

ステンレス鉄筋を補強材としたP C a埋設型枠の開発

日本コンクリート技術(株) 河野一徳

日本コンクリート技術(株) 篠田佳男

1. はじめに

P C a (プレキャスト)埋設型枠はコンクリート施工における型枠脱型作業を不要とし、省力化による急速施工を可能とした材料である。建設業界においては、作業員の高齢化や型枠大工などの熟練工不足に歯止めがかからない状況となっている。また、一方ではコンクリート構造物に対する耐久性や美観の向上も求められている。工場製品であるP C a埋設型枠は、上記のような課題を解決する機能を有する構造部材として期待を集め、開発・実用化が進められてきた。写真-1にP C a埋設型枠の適用事例を示す。



(a) 水力発電所の選択取水設備



(b) ハイピア



(c) 原子力発電所の放水路縦坑

写真-1 P C a埋設型枠の適用事例

既往のP C a埋設型枠は、基材モルタルを低水セメント化することにより高強度化・高耐久化が図られており、厚さは5cm程度が標準となっている。また、基材モルタルの補強材としては、ピニロンファイバーなどの短繊維が用いられている。補強効果の点から考えれば、鋼繊維を補強材とした方が効果的であるが、さびの発生など防食性に問題があり埋設型枠にはほとんど用いられていない。また、防食性の高いステンレスファイバーは、国内での製造が中止されて以降は使用実績がほとんどないのが現状である。したがって、既往のP C a埋設型枠は、コンクリート構造物のかぶりの一部として利用することは可能なものの、引張力を負担する構造とはなっておらず、構造性能を大きく高めるような効果は期待できない。このことは、工事費が高くなることと相まって、P C a埋設型枠の普及が期待されたほどは進んでいない要因のひとつとなっているものと考えられる。

上記の課題を解決する方法としては、鉄筋を補強材として使用する方法が挙げられる。すなわち、P C a埋設型枠を鉄筋コンクリート構造部材とすれば、ひび割れ発生後も構造的な連続性が保たれ、P C a埋設型枠を補強部材として使用することも可能となる。しかしながら、この方法では耐久性確保の必要性から鉄筋かぶりを大きくとる必要がある。したがって、P C a埋設型枠は厚肉の重い部材とせざるを得ず、現場でのハンドリングの面で不利となる。ただし、鉄筋として防食性の高いステンレス鉄筋を使用すればかぶり厚さを小さくでき、薄肉軽量化が可能となる。

以上のような考え方にもとづき、筆者等はステンレス鉄筋を補強材として使用したP C a埋設型

棒（SUS埋設型棒）の開発に取り組んでいる。まず、第1段階として、小型のパネルを対象とした基礎実験を通じて薄肉部材でも耐力や変形性能に優れ、鉄筋コンクリート方式での設計が可能なこと¹⁾を確認した。さらに、実構造物を模擬して小型パネルに鉄筋コンクリートを打ち継いだ合成梁試験体に対する曲げ試験を実施し、P C a埋設型棒間の接合部を重ね継手方式で構造的に一体化できること¹⁾を確認した。次に、第2段階として、実規模レベルの5cmの厚さの試験体を作製して曲げ試験を実施し、既往のP C a埋設型棒にはない耐荷性能および変形性能を有することを確認した。

本報告では、ステンレス鉄筋で補強したP C a埋設（以下、SUS埋設型棒と称す。）の開発を目的とした一連の構造実験の内容とSUS埋設型棒の実用化に向けた今後の展開について述べる。

2. ステンレス鉄筋について

ステンレス鉄筋は、優れた耐食性能を有しており海外では多くの使用事例がある。しかしながら、我が国においては、在来の炭素鋼の鉄筋に比べて価格が高いこともあり普及が進んでいないのが実情である。ただし、写真-2に示すように、ステンレス鉄筋に関しては、2008年3月にJIS規格化（JIS G 4322）がなされたこと、また、同年8月に土木学会から「ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針(案)」(以下、「設計施工指針」と称す。)³⁾が刊行されたことにより、普及拡大に向けての環境は整ったといえる。



写真-2 JIS規格および設計施工指針

ステンレス鉄筋は、ステンレス鋼から普通鉄筋と同様の形状を有するように熱間圧延によって製造されたものである。ここで、ステンレス鋼はクロムを重量比で10.5%以上含有した合金鋼であり、鋼材表面に形成されているクロムの薄い酸化被膜（不動態皮膜）により優れた耐食性が期待できる。ステンレス鋼には、要求される耐食性能、機械的性質等に応じて合金元素の種類と含有量が異なる多くの種類が規格化されているが、「設計施工指針」では、表-1に示すように、耐食性レベルの異なるステンレス鉄筋としてJIS G 4322に規定されるSUS304-SD、SUS316-1SDおよびSUS410-SDの3種類のステンレス鋼から製造されるステンレス鉄筋のみを対象としている。これらのステンレス鉄筋は、いずれもステンレス鋼として十分な実績を有する汎用性のある鋼種により製造され、かつ鉄筋としての性能も確認されているものである。

表-1 ステンレス鉄筋の種類

鋼種	材質	明細
SUS304-SD	オーステナイト系	ステンレス鋼として広く使用されるベース鋼種
SUS316-SD	オーステナイト系	モリブデン添加によりSUS304よりさらに耐食性を向上させた鋼種
SUS410-SD	フェライト系	合金量を抑えたクロム系鋼種

ステンレス鉄筋の高い防食性能について、「設計施工指針」に記載された表-2 の腐食限界発生塩化物イオン濃度とひび割れ幅の限界値を用いて示す。表-2 より、腐食限界発生塩化物イオン濃度の推奨値は、普通鉄筋の 1.2kg/m^3 に対して防食性が低い SUS410-SD の場合でも 9.0kg/m^3 と前者を大きく上回る数値を示している。また、SUS304-SD の腐食限界発生塩化物イオン濃度の推奨値は 15kg/m^3 であり、厳しい腐食性環境下にある飛沫帯（コンクリート表面の塩化物イオン濃度 $=15.0\text{kg/m}^3$ ）においてもステンレス鉄筋に腐食が生じる可能性は低いと考えられる。以上より、ひび割れ幅の限界値を SUS304-SD および SUS316-SD では 0.5mm としていることなど、事実上ステンレス鉄筋を用いた鉄筋コンクリート部材については、ひび割れ幅の照査は不要となる。言い換えれば、ステンレス鉄筋を用いると、鉄筋コンクリート部材の鉄筋のかぶりを普通鉄筋と比較して大幅に小さくすることができるため、部材の薄肉軽量化を実現できることとなる。このことは、P C a 埋設型枠のようにコンクリートの表面に用いられ、かつ軽量化がハンドリング性の向上の面で有利に作用する部材の要求性能に合致しているといえる。

表-2 ステンレス鉄筋の腐食発生限界イオン濃度の推奨値およびひび割れ幅の限界値

鋼種	腐食発生限界塩化物イオン濃度の推奨値	ひび割れ幅の限界値
SUS304-SD	15.0 kg/m^3	0.5mm
SUS316-SD	24.0 kg/m^3	0.5mm
SUS410-SD	9.0 kg/m^3	0.005c (mm) あるいは 0.5mmのいずれか小さい方の値
普通鉄筋	1.2 kg/m^3	0.0035c (mm)、c：かぶり ※特に厳しい腐食環境下の場合

3. 小型パネルを用いた予備試験

3.1 試験目的および概要

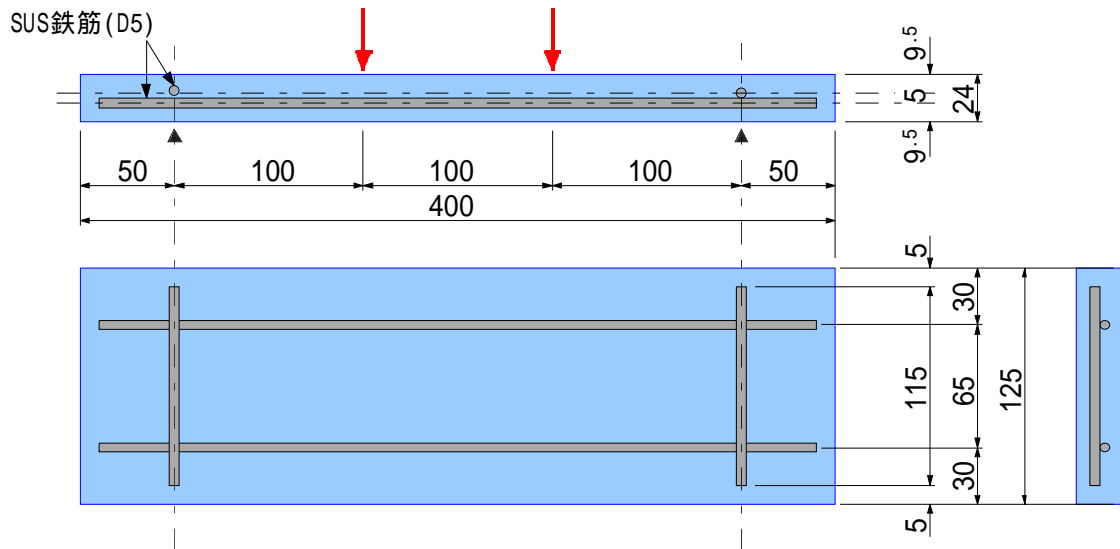
SUS 埋設型開発の基本コンセプトは、通常の埋設型枠に比べて耐力や変形性能が優れており、鉄筋コンクリート方式での設計が可能な理想的な埋設型枠を実現することにある。このことをふまえて、まず予備実験として小型パネルの曲げ試験を実施し、SUS 埋設型枠の基本性能を確認することとした。また、SUS 埋設型枠は、通常の埋設型枠と異なり、接合部においても重ね継手などを用いることで構造的な連続性を担保することが可能である。このことを検証するために、スパン中央部に接合部を有する小型パネルに鉄筋コンクリートを打ち継いで製作した合成梁試験体に対する曲げ試験を実施した。ここで、接合部には添え筋方式の重ね継手を設け、小型パネル間における引張力が添え筋により負担されることを確認した。以下で、各試験の内容および結果を示す。

3.2 小型パネルの曲げ試験

(1) 試験体

試験に用いた小型パネル試験体の形状寸法および配筋を図-1 に示す。試験体は、厚さ 24mm 、長さ 400mm を固定し、幅を 100mm 、 125mm および 150mm の 3 水準に変化させた。ステンレス鉄筋

は D5 を使用し，縦筋と横筋が断面中央部に位置するように配置することでかぶりを 7mm となるようにした．埋設型枠の基材モルタルは，水セメント比 30% とし，その圧縮強度は試験材齢時において 87.9N/mm^2 であった．



試験体の幅は 100mm，125mm，150mm の 3 水準

図-1 小型パネル試験体の形状寸法および配筋

(2) 試験方法および結果

曲げ試験は，写真-3 に示すようにせん断スパンと等モーメント区間がそれぞれ 100mm の 3 等分点載荷とした．表-3 に断面の幅を変化させた 3 体のパネルの試験結果を示す．ひび割れ発生強度は $4.56 \sim 4.71\text{N/mm}^2$ であった．また，終局荷重は 5.51 ~ 6.24kN で，計算値との比が 1.04 ~ 1.16 と比較的良い一致を示している．ここで，計算値の算定は，曲げモーメントに対する断面耐力を等価応力ブロックを用いて算定する方法で行った．



写真-3 載荷状況

表-3 試験結果一覧表（小型パネル試験）

試験体幅 (w)	ひび割れ発生		終局荷重(kN)	
	荷重 (kN)	応力 (N/mm^2)	実測値	計算値
W=100mm	0.88	4.56	5.80	5.21
W=125mm	1.20	4.99	5.51	5.32
W=150mm	1.36	4.71	6.24	5.40

図-2 に幅 100mm のパネルの載荷試験において得られた荷重とパネル中央変位の関係を示す．また，全断面有効と仮定した場合と，ひび割れ発生後における RC 断面と仮定した場合の計算値をあわせて図-2 に示す．曲げひび割れの発生荷重は 0.88kN (引張応力 4.56N/mm^2) であった．曲げひび割れの発生後，パネルは剛性を低下させながらも荷重が徐々に増加する変形性能に優れた挙動を示している．パネルの挙動は，ひび割れ発生までは全断面有効と仮定した場合の計算値と一致し，そ

の後は RC 断面と仮定した場合の計算値に向かって荷重の増加に対する変形が大きくなっていく。以上のように、耐力および変形性能から、パネルが鉄筋コンクリートとしての構造性能を有することが確認された。すなわち、厚さが 24mm と薄肉のモルタル製パネルでも、内部に鉄筋を配置することで鉄筋コンクリートと同様の構造性能を有することを期待してよいことが確認された。

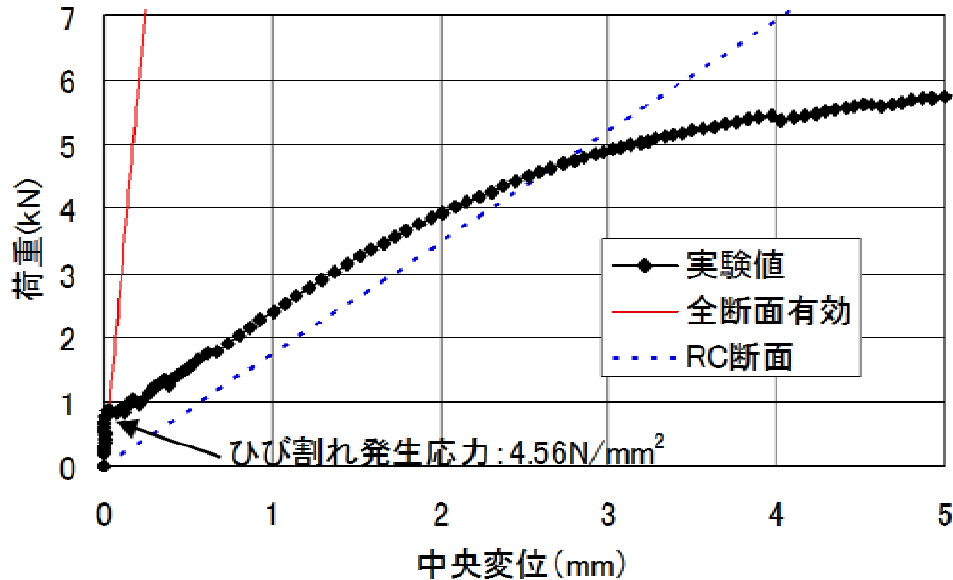


図-2 荷重と載荷スパン中央のたわみの関係

3.3 合成梁の曲げ試験

(1) 試験体

梁試験は、表-4 および図-3 に示すように、基準試験体 BS とスパン中央部の SUS 埋設型枠の接合部に添え筋を配置した B-SUSD5 および B-SUSD6 の 3 体の試験体を使用して実施した。ここで、添え筋は長さ 300mm で一定とした。基準試験体 BS の形状寸法は、断面が 125mm×200mm で長さ 1,800mm である。また、SUS 埋設型枠は厚さ 30mm とし、図-3 に示すように、基準試験体 BS の下面に中央 2 分割で 2 枚設置した。そして、SUS 埋設型枠の上部には、型枠内の鉄筋位置と一致するように添え筋を配置した。コンクリートは、骨材の最大寸法が 20mm で、圧縮強度 34.1N/mm² のものを使用した。また、鉄筋は表-5 に示す機械的性質のものを使用した。

表-4 合成梁試験体一覧表

No	試験体	試験体仕様
1	BS	基準試験体（断面 125mm×200mm の鉄筋コンクリート梁）
2	B-SUSD5	BS 下面に SUS 埋設型枠，接合部に添え筋（D5）長さ 300mm
3	B-SUSD6	BS 下面に SUS 埋設型枠，接合部に添え筋（D6）長さ 300mm

表-5 鉄筋の機械的性質

鉄筋の種類	鉄筋径	降伏強度(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)
SUS304-SD	D5	455	706
	D6	376	654
異形棒鋼	D13	379	468

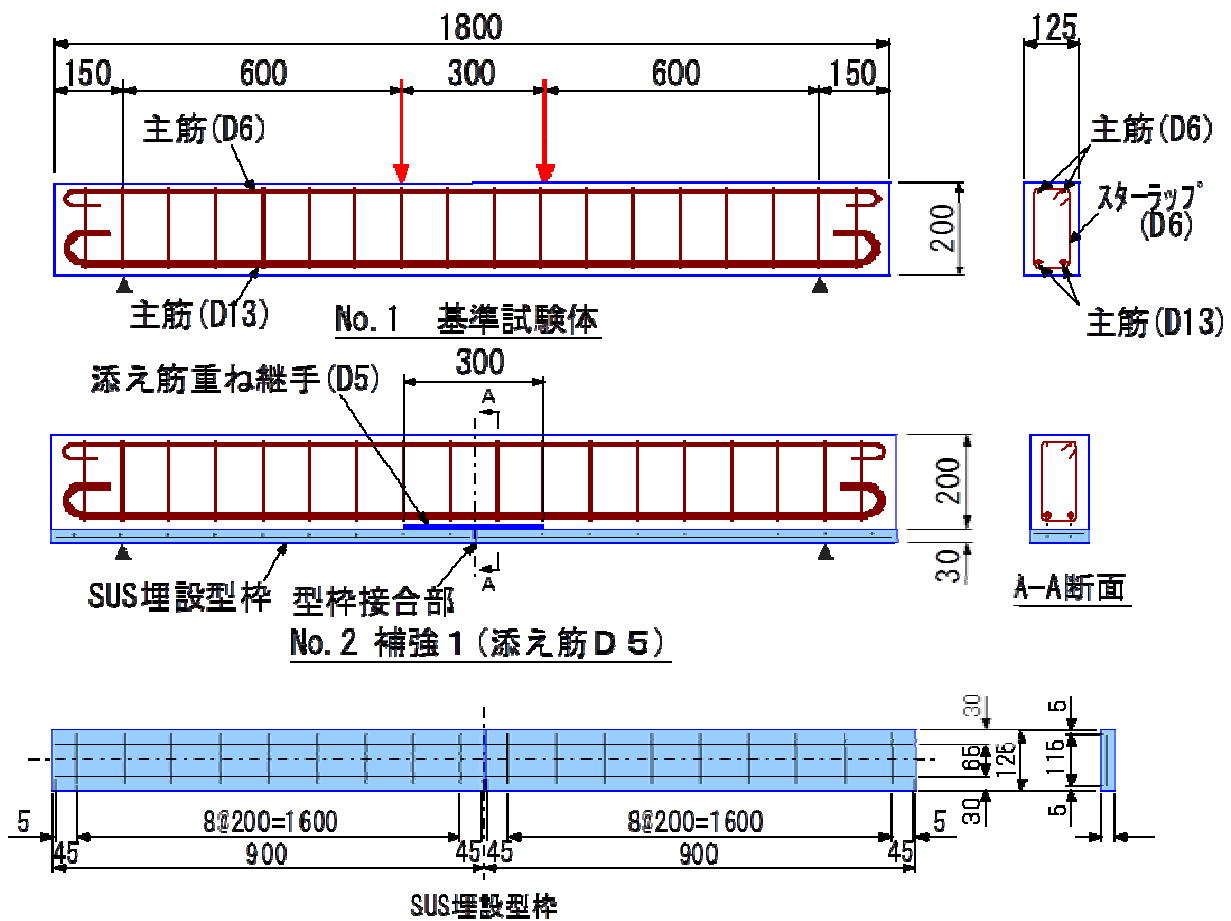


図-3 合成梁試験体の構造および配筋

(2) 試験方法および結果

荷重試験は、写真-4 に示すように、せん断スパンが 600mm で等モーメント区間を 300mm とした 2 点集中荷重で行った。

梁試験の結果を表-6 に示す。ひび割れ発生荷重は 10.2 ~ 15.0kN で、引張縁の応力度が 2.77 ~ 4.08N/mm² であった。また、終局荷重は SUS 埋設型枠を設置した試験体が大きく、特に D6 の添え筋使用の場合が BS に比べて 1.2 倍以上となっている。さらに、実測値と計算値の良い一致が認められる。



写真-4 荷重状況

表-6 試験結果一覧表 (合成梁試験)

試験体	ひび割れ発生		終局荷重(kN)	
	荷重 (kN)	応力 (N/mm ²)	実測値	計算値
BS	10.3	3.69	62.9	60.9
B-SUSD5	10.2	2.77	70.3	69.4
B-SUSD6	15.0	4.08	75.9	73.1

図-4 は荷重荷重と中央部における変位の関係を示したものである。基準試験体 BS と合成梁試験体 (B-SUSD5 および B-SUSD6) の挙動の比較により、SUS 埋設型枠が耐荷性能向上に寄与し、添え筋を配置した 2 試験体ともに主鉄筋の降伏以降の挙動が確認されている。なお、主鉄筋が降伏し変形が増すと、継手部の付着応力が増大して重ね継手破壊が生じる。今回の実験は添え筋の長さが 300mm で重ね継手長を 150mm と 30 以下としたが、重ね継手破壊は主鉄筋降伏変位 y の 2 倍以上の変位で生じた。このことは、継手部に横方向鉄筋の配置などの補強を実施することで、十分な耐荷力が確保できることを意味する。なお、SUS 埋設型枠は、重ね継手破壊を生じるまで梁部材と一体化していたことも確認された。

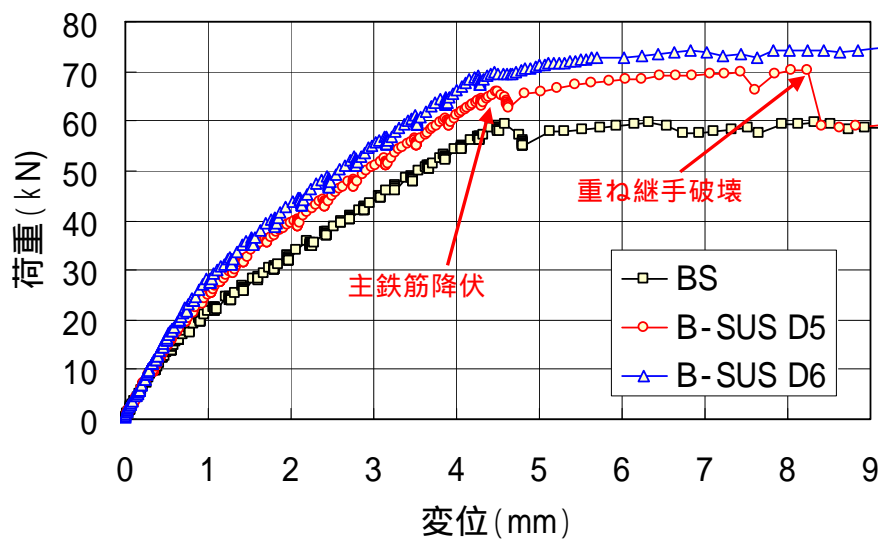


図-4 荷重とスパン中央変位の関係 (梁試験)

3.4 まとめ

小型パネルの曲げ試験結果より、SUS 埋設型枠は鉄筋コンクリート方式で設計できることが明らかとなった。また、合成梁の曲げ試験結果より、SUS 埋設型枠は接合面においても重ね継手が引張力を負担することで構造的な一体性が確保できることが確認された。以上より、SUS 埋設型枠の補強部材への適用など、実用化に向けた新たな展開を検討することとした。

4. 実規模パネルを用いた構造性能の検証

4.1 試験の目的および概要

SUS 埋設型枠はステンレス鉄筋を補強材として使用することにより、既往の P C a 埋設型枠の機能向上による適用範囲の拡大を可能とした型枠として位置づけられる。このことをふまえて、SUS 埋設型枠の実用段階へのステップアップに向けた、実規模レベルの厚さを有するパネル試験体を用いた曲げ試験を実施した。

4.2 試験体

図-1 に実規模パネル試験体の形状寸法と配筋を示す。試験体は厚さを既往の P C a 埋設型枠の標準的な厚さである 5cm とし、幅 30cm、長さ 120cm とした。補強材であるステンレス鉄筋は、SUS304-D10 を 10cm 間隔で 3 本配置した。ここで、鉄筋位置は軸方向鉄筋と横断方向鉄筋の交差位置がパネル断

面の中心となるようにした。したがって鉄筋のかぶり厚は 15mm となる。表-7 にステンレス鉄筋の機械的性質を示す。また、基材モルタルは小型パネル試験と同じく W/C=30% の高強度のものをを用いた。表-8 に基材モルタルの配合、表-9 に基材モルタルの強度試験結果をそれぞれ示す。

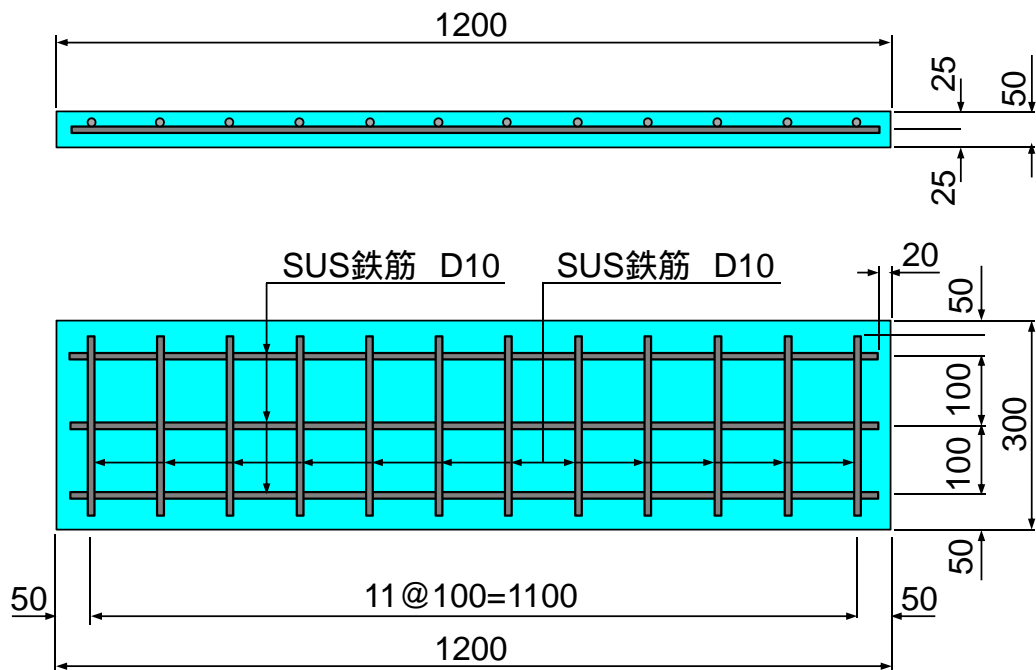


図-5 試験体の形状寸法および配筋（実規模パネル試験）

表-7 ステンレス鉄筋の機械的性質

ヤング係数 (N/mm ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
202,000	363	695	50

表-8 基材モルタルの配合表

配合条件		単位量 (kg/m ³)			
フロー値(mm)	水セメント比 (%)	セメント	水	細骨材	混和剤
250 ± 20	30	700	210	1404	8.40

表-9 基材モルタルの強度試験結果

フロー値 (mm)	空気量 (%)	強度 (N/mm ²) [材齢 14 日]	
		圧縮強度	曲げ強度
268 × 263	3.1	89.1	11.3

4.3 荷重方法および計測項目

試験体への荷重は、写真-5に示すように中央部の等モーメント区間と両端部のせん断スパンを各300mmとした3等分点荷重方式で行った。荷重手順は、まず、ひび割れの発生を確認するまで荷重した後、いったん除荷した。そして再び荷重を行い、荷重～変位関係にもとづいて鉄筋の降伏を確認した後、そのまま荷重を続けた。なお、計測項目は、荷重荷重、スパン中央部におけるたわみ変位量、等モーメント区間の引張縁におけるひび割れ幅、等モーメント区間の圧縮縁におけるコンクリートひずみとした。



写真-5 荷重状況（実規模パネル試験）

4.4 試験結果および考察

図-6に荷重荷重と試験体中央部のたわみ量の関係を示す。ひび割れは4kN荷重時に発生した。また、主鉄筋は13kN荷重時に降伏したものと推察される。ただし、主鉄筋降伏後も荷重は徐々に増加していくことが図-6よりわかる。写真-6に示すように、装置の限界まで荷重を行った段階においても、試験体には圧縮縁のコンクリートが圧壊して終局破壊が生じる兆候は見られなかった。

図-7に荷重と圧縮縁におけるコンクリートひずみの関係を示す。ひずみは鉄筋降伏以降もほぼ荷重に対して線形的に増加していくことがわかる。また、写真-7に試験体の底面におけるひび割れの発生状況を示す。ひび割れは等モーメント区間に10cm程度の間隔で7本発生していた。以上より、試験体は薄肉平面パネルに特有のじん性に富んだ変形挙動を示したものと考えられる。

表-10にひび割れ発生荷重、主鉄筋の降伏荷重および終局荷重の実験値と計算値の比較を示す。ただし、終局荷重については荷重を終了した時点での荷重を示す。実験値と計算値がほぼ一致することから、ステンレス鉄筋で補強した埋設型枠は、実用レベルの大きさとした場合でも鉄筋コンクリート方式により耐力を算定することが可能なことが確認された。既往のスチールやビニロンなどの短繊維を補強材とした埋設型枠は、ひび割れが発生した段階で終局状態となることを考慮すれば、SUS埋設型枠は補強材としても十分な耐力及び変形性能を有することが確認された。

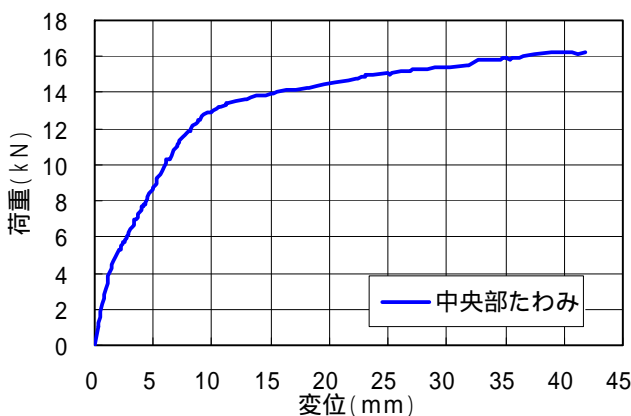


図-6 荷重とスパン中央変位の関係

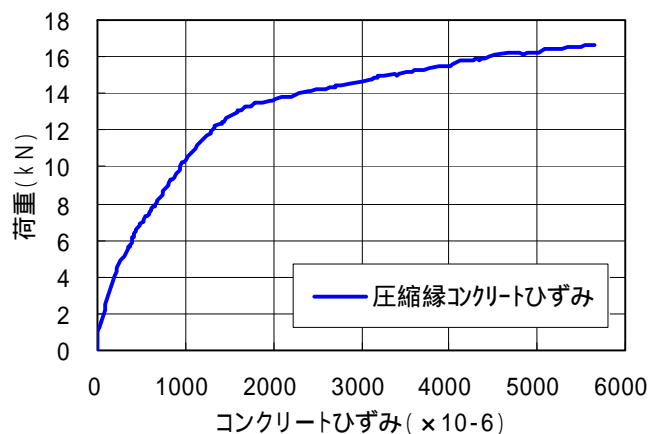


図-7 荷重とコンクリートひずみの関係



写真-6 供試体の載荷終了時の変形状況



写真-7 ひび割れの分散状況

表-10 試験結果一覧表

ひび割れ発生荷重	鉄筋降伏荷重	終局荷重
5.0 [6.6]	13.0 [13.4]	14.6 以上 [14.4]

単位：kN，[]内は計算値を示す

5. 今後の展開について

小型パネルから実規模パネルを用いた一連の実験より，ステンレス鉄筋で補強したP C a埋設型枠は，通常の埋設型枠の概念を超えた耐荷力と変形性能を示し，かつ既往の鉄筋コンクリートと同様な設計法が適用できることなど従来の埋設型枠にはなかったメリットを有することが確認された。

P C a埋設型枠を補強工事に適用する場合は，補強材は鉄筋のような連続した材料とすることが望ましい。しかしながら，P C a埋設型枠のような薄肉部材を鉄筋により補強する場合は，鉄筋かぶり小さくなるため，耐久性確保の面からはマイナス要因となる。今回報告したように，耐食性が高いステンレス鉄筋を補強材として使用することで，上記のような問題の解決が可能となる。

今後の展開としては，以下の2つのタイプの埋設型枠を実施工への適用を考えている。

従来の埋設型枠と同様の使用方法。ただし，鉄筋コンクリート方式で設計できるメリットを活かし，耐震補強工事などの補強用構造部材への適用範囲を拡大する。

補強材としてD5（あるいはD6）のような細径の鉄筋を使用することで徹底的な薄肉化を図り，加工性やハンドリング性を向上させることで，合板型枠と同じ使用方法とする。

今後はSUS埋設型枠をP C a製品メーカーの協力を得て，新設構造物のみならず，補修・補強工事への適用を推進することにより，普及拡大に努めていく所存である。

謝辞 実験の計画ならびに実施にあたっては，早稲田大学創造理工学部の清宮理教授より懇切丁寧なるご指導をいただいた。試験体に使用したステンレス鉄筋については，大同特殊鋼(株)および愛知製鋼(株)より提供を受けた。また，実規模試験の試験体作製については東栄コンクリート工業(株)の協力を得た。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 篠田佳男，清宮理，河野一徳，佃有射：ステンレス鉄筋使用埋設型枠の耐荷性能に関する基礎的研究，土木学会第65回年次学術講演会，V-651，pp.1301-1302,2010年9月
- 2) 河野一徳，篠田佳男，安同祥，清宮理：ステンレス鉄筋を補強材としたP C a埋設型枠の開発，土木学会第66回年次学術講演会，V-458，pp.915-916,2011年9月
- 3) 土木学会：ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針(案)，2008年9月