

ベルリン会議場の屋根の崩壊事故について

Berlin Congress Hall Collapse

俣野善治*

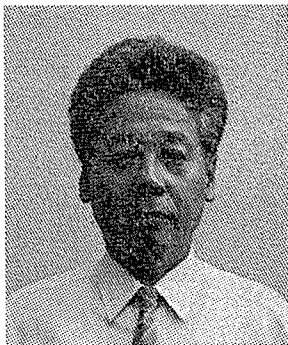
1. はじめに

今から5年前の1980年5月21日に西ベルリンのティアガルテンで、会議場のコンクリート造吊り屋根が部分崩壊した。屋根構造内部に潜んでいた欠陥による突発事故であった。

事故原因の調査は、会議場経営者の委託を受けた J. Schlaich (シュトゥットガルト大学) らのグループと、検事局の委託を受けた A. Plank らの連邦材料試験所 (BAM) のグループとによって別々に実施された。第1のグループの調査結果は事故の半年後 Beton- und Stahlbetonbau 誌に掲載された^{1),2)}。第2のグループの調査結果はこの更に1年後、BAM の年報に鑑定書の抜粋として掲載された³⁾。事故の2年後筆者がたまたま西ベルリンを訪れた際、BAM に立ち寄ってこれを入手した⁴⁾。

その後、数値モデルを使って行われた屋根構造の載荷能力算定によって、屋根の部分崩壊のプロセスが解明され⁵⁾、また、残存部分の追加調査によって、欠陥と損傷が屋根全体に及んでいたことが明らかになった⁶⁾。1983年6月に、この事故の総括報告とも言える J. Hundt らの報告が Bautechnik 誌上に発表されて⁷⁾、本件の調査・検討報告は出尽した感がある(注)。

以下に、これらの文献、特に文献3)に基づいて、この事故の概要を紹介する。文中、特に必要な場合を除いて、



* Yoshiharu MATANO
(財)日本建築総合試験所構造物試験室長

(注) その後、F. Buchhardt (BAM) らが、Concrete International 誌に事故の概要を紹介するとともに、同建物の再建決定を伝えている⁸⁾。

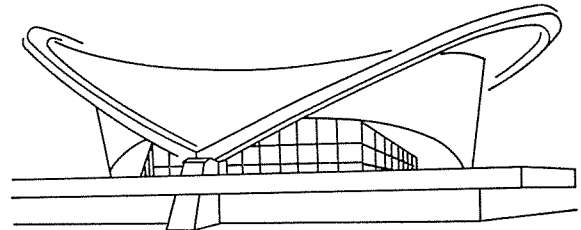


図-1(a) ベルリン会議場⁷⁾

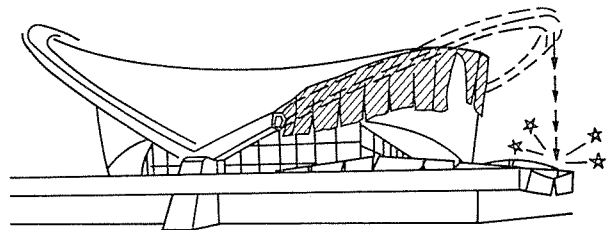


図-1(b) 部分崩壊後の会議場

引用文献番号の記載を省略した。

2. 屋根架構の概要

1957年に完成したベルリン会議場の屋根は、鞍形の吊り屋根で、特色ある外観を有していた(図-1(a))。これの原型は、米国ノースカロライナのラーリ競技場の屋根(図-2)である。ただ、同競技場屋根では、吊り屋根を支える縁アーチが、その下に立ち並ぶ多くの柱で支持され、非対称の屋根荷重に対しても安定しえたのに対し、ベルリン会議場の屋根では、建築家が大胆な形態に固執したために、鉄筋コンクリート(RC)造中空縁アーチの下には、両基端を除いて支柱は1本もなく、吊りケーブル群によってアーチをはね上げるモーメントと、自重によるアーチ転倒モーメントが釣合う構造となっていた。したがって、会議場の屋根は、非対称屋根荷

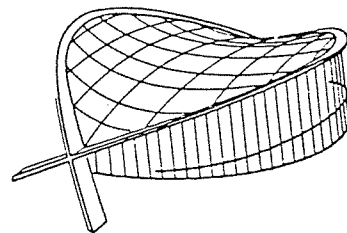


図-2 ラーリ競技場

プレストレストコンクリート

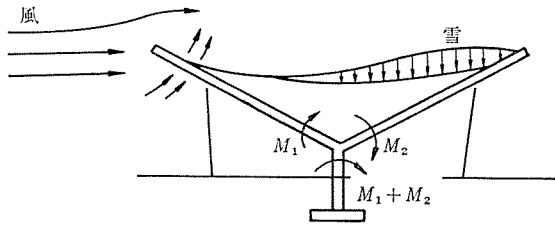


図-3⁴⁾

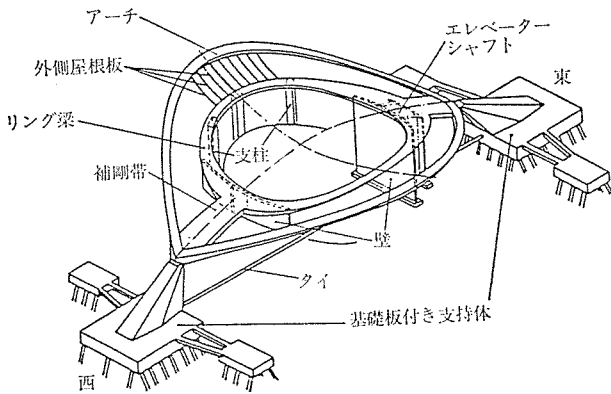


図-4 会議場の構造体⁷⁾

重が作用した場合、このままでは安定性を欠くことになるので(図-3)、設計者はやむを得ず、オーデトリウム外壁頂部の屋根曲面内に、厚さ40cm、幅2.0~8.2mのRC造環状梁(リング梁)を設けることによってこれに対処した(図-4)。この結果、厚さ7cmのRC造屋

根板は、リング梁に囲まれた「内側屋根」と、リング梁とアーチとの間の「外側屋根」とに区分されることになった。

会議場の平面と断面を 図-5 (a), (b), (c) に、屋根平面と PC ケーブル配置を 図-6 にそれぞれ示す。また、屋根の断面詳細を 図-7 に、外側屋根板断面を 図-8 にそれぞれ示す。

内側屋根板は、厚さの中央に PC ケーブル (St.145/160, 25t, 85cm 間隔) が納められた1枚のコンクリートシェルで、PC ケーブルを緊張することによりプレストレスが導入されている。

一方、外側屋根板は、2.1m おきに設けられた目地で多くの带状板に区切られ、個々の带状板の厚さ中央には2~4本の PC ケーブルが納められている(図-8 参照)。ケーブル端部の定着体の断面を 図-9 に示す。带状屋根板相互間の目地にはアスファルト含浸段ボールのテープが入っているだけで(図-10 参照)、目地モルタルは打たれていない。したがって、この外側屋根板は全体が1枚のコンクリートシェルとはなっていない。

外側屋根の PC ケーブルの初回緊張作業中は、リング梁外縁上部に設けられた欠込み溝(図-7 下図)はまだ空いたままで、带状板が何の抵抗もなく滑動できるようになっており、この欠込み溝に打設された後埋めコンクリートの硬化後、PC ケーブルを再緊張することにより、屋根板と目地にプレストレスが導入された。

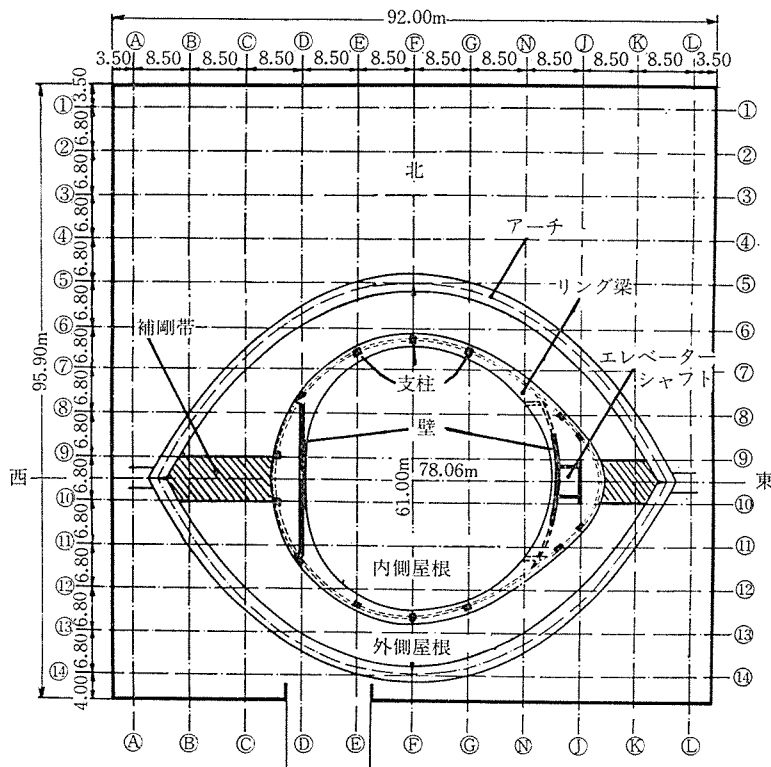


図-5(a) 平面図⁹⁾

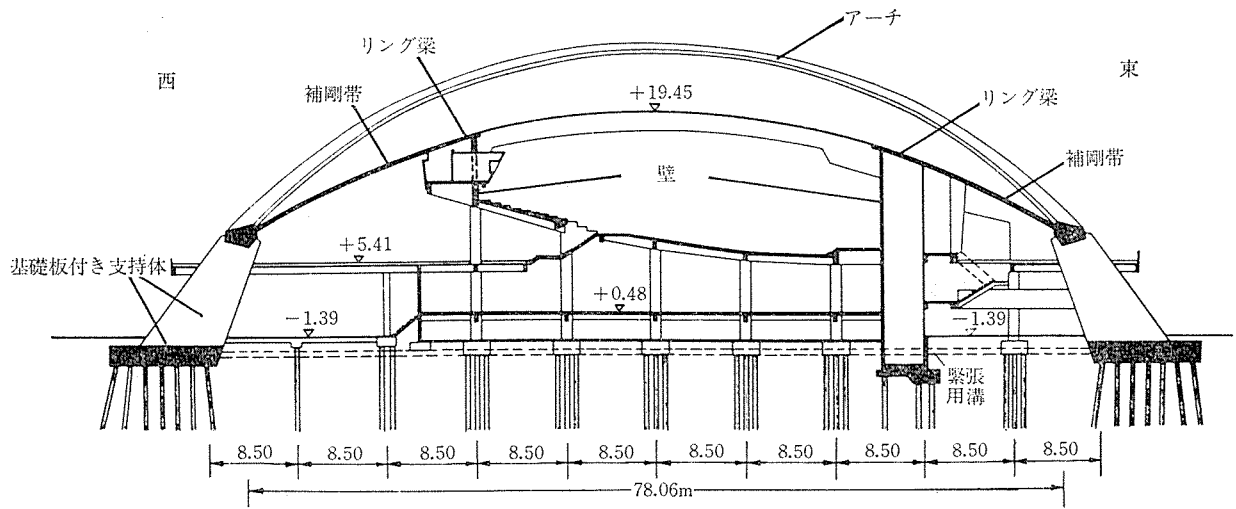


図-5(b) 縦断面図⁹⁾

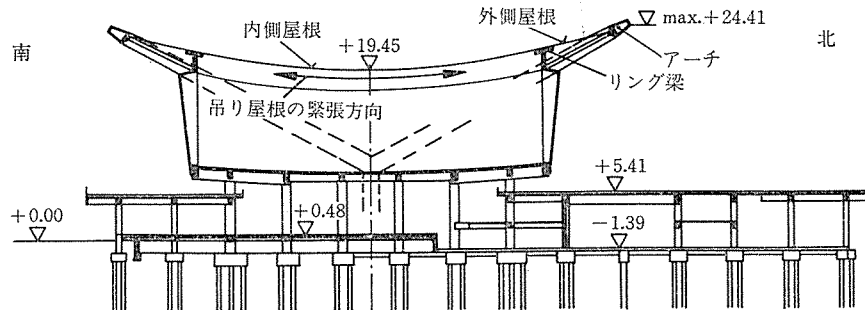


図-5(c) 横断面図⁹⁾

屋根防水層の詳細は 図-10 に示されたとおりであり、屋根板の施工時にできた段差は木繊維板で調整されている。また、アーチ部分の防水層の詳細は当初 図-11(a) のようであったが、建設後幾度か追加防水工事が行われ

て、事故時には 図-11(b) のように変更されていた。

大胆で魅力的な外観のこの屋根は、上述のように、力学的にはかなり複雑で、かつ、安定性にやや不安の残る構造になっていたわけである。力の流れが明解でなく、

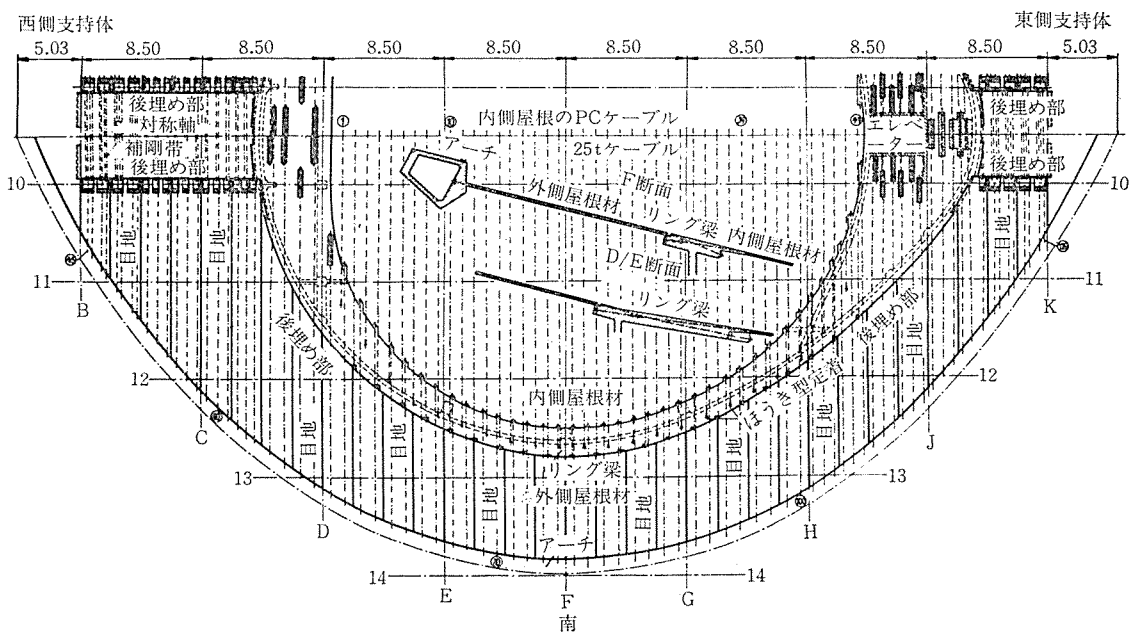


図-6 屋根平面と PC ケーブル配置⁹⁾

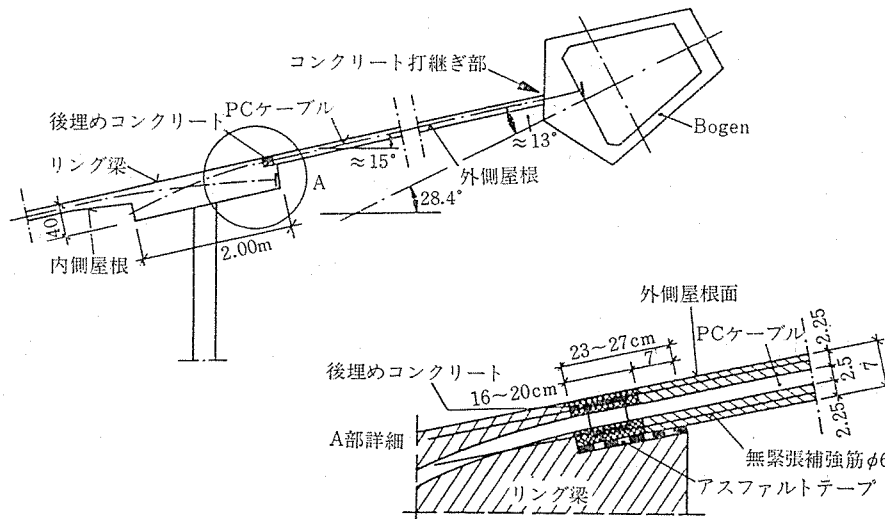


図-7 屋根断面詳細図³⁾

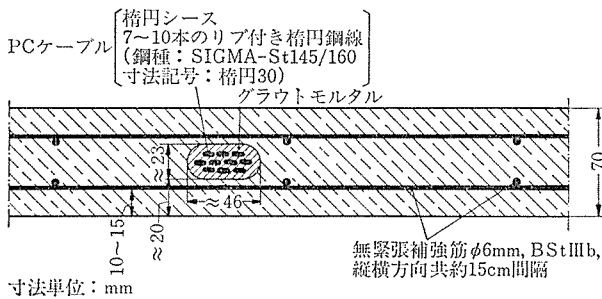


図-8 帯状屋根板断面詳細図³⁾

かなり無理のあるとみられたこの構造に対して、その完成後、一部の人たちから手厳しく批判された³⁾。

3. 損傷の発端から崩壊まで

完成の23年後、批判者の不安が現実のものとなつてしまい、南側外側屋根とその外縁のアーチが崩壊した(図-1(b))。工期1年という突貫工事で造られたこと

もあって、事故の直接の発端として、コンクリートの材料欠陥によるアーチの破壊も考えられたが、アーチや支持体の材料調査の結果、これらのコンクリートには特に異常はないことが確かめられた。となると、あとは PC ケーブルが何らかの原因で破断した結果アーチが重力に抗しきれずに落下したと考えるしかなかった。

PC 鋼材の破断の原因として、(1) PC 鋼材の品質の欠陥、断面寸法と本数の不足、(2) 設計段階での荷重と二次応力の過小見積、(3) 施工時の被り厚さ不足、コンクリートの密度不足と防水層の欠陥による PC 鋼材の防食不良、(4) 腐食の影響による PC 鋼材の劣化とぜい性破断、などが検討された。

材料調査の結果、(1) のうち、PC 鋼材の品質や寸法偏差に問題はなかった。また、各 PC ケーブルを構成する鋼線の本数については、計画本数に対して多少の過不

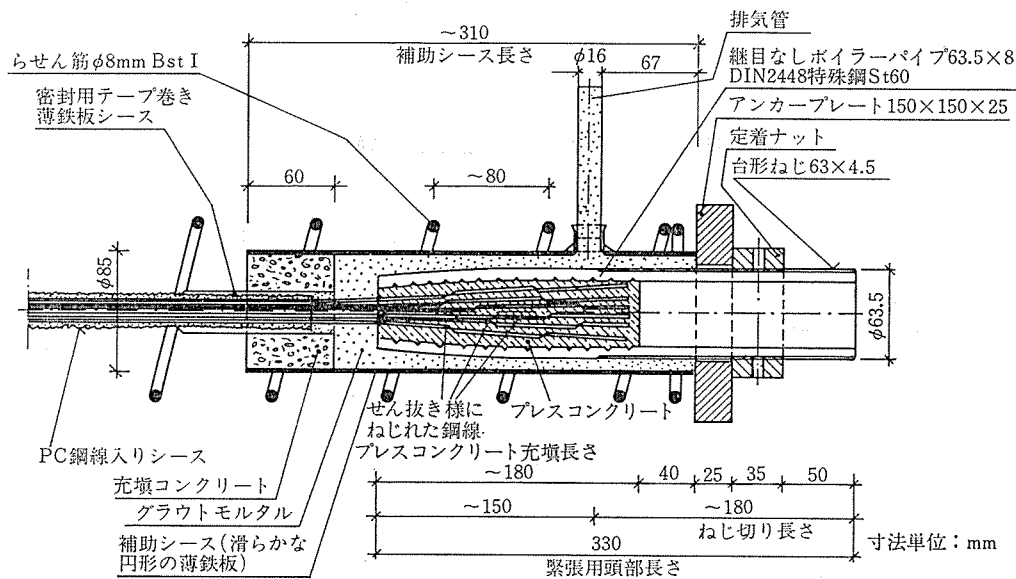


図-9 PC ケーブル定着体断面³⁾

足はあったが、これが損傷発生の主因とはならないことがわかった。(2)のうち、設計荷重の過小見積りはなかったが、屋根板とリング梁、アーチとの接合位置におけるPCケーブルの局部曲げによる曲げ応力は、設計では見込まれていなかった。(3)、(4)の原因については、現場検証で、次のような実態が明らかとなった。

すなわち、崩壊した南側外側屋根の東側半分の限定された範囲のPCケーブルに、腐食による破断が集中していることがわかった(図-12)。しかもその鋼線の破断端面の腐食の程度がひどく、この破断は崩壊よりも前から長期間かかって生じたものであることがわかった。また、あるPCケーブルでは、鋼線の破断端面の腐食被膜

上にグラウトモルタルが付着していたことから、グラウティングの前に既に破断していた鋼線もあったことが推測された。

このような実態と数値モデルによる解析の結果から、損傷の発端から屋根の部分崩壊までの経過は、次のようであったと推論された。すなわち、南側外側屋根の東寄りの位置で、鋼線の腐食破断によって、時間の経過に伴って幾本かのPCケーブルが弱められ、隣接する他のケーブルへの応力再分配が行われて、これらの鋼線の応力が増大した。この結果、アーチの鉛直変位が大きくなり、当初からリング梁欠込み部で強く曲げられていたケーブル(図-13)は、更に大きく曲げられて(図-14)、

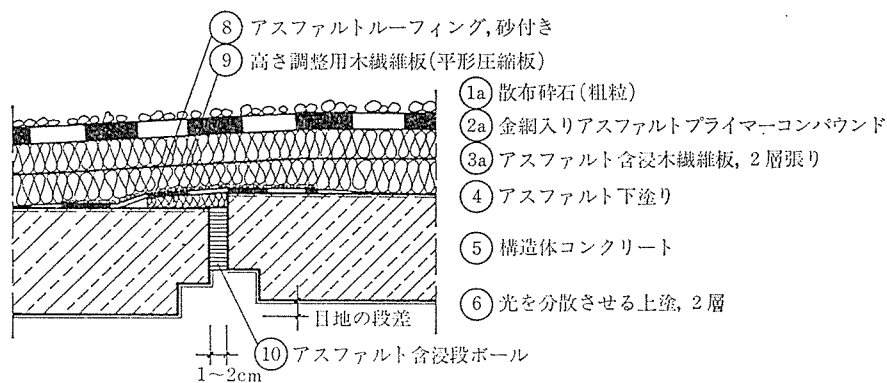


図-10 屋根防水層と目地詳細³⁾

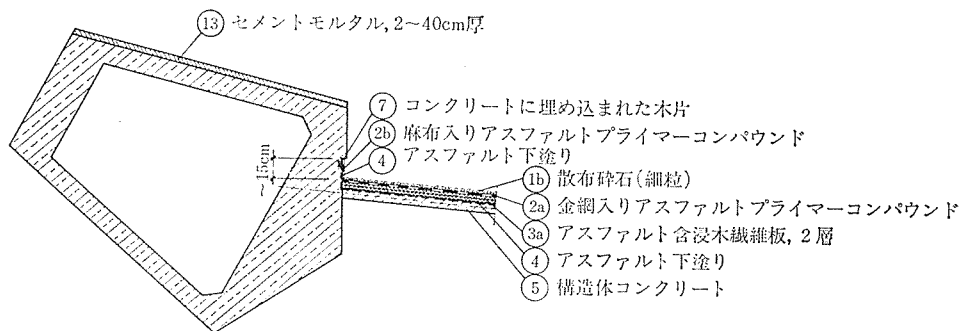


図-11(a) 外屋根とアーチの接合部 (1957年)³⁾

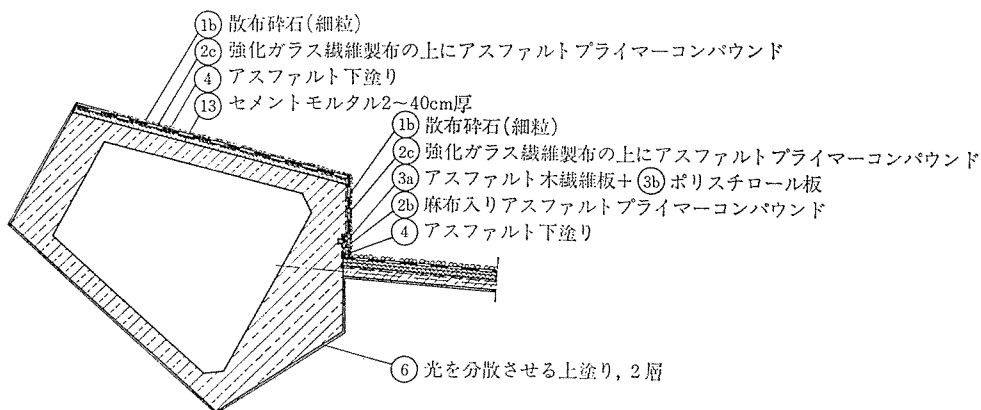


図-11(b) 外屋根とアーチの接合部 (1980年)³⁾

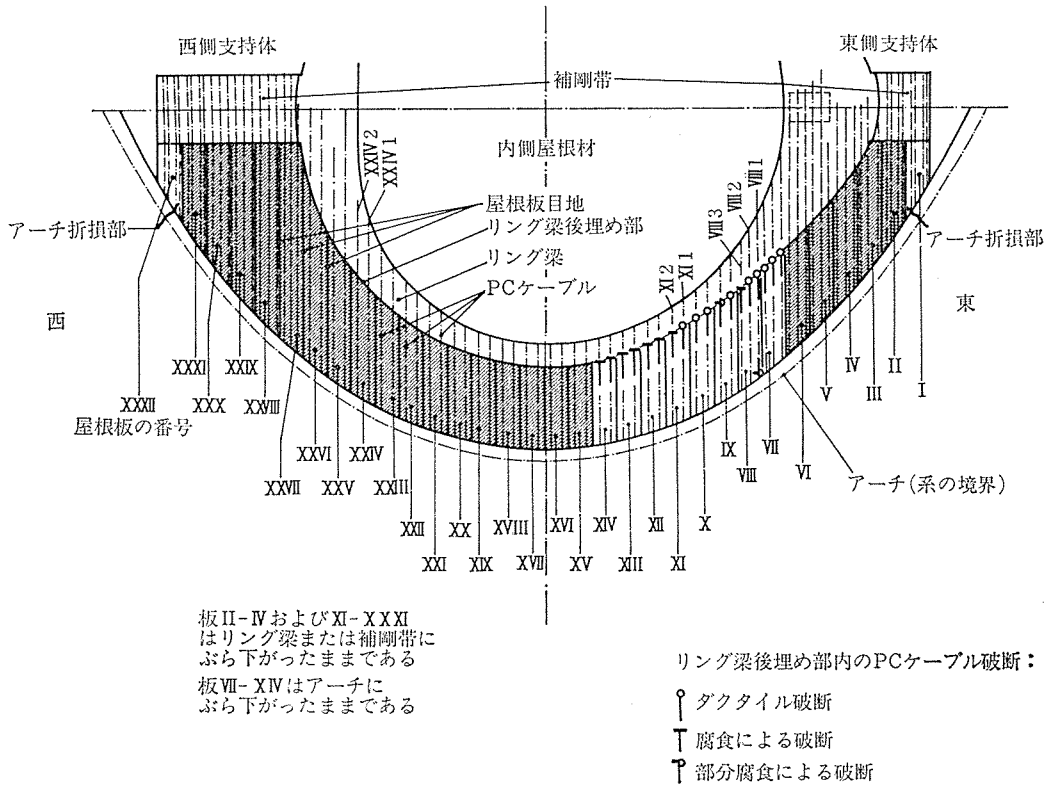


図-12 部分崩壊後の状況と PC ケーブル破断種別⁸⁾

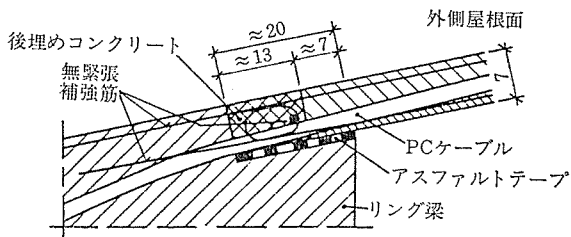


図-13 下方へずれた PC ケーブル⁸⁾

鋼線は一層不利な応力状態となった。しかし、まだ健全な PC ケーブルがこの付加応力を負担できる限りアーチが崩壊することはなかった。その後、時間の経過とともに、この範囲の他の PC ケーブルの鋼線にも順次腐食破断が生じて、ここの PC ケーブル群が作用力に抗しきれなくなって、次々と連鎖反应的に破断し、ついにアーチが崩壊してしまったのである。

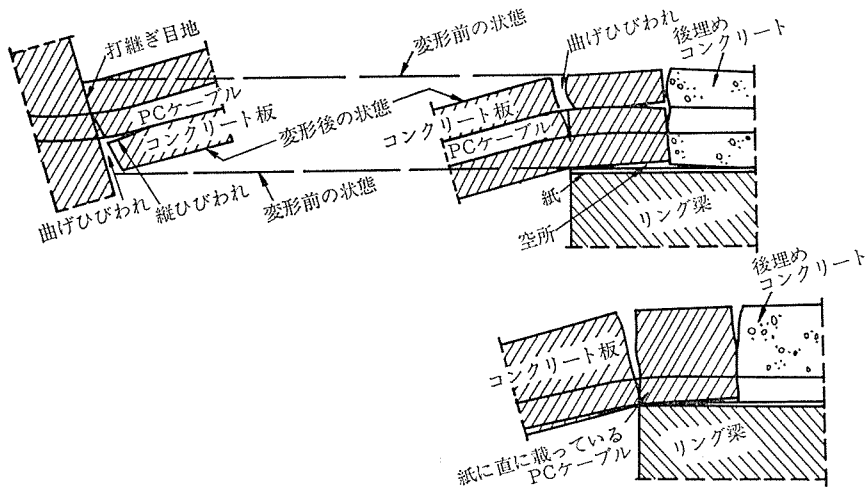


図-14 屋根板の局部曲げとひびわれ¹⁾

4. PC 鋼材の腐食状況とその原因

前述のように、鋼線の破断端面はひどく腐食していて、事故のずっと前に破断したのもあった。鋼線の古い破断部は、1本のPCケーブルでは屋根板がアーチに接合する位置にあったが、他はすべてリング梁後埋め部にあった。そしてこれらの鋼線の破断端面の状態が、水素による応力腐食の典型的な状態であったことと、この位置のPCケーブル用シースが腐食のために全くくずれてしまっていたこと、更に、一部の無緊張補強筋がひどく錆びてしまっていたことから、これらの鋼線には高い応力が生じており、また、十分な水分の供給があったことを伺わせた。

調査の結果、この高引張力と水分供給の原因として次のいくつかの設計・施工欠陥が浮かび上がってきた。

(1) 崩壊した外側屋根の防水層を事故の後で剥がして調べたところ、図-15に示すように、東側リング梁外縁と屋根板の一部で断熱材(木繊維板)がすっかり濡れてしまっていた。これは、その水上に屋根防水層が長期にわたって損傷したままの箇所があったことを暗示している。屋根防水層の亀裂や、特にアーチ部分の粗末な防水層の欠陥部から侵入した雨水は、断熱層に浸透し、アスファルト下塗りだけで防護されていたRC造屋根板上面を流れ下ってリング梁後埋め部に到達したようである。

(2) 屋根板の自重、雪荷重、風荷重と、コンクリー

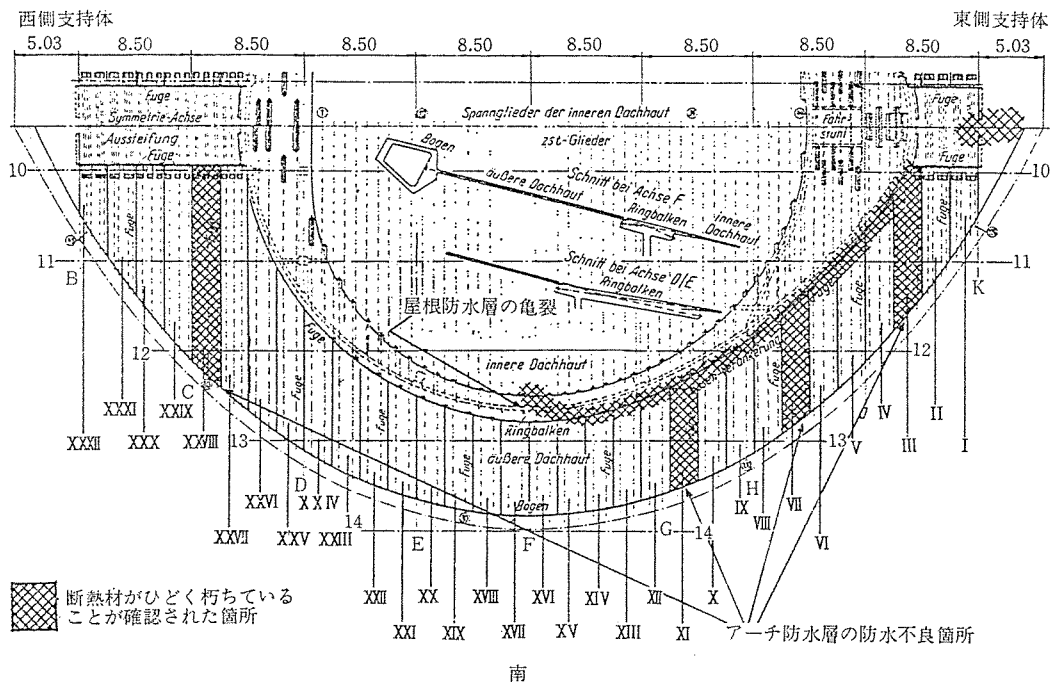


図-15 断熱材がひどく朽ちている範囲³⁾

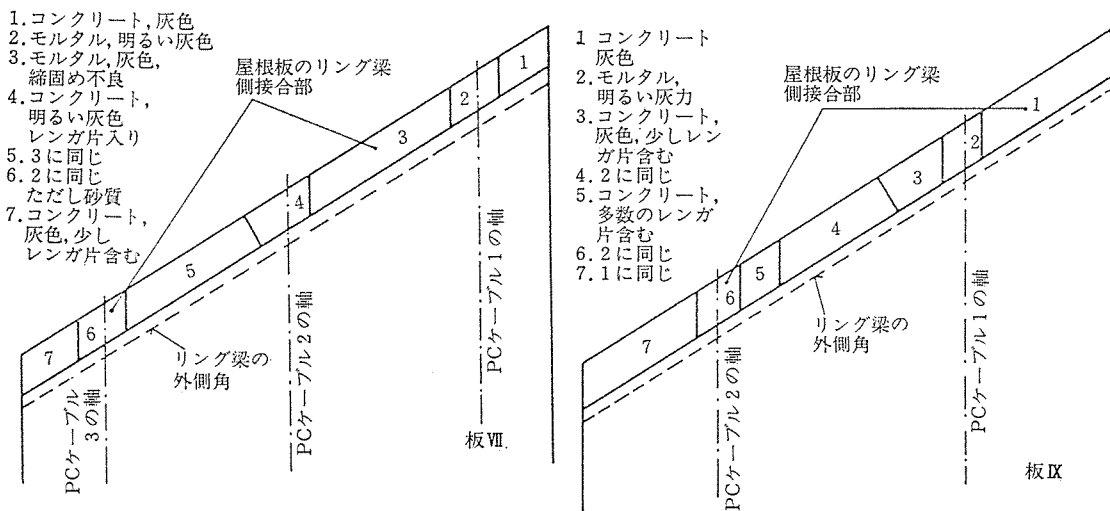


図-16 リング梁欠込み溝内の後埋め材料³⁾

トのクリープ、収縮や屋根板の温度変化によるアーチの下方への変位によって、RC 造屋根板のリング梁およびアーチとの接合位置には、大きな曲げ応力が生じた。この曲げ応力のために、これらの接合位置の屋根板コンクリートに PC ケーブルまで達するひびわれが生じ、また、アーチと屋根板間の打継ぎ目地が口を開けた。検算の結果、屋根板コンクリートの自重だけでもこの目地がひびわることが確かめられている。また、現場検証で、この目地内に下塗り材が見つかっていて、このひびわれが屋根の仕上げ工事の前に既に発生していた、と推測された。

こうして、この位置に PC ケーブルへの水分の侵入路ができた。そのうえ、設計では考慮されていなかった屋根板の曲げ変形と、PC ケーブルがリング梁の位置で局部的に強く曲げられていたことが、鋼線の応力腐食の危険性を更に増大させる原因となったようである。

(3) リング梁後埋め部には、雑多な種類のコンクリートとモルタルが幾度かに分けて打ち込まれたようで(図-16)、特に、鋼線に古い破断部があった範囲内の後埋め材は多孔質であり、砂質で透水しやすいものであった。この結果、ここに配置されていた PC ケーブルと無緊張補強筋は腐食しやすい条件下におかれた。

前述の局部曲げに伴う過大な応力によって屋根板上面に現われたひびわれと、ここで述べた後埋め材の品質欠陥のために、防水欠陥部から侵入し流れ下った水は、リング梁後埋め部内に浸透し、その底まで到達した。

(4) リング梁の後埋め部内の古い破断部を有する数本の PC ケーブルでは、シーす下面が直接アスファルトテープに接していた(図-13)、つまり、これらの PC ケーブルは、板厚中央の計画位置よりずっと下の方に配置されていて、その下面のコンクリート被り厚さが少なく、建設当時のドイツ規格(DIN 4227)で要求されていたコンクリート被り厚さ 1.5 cm(その後この規格値は 3.0 cm に改められた)をも下まわっていた。仮に後埋め材の品質に問題がなかったとしても、また、上記のひびわれが生じていなかったとしても、この位置の PC ケーブルはきわめて腐食しやすい状況に置かれていたのである。

以上述べたリング梁欠込み部近辺の状況に対して、接合部から離れた位置にある外側屋根板中の PC ケーブルでは、鋼線の古い破断は見つからなかったし、この範囲内にあったグラウト不充填区間の鋼線ですら錆びていなかった。被り厚さの確保がいかに重要であるか、ということを示す好例である。

コンクリートやグラウトモルタル中の塩化物や硫酸塩の含有量、PC 鋼材の亜鉛めっき、屋根の断熱材からの

酸性物質の溶出、および会議場前の池に設置されていた噴水の影響など、PC 鋼材の損傷を助長したと思われる他の要因についても慎重な調査検討が行われたが、いずれも損傷発生に対して決定的な要因とはならなかった、と判断された。

5. 崩壊は予知できなかったのか

屋根の部分崩壊の前に、構造体には、さまざまな徴候が現われていた。にもかかわらず、危険が予知されず、有効な対策が講じられることなく、事故が発生してしまった。では、どんな徴候があって、それらに対してどんな対応がなされたのか。

(1) 事故のずっと前(1969年)に、コンクリートのひびわれと、このひびわれからの水溶液が滲出して赤かっ色の流出跡を残しているのが観察され、記録されていた。その位置は、二つのアーチが交わる支持体部、その近くの外側屋根下面、アーチ上面に打ち足された厚いモルタル層とアーチとの境界、それに屋根板とアーチとの接合部のアーチ内側面、外側屋根帯状板相互間の数箇所の目地などである。崩壊の発端となった外側屋根板とリング梁との接合部のリング梁後埋め部には、こうした徴候は見られなかったらしいが、上記のひびわれ発生は、その位置に構造的欠陥が存在することを示唆していたわけだし、また、流出跡の存在は、その水上に防水層の欠陥があることを示唆していたのである。

断熱材からの滲出液も赤かっ色を呈することから、流出跡が赤かっ色であっても、これが鋼材の錆汁であるとは即断できなかった事情は理解できるが、この徴候に特別の注意を払うことなく、単に流出跡を除去したり、この上に塗料を塗り重ねてしまったのは、お粗末な対応であったと言われてもしかたがないのではないか。

同様のことが、屋根防水補修についても言える。防水層補修工事は度々行われたのであるが、この会議場の経営者が、屋根防水層を全面的に除去して根本的に改修する決断を下さず、対症療法的な部分補修に終始して、漏水を完全に止められなかったために、損傷が更に悪化し、また、リング梁後埋め部の危険な欠陥を見つける機会をも逃してしまった。

(2) 事故の約2箇月後、崩壊せずに残っていた北側の外側屋根のリング梁やアーチから、コンクリート片が剝離して落下するという出来事があった。この直後に行われた目視調査によって、北側の外側屋根帯状板のうち、2枚がひどく垂れ下がっており、その隣の3枚目はやや小さく垂れ下がっていて、段差となった目地部分の板側面に、塗料が塗られていない部分があることが確認された。このことにヒントを得て推測されたのである

が、崩壊した南側外側屋根でも、鋼線の破断によって幾本かの PC ケーブルが弱められていたとすれば、これが納められている屋根帯状板と、これに隣接する帯状板との間の目地に、何がしかの段差が認められたはずである。もし、専門家が前もって入念に探査していれば、PC ケーブルの破断が予見できたかもしれないのである。

6. 事故の責任

後埋め材料の低品質、PC ケーブルの被り厚不足は明らかに施工の欠陥であり、更に、無緊張補強筋の被り厚不足、グラウト不良区間の存在も、損傷事故に直接影響しなかったとはいえ、施工の欠陥である。一方、設計者が二次曲げ応力を考慮していなかったとすれば、明らかに設計の落度であろう。また、雨漏りに対して抜本的な対策の実施に踏み切れなかった管理者の責任も見逃すことはできない。

7. あとがき

本特集では、本来、わが国の PC 建築損傷事例が紹介されるべきであろうが、幸か不幸か、わが国の PC 建築では崩壊事故は起こっていないことと、軽微な損傷の場合、その実態が公表され難い技術環境にあるために、やむをえず筆者が、5 年も前の外国の事故例を紹介することになってしまった。

実在建物の損傷事例こそ、得難い貴重な技術資料であって、どんな些細な事例でも、その後の技術の向上に資するところが大きいはずである。今後、不幸にして、

PC 建築の損傷事例が見つかり、その調査が行われる際には、可能な限りその結果が公表されることを期待するものである。

本稿では、参考文献の中から多くの図を転載させていただいた。各著者に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) Schlaich, J., Kordina, K., und Engell, H.-J. : Teileinsturz der Kongreßhalle Berlin—Schadensursachen Zusammenfassendes Gutachten, Beton- und Stahlbetonbau, 75 (1980), H.12
- 2) 川口衛 : 西ベルリンのコングレスホール崩壊事故, 日経アーキテクチャ, 1981 年 8 月 17 日号
- 3) Plank, A., Struck, W., und Tzschätzsch, M. : Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten, Forschungsbericht der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Nr. 80, Berlin 1981
- 4) Plank, A., Struck, W., und Tzschätzsch, M. (俱野善治訳) : ベルリンティアガルテンのコングレスホールの部分倒壊の原因, (文献 3) の全訳, 日本建築総合試験所機関誌「GBRC」V. 8 (1983), No. 1, No. 2
- 5) Buchhardt, F., Magiera, G., und Mattees, W. : Berechnungen zum Traglastvermögen der Berlin Kongreßhalle. die Bautechnik, 1482, H. 4
- 6) Hundt, J., und Porzig, E. : Materialtechnische Untersuchungen am Dach der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten, die Bautechnik, 1982, H. 8
- 7) Hundt, J., und Tzschätzsch, M. : Die Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten—Schlußfolgerungen aus einem Schadensfall, die Bautechnik, 1983, H. 6
- 8) Buchhardt, F., Magiera, G. and Plank, A. : Structural Investigation of the Berlin Congress Hall Collapse, Concrete International, 1984, No. 3
- 9) Fleckner, S. : Das Tragwerk des Daches der Kongreßhalle Berlin, Beton- und Stahlbetonbau 1957, H. 9

◀刊行物案内▶

プレストレストコンクリート構造物設計図集 (第 2 集)

本書は協会設立 20 周年行事の一環として、前回発行した設計図集の様式にならない編集した、その第 2 集です。協会誌第 10 巻より 21 巻に亘る巻末折込付図を主体とし、写真ならびに説明を付し、その他参考になる PC 構造物についてとりまとめた設計図集で、PC 技術者の座右に備え付けるべき格好の資料と考えます。

希望者は代金 (現金為替または郵便振替 東京 7-62774) を添え、下記宛お申し込みください。

体 裁 : B 4 判 224 頁

定 価 : 9,000 円 (会員特価 7,000 円) 送 料 : 1,000 円

内 容 : PC 橋梁 (道路および鉄道) 74 件, PC 建築構造物 25 件, その他タンクおよび舗装等 10 件

申 込 先 : (社) プレストレストコンクリート技術協会

〒102 東京都千代田区麴町 1-10-15 (紀の国やビル) 電話 03 (261) 9151