 | 280 | 4.83 | 11.5 |
| CP-RC-R | 69 | 410 | 5.94 | 9.37 |
| RC-RC | 54 | 340 | 6.30 | 8.83 |
| CP-CP | 57 | 280 | 4.91 | 11.3 |
| $\bar{b}_s = 10.26, \sigma_{n-1} = 1.363, \sigma_n = 1.18$ | | | | |

$$b_s = P_{\text{unit}} / b / (\sigma_2 / P_y), \quad b: 60\text{cm}(\text{試験体の幅})$$

P_{unit} : 3.338tonf(荷重1tonfあたりの圧縮ストラットに作用する圧縮力: トラス解析から算出)

本実験のように鉄筋の定着長を鉄筋コンクリートと同じくし、鋼板についてはChuahの実験結果を参照すれば問題ないことが明らかになった。

なお、本実験のような加力状態の場合、図-11の○印の付いた要素で力が全く作用していない。これは実験において隅角部近傍のせん断補強筋に貼ったひずみゲージの値からも確認されている（図-12）。このことは沈埋トンネルなど水圧が主たる作用荷重の場合、隅角部の設計において、大幅に設計を簡略化できる可能性を示すものであると言える。即ち、ハンチを設ける必要もなく、隅角部を全く補強しなくても所定の耐力が得られる可能性を示すものである。

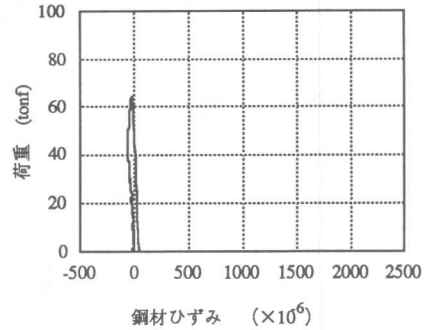


図-12 隅角部近傍のせん断補強筋ひずみ

4. まとめ

- ①主要なひびわれはすべて接合部の圧縮部コーナーへ向かって伸長する。その主要なひびわれははりの場合と同様に有効高さ d の約半分の間隔で発生する。ひびわれの発生、伸長とも試験体下部の方が早いがこれは試験体下部には自重が作用しているためと考えられる。
- ②最大荷重は大きい順から CP-R C-R 試験体、CP-R C 試験体、CP-C P 試験体、R C-R C 試験体の順であった。立ち上がりの剛性は全試験体ほぼ同じであるが荷重が大きくなるにつれて最大荷重の小さい順に剛性が小さくなっていく。部材降伏後の変形はなだらかであり曲げ破壊であったことがわかる。
- ③鋼材は各所で降伏しており、試験体の最大荷重は鋼材の降伏で決定されていることが確認された。
- ④コンクリート表面の3軸ひずみ測定結果から計算した主ひずみとその方向から、主ひずみは試験体の圧縮隅角部に向かっており、隅角部ではトラス機構が明瞭に形成されていることがわかる。この圧縮ストラットの幅を計算してみるとストラットの幅は約 $d/6$ (10cm) であり、設計においても $d/6$ 程度の値をとってよいものと考えられる。
- ⑤2割強の差はあるがトラス解析で接合部の耐力は評価できるものと考えられる。また、接合部の詳細については本実験のように鉄筋の定着長を鉄筋コンクリートと同じくし、鋼板については Chuah の実験結果を参照すれば問題ないことが明らかになった。

<参考文献>

- [1] 土木学会：合成構造の活用に関するシンポジウム論文集、1986年9月
- [2] 土木学会：鋼・コンクリート構造の設計ガイドライン、1989年3月
- [3] 上田多門、塩屋俊幸：鋼コンクリート系サンドイッチ構造、コンクリート工学、Vol.30、No.5、pp.5-20、1992年5月
- [4] 土木学会：鋼・コンクリートサンドイッチ構造設計指針（案）、1992年7月
- [5] 土木学会：コンクリート標準示方書〔平成3年版〕、設計編
- [6] Chuah C.L., Rungrojsaratis V. and Shima H.: Load-Displacement Relationship of Shear Connector along Steel Plate Anchorage, コンクリート工学年次論文報告集、第12巻、第2号、pp.853-858、1990年