

V-8

鋼コンクリートオープンサンドイッチスラブの押抜きせん断破壊機構について

○北海道大学大学院 学生員 高橋 良輔

北海道大学大学院 正 員 古内 仁

北海道大学大学院 正 員 上田 多門

1. はじめに

鋼コンクリート合成床版、いわゆるサンドイッチスラブは、鉄筋コンクリート床版(以下RCスラブ)に比べ同じ鉄筋比で床版厚を薄くでき、また現場での省力化や施工性、耐候性の良さから海洋構造物だけでなく橋梁上部工、フーチングなど、さまざまな構造物において使われている。鋼コンクリート合成床版のメリットを活かし床版厚を薄くすると、局所的に大きな荷重を受けた場合、スラブがコーン状に押し抜かれる押抜きせん断破壊をより起こしやすくなると考えられる。しかしRCスラブに比べ、鋼コンクリート合成床版の押抜きせん断破壊については不明な点がまだ非常に多い。本研究では押抜きせん断破壊における破壊性状からその破壊機構を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 実験供試体

この実験に用いた供試体は、ずれ止めにスタッドを用いた長方形ロビンソンスラブである。供試体総数は5体で、それらの諸元をTable. 1に、供試体図をFig. 1に示す。用いた鋼板の種類は全部で2.3mm, 4.5mm, 9mm, 16mmの4種類で、供試体は鋼板の厚さのみを変えた。鋼板に働く応力を測定するため、Fig. 1に示す各点にひずみゲージを貼った。主応力方向がわかっていると支間方向に1軸ゲージ、幅方向に2軸ゲージ、また斜め方向には主応力方向が特定し難いとして、3軸ロゼットゲージを用いた。また、Fig. 2には使用したスタッドの形状寸法を記した。スタッドの種類はS1, 2およびS5とS3, 4で異なり、S1, 2, 5には溶接スタッドを用い、S

Table.1 Specimen Properties

Specimen	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5
Thickness of plate(mm)	16.0	9.0	4.5	2.3	16.0
Effective depth(mm)	175				
Tension plate ratio(%)	9.1	5.1	2.6	1.3	9.1
f'_c (MPa)	26.5	26.4	18.5	22.2	28.4
f_y (MPa)	300	284	284	250	300
Stud type	Weld	Weld	Bolt	Bolt	Weld

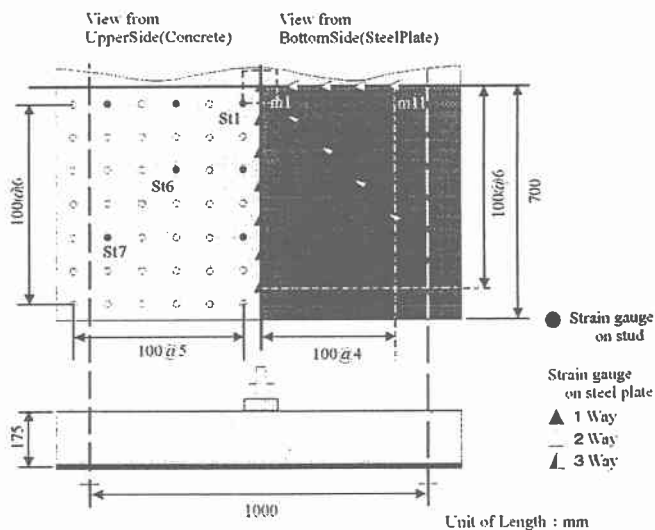


Fig.1 Specimen Size and Location of Strain gauges

Punching shear failure mechanism for open-sandwich slabs

By Ryosuke Takahashi, Hitoshi Furuuchi and Tamon Ueda

3, 4には薄い鋼板への溶接が非常に困難なため、ボルト締めスタッドを用いた。ボルト締めスタッドについては“あそび”内でのずれが実験結果に影響しないように前もって実験で調べたトルク値で締めている。スタッドの配置についてはFig. 1のとおりである。また、スタッドに働く水平方向の荷重の度合いを見るためにいくつかのスタッドにひずみゲージを貼った(Fig. 2参照)。スタッドに貼ったゲージの位置は、鋼板から2cmの高さである。施工時に型枠として機能するように鋼板に側板を設けているが、実験時には端部でのずれ止めとして機能して実験結果に影響を与える恐れがあると考え、供試体S2～S5については厚さ4mmのスチロール製のシートを2枚重ねて側板の内側に張りつけ、側板に応力を伝えないようにした。しかしその後、S1とS5とのひずみ等の比較の結果、側板の影響はないと判断できたので以降では全ての供試体について同様に議論する。尚、S5供試体については変位が計測できなかった。

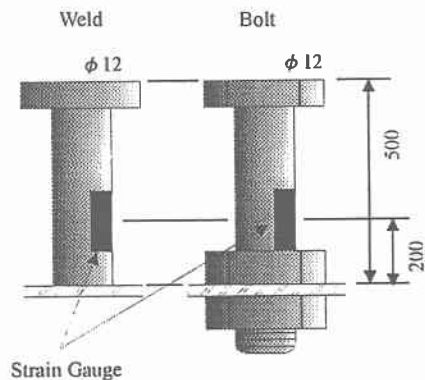


Fig.2 Size and Shape of Stud

2. 2 実験方法

載荷方法は静的載荷で荷重は床版の中央部に10cm×10cmの正方形鋼板を介して作用させた。また、支持条件はFig. 1に示すように相対する2辺を支持、他の2辺が自由で、載荷中における支持端部でのスラブの浮き上がりを自由としている。

2. 3 ひび割れ観察方法

供試体S1～S4では押抜きせん断破壊後も荷重の増加が観察できたために、荷重減少が認められるまで載荷を続けた。結局、荷重の減少はなかなか認められず、最終的にスラブの側面に水平ひび割れが入ったためそこで実験を終了した。このために、供試体S1～S4では押抜きせん断破壊のみによるひび割れ性状は観察できなかった。そこで、供試体S5では押抜きせん断破壊による荷重減少が認められたところで実験を終了し、押抜きせん断破壊のみによるひび割れ性状が観察できるようにした。ひび割れ観察は実験終了後、供試体を支間方向に、スラブ中央からそれぞれ、0, 10, 20, 30cmの位置でカットし、コンクリートをはつてカット面に現れている幅方向のひび割れを順次観察した。また、支間方向のひび割れについては側板があるために、今回観察することはできなかった。

3. 実験結果

この実験で得られた結果をTable. 2に示す。表中の P_{test} は破壊荷重で、 P_{test} はコンクリート圧縮強度 f_c のばらつき(18.6 MPa～26.2 MPa)を考慮し、 $\sqrt{25}f_c$ を乗じてコンクリート圧縮強度 25.0 MPa に換算した値である。また P_{cal} は、

Table.2 Experimental Result

Specimen	S1	S2	S3	S4	S5
P_{test}	440	423	297	310	530
P'_{test}	428	412	346	329	497
P_{cal}	581	581	530	424	581
P_{test}/P_{cal}	0.74	0.71	0.65	0.78	0.86

(kN except P_{test}/P_{cal})

P_{con} は、Eq. 1に示すコンクリート標準示方書の面材の押抜きせん断耐力式¹⁾(以下、示方書式)を用いて計算した計算値である。この式はRCスラブを対象にしたものであるが、RCスラブとの比較のために用いている。実験で用いた供試体は5体全て押抜きせん断破壊であった。実験値は示方書式に比べ70 %前後減少している。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d / r_b$$

$$f_{pcd} = 0.19 \sqrt{f_{cd}} \quad \beta_r = 1 + 1 / (1 + 0.25u / d) \quad f_{cd} : \text{Compressive Strength of concrete}$$

$$\beta_d = \sqrt[3]{100d} \quad \text{If } \beta_p > 1.5 \text{ then } \beta_p = 1.5$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p} \quad \text{If } \beta_d > 1.5 \text{ then } \beta_d = 1.5 \quad u : \text{Perimeter of loading area}$$

$$u_p : \text{Perimeter of design section} \quad r_b : \text{Member factor } (= 1.0)$$

Eq.1

4. 考察

4.1 ひずみ挙動

Fig. 3は鋼板裏側のひずみと載荷荷重の関係、Fig. 4はスタッドのひずみと載荷荷重の関係をグラフにしたものである。Fig. 3から鋼板では、ある荷重付近で載荷点下にあたる中央部やそれに近い部分では引張力が働き、逆に遠方では圧縮力が働くといったひずみ挙動の変化が起きることがわかる。これは、挙動の変化がほんの一時期であることからある荷重レベルで鋼板に急激に大きな力が働き、その結果鋼板がS字状にた

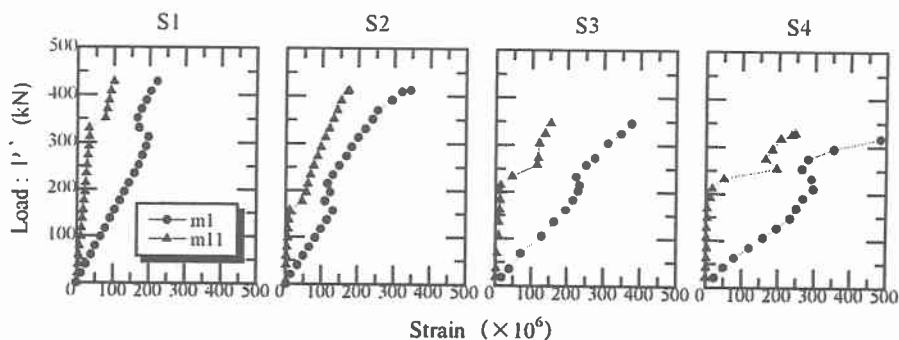


Fig.3 Relationship between load and strain of steel plate

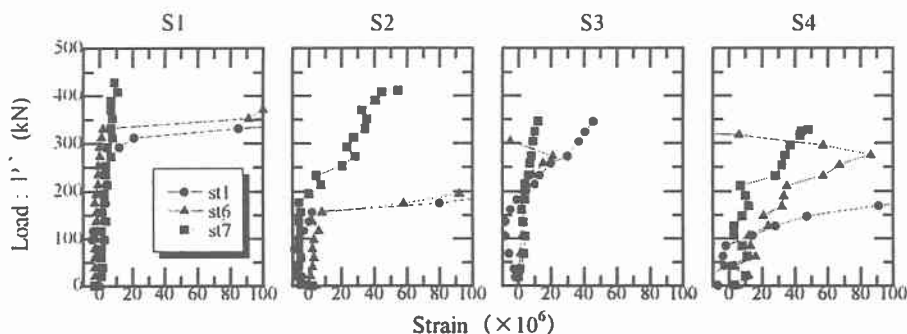


Fig.4 Relationship between load and strain of stud

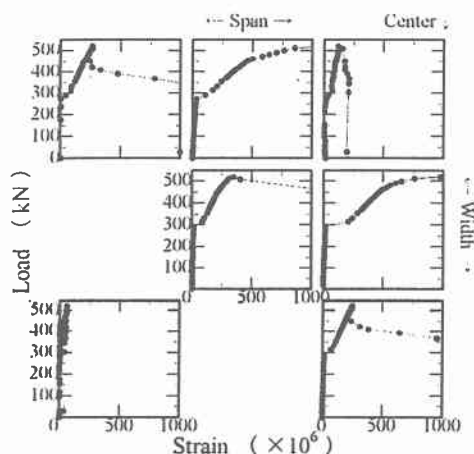


Fig.5 (a)

Relationship between load and strain
of stud at S5

わんだためと推測される。スタッドにおけるひずみは溶接とボルトで多少挙動の違いはあるものの、ある荷重付近に至ると載荷部から離れた2点を除き、一斉に大きく荷重がかかっている。またS4を除く3体ではこの現象が起こる荷重レベルが、た鋼板のひずみの変化する荷重レベルにほぼ一致している。これは、スラブの中で一斉に状態の変化、おそらくは大きなコンクリートのひび割れが発生したことによるものと思われ、それによる応力伝達状態の変化により鋼板がS字状にたわむものと考えられる。ひとつの供試体内のひずみにどのような特徴があるのかを見るためにFig.5aとFig.5bにS5における各位置での鋼板およびスタッドひずみを示した。図では各位置の違いにおけるひずみ挙動の違いをわかりやすくするために、ひずみグラフをスラブ内と相対的に同じ位置に配した。鋼板ひずみ、スタッドひずみ共に挙動形状がスラブの対角軸対象の位置において等しくなっている。つまり、ひび割れ面は対角軸において対象に広がっていると推測できる。

4.2 ひずみ分布

今回の実験は2辺支持であるため、スラブを梁と見なしして諸数値を計算できる。そこで、梁と見なした計算によるスラブの鋼板のひずみ分布と実験によ

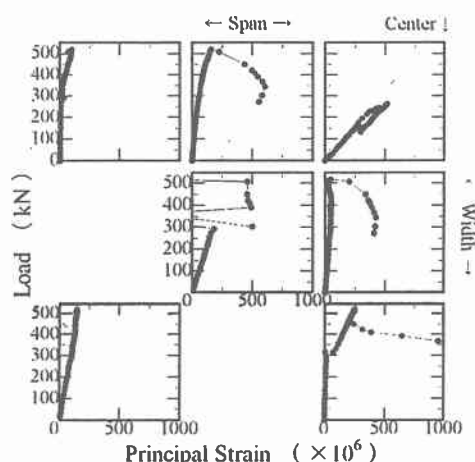


Fig.5 (b)

Relationship between load and strain
of steel plate at S5

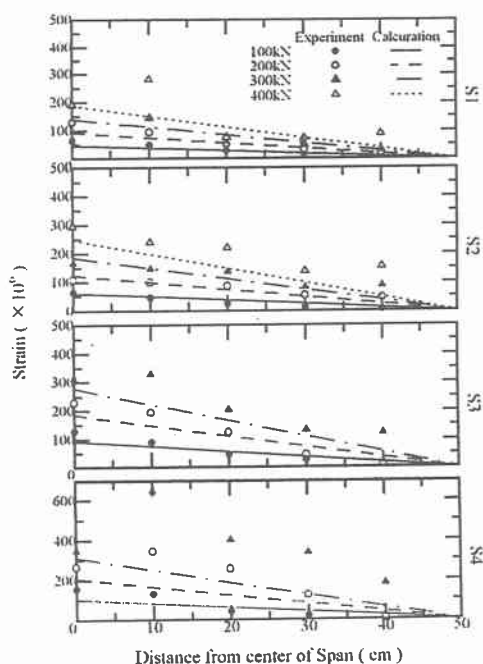


Fig.6 Distribution of strain in span direction

て得られたひずみ分布とを比較した。ここで、スラブは全断面有効とし、支間方向のひずみ分布について計算した。Fig. 6 にその結果を示す。どの供試体も載荷初期の段階では計算値に近い値をとっているが、載荷が進むにつれ徐々に計算値から離れ出す。傾向としては、どの供試体も載荷点下の鋼板でひずみは計算値より小さい値を取り、その傾向は破壊が進むにつれ大きくなる。特に鋼材比の低い供試体 S 4 においては、他の3体が載荷点下と支点以外では比較的計算値に近い値を示すのに対し、載荷点下だけでなく他の位置でも計算値より大きな値を取る。これは、鋼材比の低いものになるとコンクリートのひび割れによる断面欠損の影響が大きく出るためだと思われる。鋼材比の低いものについてはこの議論は適用できない。また、支点付近では計算値より大きい値を取り支点付近も分布形状がフラットに近くなる。これにより、最下部底面の応力が減少し、その周辺の応力が増加することがわかり、鋼板の S 字状の変形が確認できる。また、2 辺支持 RC スラブの曲げ問題では部材幅方向において載荷位置からある程度までしか応力が働かないために有効幅という概念が導入されるが、今回のオープンサンドイッチスラブにおいては全幅での計算値に近い値を示し、今後の研究でスラブの曲げに対する有効幅がオープンサンドイッチスラブにおいて適応できるかどうか確認する必要がある。

4. 3 ひび割れ性状

Fig. 7 に本実験で得られた、ひび割れ性状を示す。ひびわれ面は RC スラブに似ており、載荷面からコーン上に伸びて鋼板に至っている。この図を元にひび割れの高さ別による位置をプロットしたものが Fig. 8 である。これと Fig. 5b を比較すると、スタッドの高さは 5cm であるから、S 5-6, 8 はスタッドの頭以上にひび割れが入っており、S 5-5, 9, 10 はひび割れがスタッドを斜めに横切って入っていることがわかる。スタッドはスラブ中で水平せん断力に抵抗しているが、ひび割れ面が横切るスタッドは、ひび割れによってスラブ本体からほとんど切り離されたコアコンクリートを結合する形になるため、載荷荷重によってコアコンクリートとスラブ本体が離れるのに抵抗する軸力がさらに発生すると考えられる (Fig. 9)。4. 1-Fig. 5 において、中心から約 15cm の位置におけるスタッドひずみが増減率がより大きく傾きが緩やかであり 25cm 付近では 15cm 付近に比べ変化率が小さいといった現象が見られるが、25cm 付近のスタッドはひび割れ面

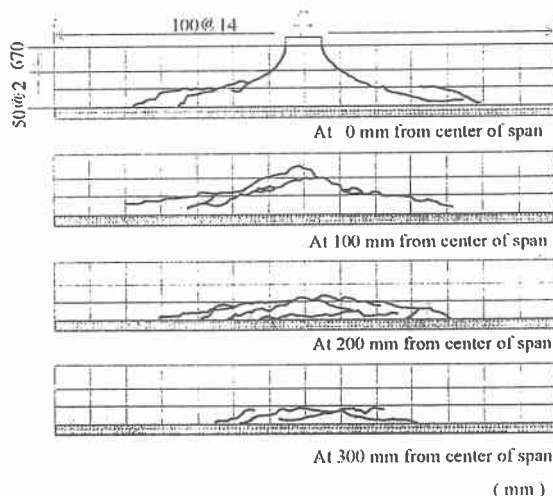


Fig.7 Crack pattern of punching shear failure

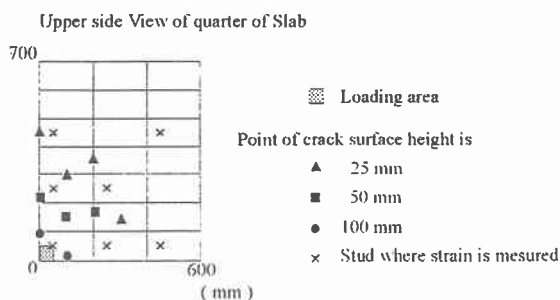


Fig.8 Contour of crack surface

を横切っており、水平力のみが作用するS 5-6, 8 に比べ軸力が発生している分、ひずみの変化の割合が小さくなっていると推論できる。以上のことから押抜きせん断破壊進行下におけるスタッドには、水平力が卓越、軸方向力が卓越、ほとんど力を受けない、の3種類の状態が考えられる（これからFEMでの使用考をえた場合、これらの影響を考慮すべきである）。しかし、今回の実験ではスタッドのひずみ測定は水平力の指標としか考えておらず、片側のひずみしか測定できていないためにこれ以上の考察は進められなかった。

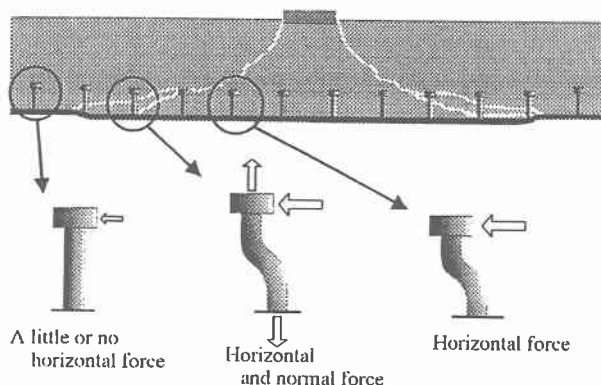


Fig.9 Resisting of stud under punching shear failure

4. 4 破壊機構に関する考察

以上の考察から考えられる、オープンサンドイッチスラブの押抜きせん断破壊機構について Fig. 9 にまとめた。

スラブは初め全幅有効な梁のように挙動する。ある荷重レベルで一斉に大きなせん断ひび割れがスラブ内に発生し、ピラミッド状のひび割れ面ができ、鋼板がS字状にたわむ。

それから、このひび割れによってできたピラミッド状のコアコンクリートと、スラブ本体、鋼板、3つの状態のスタッドによる複雑な荷重伝達状態になり、その後押抜き破壊に至る。

以上が、本研究から推測される破壊機構であるが、オープンサンドイッチスラブの押抜きせん断破壊の破壊機構を解明するためにはスタッドの状態、せん断ひび割れ後の荷重伝達機構の解明などまだまだ多くの未知の部分があり、今後さらなる研究が必要とされる。

5. まとめ

本研究においてわかった事を以下に示す。

- ・オープンサンドイッチスラブの押抜きせん断破壊によるひび割れ面は載荷面からコーン状に広がり鋼板に至る。
- ・スタッドは初め水平力のみかかっているが、ひび割れ発生後はスタッドに対するひび割れの位置により水平力のみ受ける場合と水平力と軸力とを複合的に受ける場合との2種類の状態が存在する。
- ・ひび割れが一斉に入る載荷レベルが存在する。
- ・2辺支持スラブでは、ひび割れ発生以前で、ひずみ分布は梁に近い値を示す。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[平成8年版]設計編。