

(8) 有限要素解析による鋼コンクリートオープンサンドイッチスラブの 押抜きせん断破壊性状に関する考察

Study on punching shear failure mechanism of Open-sandwich slab with Finite Element Method

高橋良輔*¹, 上田多門*², 佐藤靖彦*³, 今野克幸*⁴, Ahmed Sabry Farghaly*¹

Ryosuke Takahashi, Tamon Ueda, Yasuhiko Sato, Katsuyuki Konno, Ahmed Sabry Farghaly

*¹ 北海道大学大学院 工学研究科複合構造工学分野(〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

*² 北海道大学大学院助教授

同上

*³ 北海道大学大学院助手

同上

*⁴ 北海道工業大学講師 工学部土木工学科(〒006-8585 札幌市手稲区前田 7 条 15 丁目 4 番 1 号)

There are not so many analytical studies on the mechanism of punching shear failure, especially of open-sandwich slab. Analysis with 3D non-linear finite element method, which can make us to see easily stress and strain in slab was conducted, so that punching shear mechanism can be understood more clearly. Although it is still a primitive stage, some 札幌市手稲区前田 7 条 15 丁目 4 番 1 号 findings are presented comparing experimental values with analytical values.

Keywords : 3D non-linear finite element method, Open-sandwich slab, Punching shear failure

1. はじめに

鋼コンクリートオープンサンドイッチスラブは、施工の容易さ、対候性の良さ、経済性の高さから橋梁床版やフーチング、港湾構造物など多くに適用されている複合構造物である。床版に局部的に大きな荷重がかかった場合、床版がコーン状に押し抜けるというきわめて脆性的な破壊を起こす。これが押抜きせん断破壊であるが、港湾構造物などにも多く採用されているオープンサンドイッチスラブは、重機や船舶の衝突など押抜きせん断破壊を引き起こす可能性のある要因も多い。しかし、現状ではオープンサンドイッチスラブの押抜きせん断破壊に関する研究は少なく、そのメカニズムを解明するには至っておらず、未だ合理的な設計手法等も確立されていない。そこで、本研究では新たに開発した 3 次元非線形有限要素解析プログラムを用いて解析実験を行い、実験値と比較することによってその適用性を示し、解析結果からオープンサンドイッチスラブの押抜きせん断破壊メカニズムを明らかにする事を目的とした。

2. 解析概要

2. 1 実験供試体

解析にあたって、比較に用いた実験について述べる。

実験はオープンサンドイッチスラブを用いた静的載荷試験で、支持は 2 辺支持で隅部での浮き上がりを自由としている。実験供試体の諸元を Table.1、形状寸法を Fig.1 にそれぞれ示す。

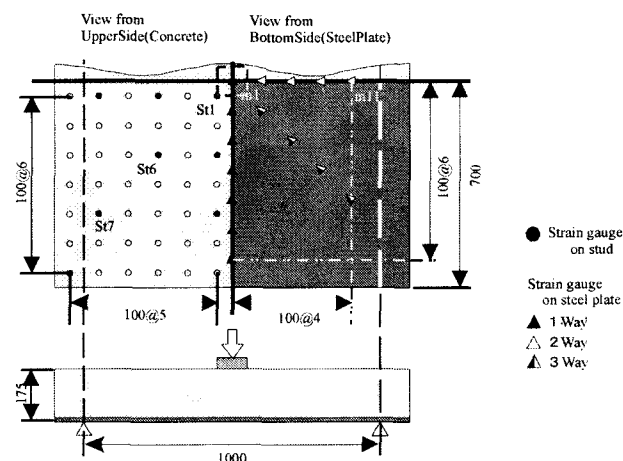


Fig.1 Specimen Size and Location of Strain gauges

Table.1 Specimen Properties

	S1	S2	S3	S4	S5
Thickness of plate (mm)	16	9	4.5	2.3	16
Effective depth (mm)	175				
f _c (MPa)	26.5	26.4	18.5	22.2	22.2
f _y (MPa)	300	284	284	250	250

実験供試体は全4種類、5体で、4種類の供試体は実験パラメータとして、有効高さを一定にし、鋼板厚を変えることで、引張り補強鋼材比を変えている。また、実験供試体、S1とS5は形状寸法は全て同じである。

また、ひずみは鋼板の下側において、中央変位は載荷板に鋼材を渡して鉛直下方向に2点で測定している。尚、中心変位は2点の平均を用い、支点沈下等により補正している。

2. 2 解析供試体

解析供試体は実験供試体の1/4カットモデルで、全要素数162要素、総節点数982節点とした。概略図を

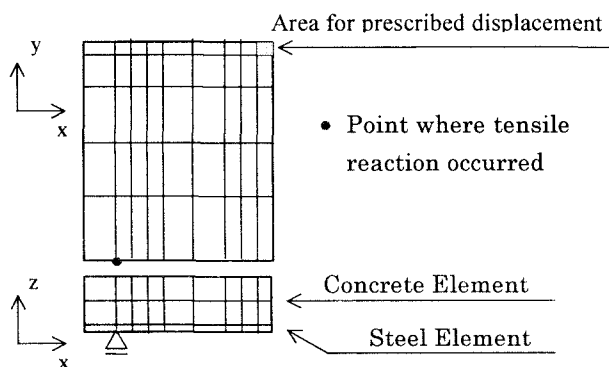


Fig.2 Analysis Model

Fig.2に示す。また、Fig.2中の黒点については後に述べる。解析に用いた材料特性値はTable.2のとおりである。コンクリートのヤング係数、ポアソン比は実験時に測定されていなかったため、ヤング係数についてはコンクリート標準示方書・設計編¹⁾に記載されている、各圧縮強度における値を線形補間で、ポアソン比についても同書に記載されている値、0.2を用いた。また、解析はそれぞれの供試体について3種類の支持条件のもとで行った。

Table.2 Properties of Analytical Specimens

	M1	M2	M3	M4
Thickness of Plate(mm)	16	9	4.5	2.3
f_c (MPa)	26.5	26.4	18.5	22.2
f_s (MPa)	300	284	284	250
E_c (kgf/cm ²)	262500	222500	262000	255000
E_s (kgf/cm ²)	1700000	1750000	1700000	1940000
ν_c	0.2			
ν_s	0.32	0.28	0.28	0.33

本研究にあたって、3次元有限要素解析用のプログラムは新たに開発したものをを用いた。要素は20節点アイソパラメトリック要素で、コンクリート、鋼材要素を作成、使用した。非線型モデルは、コンクリート要素に関しては"TRIAXIAL ELASTO-PLASTIC AND FRACTURE MODEL FOR CONCRETE"²⁾を適用し、またこのモデルは鋼材に対しても適用できるために、鋼材要素にもそれを

適用した。このプログラムは現在開発途中にあるために、接合要素、コンクリートのひび割れ後構成則は未だ導入されておらず、それらに関しては今回考慮することができなかった。

2. 3 支持条件

実験での支持条件は、丸鋼を支承としたローラー支持であったが、摩擦による水平方向の変位拘束が発生する事も考えられる。また、実験では隅部の浮き上がりを自由としていたが、解析において、その条件の扱い方が結果に大きな影響を与える可能性もある。そこで、解析実験を行うにあたって、最も実験に合う支持条件を探ることとした。この支持条件の検証にあたって、解析供試体は鋼板厚16mmのモデルを用いた。

結果として得られた荷重変位関係と、鋼板底面における橋軸方向ひずみの橋軸方向分布をFig.3、Fig.4に挙げる。支点上の節点において鉛直方向のみを変位拘束したものは、剛性が実験値より低いものの、ひずみ分布に関しては非常に良い値を示している。また、水平方向に変位拘束したものは結果として剛性が実験値に近づいたものの、ひずみ分布形状は明らかに実験値と異なっており、水平方向には変位拘束しない方が実験により適合してい

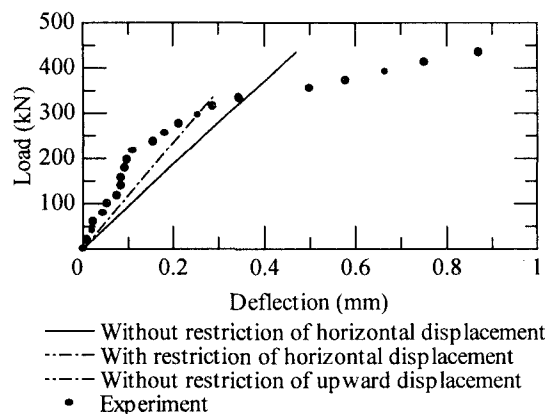


Fig.3 Load-deflection relationship

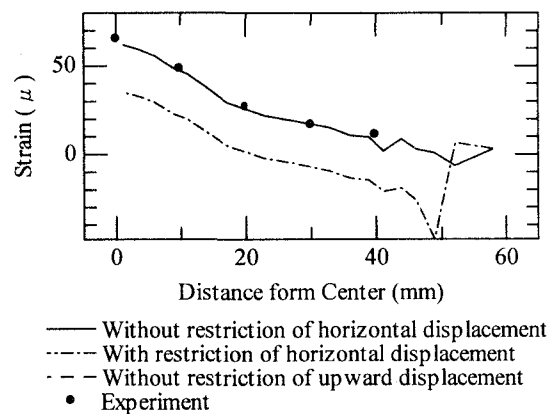


Fig.4 Strain distribution at 100kN

るといえる。また、隅部の浮き上がりについてであるが、もし支点上の節点において下向きに反力が出ていれば、そこは理論上、スラブが浮き上がろうとするのを上から押さえつけられていることになる。水平方向変位拘束なしの解析において調べたところ、Fig.2 で示した黒点の節点に関して下向き反力が出ていたためその節点の拘束をとり、隅部浮き上がりを自由にしたものとして解析をおこなった。また、水平方向の変位については、先の結果より拘束しないものとした。この解析の結果についてもそれぞれ Fig.3、Fig.4 に記す。荷重変位関係、ひずみ分布とも浮き上がりを拘束したものとはほとんど変わらないが、収束性が拘束したものよりも良くなった。以上の結果より、以降の解析は実験での支持条件と同じ、隅部の浮き上がり自由、ローラー支持として行った。3次元解析ではこのように拘束の仕方ひとつで大きく結果が変わってしまうために、支持条件などの拘束条件には十分

配慮する必要がある。

3. 解析結果と考察

3. 1 鋼板のひずみ

各供試体の鋼板底面における橋軸方向ひずみの分布を Fig.5 と Fig.6 に示す。Fig.5 は支間中央からの橋軸方向の距離と橋軸方向ひずみとの関係である。Fig.6 は支間中央からの橋軸直角方向の距離と橋軸方向ひずみとの関係である。

どの供試体でも载荷レベルの低い段階では実験結果と比べ良い値を示している。しかし、载荷レベルが高くなるにつれ、解析値は実験値を下回る値になる。これはスラブ内部でのコンクリートのひび割れ進行に伴う断面欠損などの影響によるものと考えられる。同じように高い载荷レベルであっても、载荷点近辺においては、解析

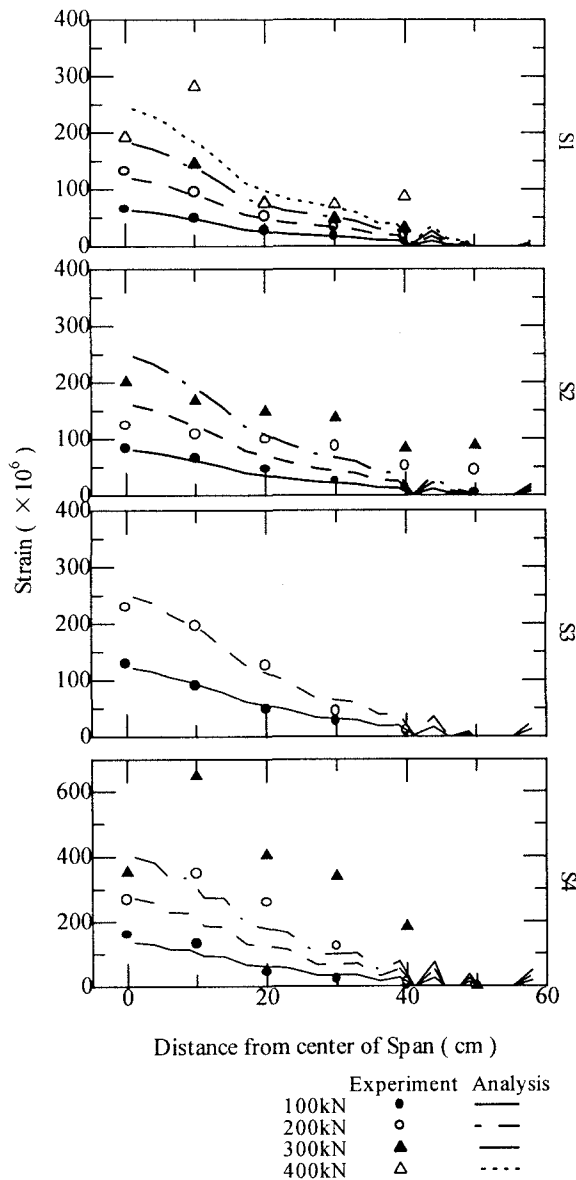


Fig.3 Strain distribution in span direction

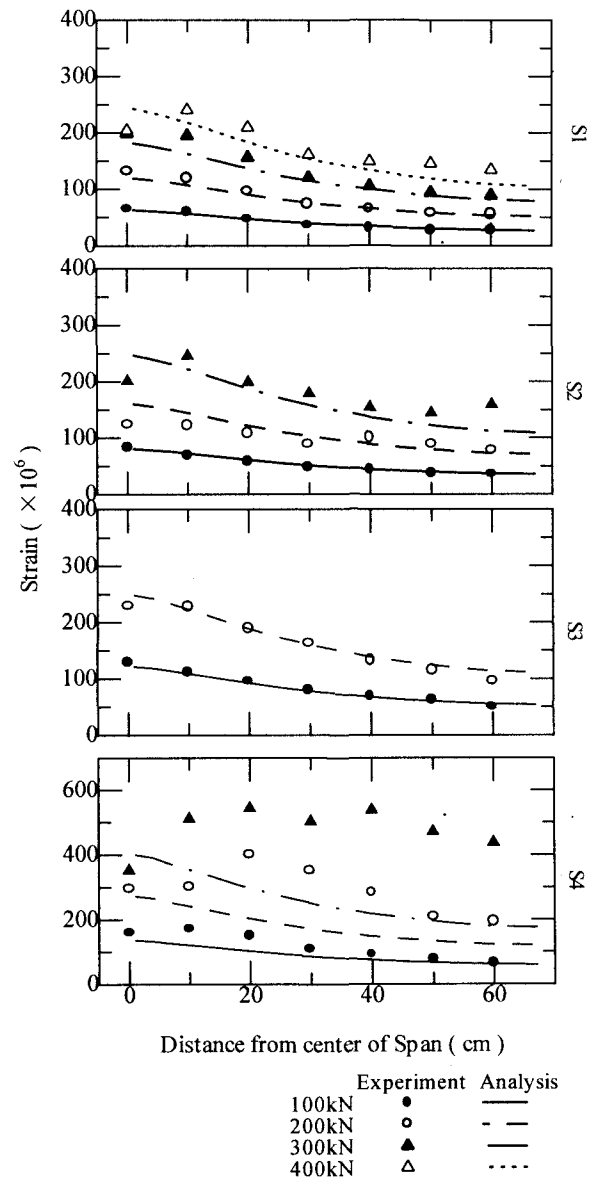


Fig.4 Strain distribution in width direction

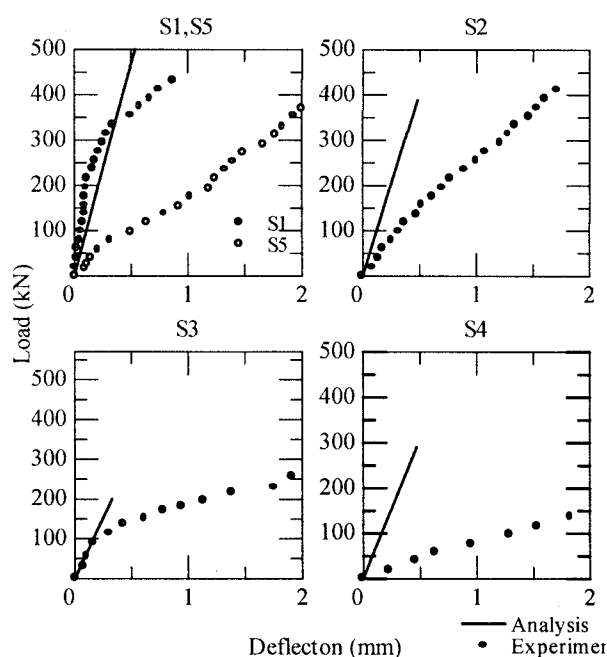


Fig.7 Load-deflection relationship

値は実験値を上回ってしまう。これもスラブの内部の破壊進行によって生じる鋼板のS字状の局所変形の影響で、応力減少がおきたためと考えられる。とくに鋼材が薄く、鋼板自体の剛性が低い2.3mmの供試体においてはその傾向が顕著である。载荷レベルの低い場合には解析による値は十分適用できることが明らかとなった。しかし、スラブ内コンクリートにひびわれが起きるような载荷レベルでは、たとえ今回の結果が良く合っていたとしてもひび割れの影響が解析値に大きな変化をもたらすかもしれない。高き载荷レベルでは適用できるとは言い難い。また、今回の解析では接合要素を導入していないために完全剛結で解析を行っており、载荷レベルの低い段階でも適用できるのは今回の実験供試体のようにスタッド配置が比較的密なものに限定されるであろう。

3. 2 荷重変位

実験、解析それぞれにおける载荷点における荷重と鉛直方向変位の関係図を Fig.7 示す。鋼板厚 4.5mm のものは载荷初期の段階で良く一致しており、有限要素法による値が正しい事を示しているが、それ以外は、実験値と比べ剛性が大きかったり、低かったりと様々である。鋼板厚 16mm のものは実験供試体 S1 と S5 は全く同じ形状寸法の供試体で変位のみが全く違う値を示してしまった供試体だが、それらの実験値の間に解析値が収まっ

ている。他の2体では解析値と実験値は非常に離れている。これらの実験値を観察すると、鋼板厚 16mm、4.5mm の供試体 S1, S4 ではひび割れによると思われる剛性の変化が顕著であるが、鋼板厚 9mm、2.3mm 供試体 S2, S3 にはその剛性の変化がまったく見られない。よって何らかの原因により、これら2体の供試体においては、変位の実験値が正しくない可能性が考えられる。また、4.5mm 鋼板のものは、ひび割れによると思われる剛性変化の前までは実験値と非常に良くあっており、これから剛性が変化するような大きなひび割れが入る前のような载荷レベルの低い段階においては、有限要素法の結果が適用できると思われる。

4. まとめ

以上より得られた知見についてまとめると。

1. 3次元有限要素法では、支持条件の設定が重要であり、2辺単純支持スラブでは水平方向変位拘束を与えない方がより良い値をとる
2. 隅部の浮き上がりは解析結果にあまり影響を与えない
3. オープンサンドイッチスラブの押抜きせん断破壊のメカニズムを知るのにおいて有限要素法は非常に有用であるが、本研究の範囲内ではスタッド配置が比較的密で载荷レベルの低い段階であることに限定される。

5. あとがき

現在、コンクリートのひび割れが起きた後について開発中であり、ひび割れを考慮したの詳細な考察については今後進めていきたい。また、既往の研究から鋼板とコンクリートとのずれ止めであるスタッドジベルが破壊メカニズムに大きな影響を与えていることがわかっている。また、水平方向のずれ、付着に関してもスタッドジベルが重要な役割を果たしている。そのため、スタッドジベル要素についても現在開発中である。今後、スタッドジベル要素とコンクリートひび割れ後の構成則を盛りこんだプログラムを用いて、オープンサンドイッチスラブが押抜きせん断破壊に至るまでの全体の詳細なメカニズムについて考察する予定である。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書【昭和61年制定】設計編, 土木学会
- 2) MAEKAWA, TAKEMURA, IRWAN and IRIE : TRIAXIAL ELASTO-PLASTIC AND FRACTURE MODEL FOR CONCRETE, JSCE No.460 / V-18, pp.131-138, February 1993.