

[122] ワッフルスラブの終局耐力とたわみ性状に関する研究

正会員 安藤 信好 (武蔵工業大学工学部)
 正会員 ○中西 洋之 (三友工業システムセンター)

1. 序および目的

鉄筋コンクリートスラブの終局耐力に及ばず圧縮面内力効果に関する研究は、既に1950年代から始められており、中でも境界の拘束速度、およびスラブ厚の大きなものについてはその終局耐力が Johansen の降伏線理論値の数倍にも達すると言われている。また近年、日・田型変厚版においてもこの面内力効果によりひび割れ対策上極めて有利な力学特性を有するとする報告もある。

本研究ではリブ部による面内軸力効果が期待できる事から、スラブの一種であるワッフルスラブの構造について面内軸力効果の影響を実験的に明らかにすると共に、種々の条件下(鉄筋量、コンクリート強度、周辺の支持条件、リブ形状などの変化)における挙動の中で主として終局耐力およびたわみ性状についての基礎的な解析および考察結果を述べる。

2. 解析モデル

本文での解析対象は図1(a)に示すようなリブ間隔が均一かつ正方形スラブの四半分の対称要素で、またその解析構造モデルを図1(b)に示すようなT型梁(周辺部はL型梁)要素に置換する。更にこの構造全体を有限個のT型部材の集合体として解析する。なお板状構造物を梁要素に置換する手法は過去に数多く研究・報告されており、本研究では特殊断面を含まない一般形状の断面を対象とするので、この方法で考察した。

3. 解析手法および解析仮定条件

3.1 解析手法

本研究では目的がこの構造の面内力およびその挙動を明確にする点にある事から、変位法有限要素法による三次元解析を行い、漸増荷重法により終局まで追求する。そのため各荷重ステップにおける部材剛性は前ステップにおける応力および歪の状態を材料特性に基づいて判定し、得られた有効断面形状・有効断面性能により求める手法をとる。なおこの剛性マトリックス作成にあたっては幾何学的な非線形を考慮した部材補正を行い得られた連立方程式の解法は、Gaussの消去法にバンドマトリックス法を適用した。更に構造物の崩壊状態に相当する終局耐力は、塑性ヒンジ発生による独立結合力数の減少数がこの構造の内的不静定次数を超した場合とし、次式で判定した。

$$n_i = m + 3(\sum r + 2) - 3n < 0$$

ただし、 n_i : 構造物の内的不静定次数

m : 両端にヒンジの発生した部材の総数

r : 剛接点において一材に剛接される他材の数

n : 全接点数

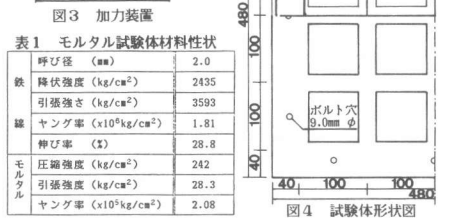
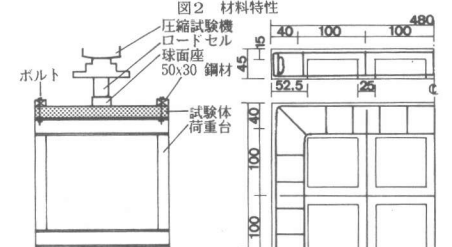
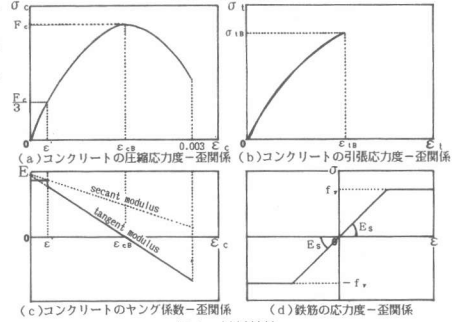
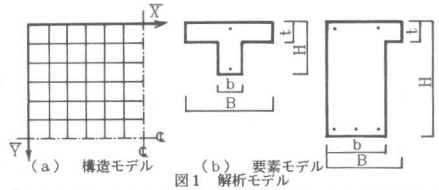


表1 モルタル試験体材料性状

	呼び径 (mm)	2.0
鉄	降伏強度 (kg/cm ²)	2435
	引張強度 (kg/cm ²)	3593
錐	ヤング率 (x10 ⁶ kg/cm ²)	1.81
	伸び率 (%)	28.8
モルタル	圧縮強度 (kg/cm ²)	242
	引張強度 (kg/cm ²)	28.3
	ヤング率 (x10 ⁵ kg/cm ²)	2.08

3.2 解析仮定条件

① コンクリートの応力度と歪の関係は次式による。

2) 圧縮時 $1 - \sigma_c / F_c = (1 - \epsilon_c / \epsilon_{cb})^k$ (図2(a))

$$\epsilon_{cb} = 2.2 \times 10^{-4} F_c^{0.39}, k = 29 \times F_c^{-0.5}$$

3) 引張時 $1 - \sigma_t / \sigma_{tb} = (1 - \epsilon_t / \epsilon_{tb})^k$ (図2(b))

$$\epsilon_{tb} = 4.95 \times 10^{-4} \sigma_{tb}^{0.285}, k = 4.84 \times \sigma_{t,-0.346}$$

② コンクリートのヤング係数は圧縮応力が $1/3 F_c$ 以下の場合には $1/3 F_c$ における secant modulus を、それ以上では①で示される式の tangent modulus とする。(図2(c))

③ 鉄筋の応力度と歪の関係は bi-linear とする。(図2(d))

④ 曲げ材の各断面は、変形後も平面を保持する。

⑤ 部材応力は全て節点を通して伝達されるものとする。

⑥ ヒンジ間の部材は、曲げ応力を伝達しないものとする。

⑦ コンクリートの引張応力はひび割れ後無視する。

4. 実験概要

モルタル実験は、この面内力効果が明確に現われ、かつ解析手法および仮定条件の妥当性が確認できる規模および実用設計への適用性を考慮した予備実験とした。そのためモデルは比較的国内で多様化されているリブ間隔 60cm に相当するもので縮尺 1/6 の試験体を選定した。図3にはリブ形状、間隔、辺長大きさ、および配筋などを示す。なお試験体は今回二種類として境界の違い二種類各二体による面内力効果を追求した。

加力は、試験体中央上の中央集中荷重とし、その方法は単調増加とする(速さ 2kg/sec)。支持は、端部が両極論になるよう、周辺固定と周辺単純支持の方法とする。測定は、中央点下の垂直たわみ、および側梁の回転を変位計により、鉄線およびモルタルの歪をストレインゲージにより行った。実験において使用した鉄線およびモルタルの材料性状は表1に明記した。

5. 実験結果および考察

モルタル試験体による実験結果と解析結果を図5に示す。終局耐力および終局たわみにおいて実験結果と面内力を考慮した解析結果がほぼ一致しており、本研究の目的としているところからすると、この実験により解析手法および仮定条件の妥当性が確認できた。図6に示したひび割れの内、下端に発生するひび割れは先ずリブに発生し、後にリブ全般に至るひび割れとなり、またその後スラブにひび割れが発生する。上端に発生するひび割れについても、初期ひび割れがリブと直交するように発生してから板全体に円弧を描くようにひび割れが進展する。すなわちスラブに生じたひび割れはすべてリブに発生したひび割れに沿うようにして、あるいはリブのひび割れが発生、拡大することにより生じると考えられる。

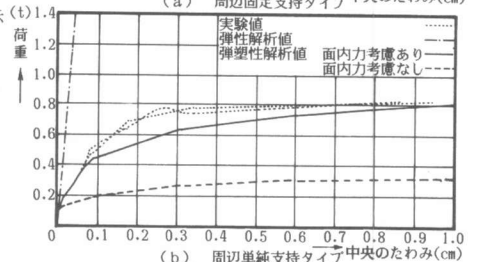
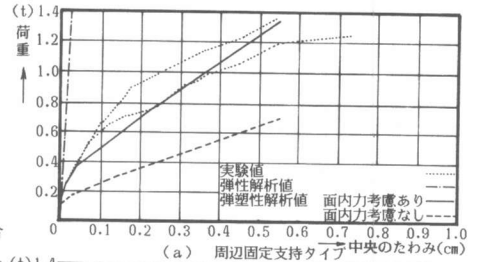


図5 実験値と解析値

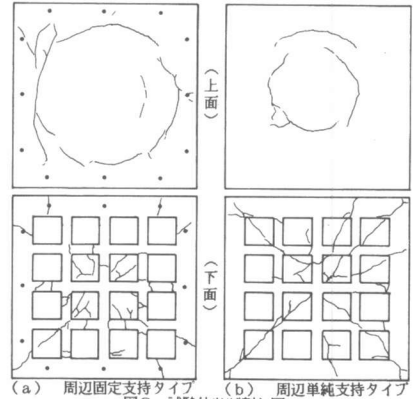


図6 試験体ひび割れ図

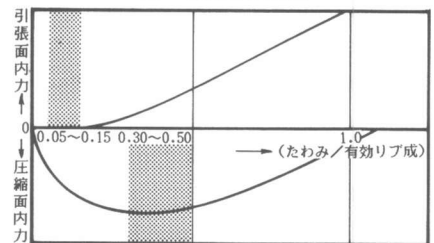


図7 面内力(たわみ/有効リブ成)関係の傾向

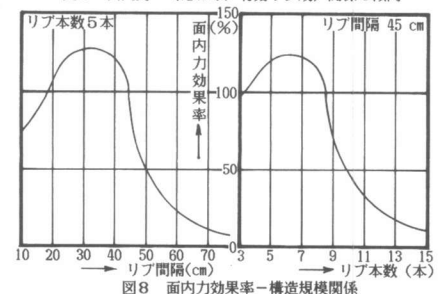


図8 面内力効果率-構造規模関係

6. 解析結果および考察

面内応力度と、中央点下におけるたわみの有効リブ成に対する比の関係は、図7に示す通りである。その結果圧縮面内力はたわみが有効リブ成の40%程度で最大となり、それ以上ではたわみが増すにつれて小さくなる。これに対し、引張面内力はたわみが有効リブ成の5%~15%から顕著に現われ、たわみが増すにつれて加速的に増大する傾向にある。

ここで、面内力を考慮した解析による終局耐力を P_N 、面内力を考慮しない解析による終局耐力を P_M とし、面内力効果率 E_U を次式で定義する。

$$E_U = (P_N - P_M) / P_M \times 100 \quad (\%)$$

前述の田型変厚版は、リブ本数を3本にしたものに相当すると考えると、文献1)の研究・報告で示されている面内力効果率約90%~100%という結果は本解析による結果とよく一致している。

またこの面内力効果率を、リブ間隔とリブ本数の変化、言い換えればワッフルスラブの構造規模(辺長)因子の変化によりどのように変化するかを示したのが図8である。この解析ではリブ間隔45cmとその時のリブ形状($b=12.5cm$, $B=45.0cm$, $H=27.0cm$, $t=10.0cm$ (図1(b)参照))を基準とし、また他のリブ間隔の場合にはこの基準となるリブ形状をリブ間隔の比で拡大・縮小したものを考えた。その結果、全体的に田型変厚版と比べ、ワッフルスラブも同等あるいはそれ以上の面内力効果が得られるものと考えられる。

図8の効果率を終局たわみの有効リブ成に対する比との関係で考えると図9のようになる。終局たわみが有効リブ成に達するまでは、面内力効果率はほとんど圧縮面内力に支配され、終局たわみが有効リブ成の30%~50%で最大となり、図7の圧縮面内力と同じ曲線を描いて減少するが、有効リブ成を越えると引張面内力により再び増加する傾向にある。以上のことより実験結果とも合わせて、面内力による終局耐力の増加が大きいことから、解析をする場合これを考慮する必要がある。

次に各解析条件(コンクリート強度、上端筋量、下端筋量、端部固定度、リブ幅、リブ成)下におけるこの構造の挙動変化について示す。

各条件を変化させた場合の挙動変化としてヒンジ進展の変化が顕著に現われるのは、上記条件因子の内、端部固定度で側梁の断面を中リブよりわずかに大きくすることにより、その挙動は大きく図10(a)の端部固定度大のものに近付き、これに伴い終局たわみは激減し、面内力は大きく作用する。その他の条件因子によるヒンジ進展における挙動変化は比較的少ない。

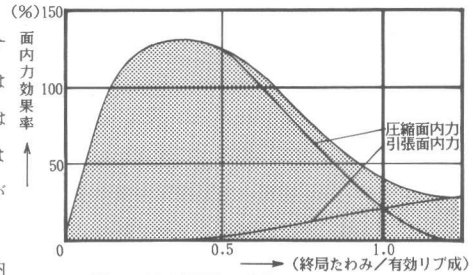


図9 面内力効果率-(終局たわみ/リブ成)関係
ひび割れ ▲(上端)▽(下端)
鉄筋降伏 △(上端)▲(下端)
ヒンジ形成 ●

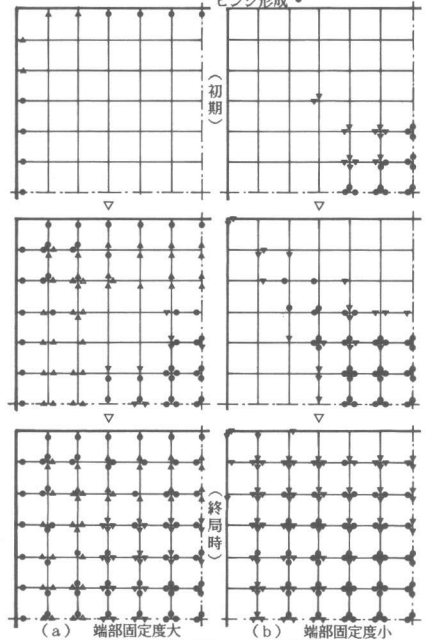


図10 端部固定度とヒンジ進展

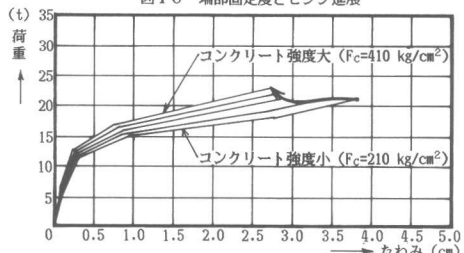


図11 コンクリート強度変化における荷重-たわみ曲線

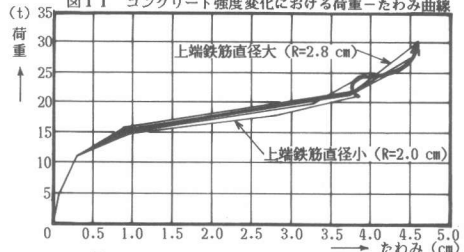


図12 上端鉄筋量変化における荷重-たわみ曲線

図11～16に、各条件を変化させた場合の終局耐力および終局たわみの変化の一例を示す。各々の条件変化によるその挙動の変化は、他の条件因子により様々に変化し、定量的にはとらえにくいものであるが、① 主に終局耐力の変化が現われるもの（鉄筋量変化）、② 主に終局たわみの変化が現われるもの（コンクリート強度、端部固定度変化）、③ この中間的なもの（リブ幅、リブ成変化）の3種類に大別することができる。さらに、(I)上端鉄筋量変化および端部固定度変化のように挙動変化が顕著に現われるものと、(II)そうでないものに二分することができる。

ワッフルスラブを設計する場合、まず第一はリブ形状を定めることである。構造規模に適したリブ間隔あるいはリブ断面を定めることによりワッフルスラブのもつ構造特性を最大限に発揮することができる。

第二に前述の条件因子の内リブ形状以外のものにより補強効果を得ることである。特に、端部固定度に関しては、側梁断面をわずかに大きくすることにより、たわみをかなり少なくすることができる。

第三に前述の分類で、挙動変化が顕著に現われるものに関するもの、あるいは分類①と分類②に属するもののように挙動変化の方向性が違うものを組み合わせて変化（増加）させることでより効果的にワッフルスラブ特有の力学特性を活用することが出来ると考えられる。以上の点に留意してワッフルスラブの設計をすることでより一層の構造的安全性や経済性が得られると考えられる。

7. 結論

本研究の基礎的試験および幾何学的非線形を考慮したFEM解より、ワッフルスラブの構造は、① 圧縮面内力および引張面内力の効果により、大きな耐力増加およびたわみ減少を期待できる構造であり、極めて有利な力学特性を有する事が判明した。② 終局耐力および終局たわみの算出には、圧縮および引張面内力の効果を検討する必要がある。③ 終局たわみが有効リブ成の4割（ $\delta/d = 0.4$ ）近くで圧縮面内力効果が最大となる。また、終局たわみが有効リブ成を超えると（ $\delta/d = 1.0$ ）引張面内力効果が加速度的に増大する。④ 耐力増加には上端鉄筋量増加が、たわみ減少には端部固定度増加（側梁断面増大）が顕著に寄与する。特に辺長が大きく、かつ終局近くでたわみとなるような場合には引張面内力効果が現われ、端部上端鉄筋の付着を高めることにより一層の耐力増加を期待することができる。

参考文献1) 日野正照 他;「強固な補剛架構をもつ鉄筋コンクリート床板の実験(その3 日, 田型変厚版)」

日本建築学会関東大会学術講演梗概集 第2742号, 昭和59年10月

2) 浜田 稔 ;「鉄筋コンクリート柱および梁における安全率の選択について」

日本建築学会 建築雑誌, 昭和7年9月

3) 河野輝夫 他;「コンクリートの引張実験」日本建築学会論文報告集 第4号, 昭和12年

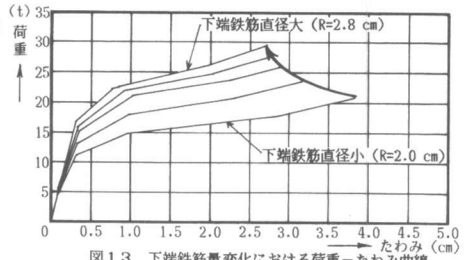


図13 下端鉄筋量変化における荷重-たわみ曲線

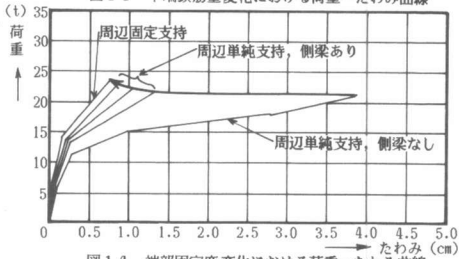


図14 端部固定度変化における荷重-たわみ曲線

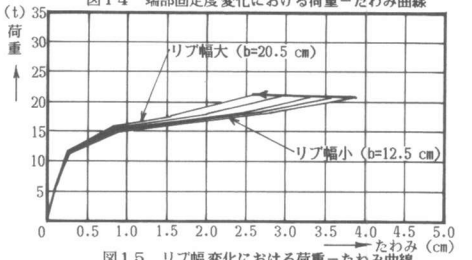


図15 リブ幅変化における荷重-たわみ曲線

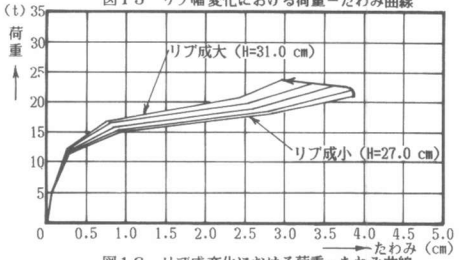


図16 リブ成変化における荷重-たわみ曲線