

鋼コンクリート複合構造接合部における時間依存性挙動の実験的検討

長岡技術科学大学大学院 学生会員 ○ 茨木 泰介
長岡技術科学大学 正会員 下村 匠

1. はじめに

鋼コンクリート複合構造の応答を精度よく予測するためには、鋼、コンクリートのそれぞれ単体の材料特性に加え、部材間を一体化するための接合部の力学特性を明らかにすることが重要である。

鋼、コンクリートの単体の性質は、それぞれの分野で十分な知見が得られている。また、ずれ止めを用いた鋼とコンクリートの部材接合部の力学特性については、短時間の応答、終局時の挙動は、実験方法の確立や定式化、現象の理解が行われており¹⁾²⁾³⁾⁴⁾、所要の性能を有した構造物を実現するに足る知見が得られている。

一方で、経時挙動問題（コンクリートに収縮が生じる場合や持続荷重を受けた場合）については、鋼とコンクリートの部材間で完全合成を仮定し、コンクリート単体の収縮、クリープ特性を用いて構造応答を算定しており、部材接合部のずれ止めの応力伝達メカニズムより成る、鋼、コンクリート、ずれ止め、それぞれのふるまいが考慮されていない。そのため、求めた変形、応力は実構造物の実測結果と乖離する場合があることが報告されている⁵⁾。これらのことは、経時挙動問題における計算仮定が実現象を表していないことを意味しており、コンクリートの収縮および持続荷重作用下における鋼コンクリート複合構造の時間依存性変形と応力の予測に適用可能な接合部の構成モデルが必要である。構成モデルの開発に必要である部材接合部の時間依存性の変形と応力に関しては、終局挙動に直接関係しないためか研究事例が少ない⁶⁾。そこで、本研究は基礎データを取得するため、持続荷重が作用した条件下で頭付きスタッド接合部の押し抜き試験を行った。

2. 実験の概要

2.1. 試験体と使用材料

文献²⁾³⁾⁶⁾を参考に図-1に示す試験体を2体作製した。スタッドは軸径13mm、高さ80mmのものを、H形鋼は材質SS400、寸法200×200×8×12mmのものをを用いた。頭付きスタッドの機械的性質を表-1に、コンクリートの示方配合を表-2に、圧縮強度試験の結果を表-3に示す。

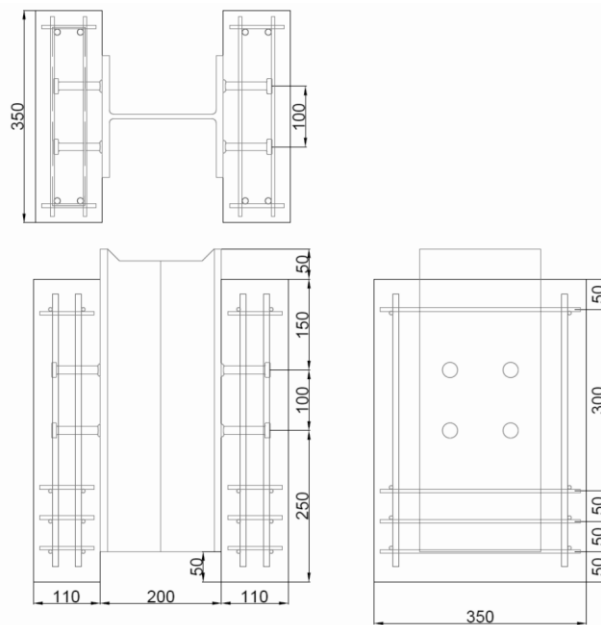


図-1 試験体形状

表-1 頭付きスタッドの機械的性質

材質	降伏強度または0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
SS400	363	446	33

表-2 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	AE減水剤
58	45	166	286	838	1051	286ml

備考) 配合強度：30N/mm² 目標スランプ：12cm

粗骨材最大寸法：20mm 普通ポルトランドセメント

表-3 圧縮強度試験結果

Case	圧縮強度(N/mm ²)	ヤング係数(kN/mm ²)
Case1	38.6	35.1
Case2	33.8	31.4

実構造物の接合部は複数のずれ止めで構成されていることから、スタッドは2段2本配置とした。補強鉄筋については既往研究⁶⁾を参考として配筋を行った。コンクリートの打設は水平方向に取り付けられたスタッドに対して上側から行った。スタッドに影響を集約させるため、コンクリートと接触するH形鋼フランジ面にテフロ

ンシートの設置, グリースの塗布をし, 摩擦を除去した。コンクリートの乾燥による影響を排除するためコンクリート部は, 防水気密テープを用いて非乾燥状態とした。

2.2. 試験方法

荷経路は, 残留ずれ変位と除荷・再荷時のずれ剛性を測定するため, 設計せん断耐力の 5%毎に漸増繰り返し荷重とし, 所定の荷重レベルに達したら, 約 15 日間の持続荷重を行った。持続荷重を行う荷重レベルは設計せん断耐力 20%, 40%, 60%とした。設計せん断耐力の算定は複合構造標準示方書⁷⁾に示されている式(1)および式(2)のうち小さい方を用いた。

$$V_{ssud1} = \left(31A_{ss} \sqrt{(h_{ss}/d_{ss})f_{cd}} + 10000 \right) / \gamma_b \quad (1)$$

$$V_{ssud2} = A_{ss} f_{ssud} / \gamma_b \quad (2)$$

ここに, V_{ssud} : スタッドの設計せん断耐力(N), A_{ss} : スタッドの断面積(mm²), d_{ss} : スタッドの軸径(mm), h_{ss} : スタッドの高さ(mm), f_{ssud} : スタッドの設計引張強度(N/mm²), f_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度(N/mm²), γ_b : 部材係数

作製した試験体のスタッド 1 本当たりの設計せん断耐力は 61.8kN, 破壊モードはスタッドの破断である。また, 荷経路の影響の有無を明らかにするため, ケース 1 は設計せん断耐力の 50%まで静的荷重を行った後に, 漸増繰り返し荷重および持続荷重を行っている。

荷経路方法は, 写真-1 に示すように油圧ジャッキ, 油圧ポンプにより荷重を制御した。試験体はコンクリートブロック設置位置にセメントペーストを敷き固定した。

荷重とずれ変位に加えて, H 形鋼やコンクリートブロック, スタッドのひずみ等を経時的に計測した。ずれ変位は, 頭付きスタッドが配置されている水平断面位置における, H 形鋼フランジのスタッド溶接の背面とコンクリートブロック側面の厚さの中心の相対的なずれ変位を計 8 か所で, 高感度変位計を用いて測定した。スタッドのひずみは頭下から 20mm の位置で, 曲げの影響をなくすため, せん断力方向に対して側面で測定した。

3. 実験結果および考察

3.1. せん断力—ずれ変位関係

各ケースのせん断力—ずれ変位関係を図-2 に示す。持続荷重を行った荷重レベルに着目し, 拡大表示したせん断力—ずれ変位関係を図-3 に示す。せん断力は荷重をスタッド本数で除した, スタッド 1 本に対する値である。ずれ変位は各測点で計測した値を平均した。なお,

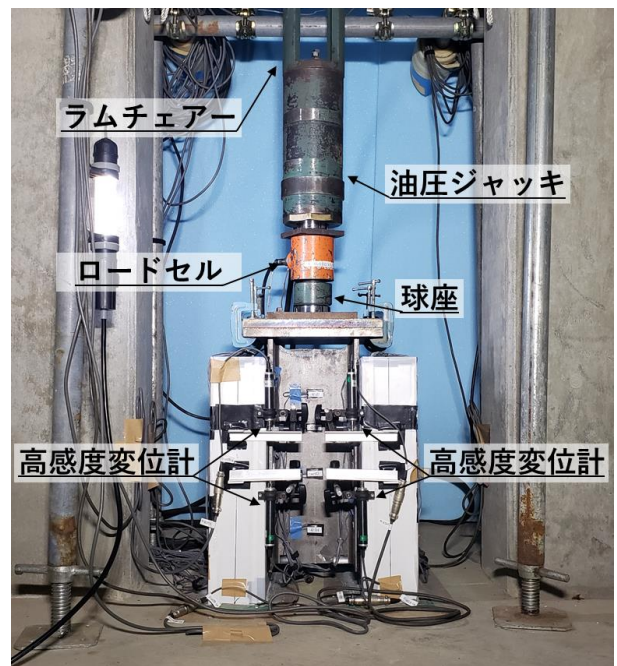


写真-1 荷経路方法

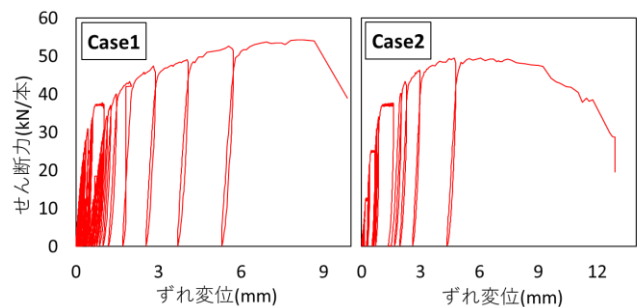


図-2 せん断力—ずれ変位関係

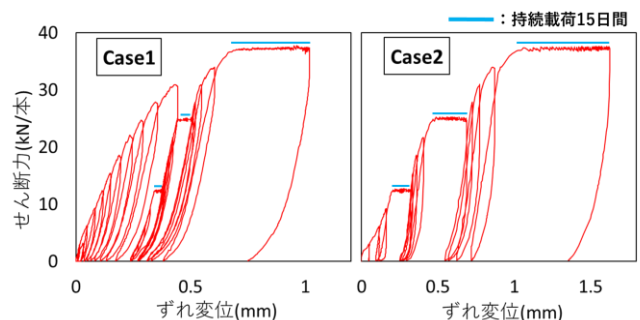


図-3 せん断力—ずれ変位関係 (持続荷重部を拡大表示)

両ケースともスタッドの破断による終局であった。

包絡線より, 各試験体で個体差があることが分かる。これは, 既往研究⁴⁾で報告されている通り, コンクリートの打ち込み方向による影響であると考えられる。また, 両ケースとも設計せん断耐力の 60%でスタッドが降伏したことを, スタッドのひずみ挙動より確認した。

3.2. 持続荷重によるずれ変位の経時変化

持続荷重によるずれ変位の経時変化挙動について明らかにするため, 経時変化成分と瞬間成分との比である, ずれ変位増分比として, 式(3)のように整理を行った。

$$\kappa(t - t_i) = \frac{\delta(t) - \delta(t_i)}{\delta(t_i)} \quad (3)$$

ここに、 $\kappa(t - t_i)$ ：ずれ変位増分比、 $\delta(t) - \delta(t_i)$ ：持続荷重により生じたずれ変位の総和(mm)、 $\delta(t)$ ：時刻 t におけるずれ変位(mm)、 $\delta(t_i)$ ：時刻 t_i におけるずれ変位(mm)、 t_i ：各持続荷重開始時刻

せん断力—ずれ変位関係が、一般的なコンクリートの圧縮応力—ひずみ関係における時間依存性と同程度か検討するため、ずれ変位増分比とクリープ係数の比較を行った。クリープ係数はコンクリート標準示方書【設計編】⁸⁾に示されている、クリープ係数予測式 (4)から算定した。なお、非乾燥状態で試験を行っていることから、相対湿度を100%とし、乾燥しないとしている。また、ケース2 持続荷重レベル20%よりずれ変位増分比の関数抽出を行い、式(5)に示すように持続荷重によるずれ変位増加量を算定し、線形則、重ね合わせ則について検討を行った。

$$\varphi(t, t') = \frac{4W \left(1 - \frac{RH}{100}\right) + 350}{12 + f'_c(t')} \cdot \log_e(t - t' + 1) \cdot E_{ct} \quad (4)$$

ここに、 W ：単位水量、 RH ：相対湿度(%), $f'_c(t')$ ：荷重の有時効材齢 t' におけるコンクリートの圧縮応力(N/mm²), E_{ct} ：荷重の有時効材齢 t' におけるコンクリートの弾性係数(N/mm²)

$$\delta(t) - \delta(t_i) = \sum_{i=0}^n \Delta\delta(t_i) \cdot 0.2194(t - t_i)^{0.3286} \quad (5)$$

ここに、 $\Delta\delta(t_i)$ ：瞬間ずれ変位の増加量(mm)、 $0.2194(t - t_i)^{0.3286}$ ：ケース2 持続荷重レベル20%より抽出した関数

ずれ変位増分比およびクリープ係数の経時変化を図-4に示す。なお、ケース1の持続荷重レベル60%はコンクリート部のクリープ破壊を懸念し、6日間で持続荷重を終えた。

図-4より持続荷重開始直後にずれ変位が急増し、時間経過とともに収束する傾向にあり、持続荷重レベルが大きい程ずれ変位増分比は増加傾向にある。これらは、一般的なコンクリートのクリープ挙動と類似している。

ケース1の持続荷重レベル20, 40%は、ずれ変位増分比の変化が緩やかである。これは持続荷重前に荷重レベル50%まで、静的荷重を行った影響と考えられる。また、ケース1の持続荷重レベル60%では、ずれ変位増分比の変化が大きい。これは、これまでの履歴以上の荷重レベルで持続荷重を行ったためと考えられる。これらのことから、持続荷重によるずれ変位増加傾向は、最大荷重履歴の影響を受けることが示唆される。

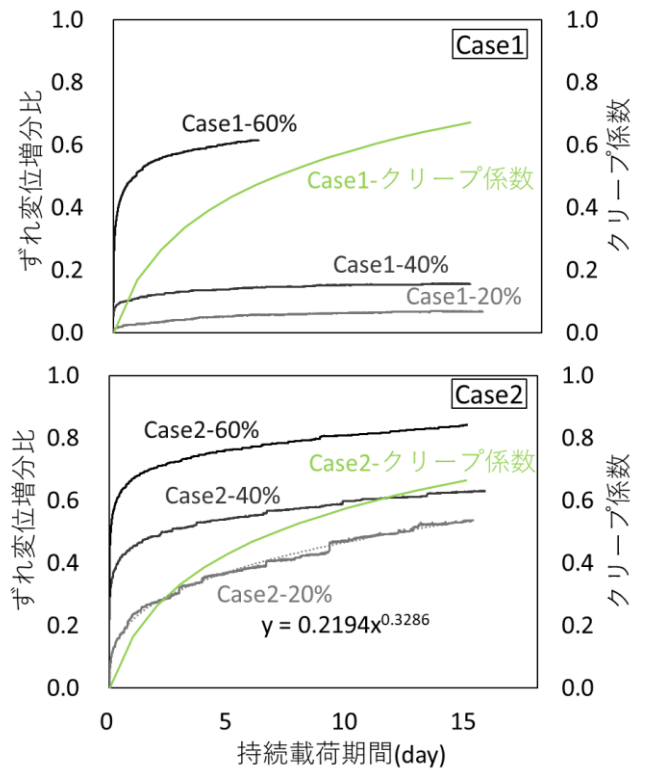


図4 ずれ変位増分比およびクリープ係数の経時変化

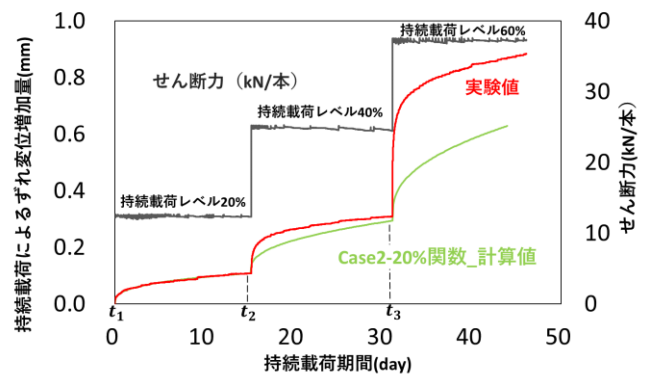


図5 持続荷重によるずれ変位増加量の計算値と実験値の比較

クリープ係数とずれ変位増分比を比較すると、持続荷重以上の荷重履歴のあるケースを除いて、同様のオーダーである。また、ずれ変位増分比の方が収束傾向にある。

図-5に持続荷重によるずれ変位増加量の計算値と実験値の比較を示す。持続荷重レベル40%の区間において、立ち上がりの挙動には差があるが、概ね同じ値に収束している。このことから、持続荷重レベル40%までは線形則、重ね合わせ則が成り立つ可能性が示唆された。

3.3. 残留ずれ変位—過去に受けた最大ずれ変位

漸増繰り返し荷重の各除荷・再荷重における、残留ずれ変位と過去に受けた最大ずれ変位の関係を図-6に示す。両ケースともに途中から線形的に増加する傾向が見

られる。また、持続荷重のプロットにおいても同一線上に乗っている。このことから、持続荷重の影響によらず、過去に受けた最大ずれ変位により、一意的に残留ずれ変位が生ずる可能性が示唆された。

3.4. 除荷ずれ剛性—過去に受けた最大ずれ変位

漸増繰り返し荷重の各除荷・再荷重における、除荷時のせん断力とずれ変位、除荷後の残留ずれ変位の割線の傾きより、除荷ずれ剛性を算出した。除荷ずれ剛性と過去に受けた最大ずれ変位の関係を図-7に示す。両ケースとも、除荷ずれ剛性は低ずれ変位で大きく低下し、その後一定の値に収束する傾向が見られる。また、持続荷重のプロットにおいても同一線上に乗っている。このことから、持続荷重によるずれ変位の増大により、ずれ剛性は低下しない可能性が示唆された。

4. まとめ

本研究で、得られた知見を以下に示す。

- 1) 持続荷重によるずれ変位の経時変化挙動は、一般的なコンクリートのクリープ挙動と同様である。
- 2) 持続荷重によるずれ変位の増加傾向は、最大荷重履歴の影響を受け、持続荷重以上の荷重履歴がある場合は、時間依存性のずれ変位の増加傾向は緩やかになる。
- 3) 持続せん断力と持続荷重により生ずるずれ変位に関して、荷重レベル40%までは線形則、重ね合わせ則が成り立つ可能性が示唆された。
- 4) 持続荷重の影響によらず、過去に受けた最大ずれ変位により、一意的に残留ずれ変位が生ずる。
- 5) 時間依存性のずれ変位の増大により、ずれ剛性は低下しない可能性が考えられる。

参考文献

- 1) 島 弘, 渡部誠二: 頭付きスタッドのせん断力—ずれ関係の定式化, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.935-947, 2008
- 2) 頭付スタッドの押抜き試験方法 (案), JSCC テクニカルレポート, No.35, (社) 日本鋼構造協会, pp.1-24, 1996
- 3) 赤尾新助, 栗田章光, 平城弘一: 頭付きスタッドの押抜き 挙動に及ぼすコンクリートの打込み方向の影響, 土木学会 論文集, 第 380 号/1-7, pp.311-320, 1987
- 4) 複合構造ずれ止めの抵抗機構の解明への挑戦, 土木学会 複合構造委員会, 複合構造レポート 10, 2014
- 5) 藤原良憲, 谷口望: 連続合成桁における床版コンクリートの施工時の桁挙動測定, 構造工学論文集 Vol.54A, 土木学会,

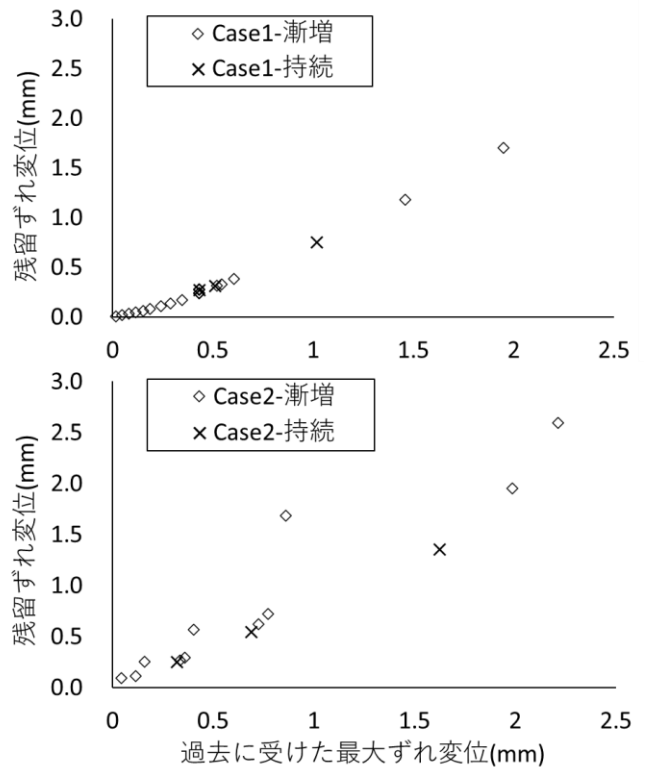


図-6 残留ずれ変位—過去に受けた最大ずれ変位関係

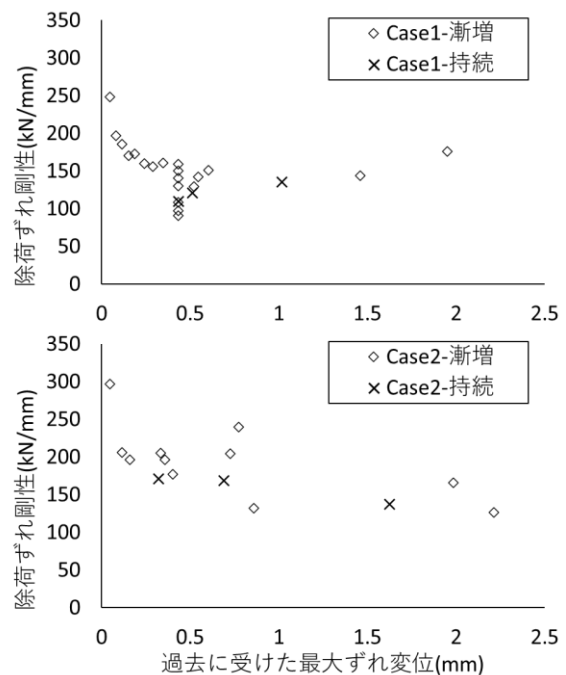


図-7 除荷ずれ剛性—過去に受けた最大ずれ変位関係

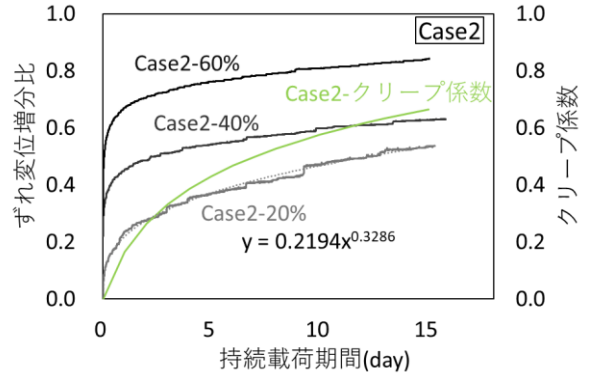
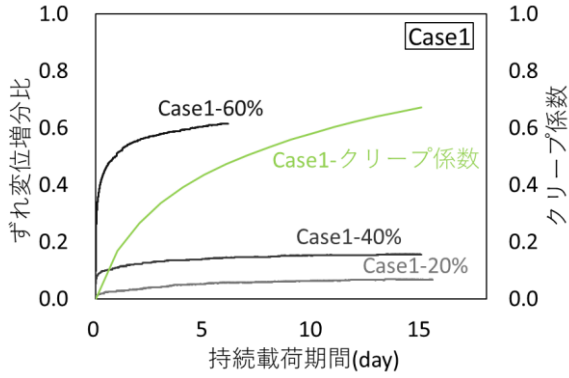
pp.860-870, 2008

- 6) 牧剛史, 渡辺遼, 張 鵬: 持続せん断力下における頭付きスタッド接合部の変形性状, 第 11 回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム 講演集, pp.52-60, 2015
- 7) 2014 年制定 複合構造標準示方書, 土木学会, 2014
- 8) 2017 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】, 土木学会, 2017

正誤表

図4：ずれ変位増分比およびクリープ係数の経時変化においてデータ整理に誤りがありましたので訂正させていただきます。なお、考察や検討において影響はありません。

【誤】



【正】

