

圧縮を受ける有孔補剛板の補強と終局挙動

REINFORCEMENT AND ULTIMATE BEHAVIOR OF STIFFENED PLATE WITH A HOLE IN COMPRESSION

藤井 堅* 藤枝 洋二** 佐藤 誠***

By Katashi FUJII, Youji FUJIEDA and Makoto SATO

Under axial compression test a method of reinforcement for stiffened-plate with a hole reinforced by a doubling plate was studied. It was found that the ultimate strength of stiffened plate with a hole was nearly equal or greater than that of stiffened plate without a hole. Although thick doubling plate reduces stress concentration of stiffened plate around the hole, the use of excessive thickness causes another stress concentration below the edges of doubling plate.

1. まえがき

吊橋の主塔やラーメン橋脚には、一般に補剛板を用いた箱形構造が多用されているが、架設あるいは保守点検用にマンホールなどの穴を開けなければならない場合がある。このような開孔部を有する補剛板（以下、有孔補剛板と呼ぶ）は、断面欠損や開孔による応力集中、あるいはリブが切断されることによる剛性低下に起因して、耐荷力が低下する。したがって、構造物全体の耐荷力が有孔補剛板パネルによって決定される場合もあり、設計において、有孔補剛板パネルは、少なくとも孔のない補剛板パネルと同等の耐荷力を持つように補強する必要がある。

従来、機械あるいは船舶分野では、重量軽減の目的から有孔板の研究が精力的に行われており、補剛材、ダブリングプレート、スピゴットプレートなどによる座屈補強効果について検討されている¹⁻²⁾。しかしながら、これらのほとんどが分岐座屈に関するもので、終局強度に注目した研究ではない。さらに、これらの研究は円孔あるいは正方形孔を有する単一板パネルを対象としているのに対し、上記の有孔補剛板では、小判形や長方形孔で、しかも開孔により縦補剛材が切断される場合が多い。そしてこのような補剛板パネルの研究はほとんどない。

阪神高速道路公団では、縦補剛材が切断されるような有孔補剛板がダブリング補強された場合の、開孔部の応

*, ***, 工博 広島大学助教授 工学部第四類 (724 東広島市鏡山1丁目4-1)

**, 広島大学文部技官 工学部第四類 (724 東広島市鏡山1丁目4-1)

力集中や切断された縦補剛材趾端部の応力集中などを調べ、有孔補剛板設計のための条文素案を提案している³⁾。しかしこれは、弾性線形解析に基づくもので、終局挙動あるいは終局耐力を考慮したものではない。限界状態設計法が整備されつつある我が国の現状を考えると、有孔補剛板パネルについても終局耐力に基準をおく補強設計法の確立が工学的な重要課題といえる。

本研究では、このような観点から、ダブリング補強された有孔補剛板の圧縮耐力に着目し、孔周辺の応力集中や終局挙動を調べ、終局強度設計のための補強法の基礎資料を提供する。なお、補強法としてダブリングを採用したのは、一般の橋梁では開孔部に蓋を取付けることが多いことから、その施工性を考慮したためである。

ダブリング補強された有孔補剛板の圧縮耐力の支配要因は、板パネルの幅厚比や縦横比、補剛材の剛比といった補剛板自体の形状パラメータに加えて、孔の形状や開孔幅と補剛板パネル幅の比、さらにダブリングプレートの形状および板厚などが考えられ、大変複雑である。そこで今回は、補剛板の板厚、縦横比、補剛材の剛比そして孔の形状をすべて一定とし、ダブリングプレートの形状と板厚のみを変化させて終局挙動を実験的に調べた。

補剛板の設計は、道路橋示方書⁴⁾に従い、リブの剛比は必要剛比程度とした。孔の形状は、角に丸みのついた長方形孔や小判形孔などが実際に使用されているようであるが、ここでは小判形を採用した。

2. 圧縮耐力実験

2. 1 実験概要

載荷は、400tf水平載荷試験機を用い、荷重制御型とした。載荷装置および実験状況を図-1に示す。

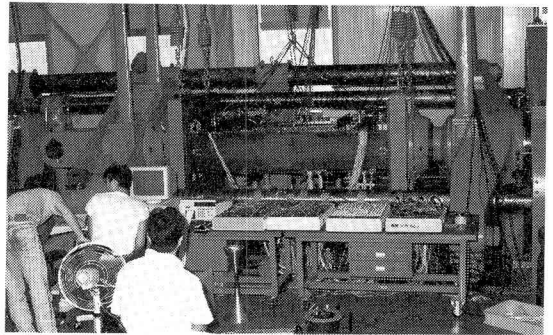


図-1 実験状況

載荷辺では、直径20mmの円柱棒を介して、供試体の図心（孔のない場合の図心）に加力できるようにし、非載荷辺では、1辺当り35個の支承ブロック（図-2参照）を取付けて、周辺単純支持とした。

載荷実験用供試体は、図-3に示すように、長さ1,780mm×幅730mm×板厚6mmの板パネルと、50mm×4.5mmの縦補剛材5本および100mm×10mmの横補剛材4本からなる3パネルの補剛板（載荷および非載荷辺における支承部の長を考慮した支点間でみると、各パネルは幅780mm

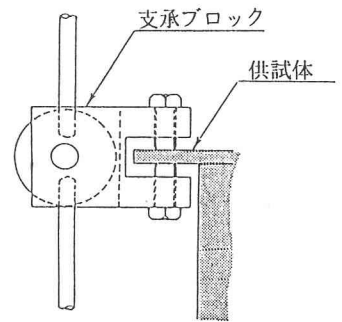


図-2 非載荷辺支承ブロック

×長さ640mmの矩形パネルとなる）で、縦補剛材剛比 $\gamma/\gamma_{req}=1.08$ である。ここに補剛材の必要剛比 γ_{req} の算出は道路橋示方書⁴⁾にしたがった。なお、鋼材はSS400を使用した。

開孔部は、3パネルのうち中央パネルに幅160mm×長さ240mmの小判形孔を設けた。このとき真中の縦補剛材は、開孔にともなって切断され、ダブリングプレート趾端位置では、図-3に示すようなスカラップを設けている。実際に採用されている孔形状の大きさは、400mm×600mmが標準とされており、載荷供試体の孔はこれと相似形である。表-1に各供試体の板厚測定結果を示す。

たわみは、主に中央パネルに注目して測定した。中央パネルでは、軸直角方向に縦補剛材上とその中間位置を含む11断面

(A-K) と、軸方向に11断面 (a-f, h-l) を決め、計121点のたわみを測定した。この他に側方パネルでも縦補剛材上の6点のたわみを測定した。

ひずみは、孔周辺では3軸ひずみゲージを、その他では単軸ゲージを、板および補剛材の両表面に貼付して測り、曲げひずみと膜ひずみを求めた。

図-4および図-5に、それぞれたわみおよびひずみの測定位置を示す。これらの図では穴のある中央

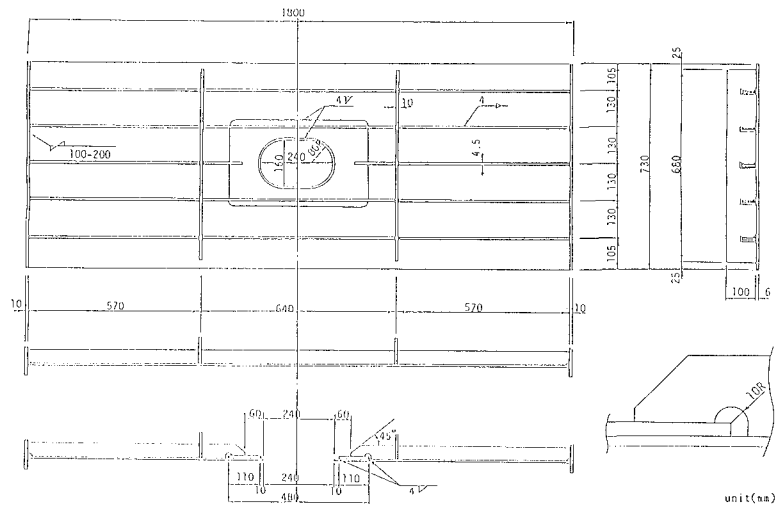


図-3 供試体 (SHD8-L22-D15)

表-1 寸法諸元 単位 (mm)

供試体 名称	パネル 板厚	縦補剛材 板厚	横補剛材 板厚	ダブルリングプレート		
				a	b	板厚
SE	6.0	4.9	10.1			
SP	6.1	4.8	10.1			
SHD 8-L22-D15	6.1	4.9	10.1	480	331	8.3
SHD 9-L22-D15	6.1	4.9	10.1	480	330	9.3
SHD10-L22-D15	6.1	4.9	10.1	479	328	10.1
SHD 4-L22-D27	6.0	4.9	10.1	481	451	5.2
SHD12-L22-D10	6.0	5.0	10.2	480	279	12.3
SHD 8-L8-D15	6.0	4.9	10.0	330	330	8.3

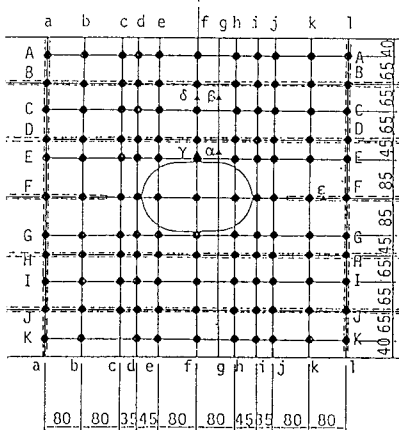
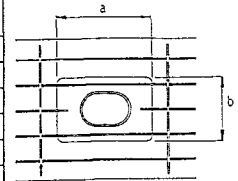


図-4 たわみ測定位置

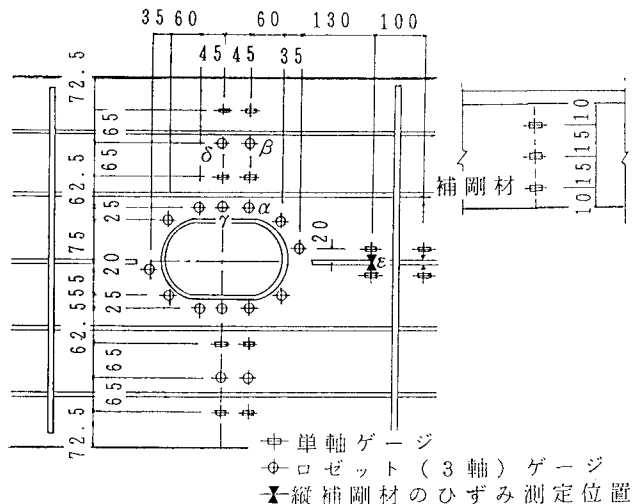


図-5 ひずみ測定位置

パネルだけを示した。

また、図-4、5には、後の考察で使用する断面および測定点位置の名称もあわせて示した。以下では、たとえば図-4でA-Aを通る断面は断面A、断面Aと断面bの交点は点A b、またひずみ測定位置では断面f、点 α などと表すこととする。

2. 2 ダブリングプレート

孔の補強には、図-6に示すようなダブリングプレートを使用した。ダブリングプレートの隅角部は、半径5cmの丸みを付け、その外周と孔の周囲は、すみ肉溶接されている。

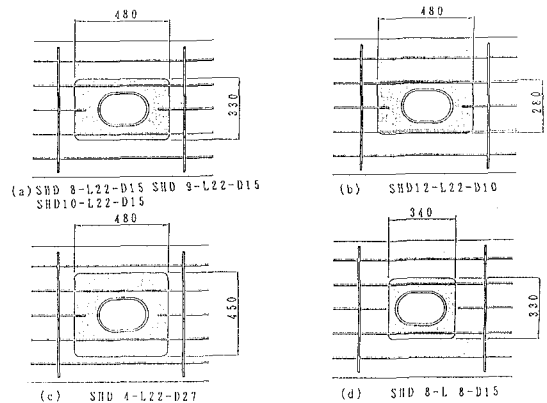


図-6 ダブリングプレート

表-1にダブリングプレートの板厚および形状の実測値を示す。表中、SPは孔のない無孔補剛板、SHはダブリング補強のない有孔補剛板、その他はダブリング補強された補剛板である。供試体SHD8-L22-D15、SHD9-L22-D15、およびSHD10-L22-D15は、表-1中の図で $a=480\text{mm}$ 、 $b=330\text{mm}$ の同じ大きさのダブリングプレートを持つが、それぞれ板厚が異なっている（補強部のダブリングプレート断面積が変化する）。一方、SHD8-L22-D15およびSHD4-L22-D27、SHD12-L22-D10の供試体では、開孔にともなう欠損断面積を補うような条件下（補強部のダブリングプレート断面積がほぼ一定となる条件）で、補強幅 b と板厚 t を変化させている。

また、SHD8-L8-D15は、補強幅と板厚はSHD8-L22-D15に等しいが、補強長さ a が短く、縦補剛材とダブリングプレートとの溶接部がない。したがって、この供試体ではスカラップがない。

2. 3 材料特性

載荷用供試体中使用されたそれぞれの鋼材について、JIS1号引張試験片を各2枚作成し、材料特性試験を行った。各鋼材の試験結果を表-2に示す。

表-2 材料特性試験結果

(単位 MPa)

	σ_y	σ_s	E	ν
Pl 6mm	319	439	0.207	0.286
Rib 4.5mm	302	423	0.197	0.274
D 4.5mm	306	421	0.206	0.296
D 8mm	279	417	0.207	0.281
D 9mm	273	425	0.204	0.281
D 10mm	275	438	0.208	0.281
D 12mm	282	430	0.207	0.285

σ_y : 降伏応力, σ_s : 引張強度
E: 弾性係数 ($\times 10^5$), ν : ポアソン比

2. 4 初期不整

載荷に先立って、初期たわみを測定した。初期たわみ測定結果を表-3に示す。表中、初期たわみ δ_1 、 δ_2 の符号で、正值は補剛材のない側にたわんでいることを示す。表から、補剛材間板パネルの初期たわみについては、道路橋示方書⁴⁾の規定値をほぼ満足している。しかし供試体全体（3パネル全体）の初期たわみの最大値は、規定値よりもかなり大きい結果となっ

表-3 初期たわみ測定結果

供試体 名称	補剛材間板パネル			補剛板全体	
	δ_1	b/150	δ_2	a/1000	
SP	1.10 1.08 1.06	0.87	6.06	1.78	
SH	1.18 0.99 0.99		-4.81		
SHD8-L22-D15	0.63 0.58 0.54		3.09		
SHD9-L22-D15	0.86 0.84 0.82		3.75		
SHD10-L22-D15	0.75 0.74 0.72		3.52		
SHD4-L22-D27	0.51 0.50 0.49		4.14		
SHD12-L22-D10	1.12 0.93 0.93		3.17		
SHD8-L8-D15	0.94 0.89 0.81		-3.60		

た。初期形状の一例を図-7に示す。

2. 5 残留応力

開孔部を補強していない供試体 SH では、後でも述べるが、載荷実験で得られた耐荷力は、593kN (60tf) で、後述の有限要素解析結果よりもずいぶん低く、しかも中央パネルではなく側方パネルが座屈崩壊した。これは、初期たわみの影響と思われるが、開孔部のある中央パネルは降伏していないようである。そこで載荷後、これを用いて坂野ら⁵⁾の方法により残留応力を測定した。結果を、測定位置とともに表-4

に示す。表から、開孔部付近では、開孔にともなう溶断および縦補剛材の溶接により、かなり大きな軸方向引張残留応力があると判断される。また、縦補剛材で挟まれる区間は、中央が圧縮、溶接部付近が引張というよく知られた応力パターンである。

3. 結果と考察

3. 1 変位

図-8、および図-9に、f 断面におけるたわみの軸直角方向分布を示す。図-8は、ダブルリングプレート幅 b を一定にして板厚 t を変えた場合を、図-9は、ダブルリングプレートの断面積を一定にして板厚 t と幅 b を変化させた場合である。

図-8から、当然のことであるが、補強幅 b を一定にした場合板厚 t が厚いほどたわみは小さくなる。図では、板厚が $t=9\text{mm}$ 程度であれば、無孔補剛板と同程度のたわみに抑えられている。文献3) では、ダブルリングブ

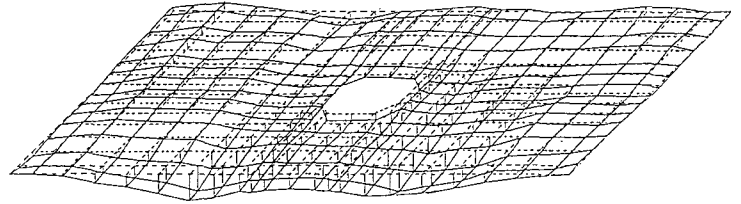


図-7 初期形状 (SHD-8-L22-D15)

表-4 残留応力

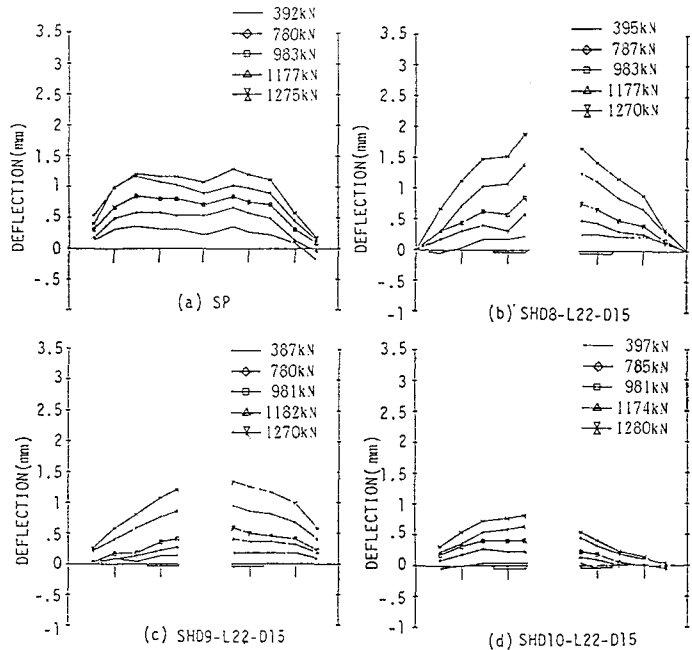
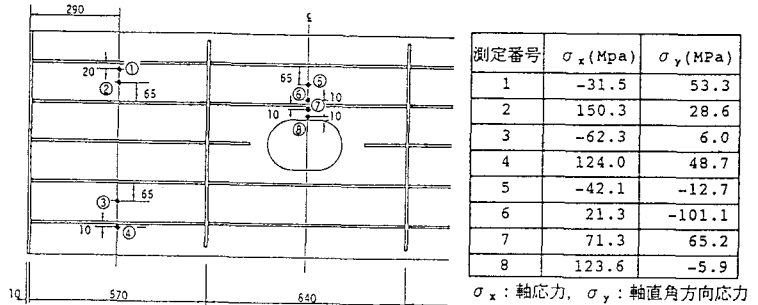


図-8 軸直角方向たわみ分布 (断面 f)

レートの板厚は板パネル厚の1.5倍
 としているが、発生するたわみの面
 からみるとこの規定は妥当といえる。

図-9からは、図-a)の板厚 $t=12$
 mmの場合には、ダブリング補強部
 の剛性が高く、この部分が剛体的挙
 動であることがわかる。逆に、板厚
 $t=4$ mm(図-c)では、あたかも
 補強されていないような挙動を呈し
 ている。図d)では負方向のたわみ
 が発生しているが、これは初期たわ
 みの影響による。

図-10にF断面(中央縦補剛材上)
 のたわみの軸方向分布の一例を示す。
 図では、横補剛材上がたわみの節と
 なっていないが、これは、図-2に示
 すようなディテールを採用したため、

横補剛材趾端部で板パネルが折れ曲がり、中央パネル全
 体が剛体移動するような挙動が現われたためと思われる。

3. 2 ひずみ

開孔による応力集中が最も大きくなるg断面(α , β
 を通る断面)の軸ひずみ分布を、図-11に示す。また、ダ
 ブリングプレートによって補強されている区間では、実
 験で得られた両表面のひずみの平均値が必ずしも膜ひず
 みをあたえるとはかぎらないが、図では両表面の平均を
 膜ひずみとした。

図-11から、ダブリングプレートを設けても孔周辺の応力集中をなくすることはできないことがわかる。ダブリ
 ングプレートの板厚が大きくなると孔縁の応力集中が緩和できると予想されるが、今回用いた程度の板厚では、
 応力集中を十分に緩和できていない。ただし、補強されていない供試体SHに比べ補強された場合は、断面積が
 増加するので全体的にひずみが小さくなる。なお、無孔補剛板SPは、ほぼ等ひずみ分布であった。

3. 3 崩壊性状および耐荷力

補強された有孔補剛板SHD8-L22-D15の載荷後の状態を、図-12に示す。また、図-13, 14にダブリングの
 長さの短いSHD8-L8-D15とダブリングプレートの板厚が薄いSHD4-L22-D27の崩壊後の状態を示す。今回

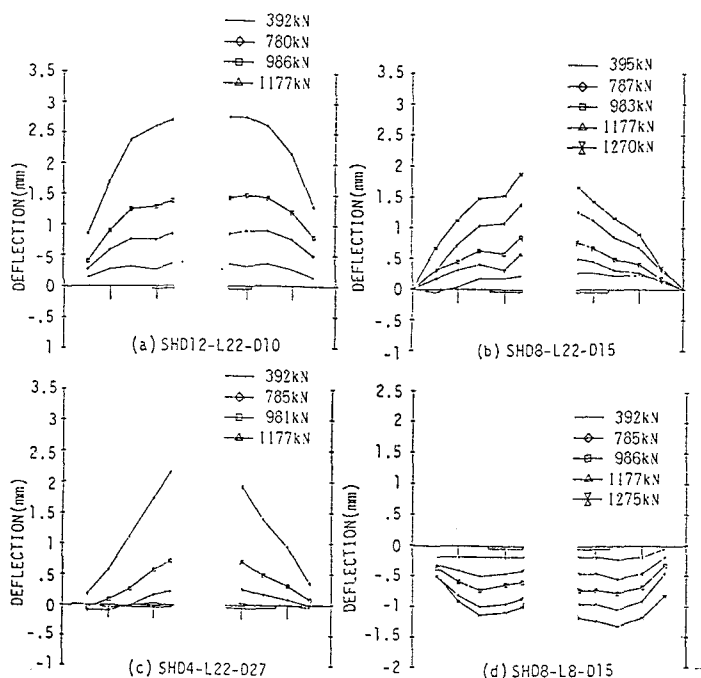


図-9 軸直角方向たわみ分布(断面f)

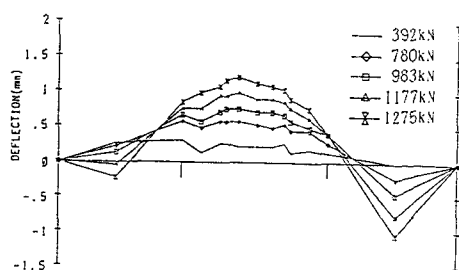


図-10 軸方向たわみ分布(断面F)

の実験では、供試体SHを除くどの供試体も中央パネルの縦補剛材が座屈して崩壊した。とくに図-12b)あるいは図-13に示すように、補強された有孔補剛板では、縦補剛材のスカラップの位置で座屈している。このことから、縦補剛材にスカラップを設けることは、終局耐荷力に対してして大きな弱点となることが予想される。実際にダブリング補強する場合、縦補剛材にスカラップを設けないようにするのがよいと考えられる。図-13では、供試体SHD8-L8-D15では、切断された中央の縦補剛材は、スカラップがないので、また切断により圧縮応力が小さいので、座屈していない。

図-12a)と図-14を比較すると、ダブリングプレートが薄い場合には、孔縁で最大残留たわみが発生しているのに対して、ダブリングプレートが8mmと厚くなると、ダブリングプレートの趾端部溶接線に沿って最大たわみが残っており、この溶接線で折れ曲がるような崩壊形式である。これは、縦補剛材がスカラップ位置で局部座屈を起こしていることと対応している。なお、ダブリングプレートが8mm以上の供試体は、すべて図-12a)のような崩壊形式であった。

得られた圧縮耐荷力を表-5に示す。表から、実験結果は概ね解析結果よりも高い耐荷力となっている。補強していないSHは、実験では側パネルが低い荷重で座屈崩壊した。

表-5から、SHD12-L22-D10を除くすべての補強された補剛板は、無孔補剛板と同程度あるいはそれ以上の耐荷力を有していることがわかる。発生するたわみを抑止するという意味では、板パネル厚の1.5倍程度のダブリングプレート厚が必要であるが、終局強度という観点からはこれよりも薄いダブリングプレートで十分であることを表は示している。

また、供試体SHD12-L22-D10は無孔補剛板よりも低い荷重で崩壊していることから、孔による欠損断面積を補う条件下で、ダブリングプレートの板厚を増加させる（この場合ダブリング幅が小さくなる）のは、必ずしも十分な補強効果は得られないといえる。

4. 弾塑性有限変位解析による塑性域の進展

実験結果の考察を補足するために、弾塑性有限変位解析を行った。解析は、吉田ら⁶⁻⁸⁾の三角形ハイブリッド要素を用い、座標更新法による増分解析とした。解析領域は、中央パネルのみを取り出し、対称性を考慮してその1/4領域とした。板パネルとダブリングプレートは、それぞれ別々の板として取り扱っている。縦補剛材は、板

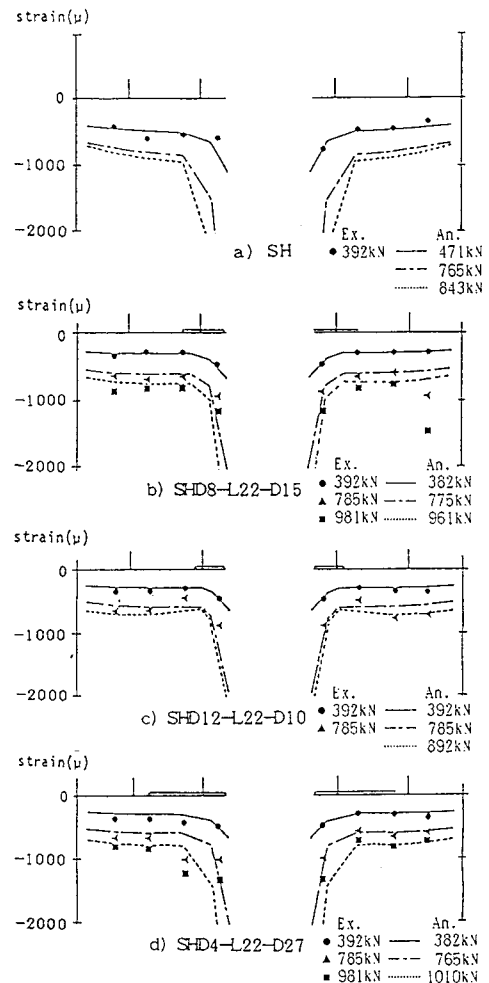
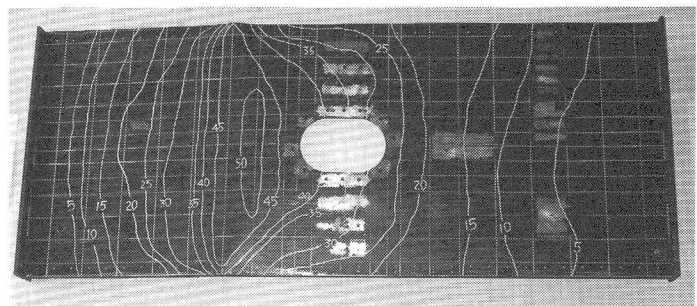


図-11 ひずみ分布

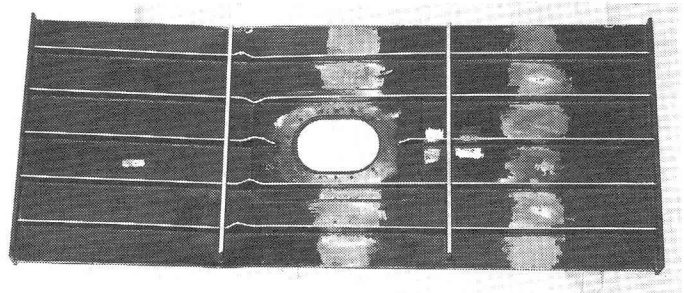
幅方向に4分割し、ダブリングプレート趾端部では縦補剛材に長方形のスカラップを設けた。また、補剛板パネル周辺の境界条件は、たわみに対して単純支持とした。

解析結果は、解析領域を中央パネルの1/4に限定したため、初期たわみや載荷位置の偏心量などを正確に解析に反映できなかったこと、板パネルとダブリングプレートは接触問題として解かれるべきであるが、単に別々の板として取り扱っているために両板が交差するなどの問題も現われ、実験の変位挙動を十分には表現できなかった。しかし、図-11に示すように膜ひずみについては実験結果と概ね一致しており、また塑性域の進展については一応の信頼性はあると考えられる。

図-15に各供試体の板パネルの塑性域の進展状況を示す。補強されていない有孔補剛板SP(図-a)参照)は、まず588kN(60tf)程度で応力集中により、開孔部の半円と直線の交点付近が降伏し、そこから補剛板パネルの隅角部に向かって塑性域が進展する。これに対してダブリング補強された場合には、たとえば図-b)あるいは図-d)からわかるように、784kN(80tf)程度の荷重で孔縁の応力集中により降伏するが、



a) 補剛材のない側



b) 補剛材のある側

図-12 載荷後の状態 (SHD8-L22-D15)

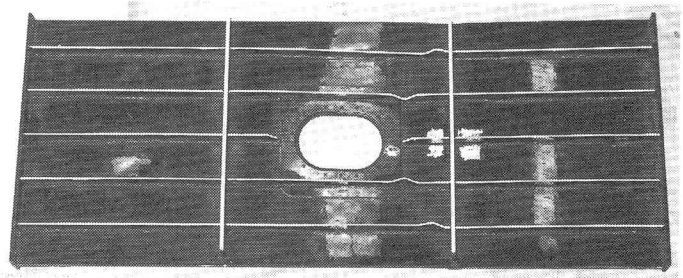


図-13 載荷後の状態 (SHD8-L8-D15)

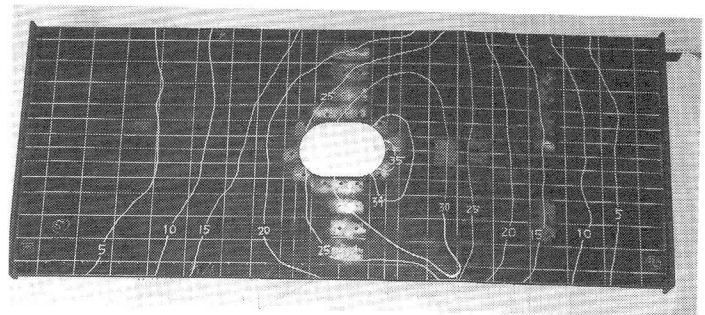


図-14 載荷後の状態 (SHD4-L22-D27)

そこからの塑性域は止まっている。そして新たにダブリングプレートの隅角部（矩形板の角の丸み部分）に塑性域が現われ、ここから補剛板パネルの隅角部に向かって塑性域が進展するのが特徴的である。一方、図-c）に示すように、ダブリングプレートの板厚が厚い場合には、ダブリングプレート隅角部から補剛板パネル隅角部に向かう塑性域の進展はなく、ダブリングプレート趾端と横補剛材の間の板パネルが降伏する。これは、剛体を金属に打ち込んだ様子に類似している。したがって、ダブリングプレートを過度に厚くするのは、孔縁の降伏を防止

表-5 圧縮耐荷力

供試体	P_u^{Ex}	P_u^{Th}	P_y	P_u^{Ex}/P_y
SH	593	910	1215	0.488
SP	1422	1141	1537	0.925
SHD 8-L22-D15	1456	959	1564	0.931
SHD 9-L22-D15	1372	1200	1606	0.855
SHD10-L22-D15	1372	1209	1633	0.840
SHD 4-L22-D27	1314	1098	1594	0.825
SHD12-L22-D10	1236	894	1545	0.800
SHD 8-L8-D15	1373	1066	1553	0.884

P_u^{Ex} : 実験結果(kN), P_u^{Th} : 解析結果(kN), $P_y = A\sigma_y$ (kN)
A : 孔による断面欠損を考慮した断面積, σ_y : 降伏応力

できるとはいえ、別の箇所に応力集中を発生させる危険性があることを、これらの図は示している。
なお、ダブリングプレート上を通る切断されていない縦補剛材には、ダブリング補強による応力が集中し、スカラップ付近が早期に降伏した。したがってスカラップを設けることについては、なお十分な検討が必要と思われる。

5. 結論

本研究は、終局強度に注目して、孔を有する補剛板の圧縮耐荷性状を調べ、ダブリングによる最適な補強方法を得ることを目的としたものである。この種の問題は、支配的パラメータが多く、きわめて複雑であり、またスケールエフェクトの問題もある。したがって本研究で行った範囲だけで最適な補強法を提案することは困難である。今後なお検討すべきことが多いのはいうまでもないが、今回の実験および解析から得られた知見をまとめれば次のようになる。

- (1) ダブリング補強にともなって設けられた縦補剛材のスカラップ部に座屈崩壊した。したがって、縦補剛材にスカラップを設けるのは弱点となる恐れがある。
- (2) 発生するたわみを抑ええるという意味では、厚いダブリングプレートによる補強が効果的であるが、終局強度という観点からは、たわみは大きくなるが、薄いダブリングでも無孔補剛板と同程度の強度を持たせること

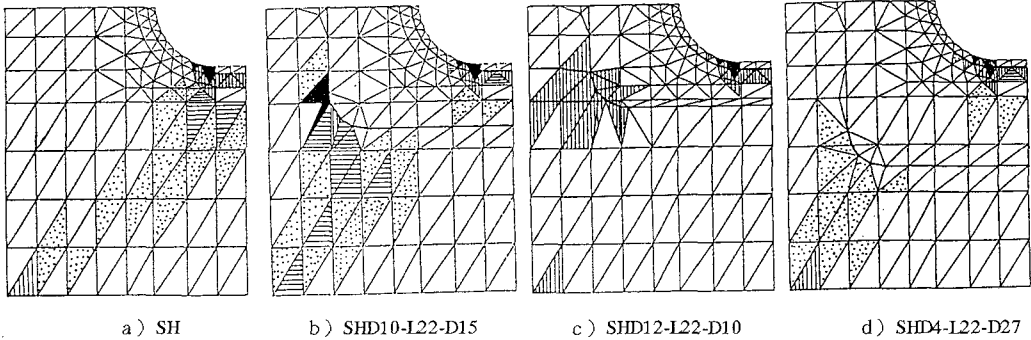


図-15 塑性域の進展

ができる。無孔補剛板と同程度のたわみに抑さえるには、ダブリング板厚は板パネル厚の1.5倍程度必要と思われる。

(3) 厚いダブリングプレートを用いると、孔縁の応力集中の緩和が期待できる。しかし過度に厚い場合には別の部位(補強していない板パネル)を降伏させる可能性がある。したがって、ダブリングプレートを厚くしたからといってより高い耐荷力が得られるとは必ずしもいえない。

(4) 今回採用した補強は、孔縁の応力集中をあまり緩和できなかったけれども、終局強度は無孔板と同程度かそれ以上の強度を持たせることができた。

(5) ダブリング補強を施すと、孔縁の塑性域の進展を抑制できる。この場合、塑性域は孔縁の他にダブリングプレートの隅角部から横補剛材隅角部に向かって進展する。

本研究にあたり、岸田允博(広島県)、吉田仁司(復権調査設計株式会社)の両君には多大な強力を頂いた。ここに記して感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 横強度小委員会WG: 開孔板の座屈と補強効果について, 日本造船学会誌, No.605, pp.550-560, Dec. 1979.
- 2) 河角省吾, 福池信義, 南美隆: 初期不整を有する平板構造の最終強度(その2) 有孔平板, 長崎大学工学部研究報告, No. 15, pp.141-150, Jul. 1976.
- 3) 阪神高速道路公団鋼構造検討委員会: 鋼構造物設計・施工に関する調査研究業務(その1) 報告書, 3. 4 扉付マンホールの補強構造, Mar. 1983.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, Feb. 1990.
- 5) 坂野昌弘, 古川正己, 竹之内博行, 西村俊夫: 実橋における溶接残留応力の測定, 橋梁と基礎, pp.27-30, Mar. 1986.
- 6) 吉田裕, 雨宮栄一郎, 増田陳紀: 立体構造解析のための薄板有限要素, 土木学会論文報告集, No. 211, pp.19-28, Mar. 1973.
- 7) 吉田裕, 増田陳紀, 森本剛, 広沢規行: 立体骨組構造の増分つり合い方程式とその解法, 土木学会論文報告集, No. 300, pp.21-31, Aug. 1980.
- 8) 吉田裕, 増田陳紀, 松田隆: 薄板で構成される立体構造の弾塑性・大変形離散化要素解析法, 土木学会論文報告集, No. 288, pp.41-55, Aug. 1979.
- 9) 有角形開孔平板の軸圧縮座屈強度, 東海大学紀要・工学部, Vol. 23, No.2, pp.115-122, 1984.
- 10) 吉浪康行: 補剛板の圧縮強度と設計の合理化に関する研究, 広島大学学位論文, Dec. 1988.
- 11) 奈良敏: 面内力を受ける鋼板および補剛板の極限強度に関する研究, 大阪大学学位論文, Dec. 1986.
- 12) 岸田允博, 藤枝洋二, 藤井堅: 孔を有する補剛板の圧縮耐荷力実験, 広島大学工学部研究報告, Vol. 39, No2, pp.141-150, Mar. 1991.

1992年9月21日受付