

朱鷺メッセ連絡デッキ崩壊メカニズム 要旨

平成 15 年 12 月 21 日

朱鷺メッセ連絡デッキ落下事故調査委員会

1. 構造物の落下状況

朱鷺メッセ連絡デッキがなぜ崩壊したのかを検討する上で、最も基本的な情報は連絡デッキ構造物の落下状況である。写真 - 1 および図 - 1 に落下した後の状況を示すが、斜材ロッドの定着部破壊が 8 箇所、上弦材の完全な破断が 2 箇所、床版（PC 鋼より線）の破断が 3 箇所である。これらの破壊・破断がどのような順序で生じて全体構造の崩壊に至ったかを推定する。その際、図 - 1 に示すように、落下した連絡デッキ構造物の床版の位置が、当初の位置の真下ではなく、朱鷺メッセ側にずれて落ちているという事実も重要な手がかりとなる。

2. 崩壊メカニズムの想定とその検証

図 - 1 に示されている破壊・破断がどのような順序で生じたかは、崩壊現場の調査からだけでは必ずしも自明ではない。特に、デッキ構造物が落下した時には、自重以外に目立った力が作用していなかったこともデッキ構造物の崩壊メカニズムの推定を難しくしている。部材の破壊・破断箇所が 13 あるので、破壊・破断順序の組み合わせは $13!$ （ $= 13 \times 12 \times \dots \times 3 \times 2 \times 1$ ）と膨大な数になるが、先ず、どの部材の破壊・破断が起点となったかで類別することとした。

想定 1：斜材ロッド定着部（8 箇所のうちの 1 箇所）

想定 2：上弦材（2 箇所のうちの 1 箇所）

想定 3：PCa 床版 PC 鋼より線（3 箇所のうちの 1 箇所）

破壊・破断の起点は、通常、部材の耐力（各荷重状態に対する最大耐力）より大きな力が生じている箇所と考えられる。しかし、設計では、自重の他に人々が通行する際の荷重、風あるいは雪の影響、温度変化の影響等を考慮しており、弾性解析による計算で、起点となりうる箇所はそれらの荷重に耐え得る耐力（設計耐力）を有しているとしている。委員会でも、通常の 3 次元弾性解析手法を用いて連絡デッキ構造物の解析を行ったが、自重のみ作用させた状態では、当然のことながら、部材の設計耐力を超えた力が作用している箇所はなかった。

次に、上記の解析において、破断箇所の部材を一つ取り除いた場合に他の部材に生じる力の増分を求めた。13 箇所について各々算定し、比較検討した結果を表 - 1 に示す。自重だけが作用している段階では、各部材に生じている力を再配分しても、他の部材の設計耐力を超えることにはなっていない。

最初のジャッキダウン時に上げ越し状態から最大約 120 mm のたわみが生じていたことにより、その影響についても解析的な検討を行った。測定されたたわみと解析で算定し

たたわみの比較を図 - 2 に示す。この時点で、13 箇所部材に生じている力の算定結果を表 - 2 に示す。その結果、定着部 (R 2 0、R 2 1 等) に比較的大きな力が発生している。

3 . 崩壊メカニズムの推定

(1) 部材の耐力算定

前述の段階 (第 2 章) では、部材の耐力として設計時に想定したもの (設計耐力) を用いていたが、種々の算定結果からは、自重のみが作用している状態で部材の破断を示すことができなかつた。そこで、特に斜材ロッド定着部、上弦材および PCa 床版の破壊状態、破断面の状態等を詳細に調査するとともに、部材の各種耐力を推定した。

i) 定着部

定着部の破壊 (写真 - 2) 状況からは、U字型補強鉄筋の痕跡が十分に認められないものもあつた。また、落下して破壊されなかつた定着部のコンクリートをはつて配筋を確認した結果、一部に補強鉄筋の配置が十分でなかつたものがあつた。定着部の耐力に関して、他機関で行つた定着部の実験結果を検討するとともに委員会でも既往の基準等 (建築基準法、土木学会) に基づいて耐力を試算した。その結果を比較して表 - 3 に示す。定着部の耐力は、補強鉄筋の有無によって大きく異なつてゐることが明らかである。

ii) 上弦材

鋼材 (上弦材 (溶接部を含む) および PC 鋼より線) の破断については専門家に診断を依頼した。上弦材の破断部の調査からは、やや斜め下向きの引張負荷により、全体的曲げ変形後破断したこと、また溶接部で破断した箇所近傍の母材は塑性域に達していることとの報告であつた。(写真 - 3 上弦材の破断面)

iii) PC 鋼より線

専門家の報告では、引張強度に達して破断したものであつた。(写真 - 4 PC 鋼より線の破断面)

上弦材の曲げ耐力、引張耐力および PCa 床版の曲げ耐力、引張耐力を試算すると表 - 4 のようになる。

鋼材については、ii)、iii)により崩壊の起点と考えられないと判断した。

(2) コンクリートのクリープ破壊

部材の耐力より小さい力が作用している状態で部材が破壊するケースとして、コンクリートのクリープ現象に基づく破壊およびコンクリートあるいは鋼材の疲労に基づく破壊がある。疲労破壊の場合は、応力レベルの高さと応力振幅および繰り返しの回数が問題となるが、供用開始後約 2 年 4 ヶ月の今回の場合では、疲労破壊は生じないと判断される。

コンクリートのクリープ破壊とは、圧縮強度の 8 0 % 程度以上の荷重が持続的に載荷されていると、時間の経過とともに破壊する現象である。このようなクリープ破壊現象は、

圧縮力だけでなく引張力、せん断力および付着力に対しても生じる。

そのため、持続荷重（長期荷重）によって発生するコンクリートの圧縮応力度は、鉄筋コンクリート造建築においては圧縮強度の1/3以下に、土木学会でのプレストレストコンクリートの設計においては、圧縮強度の40%以下にすることが規定されている。また、持続荷重（長期荷重）によって発生するコンクリートの引張応力度やせん断応力度は、鉄筋コンクリート造建築においては、圧縮強度の1/30（低強度のコンクリート）から1/60（高強度のコンクリート）以下と規定されている。

（3）崩壊メカニズムの推定

連絡デッキ構造物は、最も荷重の小さい状態の時に崩壊したこと、斜材ロッド定着部の耐力は想定より小さく相対的に作用荷重が大きかったと想定されること、鋼材は前述のように崩壊の起点と考えられないことから、崩壊の起点は定着部コンクリートのクリープ破壊であると推定される。

最初のジャッキダウン時には佐渡汽船側の定着部（R20、R21）にひび割れが発生する可能性がある荷重が作用したこと、朱鷺メッセ側の定着部（R26）には大きな力が作用するものの、補強工事等の関係から、荷重が作用したのは他の定着部より1年以上も後であったこと、R21入り江側定着部の定着板はほとんど変形しておらず、大きな力が加わらずに破壊したと推定されること、落下した構造物の床版は全体として朱鷺メッセ側に寄っていること、R20での上弦材がほぼ直線状であること、R27の上弦材破断部の鉄骨フランジが下方に変形していること等から、崩壊のメカニズムは以下のように推定される。

R21入り江側の定着部が持続荷重の下で破壊する。（破壊による振動により、屋根等で音が発生する）

この箇所は駐車場通路との接合部の近くなので、定着部の破壊直後では、駐車場通路の接合部に支えられるなどして、直ぐには全体の崩壊に至らないと推定される。

R21入り江側の定着部の破壊に伴い、連絡デッキ構造物は徐々にたわみ、荷重の増加したR21信濃川側の定着部、R20（入り江側、信濃川側）の定着部が次々と破壊してゆく。

連絡デッキ構造物のたわみが大きくなるにつれて、PCa床版の曲げモーメントも大きくなりPC鋼より線が破断し始める。

全体構造が崩壊に向かってゆく中で、朱鷺メッセ側の定着部（R26）も破壊し、朱鷺メッセ側の支点の上弦材（R27近傍）は大きく曲げられ破断する。

この間に、床版も朱鷺メッセ側で破断したと推定される。

4．おわりに

連絡デッキ構造物が、最も荷重の小さい時に崩壊したことから、荷重と耐力の直接的な

比較により崩壊メカニズムを評価することはできなかった。本委員会では、想定される崩壊メカニズムを全て検討することとし、崩壊時の状態、部材各部の破壊状態、目撃証言、関係者ヒアリング、解析的な検討、耐力算定、実験結果等の総合的判断から、あり得ないメカニズムを消去していった。その結果、最もあり得るメカニズムとして残ったのが、前項で述べた崩壊のプロセスである。

写真 1 : 落下した全体構造物

写真 2 : 斜材ロッド定着部の破壊状況

写真 3 : 上弦材の破断面

写真 4 : P C 鋼より線の破断面

図 1 : 落下した全体構造物

図 2 : 最初のジャッキダウン時のたわみ状態

表 1 : 解析上での作用力の増加量 (13 箇所について)

表 2 : 最初のジャッキダウン時の作用力 (13 箇所について)

表 3 : 定着部の耐力 (実験結果、算定結果)

表 4 : 上弦材および PCa 床版の耐力 (曲げ、引張)