

鋼板・コンクリート合成床版の静的耐荷力と破壊モード

園田恵一郎*・鬼頭宏明**

本研究で対象とする合成床版は、頭付きスタッドを溶植した薄鋼板に現場打ちコンクリートを合成した板部材で、道路橋床版や沈埋トンネル等の海洋構造の部材として用いられるものである。本研究はこの合成床版の破壊形式と耐荷力を実験的及び数値解析的な手法により検討したものである。まず、ずれ止め配置方式を因子とした12体のモデル床版に対する載荷実験を実施し、続いて剛体バネモデルによる3次元材料非線形解析法を提案しその適用を試みた。

Key Words : composite slab, failure mode, loading capacity, rigid body spring model, stud connector, material nonlinearity, 3 dimensional analysis

1. 緒言

鋼・コンクリート合成構造は、鋼構造、コンクリート構造に次ぐ第3の構造形式として注目を浴び、近年その優れた耐荷力特性、施工性を含み経済性が認識され、その利点を活かした合理的な設計法の確立に向け、国内外を問わず、その研究・開発が精力的に進められている^{1)~4)}。本研究で対象とする鋼板・コンクリート合成床版⁵⁾（以下、合成床版）は、ずれ止めとしての頭付きスタッドを溶植した薄鋼板に現場打ちコンクリートを一体化した合成板部材であり、一般にロビンソン・スラブと呼ばれ、オープンサンドイッチ構造の一種と見なされる。この合成床版は、従来道路橋床版として使用されている鉄筋コンクリート床版に代わるものとして開発・適用^{6),7)}されたものであり、その特徴として大きな鋼断面による耐荷力特性の改善、床版厚の低減、軽量化、そして構成材の鋼板を型枠として利用できる簡便な施工などが挙げられる。このような利点を鑑み、現在海洋構造物の構成部材⁸⁾等その他の構造物にもその活用が期待されている。

本研究は、この合成床版の合理的な設計法の確立に資するために、限界状態設計法の一規準となる終局限界状態での特性を対象とし、合成床版の破壊モードと耐荷力を実験的・数値解析的に考察・検討したものである。

まず、実験的手法としては、部分載荷を受ける正方形単純支持合成床版を取り上げ、その構造の力学的挙動を大きく支配する鋼板とコンクリートの接合材（ずれ止め）、ここでは頭付きスタッド、の配置方法と竊突起付き鋼板の併用とを因子とした全12体のモデル床版に対し静的載荷実験を行い、ひびわれ進展、ずれ挙動を包括

した破壊モード（変形性状）とその耐荷力を調査している。

つぎに、数値解析的手法としては、極限解析法の一つである降伏線理論を一般化し不連続体要素の集合体として数値モデルを構築し、離散化極限解析法として位置づけられる剛体バネモデル⁹⁾を用いた3次元材料非線形解析法を展開し、合成床版の終局状態に至る挙動の追跡を試みている。3次元モデル化は、鋼板とコンクリートとの界面に離散的に配置されたスタッドの伝達力特性を評価するために不可欠な事項であり、また剛体バネモデルの採用は、複雑な3次元材料非線形解析を、発生しうる破壊モードを適切に導入し要素分割方式に反映させることにより、低自由度かつ簡便な解析を可能にしうる点に起因する。考慮した材料非線形性は、合成床版の破壊を支配するコンクリートのひびわれ、せん断すべりと圧壊、スタッドの変形による鋼板とコンクリート間のずれ、そして鋼板の降伏等であり、これらの不連続性が卓越する挙動は剛体バネモデルの基本的特性により明瞭に表現できる。得られた数値解析結果は、先に述べた静的載荷実験結果との比較を通して、本解析法の妥当性を検証している。

なお、本論文は1991年福岡にて開催された国際会議において発表した2編の論文^{10),11)}に新規実施した数値解析結果を併せて取り纏めたものであることを付記する。

2. モデル床版の静的載荷実験

(1) モデル床版供試体

静的載荷実験に使用した全12体のモデル床版供試体（以下、供試体）は、平面内に1600mm×1600mm、コンクリート打設厚120mm、鋼板厚6mmの正方形合成版である。スタッド配置方式と竊突起付き鋼板の併用を因子とした各床版の詳細を表-1に示す。ここで、竊突起付き鋼板（以下、竊鋼板）とは、通常の平鋼板の片

* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科
(〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

** 正会員 工修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科

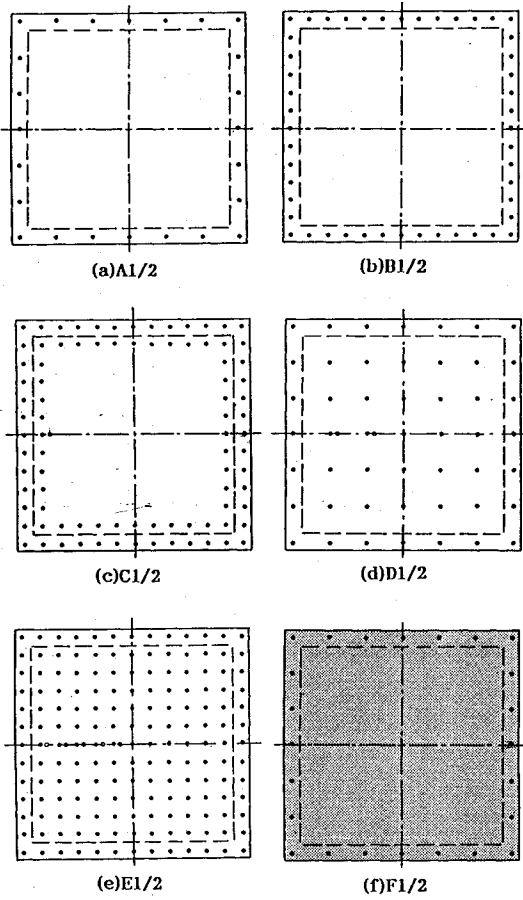
表一 モデル床版供試体の諸元

供試体	鋼板種	スタッド配置方式		
		配置領域	間隔(mm)	総本数
A1, A2	平	端辺周辺 1列	250	24
B1, B2	平	端辺周辺 1列	125	48
C1, C2	平	端辺周辺 2列	125	92
D1, D2	平	全 域	250	49
E1, E2	平	全 域	125	169
F1, F2	縞	端辺周辺 1列	125	24

表二 使用した材料の特性

供試体	コンクリート			鋼板; 平 [縞]		
	f_c'	E_c	ν_c	f_{sy}	E_s	ν_s
A1, B1, C1	395	2.70×10^5	0.21			
D1, E1, F1	391	2.79×10^5	0.20	3574	2.11×10^6	0.28
A2, B2, C2				[2978	2.12×10^6	0.28]
D2, E2, F2	395	2.48×10^5	0.18			

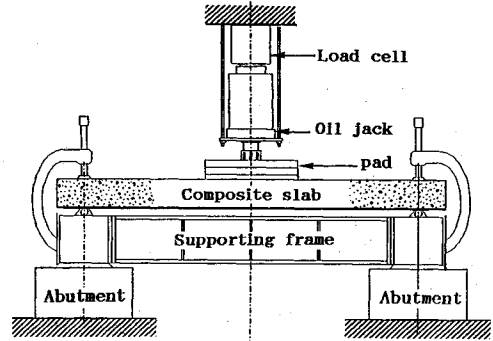
※強度系の単位は kgf/cm^2



図一 モデル床版供試体のスタッド配置

面に高さ 1.3 mm, 長さ 32.1 mm, 幅 6 mm 程度の突起が, 間隔 32.1 mm 程度で千鳥格子状に配置されたものであり, 一般市場に流通し入手容易な既製品である。ずれ止めとしてのスタッドは, 頭付きとし, Nelson 型, 軸径 13 mm, 高さ 80 mm を使用した。使用した鋼材ならびにコンクリートの材料特性を表二に示す。

供試体鋼板接合面でのスタッド配置形式を図一に示す。配置方式の選定に際しては, 可能な限り密な配置と疎な配置, それらの中間に相当するものから選定した。すなわち, 平鋼板を用いて, 供試体 A1, A2 はスタッドを端辺周辺に疎な間隔で 1 列配置, 供試体 B1, B2 は端辺周辺に密な間隔で 1 列配置, 供試体 C1, C2 は



図二 静的載荷方式 (中央部分荷重載荷)

端辺周辺に密な間隔で 2 列配置, 供試体 D1, D2 は接合面全体に疎な配置, そして供試体 E1, E2 は接合面全体に密な配置とした。また, 供試体 F1, F2 は, 縞鋼板を用いて, スタッドを端辺周辺に疎な間隔で 1 列配置, すなわち供試体 A1, A2 と同一な配置を施した。

(2) 載荷方式と測定項目

載荷方式を図二に示す。供試体は直径 50 mm 程度の丸鋼棒により支持辺長 1375 mm で全周単純支持し, 4 隅を浮き上がり防止のスクリージャッキで固定した。載荷に際しては, 上記 6 種のスタッド配置の各 2 体の供試体に対し, 各々載荷辺長 125 mm または 375 mm の正方形荷重を供試体上面中央部に油圧ジャッキにより与えた。載荷部には厚さ 20 mm のゴム板をジャッキ頭部に取付けた鋼板と供試体上面に挿入し, 載荷領域に均等な分布荷重を与えるように努めた。

測定は, 荷重増分量を 0.5 tf とし, 弾性ならびに残留たわみ, 鋼板のひずみ, そして鋼板とコンクリート間のずれ量に対して行った。また, コンクリート部のひびわれ進展状況を随時観察した。なお, 上記ずれ量の計測は着目点鋼板部, スタッドからの周辺方向距離 50 mm 位置に設けた直径 20 mm の円孔に π 型ゲージを設置し測定した。

(3) 実験結果

表一に得られた実験結果の一覧; 鋼板とコンクリート間の自然付着効果を失った荷重値, ひびわれ発生荷重値, 最大荷重値 (耐力), 最大たわみ量, 鋼板とコンクリート間の最大ずれ量ならびに破壊モード, を示す。ここで, 第 1 者は, π ゲージによるずれ, または目視により端部鋼板のずれ, を最初に確認した荷重値を意味す

表-3 実験結果一覧

供試体	載荷面積 (mm ²)	自然付着消 失荷重 (tf)	破壊荷重 (tf)	ひびわれ荷重 (tf)		最大変位 (mm)		破壊モード
				周辺	上面曲げ	たわみ	ずれ	
A1	125x125	27.0	27.0	○	22.0	12.2	1.46	付着せん断
B1		25.0	27.9	27.5	27.5	10.3	0.26	押抜きせん断
C1		22.0	30.5	×	×	9.3	0.09	押抜きせん断
D1		17.5	31.9	25.0	31.9	11.7	0.86	押抜きせん断
E1		20.0	41.4	×	×	9.4	0.00	押抜きせん断
F1		26.7	40.0	40.0	40.0	13.6	0.26	付着せん断
A2	375x375	27.5	27.5	○	23.0	10.5	0.72	付着せん断
B2		31.5	31.5	×	27.5	11.3	0.64	押抜きせん断
C2		30.4	38.9	×	31.0	11.1	0.14	押抜きせん断
D2		30.3	38.5	31.0	35.0	15.3	1.49	付着せん断
E2		25.4	77.3	57.5	55.0	13.0	0.35	押抜きせん断
F2		34.1	39.6	39.0	39.0	13.4	1.27	付着せん断

注) ○周辺ひびわれ発生荷重未確認, ×ひびわれ発生せず

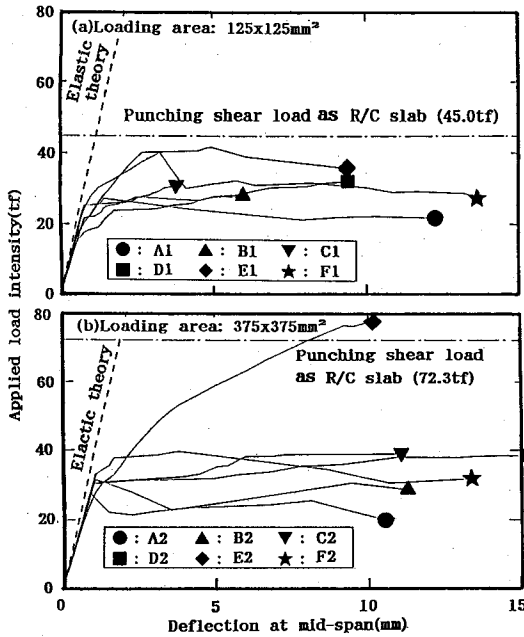


図-3 荷重-床板中央たわみ関係

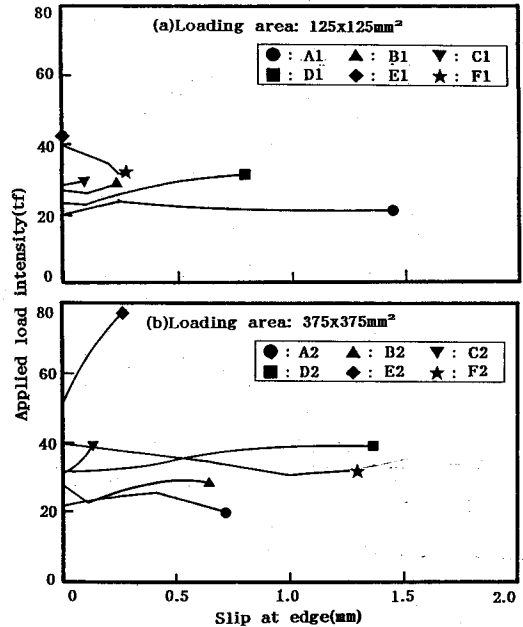


図-4 鋼板とコンクリート間の相対変位

る。

a) 荷重-変位関係

図-3に全供試体に対して得られた荷重-供試体中央たわみの関係を示す。この図より、いずれの供試体もコンクリートの粘着力による自然付着力が失われるまでは、完全合成板としての弾性剛性を保持していたことがわかる。荷重-変位関係の概形を見れば、端辺周辺に疎なスタッド配置を有する供試体、例えば供試体A1, A2, はコンクリート部の負曲げによるひびわれ発生後、幾分その耐力が低下するものの、耐力低下時の比較的大きなたわみに至るまでその耐力を保持し、良好な塑性変形状(靱性)を示した。一方、密なスタッド配置を有する供試体、例えば供試体E1, E2, は後述の急激に発生する押抜きせん断破壊モードに支配されるために脆性的な破壊挙動を示した。

一方、最大荷重(耐力)は、最もスタッドが密な供試体E1, E2ではR/Cスラブとしての押抜きせん断耐力の計算値(鋼板を鉄筋量に置き換え、土木学会コンクリート標準示方書の式による)にほぼ到達しているが、他の供試体のいずれも計算値よりかなり下回っていることが分かる。

b) 鋼板とコンクリート間のずれ挙動

図-4に全供試体の端辺上にて測定された鋼板とコンクリート間の相対変位(付着ずれ)の挙動を示す。この図より配置スタッド本数の少ない供試体では破壊に至る前段階からずれの発生が確認されたが、スタッド本数の多い供試体では殆ど認められなかった。図-5に供試体E1, E2の付着ずれ量の分布性状を各々示す。この図より、ずれ量の最大値は載荷端から下方に概ね45°方向に支承に向かった位置の鋼板で発生し、それより周辺部

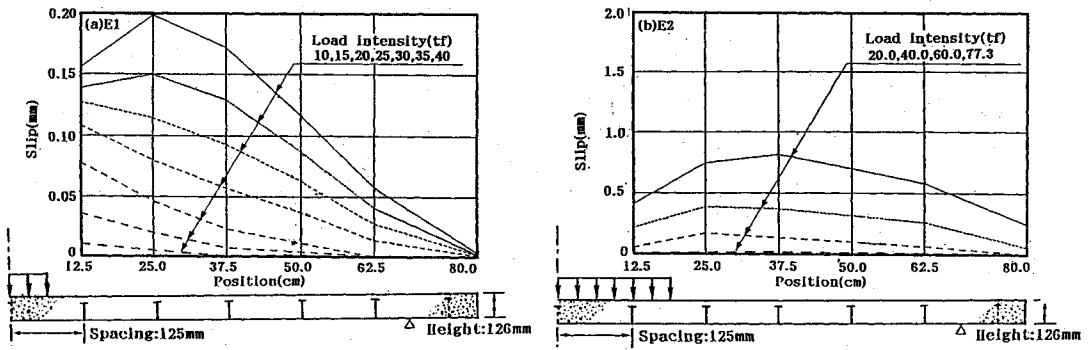


図-5 鋼板のずれ量の分布

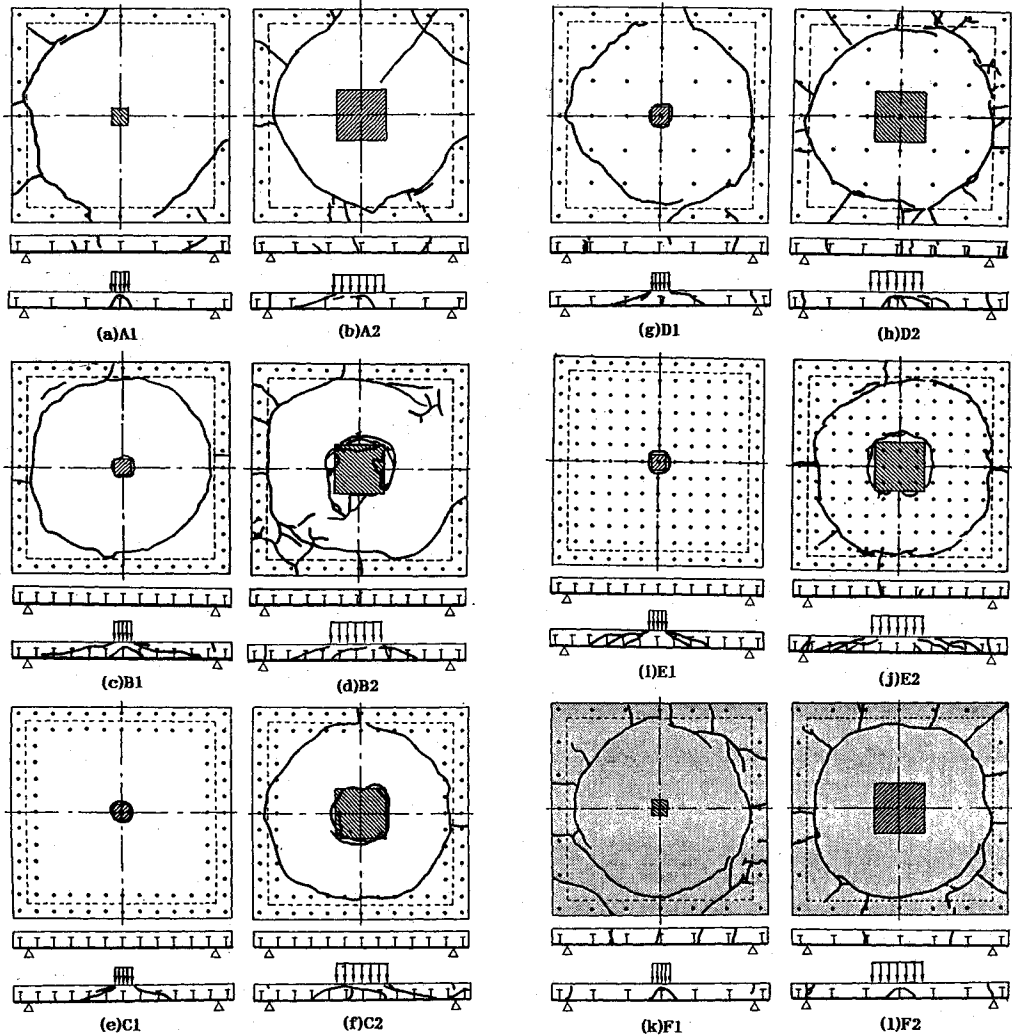


図-6 破壊モード (最終的なコンクリートひびわれ状況; 上段・上面: 中段・周辺: 下段・中央切断面)

に向かって減少していることがわかる。すなわち、供試体周辺でのずれ量は周辺部のコンクリートにひびわれが発生するまでは、殆ど現れなかった。

c) 破壊モードと耐力

図-6 にコンクリート上面ならびに周辺面での最終的なひびわれ状況と、実験終了後供試体を切断・観察した中央断面でのひびわれ状況を示す。実験により観察された破壊モードは2種に大別できた。一者は、負曲げによ

表一4 耐荷力とその算定結果 (tf)

供試体	実験	算定	供試体	実験	算定
A1	27.0	—	A2	27.5	—
B1	27.9	—	B2	31.5	—
C1	30.5	—	C2	38.9	—
D1	31.9	33.8	D2	38.5	52.1
E1	41.4	39.5	E2	77.3	78.6
F1	40.0	—	F2	39.6	—

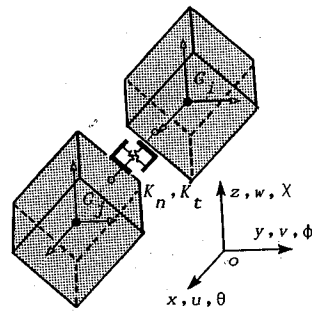
りコンクリート上面で支持辺に内接する円形のひびわれを発生し、最終的に周辺部のコンクリートが押し出される。ずれ破壊に支配される付着せん断破壊モード（以下、付着モード）であり、他者は、通常のRC床版においても観察される載荷端から下方約45°方向に広がるコーン状の面でコンクリート部が急激に陥没する押抜きせん断破壊モード（以下、押抜きモード）である。なお破壊モードの検討に際し、いずれの供試体においても破壊に至る全載荷過程を通して、鋼板の降伏およびスタッドの破断は観察されなかったことを付記する。

まず、端辺周辺に疎な間隔でスタッドを1列配置した供試体A1, A2では、スタッド配置方式に依存するずれ抵抗に与える付着モードを呈したため、載荷面積の大きさが与える耐荷力への影響は認められなかった。平鋼板を使用した供試体A1, A2と同一のスタッド配置で縞鋼板を使用した供試体F1, F2を比較すると、付着モードを呈する場合、縞鋼板はずれに抵抗する機能を発揮し、その結果かなりの耐荷力が向上することがわかった。

一方、全体に密な間隔でスタッドを配置し押抜き破壊モードを呈した供試体E1, E2の耐荷力は載荷面積の大きさに影響を受けた。これは、押抜きモードでの耐荷力は押抜かれるコンクリート・コーンの表面積に関係することを示唆している。

また、上記以外の供試体では両破壊モードの混在が認められたが、最終的に供試体D2が付着せん断破壊した以外は、押抜きせん断破壊に支配され、結果としてそれらは供試体A1, A2とE1, E2との中間的な耐荷力特性を示した。

表一4に各供試体に対する耐荷力を再表示し、先に著者らが提案した合成床版の押抜きせん断耐力算定式⁹⁾による算定値を併記する。この算定式はRC床版の押抜きせん断耐力算定式における主鉄筋の付着効果の項を合成床版にて45°下方に押抜かれるコンクリート・コーン底面内の鋼板に配置されたスタッドのせん断伝達能力で評価し直したもので、コーン底面内にスタッドが存在しない供試体に対しては評価していない。この表より、本算定法は合成床版の押抜きモードに対する耐荷力をほぼ良好に評価できるといえる。



図一7 3次元剛体バネモデル概要

3. 剛体バネモデルによる3次元材料非線形解析

(1) 剛体バネモデルの概念

剛体バネモデル⁹⁾とは、実験的事実に基づき対象とする構造物を材料構成関係を考慮したバネにより連結された剛体要素の集合体として離散化したモデルであり、構造物の破壊挙動を支配する構成材料あるいは部材間の分離・すべり等の不連続現象を明快かつ簡便に表現しうることにその特徴を有する解析モデルである。

本研究では、その概要を図一7に示す剛体重心にて並進3成分と回転3成分の計6自由度を有し、隣接する要素境界面に対し垂直方向と接線方向の計2種のバネを配置した3次元剛体バネモデルを用いる。なお、接線方向のバネは境界面上の主せん断成分に抵抗するものとし、その抵抗力をx, y両方向に分解した。本モデルにて要素境界面上における単位面積当りの表面力とバネの単位長さ当りの伸縮、すなわち応力 σ_{ij}^n とひずみ ϵ_{ij}^n の関係は、境界面に垂直方向と接線方向各バネ定数 K_{ij}^n を用いて次式のように記述する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij}^n &= K_{ij}^n \times \epsilon_{ij}^n \\ K_{ij}^n &= \frac{E_i E_j}{E_i h_j + E_j h_i}, \quad K_{ij}^t = \frac{G_i G_j}{G_i h_j + G_j h_i} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、隣接する要素の各弾性係数 E_i, E_j 、同せん断弾性係数 G_i, G_j ： $G = E/2(1+\nu)$ 、 ν はポアソン比、そして各要素重心から境界面までの垂線距離 h_i, h_j を用いた。この定式化より、上式では垂直方向成分と接線方向成分の連成項は直接考慮していない。本式を材料非線形解析に適用するために、後述する構成関係に則り、与えられたひずみ値に基づき、その連成関係を踏まえ対応する両応力値を定義し、それに従って割線係数を逐次修正する方法により反復計算を行った。なお、式(1)の評価点、すなわちバネ配置方式は、複数組のバネが分散配置された方式を採用し、要素境界面で数値積分することにより式(1)を評価した。ここでは数値積分法に関する試行検討の結果、4×4のLobatto積分¹²⁾を採用し、要素境界面上に計16の積分標本点を設けた。

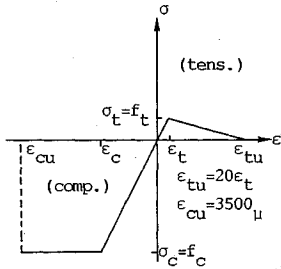


図-8 コンクリートの応力-ひずみ関係

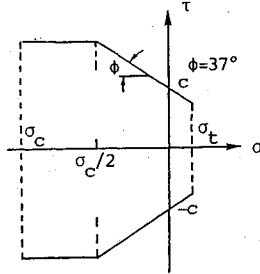


図-9 コンクリートの降伏曲面

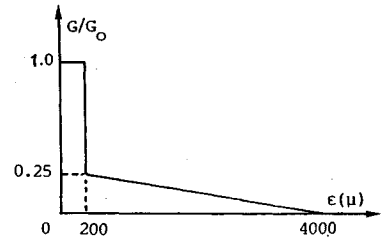


図-10 ひびわれ面でのせん断伝達特性¹⁴⁾

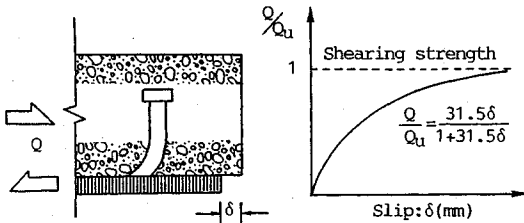


図-11 スタッドのせん断力-ずれ関係¹⁶⁾

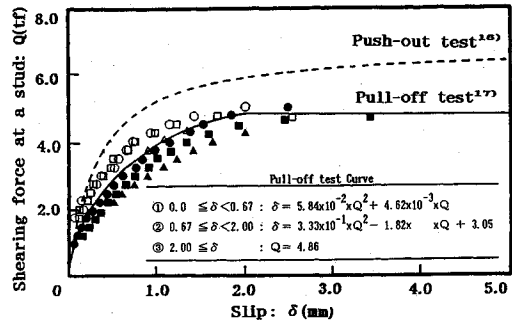


図-12 引抜きせん断実験結果¹⁷⁾

(2) 非線形材料構成関係

a) コンクリートの材料構成関係

まず、図-8に圧壊とひびわれ破壊を考慮した垂直成分の応力-ひずみ関係を示す。なお、後者を特性づける引張軟化モデルの設定に関しては、後述の数値計算結果の節で議論する。次に、せん断すべり現象は、図-9の応力空間にて粘着力 c と内部摩擦角 ϕ で規定されるモール・クーロンの基準に類似した降伏曲面¹³⁾に従うものとする。図示のとおり、このモデルでは前述の圧縮・引張破壊に関連して、その両端を平面的に切断している。更に、ひびわれ面でのせん断伝達特性は、図-10の直ひずみ-せん断剛性低下率関係¹⁴⁾により表現した。

なお、本構成関係の適用性は、豊富な既往の研究結果と対比できるRC床版の終局強度に関するパラメトリック解析¹⁵⁾を通して検証している。

b) 鋼板の材料構成関係

鋼板は、鋼材の降伏点により規定される完全弾塑性体とし、応力-ひずみ関係にて垂直成分と接線成分との連成関係は考慮していない。なお、接線成分はRC床版における主鉄筋のせん断分担機構であるダボ作用を規範とし、せん断剛性低減係数 β （ここでは0.01）を導入した。

c) 鋼板とコンクリート間界面での伝達力特性

まず、接線方向力は、ずれ止めであるスタッドを介してのみ伝達されるとし、摩擦力は考慮していない。コンクリートに埋め込まれたスタッドのせん断力-ずれ変形関係は、既往の実験結果¹⁶⁾より図-11に示すスタッドのせん断耐力の関数として評価し、スタッド配置位置に

それに準じた接線方向バネを設けることにより表現できる¹¹⁾。しかし、この特性は合成桁のような剛性の高い鋼材に溶植されたスタッドの挙動を対象に押抜きせん断実験より導かれており、ここで用いた鋼材が板厚6mmの薄鋼板であることを考えると、スタッド基部の鋼板の変形性とその挙動に影響を及ぼすことが推察された。そこで同等の薄鋼板にスタッドを配置した供試体に対し、引抜きせん断実験を実施したところ¹⁷⁾、図-12から分かるように得られた結果は、図-11のせん断力(Q)-ずれ(δ)曲線に比して柔なずれ挙動を呈し、加えてせん断耐力の低下も認められた。従って、解析には図-12の実験結果を平均化して得られた $Q-\delta$ 曲線を用いた。なお、縞鋼板の突起によるせん断分担特性は、現時点において充分定量化されておらず、今回の解析では対象外とした。

次に、垂直方向力は下記の2者を考慮した。引張力は、浮き上がりに抵抗する頭付きスタッドを介してのみ伝達されるとし、スタッド配置位置にその軸部断面積、軸部長さと弾性係数から算定した垂直方向弾性バネを設けた。一方圧縮力は、界面全域にて伝達されるとし、式(1)を用いた数値積分により評価した。

(3) 要素分割方式の設定

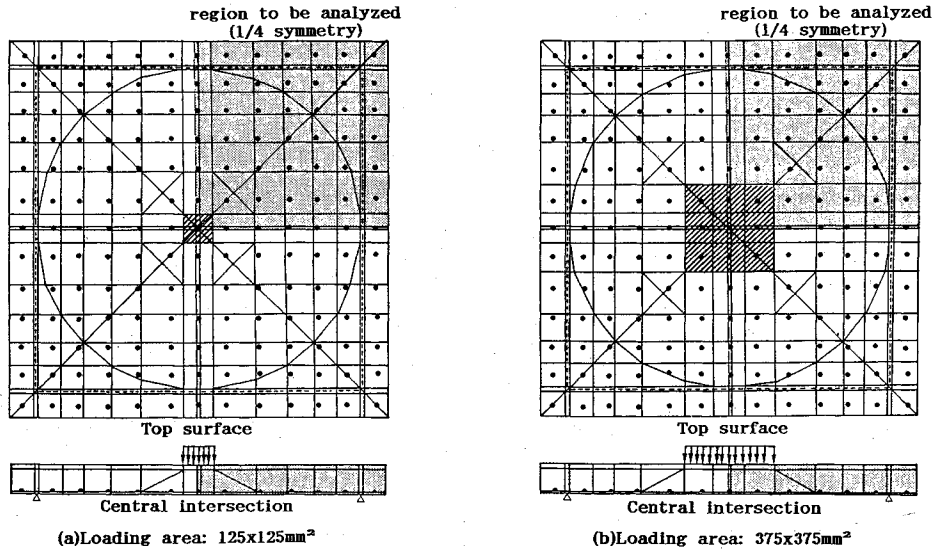
剛体バネモデルを用い適切かつ簡便な解析モデルを構築するには、対象とする構造物の破壊モードを的確に評価し、それに即した要素分割を施すことが肝要となる。

合成床版の主たる破壊モードは前章の実験結果からも

表一5 数値解析結果一覧

供試体	破壊荷重 (tf)	最大変位 (mm)		破壊モード	
		たわみ	ずれ		
A1	21.0 [27.0]	11.1 [12.2]	1.55 [1.46]	付着せん断	[付着せん断]
B1	32.0 [27.9]	8.2 [10.3]	1.01 [0.26]	押抜きせん断	[押抜きせん断]
C1	35.0 [30.5]	4.6 [9.3]	0.41 [0.09]	押抜きせん断	[押抜きせん断]
D1	37.0 [31.9]	10.2 [11.7]	1.30 [0.86]	押抜きせん断	[押抜きせん断]
E1	45.0 [41.4]	3.0 [9.4]	0.18 [0.00]	押抜きせん断	[押抜きせん断]
A2	26.0 [27.5]	10.1 [10.5]	1.51 [0.72]	付着せん断	[付着せん断]
B2	38.0 [31.5]	9.0 [11.3]	1.10 [0.64]	付着せん断	[押抜きせん断]
C2	51.0 [38.9]	10.1 [11.1]	0.74 [0.14]	付着せん断	[押抜きせん断]
D2	43.0 [38.5]	12.3 [15.3]	1.81 [1.49]	付着せん断	[付着せん断]
E2	79.0 [77.3]	8.5 [13.0]	0.50 [0.35]	押抜きせん断	[押抜きせん断]

注) []は実験結果



図一13 要素分割方式；●スタッド配置例 (供試体 E1/2)

明確に付着せん断および押抜きせん断の2種であり、本解析手法においては、これらの破壊モードと曲げ破壊モードを考慮した要素分割を採用し概ね良好な解を得ることが実証されている¹¹⁾。ここでは、更に解の信頼性を向上させるために、次の2点に留意して要素分割方式を再検討した。1点は各スタッドの挙動を個別に評価すべく鋼板とコンクリート間の界面を表現する各要素境界面に複数のスタッドが位置せぬようにすることであり、もう1点は押抜きモードの耐荷機構を的確に導入することである。後者は、RCはり部材のせん断耐荷機構として熟知のアーチ機構を、平面的に拡張したドーム機構¹⁸⁾の表現を意味し、そのために載荷領域直下に形成される圧縮分担層を考慮し、コンクリート部を2層に分割し、厚さ方向に対し鋼板層を含めた3層モデルの設定を試みる。以上の経緯より図一13の要素分割方式を決定した。なお、図示の解析モデルは対称性を考慮した1/4領域に於いて、約300個の剛体要素：全自由度約1800を有し、次元離散化モデルとしては低自由度なものの部類に属するといえる。

(4) 数値解析結果

a) 解析モデルの妥当性

まず、引張軟化モデルの設定について取り上げる。この種のモデル化、すなわちコンクリートのひびわれ挙動の評価に関しては、近年破壊力学に基づきコンクリート固有の引張破壊エネルギー G_F を決定し、それから引張応力-ひびわれ開口量関係を規定することの必要性が提唱されている¹⁹⁾。ここでは、簡易的ではあるが図一8内の引張限界ひびわれ ϵ_{lu} を限界ひびわれ開口量と結びつけ、その値をひびわれ発生ひびわれ ϵ_i の2, 5, 10, 20倍と変化させその影響を検討した。その結果、 ϵ_{lu} の変化が解に及ぼす有意義な影響は認められなかった。その理由として、スタッド周囲のコンクリートに発生するひびわれの影響が、スタッドのせん断力-ずれ関係に別途含まれていること、ならびに合成床版における支配的な破壊モードが、曲げ破壊モードのようにひびわれの進展に鋭敏に反応するものでないことが挙げられる。

次に、スタッドのずれ挙動の評価について検討するために、前述の既往の実験成果¹⁶⁾と薄鋼板を用いた実験結

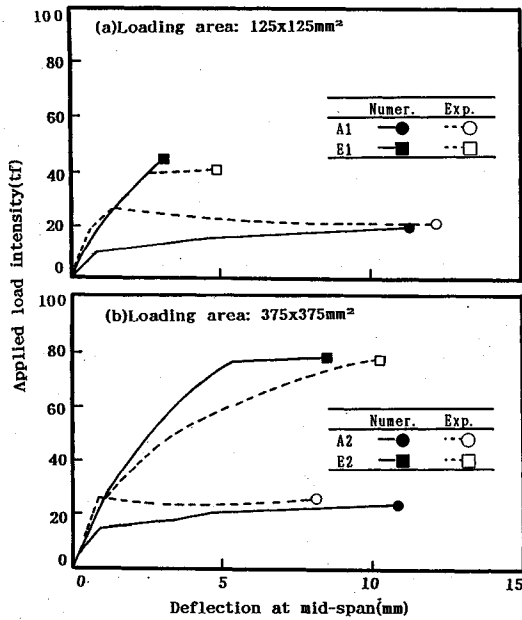


図-14 荷重-床版中央たわみ関係

果¹⁷⁾による2種のせん断力-ずれ変位関係を用いて比較解析を行った。結果として、スタッド配置量を多くする程両者間の差異が顕著になり、得られた耐荷力に着目すれば、供試体 E1, E2 で前者の関係をを用いた解は後者の関係をを用いたものに対し約 10~20% の増加を示した。また前章の実験結果と対比すると当然のことながら、薄鋼板上のスタッドの挙動を忠実に評価した後者の関係をを用いた解にその整合性が確認された。

b) 実験結果との比較検討

前述の理由により編鋼板を用いた2供試体を除く、計10体の供試体に対する数値解析結果と前章の実験結果とを表-5に併記・対照する。この表より、中間的なスタッド配置を施した供試体 C2 を除けば、得られた各耐荷力は、各スタッド配置がその耐荷力に及ぼす影響を評価し、実験結果に対しおおよそ一致が見られる。更に同時に得られた各破壊モードは、実験にて観察された2種のモードの発生に的確に対応しており、ここで採用した簡便な要素分割方式が適切であったことも確認できる。

次に、好対照なスタッド配置を有し異なるモードで破壊に至った供試体 A1, A2, E1 そして E2 の荷重-変位(床版中央点たわみ)関係を図-14に示す。図より本モデルは、コンクリートと鋼板間の自然付着の効果を考慮していないためスタッド配置数の少ない供試体 A1, A2 の初期荷重段階においてかなりの差異がみられるものの、観察された合成床版の非線形挙動をその破壊時までほぼ追跡可能であるといえる。上述の差異は、実験にてスタッド配置数の少ない供試体では、一旦ずれが発生

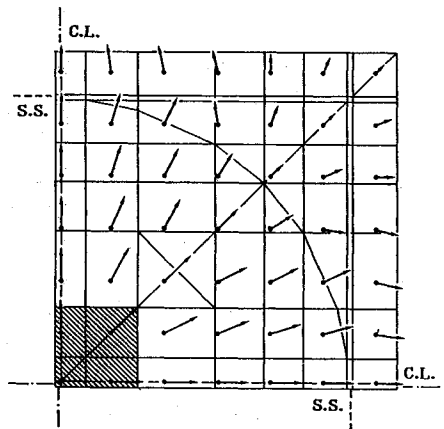


図-15 スタッドに働くせん断力分布状況 (1/4 対称領域)

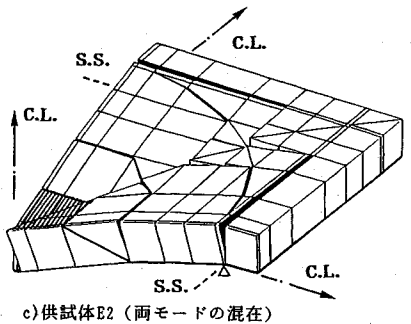
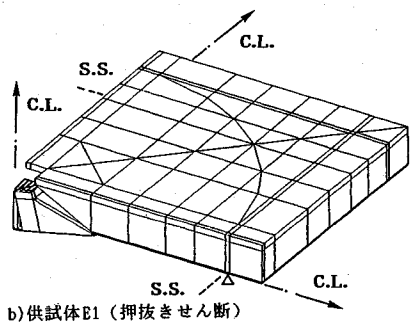
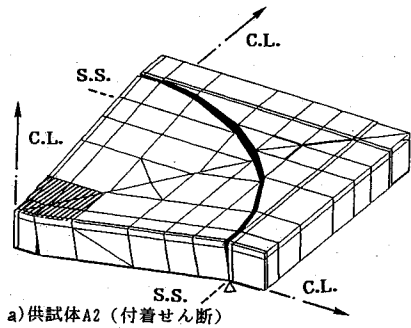


図-16 破壊モード (1/4 対称領域)

し鋼板とコンクリート間のせん断伝達機構が遷移すると急激に剛性が低下することからも裏付けられる。一方スタッド配置数の多い供試体では、ずれが発生してもスタッドが同等のせん断力を十分に伝達しこの種の剛性の低下は顕著ではなかった。

続いて、破壊時近傍でのスタッドに作用するせん断力の分布状況を図-15に示す。結果として実験結果のずれ分布特性(図-5参照)、すなわち載荷部周辺から床版端部に向かってずれが減少していく傾向が再現されている。

最後に、得られた破壊モードを、解析を実施した1/4対称領域に関して図-16に示す。図示した供試体は、a) 付着せん断破壊モードを呈した供試体A2, b) 押抜きせん断破壊モードを呈した供試体E1, そしてc) 両モードが観察され最終的に押抜きせん断破壊した供試体E2の3体であり、a) ではコンクリート上面の円形ひびわれとコンクリートと鋼板間のずれ発生が、b) では載荷部周辺からコーン状に陥没する局所的な破壊が、そしてc) では上記両モードの混在が描かれ、実験での破壊モード(図-6参照)を明瞭に表現している。

以上の比較検討より、本解析手法は合成床版の破壊過程に起こるコンクリートのひびわれ、せん断すべりそしてコンクリートと鋼板間のずれなどの不連続現象を充分に表現でき、その非線形な挙動を予測するための適切かつ簡便な方法であると判断できる。

4. 結 論

鋼板・コンクリート合成床版の破壊モードと耐荷力を検討するために、周辺単純支持正方形モデル床版に対する静的載荷実験と剛体バネモデルによる3次元材料非線形解析を実行した結果として以下の事項が得られた。

モデル床版に対する静的載荷実験から、

(1) 実験因子としたスタッド配置に関連して、2種の破壊モード;鋼板とコンクリート間のずれを伴う付着せん断破壊モードと載荷領域周辺にてコンクリートが陥没する押抜きせん断破壊モード、が観察され、破壊モードと耐荷力との関連性が示された。

(2) 付着せん断破壊モードに支配された端辺周辺に疎な間隔でスタッドを配置した供試体では、その耐荷力は載荷面積に依存せず、またその破壊挙動は良好な塑性変形性状を呈す延性的なものであった。更に、縞鋼板併用による耐荷力向上も認められた。

(3) 押抜きせん断破壊モードに支配された供試体では、その耐荷力は載荷面積の影響を受け、またその破壊挙動は脆性的なものであった。

(4) ここで設定した実験因子の範囲では、押抜きせん断破壊モードを呈す供試体で多数のスタッドを配置するものほど大きな耐荷力を示した。

(5) 合成床版の耐荷力の評価に関しては、鋼板の全面にスタッドが配置されている供試体に対しては、既往の算定式により良好に把握できることが確認できた。剛体バネモデルによる3次元材料非線形解析から、

(6) 実験にて観察された付着せん断破壊モードと押抜きせん断破壊モード、そしてスタッドの配置方式を考慮し、低自由度な3次元離散化モデルを構築した。

(7) 実験的事実を裏付けるようにスタッドのずれ特性の評価法は、数値解析結果に影響を及ぼし、その適切なモデル化の必要性が示された。

(8) 解析対象としたモデル実験供試体全10体中、中間的な配置を有する1体を除けば、得られた解は設定した各スタッド配置の効果を反映し、その耐荷力は各実験結果におおよそ一致を示し、同時に発生する各破壊モードもほぼ再現できた。

(9) 上記の事項より、本解析手法は、合成床版の破壊に至るまでの不連続現象を含んだ非線形挙動を追跡するのに適切かつ簡便な方法であることが検証できた。

謝辞：剛体バネモデルの適用に関しては、明星大学理工学部・竹内則雄助教授、(株)竹中工務店技術研究所・上田真稔主席研究員、上林厚志氏ならびに(株)安部工業所技術部・樋口晴紀課長に貴重なご意見を賜った。また、研究当時本学構造工学講座の大学院生および学部学生であった土生川真二(現三菱重工業)、長谷川明生(現関西電力)、野出光吉(現阪神電鉄)、井櫻潤示(現大成建設)、斧申二(現清水建設)各氏の協力を得た。ここに記し謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 構造工学シリーズ3/鋼コンクリート合成構造の設計ガイドライン, 土木学会, 327 p., 1989.
- 2) コンクリートライブラリ73/鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案), 土木学会, 100 p., 1992.
- 3) Proc. of an Engineering Foundation Conf.; Composite Construction in Steel and Concrete, ASCE, Henniker, NH, U.S.A., 820 p., 1988.
- 4) IABSE Symposium Brussels; Mixed Structures, including New Materials, 712 p., 1990.
- 5) 園田恵一郎・堀川都志雄・鬼頭宏明・木曾収一郎: 鋼板・コンクリート合成床版のスタッドに働くせん断力と押抜きせん断耐力, 土木学会論文集, 第404号, pp.249~258, 1989.
- 6) Johnson, R.P. and Buckby, R.J.: Composite Structure of Steel and Concrete, Vol.2, Bridge with a Commentary on BS 5400 Part 5, Granada Publishing, Great Britain, 524 p., 1975.
- 7) 大貫一生: コンクリートと合成構造・設計事例(9)合成床版—首都高速道路9号線, 枝川ランプ—, コンクリート工学, Vol.21, No.12, pp.65-67, 1983.
- 8) 遠藤博・川合紀章・北山資: 大阪港沈埋トンネル合成構

造沈埋函の設計指針について，土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集，第 1 部門，pp.362～363，1992.

- 9) 川井忠彦：コンピュータによる極限解析法シリーズ 1／離散化極限解析法概論，162 p.，培風館，1991.
- 10) Sonoda, K. and Kitoh, H. : Failure modes and loading capacities of steel plate and concrete composite slabs with different arrangement of stud connectors, Proc. of 3rd Int'l Conf. on Steel-Concrete Composite Structures Fukuoka Japan pp.509～514, 1991.
- 11) Kitoh, H., Kambayashi, A. and Sonoda, K. : Ultimate strength analysis of steel-concrete composite slabs using a rigid body spring model Proc. of 3rd Int'l Conf. on Steel-Concrete Composite Structures, Fukuoka, Japan, pp.461～466, 1991.
- 12) 赤坂隆：応用数学講座 7／数値計算，コロナ社，pp.161～163，1971.
- 13) 上田真稔・竹内則雄・樋口晴紀・鬼頭宏明・川井忠彦：引張・圧縮破壊を考慮した RC 構造物の離散化極限解析，構造工学論文集，土木学会，Vol. 36 A, pp.315～323，1990.
- 14) Cedline, L. and Dei Poli, S. : Finite elemnt studies of shear critical reinforced concrete beams, J. of the Engr. Mechanics Division ASCE, Vol.103, EM 3, pp.395～410, 1977.
- 15) 園田恵一郎・鬼頭宏明・土生川真二：3次元剛体バネ要素法による RC 及び合成床版の終局強度解析，コンクリート工学年次論文報告集，日本コンクリート工学協会，Vol. 12, No.2, pp.65～70，1990.
- 16) Ollgaard, J.G., Slutter, R.G. and Fisher, J.W. : Shear strength of stud connectors on light weight and normal weight concrete Engr. J. of AISC, No.5, pp.55～64, 1971.
- 17) 園田恵一郎・鬼頭宏明・中前潔：鋼板・コンクリート合成板の付着特性に関する基礎的研究，平成 3 年度土木学会関西支部年次学術講演概要，1-6，1991.
- 18) Rots, J.G. : Punching RILEM Report; Fracture Mechanics of Concrete Structures —From theory to application— (ed. Elfgrén L.), Chapman and Hall, London, pp.241～244, 1989.
- 19) RILEM : Determination the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams, Materials and Structures, Vol.18, pp.285～290, 1985.

(1992. 11. 19 受付)

ULTIMATE LOADING CAPACITIES AND FAILURE MODES OF STEEL PLATE AND CONCRETE COMPOSITE SLABS

Keiichiro SONODA and Hiroaki KITOH

Steel plate and concrete composite slabs described herein are the so-called Robinson's slabs as open sandwich plate elements, that are made of thin steel plate with headed studs and in situ concrete. It can be found their applications to bridge decks and some members of marine structures such as undersea tunnels. The purpose of this paper is to discuss their failure modes and loading capacities. First, patch loading tests of 12 square slabs with some different stud arrangements have been carried out. Second, we have developed 3D rigid body spring model considering material nonlinearity to simulate their behavior up to failure. The validity of the model has been verified in comparison with the experimental results