

開口を有する鋼製下地吊り天井の耐力に関する研究

EXPERIMENTAL STUDY ON STRENGTH OF STEEL FURRING SUSPENDED CEILING SYSTEM WITH OPENINGS

森田 泰弘*¹, 渡壁 守正*², 稲井 慎介*¹
Yasuhiro MORITA, Morimasa WATAKABE and Shinsuke INAI

In recent years, suspended ceilings were often damaged by earthquakes. Investigations on seismic capacity of ceilings have been conducted by some researchers. The new standard for ceilings against earthquakes requires a relatively large clearance around those to prevent collision with surrounding walls. On the other hand, there are still the needs for ceilings without clearance because of workability or room's uses. In this paper, mechanical properties of steel furring suspended ceiling system with openings for in-plane compression are clarified by static compression tests, using large scale specimen. Those properties are essential to evaluate the seismic capacity of ceilings without clearance.

The following results were obtained.

1. This strength decreases in proportional to the effective width decreases.
2. Buckling of the surface material accounts for majority of destruction first mode.
3. It was obtained that stress of the effective width is larger than the opening width from the detailed measurement.

Keywords : Ceiling System, Gap, Static Compression Tests, Opening, Buckling
 天井, ギャップ, 静的面内圧縮加力実験, 開口, 座屈

1. はじめに

吊り天井は従来から一般の建物で使用されており、2011 年の東日本大震災では、広範な地域で被害が報告されている（写真 - 1）。人的被害を防ぐうえで、天井落下を防止することは大切であり、天井の耐震性に関して検討を行うことは重要である。

被害を踏まえた技術基準として、2014 年 4 月 1 日に天井告示（平成 25 年度国交告第 771 号¹⁾等）が施行された。同告示では、特定天井を対象として、地震時の水平力を斜め部材で負担し、天井が周囲の壁等と衝突し、脆性的な破壊及び脱落が起きないように所定のクリアランスを設けることが規定されている（図 - 1）。

一方、従来の吊り天井は、隙間を設けない仕様が多くを占めている。また、室用途によっては、クリアランスを設けることは機能上好ましくない。そのため、隙間を設けない天井の需要は多く、その耐震性を検証することは、重要な課題である。

これまでに、隙間を有さない鋼製下地吊り天井の耐震性に関する実験的研究^{例えば 2,3)}を行っており、昨年度報告⁴⁾を行った。そこでは、天井面の耐力や、施工誤差等による天井と周囲の壁等との間に意図しない隙間（以下、ギャップ（写真 - 2）が生じることにより発生する地震時の壁と天井の衝突による衝撃力についての検討を行っている。その試験体の多くは、無開口のものであるが、実建物では、沢山の設備開口（例えば、写真 - 3）が設けられており、より

現実に即した耐震性を検討する上では、天井開口の影響について把握することが必要である。

そこで、本報では、天井面に開口を有した場合の静的面内加力実験を行った結果について報告する。

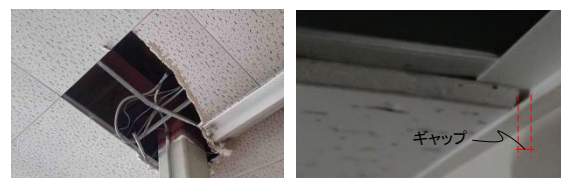


写真 - 1 地震被害例

写真 - 2 ギャップ

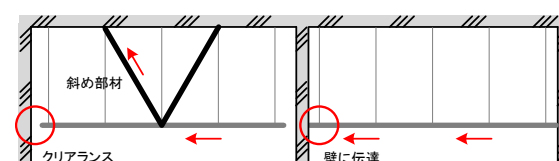
第771号告示
の考え方本報で検討する天井の
考え方

図 - 1 地震時水平力の伝達経路



写真 - 3 設備開口例

*1 戸田建設株式会社技術開発センター 修士（工学）

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

*2 広島工業大学 環境学部環境デザイン学科 教授 工学博士
（元戸田建設株式会社技術開発センター）

Hiroshima Institute of Technology, Prof., Dr.Eng.

2. 実験概要と実験方法

2.1 加力方法

実験装置と試験体配置を図-2に示す。実験は、図に示すように反力側を固定し、加力側から水平に載荷する方法により行った。加力側の境界条件はローラーとした。加力は、試験体を均等に載荷できるように、鉄骨梁を介して載荷した。

鉄骨梁は、十分な剛性を持たせるために、H150のH形鋼とし、リブプレート@500で設けた。加力のスケジュールは、単調載荷とし、加力の制御は、手動ポンプにより、天井面の水平変位、ジャッキに取り付けたロードセルの荷重を常時把握しながら行う方法とし、天井が破壊するまで行った。また、実験中に荷重が大きく落ち込んだ時点で加力を止めて試験体状況を観察した後に、再度載荷することとした。

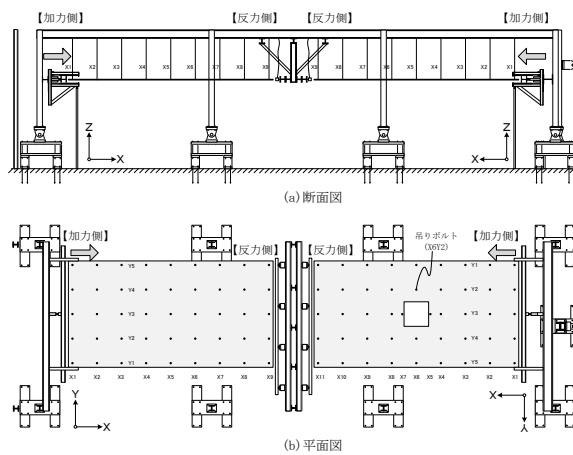


図-2 実験装置

2.2 試験体及び測定点

試験体の仕様は、公共建築工事標準仕様書⁵⁾に示す仕様に準拠した。野縁と野縁受けの接合部（以下、クリップ接合部）については、従来、用いられてきた片掛けクリップではなく、軒天井で用いられる耐風圧クリップ(写真-4)とした。クリップ接合部、ハンガー接合部、ジョイント部のビス留め補強は行っていない。天井端部の仕様は、写真-5に示すように、面材が加力、反力面と線的に接するよう、下地材を20mm程度短くしている。使用する面材は、せっこうボード9.5mm厚1重張りとした。

開口補強図を図-3に、開口補強例を写真-6に示す。開口補強は、開口周囲150mm以内に、野縁、野縁受けを追加し、最短の吊りボルトが開口縁から150mm以上離れている場合は増し吊りを行った。



写真-4 耐風圧クリップ

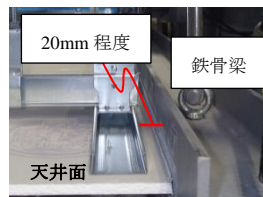


写真-5 端部仕様

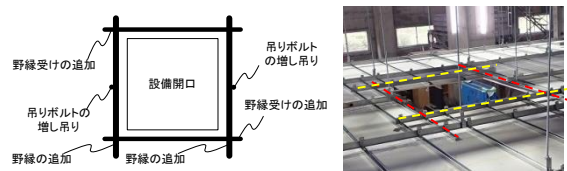


図-3 開口補強図

写真-6 開口補強例

表-1 試験体一覧

No	名称	開口数(ヶ所)	開口サイズ(mm) 幅方向×圧縮方向	幅方向	
				有効幅(mm)	有効幅率(%)
1	無開口	0	-	3900	100
2	小型開口 1(中央配置)	1	910×900	2990	77
3	小型開口 1(端部配置)	1	"	2990	77
4	小型開口 2	2	"	2080	53
5	小型開口 3(千鳥配置)	3	"	1170	30
6	小型開口 4	4	"	2080	53
7	長方形型開口	1	2000×900	1900	49
8	大型開口	1	2000×2000	1900	49

試験体の一覧を表-1に、試験体および測定点を図-4、試験体を写真-7に示す。表-1に示す有効幅とは、全幅長のうち、開口幅でない部分(開口を有していない天井幅)のこととする。また、図-4に示す数字は野縁受けのひずみ位置を、アルファベットはせっこうボードのひずみ位置を示している。

試験体の大きさは、平面寸法を7500*3900、天井懐を1500mmとし、加力方向は、全て野縁受け方向とした。パラメータは、開口の位置、形状、数とした。

計測項目は、載荷荷重、天井面加力方向変位の他、野縁受けのひずみ、せっこうボードのひずみとした。

天井変形は、天井面の絶対変位のうち、加力側2点と反力側2点の差分とした。また、天井変形を試

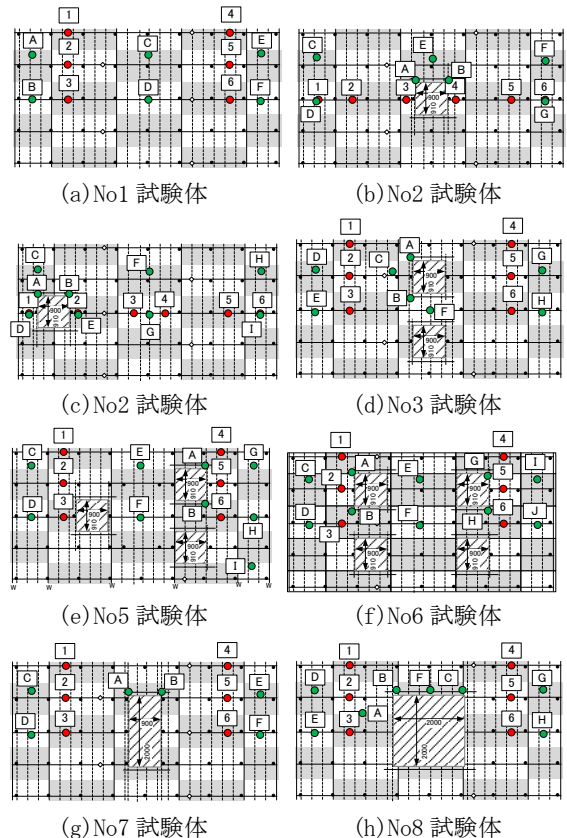


図-4 試験体及び計測図

験体長さで除したものをひずみとしている。

野縁受けのひずみは、図 - 5 に示すように、3 点 6ヶ所と 1 点 2ヶ所について測定を行った。後述するが、フランジ、ウェブ共に同程度のひずみ量だったため、ウェブのひずみをもとに力を算出している。

せっこうボードのひずみは、表面の紙面を削り取り、プリコート設けた上で、ゲージを貼って測定した。

3. 実験結果

3.1 一覧

実験結果の一覧を表 - 2 に、天井変形と最大荷重との関係を図 - 6 に、有効幅と最大荷重の関係を図 - 7 にそれぞれ示す。

図 - 6 より、天井ひずみが 1500 μ 以上において損傷が見られた。その際の単位幅荷重は、7.8~13.7kN/m だった。

図 - 7 より、有効幅で比較した場合、有効幅が小さくなるほどに最大荷重が低下する傾向が見られた。

同程度の有効幅でも、小型開口 2 と長方形開口のように、開口の位置やサイズが異なると、荷重が大きく低下していた。

3.2 荷重ひずみ関係の比較

荷重と天井のひずみの関係を図 - 8 に示す。なお、以後示す損傷荷重とは、加力開始後、第一に荷重が低下した際の直前の値とする。

小型開口の開口数での比較をした場合、無開口 (No1) は、最大荷重が 10.96kN/m であったのに対し、開口数が 1-3 口の最大荷重は、大きな値を示した。開口数 1 口、2 口は、剛性が同程度であり、3 開口については、25%程度小さかった。有効幅が 50%程度の小型開口 4 口 (No6) は同程度の最大荷重であり、剛性は、25%程度小さかった。

開口の位置で比較をした場合、中央 (No2) に比べ、端部 (No3) の試験体は、損傷荷重、最大荷重、剛性ともに小さな値だった。

開口の大きさを比較した場合、長方形型 (No7) と大型開口 (No8) の試験体では、最大荷重は大型化以降のほうが大きいものの剛性は同程度だった。

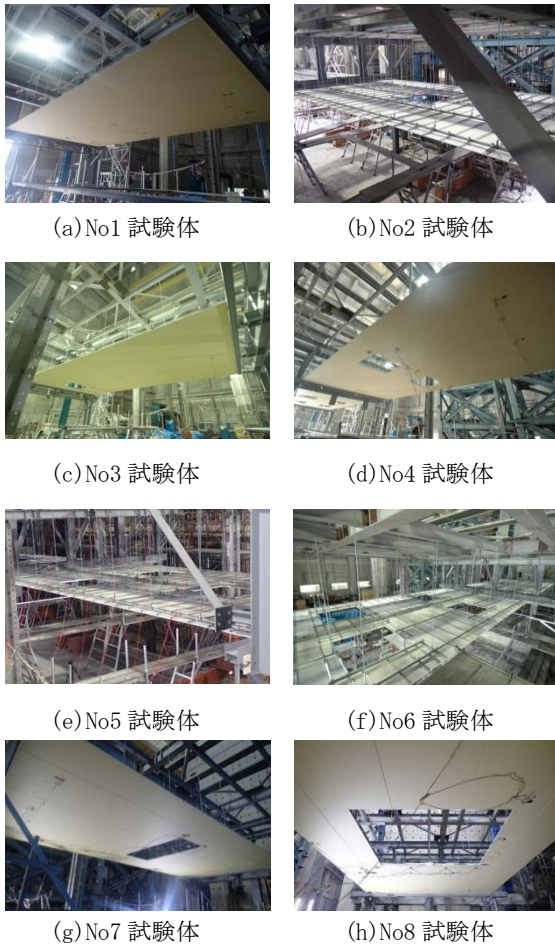


写真 - 7 試験体写真

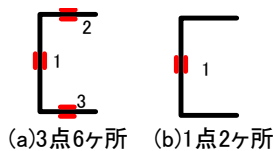


図 - 5 野縁受け測定図

表 - 2 実験結果一覧

No	名称	有効幅率 (%)	実験結果			最大荷重時 変形 (μ)	最大荷重 (kN)	単位幅最大 荷重(kN/m)	最大荷重時 破壊形態
			最大荷重時 変形 (μ)	最大荷重 (kN)	単位幅最大 荷重(kN/m)				
1	無開口	100	1673	42.8	10.96			反力側端部 面材産屈	
2	小型開口 1 (中央配置)	77	1895	53.4	13.69			反力側端部 面材産屈	
3	小型開口 1 (端部配置)	77	1651	44.0	11.28			反力側端部 面材産屈	
4	小型開口 2	53	2078	50.1	12.84			反力側端部 面材産屈	
5	小型開口 3 (千鳥配置)	30	1680	33.9	8.69			反力側端部 面材産屈	
6	小型開口 4	53	2164	43.0	11.02			加力側 面材産屈	
7	長方形型開口	49	1705	30.5	7.82			反力側端部 面材産屈	
8	大型開口	49	1755	37.6	9.64			開口周辺・端部 面材産屈	

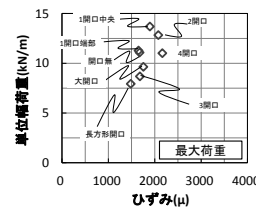


図-6 ひずみと単位幅荷重の関係

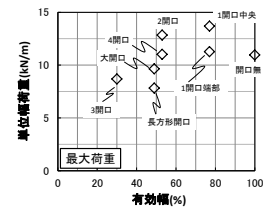
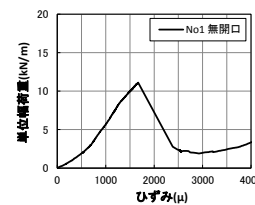
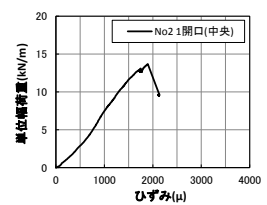


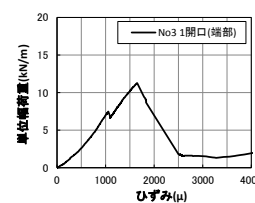
図-7 有効幅と単位幅荷重の関係



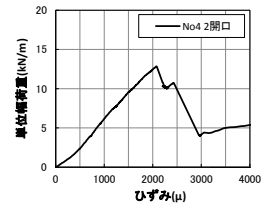
(a) No1 試験体



(b) No2 試験体



(c) No3 試験体



(d) No4 試験体

図 - 8 荷重-ひずみ関係 (その 1)

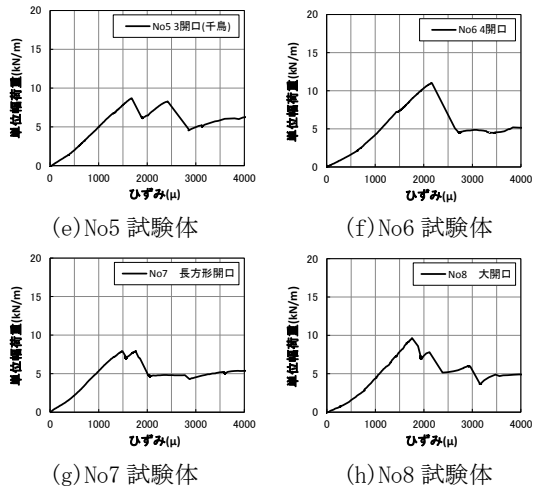


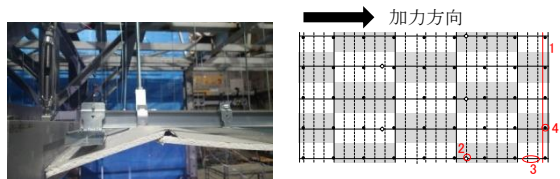
図 - 8 荷重-ひずみ関係 (その 2)

3.3 破壊性状

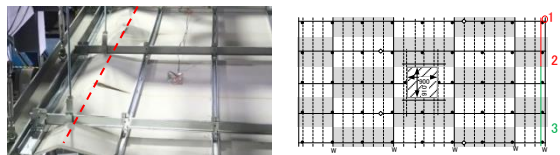
各試験体の破壊性状について図 - 9 に示す。平面図に示す番号は、破壊順序を示している。各試験体における破壊順序 1 は、損傷荷重時の破壊を表している。また、直線は面材の座屈を、枠線は、面材の落下・剥離を、点線は、下地材の変形を示している。

初期の荷重低下の破壊性状として、No.1~5, 7 では、端に位置する野縁-野縁間での面材の座屈だった。No.6 では、端部ではないものの、端寄りの野縁-野縁間での座屈だった。No.8 では、開口入隅部の 1 と、端部 2 の面材の座屈が、ほぼ同時に発生した。

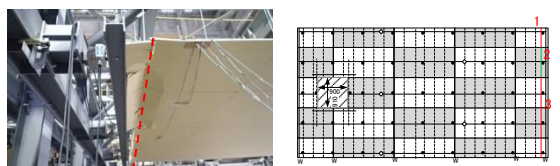
全体的な破壊の性状としては、有効幅の一部が損傷後、加力を行うと、再度荷重が増加するが、健全性を保っていた有効幅のボードが徐々に損傷し、荷重が低下した。全有効幅が損傷すると、変形のみが進展し、面材が脱落するなどの破壊が発生した。なお、面材の座屈の多くは、1 枚ごとに発生した。



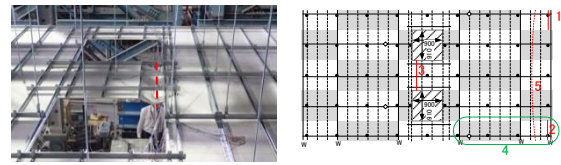
(a) No.1 試験体



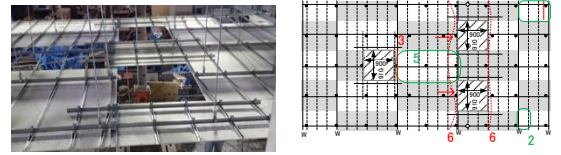
(b) No.2 試験体



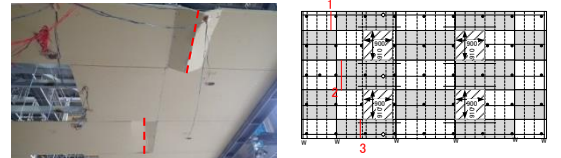
(c) No.3 試験体



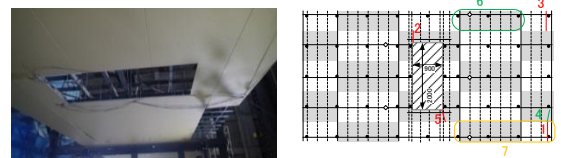
(d) No.4 試験体



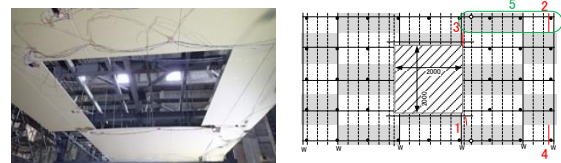
(e) No.5 試験体



(f) No.6 試験体



(g) No.7 試験体



(h) No.8 試験体

図 - 9 破壊性状

3.4 天井各部の測定点の関係

(1) 野縁受けの軸力

軸力の算定に用いたウェブのひずみとフランジのひずみの比較を図 - 10 に示す。ウェブ、フランジの軸力の合計値は、ウェブのひずみから求めた軸力とほぼ同値となったため、以降に示す軸力は、ウェブひずみから算定した。

各試験体の最大荷重時における野縁受けに作用する軸力を図 - 11 に示す。図中の凡例および番号は、図 - 4 に示す。

(a)より、無開口では、各野縁受けに作用する軸力にはばらつきはあるものの、加力側から反力側にかけて軸力が減少していた。これは、有開口試験体の有効幅上の野縁受けにおいても同様だった。

(b)より、中央に開口がある場合、どの計測点も 500N 以下で、その他の試験体と比較すると、小さかった。

(c)より、端部に開口がある場合、開口付近の野縁受けの軸力は小さく、端部の計測点 5 の軸力が大きかった。

(d)より、2 開口の場合には、開口のある Y4 の軸力が小さく、計測点 1,3 で 1900N 程度の軸力であった。

(e)より、3 開口の場合には、開口のない、計測点 1,4 が最も大きく、開口近傍の計測点 3,5 は小さかった。

(f)より、4 開口の場合には、有効幅の位置が同じである 2 開口の試験体(No4)と同様の結果となった。

(g)より、長方形型開口の場合には、加力方向に開口のない計測点 1,4 の軸力が大きかった。反力側の軸力は加力側より小さかった。

(h)より、有開口幅の負担率も小さく、野縁受けでの負担が小さい試験体であった。

全体的に、反力側では、軸力が小さくなっており、加力側、反力側で対称でなかった。

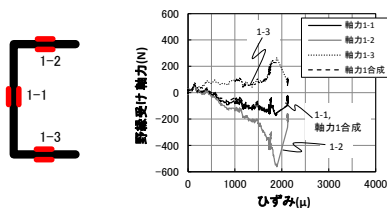


図 - 10 野縁受け測定点の軸力 (No2 計測点 1)

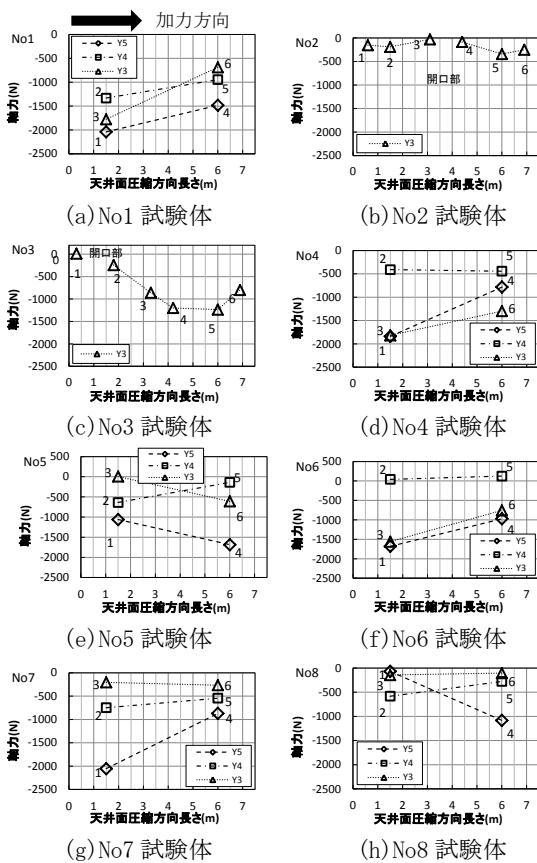


図 - 11 野縁受け軸力

(2) せっこうボードの軸応力

各試験体の最大荷重時におけるせっこうボードに作用する軸応力を図 - 12 に示す。記号は、図 - 4 に示す。また、軸応力算出時のせっこうボードのヤング係数は、 1225N/mm^2 としている。

(a)より、無開口では、どの測定点も 0.8N/mm^2 程度であり、均等に力が伝達されていた。

(b)より、小型開口が中央に 1 つある場合、開口幅上の D の軸応力は小さかった。開口周辺では、局所的な応力の増減は見られなかった。

(c)より、端部に開口がある場合、開口幅上を示す center 軸は、edge 軸に比べ小さな値となっており、幅方向端部に応力が集中する傾向が見られる。軸応力は、最大で 1.2N/mm^2 だった。

(d)より、2 開口の場合には、開口の corner 部分である A,B の応力と中央の F の応力が同程度であった。中央側での負担が大きいことが分かる。

(e)より、3 開口の場合には、有効幅上の edge1 軸で軸応力が大きく、開口幅上の計測点の軸応力は小さかった。

(f)より、4 開口の場合には、corner 部分の応力が最も大きく、有効幅の位置が同じである 2 開口の試験体と同様の結果となった。

(g)より、長方形型開口の場合には、開口近傍の計測点の軸応力が大きく、 2.5N/mm^2 程度であった。

(h)より、大型開口の場合、開口近傍の計測点の値が大きい。開口幅上の計測点は、応力負担が小さかった。

以上より、せっこうボードのひずみから軸応力を算出し、最大値の分布図を比較すると、有開口幅上では、ばらつきはあるものの、 $0.5\text{--}1.0\text{N/mm}^2$ 程度の軸応力であった。また、入隅部の測点では、最大 2.5N/mm^2 程度の軸応力であった。

野縁受けが加力側と反力側で力が異なるのに対し、せっこうボードではそのような傾向は見られなかった。

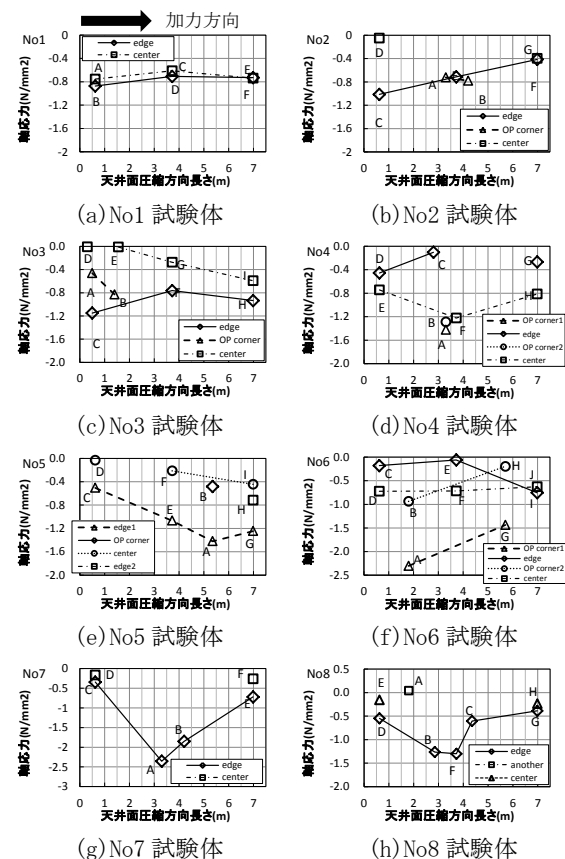


図 - 12 せっこうボード軸応力

5. まとめ

開口を有する吊り天井の静的面内圧縮実験について、報告を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 最大荷重と有効幅との関係で比較すると、同程度の開口でも最大荷重に大きな差があった。
- 2) 剛性は、有効幅に比例する傾向が見られた。
- 3) 初期の破壊性状の多くは、面材の座屈であった。
- 4) 天井の全有効幅が損傷するまでは、荷重の増減を繰り返した。
- 5) 全有効幅が損傷すると、変形のみ進展し、その後、下地の変形、面材の脱落へとつながった。
- 6) 最大荷重時の野縁受けに作用する軸力は、最大2000N程度だった。
- 7) 野縁受けの軸力は、加力側と反力側で異なる傾向が見られた。
- 8) 最大荷重時のせっこうボードの軸応力は、最大で2.5N/mm²程度であった。
- 9) せっこうボードの応力は、開口入隅で大きい傾向が見られた。

謝辞

本稿は、2015年日本建築学会大会学術講演梗概集に投稿した内容に、考察を追記したものである。一連の実験は一般社団法人建築性能基準推進協会の依頼をもとに実施したものであり、実験内容については国土技術政策総合研究所に設けられた天井技術基準原案作成STGにおいて、清家剛准教授、元結正次郎教授をはじめ、委員・協力委員の方々に議論頂いた。ここに記すとともに謝意を表します。

参考文献

- 1) 特定天井及び特定天井の構造耐力上安全な構造方法を定める件(平成25年度国土交通省告示第771号)、ほか、官報号外第170号、2013.08.05
- 2) 戸田建設株式会社、「吊り天井の耐震設計に係る基準の高度化に資する検討」、平成25年度基準整備促進事業S4報告書、2014.3
- 3) 石原直、稲井慎介、森田泰弘、渡壁守正、脇山善夫、喜々津仁密、「周囲の壁等に慣性力を負担させる水平な在来工法天井の耐震性に関する実験的研究 その1～その5」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造I、pp.977-986、2014.9
- 4) 稲井、渡壁、森田、「隙間を有さない在来工法天井の耐震性に関する実験的研究」、戸田建設技術研究報告第40号、2014.10
- 5) 社団法人公共建築協会、「公共建築工事標準仕様書(建築工事)平成22年版」、pp.197-198,308-312、2010.5
- 6) 船積宏章、元結正次郎、仁科雄太郎、吉川昇、「在来工法による鋼製下地天井の力学特性に関する研究 その1」、構造I、pp.911-3121、2015.9