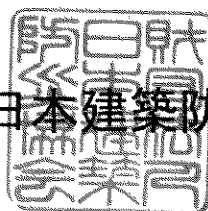


川崎シンフォニーホール震災被害調査

中間報告書

平成 23 年 8 月

財団法人 日本建築防災協会



川崎シンフォニーホール震災被害調査 中間報告書

平成 23 年 8 月
財団法人日本建築防災協会

1 はじめに

川崎シンフォニーホールは、平成 15 年に竣工した川崎市が所有する音楽ホールである。

このホールの天井が、平成 23 年 3 月 11 日午後 2 時 46 分に発生した東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)により、大面積にわたって落下するという被害を生じた。なお、この地点における震度は、気象庁震度階では、幸区は 5 弱で、川崎区は 5 強である。一方、(財)日本建築防災協会が入手した至近距離の地震波から計算によって得られた震度階としては 5 強(計測震度 5.1)であった。

この被害について、川崎市から(財)日本建築防災協会に震災被害の調査依頼があり、「川崎シンフォニーホール被害調査委員会」が設置された。本中間報告は、この委員会の現時点での調査・検討結果を報告するものであり、今後さらに調査・検討を加えて、最終報告をまとめることにしている。したがって、最終報告では、内容に変更の可能性がある。

2 建物の概要

この建物は、施設全体としては事務所、店舗、ホール、駐車場を含む、複合建築物である。当該天井があるホール棟は、一部鉄骨鉄筋コンクリート造の鉄骨造で、地下 2 階、地上 8 階である。ホールは、4 階以上にある。

このホールには、舞台の上だけでなく客席の上も含め、ほぼ全面にわたって、鉄骨造の小屋トラスから吊られた重量鉄骨製のブドウ棚がある。このブドウ棚の周辺は、躯体の鉄骨に接合されており、ブドウ棚は、構造的には躯体と一体となっていると見なせる。このブドウ棚には、舞台・音響装置用の機械が載っており、部分的にスノコが張られているほか、キャットウォークも載っている。

3 天井の特徴と揺れ方・荷重への影響

この天井は、上記の重量鉄骨製のブドウ棚から吊られた「吊り天井」である。天井面は、凹凸の多い複雑な形状をしている。天井下地は軽量鉄骨製であり、大部分で 2 段吊りになっている。すなわち、1 次下地(リップ溝形鋼)ー吊りボルトー2 次下地(同)ー吊りボルトー野縁受けー野縁ー天井板、という構成になっている。ただし、天井面の複雑な形状に合わせるため、吊りボルトの長さにも長短があり、かつ、接合方法にも複数のものが使われている。

部材(リップ溝形鋼、吊りボルト)は、在来構法の天井に用いられる天井専用の部材(JISA6517 建築用構成材(壁・天井)によるもの)ではなく、概してそれよりも断面の大きい一般の軽量形鋼やねじ切りをした棒鋼が使われている。また接合部のうち、吊元用のフック状金具は汎用の部品、ハンガーは既製品、クリップは特注品である。また、1 次下地と 2 次下地の間の吊り

ボルトの中間に、防振ゴムが入っている。

以上の下地構成で、2段吊りになっていること、1次下地としてリップ溝形鋼を用いていること、防振ゴムが入っていることは、かならずしも一般的ではない。すなわち、多くの天井では、1段吊りであり、1次下地としては（小屋トラスなどにつけられた）小梁を利用し、防振ゴムは使わない。

天井板は無機系のボードである繊維混入石膏板（商品名エフジーボード）であり、天井板の材料としては特殊なものではない。

この天井は、過去の地震や今回の地震で落下した体育館などの天井と比較すると、とくに次の2点に特徴がある。

- ① 天井面の凹凸が多い
- ② 天井板が重い

これらの点は、いずれも音響効果を高めるためである。

この天井は、中央部は全体として高くなっており、高天井と呼ばれる。また、外側環状部は、白色と黒色に塗り分けられた二重環で構成されており、それぞれ白天井、黒天井と呼ばれる。

以上のような特徴を持つこの天井の地震時の揺れを推測すると、次のようになる。

まず①の天井面の凹凸が多い、すなわちその形状が複雑なことが、地震時に必然的に複雑な揺れ方をする理由のひとつになったと思われる。

すなわち、天井面が一体として揺れたのではなく、部分によって異なる揺れ方をしたと思われる。平面的に張られた天井であれば、全面が一体となって揺れる可能性があるが、この天井のように、断面がいわばアコーディオン状になっていると、その折れ曲がり部分で角度の変化が生じる可能性があり、そのために部分によって異なる揺れ方になることが考えられる。

もうひとつは、吊り長さが場所によって異なるため、下地の部材や接合部に不均一な力が働いたであろうことが推測される。たとえば、吊り長さが短い吊りボルトは、揺れたときの角度が大きくなり、その吊元には、ほかの吊元と比較して、大きな水平方向の力がかかるからである。

次に②の天井板の重さについてであるが、この天井はほぼ全面、厚さ 8mm の繊維混入石膏板 (13.6kg/m^2) を5枚張りしたもの (68kg/m^2) が使われており、軽量鉄骨の下地 ($15\text{--}20\text{kg/m}^2$) を含めて、 1m^2 あたり約 100kg 弱になる。これは一般の体育館などの天井(天井板だけで 20kg/m^2 弱、下地と合わせて 30kg 程度/ m^2) の場合と比較して、数倍重い。その分だけ、長期鉛直荷重が大きく、かつ地震力も大きくなる可能性がある。

なお、1次下地からの吊りボルトの配置は、標準的なところで2方向のピッチがそれぞれ 1.2m と 1.5m であり、支配面積は約 1.80m^2 である。したがって、吊りボルト1本にかかる長期の引っ張り力は、 180kg 弱になる。

4 「技術的助言」における耐震上の配慮との関係

天井の耐震性については、国交省から複数回（平成 13,15,17 年）にわたって出された技術的助言があるが、その内容との主な違いは、次の通りである。

- ① 「斜め振れ止め」の数が少ない。反射板の上の部分（未落下）には、ほとんど見あたら

ない。ただし、ステージ下手の白黒天井（未落下）の部分では、図面に斜め振れ止めが描かれており、かつその通りに施工されている。したがって、設計段階では、反射板の上の部分を含め広範囲にわたって、斜め振れ止めがほとんど入っていなかったと思われる。

このように斜め振れ止めが少ないことは、それによる天井の水平方向の揺れを拘束する効果が少なかったと推測される。

- ② 天井周辺と壁との間にクリアランス（隙間）がない。これは、音響効果を確保するためであると思われる。

このことに関して、耐震上は壁とのとりあいはどうなっているかが問題である。この部分のおさまりは、天井端部が壁に突きつけになっているだけで、直接なんらかの接合具で接合されていない。したがって、地震時には、壁面と平行方向には、ずれを生じる可能性がある。また、壁面と直角方向には、押しの向きには壁による抵抗力をうけるが、引きの向きには抵抗なく離れる可能性がある。

このため、天井端部に働く壁からの水平反力は、圧縮力のみであり、天井の揺れを複雑にしたと考えられる。

5 天井落下のプロセスとそれをもたらした揺れ

この天井の落下については、落下中にその様子を見た人はいない。また、落下後の状況からも、全体が一気に落ちたのか、どこかの場所（天井伏図上の位置）から落下が始まり、それから連鎖的に落下したのかなどを推測することも困難である。しかし、天井の落下範囲が広範囲にわたっており、ある場所一カ所だけから始まった落下が、順次広がって、落下部分全体に及んだとは考えにくい。したがって、複数の場所から落下が始まり、落下がその周辺に及び、結果的に大面積の天井が落下したと考えられる。

このことは、ある特別な場所にだけに問題があったわけではないことを示唆しているように思われる。

この地震の時に天井面が水平方向に大きく揺れたであろうことに関しては、直接、間接にその証拠がある。

- ① 天井に載っているスピーカボックスの側面に、ブドウ棚（水平方向には躯体の小屋トラスとほぼ同じように揺れたと推定される）に固定されているキャットウォークの手すりのとめつけ部によってつけられたとみられる擦過傷（長さ約 20cm）があり、天井とブドウ棚の間に相対的な動きがあったことが推定される。また、別の場所でも、類似の現象が見られる。
- ② 落下した天井の元の位置付近の壁の下地材に、天井がぶつかった痕跡が見られる。
- ③ キャットウォーク直下の吊り長さのごく短いところで、（溶接による）接合部分（吊元）が切れている。
- ④ 落下していない部分（舞台下手の高天井など）の天井と壁との間に、地震前にはなかったはずの隙間が見られる。
- ⑤ 地震応答解析でも、6. で述べるように、揺れが大きかったという結果が得られている。

次に、上下振動がどのくらいあったかについて、被害状況からは、破壊のおもな原因が上下振動であったという形跡は見あたらないが、壁面から離れたところで天井面の上下振動がどうであったかは、明らかでない。

なお、天井面と、反射板やバトンのワイヤとの相互干渉については、天井の揺れに大きな影響はなかったと考えられる。

また、空調ダクトなどの設備配管類は天井とは独立に吊られているが、吹き出し口は、天井といっしょに落下しているものがある。しかし、設備配管類が先に壊れて天井を巻き添えにして落下したという形跡はない。

6 地震応答解析による天井の揺れ

この建物に関する振動解析結果によれば、この建物の X（長辺、東西）方向と Y（短辺、南北）方向の 1 次固有周期は、いずれも 1 秒程度であり、これらは、常時微動測定の結果とも矛盾しない。

他方、この地震の時に、約 1km 離れた宮前小学校で得られた地震動記録から、この建物位置での地震動を計算した結果によると、最大加速度は、東西（X、長辺方向）・南北（Y、短辺方向）の両方向ともに、約 150 ガル前後である。

この計算による地震動を用いて、この建物の地震応答解析を行った結果、小屋トラス部分の X、Y 両方向の最大加速度は、いずれも 500 ガル程度である。

次に、この小屋トラスにおける応答波形（ブドウ棚もほぼ同じはず）について、フロアレスポンススペクトル（減衰定数 $h=5\%$ ）を計算すると、1 秒前後で 2000 ガルから 3000 ガルの応答となる。0.5 秒前後でも、1000 ガルから 1500 ガルである。

この天井に固有周期といえるものがあるかどうかや、減衰定数がいくらであるかは、わからないとはいえ、この天井面には、水平方向に $1g$ （980 ガル）を越える加速度がかかった可能性がある。

次に、上下動について、この地震によるこの建物位置での上下動も、水平動と同様の手法で計算されているが、それによると、最大加速度は 100 ガル弱である。

この上下動によって、この建物が上下振動し、小屋トラス・ブドウ棚、さらには天井面が上下振動したとして、その天井面の上下方向の最大加速度を概算してみると、せいぜい $1g$ 未満であると推測されるが、その詳しい計算は今後の課題である。

7 天井の破壊部分の特定

落下した天井の下地の観察結果から、次のようなことがいえる。

- ① 落下した天井の大部分で、吊りボルトを 1 次下地のリップ溝形鋼に引っかける接合部品（フック状金具、商品名「つりっこ 2 号」）が変形し、この部分で分離して、天井が落下している。また、1 次下地である C 形鋼のリップが、フック状金具がついていたところで変形しているものもある。したがって、この部分にかかった力に対して、この接合部品の強度が十分でなかった可能性が高い。

- ② 上記の部分以外にも、下記のような接合部分で分離が見られる。
- ・後付ピース（先行ピースが工場溶接で取り付けられているのに対し、現場溶接で取り付けられたと思われるもの）が、ブドウ棚の鉄骨下弦材から分離
 - ・1次下地のリップ溝形鋼が、先行ピースから分離
 - ・1次下地、2次下地のリップ溝形鋼の継ぎ目で分離
- ③ また、天井が落下していない部分の下地に関して、次のような部材・部品の変形が見られる。
- ・1次または2次下地のリップ溝形鋼の変形（たわみ、ねじれ）
- 以上から、いずれにしても、接合部にかかった力が大きかったことが推測される。
このことは、フック状金具の強度不足のみが天井落下の原因でないことを示唆している。

8 フック状金具の強度

先に述べたように、この落下した天井を見ると、吊元のフック状金具（つりっこ2号）が変形して、この部分で分離しているものが非常に多い。したがって、この金具の強度が問題になる。ただし現時点では、この金具を含む部品類の採取を行ったばかりであり、まだ強度試験を行っていない。そこで、当時のカタログに記載された当該金具「つりっこ2号」の許容静荷重等を参考に、この金具の強度を考察する。

まず、長期鉛直荷重に対する検討は、次のようになる。

標準的なピッチで配置されている吊りボルト 1 本にかかる長期鉛直荷重は、前述のように 180kg 弱である。

他方、この天井の金具のうち、「つりっこ2号」というフック状金具の 2003 年版のカタログによると、その許容荷重の類は、以下の通りである。

許容静荷重（安全荷重）	180kg
最大荷重	510kg

これらの数値の意味するものや決定根拠は明らかでないが、許容静荷重は最大荷重の約 1/3 であり、建築構造でいう許容耐力と見なせそうである。

ここでこの許容耐力相当の値 180kg と上記の長期鉛直荷重 180kg 弱とを単純に比較すれば、かろうじて「OK（荷重が許容荷重より小さい）」となる。なお、以上の検討は、吊りボルトの間隔が標準的なピッチで、かつ天井面が水平である場合についてであることに留意する必要がある。

次に地震時には、これに水平振動による慣性力と、上下振動による慣性力とが加わる。それらを合成した力がいくらになるかは、現在検討中であるが、水平力が加わった場合には、この「つりっこ2号」に、鉛直方向の力だけでなく、水平方向の力も加わる。

事実、「つりっこ2号」の爪の変形には、真下に引っ張られたものだけではなく、斜め下に引っ張られてはずれた（あるいは切れた）とみられるものがあり、上記の最大荷重まで耐力を発揮できない可能性が十分にある。

なお、上記のカタログには、「つりっこ2号」について、《注意事項》として、「・・・、

上下左右動荷重の作用する場所は、落下するおそれがありますので、使用しないでください」との記述がある。

9 施工時点での耐震性の検討

施工中における設計・施工関係者による音響工事品質委員会のホール・練習室遮音防振幹事会で、この吊り天井の耐震性も複数回議論されたとの記録がある。もっとも詳しい議論は、第11回幹事会（2003.4.3）で行われており、そこに出されたと思われる「ホール天井下地耐震補強計算書（2003.3.11 付け作成）」の要点は次の通りである。

- ① 天井が建物と共振しないようにするために、天井の固有周期（水平）が建物の固有周期の半分以下になるようにする。
- ② 天井の固有周期を求めるための剛性を、斜め振れ止めの伸縮だけで評価する（つまり、吊りボルトの伸縮や接合部の変形は考慮しない）という前提で算出した値で検討した結果、上記①を満足するための斜め振れ止めの量は、非常に少なくてもよいとの結論を得ている。
- ③ 斜め振れ止めの直径を9Φとして、水平震度1.5と鉛直震度0.42にもつように、斜め振れ止め間隔を決めている。結果は、ピッチ3360mmである。
- ④ その結果、天井の固有周期は、十分に短くなることを確認した。

以上の「計算書」と「幹事会議事録」とから推測する限り、天井下地を構成する部材や接合部について、必要十分な強度計算が行われたとは考えられない。

10 むすび

東北地方太平洋沖地震によって、この川崎シンフォニーホールの建物本体ならびにそれに剛強に緊結されているブドウ棚には、何らの被害がなかったにもかかわらず、その天井のみが大面積にわたって落下した原因について、現時点までの検討結果では、次のように言える。

この天井は、天井面の凹凸が多いために複雑な揺れをしたであろうこと、また、質量が大きいために地震力も大きかったであろうことが推測され、ひいては天井構成部材・部品に大きな力がかかったのに対して、その部材、部品の耐力が相対的に十分でなかった。

とくに、吊元のフック状金具（つりっこ2号）の耐力が不足していたと思われるが、もしその耐力が十分でも、ほかの部分で壊れた可能性も残っている。

今後は、以上の点を中心に、事実関係の確認、とくに定量的な検討を行うつもりである。

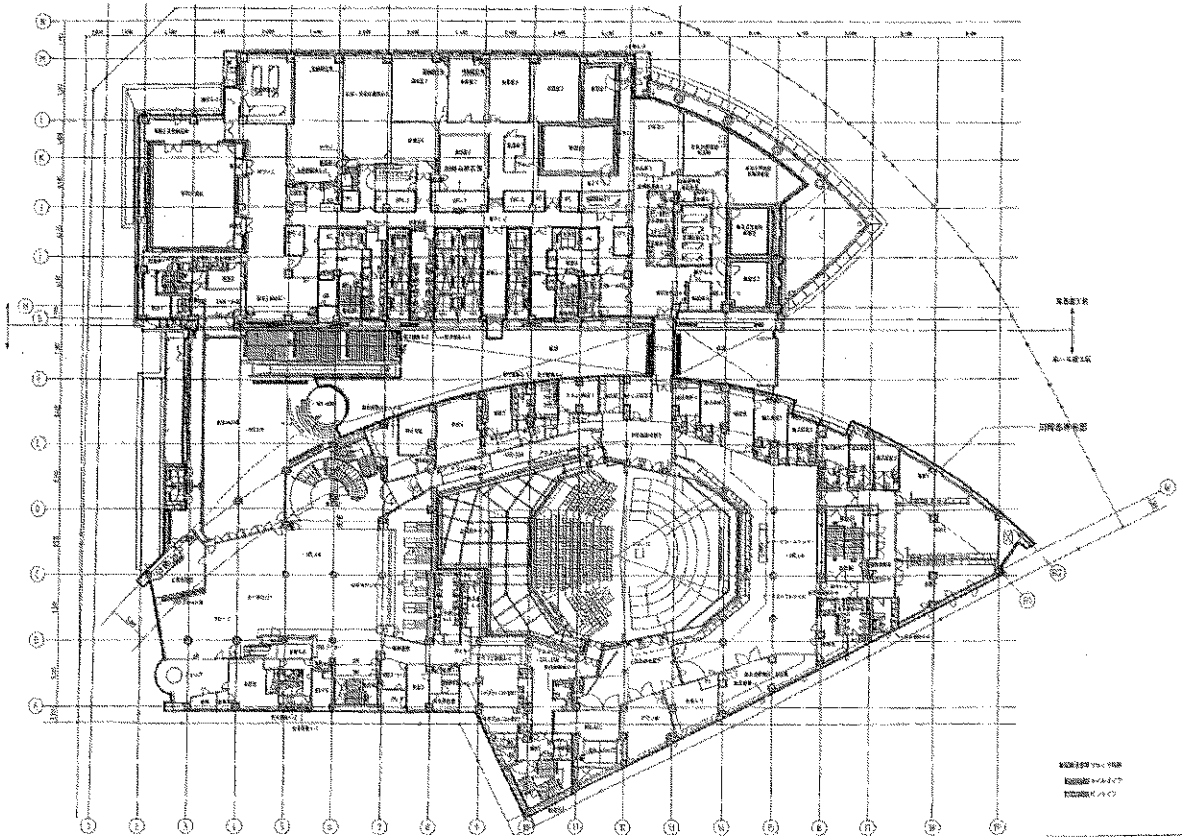


図1 平面図

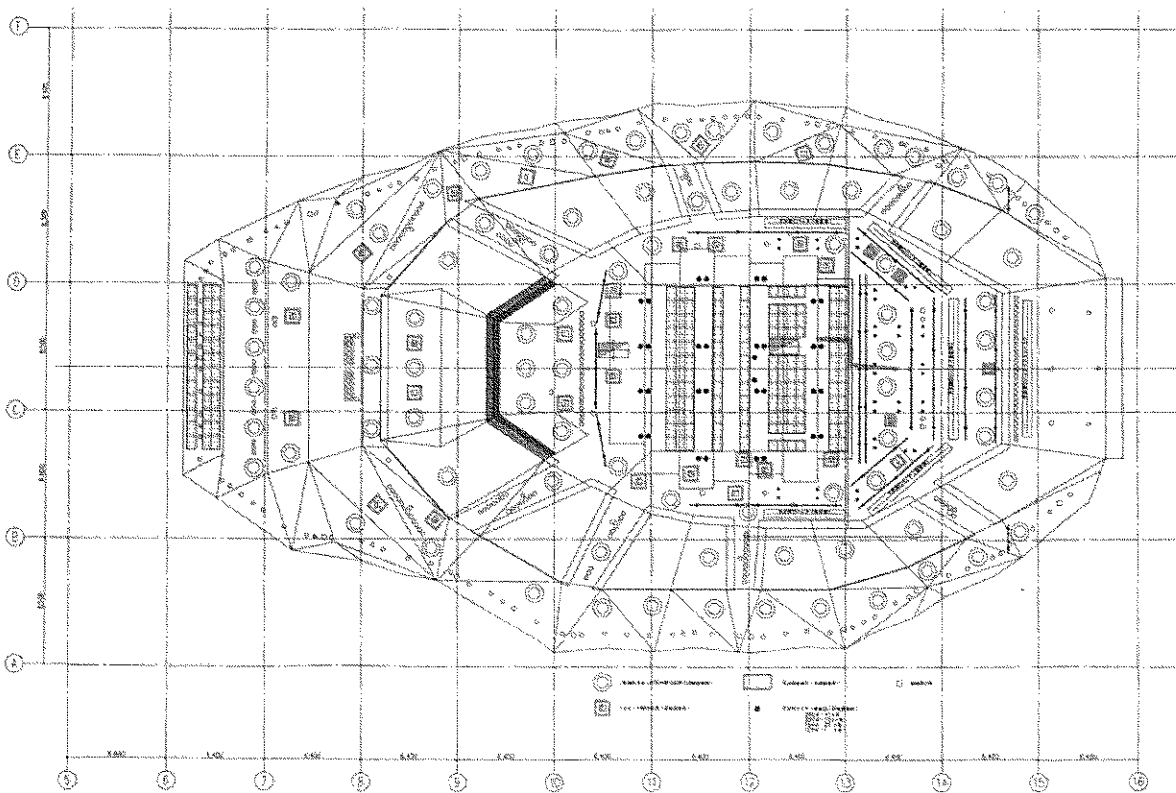


図2 ホール天井伏図

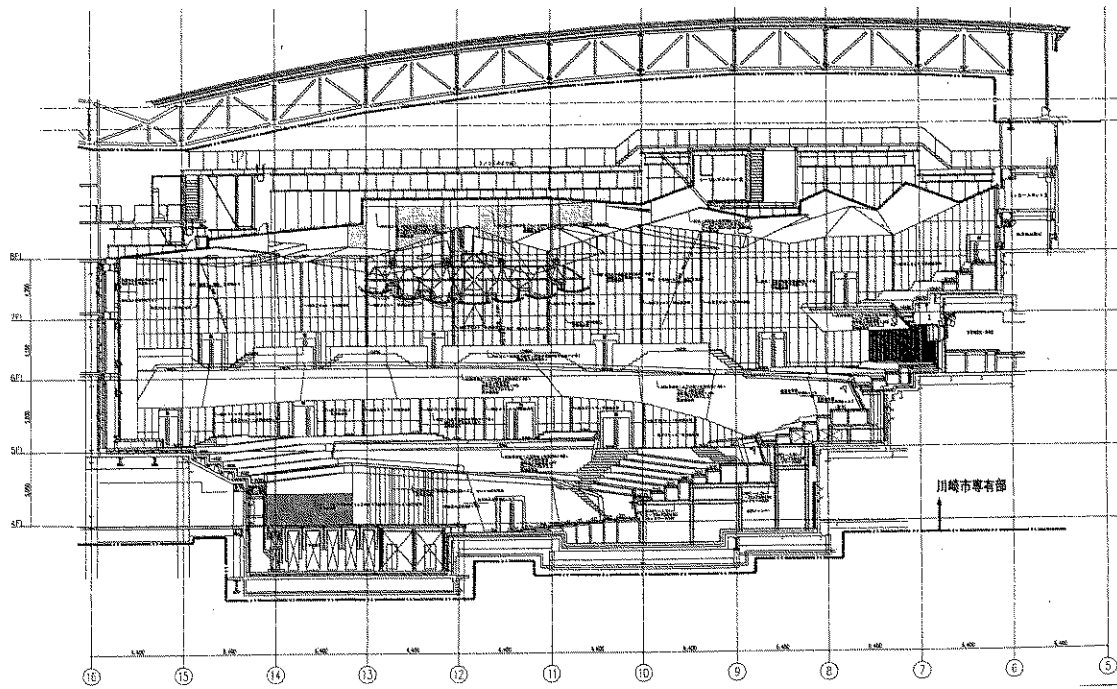


図3 ホール断面図（長辺方向）

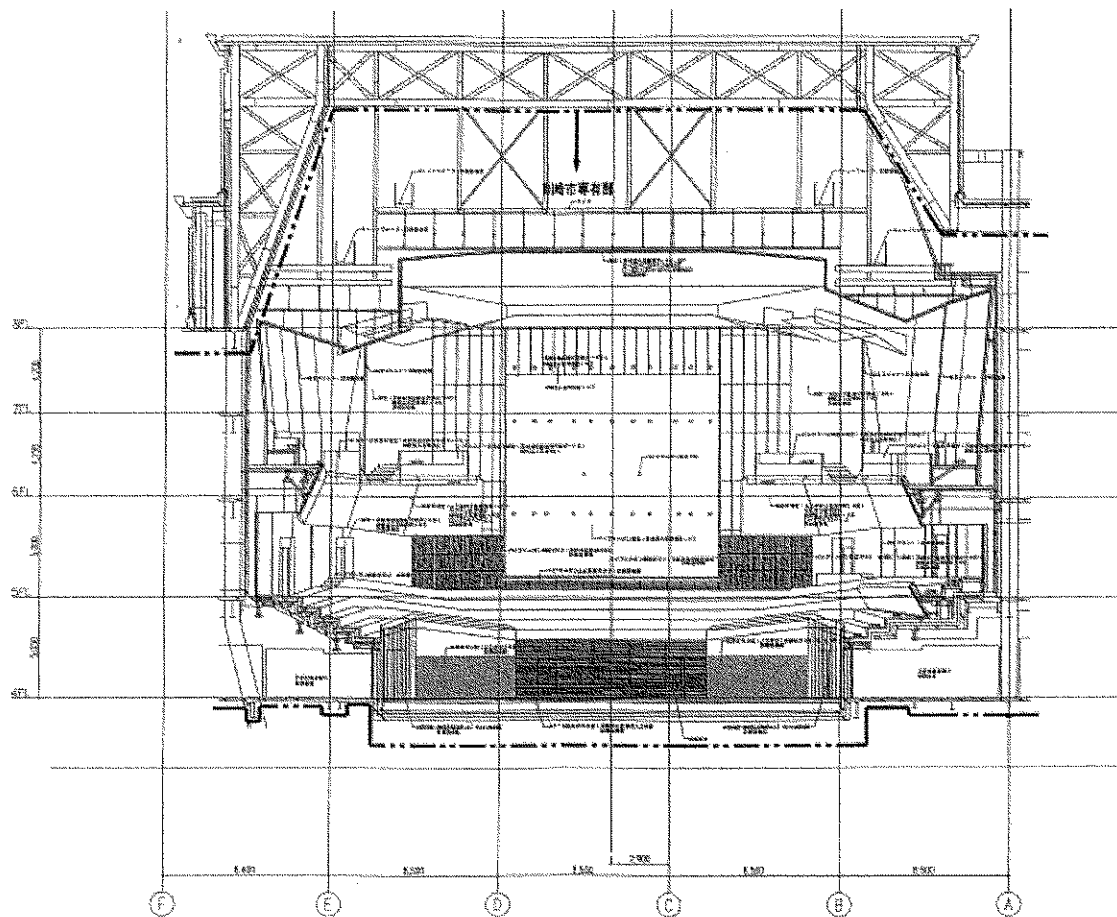
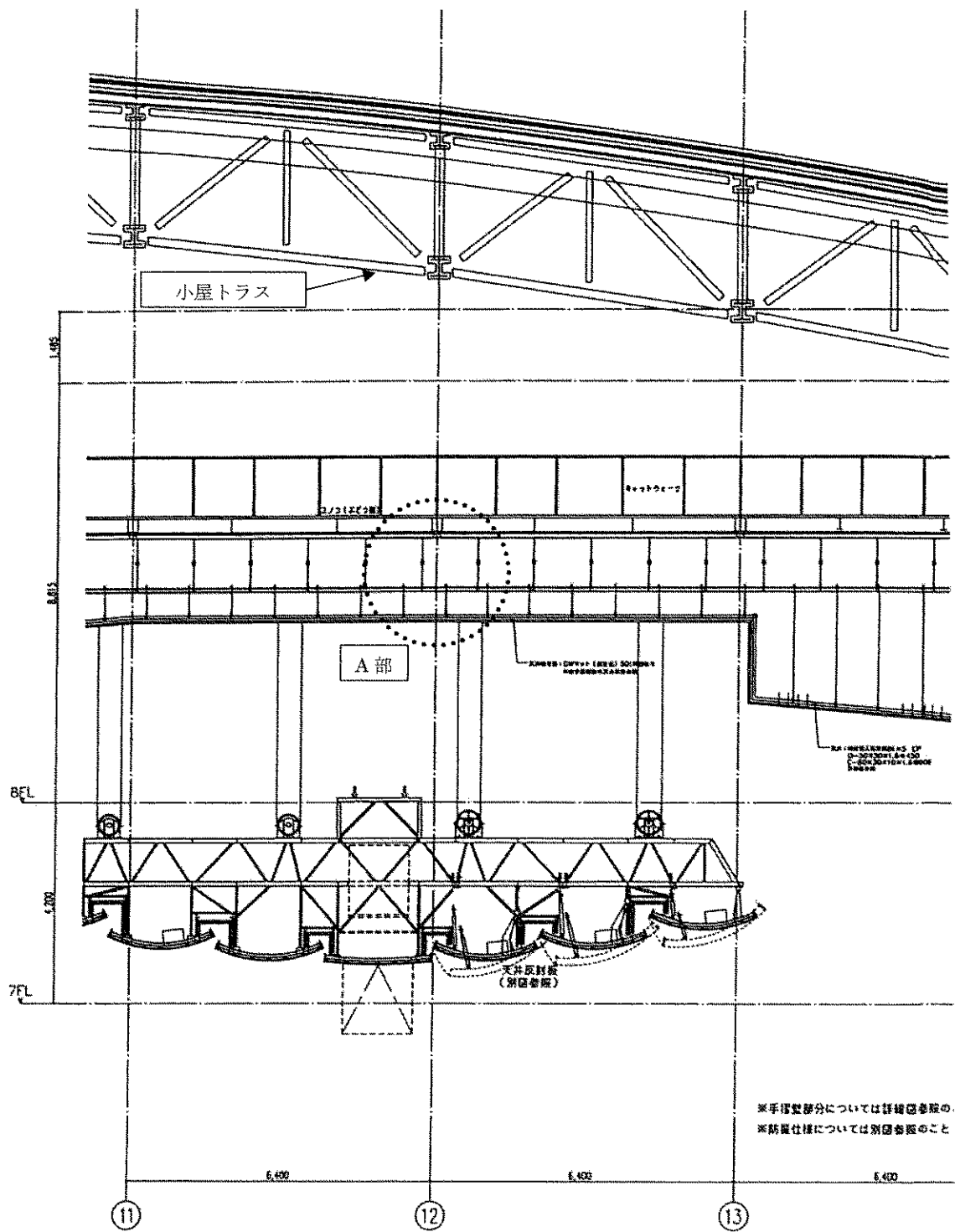
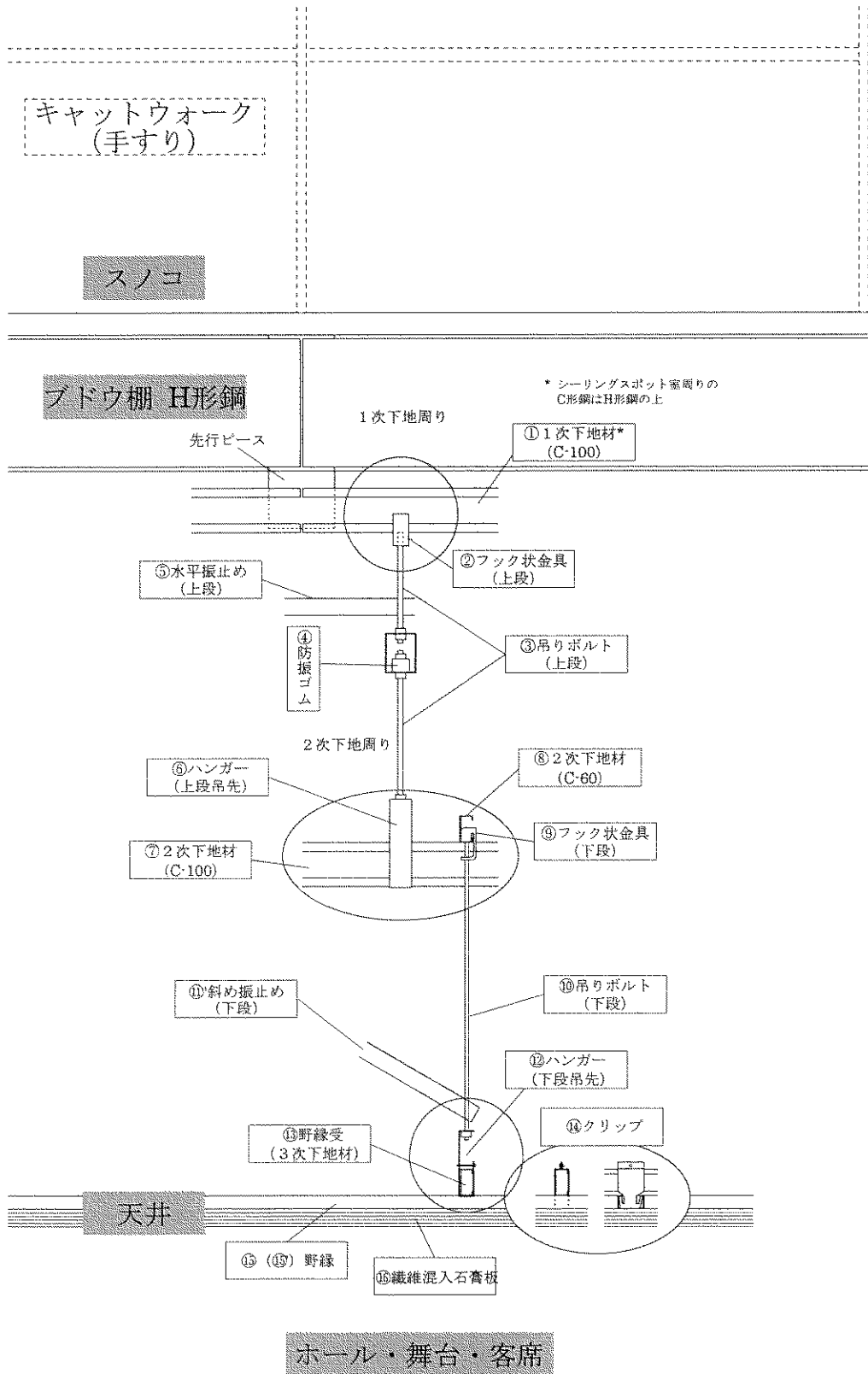


図4 ホール断面図（短辺方向）



「建築 6208 : ホール断面詳細図・4」(表 1.5.1 資料 No.3 より抜粋) に加筆

図 5-1 天井下地の構成 (1) 小屋トラス・ブドウ棚・天井下地の位置関係



注) ホール長辺方向の⑬通り付近 (A部) を想定して作図。

図 5-2 天井下地の構成 (つづき) (2) 天井下地材の位置関係



写真1 ホール内部の天井落下状況（舞台下手側入口付近より 撮影 2011.3.23）



1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27. 28. 29. 30. 31. 32. 33. 34. 35. 36. 37. 38. 39. 40. 41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48. 49. 50. 51. 52. 53. 54. 55. 56. 57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64. 65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72. 73. 74. 75. 76. 77. 78. 79. 80. 81. 82. 83. 84. 85. 86. 87. 88. 89. 90. 91. 92. 93. 94. 95. 96. 97. 98. 99. 100.