

技術資料①

壁を活用した鉄筋コンクリート造建築物の損傷制御設計法

壁を活用した鉄筋コンクリート造建築物の損傷制御設計法

目 次

1. 適用範囲
2. 架構の要求性能
 - 2.1 耐震ランク
 - 2.2 許容応力度計算と保有水平耐力計算
 - 2.3 耐震ランクⅠの検証項目
 - 2.4 耐震ランクⅡの検証項目
3. 架構の計画
 - 3.1 応力計算の原則
 - 3.2 壁部材の取り扱い
 - 3.3 二方向外力の取り扱い
 - 3.4 ピロティ階の取り扱い
4. 部材の設計
 - 4.1 壁部材および壁付き部材の仕様規定
 - 4.2 壁付き部材のモデル化
 - 4.3 壁付き部材の部材種別
 - 4.4 接合部の取り扱い
 - 4.5 スラブの取り扱い
5. 応答変位計測装置の設置

1. 適用範囲

本資料は「災害拠点建築物の設計ガイドライン」(案)に基づく「壁を活用した鉄筋コンクリート造建築物の損傷制御設計法」を示すものであり、そで壁・腰壁・垂れ壁を構造壁として活用した鉄筋コンクリート造架構の構造設計に適用する。その目的は大地震(極稀地震)後の建築物の機能継続に必要な構造躯体の性能を確保することである。

本資料は国土交通省 総合技術開発プロジェクト「災害拠点建築物の機能継続技術の開発」(以下、災害拠点総プロ)により開発された「災害拠点建築物の設計ガイドライン」第6章に示した構造躯体の設計の具体的な方法として、「壁を活用した鉄筋コンクリート造建築物の損傷制御設計法」について示した技術資料である。なお、本資料が対象とするそで壁・腰壁・垂れ壁を構造壁として活用した鉄筋コンクリート造建築物は制振や免震等の先端技術を利用せずとも、従来の耐震技術により比較的安価に機能継続に必要な構造躯体の性能を確保できるという特徴を有している。

建築基準法(新耐震基準)が求める耐震性能は、(1) 中地震に対して損傷せず、地震後も特に修復を要しないこと、(2) 大地震に対して倒壊・崩壊せず、人命が守られること、の2点である。すなわち、大地震に対しては建築物が損傷し使用できなくなるような事態を防止することまでは求められていない。それに対して災害拠点建築物の目標性能においては、上記の大地震に対する「人命の確保」に加えて「地震直後の機能継続」という高度な耐震性能が求められる。

現在、官庁施設は官庁営繕の総合耐震・対津波計画基準¹⁾により安全を確保するとともに、大規模地震発生時に災害応急対策活動の拠点として機能を十分に発揮できるよう基準を定めている。具体的には耐震安全性の目標としてⅠ類を「大地震動後、構造体の補修をすることなく建築物を使用できること」、Ⅱ類を「大地震動後、構造体の大きな補修をすることなく建築物を使用できること」としている。その実現の方法としては必要保有水平耐力の割増しが一般的に行われている。

本資料においても、上記の官庁営繕の基準と同じ目標性能を設定しているが、達成する方法については、災害拠点総プロで実施した実大5層鉄筋コンクリート造建築物の載荷実験や既往の部材実験等の成果に基づき、具体的な設計方法を新たに提案している。

災害拠点建築物の要求性能は2種類の耐震ランクという指標により表される(図1-1)。耐震ランクⅠは「大地震(極稀地震)に対する応答は概ね弾性変形に留まるため、構造性能に関わる構造体の補修を要せず機能継続しうることを目標とするクライテリアであり、工学的な要求性能としては大地震後の構造体の被災度が軽微から小破程度以下とした。耐震ランクⅡは「大地震(極稀地震)に対する応答は完全な弾性応答範囲には留まらないものの、大規模な補修を必要とする損傷が生じず機能継続しうることを目標とするクライテリアであり、工学的な要求性能としては大地震後の構造体の被災度が小破以下の状態とした。

本資料に示されていない項目については建築基準法に基づく構造計算を満足させるため、2015年版 建築物の構造関係技術規準解説書²⁾を参照する。構造計算方法としては①保有水平耐力計算、②限界耐力計算、③時刻歴応答計算の3種類が適用できる。

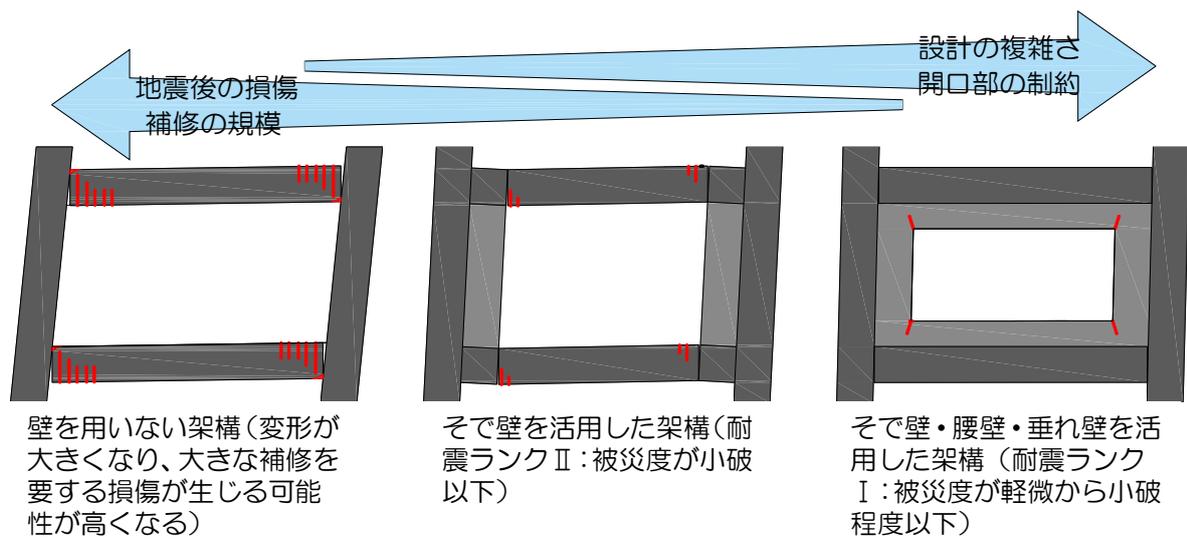


図 1-1 壁を活用した RC 造建築物の大地震に対する耐震性能に関する模式図

2. 架構の要求性能

2.1 耐震ランク

災害拠点建築物は大地震時の応答を概ね弾性状態に留める設計（耐震ランクⅠ）、大規模の補修を必要とする損傷が生じない状態に留める設計（耐震ランクⅡ）の2種類に分類される。耐震ランクⅠの災害拠点建築物については大地震後に概ね補修することなく機能継続させることを目標とする。耐震ランクⅡの災害拠点建築物については大地震後に大規模な補修をすることなく機能継続させることを目標とする。

要求性能は大地震時の応答を概ね弾性状態に留める設計（耐震ランクⅠ）と大規模の補修を必要とする損傷が生じない状態に留める設計（耐震ランクⅡ）により分類している（図2-1）。

耐震ランクⅠは架構に靱性的な挙動は要求しないが、高い強度を要求する。したがって、柱量・壁量が大きくなり、建物高さや大きな空間を確保することは設計上困難となる。大地震に対する応答を概ね弾性変形に留め、耐久性を確保するための幅0.3mm程度以下のひび割れの補修等を除き、特段の補修をすることなく、機能継続させることを目標とする。柱はり架構に取り付くそで壁・腰壁・垂れ壁を活用した場合、柱に加えてはりの断面強度が増加するため、耐震ランクⅡに比べて架構の強度が高くなるが、架構が最大強度に達した後に何れの部材においても壁端部で圧壊が生じるため架構が耐力低下性状を示す。したがって、壁厚や端部拘束筋により靱性能を高めることが重要である。また、耐力が低下するため、最大 D_s 相当の強度が架構に求められる。大地震後の目標とする被災度は軽微から小破以下である。方立壁については小さい変形角でせん断ひび割れが生じ得るため、水平スリットにより主架構から切り離す。柱はり周囲の壁についてはいずれも耐力壁として取り扱うため、開口設計において一定の制約が生じる。また、柱はりが短スパン化するため、各部材の負担するせん断応力度が上がり、慎重なせん断設計が必要となる。災害拠点総プロでは上記の構造方法を検証するために、2015年度に耐震ランクⅠに対応する実大5層建築物の載荷実験を行った。

耐震ランクⅡは靱性的な挙動と中程度の強度を要求しているため、耐力壁を含まない架構や中高層建築物に対して適用可能である。大地震に対する応答を大規模な補修を必要とする損傷が生じない変形に留め、足場掛けの必要となる幅2.0mm程度以上のコンクリートひび割れ、コンクリート端部の圧壊、せん断破壊、主筋座屈の修復等をすることなく機能継続させることを目標とする。なお、ここで定義する機能継続とは大地震後に十分な残存耐震性能を有し、建築物の扉や窓が地震後に開閉可能であることとする。剛節架構の柱をそで壁付き柱とし、腰壁・垂れ壁・方立壁等のその他の壁については構造スリットにより主架構から切り離し、明確なはり降伏メカニズムを形成させることを意図しているため中高層建築物に対しても比較的適用しやすいが、はりの剛域拡大（可撓長さの縮小）による架構強度の増加が主となる靱性型架構で最大 D_s 相当の強度まで設計上増加させることは難しく、大地震時の応答としても一定の塑性化を許容している。大地震後の目標とする被災度は小破以下である。そで壁付き柱の活用では、はりの危険断面がそで壁端に移動するため、柱はり接合部にひび割れ等の損傷が生じにくくなり、その修復作業の軽減にもつながる。災害拠点総プロでは上記の構造方法を検証するために、2014年度に耐震ランクⅡに

対応する実大5層建築物の載荷実験を行った。

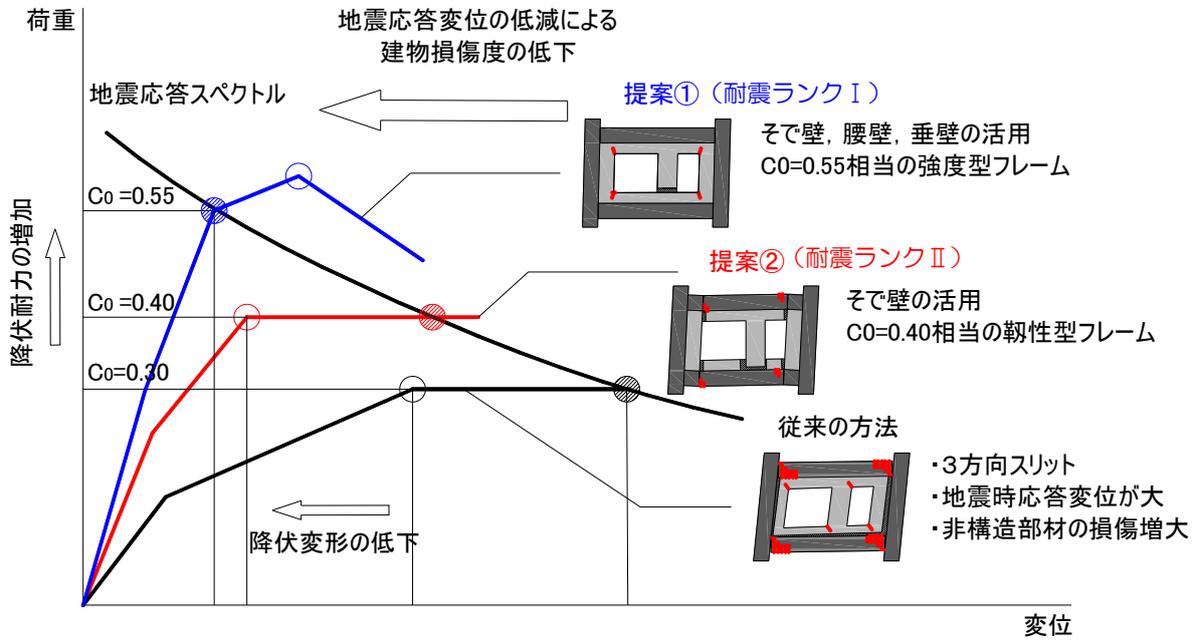


図 2-1 提案する架構と要求性能の関係の模式図

2.2 許容応力度計算と保有水平耐力計算

壁を活用した鉄筋コンクリート造建築物の損傷制御設計法では、壁付き架構について許容応力度計算と保有水平耐力計算を行い、さらに壁を取り除いた柱はり架構について保有水平耐力計算を行う。

許容応力度計算および保有水平耐力計算については、壁付き部材を耐力壁として取り扱った架構について実施する。許容応力度計算については、壁付き部材端部のコンクリートおよび端部補強筋が許容応力度を超えないように十分な壁厚および補強筋量を確保する。柱はりに取り付く壁が長くなると部材として降伏変形に達してはなくても、端部に非常に大きな応力が生じ得るので設計において注意する必要がある。本設計法では柱はりに取り付く壁の長さとして柱せい程度のものを対象としている。付帯する壁をより長くする場合は部材端部での損傷が早期に発生する傾向があるため、損傷を許容できる変形レベルについては別途構造実験により確認する必要がある。

小さい変形で高い架構耐力に達するためには、壁付き部材や耐力壁等の剛性の高い部材を多用することが考えられるが、壁付き部材に柱はり断面を設けず扁平な壁断面とした場合の損傷制御設計法に関する知見はまだ十分に得られていない。そのため、本設計法においては、柱やはり断面に壁が取り付く形状の架構を対象とする。

もともと本設計法は、建築基準法に基づき大地震に対する安全性が確保されている靱性型架構、すなわち大地震に対して安全限界以下に留まるように設計された柱はりフレームに壁を付帯させることにより大地震に対しても弾性状態あるいは大規模の補修を必要とする損傷が生じない状態に留めるようにするという考えにより構築されたものである。その趣旨から、壁を活用した鉄筋コンクリート造建築物の設計においては、壁を取り除いた柱はりフレームにおいても保有水平耐力計算を満足することを確認することとした。この検討と、壁付き架構の崩壊形形成時に脆性的な破壊が生じないことを確認することにより、大地震を上回るような過大入力に対しても、構造性能に一定の余裕を持たせることができる。なお、この検討においては、無視した壁部分の重量は設計上考慮し、壁を取り除いた柱およびはり端に降伏ヒンジが形成されるとして保有水平耐力計算を行う。

本設計法における許容応力度計算および保有水平耐力計算の構造計算フローを図 2-2 に示す。なお、フロー図では、壁を取り除いた柱はりフレームの保有水平耐力計算は壁付き架構の保有水平耐力計算の前に行う流れとなっているが、壁付き架構の保有水平耐力計算の後に実施してもよい。

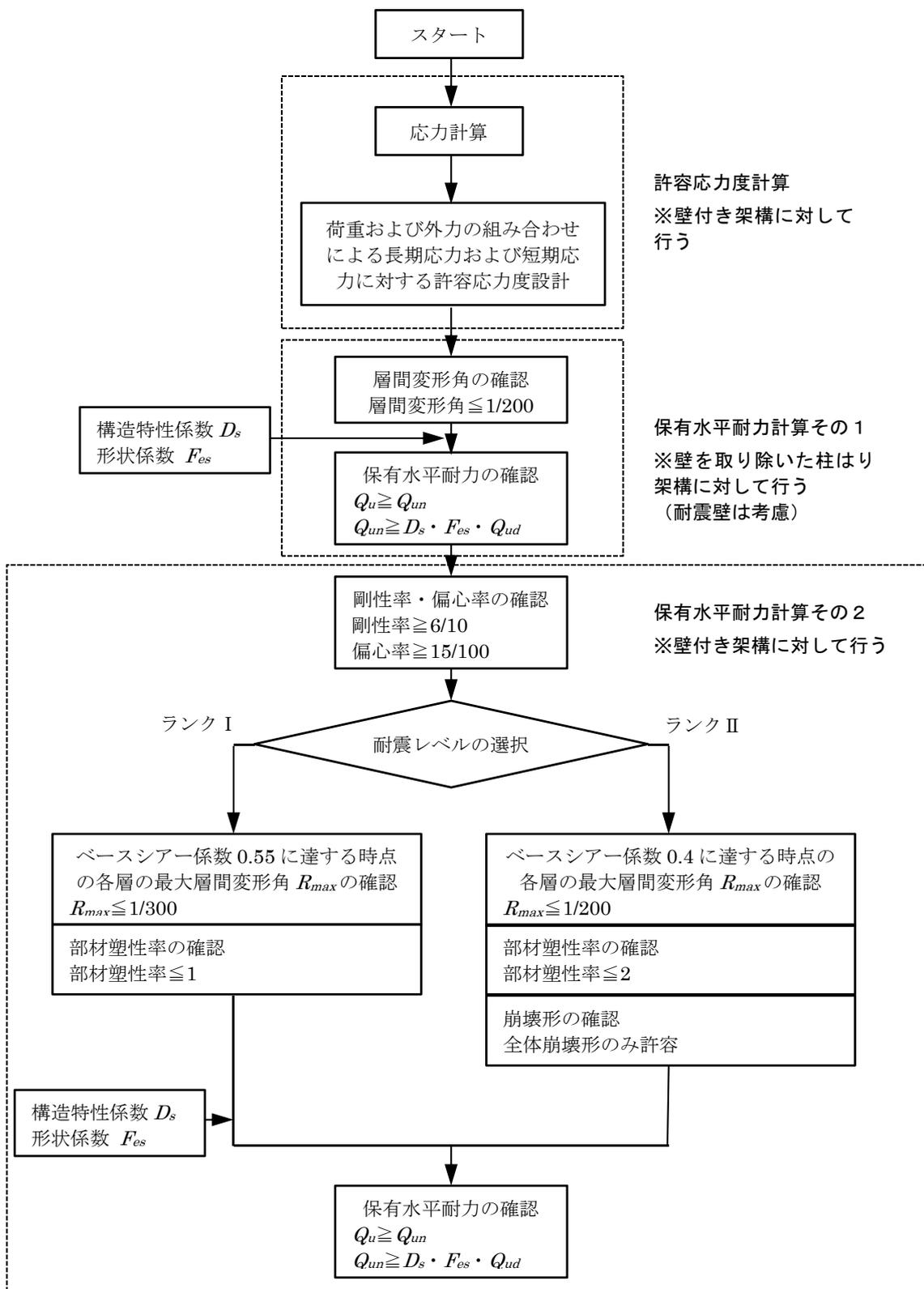


図 2-2 本設計法における許容応力度計算および保有水平耐力計算の構造計算フロー

2.3 耐震ランク I の検証項目

保有水平耐力計算による場合はベースシア係数が 0.55 に達する時点の各層の最大層間変形角 R_{max} が 0.33%以内であることを確認するとともに部材塑性率が 1 以下であることを確認する。限界耐力計算および時刻歴応答解析による場合は各層の最大層間変形角 R_{max} が 0.33%以内であることを確認する。

災害拠点総プロで 2015 年度に実大実験を実施したそで壁・腰壁・垂れ壁を活用し、はり曲げ降伏を先行させる架構では、震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針³⁾に示されているはりの損傷度を柱の損傷度に読み替えて被災度を判定する方法では残留変位、はり軸伸び変形、ひび割れの集中等により実際の損傷を過大評価する可能性があることが明らかとなった。そこで、ここでは同基準に示されている耐震性能低減係数 η (図 2-3) を 2015 年度に実施した実大実験の各層および架構全体の荷重変形関係に基づいて直接判定し、耐震性能残存率 R と被災度を検証した。

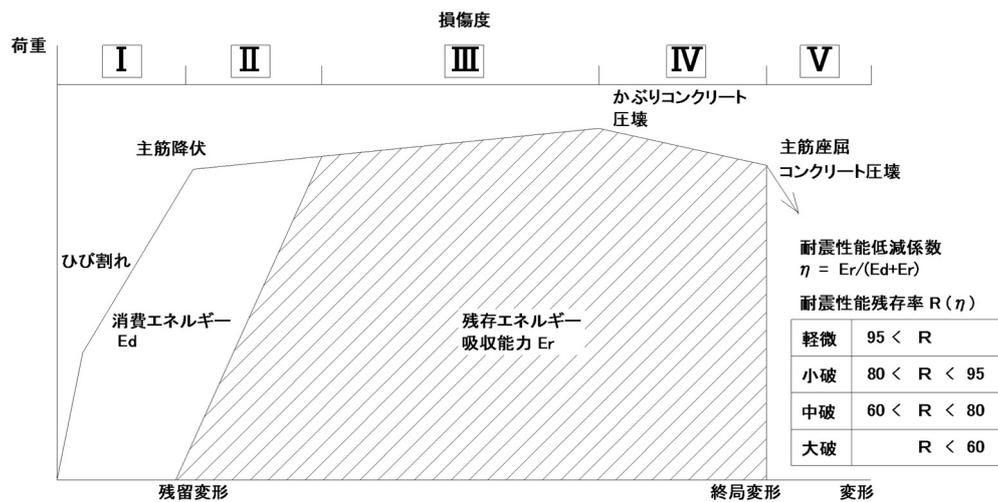


図 2-3 耐震性能低減係数 η の概念³⁾

図 2-4 に最大層間変形角 0.33% (代表変形角 0.25%) の载荷サイクルにおける最大応答層の耐震性能残存率を示した。限界耐力計算においては設計上特に配慮の必要な部材角を勘案し、架構としての安全限界変位に制限値を設けている。本検討における終局変形は限界耐力計算における安全限界変位から定義し、上記の制限値の階高に対する割合として層間変形角 1.33%を採用した。最大層間変形角 0.33%の载荷サイクルにおける被災度はいずれの層も[軽微] ($R > 95\%$) となった。したがって、大地震に対して補修を必要としない架構の損傷度(軽微)を留めるためには最大層間変形角を 0.33% 程度に留めることで達成しうる。

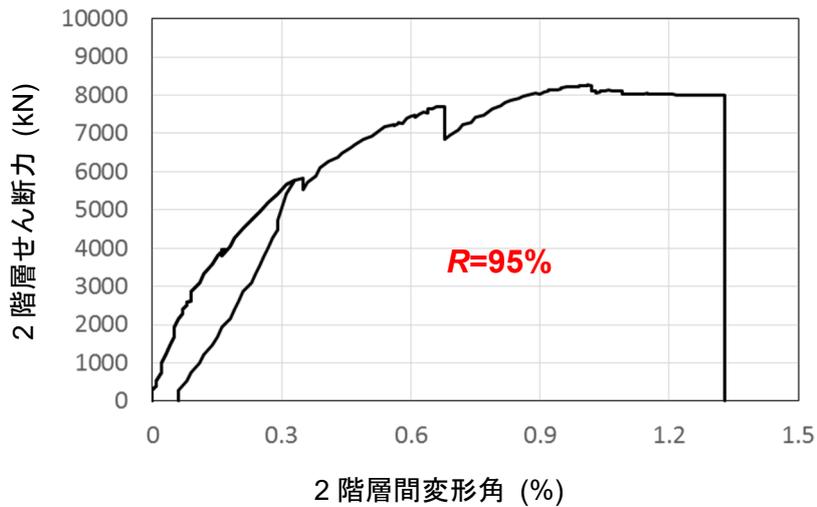


図 2-4 最大層間変形角 0.33%の载荷サイクルにおける最大応答層の残余耐震性能 (R=95%)

大地震に対する弾性応答では 1G 相当の水平力が想定され、構造特性係数 D_s 最大値 (0.55) 相当の保有水平耐力を有する架構であっても、ある程度の塑性変形能力が必要となる。実験を行った実大架構では層間変形角 0.33%の復元力性状において壁等に生じるひび割れにより架構の最大履歴吸収エネルギーの 5%程度の履歴エネルギー吸収能力を示しており、完全な弾性体ではないが塑性変形によるエネルギー吸収に期待しない強度型設計であるため、保有水平耐力計算における最大 D_s 相当の架構強度が要求される。本規定では最大層間変形角 0.33%において D_s 最大値に相当するベースシア係数 0.55 を超過することを確認することで、大地震時の建物の応答変形は層間変形角 0.33%をやや超過するが、損傷を軽微から小破程度に留めることを意図している。さらに、ベースシア係数が 0.55 を超える応答範囲に対しても十分な余力があることを確認するため、ベースシア係数が 0.55 に達する時点での変形状態において部材が降伏していないこと (部材塑性率が 1 以下であること) を確認するとともに、崩壊形まで脆性破壊が生じないことを確認する。この時、壁付き部材の降伏点変形については修正菅野式導出時の降伏点変形の定義に基づいて、部材荷重が最大終局曲げ強度の 80%に達した時点の変形とする (4.2 節参照)。なお、限界耐力計算設計法および時刻歴応答解析等により直接的に大地震に対する応答が求まる設計方法では、より直接的に最大層間変形角が 0.33%以下に留まることを確認することができる。なお、この場合においては、外力をある程度大きくすることで過大な入力に対する構造安全性の検証 (壁を取り除いた状態での保有水平耐力計算に相当) を行うことが推奨される。

また、ベースシア係数は 1 階層せん断力を建築物の重量で除した値であり、 R_i 、 Z 、 F_{es} 等の係数は乗じていない。本規定では架構に全体降伏メカニズムを形成させることまでは求めていないが、部分崩壊形や局部崩壊形となった場合には部材に応力集中が生じうる。したがって、過大な入力地震動に対してもエネルギー吸収能力を有する架構を実現するためには、崩壊メカニズムを形成するまで脆性破壊が生じないことを確認することが求められる。

2.4 耐震ランクⅡの検証項目

保有水平耐力計算において崩壊メカニズムが全体降伏形となることを確認する。また、ベースシア係数が0.4に達する時点の各層の最大層間変形角 R_{max} が0.50%以内であり、部材塑性率が2以下であることを確認する。限界耐力計算および時刻歴応答解析による場合は各層の最大層間変形角 R_{max} が0.75%以内であることを確認する。

災害拠点総プロで2014年度に実大実験を実施したそで壁を活用し、はり曲げ降伏を先行させる架構では、震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針³⁾に示されているはりの損傷度を柱の損傷度に読み替えて被災度を判定する方法では残留変位、はり軸伸び変形、ひび割れの集中等により実際の損傷を過大評価する可能性があることが明らかとなった。そこで、ここでは同基準に示されている耐震性能低減係数 η (図2-3)を2014年度に実施した実大実験の各層および架構全体の荷重変形関係に基づいて直接判定し、耐震性能残存率 R と被災度を検証した。

図2-5に最大層間変形角0.70% (代表変形角0.50%)の载荷サイクルにおける最大応答層の耐震性能残存率を示した。終局変形は限界耐力計算における安全限界変位から定義し、上記の制限値の階高に対する割合として層間変形角1.33%を採用した。最大層間変形角0.70%の载荷サイクルにおける被災度はいずれも[小破] ($R > 80%$) となった。したがって、大地震に対して大規模な補修を必要としない程度の架構の損傷度(小破)に留めるためには最大層間変形角を0.75%程度に留めることで達成しうる。

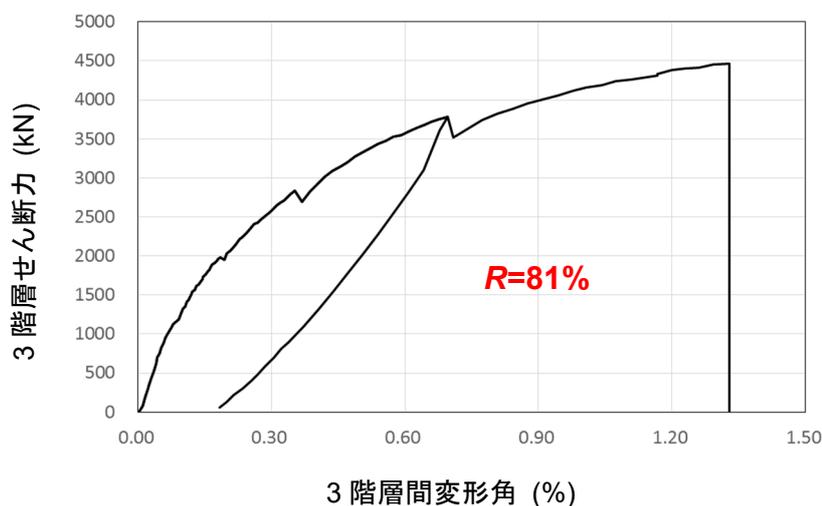


図2-5 最大層間変形角0.70%の载荷サイクルにおける最大応答層の残余耐震性能 ($R=81%$)

大地震時の最大層間変形角を0.75%とし、耐震ランクⅠにおいて復元力を概ね弾性として確認を必要とするベースシア係数0.55相当の水平力が作用した場合の弾性ひずみエネルギーと同等の履歴消費エネルギーを想定すると、層間変形角0.50%を降伏点変形とし、ベースシア係数0.40相当の水平強度を有するバイリニアモデルの履歴消費エネルギーと概ね一致する。したがって、

本規定では大地震時の変形を制限するために、ベースシア係数が 0.40 となる時点での各層の最大層間変形角が 0.50%以下となることを確認することとした。さらに、一部の部材が小さい変形角で塑性化して、架構が降伏した状態で大きな損傷とならないように、上記の変形角における部材の最大塑性率を 2 以下としている。壁付き部材の降伏点変形については修正菅野式導出時の降伏点変形の定義に基づいて、部材荷重が最大終局曲げ強度の 80%に達した時点の変形とする（4.2 節参照）。また、靱性型架構としての変形能力を必要とするため、架構の崩壊メカニズムが全体降伏形であることを確認する必要がある。なお、限界耐力計算設計法および時刻歴応答解析等により直接的に大地震に対する応答が求まる設計方法では最大層間変形角が 0.75 %以下に留まっていることを確認することによってもよい。ただし、この場合においては、過大な入力に対する構造安全性の検証（壁を取り除いた状態での保有水平耐力計算に相当）を行うことが推奨される。

3. 架構の計画

3.1 応力計算の原則

災害拠点建築物では許容応力度計算および保有水平耐力計算において、ひび割れおよび鉄筋降伏の剛性低下を適切に考慮し、建築物の力と変形の関係を適切に表すモデルを用いること。また、メカニズム形成時点まで脆性破壊が生じる部材を許容しない。

災害拠点建築物では、大地震（極稀地震）直後において、損傷を機能継続可能な範囲に留める性能が求められる。したがって、構造計算においては変形と損傷状態の関係を適切に表すモデルを用いる必要がある。本設計法では限界耐力計算や時刻歴応答計算に加えて、保有水平耐力計算における特性点の変形も重要となるため、架構に取り付く壁や床等の断面の強度や剛性に対する影響を明確にさせる必要がある。

例えば、許容応力度計算や保有水平耐力計算においては部材の降伏点剛性低下率を過小評価すると、部材のせん断応力度は大きくなり安全側となるが、降伏変形は小さい値に留まる。建築物の被災度は変形に応じた部材の残留ひび割れ幅や耐震性能残存率に依存することから水平力が作用した時のモデルの変形は実際の被害を過小評価することになる。したがって、各部材については適切な復元力を与えるモデルを用いる必要があり、特に正確な評価が困難とされる①壁付き部材、②床スラブ、③非耐力壁の取り扱いについては2015年版建築物の構造関係技術基準解説書²⁾に記載されている最新のモデル化方法を適用する必要がある。

災害拠点建築物は損傷制御を目的とした建築物であるが、大地震を超過するような極大地震に対しても安全性を確保するような設計上の配慮も求められる。鉄筋コンクリート造建築物では部材が脆性破壊すると架構の応力状態が急激に変化し、汎用的な骨組解析モデルの応答推定精度は比較的低いことが知られている。また、部材の脆性破壊は軸力再配分を生じさせ、建物の進行性崩壊につながる危険性もあるため、地震後に機能継続のみならず一時的に避難することも困難となる。したがって、災害拠点建築物では崩壊メカニズム形成時までに部材の脆性破壊を生じさせないようにする。保有水平耐力計算において部材の曲げ変形によるコンクリート圧縮破壊については、壁付き部材の載積実験等において壁断面の損傷は架構を支持する柱はり断面の損傷に先行して生じることが確認されているため許容している。

3.2 壁部材の取り扱い

壁部材は耐力壁として設計する。構面外またはモデル化の不確定性等によりせん断破壊等の損傷が発生する可能性がある壁部材については完全スリットを設けて応力を負担しないようにする。架構の剛性率および偏心率については壁部材の剛性を考慮した計算を行う。偏心率については0.15以下、剛性率については0.60以上とすること。

災害拠点総プロにおける実大5層建築物の载荷実験等の研究成果から壁付き部材を有する架構は壁を無視した柱はり剛節架構モデルに比べて、大きく剛性および耐力が増加することが明らかになった。一方で、崩壊メカニズムについても壁端部の圧縮破壊や降伏ヒンジ等により柱はり剛節架構に形成されるものとは明確に異なるものであった。また、近年の2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震の建築物被害でも鉄筋コンクリート造の庁舎や集合住宅において鉄筋コンクリート造非構造壁にせん断ひび割れ等が生じて、地震後の機能継続が困難となった事例が見受けられた。これらの建築物では壁付き部材は損傷を許容する部材として設計上考慮されず、地震時に早期に損傷し、これらの被害をもたらしたと考えられる。

したがって、本設計法では、壁部材については壁板部分の取り付く長さによらず原則耐力壁として設計する。壁部材には壁付き部材（そで壁付き柱・腰壁ないし垂れ壁付きはり）に加えて、両側柱付き耐力壁、柱型のない耐力壁、方立壁、有開口付き耐力壁等が挙げられるが、これらの部材のうち(1)モデル化の不確定性等により大地震時にせん断破壊等の損傷が発生する可能性がある壁部材、(2)構面外の小ばりやスラブに直接取り付く架構への応力伝達が不明確な壁部材については完全スリットを設けるまたは乾式の非耐力壁等を用いることで明確に架構から切り離す。切り離すことが困難な場合は適切な壁厚および配筋を設けて耐力壁として地震力に抵抗できるように設計する。

架構の剛性率および偏心率の算定時には壁付き部材の剛性についても適切に考慮する。通常、保有水平耐力計算においては平面あるいは立面的に不整形な建物に対して F_{es} による要求耐力の割増規定があるが、2011年東北地方太平洋沖地震で被災した庁舎建築物において耐震補強されていたにも関わらず、大きく偏心していたために柱が斜め方向に大きく変形しせん断破壊した事例が確認されている。災害拠点建築物では不整形な架構の計画により、損傷が集中しないように偏心率については0.15以下、剛性率については0.60以下となるように設計する。

3.3 二方向外力の取り扱い

柱に作用する応力を算出するにあたっては、建築物の主軸各方向の他に斜め方向の地震力についても検討すること。

建築物に作用する地震力は、主軸 2 方向のみならず、斜め方向にも作用する。そこでここでは、2 方向外力の取り扱いについて、作用応力と保有耐力別に主に柱に着目して解説する。

図 3-1(a)に示すように、建築物が整形で地震力が主軸方向に作用する場合は、2 つの直交する主軸方向ごとに分けて考えることができる。この場合、柱に作用するせん断力（あるいは各階での柱に作用するせん断力の合計である層せん断力）は、建築物が弾性の場合は設計用せん断力に一致する。一方、弾塑性領域ではせん断力の大きさはその崩壊メカニズムによることになるが、各方向別に考えることができる。具体的には、例えば全体崩壊形の場合は、検討している地震力の方向と同一方向の構面の崩壊メカニズムにより柱の各方向の設計用せん断力を算出することができる。

一方、図 3-1(b)のように建物の斜め方向に地震力が作用した場合を考える。この場合においても、建築物が弾性の範囲では、図 3-1 (a)の場合と同じく、層せん断力は設計用層せん断力と一致する。その為、例えば全層において $D_s=0.55$ で設計する場合などは、想定する地震動に対して建物は弾性範囲とみなすことができる。ただし、検討方向に作用するせん断力は取り付く 2 方向のはりの剛比の影響を受けるため、柱 1 本ごとの設計用せん断力は図 3-1 (a)とは異なる場合もあるため、強度に余裕がない場合は注意が必要である。

一方、建築物が弾塑性領域に入ると、例えば両方向で全体崩壊形を形成する場合においても図 3-1 (a)とは異なり、取り付く 2 つのはりの終局モーメントの合力を柱が負担することとなり、設計用せん断力は一般的には増加することとなる。この柱の設計用せん断力をより精確に算出するためには建築物全体の立体モデルを構築し、斜め方向に地震力を作用させる必要がある。柱の設計用応力が最大となる地震力の方向を見つけるためには、あらゆる作用方向に対して設計用応力を算出し、その最大値を見つける必要があるが、一般的には、45 度方向を検討すればよい。ただし、明らかに 45 度以外の地震力の方向で応力が大きくなる場合には、その方向に対しても検討を行う。また、立体解析を実施せずに上下に取り付くはりの終局モーメントから安全側に柱の設計用応力を算出できる場合は、斜め方向の地震力に対する立体解析を実施しなくても良い。

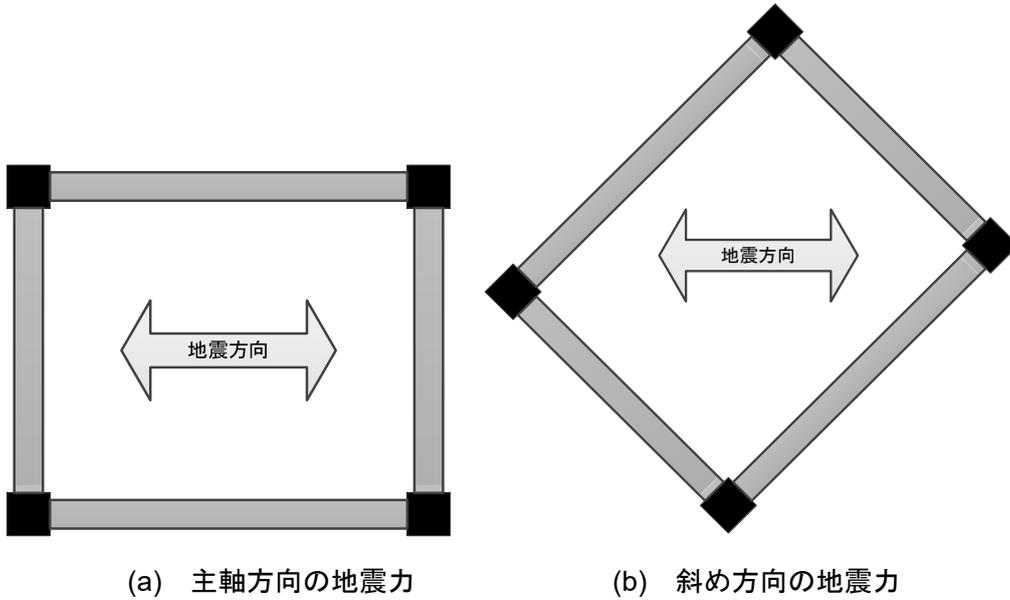


図 3-1 地震力の作用方向

一方、保有耐力に関しては、曲げモーメント耐力およびせん断耐力における 2 方向応力の影響を検討する必要がある。X および Y 方向に加力した時の各曲げモーメント耐力 (M_{ux} , M_{uy}) およびせん断耐力 (Q_{ux} , Q_{uy}) に対して、2 方向の影響が全くないとすると図中の四角形のように各方向の耐力は一定となる。一方、円で近似すると 2 方向加力時の各方向の耐力は、図 3-2 に示すように次式で表すことができる。

$$\left(\frac{M_x}{M_{ux}}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{uy}}\right)^2 = 1$$

$$\left(\frac{Q_x}{Q_{ux}}\right)^2 + \left(\frac{Q_y}{Q_{uy}}\right)^2 = 1$$

特に曲げモーメント耐力に関しては、断面を 2 方向で微小要素に分割したファイバー解析を実施することにより、2 方向外力に影響を直接的に検討することができる。一般的にはこの 2 方向外力に対する影響は次式で表し、 α 向外力に程度とすることが多い。

$$\left(\frac{M_x}{M_{ux}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_y}{M_{uy}}\right)^\alpha = 1$$

$$\left(\frac{Q_x}{Q_{ux}}\right)^\alpha + \left(\frac{Q_y}{Q_{uy}}\right)^\alpha = 1$$

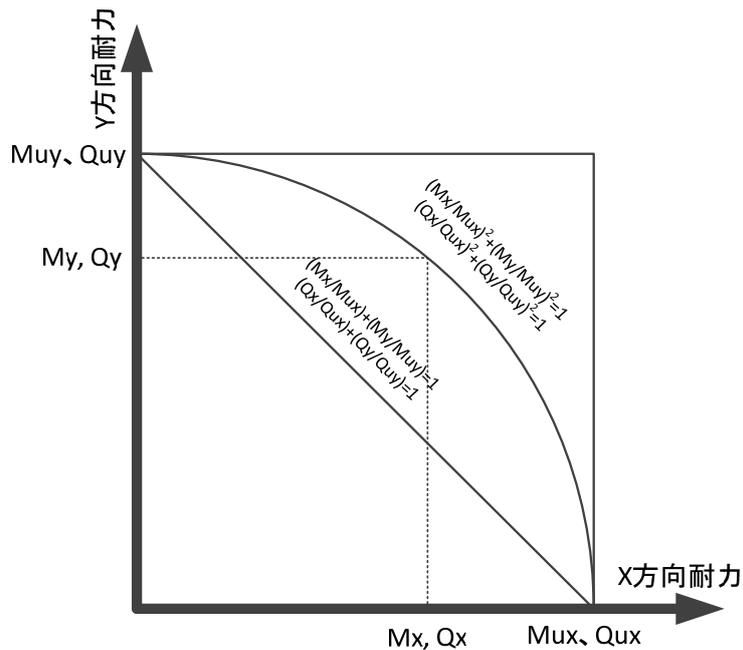


図 3-2 柱の 2 方向加力時の耐力

以上をまとめると、図 3-3 に示すように $D_s=0.55$ 相当を建物に採用した場合は、建物はほぼ弾性に留まっているとみなせるため、応力（要求値）は図に示すように円弧となる。その為、各方向で耐力が応力を上回ることを確認すれば別途斜め入力に対する検討は原則として不要となる。一方、 $D_s=0.40$ 相当を採用した場合は、建物の塑性化を想定しているため、図 3-3 に示すように応力は矩形となる。この場合、必要なせん断余裕度は 1.25 倍以上であるため、 D_s 換算で 0.50 程度のせん断耐力を有することとなる。よって斜め 45 度入力を考えた場合、図 3-3 に示すように応力が耐力を上回ることが想定される。斜め方向を考慮すると 1.40 倍程度の余裕度が必要であり、余裕度が小さい場合は斜め入力による検討を実施するなど、注意が必要である。

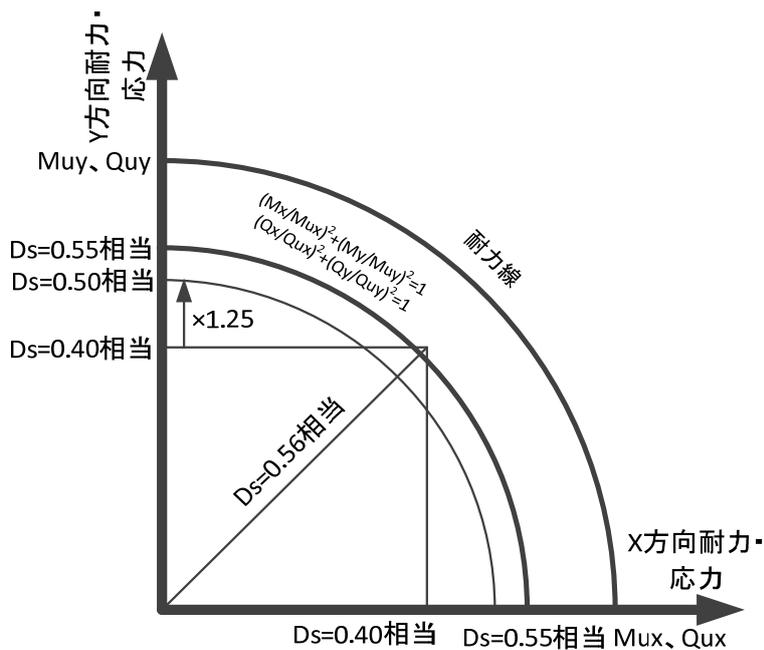


図 3-3 2 方向を考えた耐力と応力（要求値）の関係

3.4 ピロティ階の取り扱い

ピロティ階を計画する場合には、ピロティ階における層崩壊形を許容しない。

2015年版建築物の構造関係技術基準解説書²⁾では、ピロティ階での層崩壊形を許容しない設計方針（付録1-6.1）と、ピロティ階の層崩壊形及び全体崩壊形を許容する設計法（付録1-6.2）が示されているが、災害拠点建築物に求められる機能継続性を確保するために、付録1-6.1に示されているピロティ階での層崩壊形を許容しない設計方針に従って設計するものとする。

4. 部材の設計

4.1 壁部材および壁付き部材の仕様規定

壁部材は厚さを 200 mm 以上かつ柱に取り付く場合は柱幅の 1/4 以上とする。縦筋はダブル配筋とし、端部は柱型または閉鎖型鉄筋で拘束する。柱型としない場合は壁板縦筋比 0.6%以上とし、横筋は壁端部で 180° フックにより定着させる。曲げ降伏ヒンジが生じる壁板部分および壁が取り付く柱部材のせん断補強筋の間隔は 100mm 以下とする。また、コンクリートの設計基準強度については 30 N/mm² 以上とする

一般に壁厚が薄い非耐力壁、壁付き部材、耐力壁等では柱やはりに比べて、大きなひび割れ幅が生じやすい。2011 年東北地方太平洋沖地震においても中高層鉄筋コンクリート造共同住宅において非耐力壁の大きな損傷により機能継続が困難となった被害事例が散見されている。そこで、耐力壁として設計する壁については今回の実大実験結果を鑑みてひび割れ等の過大な損傷を防止するために、複配筋とし厚さを 200mm 以上とする。また、2015 年版建築物の構造関係技術基準解説書²⁾に記載されているので壁付き柱の終局せん断強度式（分割累加式）は柱断面と壁断面を分割してそれぞれのせん断強度を累加することで算定される。したがって、壁板部分と柱部分の比率が大きく異なる場合は各断面が負担するせん断応力度に差異が生じると考えられるので、壁厚は取り付く柱幅の 1/4 以上と規定している。ただし、今後の研究の進展によっては本規定が緩和される可能性がある。

壁部材については、せん断ひび割れを分散させ、端部のコンクリート圧壊や壁板縦筋の座屈を防止するために、端部に柱型を設けるか災害拠点総プロで載荷実験を行った実大 5 層試験体と同様に閉鎖型鉄筋および壁板縦筋比を 0.6 % 以上を設けることとしている。また、壁板部分のせん断補強筋は壁板縦筋に 180°フックにより定着させる。壁板縦筋比の算定は壁端部補強筋の断面積を閉鎖型鉄筋で拘束している面積にかぶり厚さと同じ長さだけ外側に広げた領域のコンクリート断面積に対する比率として算定される。設計において曲げ降伏ヒンジが想定される壁板部分および壁が取り付く柱については壁板縦筋または柱主筋が早期に座屈することを防止するためにせん断補強筋の間隔を 100mm 以下とする。一般の連層耐力壁付きラーメン構造においても曲げ降伏ヒンジが設計で想定される耐力壁については壁板部分も含めてコンクリートの圧縮靱性を高めるため、せん断補強筋の間隔を 100mm 以下とする。また、コンクリートの設計基準強度については 30 N/mm² 以上とする。これは、壁部材端部に高い圧縮応力が作用することに配慮したものである。

壁付き部材については設計において通気口や設備配管孔を設けることが多いが、曲げ降伏ヒンジを期待している部材においては開口を設けないことが望ましい。連層所で壁付き柱における端部補強筋および壁縦筋ははり内定着とし、はり上下端から 40d (d は鉄筋径) 以上の定着長さを確保する。これらの鉄筋の継手位置については降伏ヒンジ等が発生する危険断面から十分な距離をとった位置に計画する必要がある。

なお、本資料の中では、柱およびはりについては仕様規定を特に設けていないが、本設計法は高い剛性や耐力を付与して各部材の変形（損傷）を小さく抑えることを意図しているため、柱やはりに対しても余裕を持った断面や配筋となるように配慮することを推奨する。

4.2 壁付き部材のモデル化

壁付き部材は単一ばねまたはマルチスプリングにより線材モデルに置換する。ひび割れ強度、終局強度、剛性低下率等については 2015 年度版 構造関係技術基準解説書²⁾に記載されている方法を用いる。柱はり降伏ヒンジ位置が明確な場合の剛性として考慮する剛域は $D/4$ 節点側に入った位置まで、耐力として考慮する剛域はフェイス位置とする。(D は壁部分を含む部材全せいとする)

壁付き部材は単一ばねまたはマルチスプリングによる線材モデルに置換して解析を行う。また、復元力特時点については 2015 年版建築物の構造関係技術基準解説書²⁾「付録 1-3 鉄筋コンクリート造に関する技術資料」に記載されている方法を用いる。災害拠点総プロで実施した実大 5 層試験体 2 体の载荷実験結果についても既存の骨組解析プログラムを用いて、部材の剛性および強度を上記方法により評価し、壁付き部材を柱はり部材と同様に線材置換した静的漸増载荷解析結果と概ね整合することを確認している。

また、上記のモデルにおいてはそで壁付き柱の剛性算定時の剛域は $D/4$ (D は壁を含む部材全せい)、耐力算定時の剛域はフェイス位置としている。これは既往の部材実験結果において反曲点高さを揃えた腰壁付き柱部材とそで壁および腰壁付き柱部材の降伏点変形の比較から、剛性算定時の剛域については壁を含めた部材全せいの $1/4$ 程度とすると解析モデルが実験結果と整合しているためである。実験結果において部材の耐力算定時の剛域については壁厚に応じて変化するため一義的には定義できないものの、災害拠点建築物の設計では壁厚の厚い壁部材のみを計画しているため、耐力算定時の剛域についてはフェイス位置と見なして良い。なお、これらの剛域設定については柱またははり部材のいずれかに降伏ヒンジが形成されることが明確な場合であり、そで壁付き柱と腰壁または垂れ壁付きはりが交差する接合部分については、柱はり曲げ耐力比や取り付く壁長さ等により降伏ヒンジ位置や剛域が変化することが指摘されている。壁付き柱はり部材の危険断面位置での曲げ耐力比が近接し、どちらに降伏ヒンジが形成されるか明確でない場合については 4.4 節に示した方法により、降伏ヒンジ位置および剛域長さの詳細な検討を行う。

解析モデルにおける降伏点変形は、図 4-1 に示すように部材として定義した変形であり、最大耐力の 80%程度に到達する変形を目安としている。したがって部材せいの大きな壁付き部材については端部鉄筋の塑性率が大きくなることに留意する必要がある、部材種別の評価においても後述の通り壁式構造の耐力壁として読み替えて評価することになる。

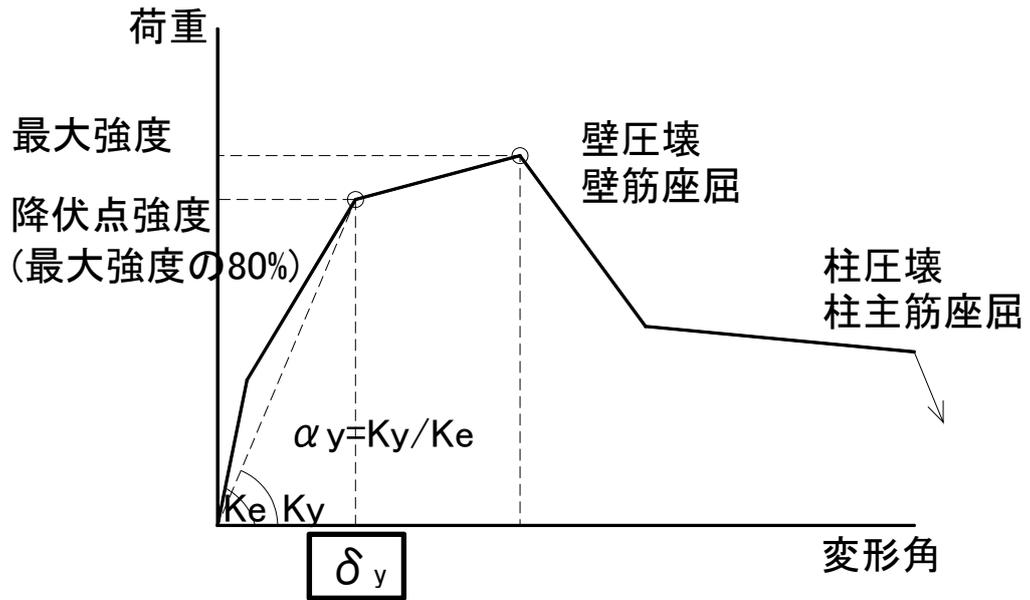


図 4-1 曲げ破壊形式を有する壁付き柱はり部材復元力の包絡曲線

4.3 壁付き部材の部材種別

壁付き部材の部材種別は 2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書²⁾6.4.4 (2) 1) f) に記載されている方法を用いて判定する。

壁付き部材の部材種別は 2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書²⁾6.4.4 (2) 1) f) に記載されている方法を用いて判定する。これは柱、はりの部材種別判定法を準用するものである。すなわち、そで壁付き柱の場合、 D は柱せいに圧縮側となるそで壁の長さを加えた数値、 τ_u は D_s 算定時のせん断力を柱と壁の断面積の和で除して計算した数値、 σ_0 は D_s 算定時の軸力を柱の断面積で除した数値、 p_t は柱部分の引張主筋断面積を柱の断面積で除した数値とし、柱と同様に判定する。このとき、 h_0/D を $2M/(Q \cdot d)$ に替えないこととする。また、腰壁、垂れ壁付きはりの場合、 τ_u は D_s 算定時のせん断力をはりの断面積で除して計算した数値とし、はりと同様に判定する。

ただし、同解説書で指摘されている通り、構造耐力上主要なそで壁が取り付く柱及び腰壁、垂れ壁が取り付くはりについては、これらの壁が取り付くことによって塑性変形能力、脆性破壊現象に影響を及ぼすが、現状の知見では正確な評価が困難である。また、最近の検討によると、柱、はりに取り付く壁が長く、柱、はりより耐力壁に力学性状が近づく場合、壁の仕様によっては上述の方法により部材種別を FA~FD に判定すると危険側の評価となる場合があることが分かってきたため、上述の方法で部材種別判定を行う壁長さについては、柱、はりのせいの 1.0 倍までとすることが推奨される。その理由は、災害拠点総プロで実施した実大 5 層試験体の載荷実験において、4.1 節に示した仕様規定を満足させた場合には、著しい耐力低下挙動が生じないことを確かめたためであり、壁長さがこれを超える場合には、4.2 節に示した仕様規定を満足させたとしても、著しい耐力低下挙動が生じないことが保証できない。したがって、壁長さが柱、はりせいの 1.0 倍を超える場合には、例えば、昭 55 建告第 1792 号第 4 第二号に掲げる壁式構造の耐力壁の種別 (WA~WD) を用いる等の余裕を持った設計が望まれる。また、壁が薄い場合にも塑性変形能力が小さくなり危険側となることも指摘されているが、本設計法では壁厚を柱幅の 1/4 以上確保することとしているため、壁厚は十分に確保されていると考えてよい。

4.4 接合部の取り扱い

腰壁・垂れ壁付きはり、はり主筋の引張降伏が壁端部の圧壊よりも先行するように設計すること。壁を考慮した柱はり曲げ耐力比は 1.2 以上とすること。

はりヒンジ部で十分な曲げ耐力および靱性能を確保するためには、せん断余裕度を確保するだけでなく、はり主筋の引張鉄筋が釣合鉄筋比以下とし、はり主筋の引張降伏が腰壁・垂れ壁端部の圧壊よりも先行するように設計する。釣合鉄筋比を超えるはり主筋が配された場合、耐力・靱性が十分に発揮されないことが実験により確認されている。

また、はり崩壊形を形成した際に、はりに取りつく腰壁・垂れ壁の圧壊が、そで壁との交差部まで進展し、そで壁付き柱の剛性・耐力を低下させることのないように、十分な柱はり曲げ耐力比を確保する必要がある。そで壁付き柱のそで壁端部の圧壊が生じる前に架構がはり降伏型のメカニズムに達するためには、壁を考慮した柱はり曲げ耐力比（そで壁付き柱の曲げ終局強度時節点モーメントと腰壁・垂れ壁付き柱の曲げ終局強度時節点モーメントの比）を 1.2 以上とすればよい。これは、壁付き柱はり接合部の実験において、壁を考慮した柱はり曲げ耐力比を 1.2 以上とすることで、そで壁の圧壊が生じず、そで壁と腰壁・垂れ壁交差部での圧壊も生じなかったことに基づくものである。

節点モーメント算定時には、壁付き架構の応力状態を考慮して適切な反曲点高さを設定する必要がある。現状では適切な反曲点高さを算定する簡易手法が確立されていないため、骨組み解析等により反曲点高さを設定することを原則とする。検討は、一次設計時および二次設計時の反曲点高さをを用いることとする。

4.5 スラブの取り扱い

崩壊メカニズムの確認時にはスラブ付きはり降伏点変形においてスラブ全幅を有効とした部材モデルを用いる。スラブ下端筋については引張応力に対して十分な定着長さを確保した上で終局曲げ強度に反映させる。

災害拠点総プロで実施した実大5層試験体の載荷実験においても、スラブ全幅有効とした架構の計算強度が実験結果における復元力の包絡線と最も対応が良いことが確認されている。また、腰壁または垂れ壁付きはり部材についてもスラブ全幅およびはりに付帯する壁断面を考慮した平面保持仮定に基づく終局強度評価によって、部材曲げ終局強度を評価しうることを、災害拠点総プロで実施した部材実験および実大実験により検証している。これらの部材では中立軸は壁内に位置するため、スラブ全幅の上端下端筋が引張鉄筋として曲げモーメントに寄与するため、非常に大きな終局曲げモーメントとなる。一方、近年の架構実験においてスラブ上面のひび割れ位置やスラブ上端筋の最大引張歪みは桁行方向にも張間方向にも一様な分布とはならないため、保有水平耐力算定時の変形角レベルで歪み計測点で網羅的に全てのスラブ筋が降伏した状況は確認されていない。したがって、保有水平耐力の算定における安全側の検討としては慣用的な1mのスラブ協力幅を考慮することもできる。スラブ有効幅は変形角に応じて拡大するため、弾性剛性および降伏点剛性低下率（降伏変形角）については従前の通りスラブ協力幅をスパン長さの0.1倍とした日本建築学会 鉄筋コンクリート構造計算規準における値を採用する。

慣用的な方法としてはり側面から片側1m程度の範囲内のスラブ上端筋をはりの剛性および強度の算定時に考慮に入れる方法が2015年版建築物の構造関係技術基準解説書²⁾に記載されているが、これらの仮定は既往のスラブ付きはりを有する載荷実験に基づくものであり、その多くはT字型断面の桁行はりとして直交はりを有さない条件下で検討されてきた。この実験条件は張間方向に無限長のスパン長さの付帯スラブを仮定したものであるが、通常のスラブは周囲がはりに拘束されているため、はり軸方向変形に伴うスラブの引張ひずみが直交方向にほとんど減衰せず、これらの実験結果は実際の建物におけるスラブ協力幅を過小評価する結果となっている。したがって、崩壊メカニズムの確認、すなわち柱はり曲げ耐力比の計算における壁付きはり部材の曲げ終局強度の算定時にはスラブ全幅を有効として計算する必要がある。また、スラブ下端筋は計算耐力と実耐力が整合するように引張に対して十分な定着長さを確保させる必要がある。

5. 応答変位計測装置の設置

災害拠点建築物では、最大層間変形角を計測可能な装置を各階に設置する。

2011年東北地方太平洋沖地震では地震による被災地域が広範囲にわたったこともあり、応急危険度判定を実施できる専門家の早期確保が困難となり、特に超高層建築物等では地震後から使用安全性の確認がとれるまでに時間を要した。災害拠点建築物では周辺地域の応急復旧の拠点として安全性が即座に確認される必要があり、民間建築物に比べて施設管理者により直接応急危険度を判定できるケースが多いと考えられるが、損傷度の例示は主に柱や壁部材に生じたひび割れ損傷を扱っており、主にはり降伏メカニズムを有する現行基準の建築物では残留ひび割れ幅から残存耐震性能を正確に評価することは十分な経験や専門的知識を要する。建物管理者であっても目視により簡易に建築物の機能継続の可否について判断可能な仕組みが社会から求められている。

そこで、災害拠点建築物については最大層間変形角を計測可能な装置を各階に設置することとし、災害拠点総プロでは比較的簡易な罫書き（応答変位計測装置）を設置することにより、最大層間変位および残留変位を記録する方法を提案し、実大5層試験体の載荷実験において検証を行った。

2014年度に実施した実験においては、方立壁に設けた構造スリットの切り離し部分を利用して罫書きを設置することにより、最大層間変位および残留変位を記録した（図5-1）。罫書き針をスプリングコイルにより記録板に押当てた形式とし、層間変形角1.00%まで水平・鉛直変形に対して追従し、スリットつき方立壁の回転角と層間変形角の幾何学的比例関係から層間変形角を概ね推定できることを示した。罫書き針および押当て板はプラスチック製ではなく金属製とした方が滑らかな応答履歴が得られることも明らかになった。この方法により、地震時の最大応答変位計測し、耐震ランクⅠでは最大層間変形角0.33%、耐震ランクⅡでは0.75%として架構の機能継続を判断する。設置場所については建物全層が望ましいが、静的漸増載荷解析からそれぞれの状態における最大応答層のみ設置すればよい。なお、これ以外のモニタリングの方法としては簡易強震計を建物内に設置する方法があり、それによってもよいが無停電装置や継続的な観測のためのランニングコストが必要となる。

また、災害拠点建築物の試設計例においては、DS、EPS、倉庫等の空間を利用して、応答変位計測装置を比較的簡単に取り付けられる方法を検討している。測定治具は、鋼製アングルの縦材を上階のはりに固定し、当該階の床付近まで腕を伸ばした形とする。その腕の先に罫書きを取り付け、治具と床の相対変位を測定する。測定精度確保の剛性としては、水平震度1.0に対して1mm以下と設定し、斜材を設けている（図5-2）。なお、これらの機器により被災直後の機能継続の可否が確認された場合であっても、被災度区分判定については専門的な判断を有するため、別途有識者等による補修の要否等について詳細な損傷状態の調査は必要である。

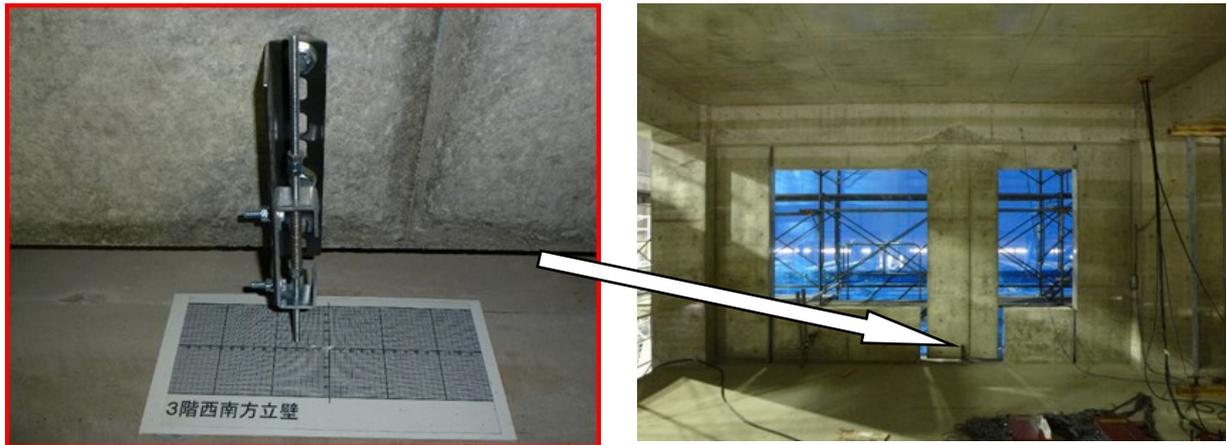


図 5-1 実大実験で検証した応答変位計測装置

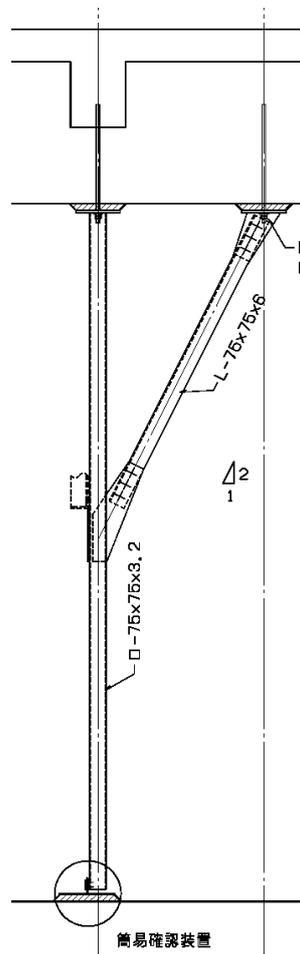


図 5-2 試設計で検討した応答変位計測装置の取付け方法の例

参考文献

- 1) 官庁施設の総合耐震・対津波計画基準, www.mlit.go.jp/common/001157883.pdf
- 2) 2015年版 建築物の構造関係技術基準解説書, 全国官報販売協同組合
- 3) 2015年改定版 震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 一般財団法人 日本建築防災協会
- 4) 建築構造設計基準の資料 平成27年版, www.mlit.go.jp/common/001157896.pdf

技術資料②

拠点室における天井設計法

拠点室における天井設計法

目次

1. 適用範囲
2. 要求される機能・性能
3. 天井の耐震設計
4. 国総研式耐震吊り天井（KT吊り天井）
 - 4.1 概要
 - 4.2 適用範囲
 - 4.3 材料
 - 4.4 水平力抵抗部材の耐力
 - 4.5 設計

1. 適用範囲

本設計法は、「災害拠点建築物の設計ガイドライン（案）」（以下、ガイドライン（案））に基づく災害拠点建築物の拠点室に、天井を計画・設計する際に適用する。

本設計法は、災害拠点建築物の拠点室となる執務室を念頭においている。執務室は一般的に、平面方向に間隔が大きくなならない程度の距離で柱を格子状に均等に配置した中に計画され、階高や天井高は大きくなならない。また、主に事務作業等を行う執務室に要求される機能や性能は、その他の室と比べて異なることも想定される。このため、本設計法の内容を災害拠点建築物の拠点室となる執務室以外に適用する際には、個別の条件に照らし合わせて、適用の適否について判断する必要がある。

2. 要求される機能・性能

対象とする拠点室の天井の計画・設計は、室の用途を踏まえて天井に要求される機能・性能を適切に設定した上で行う。

天井は、計画・設計の対象とする室等の上方に位置する建築的な面、と定義することが可能である。この場合、吊り天井を室に設ける以外にも、室の上方に位置する建築的な面（例えば、上階の床スラブの下面等）によって天井を形成することもあり、天井の計画・設計は、室等に吊り天井等を設ける場合だけでなく吊り天井等を設けない場合も対象となる。

室を上下に分割する高さに天井面を設けることを想定した場合、天井が室等の空間に与える作用としては、以下のようなものを挙げることができる。

- ①天井面による室の空間の分割
- ②居室への意匠的な作用
- ③天井自体及び付随する部材の位置の保持
- ④天井面による遮断・透過・反射

①天井面による室の空間の分割

天井面を境として、天井面の下方には日常的に利用する居室の高さ・容積が確保され、天井面の上方である天井裏にも高さ（深さ）・容積が確保される。居室と天井裏に必要な機能・性能等を踏まえて天井面が設定されて空間が上下に分割されるが、必ずしも居室と天井裏を同等に計画するわけでもなく、与条件となる階高分の空間から、必要な機能・性能等を踏まえて計画・設計した居室を取り去った“残りの空間”がそのまま天井裏となることも少なくない。

②居室への意匠的な作用

室を使用する人に対して意匠的な側面を有する。例えば、天井の表面の色彩・模様であったり、天井の立体的な形状であったりする。意匠的な観点から天井面を立体的に構成しようとするると天井面が一体的に挙動しない部分が出てきて耐震性という観点から弱点となることもあるので、室に要求される機能・性能を踏まえて計画・設計する必要がある。

③天井自体及び付随する部材の位置の保持

天井自体及び付随する部材の位置を保持する。例えば、天井面は吊り材で吊られて水平面を維持しており、天井面には照明等の比較的小さな設備機器が設置されており、天井から案内板がぶら下がるなどしており、種々の部材をその位置に保持している。地震時にはそれらの部材を含めて耐震性を確保する必要がある。

④天井面による遮断・透過・反射

天井面を境に、居室と天井裏の間の種々の要素のやりとりが調節される。例えば、居室に天井裏から入る（居室から天井裏に出る）のが望ましくないものは遮断・反射され、適度に入る（出る）のが許容されるものは透過される。遮断・透過・反射にあたっては、(1)天井にある程度の質量・強度等を必要とするもの（例えば音、熱）もあれば、(2)天井にそれ程の質量・強度等を必要としないもの（例えば視線、光）もある。

天井に求められる性能や役割については「天井等の非構造部材の落下に対する安全対策指針・同解説」（(一社)日本建築学会、2015年）で表2の通り整理されており、それらの項目に上記の①～④をあてはめて表2に整理した。例えば、比較的軽い材料で天井面を設けることを考える場合、ある程度の質量・強度を必要とする④(1)に該当する項目について特に検討する必要がある。また、比較的重い材料で天井面を設けたり、地震力等の外力の影響を考慮したりする場合は、③について特に検討する必要がある。

居室に天井面を設けない場合は、天井面が担っている性能や役割について代替措置を講じる必要がある。

表2 天井に求められる性能や役割と各作用

分類		求められる性能や役割	①	②	③	④		
						(1)	(2)	
室内空間に本来期待される機能の実現	視覚	照明	屋光利用	・窓・天窓からの採光時の天井面の反射を利用				○
		照度	・天井面は背景として、反射面としての明るさの感覚に寄与					○
		その他	・照明器具の保持、照明による光の分布					
	サインなど	・サインの保持やワイヤーメッシュ天井からの吊り下げ ・サインの見やすさ				○		
	映像、舞台	・映像スクリーン機能 ・舞台やスクリーン ・ピクチャーレールの保持						○
	安心感、空間のグレード	・設備機器類やダクト、配管等を隠蔽 ・圧迫感や開放感、また空間のグレード感	○	○				○
	空調	冷暖房、換気	・空調機器の保持				○	
			・天井チャンバーなど ・天井形状による気流の誘導	○				○
		適切な空調ボリューム	・室内の気積を天井高さで制御	○				○
		室内空気質	・VOC等 ・汚染物質の封じ込め					○
断熱・結露・落滴防止	・天井による断熱効果(最上階) ・天井形状による結露水の誘導や落下防止(プール、浴場等)				○		○	
清潔・防塵	・耐火被覆材や塵かき類の落下を防止 ・厨房等では天井は衛生面から必要					○		
特定の性能の実現	音	遮音	・屋根、上階からの音浸入防止(外部騒音、雨音など) ・遮音性能は天井の質量に依存				○	
		吸音	・吸音性、音声明りょう度、話しやすさ					○
	反射	反射音、残響音	・反射性能は天井の質量と形状に依存				○	○
		スピーチプライバシー 空間認知	・可動式反射板の天井設置による音響可変性の実現 ・室内反射音での空間認知 ・スピーカー等音響機器の保持					○
	空気質	高度な空気管理	・温湿度の制御 ・空気清浄度、クリーン度					○
火災安全性との関連	煙の制御	排煙口の保持	・天井面は煙たまりの界面	○			○	
		排煙ダクト	・天井チャンバー排煙	○			○	
		防煙垂壁等	・防煙垂壁の設置				○	
	蓄煙機能	・火災時の蓄煙・希釈効果、天井が低い場合、煙が降下する時間は短く危険側	○				○	
不燃性能など(内装制限)	・屋根スラブにウレタン等の断熱材を施す場合、不燃性能等が確保しづらい。不燃などの天井を張ることで解決可能 ・壁は難燃でも天井は準不燃以上など、壁より厳しい要求 ・重い不燃材は火災時に落下しやすく、消防活動上危険					○		
防災機器の保持	感知器、スプリンクラー、非常用照明、誘導灯	天井がなくても別の方法で設置は出来る。スプリンクラーなどは設置位置によっては機器の性能を上げる必要がある				○		

3. 天井の耐震設計

天井の耐震設計は水平方向及び鉛直方向について行う。吊り天井に作用する設計用水平地震力の算定に用いる設計用標準水平震度について以下に検討する。

一般的な官庁施設の非構造部材の耐震設計にあたって参照される文献²⁾³⁾⁴⁾を踏まえた上で、ここで対象とする指示機能を有する拠点室に設ける吊り天井に作用する設計用地震力の検討を行う上で文献 2 を参照する。同文献では、非構造部材の設計用地震力について、以下のように定めている。

$$F_H = K_H \cdot W$$

$$K_H = Z \cdot K_S$$

$$F_V = K_V \cdot W$$

$$K_V = 1/2 \cdot K_H$$

F_H : 設計用水平地震力 (kgf)

F_V : 設計用鉛直地震力 (kgf)

K_H : 設計用水平震度

K_V : 設計用鉛直震度

K_S : 設計用標準水平震度

Z : 地域係数 (原則として、1.0 とする。)

W : 建築非構造部材の重量 (kgf)

ここで、非構造部材の設計用標準水平震度として、以下のような値が示されている。

表 3-1 建築非構造部材の設計用標準水平震度 (K_S)²⁾

場所	建築安全性の分類	
	機能停止が許されない室、 A類施設の外部及び特定室	一般室及びB類施設の外部
上層階 屋上及び塔屋	1.0	1.0
中間階	1.0	0.6
1階及び地下階	0.6	0.4

(注) 上層階の定義は、次のとおりとする。

2～6階建の場合は最上階、7～9階建の場合は上層2階、10～12階の場合は上層3階、13階建以上の場合は上層4階とする。

平屋建の場合は、1階及び地下階の値を用いる。

また、建築非構造部材及び建築設備の耐震安全性確保について検討するための床応答加速度の検討について、以下のような内容を示した上で、“ただし、これらの係数を全て乗じると過大な値となること、建築非構造部材や建築設備機器は許容応力度設計され、大地震動に対しての終局強度には余裕があると思われることから、前記の値は 2/3 程度として差し支えないと考えると共に、最小値を 0.4、最大値を 2.0 とする。すなわち、建築非構造部材の値は 0.4～1.0、建築設備の値は

2.0 を採用する。”としている。

$0.4G$	A_1'	I	I_s	K_2	
建築非構造部材：	0.4	$\times (1.0\sim 2.5)$	$\times (1.0\sim 1.5)$		$=0.4\sim 1.5$
建築設備：	0.4	$\times (1.0\sim 2.5)$	$\times (1.0\sim 1.5)$	$\times (1.0\sim 1.5)$	$\times (1.5\sim 2.0) =0.6\sim 4.0$
建築物の重要度係数			$I : 1.0\sim 1.5$		
建築設備の重要度による係数			$I_s : 1.0\sim 1.5$		
建築設備機器の応答倍率				$K_2 : 1.5\sim 2.0$	

上記では、建築非構造部材については、部材の重要度による係数（建築設備では I_s ）と部材の応答倍率による係数（建築設備では K_2 ）は考慮されていない。

ここで、拠点室に設ける吊り天井の耐震設計を考える上では、吊り天井の地震時の損傷度合が抑えられることが拠点室の機能継続上で重要であることから、重要度による係数 1.5 を考慮することとする。また、応答倍率は、構造耐力上主要な部分に追従すると想定できる直天井等とする場合は 1.0 を採用し、吊り天井の固有周期を短くすることで構造体との共振を避ける考慮をして地震時の損傷を低減できるもの（例えば災害拠点総プロで開発した吊り天井（次々頁参照））を採用することを前提として吊り天井とする場合は 1.5 を採用することとする。

これらを踏まえて本設計法で採用する設計用標準水平震度を検討すると、上記の式の前 3 項を考慮した場合の最大の設計用標準水平震度 1.0 に対して、ここで新たに採用した重要度及び応答倍率を乗じることにより、

$$1.0 \times 1.5 \times 1.5 = 2.25$$

となり、端数を切り捨てて、設計用標準水平震度は最大で 2.2 とする。

直天井などの構造体に追従する天井については、重要度による係数 1.5 を考慮する一方で応答倍率は 1.0 とし、同様な計算より、設計用標準水平震度は最大で 1.5 とする。

以上より、天井の耐震設計に用いる設計用水平地震力を求める際に用いる設計用水平震度について、設計用標準水平震度は以下とする。また、設計用鉛直地震力を求める際に用いる設計用鉛直震度は設計用水平震度の 1/2 とする。

表 3-2 指示機能を有する拠点室の天井の設計用標準水平震度

	構造体に追従する天井 (直天井など)	構造体との共振を避ける考慮 をした天井
下記以外の階	1.5	2.2
1 階及び地下階	0.9	1.3

※本表は「災害拠点建築物の設計ガイドライン（案）」に基づいて設計される建築物において、復旧・復興の際の指示機能を有する拠点室に適用する。

4. 国総研式耐震吊り天井 (KT 吊り天井)

4.1 概要

拠点室に吊り天井を設ける際の天井を検討するにあたっては、地震時に地震動との共振を避けて天井面の形状及び非共振状態を維持することを目標とした。開発した吊り天井は「国総研式耐震吊り天井」(略称 **KT 吊り天井**) と呼ぶこととした。

KT 吊り天井の仕様の検討では、既存の在来工法による吊り天井(鋼製下地材による吊り天井)をベースに、天井と周囲の壁等との間に隙間を設ける構成とした。地震時に天井に生じる慣性力を構造耐力上主要な部分や支持構造部分に伝達する耐震要素(水平力抵抗部材)は、従来の野縁受け等を用いる斜め部材と比較して耐力が大きいものを集中的に配置することとし、天井面から鉛直上方向の一定範囲は天井裏の設備機器や配管の取り回しに活用できるように検討した(図 4-1)。天井の損傷は水平力抵抗部材の鋼材(図 4-1 の柱材)の曲げ破壊により生じ、急激な耐力低下を伴わないような構成としている。

4.2 適用範囲

KT 吊り天井は、ガイドライン(案)に基づいて計画・設計される、指示機能を有する拠点室に吊り天井を設ける場合に適用できる。庁舎等では柱を比較的均等な格子状に配置して平面を構成することが多く、天井面の構成も比較的均一であり、**KT 吊り天井**はそのような場合に適用することを前提とした実験検討を背景に開発している。特定天井等での使用を検討する場合には、適用範囲を改めて想定した上で、使用条件に応じた実験等による確認が必要である。

天井面構成部材の質量は、一般的な執務室で用いられる吊り天井を想定して $20\text{kg}/\text{m}^2$ 以下とする(災害拠点総プロで実施した実験に用いた試験体は約 $15\text{kg}/\text{m}^2$)。適用面積は特に限定しないが、開発の前提が災害拠点建築物に設けられる指示機能を有する拠点室であるから、その程度までの規模の室が適用する対象として想定される。吊り天井及び水平力抵抗部材を設置する吊り元は、構造耐力上主要な部分もしくは吊り天井に生じる力を構造耐力上主要な部分まで適切に伝達できる部分とする。一体的な吊り天井を設置する箇所で天井懐寸法が異なる場合は、吊り元の高さを調節して吊り長さを合わせる、異なる高さの水平抵抗部材の剛性を揃えるなどする。

4.3 材料

吊り材、天井下地材及び野縁ジョイントは **JIS A6517**(建築用鋼製下地材(壁・天井))-2010 に規定されるものを、クリップは耐風圧クリップを用いることとする。過去の地震では、つめの折り曲げにより野縁を野縁受けに接合する一般的に用いられているクリップの面的な脱落が吊り天井の面的な脱落において確認されており、**KT 吊り天井**では耐風圧クリップを用いることとしている(実験ではクリップで損傷が生じる前に水平力抵抗部材が損傷している)。

天井板は、天井下地材にとめ付ける捨て張りの天井板には **JIS A6901**(せっこうボード製品)-2014 で規定されるものを用いることとする。災害拠点総プロで実施した実験では、一般的な執務室の天井で用いられる構成を参照して、捨て張りはせっこうボード 9.5mm 、仕上板はロックウール化粧吸音板 12mm とした。

水平力抵抗部材は、一般的に市場で容易に入手できるもので製品規格に適合する材料(例: **JIS G 3350**(一般構造用軽量形鋼)-2009 に規定する軽量形鋼、**JIS G3192**(熱間圧延形鋼の形状、寸法、質量及びその許容差)-2014 に規定する等辺山形鋼、不等辺山形鋼、溝形鋼等)を用いることにより材料の品質を確保している。災害拠点総プロでの開発では、図 4-1 に示すように、軽量形鋼 2 種類(方杖材及び上部水平材は $\square 50 \times 50 \times 1.6$ 、柱材、下部水平材及び天井面との接合部は

□50×100×1.6)、厚さ 3mm の鋼製プレートを主材料としており、各部材の接合は実験における施工時の調整を想定してボルト接合を主とした。

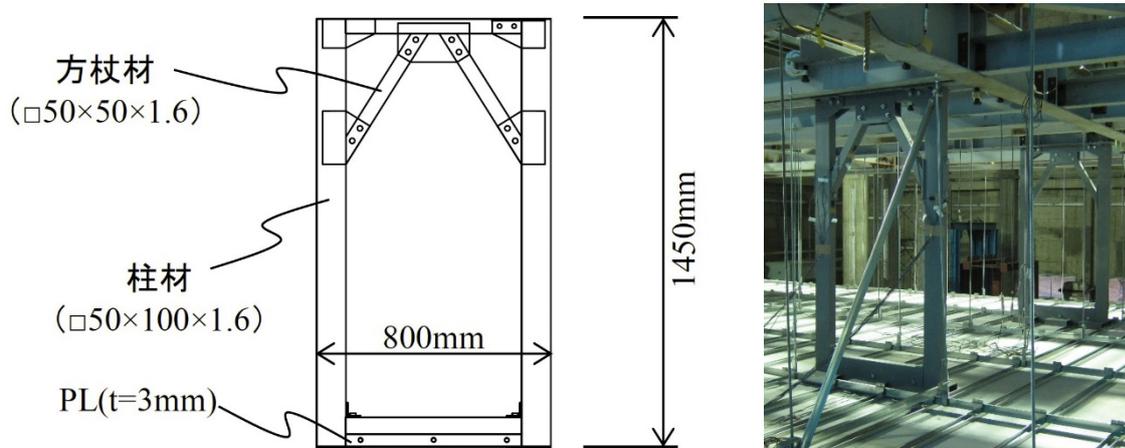


図 4-1 開発した水平力抵抗部材（吊り長さ 1.5m の場合）

4.4 水平力抵抗部材の耐力

KT 吊り天井の開発では、水平力抵抗部材の耐力は文献 4「建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説」に従ってユニット実験により求めた。図 4-1 に示す水平力抵抗部材を用いた吊り天井試験体の長手方向については、ユニット実験より許容耐力を 5.7kN と設定した。水平力抵抗部材の短手方向の剛性は長手方向に比べて小さく、本設計法で天井の剛性や耐力を計算する際には考慮しないこととした。

4.5 設計

4.5.1 耐震設計

耐震設計は水平方向及び鉛直方向について検討する。設計方法は、文献 4 に示す計算ルートによる。設計用水平震度は「3.天井の耐震設計」に従い、水平方向は最大 2.2、鉛直方向はその 1/2 の 1.1 とする。これらの震度から求められる地震力に対して、必要となる水平力抵抗部材の数を計算するとともに、水平力抵抗部材、吊りボルト、両者の吊り元に作用する力がそれぞれの部材の許容耐力以内であることを確認する（鉛直方向については、重力による自重を考慮すると、上向き 0.1G、下向き 2.1G の力が作用した時に各部材がもつことを確認することになる）。天井と周囲との隙間は 6cm とする。

なお、天井の固有周期や建物固有周期を適切に評価することができる場合には、簡易スペクトル法や応答スペクトル法を用いることができる。

4.5.2 水平力抵抗部材の配置計画

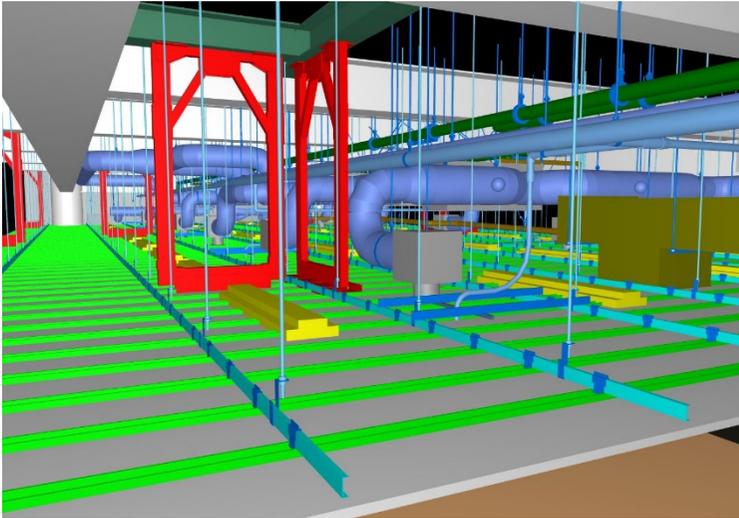
水平力抵抗部材は必要数量を、直交する 2 方向それぞれに釣り合いよく配置する。対象とする拠点室は多くの場合は格子状に配置された柱に従って計画されるため長方形平面であり、室上部に設ける吊り天井も多くの場合はおおむね（柱等の周囲に切り欠きがあるが）長方形平面となる。水平力抵抗部材の釣り合いよい配置を検討する際には、このように直交する 2 方向各 2 本の柱で囲まれる長方形の区画毎について検討することとする。この際、1 室で同様の区画が繰り返されるような場合には、天井裏に配置される空調機器・配管等について最も密である区画について水

水平力抵抗部材の配置を検討して、それを基に他の区画での配置を検討することも考えられる。災害拠点総プロで実施した動的加振実験では、約 80 m² (16.5×4.8m) の吊り天井に対して水平力抵抗部材を長手方向に 6 個 (間隔は芯々で 6.3m) 配置している。

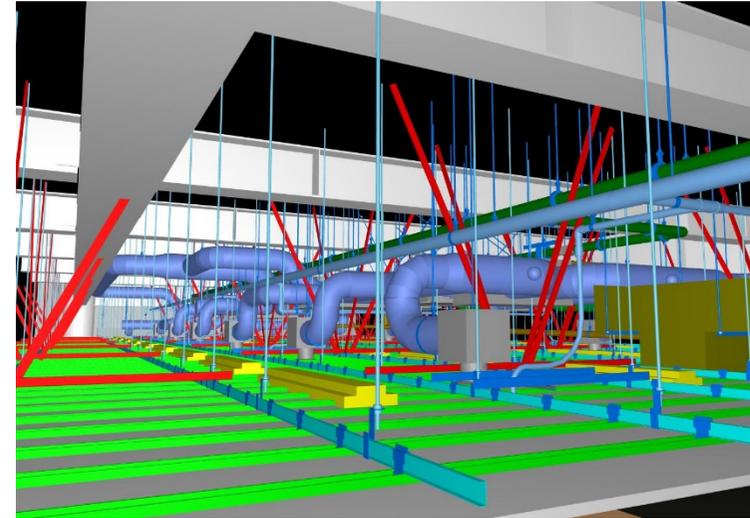
参考文献

- 1) (一社) 日本建築学会：天井等の非構造部材の落下に対する安全対策指針・同解説，2015 年
- 2) 建設大臣官房官庁営繕部監修：官庁施設の総合耐震計画基準及び同解説 平成 8 年版，(社) 公共建築協会，1995 年
- 3) 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領，(社) 日本建築学会，2003 年
- 4) 「建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説」，平成 25 年，国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所、一般社団法人新・建築士制度普及協会

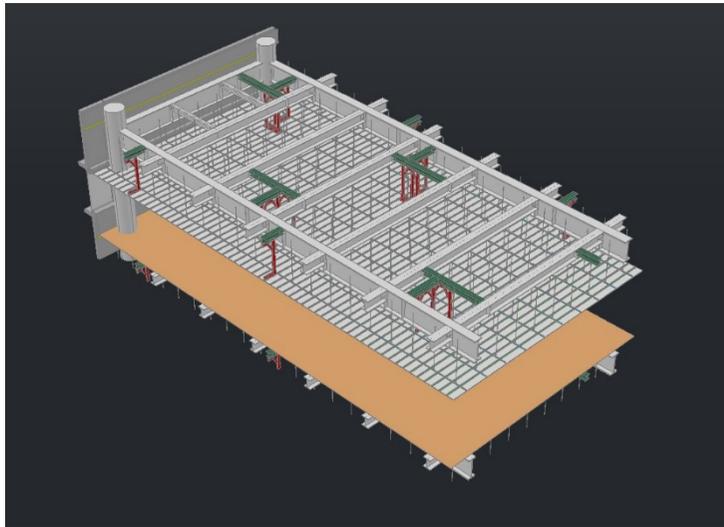
□災害拠点総プロで開発した吊り天井のイメージ（赤い部材が耐震抵抗要素（水平力抵抗部材、斜め部材））



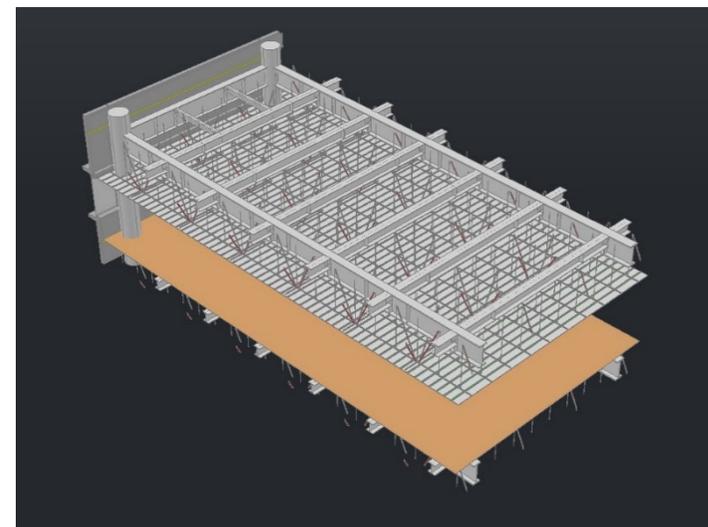
天井裏空間の状況（災害拠点総プロで開発した吊り天井）



天井裏空間の状況（従来の斜め部材を用いた吊り天井）



水平力抵抗部材の配置例



従来の斜め部材の配置例

技術資料③

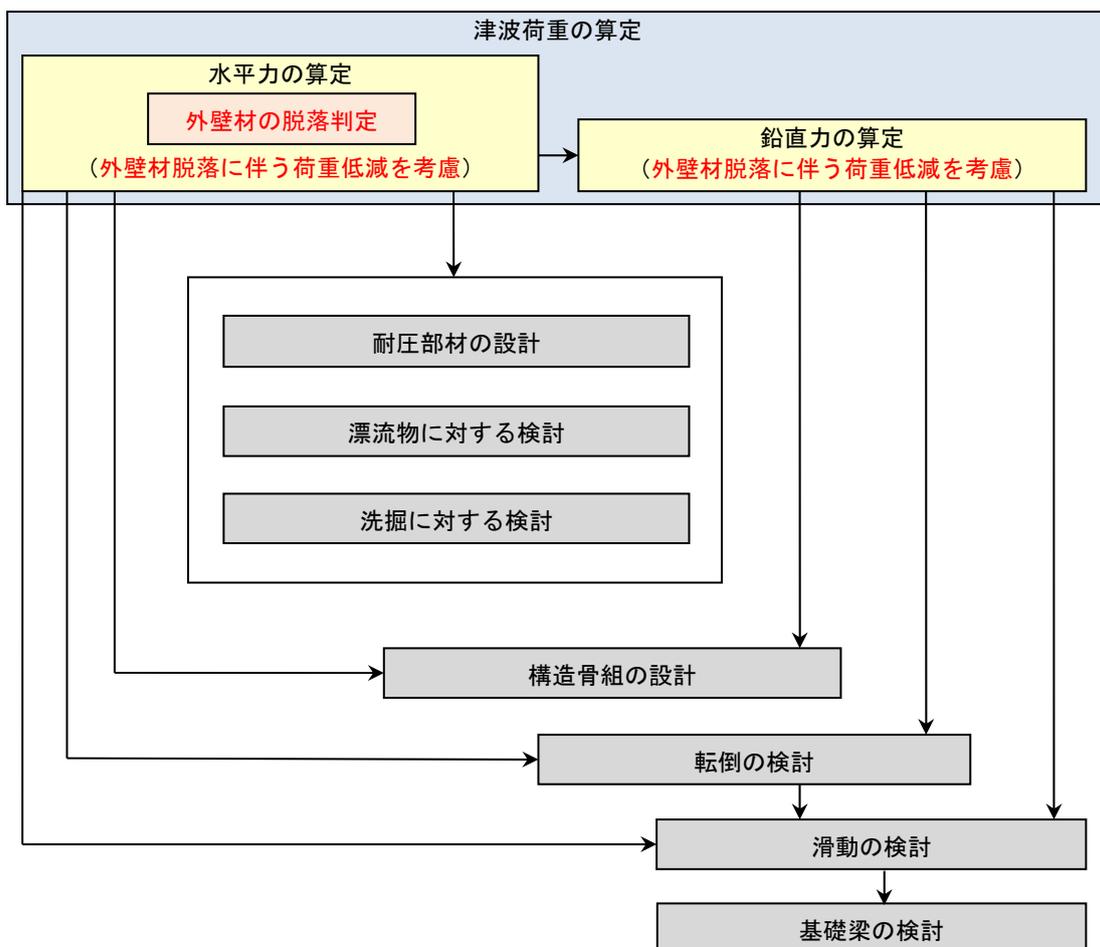
外壁材の脱落を考慮した耐津波設計法

外壁材の脱落を考慮した耐津波設計法

目 次

1. 適用範囲
2. 外壁材の脱落を考慮した水平力の算定
 - 2.1 外壁材の脱落判定
 - 2.2 津波波圧の算定
 - 2.3 水平力の算定
3. 外壁材の脱落を考慮した鉛直力の算定

本技術資料では、「災害拠点建築物の設計ガイドライン」(案)に基づく外壁材の脱落を考慮した耐津波設計法を提示する。本設計法の全体の流れを以下に示す。流れの骨格は、津波避難ビル等の構造上の要件の解説で示されるものに準拠しているが、津波荷重の算定、即ち、水平力の算定、鉛直力の算定で、外壁材脱落に伴う荷重低減を考慮している点が、従来の設計法と異なっている。ここでは、外壁材の脱落を考慮した新たな津波荷重の算定について解説する。



外壁材の脱落を考慮した耐津波設計法の全体の流れ

1. 適用範囲

- ・外壁材の脱落を考慮した津波避難ビル等の構造設計に適用する。
- ・地震・風荷重等に対する通常的设计要件を満たしていることを前提とする。
- ・本設計法の適用においては、ハザードマップ等に示される想定浸水深或いは津波浸水想定（津波があった場合に想定される浸水の区域及び水深）に基づき津波の設計用浸水深を設定する。また、当該建築物の立地に基づき水深係数を設定する。
- ・外壁材の脱落を考慮するにあたっては、原則として、当該外壁材の破壊性状、破壊に至るまでの最大耐力が水理実験等で確認されている必要がある。ただし、当該外壁材が津波による波圧により容易に破壊され開口部とみなせる場合は、この限りでない。
- ・本設計法に示されていない項目については、建築基準法、津波防災地域づくり法、その他の関係法令に従うこととする。

2. 外壁材の脱落を考慮した水平力の算定

2.1 外壁材の脱落判定

外壁材の想定破壊モードの工学量が R の場合、当該外壁材が脱落することを下式により判定する。

$$R_{\max} > R_u \quad \text{—————(1)}$$

ここで、

R_{\max} : 平成 23 年国土交通省告示 1318 号（以下、告示 1318 号という。）の津波波圧算定式(※)で算定される津波波圧により外壁材に生じる最大応力

R_u : 外壁材の最大耐力（水理実験等に基づいて適切に評価された数値とする。）

(※) 告示 1318 号の津波波圧算定式は、下式のとおりある。

$$qz = \rho g(ah - z) \quad \text{—————(2)}$$

ここで、

qz 津波による波圧 (kN/m²)

ρ 水の単位体積質量 (kN/m³)

g 重力加速度 (m/s²)

h 津波浸水想定に定める水深 (m)

z 建築物等の各部分の高さ (m)

a 水深係数 (3 とする。ただし、他の施設等により津波による波圧の軽減が見込まれる場合にあつては、海岸及び河川から 500 メートル以上離れているものについては 1.5 と、これ以外のものについては 2 とする。)

外壁材の脱落判定のクライテリアを示している。本判定式では、平成 23 年国土交通省告示 1318 号（以下、告示 1318 号という。）の津波波圧算定式で算定される津波波圧により外壁材に生じる最大応力が最大耐力を上回る時、脱落と判定される。条件を満たさない場合は、非脱落と判定される。前者の場合、当該外壁材は津波で早期に脱落するものとして波力低減の対象となるが、後者の場合、通常の外壁材と同様、波力低減の対象とはならず、告示 1318 号の津波波圧算定式から算定される津波波力を受けること

になる。なお、開口部を有する外壁材は脱落判定の対象外で、非脱落扱いとなる。

外壁材が ALC パネルの場合の脱落判定の手順を以下に示す。適用範囲は、厚形パネルの縦壁ロックン
グ構法と横壁アンカー構法とする。高層建築物等で使用されるパネル埋設アンカーをパネル内部鉄筋に
溶接固定する等の高強度仕様は、適用範囲外とする。ALC パネルで想定される主な破壊モードは、パネ
ルの曲げ破壊と取付け部の引抜き破壊の 2 種類である。津波の進行方向において、津波が建物の外側か
ら内側に浸入する時の波圧を正側の波圧（正圧）、建物の内側から外側に抜けていく時の波圧を負側の波
圧（負圧）と定義する場合、正圧に対してはパネルの曲げ破壊、負圧に対しては取付け部の引抜き破壊
が生じることが想定される。想定破壊モードの工学量をパネルの曲げモーメント M 、取付け部の引抜き
力 P とした場合、脱落判定式は次式となる。

$$M_{\max} > M_u \quad (\text{正圧の場合}) \quad \text{—————} \quad (2.1)$$

$$P_{\max} > P_u \quad (\text{負圧の場合}) \quad \text{—————} \quad (2.2)$$

ここで、

M_{\max} : 告示 1318 号で規定される津波波圧によりパネルに生じる最大応力

M_u : パネルの最大耐力（曲げ強さ）

P_{\max} : 告示 1318 号で規定される津波波圧により取付け部に生じる最大応力

P_u : 取付け部の最大耐力（引抜き強さ）

ALC パネルの最大耐力は、次式で算定することができる。

$$M_u = \alpha * M_{u0} \quad \text{—————} \quad (2.3)$$

$$P_u = \alpha * P_{u0} \quad \text{—————} \quad (2.4)$$

ここで、

α : 脱落保証係数（3 以上とする。）

M_{u0} : 静的加力試験におけるパネルの最大耐力（曲げ強さ）

P_{u0} : 静的加力試験における取付け部の最大耐力（引抜き強さ）

脱落保証係数 α は、水理実験から算出された最大耐力と静的加力試験の最大耐力の比が約 1.5～2 倍で
あったこと、津波の種類による载荷速度の影響、モデル化の影響等を勘案し、3 以上の値を設定すること
とする。

静的加力試験における最大耐力 M_{u0} 及び P_{u0} は、実際に使用する外壁材と同一ロットの試験体による最
大耐力の平均値（3 体以上の平均値）をとることを基本とする。なお、最大耐力に関する既往の知見に基
づき、最大耐力 M_{u0} 及び P_{u0} は、下記の簡便な方法で算定された値とすることもできる。

$$M_{u0} = 3.2 * M_a \quad \text{—————} \quad (2.5)$$

$$P_{u0} = P_{u0,\max} \quad \text{—————} \quad (2.6)$$

ここで、

M_a : パネルの許容荷重（パネルの許容荷重は設計図書の指定による。指定なき場合、建築基準法施
行令第 87 条の 2 に規定される風荷重とする。）

$P_{u0,\max}$: 7.2kN/箇所（厚さ 100mm のパネルに限る。）

（注）簡便式の数値・適用範囲は現時点の限られたデータに基づく暫定案で、今後変わりうるものである。

2.2 津波波圧の算定

津波波圧は下式により算定する。外壁材脱落部については、当該外壁材の最大耐力に相当する波圧だけが作用するものとして、波圧を低減して算定する。

$$qz = \rho g (ah - z) \quad (\text{一般部}) \quad \text{—————(3)}$$

$$qz_i' = \rho g (a_i' h - z_i') \quad (\text{外壁材脱落部}) \quad \text{—————(4)}$$

ここで、

qz : 津波波圧 (一般部 : 外壁材脱落部を除く建築物等の部分) (kN/m^2)

ρ : 水の単位体積質量 (t/m^3)

g : 重力加速度 (m/s^2)

h : 設計用浸水深 (m)

z : 一般部の地盤面からの高さ ($0 \leq z \leq ah$) (m)

a : 水深係数 (3 とする。ただし、他の施設等により津波による波圧の軽減が見込まれる場合にあつては、海岸及び河川から 500 メートル以上離れているものについては 1.5 と、これ以外のものについては 2 とする。)

qz_i' : 津波波圧 (外壁材脱落部) (kN/m^2) ($1 \leq i \leq N$) (i : 脱落する外壁材の番号)

a_i' : 当該外壁材の最大耐力時水深係数

z_i' : 当該外壁材の地盤面からの高さ ($z_{i,\text{down}}' \leq z_i' \leq z_{i,\text{up}}'$)

($z_{i,\text{down}}'$: 当該外壁材の下端の高さ、 $z_{i,\text{up}}'$: 当該外壁材の上端の高さ)

外壁材の脱落を考慮した場合の波圧分布の例を図 2-1 に示す。本例は 4 階建ての建築物で 1 階と 2 階の外壁材が脱落するとした場合の波圧分布である。外壁材脱落部を除く部分 (柱、梁、脱落しない外壁材) には、(3) 式の津波波圧 (水色部分)、外壁材脱落部には、(4) 式の津波波圧 (赤色部分) が作用する。外壁材の脱落を考慮しない場合、(b)-(b') 断面の波圧分布は点線で囲われる三角形分布となるが、外壁材の脱落を考慮する場合、赤色の三角形分布となり、外壁材の脱落を考慮することで両者の差分の波圧が低減される (ただし、2.3 で波力低減の制限の規定があり、開放部 (ピロティ部等) を除き、原則として、その制限内とする)。

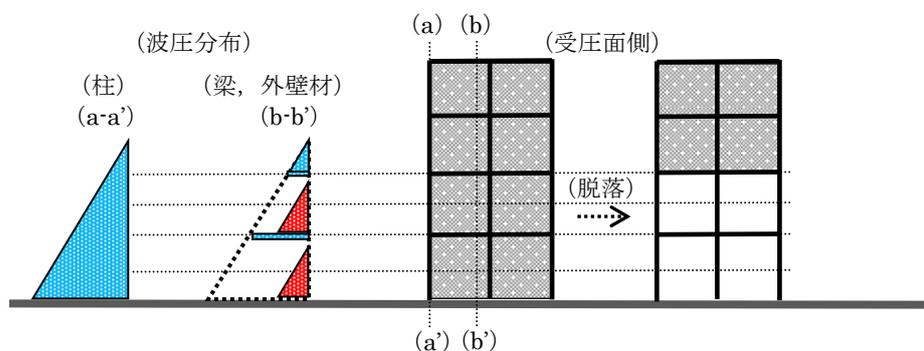


図 2-1 外壁材の脱落を考慮した場合の波圧分布の例

2.3 水平力の算定

津波によって生じる水平力は、(3)式及び(4)式の津波波圧が同時に生じると仮定し、下式により算定する。

$$Q_z = \rho g \int_{z_1}^{z_2} (ah - z) B dz + \sum_{i=1}^N \left(\rho g \int_{z_{i,down}}^{z_{i,up}} (a_i' h - z_i') B_i' dz_i' \right) \quad \text{—————(5)}$$

ここで、

Q_z : 水平力 (津波波力) (kN)

B : 高さ z における津波作用幅のうち外壁材脱落部を除く幅 (m)

z_1 : 受圧面の最小高さ ($0 \leq z_1 \leq z_2$) (m)

z_2 : 受圧面の最高高さ ($z_1 \leq z_2 \leq \min[ah, H]$) (m) (H は建築物の高さ)

B_i' : 高さ z_i' における当該外壁材の幅 (m)

開口部 (常時開放されたもの又は津波による波圧により容易に破壊されることが想定される非耐圧部材 (外壁にある窓、ドア、シャッター等) に限る。開放部 (ピロティ部等) を除く。) を有する場合、各高さ毎の津波作用幅から各高さ毎の開口部の幅を除外して津波波力を算定することにより波力を低減することができる。ただし、開口部或いは外壁材の脱落に伴う開口部を有する場合、原則として、開口部及び外壁材脱落部により低減した津波波力がこれらの低減を行わない場合の津波波力の7割を下回らないこととする。

開放部 (ピロティその他の高い開放性を有する構造 (津波が通り抜けることにより建築物等の部分に津波が作用しない構造のものに限る。) の部分) を有する場合、当該開放部に津波波力は作用しないものとする。外壁材の脱落に伴う開放部を有する場合、外壁材脱落部に、津波が建築物の外側から内側に侵入する時の波力 (正側の波力) と建築物の内側から外側に抜けていく時の波力 (負側の波力) の大きい方の波力が作用するものとする。開放部を有する階については、津波波力の低減の限度を設けないこととする。

外壁材の脱落を考慮した津波波力の設定の例を図 2-2、図 2-3 に示す。図 2-2 は外壁材が縦張りの場合、図 2-3 は外壁材が横張りの場合を想定している。建築物の各層の津波波力は、(3)式及び(4)式で算定した津波波圧を支配受圧面積で積分する形の(5)式で算定される。

開口部又は開放部を有する場合は、当該部分を受圧面積から除外することで波力を低減することができるが、開口部（外壁材の脱落に伴う開口部も含む）による低減では、一定の制限（低減前の 7 割を下回らない）が設けられているのに対し、開放部（外壁材の脱落に伴う開放部も含む）による低減では、その制限は設けられていない。前者の低減の制限は、通常建築計画を前提とし内壁等が存在する場合には、波力の低減が小さくなるとされていることから設定されている。ただし、特別な調査又は研究によりさらに低減することは排除されない。検討対象の階の内壁がパーティション等の容易に破壊されるものであり、かつ、建築物の前面と背面の外壁材の脱落を確認した場合、津波が当該階の外側から内側に侵入する時の波力（正側の波力）と建築物の内側から外側に抜けていく時の波力（負側の波力）の大きい方の波力を作用させることで、開放部と同等の扱いとして、当該階の波力については、低減の制限を解除することができる。

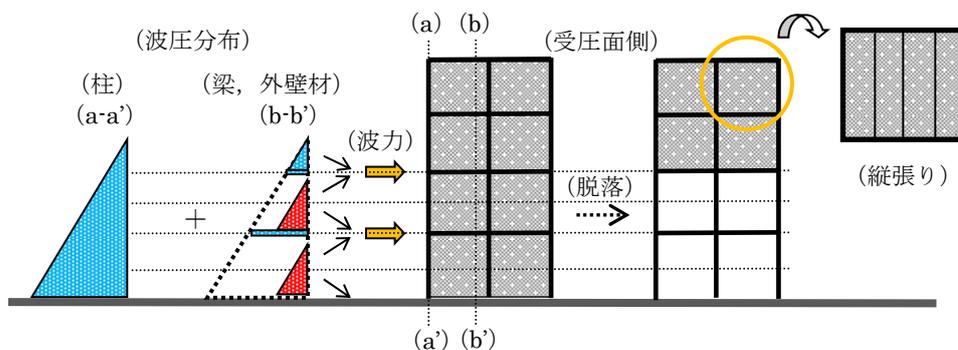


図 2-2 外壁材の脱落を考慮した津波波力の設定の例（縦張り）

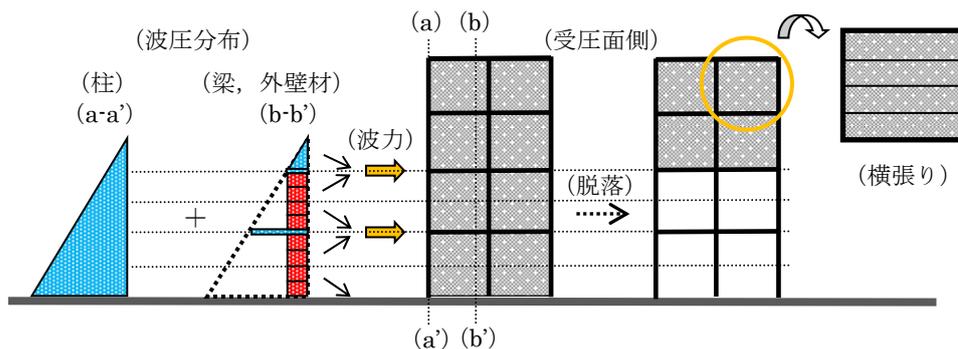


図 2-3 外壁材の脱落を考慮した津波波力の設定の例（横張り）

津波で外壁材が脱落し、対象階がピロティ階となる場合の例を図 2-4 に示す。本例では、当該階に内壁が存在せず、かつ、津波の正側の波力で構面 A の外壁材が脱落した後、負側の波力で構面 B の外壁材が脱落することから、当該階はピロティ階、即ち、開放部となる。従って、外壁材が脱落するまでに受ける波力以外には、当該階には津波波力は作用しないものとする事ができる。なお、外壁材が脱落するまでに受ける波力としては、構面 A の正側の波力と構面 B の負側の波力の大きい方の波力を採用することとする。また、当該階については、津波波力の低減の限度を設けないこととする。

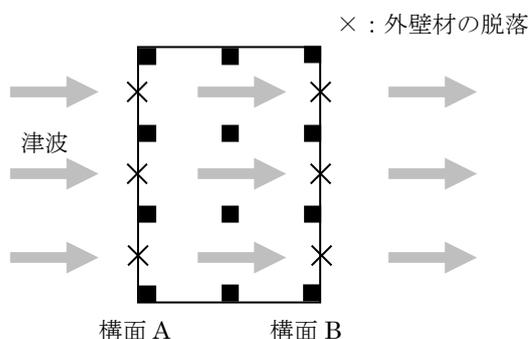


図 2-4 外壁材の脱落によるピロティ階の例（平面図）

開口部なしの外壁材と開口部ありの外壁材が混在する構面の例を図 2-5 に示す。開口部なしの外壁材は、脱落すると判定される場合、脱落による波力低減が可能であるが、開口部ありの外壁材は、脱落判定の対象外であり、波力低減の際には、通常の開口部による低減を行う。

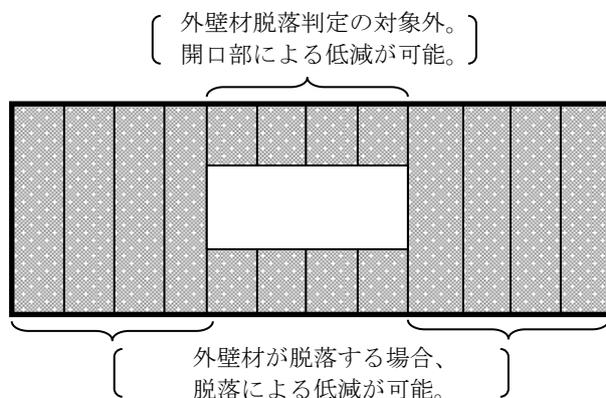


図 2-5 開口部なしの外壁材と開口部ありの外壁材が混在する構面の例

開口部等による波力低減においては、建築物等の実況を考慮する必要がある。例えば、第一構面に開口部があっても、そこから流入する水の抜け道がないような構造の場合は、開口部として取り扱わず、波力低減を行わないことが適当である。また、ピロティの内部に壁があるような場合は、その壁が津波波圧を受けるものとして波力算定する必要がある。

3. 外壁材の脱落を考慮した鉛直力の算定

津波によって生じる鉛直力は、下式により算定する。

$$Q_z = \rho g V \quad \text{—————(6)}$$

ここに

Q_z : 鉛直力 (浮力) (kN)

V : 津波に浸かった建築物の体積 (m^3)

ただし、開口率を勘案して水位上昇に応じた開口部からの水の流入を考慮して算定することができる。外壁材が脱落し開放部となる場合には、外壁材の脱落に伴う水の流入を考慮して算定することができる。

外壁材が脱落し開放部となる場合、外壁材の脱落に伴う水の流入を考慮して算定することができる旨を記述した。外壁材の脱落を考慮した浮力の設定の例を図 3-1 に示す。図の(a)は外壁材が脱落する直前に建築物にかかる浮力の状態、図の(b)は外壁材が脱落し最終的に水位が設計用浸水深に到達した時に建築物にかかる浮力の状態を示している。津波水位が上昇する中で、外壁材が脱落し当該階に水が流入すると、建築物にかかる浮力の状態が大きく変化する。外壁材の脱落を考慮した浮力の算定では、外壁材の脱落の直前と脱落後の最終状態でそれぞれ浮力を算定し、大きい方の値を採用することで、浮力を算定できる。具体的には、(a)では、脱落浸水深の時の水没した建物体積 (内部空間の容積を含む) に相当する浮力、(b)では、設計用浸水深の時の水没した建物体積から建築物に流入する水の体積 (浸水体積) を差し引いた体積に相当する浮力 (水没した構造躯体そのものの体積分の浮力、水没した層の梁又は垂れ壁と上階スラブに囲まれた空気溜まりの体積分の浮力、エレベーターホールやコア壁等に囲まれ開口部が十分に設けられていないなどの浸水しない区画の体積分の浮力の合計) を算定し、大きい方の値を採用する。なお、外壁材の脱落が複数階で生じる時は、実状に応じて複数のケースを想定し、一番大きい値を採用する。

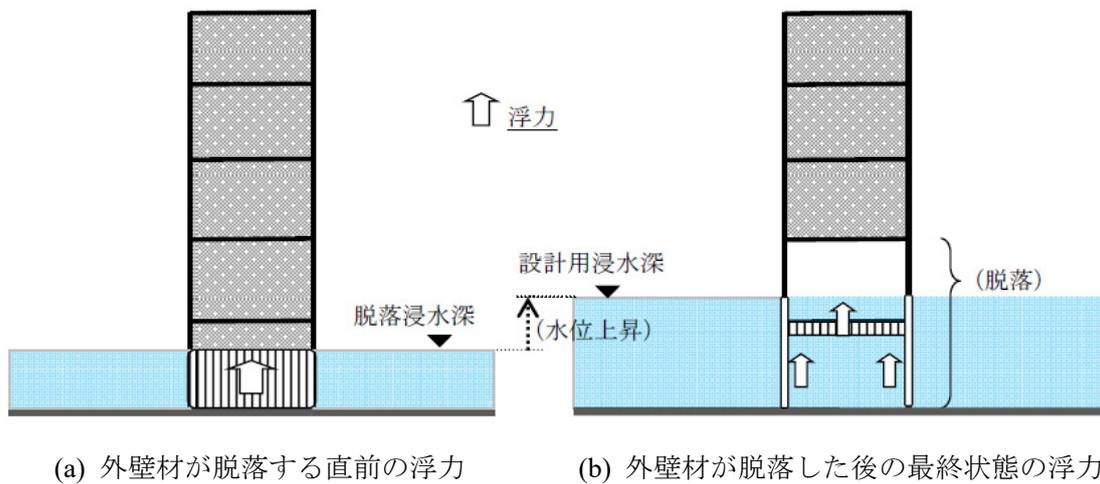


図 3-1 外壁材の脱落を考慮した浮力の設定の例

技術資料④

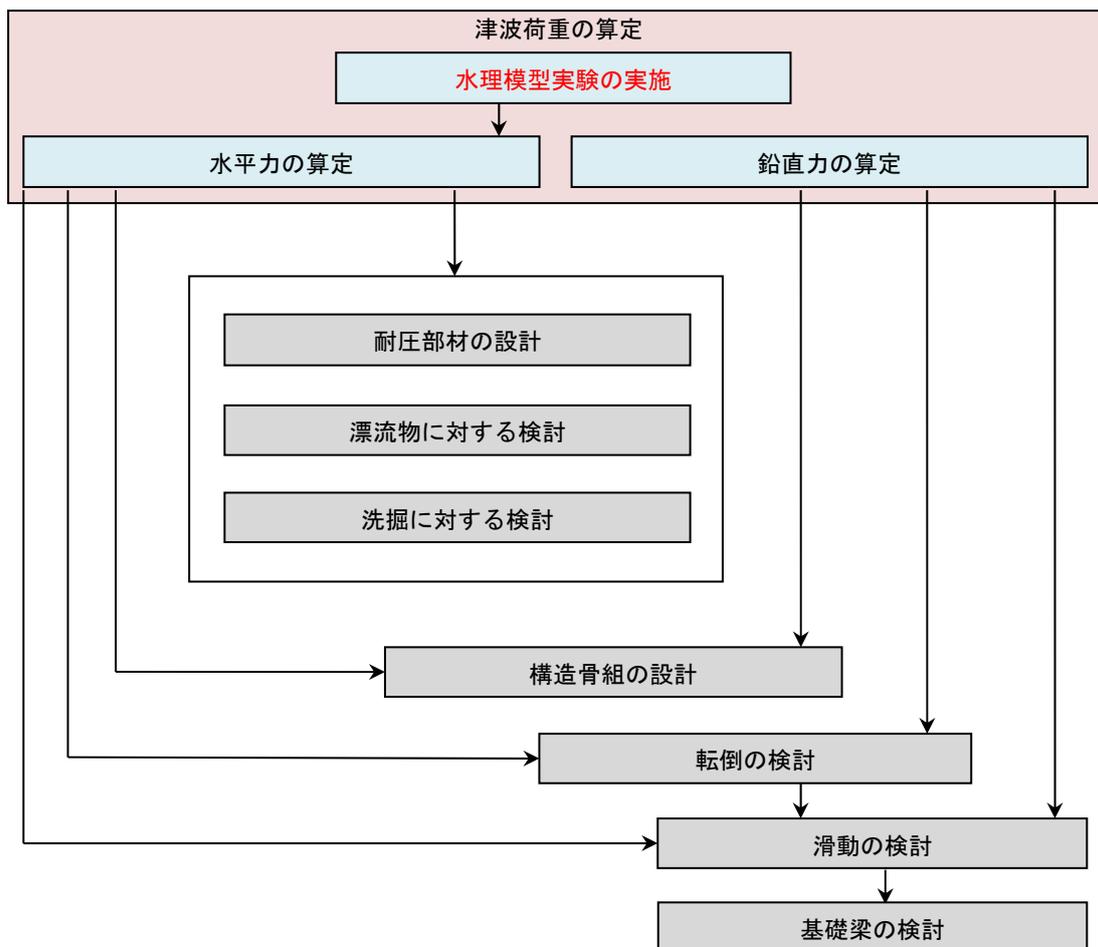
低抗力型建築物の耐津波設計法

低抗力型建築物の耐津波設計法

目 次

1. 適用範囲
2. 津波荷重の算定
 - 2.1 水平力の算定
 - 2.2 鉛直力の算定
3. 低抗力型建築物の津波荷重低減効果の評価のための水理模型実験方法
 - 3.1 本実験方法の適用について
 - 3.2 津波条件と津波波力
 - 3.3 水理模型実験の相似則
 - 3.4 造波方法
 - 3.5 実験水路
 - 3.6 建築物モデル
 - 3.7 地形モデル
 - 3.8 通過波実験
 - 3.9 波力実験

本技術資料では、「災害拠点建築物の設計ガイドライン」(案)に基づく低抗力型建築物の耐津波設計法を提示する。本設計法の全体の流れを以下に示す。流れの骨格は、津波避難ビル等の構造上の要件の解説で示されるものに準拠しているが、津波荷重の算定、即ち、水平力の算定、鉛直力の算定において、水理模型実験を実施し、建築物形状や部材配置等の影響を詳細に調査して値を算出する点が、従来の設計法と異なっている。ここでは、津波荷重の算定について解説する。



低抗力型建築物の耐津波設計法の全体の流れ

1. 適用範囲

- ・津波による力を受けにくい低抗力型の建築物の耐津波設計に適用する。
- ・本設計法の適用においては、ハザードマップ等に示される想定浸水深或いは津波浸水想定（津波があった場合に想定される浸水の区域及び水深）に基づき津波の設計用浸水深を設定する。また、当該建築物の立地に基づき水深係数を設定する。
- ・津波荷重の算定においては、水理模型実験を実施することを前提とし、当該建築物の形状を有するモデル（以下、対象建築物モデルという。）及びそれと外形寸法が等しい直方体形状の無開口モデル（以下、基準建築物モデルという。）（なお、当該建築物がセットバック部分、円弧部分等を有する場合には、対象建築物モデルと外接する直方体形状を想定する。）に作用する津波による水平力又は鉛直力が確認されている必要がある。
- ・本設計法に示されていない項目については、建築基準法、津波防災地域づくり法、その他の関係法令に従うこととする。

2. 津波荷重の算定

2.1 水平力の算定

当該建築物に作用する津波による水平力は、次式で算定する。

$$F_{x,T} = \alpha_x \cdot F_{x,T0} \quad (1)$$

ここで、

$F_{x,T}$ ：当該建築物に作用する津波による水平力

$F_{x,T0}$ ：当該建築物と外形寸法が等しい直方体形状の無開口の基準建築物を仮定し、その基準建築物に平成 23 年国土交通省告示 1318 号で規定される津波波圧が作用した場合に生じる水平力

α_x ：3 章に示す方法により、水理模型実験に基づき算出される水平力の低減率

当該建築物に作用する津波による水平力の算定プロセスは以下のとおりである。

- ・当該建築物と外形寸法が等しい直方体形状の無開口の基準建築物を仮定する。当該建築物がセットバック部分、円弧部分等を有する場合には、当該建築物と外接する直方体形状を想定する。
- ・平成 23 年国土交通省告示 1318 号（以下、告示 1318 号という。）で規定される津波波圧および波力の算定式に、設定した設計用浸水深、水深係数の値を代入し、基準建築物に作用する水平力 $F_{x,T0}$ を算定する。

$$F_{x,T0} = 1/2 \rho g (ah)^2 B \quad (2.1)$$

ここで、

ρ ：水の単位体積質量、 g ：重力加速度、 a ：水深係数、 h ：設計用浸水深、 B ：基準建築物の受圧面の幅

- ・3 章に示す方法により、水理模型実験を実施し、対象建築物モデルに作用する計測水平力を基準建築物モデルに作用する計測水平力で除して、水平力の低減率 α_x を算出する。
- ・基準建築物に作用する水平力 $F_{x,T0}$ に水平力の低減率 α_x を乗じ、当該建築物に作用する水平力 $F_{x,T}$ を算定する。

なお、当該建築物に作用する水平力 $F_{x,T0}$ から各階の水平力を推定する場合は、建築物の内部空間形状等を考慮し、その値を適切に設定するものとする。例えば、当該建築物が各階で同一平面を有する場合、告示 1318 号の津波波圧算定式（水深係数を使った静水圧式）による波圧が受圧面に作用すると仮定して

算出される水平力の割合に応じて水平力 $F_{x,70}$ を配分することができる。

2.2 鉛直力の算定

当該建築物に作用する津波による鉛直力は、次式で算定する。

$$F_{z,T} = \alpha_z \cdot F_{z,70} \quad (2)$$

ここで、

$F_{z,T}$: 当該建築物に作用する津波による鉛直力

$F_{z,70}$: 当該建築物と外形寸法が等しい直方体形状の無開口の基準建築物を想定し、その基準建築物に作用する、東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針に基づき算出される鉛直力

α_z : 3章に示す方法により、水理模型実験に基づき算出される鉛直力の低減率

当該建築物に作用する津波による鉛直力の算定プロセスは以下のとおりである。

- ・当該建築物と外形寸法が等しい直方体形状の無開口の基準建築物を仮定する。当該建築物がセットバック部分、円弧部分等を有する場合には、当該建築物と外接する直方体形状を想定する。
- ・東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針で規定される算定式を用いて、基準建築物に作用する鉛直力 $F_{z,70}$ を算定する。

$$F_{z,70} = \rho g V \quad (2.2)$$

ここで、

ρ : 水の単位体積質量、 g : 重力加速度、 V : 津波に浸かった建築物の体積

- ・3章に示す方法により、水理模型実験を実施し、対象建築物モデルに作用する計測鉛直力を基準建築物モデルに作用する計測鉛直力で除して、鉛直力の低減率 α_z を算出する。
- ・基準建築物に作用する鉛直力 $F_{z,70}$ に鉛直力の低減率 α_z を乗じ、当該建築物に作用する鉛直力 $F_{z,T}$ を算定する
- ・水理模型実験で建築物の基礎部分をモデル化していない場合、適宜その分の推定鉛直力を足し合わせ、鉛直力 $F_{z,70}$ を算定する。

なお、当該建築物に作用する鉛直力 $F_{z,70}$ を各杭に配分する場合は、津波避難ビル等の構造上の要件の解説に従い、杭の支配面積に応じて鉛直力 $F_{z,70}$ を配分することができる。

3. 低抗力型建築物の津波荷重低減効果の評価のための水理模型実験方法

3.1 本実験方法の適用について

津波荷重を特別な調査または研究に基づき算出する方法の一つとして水理模型実験による方法が挙げられる。平成 23 年国土交通省告示 1318 号の津波波圧算定式を用いて低抗力型建築物の形状・開口・部材配置等による津波荷重低減効果を評価する場合に適用できる水理模型実験方法を示す。

平成 23 年国土交通省告示 1318 号では、「第一（前略）ただし、特別な調査又は研究の結果に基づき津波の作用に対して安全であることが確かめられた場合にあっては、これによらないことができる。」と規定されている。特別な調査又は研究の範囲は、津波波圧算定式、津波波力算定式、開口部による低減、開放部分の取り扱い、水平荷重の方向、浮力の算定式などが含まれる。津波荷重を特別な調査または研究に基づき算出する方法の一つとして水理模型実験による方法が挙げられるが、上述のすべての事項を包括的に取り扱うことができる方策は現状では研究段階にある。そこで、ここでは、告示 1318 号に示されている津波波圧算定式（水深係数を使った静水圧式）を用いて低抗力型建築物の形状・開口・部材配置等による津波荷重低減効果を評価する場合に限定して、特別な調査または研究の一例として、実験方法を示すものである。

なお、特別な調査または研究として津波波圧算定式、津波波力算定式そのものを変更する場合（例えば抗力式など）については、より詳細な津波条件、より精度の高い大規模な水理模型実験装置が必要となるため、本実験方法の適用範囲外である。

3.2 津波条件と津波波力

津波条件は、建築物が設置される場所の設計用浸水深、水深係数（3.0,2.0,1.5）で規定されるものとする。原則として、津波の先端部が卓越する場合と非先端部が卓越する場合を検討津波条件とする。ただし、水深係数が 1.5 の場合、および、鉛直方向の作用力の低減を考慮しない場合は先端部が卓越する場合の検討を省略することができる。

告示 1318 号では、建築物の津波波圧は、設計用浸水深の 3 倍に相当する静水圧を基本とし、津波の勢いが軽減されることが見込まれる場合には、この倍率（水深係数 a と定義）を低減できるとしている。具体的には、津波避難ビル等から津波が来襲する方向に施設または他の建築物等の遮蔽物（津波によって破壊しないと考えられる構造物）があり、津波を軽減する効果が見込まれる場合には水深係数を 3.0 から 2.0 に、さらにそのうち、津波避難ビル等の位置が海岸及び河川から 500m 以上離れている場合については当該 2.0 を 1.5 まで低減できるとしている。本検討方法では、水深係数の設定についてはこれらの値を用いるものとする。

建築物に作用する津波波力の極大値には、津波の先端部が作用した瞬間に発生する動的波力に対応する先端部波力と継続する流れによって生ずる持続波力があり、津波の条件によりその大きさは変化する。告示 1318 号に示される水深係数と設計浸水深で表現される波力が、どちらのメカニズムで発生するかは必ずしも自明ではないので、津波波力の特性を考慮して、実験に使う波を設定する必要がある。ここでは、原則として、①非先端部が卓越する波、②先端部が卓越する波の最低 2 パターンについて実験を行うものとする（図 3-1 参照）。

非先端部が卓越する波は、持続波力を検討するための条件である。告示の水深係数 a は、フルード数

$Fr = V/\sqrt{gh}$ と関係がある。ここで、 V : 断面平均流速、 h : 設計用浸水深、 g : 重力加速度である。そこで、非先端部が卓越する波は、設計用浸水深 h とフルード数 $Fr = V/\sqrt{gh}$ により規定される準定常的な流れと考えることができる。なお、非先端部が卓越する波は定常流で模擬してもよいものとする。

近年の研究により、持続波力作用時の単一の直方体の前面の水深 h_f と浸水深 h の比は、フルード数 Fr の関数となることが知られている。例えば、加藤ら(2012)¹⁾は、流水のエネルギーが保存されるとして、次式を提案した。

$$\frac{h_f}{h} = 1 + \frac{1}{2} Fr^2 \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

また、池谷ら(2015)²⁾は、水理模型実験、理論解析の結果から、次式を提案している。

$$\frac{h_f}{h} = \begin{cases} 1 + \frac{1}{2} Fr^2 & Fr < \sqrt{2} \\ \sqrt{2} Fr & Fr \geq \sqrt{2} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

これらの関数を参考に、水深係数 a の値に対応するフルード数は、表 3-1 に示す値をとるものとする。

表 3-1 水深係数 a とフルード数 Fr との関係

	水深係数 $a = 3$	水深係数 $a = 2$	水深係数 $a = 1.5$
定常流れ Fr 数	$Fr = 2.0 \sim 2.3$	$Fr = 1.4 \sim 1.6$	$Fr = 1.0 \sim 1.2$

先端部が卓越する波は、動的波力を検討するためのものである。大熊ら (2015)³⁾によれば、先端部波力は、浸水深 h 、フルード数 Fr の他に波面の勾配の関数となるとのことであるが、未解明な点も多い。そこで、先端部が卓越する波は、設計用浸水深 h を有し、非先端部と同様のフルード数 Fr をもち、さらに十分大きな波面の勾配を有する波を用いる。動的波力が大きな影響を及ぼすのは、海岸線に隣接して立地する場合であるので、海岸線から十分はなれた距離 (500m 程度) に適用される $a=1.5$ の条件の場合には、動的波力が持続波力に比べて小さいと判断されるため、先端部が卓越する波についての実験を省略してもよいものとする。

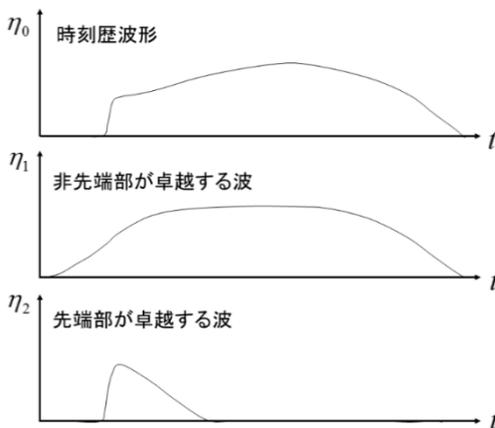


図 3-1 津波実験に用いる波形の概念図

3.3 水理模型実験の相似則

津波力を評価するための水理模型実験の相似則は、フルード相似則を用いる。水平方向と鉛直方向の縮尺が等しい無歪模型とする。実験縮尺は、粘性、圧縮性、表面張力などの影響が表れない範囲で選択するものとする。

津波波圧・波力実験を実施する場合の相似則の考え方を、土木学会水理公式集⁴⁾を参考に述べる。水理模型実験を意味のある的確なものにするためには、原型と模型との間に相似則が満足されている必要がある。水理学に現れる基本量は、長さ L 、質量 M 、時間 T の3つである。また、水理実験で取り扱う物理量は、通常以下の11個である。

L : 水平方向の尺度、 ρ' : 物体密度、 y : 鉛直方向の尺度、 g : 重力加速度、 d : 物体の尺度、 μ : 粘性係数、 U : 流速、 σ : 表面張力、 Δp : 圧力差、 K : 体積弾性係数、 ρ : 流体密度

このほか、問題によっては、拡散係数、熱伝導係数、物体の弾性係数などが付け加えられる場合がある。

バッキンガムの π 定理から、物理量の変数の数(11)から、基本量の数(3)を引いた数(8)の無次元量 π_i を作ることができる。

$\pi_1 = L/d$		
$\pi_2 = L/y$		
$\pi_3 = \rho/\rho'$		慣性力に対する
$\pi_4 = U/\sqrt{gy} = Fr$	Froude (フルード) 数	重力の比
$\pi_5 = Udp/\mu = Re$	Reynolds (レイノルズ) 数	粘性力の比
$\pi_6 = \rho a U^2/\sigma = \rho(L^2/y)U^2/\sigma = We$	Weber (ウェーバー) 数	表面張力の比
$\pi_7 = \rho U^2/K = C$	Cauchy (コーシー) 数	弾性力の比
$\pi_8 = \rho U^2/\Delta p = E$	Euler (オイラー) 数	圧力

模型実験を実施する場合に、すべての π_i が、原型と模型とで同一の値をとれば、厳密な相似が成り立つ。しかし、すべての無次元量 π_i が同一になるよう模型実験を行うことは、ほぼ不可能である。そこで、問題となっている現象に関して卓越している力に着目して、その力を模型と実物について尺度に関係した倍率を設定する緩和された相似則を用いる。

津波の伝播遡上現象においては、慣性力と重力が卓越した力であるので、 $\pi_4 = U/\sqrt{gy} = Fr$ が重要な無次元量である。フルード数 Fr を原型と模型とで共通の値とした模型をFroude相似則という。Froude相似則に則って模型(以下、フルード模型という。)を組み立てる場合、 $\pi_1 \sim \pi_4$ までの無次元数を原型と模型とで同一にすることにより、各物理量の縮尺を得ることができる(表3-2参照)。ここで、模型で変化させられる量として、水平尺度、鉛直尺度、加速度、密度を考えており、表中で添え字 r は、原型と模型との比(縮尺)を意味する。地球上では、重力加速度はほぼ一定であるので、加速度の縮尺は $g_r = 1$ とすることが多いが、遠心力場での実験では加速度の縮尺 g_r の値を変化させる。一般に、津波波圧を考える上では、水平尺度と鉛直尺度を同一とする無歪の模型を用いることが行われる。

表 3-2 物理量の倍率（水理公式集昭和 60 年版による）

物理量	次元	Fr 相似	ひずみ Fr 相似
卓越力	—	重力	重力
長さ	L	L_r	L_r 、 y_r
面積	L^2	L_r^2	L_r^2
面積（鉛直）	L^2	L_r^2	$L_r y_r$
体積	L^3	L_r^3	$L_r^2 y_r$
時間	T	$\sqrt{(L/g)}_r$	$\sqrt{(L^2/gy)}_r$
速度	LT^{-1}	$\sqrt{(Lg)}_r$	$\sqrt{(gy)}_r$
加速度	LT^{-2}	g_r	$(gy/L)_r$
流量	L^3T^{-1}	$(L^{5/2}\sqrt{g})_r$	$(Ly^{3/2}\sqrt{g})_r$
動粘性係数	L^2T^{-1}	$(L^{3/2}\sqrt{g})_r$	$(L\sqrt{gy})_r$
質量	M	$(L^3\rho)_r$	$(L^2y\rho)_r$
力	MLT^{-2}	$(L^3\rho g)_r$	$(Ly^2\rho g)_r$
密度	ML^{-3}	ρ_r	ρ_r
単位重量	$ML^{-2}T^{-2}$	$(\rho g)_r$	$(\rho g)_r$
粘性係数	$ML^{-1}T^{-1}$	$(L^{3/2}\rho\sqrt{g})_r$	$(y^{3/2}\rho\sqrt{g})_r$
表面張力	MT^{-2}	$(L^2\rho g)_r$	$(Ly\rho g)_r$
体積弾性率	$ML^{-1}T^{-2}$	$(L\rho g)_r$	$(\rho gy^2/L)_r$
圧力（底面）	$ML^{-1}T^{-2}$	$(L\rho g)_r$	$(\rho gy^2/L)_r$
運動量	MLT^{-1}	$(\rho L^{7/2}\sqrt{g})_r$	$(\rho L^2 y^{3/2}\sqrt{g})_r$
エネルギー	ML^2T^{-2}	$(L^4\rho g)_r$	$(L^2 y^2 \rho g)_r$
仕事率	ML^2T^{-3}	$(L^{7/2}\rho^2 g^{3/2})_r$	$(Ly^{5/2}\rho^2 g^{3/2})_r$

フルード模型では、無次元数の $\pi_5 \sim \pi_8$ までは同一には保たれないため、これらの無次元数が対象とする現象に大きな影響を及ぼさない範囲を吟味する必要がある。

(1) 粘性力の影響 (π_5)

原型での流れは、乱流であることが想定されるので、模型におけるレイノルズ数 Re が乱流を示す範囲（例えば、 $Re > 2000$ ）であることで、粘性の影響を緩和できる。 $Fr = 1.0$ 程度の流れであれば、

$$Re = \frac{Uh}{\nu} = \frac{Fr\sqrt{gh}^{3/2}}{\nu} > 2000 \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

より、模型水深 1.0cm 程度以上あれば、乱流域となる。ここで、 ν は動粘性係数である。津波の実験では、時間とともに水深が変化するので、浸水深で 5.0cm 程度以上に選ばれていることが多い。

構造物の直径（特性幅） D から定義されるレイノルズ数 Re では、

$$Re = \frac{UD}{\nu} = \frac{Fr\sqrt{gh}D}{\nu} > 2000 \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

となる。水深を 1.0cm とすれば直径が 1cm 以上のとき、水深を 2.0cm とすれば直径 5mm 以上のとき、乱

流の剥離となる。これより、模型の寸法の最小値（柱の直径や開口など）は、0.5cm~1.0cm 程度と考えられる。

(2) 表面張力の影響 (π_6)

フルード模型は表面張力の影響が小さい時に成立する。表面張力は表面の曲率半径が小さいほど顕著になるため、曲率半径が大きい範囲でフルード相似則はなりたつ。堀川清司著「海岸工学」⁵⁾を参考に、表面張力の影響を以下に述べる。水面波動の波速 c は、次式で表される。

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} + \frac{K_T k}{\rho}} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} + \frac{2\pi K_T}{\rho L}} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

ここで、 K_T は水の表面張力である。重力波の波速は $\sqrt{gL/2\pi}$ であり、表面張力波の波速は $\sqrt{2\pi K_T/\rho L}$ であるから、波速 c は以下の極小値をもつ（図 3-2 参照）。

$$L_m = 2\pi\sqrt{\frac{K}{\rho g}}、\quad c_m = \sqrt{\frac{4\pi K}{\rho L_m}} = \sqrt{\frac{4gK}{\rho}} \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

このとき、重力による復元力と表面張力による復元力が同程度に働いている。よって、波長 L が L_m より大きいときには、重力の影響が支配的で、表面張力の影響は小さくなる。ここで、温度 15°Cのときの水の表面張力 $K_T = 0.0735 \text{ N/m}$ 、 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ を用いると

$$L_m = 2\pi\sqrt{\frac{0.0735}{1000 \times 9.8}} = 0.0172 \text{ m} \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

となる。すなわち、波長 1.72cm より長い波長の波であれば、表面張力の影響は重力の影響に比べ小さくなる。水深規模のスケールの擾乱が生ずるとすれば、水深 2cm 程度以上であれば影響は小さいと考えられる。

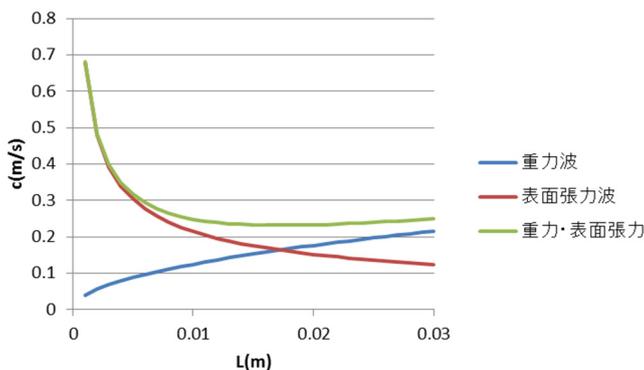


図 3-2 重力・表面張力波の波速

(3) 圧縮性の影響 (π_7)

水の圧縮性の影響は、水撃圧が発生するような高速の流れが瞬断されるように、水に急激な変化が与えられたときに顕著に表れる。ここでは、水深 h の水中にある円筒が周期 T で振動する場合を考える。動水圧に対する水の圧縮性の影響は、以下の条件で顕著になることが知られている（土木学会海岸工学委員会 1994）⁶⁾。

$$\sqrt{\frac{E_v}{\rho}} \frac{T}{h} < 10 \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

ここに、 E_v : 水の体積弾性係数 $\approx 2.0 \times 10^9 \text{N/m}^2$ 、 ρ : 水密度である。すなわち、 T/h が小さいほど圧縮性の影響が出やすい。ここでフルード相似則を考えると、 $(T/h)_r = L_r^{-1/2}$ であり、 T/h の尺度は模型の縮尺の平方根に逆比例するので、原型の方が模型よりも圧縮性の影響を受けやすい。つまり、原型が圧縮性の影響を受けていなければ、フルード相似則に基づく水理実験は妥当なものとなる。

津波波力の場合に、圧縮性が関係する現象としては、衝撃砕波力が考えられる。この場合には、水の中に空気を含む形となり、体積弾性率の値も変化するため複雑である。一般的には、水理実験の結果を、フルード相似則に従って現地の値に換算すると安全側の値を示すといわれている（榎木：1991⁷⁾）。

(4) 圧力の影響 (π_8)

通常、圧力変化は速度の2乗に比例するので、フルード模型ではオイラー数は一定に保たれ π_8 の影響はない。ただし、キャビテーション現象のように、水が気化することを考えなくてはならない場合などは、圧力変化は速度の2乗に比例しなくなるので、別途考慮が必要である。

以上から、津波の水理現象の模型実験を実施する場合は、以下の条件が推奨される。

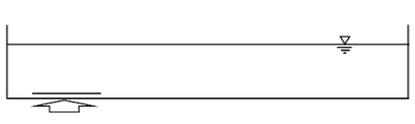
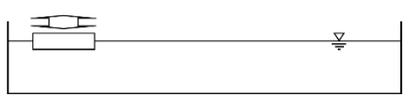
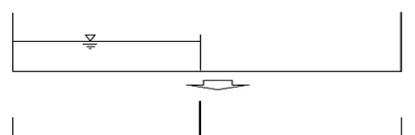
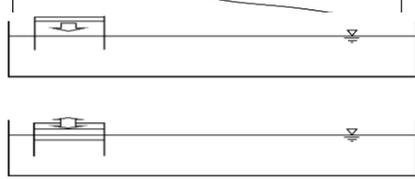
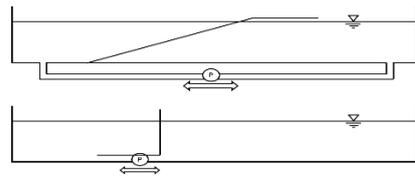
- 1) 相似則としては、フルード相似則を用いる。波力、波圧を計測する実験では、歪模型（水平縮尺と鉛直縮尺が異なる模型）は避ける方が望ましい。
- 2) 模型縮尺は、粘性の影響、表面張力の影響を考え、模型スケールで、浸水深が 5cm 程度以上、また、建築物の代表径が 5mm~1cm 程度以上となるように選択すると、原型の再現性ある水理実験の実施が可能であると考えられる。現地条件として建築物の柱の幅を 1m 程度、浸水深を 5~10m と考えれば、最小の縮尺は 1/100~1/200 程度と考えられる。

3.4 造波方法

津波力を評価するためには、浸水深と流速を適切に制御することができる造波装置を用いる。

実験水路内に津波を模擬する変動流を発生する装置として、表 3-3 に示される方法が知られている。東日本大震災後、津波波形の再現、大縮尺実験の実施を目指して装置の改良が各所で進められている（織田ら：2012¹⁰⁾、秋山ら：2015¹¹⁾、木原ら 2015¹²⁾）。津波の波形が与えられる場合には、波形再現が可能な装置を用いて造波することで、精度の良い実験を行うことができる。本検討法の場合には、非先端部が卓越する波と先端部が卓越する波の二種類を造波する。非先端部が卓越する波を造波するには、流量を制御することができる流れ発生装置（ポンプ、ヘッドタンクなど）が必要となる。また、先端部が卓越する波を造波するには、ポンプ式、造波板式、ゲート制御式、水中落下式などを用いることができる。

表 3-3 津波実験装置の原理と特徴（池谷・藤井(2006)⁸⁾、平石(2011)⁹⁾を参考に作成）

方式	原理	特徴	概念図	非先端部	先端部
水底隆起式	水槽の底部の一部を隆起させて水位変化をつくり、その水位変化を周囲に伝播させる。	海底地震により発生する津波と同様の原理。小縮尺の歪模型実験となる。		×	×
浮体上下式	水槽の一端の水面に浮体を設置し、これを上下させて水槽内に水位の変化を生む。	潮位変動を生み出す方法としてよく用いられる。小縮尺の歪模型実験となる。		×	×
ゲート制御（急開）式	水路をゲートにより2分割し、片側に水を貯める。ゲートを解放して、段波を発生させる。	ゲート急開の場合、比較的簡便な装置で実施できるが、波形の制御が難しい。開度を制御する場合、波形の制御が可能。		△	○
水柱落下方式	水槽の一端に貯水塔をつくり、貯水した水を落下させて、段波状の水波をつくる。	落下式の場合は、波形の制御ができない。貯水塔内の空気圧やバルブ開度を制御して落下水量を制御する場合は波形の制御が可能。		○	○
造波板式	ピストン型造波装置を大振幅で移動させ、水路内に長周期の波、孤立波を生み出す。	精度の良い波を起こすことができ、無歪の実験に適している。ストロークの長い造波装置が必要である。		△	○
ポンプ式	水路を仕切り壁により2分割し、両者を管路とポンプで結ぶ。流量、流向を時系列制御して水位の時間変化を生み出す。	定常流を含めて任意の波形の長波を造波できる。無歪の津波実験に適している。		○	○

先端部が卓越する波として、孤立波を用いる場合には、以下の点に留意する必要がある。孤立波は、一様水深で波形を変えずに進行する単独の波である。波形 $\eta(x,t)$ は、次式で表現される（堀川、1991¹³⁾）。

$$\eta(x,t) = \frac{H}{\cosh^2[k(x-ct)]} \dots\dots\dots (3.9)$$

ただし、 k ：波数、 c 波速、 H ：孤立波の波高である。孤立波を造波する水深を h と書けば、一次近似解としては、次式が知られる。

$$k^2 = (3H)/(4h^3) \dots\dots\dots (3.10)$$

$$c = \sqrt{g(h+H)} \dots\dots\dots (3.11)$$

孤立波の波長は、理論的には無限大であるので、津波を模擬する波として、構造物に作用する津波波力実験に用いられてきた（例えば、漆山ら：1996¹⁴⁾、有川ら：2015¹⁵⁾）。しかし、孤立波の波面の勾配が大きい部分は、比較的短い範囲に集中している。そこで、波形の変曲点間の距離 L_0 を波長の一つの指標として考える（Grilli et al., 1997¹⁶⁾）。

$$L_0 = \frac{2}{k} \tanh^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) \dots\dots\dots (3.12)$$

また、 L_0 の長さを通過するのにかかる時間 T_0 は、

$$T_0 = L_0 / c = \frac{2}{kc} \tanh^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) \dots\dots\dots (3.13)$$

と求められる。波面の最大勾配は、次式で与えられる。

$$\left. \frac{\partial \eta}{\partial x} \right|_{\max} = \frac{4\sqrt{3}}{9} kH \dots\dots\dots (3.14)$$

これらの式から、孤立波の波長、周期は水深と波高を与えると一意に定まり、水深が大きいほど、波長は長く、継続時間は長く、波面の勾配は小さくなる傾向がある。仮に水深 100m の地点で孤立波を造波したとしても波高 1m の孤立波を造波すると波長 1.5km、継続時間は 50 秒程度の波となり、短めの津波となる。水深 20m の地点とすると継続時間 10 秒程度となり、通常の風波と変わらなくなる。すなわち、孤立波を用いた実験で実際に生ずる津波現象を再現しようとする場合、孤立波が津波と同様の波長を有する水深から造波させる必要がある（図 3-4 参照）。

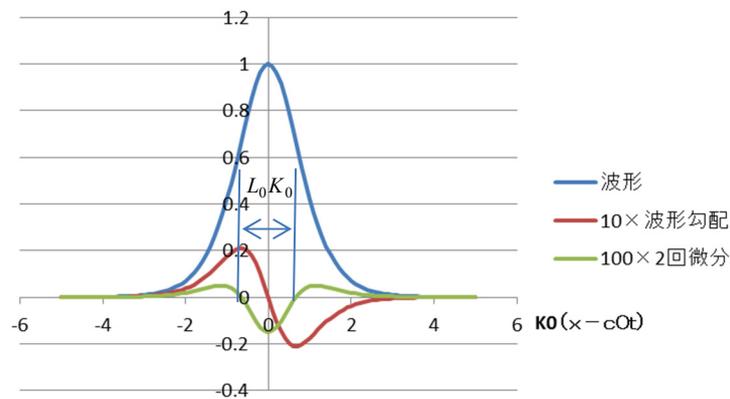


図 3-3 孤立波の波形

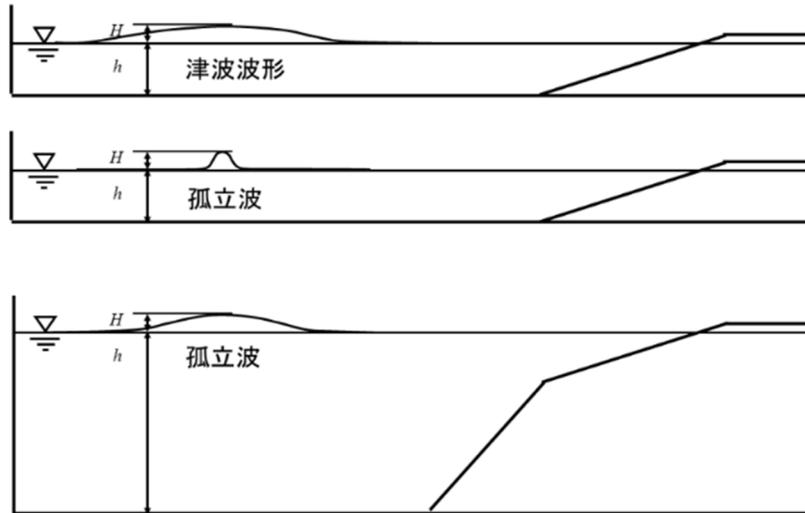


図 3-4 津波波形を孤立波でモデル化する場合の概念図

3.5 実験水路

実験水路は、十分な長さおよび幅を有する直線水路を用いることを基本とする。水路の幅は、水深係数が 3.0, 2.0 の場合、建築物模型の幅の 4 倍以上、水深係数が 1.5 の場合、建築物模型の幅の 8 倍以上あるものとする。

水理模型実験に用いる水路（あるいは、水槽）は、十分な長さ、幅を有することが望ましい。長さについては、再現しようとする地域に加えて、津波の一波長全体が含まれる程度の長さの海域部があることが理想的である。水深 10m で、周期 10 分の津波の波長は約 6000m であり、縮尺 1/100 で再現する場合 60m 程度の海域部が必要となる。陸上部分を合わせると、100m クラスの長さの水路が必要となり、これを満足する水路の使用は現実的でない。そこで、先端部が卓越する波については、構造物からの反射波が沖に向かい造波装置で再反射し、入射波に影響を与える前に実験を終了させること、非先端部が卓越する波については、反射波の影響が含まれた定常状態で近似させることなどの方法が用いられる。

一方、水路の幅については、建築物模型に対して十分大きく取れない場合には、側壁の効果、閉塞効果が生ずる。秋山ら（2002）¹⁷⁾によれば、定常流 ($Fr=0.571\sim 0.702$) を用いた実験では、水路幅が構造物の幅の 14 倍以上の場合、流体力に関する側壁の影響はなくなる。また、桑村（2014）¹⁸⁾、桑村（2016）¹⁹⁾では、河川自然流を用いた水理実験（水路幅 $B_0=90\text{cm}$ ）により、単独壁体および直方体（幅 $d=10, 20, 30\text{cm}$ ）に作用する抗力を計測し、通過波の諸元から抗力係数を求めている。抗力係数 C_d は、常流 ($Fr < 1.0$) では、閉塞率の増大によって著しく上昇するのに対し、射流 ($Fr > 1.0$) では、閉塞率の影響は認められなかったとしている。池谷ら（2015）²⁰⁾では、ポンプ式津波実験装置を用いた水理模型実験（建築物幅 19.5cm、水路幅 70cm）と理論考察により、 $Fr \approx 1$ においてはわずかな閉塞でも入射波に影響を及ぼすこと、閉塞効果が現れると津波力が大きくなること、常流の場合には、遮蔽に伴い抗力係数は増大するのに対し、射流の場合には、変化の度合いは小さいことを示している。

本年度実施した建築物幅 d を変化させて波力を評価した実験 ($Fr=0.45, 1.1, 1.19$) によれば、水路幅建

建築物幅比 B/d が小さくなると単位幅抗力比 ($B/d=20$ の時の単位幅あたりの抗力 (単位幅抗力) に対する対象とする B/d の時の単位幅抗力の比) は大きくなるのがわかる。閉塞効果が表れやすい $Fr \approx 1$ のデータでも、水路幅が建築物幅の 8 倍程度以上あれば、影響は小さいことが示されている(図 3-5 参照)。

これらの実験結果から、フルード数が $Fr < 1$ の実験では B/d は 10 倍程度以上、 $Fr = 1 \sim 1.4$ の場合 B/d は 8 倍程度以上、 $Fr > 1.4$ の場合 $B/d = 4$ 倍程度以上であれば、側壁の影響を概ね無視することができると思われる。なお、 $Fr \approx 1$ の定常流を用いる実験は、現象が不安定であるため、構造物の設置位置を複数設けるなど、データのばらつきに対する考察が必要となる。

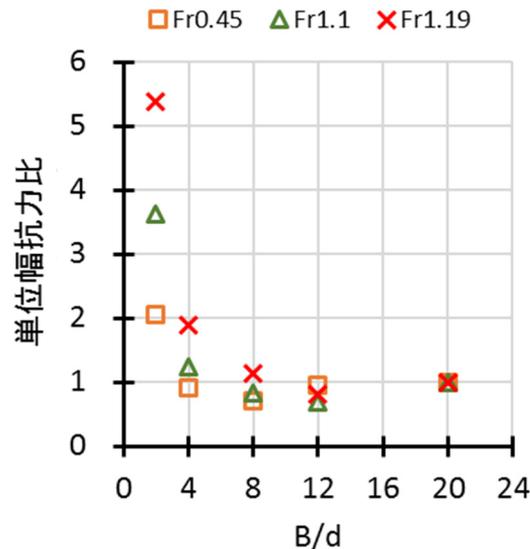


図 3-5 水路幅／建築物幅と単位幅抗力比の関係

3.6 建築物モデル

建築物モデルは、対象とする建築物の形状を有するモデル (対象建築物モデル) の他に、外形寸法が等しい無開口の直方体形状のモデル (基準建築物モデル) を作成するものとする。

本検討方法では、波力の低減率を求めることを目的とするため、建築物モデルとして、対象とする建築物の形状を有するモデル (対象建築物モデル) の他に、外形寸法が等しい無開口の直方体形状のモデル (基準建築物モデル) を作成するものとする。

建築物モデルは、作用力やモーメントを求めたい断面より上方の建築物全体をモデル化し、水が接触する範囲を再現することを基本とする。開口部をもつ建築物については、実験水位下の建築物の内部についてもモデル化するか、あるいは無開口として安全側にモデル化する。津波によって窓、扉、壁などが破損・脱落することが想定される場合には、その部分は予め開口部として取り扱ってよい。構造部材に比べて代表径が小さく、相似則が満足されない場合、津波来襲時に破壊される細い部材について、デフォルメ、省略することもある。

建築物の地下構造や基礎構造については、これをモデル化する場合とモデル化しない場合が考えられる。モデル化する場合は、地下構造や基礎構造に水が接触するように模型の設置方法を工夫する必要がある。一方、モデル化しない場合は、地盤面より上の地上部分である上部構造をモデル化した上で底面に水が接触するように設置し、作用力を計測する。なお、後者の模型から、基礎構造を含めた建築物全

体に作用する力を算出する場合には、地盤面より下の部分に作用する波力を追加評価する必要がある。

建築物モデルは、なるべく軽く、大きな剛性、強度を有するように製作する。素材としては、アクリル、鋼製（中空）などが考えられる。

3.7 地形モデル

地形モデルは、実況を考慮した地形（海域部、地上部）を縮尺に従って適切に縮小してモデル化するものとする。

地形モデルは、実況を考慮した地形（海域部、地上部）を縮尺に従って縮小してモデル化するものとする。地形の特性に応じて、海域部は一様な勾配をもつ斜面、陸上部は水平面としてモデル化してもよい。地表面の粗さに関する情報が既知の場合には、抵抗則に従い縮尺した粗度を適用してもよい。地表面の粗さに関する情報が未知の場合は、平滑な面を有する板で地盤面を構成するものとする。なお、本実験方法では、建築物の形状・開口・部材配置等による荷重低減効果を調べることが主目的であるので、隣接構造物は模型に含めなくてもよい。隣接構造物の遮蔽効果により津波波力が軽減することもあれば、隣接構造物により水深が増加し流れが加速されて津波波力が増大することもあるので、隣接構造物の影響を詳細に評価する場合には隣接構造物も含めた範囲で模型を作成し実験を行う必要がある。

非先端部が卓越する波に対する実験の場合、所定の水深、フルード数を構造物設置予定位置で出現させるために、上流側に護岸や堰を設け、フルード数を制御する工夫をする。陸上地形は、水平としてモデル化してもよい。

3.8 通過波実験

波力実験に先立ち、対象とする建築物を設置しない状態で通過する津波が所定の津波条件を満足していることを確認する通過波実験を実施する。

(1) 目的

通過波実験とは、自由水面を有する変動流、波浪、津波の実験で、対象とする構造物を設置しない状態で通過する津波が所定の津波条件を満足するように造波信号を作りこむ実験のことをいう。造波信号は造波方法により異なるが、流量の時系列、造波板の変位などが考えられる。想定した津波条件が構造物を設置する予定の位置で生じているかを確認し、生じていなければ造波条件を変更する。津波条件の達成は、誤差 $\pm 5\sim 10\%$ 程度までは許容できるものであるが、繰り返し実験を行った場合の再現性については、より厳密に管理されるべきである。繰り返し実験によるばらつきが大きい造波方法をとる場合には、繰り返しによる変動特性を把握しておくことが望ましい。

(2) 非先端部が卓越する流れの作成方法

告示に示されている水深係数を目標とする実験では、流れが射流 ($Fr > 1$) となる。不等流理論に従えば、水平床上の流れの水面形は図 3-6 に示すとおり決定する (例えば日野(1983)²¹⁾)。すなわち、射流状態の流れは、 H_3 曲線に従い上流端から水面形が決定し、常流状態の流れは、 H_2 曲線に従い下流端から水面形が決まる。

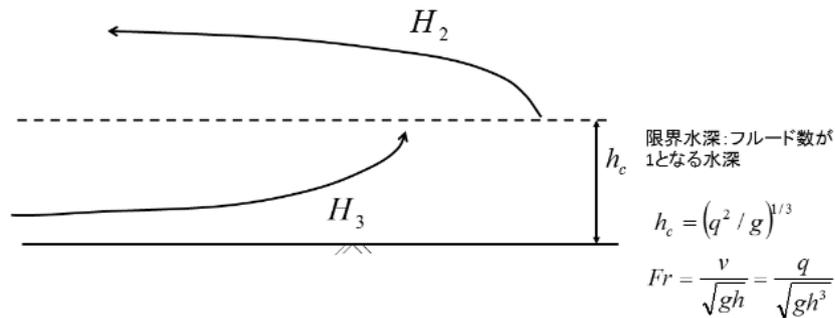


図 3-6 水平床上の水面形

また、射流状態から常流状態への遷移部では、跳水現象が発生し、射流の水深 h_1 と常流の水深 h_2 との間には、以下の共役水深の関係が成立する。

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right] \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

ここに、 $Fr_1 = v_1 / \sqrt{gh_1} = q / \sqrt{gh_1^3}$: 射流側のフルード数、 $q = v_1 h_1$: 単位幅流量(線流量)、 v_1 射流側の断面平均流速である。跳水の形態は、射流側のフルード数 Fr が小さいうちは、波状跳水などの不安定な跳水が生じ、フルード数 Fr が大きくなるにつれて定常的な跳水へと変化する。

以上のように、水平床上に等流(流下方向に状態の変化しない流れ)を作ることは、理論的に不可能である。しかし、例えば以下に示す方法で比較的緩やかにフルード数 Fr が変化する射流を形成することができる。目標となる水深、フルード数 Fr から、流速、流量を求める。例えばポンプの回転数を制御するなどして、流量が一定となるように制御する。建築物設置予定位置において射流をつくるために、上流端を射流とする必要がある。そこで、護岸を模擬した段上がり、あるいは防潮堤を模擬した堰を設置し、越流させ射流を形成させる。下流側はできるだけ水位を低く保つため、自由越流させる。上流の堰の高さを大きくして流下部のフルード数 Fr を 1 に比べて非常に大きくすれば、射流のまま段落ち部から流出する(図 3-7 下)。上流の堰の高さがそれほど大きくない場合には、水路の途中で限界水深に近づき、共役水深の関係を満足する位置で跳水が発生し、跳水下流側は常流となり、流出端で限界水深をとる(図 3-7 中)。フルード数を 1 程度に設定すると、跳水は不安定な波状跳水となる(図 3-7 上)。

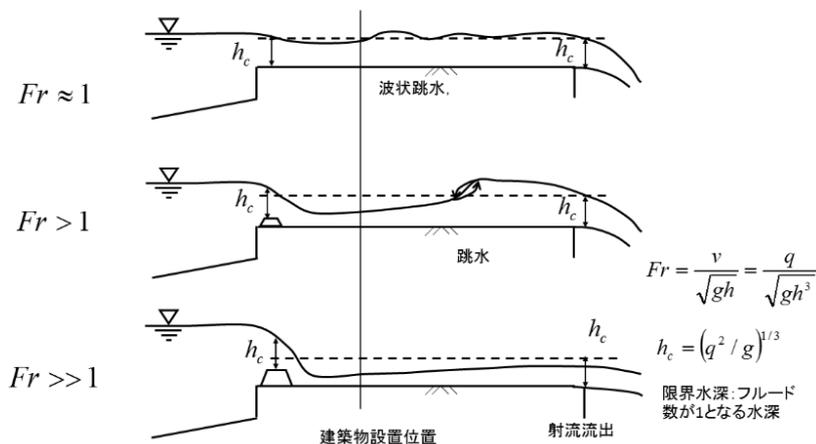


図 3-7 定常流実験におけるフルード数 Fr の制御の方法 (流量一定の場合)

(3) 先端部が卓越する波の造波方法

先端部が卓越する波は、急激に上昇する水面勾配を構成するように、ポンプの流量を急変させる方法、孤立波を造波させる方法、ゲート急開法などにより造波する。

(4) 水位、流速の計測方法

水位の計測には、動的な水位変化に追従して計測ができるように、波高計を使用することが推奨される。波高計としては、容量式波高計、サーボ式波高計、分圧式波高計に代表される水位変化を高速に計測でき、実験期間中にゼロ点のドリフトが生じにくいものが選ばれる。海域部では、実験開始前の水位（静水位）を計測し、それからのずれから水位・水深を計測する。陸上部については、陸上模型にセンサーを接着あるいは埋め込むことなどにより、浸水深がゼロから計測できるように工夫するとよい。

流速の計測には、水理現象を乱さずに、流速の変動を制度良く計測できる小型の流速計が利用されることが多い。電磁流速計、レーザードップラー流速計、超音波流速計、プロペラ流速計などが用いられる。地上部の流速の計測は、初期状態において、センサーが空気中に存在しているため、着水時にノイズが入る場合がある。この場合には、データを解釈する際にその部分は棄却するなど留意が必要である。プロペラ流速計は、応答が他のシステムに比べてやや劣るが、着水時のノイズがほとんど無いため、地上部の流速の計測に多用されている。また、PIV（粒子画像相関法）やPTV（粒子追跡法）などの粒子画像計測手法は、水の運動を乱すことなく流速分布を面的に行うことができるので、今後の活用が期待される。

(5) 平均流速の算出方法

津波による流速は、時空間にわたり変動する。流速計の位置は固定されているので、底面からある距離離れた位置の流速を計測することとなる。一方、フルード数の定義において必要となるのは、平均流速であるので、計測した流速から断面平均流速への変換が必要となる。

定常流を用いる実験であれば、流量計などで計測したポンプの流量水路幅と水深で除する方法、河川の流量観測などに適用される1点法（水面から水深の6割の位置での流速が平均流速に等しいとする方法）などを適用することができる。しかし、津波は時空間的に変化する流れであるため、水位が流速センサー以下の時間帯では流速データが欠測となる。このことを回避するため底面に近い部分の流速を計測することが多い。固定点で計測した流速から、平均流速を換算する方法として、流速分布形を仮定する方法がある。最も一般的には、対数分布を仮定し、抵抗則として、マニング則を仮定することにより、平均流速を求めることも可能である。対数則による流速分布と平均流速は、次式で表現される。

$$\frac{v(z)}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{k_s} + A_r \quad \dots\dots\dots (3.16)$$

$$\frac{V}{U_*} = \left(A_r - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{k_s} \right) \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

ここに、 $v(z)$: 高さ z で計測された流速、 V : 平均流速、 U_* : 摩擦速度、 κ : カルマン定数 (=0.4)、 A_r (=5.5)、 k_s : 相当粗度である。高さ z で計測された流速と平均流速との間には次式の関係がある。

$$\frac{V}{v(z)} = \frac{A_r - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{k_s}}{A_r + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{k_s}} \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

相当粗度はマンシングの粗度係数との間に以下の関係がある。

$$n = 0.13 \frac{k_s^{1/6}}{\sqrt{g}} \dots\dots\dots (3.19)$$

これから、マンシングの粗度係数、高さ z で計測された流速、流速を計測点の近傍において計測された水深がわかれば、平均流速が求められる。

(6) データ取得方法・処理方法

通過波検定実験における水深、流速のサンプリング周波数は、水理現象の変動の特性値、センサーの応答周波数などを考慮して、適切に定めることとする。通常 20~50Hz で実施される場合が多い。

計測された水深と流速の時刻歴から、フルード数、比エネルギーなどの特性値を定義する場合、原則として、水深、流速の時刻歴からフルード数、比エネルギーなどの特性値の時刻歴を計算し、統計処理することとする。非先端部が卓越する波として定常流を用いる場合には、統計処理する際の平均化時間は、定常と考えられる時間に対して行うものとする。時間的な変動が大きな波による波力の最大値を通過波の波諸元から評価する場合には、波力が、浸水深と水深係数とから決まることを考え、浸水深の値としては最大浸水深を、またフルード数の値としては、水深係数と関連が深い比エネルギー最大時のフルード数を用いて、評価するものとする。

3.9 波力実験

波力実験は、基準建築物モデルと対象建築物モデルに作用する波力の水平成分と鉛直成分を計測し、基準建築物モデルに作用する波力に対する対象建築物モデルに作用する波力の比を低減率として算出する。

(1) 目的

波力実験は、建築物模型を取り付けた分力系を反力架台に固定し、これに通過波検定実験で作成した津波を作用させ、分力系の出力から波力を計測するものである。本検討では、対象建築物モデルと基準建築物モデルに対して、 F_x (水平力)、 F_z (鉛直力)、 M_y (転倒モーメント)を計測し、基準建築物モデルに作用する作用力に対する対象建築物モデルに作用する作用力の割合 (低減率) を評価することを基本とする。

(2) 波力の計測方法

分力計を上方の反力架台から吊り下げる場合 (図 3-8 参照) と分力計を水路底上に固定する場合 (図 3-9 参照) がある。

水中に設置する場合には、防水型的水中分力計を使用する必要がある。水隄が建築物模型より上方に至る場合には下方設置が、建築物模型下部に作用する水圧を計測する場合には、上方設置が適している。分力計に水流が作用する場合は、波力の計測値に誤差が生じるので、適切に対策を行う必要がある。分力計の設置方法による長所短所を表 3-4 に示す。

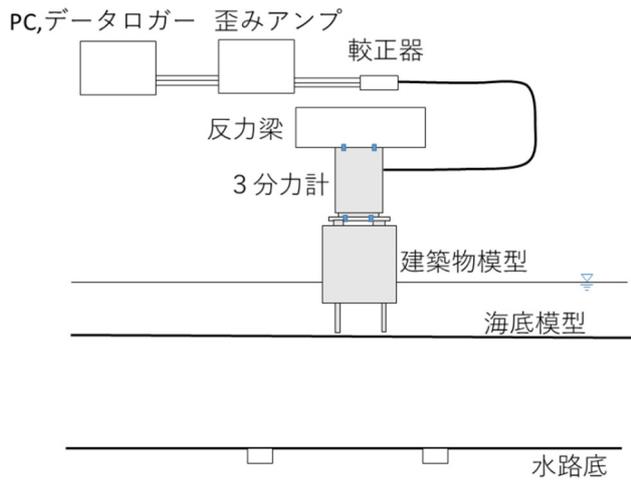


図 3-8 分力計の設置例（上方設置の場合）

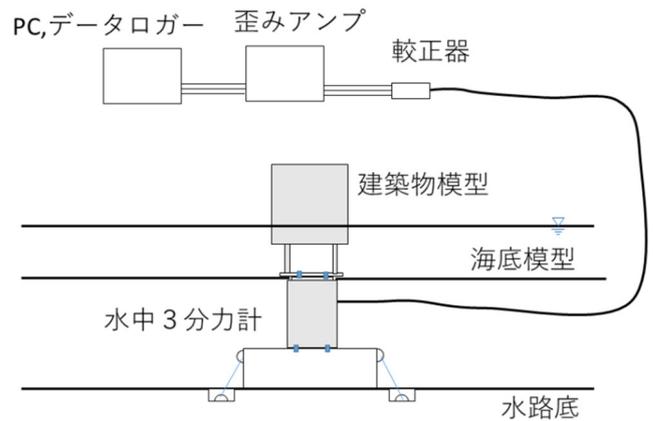


図 3-9 分力計の設置例（水路底設置の場合）

2次元実験の場合は、 F_x （水平力）、 F_z （鉛直力）、 M_y （転倒モーメント）を計測する3分力計が用いられる。流れ直角方向の力、モーメント、ねじりモーメントも同時に計測する場合には、6分力計を用いる必要がある。

分力計、支持治具、模型はなるべく剛性が高くなるように設定するものとする。構造物が応答した影響が大きい場合には、振動特性を考慮して波力を推定する方法もある（例えば、谷本ら：1983²²⁾）。

表 3-4 分力計の設置方法の特徴

	上方から吊り下げる場合	下方から支える場合
計測器	通常に分力計を使用できる。	水中で使用できる防水型分力計を使用するなどして、水中での計測システムが必要。
起源と模型	船舶に作用する流体力の計測。 模型と地盤面との間に隙間をあけるなど、力のやり取りを防ぐ必要がある。	構造物に作用する風荷重の計測。 模型と地盤面との間に隙間をあけるなど、力のやり取りを防ぐ必要がある。
水平力	津波が構造物を越流する場合は、治具に作用する流体力を含む力を計測することになるので、対策が必要となる。	建築物下部を水が運動する場合、治具により流れが阻害され、治具に作用する力を計測するようになる。
鉛直力・転倒モーメント	模型の下に水が流れる実験となるため、模型下面に作用する圧力による鉛直力、転倒モーメントを含む計測となる。模型再現部分が十分透水性のある地盤上に設置されている場合の力の計測となる。	模型下面に作用する水圧の再現性は、治具により影響を受ける。
固有振動数、モード	一般に腕の長さが長くなり、計測系の固有周期が、下方から支持する場合に比べて長くなりがちである。また、振動モードが実際とは異なる。	計測系の固有周期を短く保つことができる。また、固有モードは実建築物と同様になる。

(3) 波力計測と同時に行う計測

波力実験を行う場合、波圧、波高（水位）、流速の計測が同時に実施されることが望ましい。

模型に作用する波圧の計測は、多点で計測された波圧を積分して波力を求める場合、代表的な点での波圧を計測し、波力の各部材への分担、模型の振動影響を取り除く際の参考にする目的で、模型の前面の壁や柱だけでなく内壁や背面の壁、床面、天井面などに設置して実施される。波力実験に用いられる波圧計は、動的特性にすぐれた、高感度のセンサーが必要とされる。歪ゲージ式、セラミックコンデンサー型のセンサーが用いられることが多い。設置にあたっては、受圧面が模型の外壁面と同一面上にあるように取り付けられる。

波高の計測は、模型の前面、背面、側方、沖合において実施するものとする。前面、背面の浸水深は、模型前面、背面の圧力の検証に用いることができる。流速計を模型側方および沖合に波高計と組み合わせて設置することにより、接近流速、沖合での入射波の検証を行うことができる。

(4) 波力実験の実施回数、データサンプリング

波力実験は、波力の変動性を考慮して繰り返し回数を変更してよい。非先端部が卓越する波に対する実験で得られる波力データのばらつきは通常小さいので、定常状態に対する計測を 1 回行い、計測時間内の平均と分散を評価すれば十分であることが多い。これに対して、先端部が卓越する場合の波力は、実験毎に値がばらつくことが多いので、最低でも 3~5 回程度以上繰り返して実験を行い、ばらつきを評価するものとする。先端部が卓越する場合の波力の計測値は、繰り返し行った平均値としてよい。

データ取得のサンプリング周波数は、波圧の特性、センサーの応答特性を考慮して、十分大きな値として設定する必要がある。通常 100Hz~1,000Hz 程度が用いられることが多い。

(5) モーメント中心の変換

分力計の出力は、分力計固有のモーメント中心回りの出力であるので、構造物の設計に用いる位置（例えば、建築物の中心、地盤面上）周りに変換する必要がある（図 3-10 参照）。図 3-10 の左図のように、建築物に津波力ベクトル (F_x, F_z) が作用しているとする。これを図 3-10 の中央図のように、上方に設置した分力計で計測したとすると、分力計の出力値 (F_{x0}, F_{z0}, M_{y0}) は、次式で表される。

$$F_{x0} = F_x \quad \dots\dots\dots (3.20)$$

$$F_{z0} = -F_z \quad \dots\dots\dots (3.21)$$

$$M_{y0} = F_x h_0 - F_z l_0 \quad \dots\dots\dots (3.22)$$

ここで、 h_0 は分力計の計測位置と水平力の作用位置の間の鉛直方向の距離、 l_0 は分力計の計測位置と鉛直力の作用位置の間の水平方向の距離である。図 3-10 の右図で示される地盤面上の建築物の底面中央直下点回りでのモーメント M_y は、 F_x, F_z を用いて次式で表わされる。

$$M_y = F_x (Z_c - h_0) + F_z (l_0 - X_c) \quad \dots\dots\dots (3.23)$$

ここで、 Z_c は分力計の計測位置と地盤面の間の距離、 X_c は分力計の計測位置と地盤面上の建築物の底面中央直下点の間の水平方向の距離である。

これらの関係より、水平力 F_x 、鉛直力 F_z 、転倒モーメント M_y は、分力計の出力値 (F_{x0}, F_{z0}, M_{y0}) を用いて、次式で表される。

$$F_x = F_{x0} \quad \dots\dots\dots (3.24)$$

$$F_z = -F_{z0} \quad \dots\dots\dots (3.25)$$

$$M_y = F_{x0}Z_c + F_{z0}X_c - M_{y0} \quad \dots\dots\dots (3.26)$$

なお、分力計を下方設置する場合も、同様の関係式が得られる。

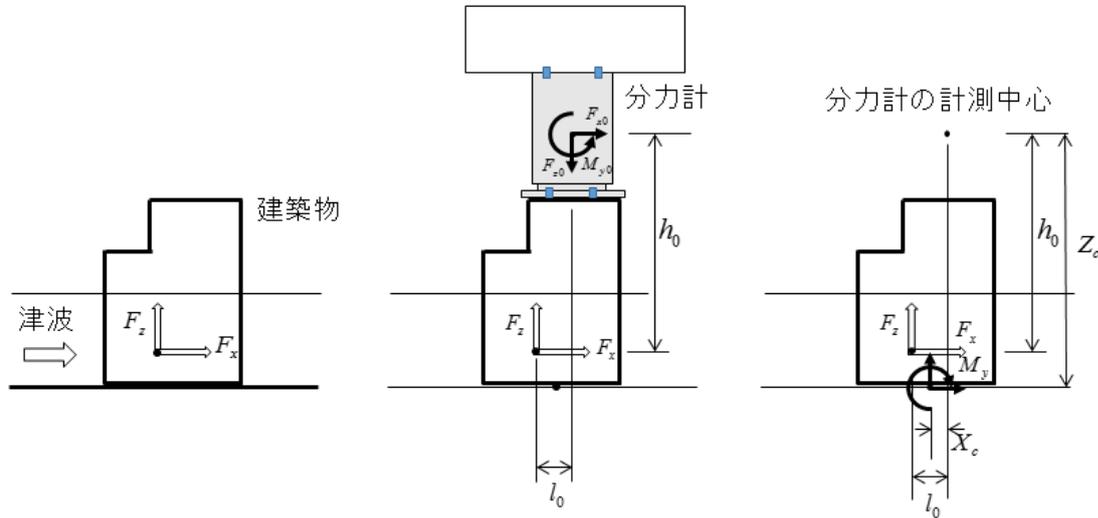


図 3-10 モーメント中心の変更

(6) 波力の低減率の設定方法

実験値から波力の低減率を求める場合、非先端部が卓越する場合の低減率と先端部が卓越する場合の低減率の大きい(低減効果の小さい)方を低減率とする。本節で用いる実験値の記号の一覧を表 3-5 に示す。

① 水深係数 $a=3.0, 2.0$ の場合(鉛直力の低減をする場合)

水平力の低減率 α_x は、実験結果から、以下のとおり求めるものとする。

$$\alpha_x = \max(\gamma_{x1}, \gamma_{x2}) \quad \dots\dots\dots (3.27)$$

$$\gamma_{x1} = F_{x1} / F_{x1}^* \quad \dots\dots\dots (3.28)$$

$$\gamma_{x2} = F_{x2} / F_{x2}^* \quad \dots\dots\dots (3.29)$$

ここで、

γ_{x1} : 非先端部実験における水平力の低減率

F_{x1} : 非先端部が卓越する波による対象建築物モデルに作用する平均最大水平力

F_{x1}^* : 非先端部が卓越する波による基準建築物モデルに作用する平均最大水平力

γ_{x2} : 先端部実験における水平力の低減率

F_{x2} : 先端部が卓越する波による対象建築物モデルに作用する平均最大水平力

F_{x2}^* : 先端部が卓越する波による基準建築物モデルに作用する平均最大水平力

鉛直力の低減率 α_z は、実験結果から、以下のとおり求めるものとする。

$$\alpha_z = \max(\gamma_{z1}, \gamma_{z2}) \quad \dots\dots\dots (3.30)$$

$$\gamma_{z1} = F_{z1} / F_{z1}^* \quad \dots\dots\dots (3.31)$$

$$\gamma_{z2} = F_{z2} / F_{z2}^* \quad \dots\dots\dots (3.32)$$

ここで、

γ_{z1} : 非先端部実験における鉛直力の低減率

F_{z1} : 非先端部が卓越する波による対象建築物モデルに作用する平均最大鉛直力

F_{z1}^* : 非先端部が卓越する波による基準建築物モデルに作用する平均最大鉛直力

γ_{z2} : 先端部実験における鉛直力の低減率

F_{z2} : 先端部が卓越する波による対象建築物モデルに作用する平均最大鉛直力

F_{z2}^* : 先端部が卓越する波による基準建築物モデルに作用する平均最大鉛直力

鉛直力の低減をする本ケースでは、作成した先端部の波の妥当性について有識者の意見を聴取することを基本とする。

基準建築物モデルに作用する鉛直方向の作用力が告示で想定される作用力よりも大きいことが確認されている場合 (V^* を基準建築物の浸水体積として、 $F_{z1}^* > \rho g V^*$ または $F_{z2}^* > \rho g V^*$ である場合) は、対象建築物モデルに作用する力の計測値から設計値を評価することは安全側である。この場合、低減率は、鉛直方向の作用力が $\rho g V^*$ を上回る方について、

$$\gamma_{z1} = F_{z1} / \rho g V^* \dots\dots\dots (3.33)$$

$$\gamma_{z2} = F_{z2} / \rho g V^* \dots\dots\dots (3.34)$$

としてもよい。

② 水深係数 $a=3.0, 2.0$ の場合 (鉛直力の低減をしない場合)

一般的には、非先端部が卓越する場合の水平力の低減率は、先端部が卓越する場合の低減率に比べて、同程度かやや大きい (低減効果が小さい) ことが想定される。鉛直力の低減をしない場合には、

$$\alpha_x = \gamma_{x1}, \alpha_z = 1 \dots\dots\dots (3.35)$$

としてよい。

③ 水深係数 $a=1.5$ の場合

非先端部の波力が卓越すると考えられるので、先端部が卓越する波に対する実験を行わずに、

$$\alpha_x = \gamma_{x1}, \alpha_z = \gamma_{z1} \dots\dots\dots (3.36)$$

としてよい。

表 3-5 実験値を表す記号

	水平力			鉛直力		
	基準建築物 モデル	対象建築物 モデル	低減率	基準建築物 モデル	対象建築物 モデル	低減率
非先端部実験	F_{x1}^*	F_{x1}	γ_{x1}	F_{z1}^*	F_{z1}	γ_{z1}
先端部実験	F_{x2}^*	F_{x2}	γ_{x2}	F_{z2}^*	F_{z2}	γ_{z2}

参考文献

- 1) 加藤史訓・諏訪義雄・藤田光一・岸田弘之・五十嵐崇博・岡村次郎・林雄一郎：建築物等による津波の堰上げの評価方法，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.68, No.2, pp. I_331-I_335, 2012.
- 2) 池谷毅・末長清也・福山貴子・秋山義信・鈴木紀雄・館野公一：反射特性を考慮した陸上構造物に作用する津波波力の評価法，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 71, No. 2, I_985-I_990, 2015.
- 3) 大熊将平・佐藤慎司・山中悠資・佐貫宏：段波の発生に着目した福島県沿岸の津波被害発生機構に関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.71, No.1, pp. 58-68, 2015.
- 4) 土木学会編：資料解析，水理公式集，昭和 60 年版，pp.109-111, 1985.
- 5) 堀川清司：[新編] 海岸工学，東京大学出版会，pp.20-22, 1991.
- 6) 土木学会海岸工学委員会：海岸波動，土木学会，406p.，1994.
- 7) 榎木亨編著：波と漂砂と構造物，技報堂出版，1991.
- 8) 池谷毅・藤井直樹：津波の水理実験と被害予測法，電力土木，No.321, pp.136-139, 2006.
- 9) 平石哲也：実験による方程式の検証，津波の事典（縮刷版），pp.238-241, 朝倉書店，2011.
- 10) 織田幸伸・伊藤一教：津波を対象とした水理実験のための造波装置の検討：土木学会年次学術講演会講演概要集 Vol.67 II-191, 2012
- 11) 秋山 義信・福山 貴子・鈴木 一輝：マルチ（波浪・津波）造波水路の更新・増強，第 71 回土木学会年次学術講演会，II-223, 2016.
- 12) Kihara, N., Niida, Y., Takabatake, D., Kaida, H., Shibayama, A., Miyagawa, Y., Large-scale experiments on tsunami-induced pressure on a vertical tide wall, Coastal Engineering, Vol.99, pp.46-63, 2015.
- 13) 堀川清司：[新編] 海岸工学，東京大学出版会，p.37, 1991.
- 14) 漆山仁・阪東浩造・池谷毅：構造物に作用する津波の波力について，平成 7 年度土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，Vol.23, pp. 210-211, 1996.
- 15) 有川太郎・大家隆行：防潮堤背後の建築物に作用する津波力に関する実験的検討，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.70, No.2, pp.806-810, 2014.
- 16) Grilli, S.T., I.A. Svendsen and R. Subramanya : Breaking Criterion and Characteristics for Solitary Waves on Slopes, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, May/June, pp. 102-112, 1997.
- 17) 秋山壽一郎・重枝未玲・小林俊彦・太田和正：定常自由表面流中の正角柱に働く流体力，水工学論文集，第 46 卷，pp.827-832, 2002.
- 18) 桑村仁：氾濫流に建つ単独壁体の形状抗力と造波抗力—河川自然流を用いた水理研究 その 1—，日本建築学会構造系論文集，第 79 卷，第 702 号，pp.1097-1106, 2014
- 19) 桑村仁：氾濫流に建つ直方体構造物の抗力と揚圧力—河川自然流を用いた水理研究 その 2—，日本建築学会構造系論文集，第 81 卷，第 720 号，pp.219-227, 2016
- 20) 池谷毅・末長清也・福山貴子・秋山義信・鈴木紀雄・館野公一：反射特性を考慮した陸上構造物に作用する津波波力の評価法，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 71, No. 2, I_985-I_990, 2015.
- 21) 日野幹雄：明解水理学，丸善株式会社，p.145-146, 1983.
- 22) 谷本勝利・高橋重雄・吉本靖俊：衝撃応答波形からの外力推定法について，港湾空港技術研究所資料 No.0474, 34p.1983.

技術資料⑤

外装材の対飛来物衝撃設計法

外装材の対飛来物衝撃設計法

目 次

1. はじめに
2. 建築物の竜巻および台風に対する要求性能
 - 2.1 要求性能
 - 2.2 強風の区別
 - 2.3 建築物の種類と要求性能
3. 設計外力
 - 3.1 風圧力
 - 3.2 飛来物による衝撃力
4. 災害拠点施設の構造計算の考え方
 - 4.1 構造骨組み
 - 4.2 機能継続が要求される建築物全体や建築物の部分の外装材
5. 飛来物耐衝撃試験の概要
6. 外装材飛来物耐衝撃試験の例示
7. 災害拠点施設等の外装材の検討例
8. まとめ

参考資料 飛来物による外装材の耐衝撃性能

1. はじめに

強風（竜巻や台風等突風）による建築物の被害は外装材の被害が多く、風圧力の作用による被害だけでなく、強風で巻き上げられた飛来物の衝突による被害も多いことが知られている。これまで我が国では、外装材の耐風性能は風圧力に関してのみ評価されており、飛来物に対する耐衝撃性能に関する評価方法が定められていなかった。一方、アメリカ合衆国の基規準^{1~4)}や ISO 16932⁵⁾では、建築物の外壁材や開口部におけるガラスの耐衝撃性能試験方法が示されており、鋼球やサイズの異なる木片等を高速で試験体に衝突させる衝撃試験と衝撃試験後の繰り返し圧力载荷により、外装材の飛来物に対する耐衝撃性能を評価するとしている。

内閣府では、近年の竜巻災害（平成 24 年茨城県つくば市など北関東で発生した竜巻、平成 25 年埼玉県越谷市などで発生した竜巻）に対し、竜巻等突風対策局長級会議（平成 24~25 年度）⁶⁾を開催し、各省庁で推進すべき 5 つの施策（竜巻等突風の予報情報の改善、災害情報等の伝達の在り方、防災教育の充実、建造物の被害軽減策の在り方、被災者支援の在り方）を纏めた。国土交通省では「建造物の被害軽減策の在り方」として、飛来物による外装材の耐衝撃性能の試験法・評価法を平成 26 年度に策定することになった。

そこで国土技術政策総合研究所では、総合技術開発プロジェクト「災害拠点建築物の機能継続技術の開発」（平成 25~28 年度）の 1 課題である「竜巻対策の技術開発」（平成 25~26 年度）として、外装材の飛来物耐衝撃性能試験法・評価法の検討を開始した。平成 25 年度は、飛来物による衝撃を受ける外装材について、国内外の試験法や評価法に関する基規準や飛来物試験に関する調査研究事例を整理し、6 種の加撃体の仕様を決めた。さらにこの加撃体を用いて外壁や開口部を対象とした衝撃試験も実施した。平成 26 年度は、災害拠点建築物を含めた各種建築物の災害に対する要求性能を整理し、平成 25 年度の検討結果を踏まえて、飛来物による建築物の外装材の耐衝撃性能の試験法・評価法を提案した。

本技術資料は平成 25~26 年度の上記の検討結果を纏めたものに、平成 28 年度に検討した風圧力による影響の考え方も加えたものである。なお、本技術資料で提案した飛来物による建築物の外装材の耐衝撃性能の試験法・評価法は、設計者や建築主が建築物の外装材の飛来物耐衝撃性能を判断するための参考情報として提供するものである。

2. 建築物の竜巻および台風に対する要求性能

2.1 要求性能

極めて稀に生じる台風および竜巻等突風による風圧力および飛来物に対する要求性能は、建築物が倒壊・崩壊せず、災害拠点機能を有する建築物全体もしくは建築物の部分の室内の人命の安全が確保され、その機能が災害後も継続することができることとする。

平成 6 年国土交通省告示第 2379 号「国家機関の建築物及びその附帯施設の位置、規模及び構造に関する規準」⁷⁾によると、国家機関の建築物及びその附帯施設（官庁施設）は、位置に関する規準として「地形、地質、気象等の自然的条件からみて、地震、津波、暴風雨等による災害時においても人命の安全確保その他の必要な機能の確保が図られ、かつ、環境の保全に配慮すること」、構造に関する規準として「地震、津波、火事、暴風雨時等による災害時に必要とされる機能を発

揮することができるものであること」が定められ、災害時において官庁施設内の人命の安全確保だけでなく、官庁施設として災害時に必要とされる機能を発揮することが求められている。

官庁施設の総合耐震・対津波計画基準⁸⁾によると、非構造部材の耐震安全性の目標として、「災害応急対策活動に必要な官庁施設、危険物を貯蔵又は使用する官庁施設^{注1)}においては、官庁施設の外部及び活動拠点室、活動支援室、活動通路、活動上重要な設備室、危険物を貯蔵又は使用する室等における建築非構造部材については、大地震動後、災害応急対策活動等を円滑に行ううえ、又は危険物の管理のうえで支障となる建築非構造部材の損傷、移動等が発生しないことを目標とし、人命の安全確保に加えて十分な機能確保が図られるもの」とある。一方、「その他の官庁施設^{注2)}の建築非構造部材については、大地震動により建築非構造部材の損傷、移動等が発生する場合でも、人命の安全確保と二次災害の防止が図られていることを目標とする」とある。

従って、庁舎、警察署、消防関連施設、病院、自衛隊関連施設などの災害拠点施設等の要求性能は、「建築物内の人命の安全確保だけでなく災害時に必要とされる災害拠点建築物の機能を発揮すること」である。また、危険物を貯蔵又は使用する施設の要求性能は「災害時に必要とされる施設の機能を発揮すること」になる。

注1 指定中央省庁、指定省庁の地方機関、災害拠点病院、それ以外の病院、避難所と位置付けられた学校や研修施設等、放射性物質若しくは病原菌類を貯蔵又は使用する施設、石油類・高圧ガス・毒物・劇薬・火薬等を貯蔵又は使用する施設

注2 避難所等に指定されていない学校や研修施設など一般官庁施設

2.2 強風の区別

建築物に被害を与える強風として、台風と竜巻等の突風が挙げられる。これらの強風はその影響範囲の大きさや強風の強さが異なるものの、どちらの強風でも飛来物が発生し建築物に被害を及ぼすことが知られている。竜巻等の突風では、建築物等の被害も甚大なものになる場合があるが、その被災範囲は限定的であるのに対し、台風被害は一般に広範囲に被害が発生すると考えられる。とくに、設計時に想定するような強大台風では、その被災範囲はかなり広範囲なものとなるだろう。そのため、最低基準を定める建築基準法では台風等の強風を設計用風荷重の対象とし、竜巻等の突風は設計用風荷重の対象と想定していない。また、台風はその進路が正確に予測できることから事前の対応が取れるのに対し、竜巻等の突風は、現時点では正確な予測が難しいため事前の確実な対応が取れないものである。そこで、本技術資料では想定する強風を竜巻等の突風と台風に分けて、建築物の要求性能を整理し、衝撃性能試験も台風試験と竜巻試験の2種類に区別することとした。

2.3 建築物の種類と要求性能

対象とする建築物を「危険物を貯蔵又は使用する施設」、「災害拠点施設等」、「避難所として位置づけられた施設」、「不特定多数の人が集まる施設」、「その他の施設」に分類し、2.1 建築物の災害に対する要求性能を基準に、各施設の災害に対する要求性能を整理し、それぞれ竜巻等の突風および台風の外力レベルを検討した(参考資料 飛来物による外装材の耐衝撃性能 第4章参照)。

建築物の竜巻等の突風および台風に対する要求性能を整理すると、表 2-1 のようになる。なお、飛来物や風圧力に対して防御するのは施設全体もしくは施設の部分であり、建築物に応じて適切に判断する。

表 2-1 建築物等施設の種類の種類と竜巻および台風に対する要求性能

建築物等施設の種類の種類			対象となる事象と外力		要求される性能
分類	概要	例	台風	竜巻	
I	危険物を貯蔵又は使用する施設：被災し機能停止する（危険物の漏洩を含む）と周辺地域に甚大な影響を及ぼすおそれのある施設	原子力発電所、石油プラント	最大級の台風における飛来物による衝撃や風圧力	日本版改良藤田スケール ⁹ JEF3 超の竜巻における飛来物による衝撃や風圧力	施設の機能継続
II	災害拠点施設等：災害時および災害直後に機能継続が要求される施設	警察署、消防関連施設、病院、庁舎、自衛隊関連施設、データセンター	極めて稀に生じる台風における飛来物による衝撃や風圧力	日本版改良藤田スケール ⁹ JEF3 の竜巻における飛来物による衝撃や風圧力	人命の安全確保 施設の機能継続
III	避難所として位置づけられた施設その他これに類する施設	避難所として位置づけられた学校・体育館・集会場・ホテルなど	極めて稀に生じる台風における飛来物による衝撃や風圧力	日本版改良藤田スケール ⁹ JEF2 の竜巻における飛来物による衝撃や風圧力	人命の安全確保
IV	不特定多数の人が集まる施設	学校、デパート、スタジアム、体育館、集会場、ホテルなど	稀に生じる台風における飛来物による衝撃や風圧力	日本版改良藤田スケール ⁹ JEF2 の竜巻における飛来物による衝撃や風圧力	人命の安全確保
V	その他の施設	住宅など	稀に生じる台風における飛来物による衝撃や風圧力		人命の安全確保

(1) 危険物を貯蔵又は使用する施設

原子力発電所や石油プラントなどのように、危険物を貯蔵又は使用する施設は、被災し一旦機能が停止すると、周辺地域に甚大な影響を及ぼすおそれがあり、施設の機能継続性に関しては、災害拠点施設等以上の性能が要求される。そこで、前節の災害拠点施設等に対するレベルを上回る外力レベルとして、最大級の竜巻等の突風（日本版改良藤田スケール⁹JEF3 超）および最大級の暴風（再現期間 1000 年相当）による飛来物や風圧力を外力レベルとした。

(2) 災害拠点施設等

災害拠点施設等のように、災害時および災害直後から必要とされる機能を発揮することが要求される建築物に対しては、日本版改良藤田スケール⁹⁾JEF3の竜巻等の突風、および建築基準法の極めて稀に生じる暴風（再現期間 500 年相当）による飛来物や風圧力を外力レベルとした。なお、わが国では、日本版改良藤田スケール⁹⁾JEF3の竜巻等の突風は 5～10 年に 1 回程度発生している。

(3) 避難所として位置づけられた施設

避難所として位置づけられた施設は、本来不特定多数の人が集まる施設で、避難所としての機能（人命の安全確保）が要求される施設と考えられる。現時点では竜巻等の突風の発生を正確に予測することは困難であるため、竜巻等の突風に対して事前に避難所として位置づけられた施設に避難するという対応は執り辛い。また、このような施設が万一竜巻等の突風による被害を受けたとしても、竜巻等の突風被害の範囲が狭いことから代替施設を用意することも可能と考えられる。そのため、竜巻等の突風に対する施設内の人命の安全確保に関する要求性能は、不特定多数の人が集まる施設と同レベルとし、その外力レベルは日本版改良藤田スケール⁹⁾JEF2 相当とした。わが国では、日本版改良藤田スケール⁹⁾JEF2の竜巻等の突風は 1～2 年に 1 回程度発生する規模の突風である。

一方、台風の場合には、かなり前からその進路を正確に予測することができるため、事前に避難所として使用されることが想定される。従って、災害拠点施設等と同レベルである、建築基準法の極めて稀に生じる暴風（再現期間 500 年相当）に対して、施設内の人命の安全確保の性能が要求されることとした。

(4) 不特定多数の人が集まる施設

学校、ホテル、デパートやスタジアムなどのように不特定多数の人が集まる施設では、施設内の人命の安全確保が要求される。ただし、台風時は事前に台風情報が気象庁から出されるため、建築基準法で定める稀に生じる暴風時でもその施設を使用することはないと考えられる。一方、竜巻等の突風に対しては、そのような情報を事前に出して施設内の人を安全な場所に避難させるという対応は執り辛い。従って、竜巻等の突風に対しては、施設内の人命の安全確保に関する要求性能は、避難所として位置づけられた施設と同レベルとし、その外力レベルは日本版改良藤田スケール⁹⁾JEF2 相当とした。台風の強風に関しては、建築基準法で定める稀に生じる暴風（再現期間 50 年相当）に対して構造耐力上安全であることが要求されることとした。

(5) その他の施設

住宅等のその他の施設は、建築基準法で定める暴風（再現期間 50 年相当）とそれに伴う飛来物に対し、居室内の人命の安全確保が要求されることとし、竜巻等の突風に対する影響までは考慮しなくて良いこととした。

3. 設計外力

3.1 風圧力

災害拠点施設の台風時および竜巻時の風圧力の大きさは、それぞれ極めて稀に生じる風圧力（再現期間 500 年相当 稀に生じる風圧力の 1.6 倍）および日本版改良藤田スケール⁹⁾JEF3（67～80m/s）で生じる風圧力とし、構造骨組み用と外装材（開口部・帳壁・屋根ふき材）用の風圧力は同レベルの大きさとする。なお、風圧力は速度圧に風力係数を乗じて算定することができるが、風力係数 C_f は建築基準法（平成 12 年建設省告示第 1454 号¹⁰⁾、同第 1458 号¹¹⁾）の値を準用しても良い。ただし、建築基準法で示す風力係数 C_f は 10 分間平均風速に基づいて定められた値であるため、竜巻時の風圧力を求める際には、瞬間風速に対応する風力係数 C_f に換算する必要がある。

3.2 飛来物による衝撃力

飛来物は竜巻時だけでなく台風時にも発生するため、飛来物は竜巻時および台風時の風圧力の大きさに応じて、ASTM^{1, 2)}や ISO⁵⁾にならい表 5-2 に定める 6 種類の加撃体に代表されるものとした。また、ASTM^{1, 2)}や ISO⁵⁾では加撃体の仕様のみが示されているだけであるが、本技術資料では各ランクでの加撃体の仕様と強風の大きさとの関係も明記した（参考資料 飛来物による外装材の耐衝撃性能 第 4 章参照）。なお、一般に、飛来物の衝突する位置が高いほど飛来物の重量が小さくなり、その高さが低いほど飛来物の重量が大きくなるため、ASTM^{1, 2)}や ISO⁵⁾にならい、飛来物が衝突する位置が高さ 10m 以上では高さ 10m 未満での加撃体の仕様よりも 1 ランク下位の加撃体を採用することとした。

4. 災害拠点施設の構造計算の考え方

4.1 構造骨組み

表 2-1 や 3.1 に定める台風・竜巻等突風による風圧力によって、構造躯体に建築物の機能継続に支障となるような損傷が生じないことを確かめる。また、飛来物の衝突や風圧力により（災害拠点機能を持たない部屋等の）窓や外壁等に大きな開口が生じ、内圧が大きく変化（内圧上昇や内圧降下）しても、構造躯体に建築物の機能継続に支障となるような損傷が生じないことを確認する。

4.2 機能継続が要求される建築物全体や建築物の部分の外装材

災害拠点機能を有する部屋や階は、災害直後からその部屋の機能を維持する必要がある、危険物貯蔵施設も被災してもその施設の機能継続が要求される。このように機能継続が要求される建築物全体や建築物の部分の外装材（開口部・帳壁・屋根ふき材）は、風圧力の作用や飛来物の衝突に対して室内等を防御することを確認する。

なお、災害拠点施設で機能継続が要求されない部分についても、極めて稀に生じる風圧力（再現期間 500 年）に対して安全上支障がないことを確認することを原則とする。ただし、沿岸型災害拠点施設で津波波力によって脱落を許容する外装材を取り付ける階は、津波により室内が浸水

することを許容していることから、これらの外装材は拠点機能を有する階に風圧力や飛来物の影響が及ばない対処を前提として、通常の耐風設計で良いこととする。

3.1 で示された風圧力の作用に対して、外装材は安全上支障のないことを許容応力度法などにより確認する。また、外装材が健全であれば内装材まで風圧力は作用しないので、その場合には内装材の安全性の確認は省略できる。

3.2 の飛来物の衝突に対して、外装材自体の損傷はある程度許容するが、機能継続が要求される建築物内に飛来物が進入せず(室内の人命の安全の確保)、部屋の機能が守られることを確認する。具体的には以下の(1)(2)の要求性能を満たすことを 5. 飛来物耐衝撃試験により確認する。

- (1) 想定される竜巻等突風や台風による飛来物が室内に貫通しないように外装材が防御すること。ただし外装材の室内側に顕著な損傷がなければ外装材の室外側等の損傷は許容される。顕著な損傷とは、外装材の損傷後室内に風雨等が吹き込み室内での活動等に支障となる損傷をさす。
- (2) 台風時には、飛来物で損傷を受けた外装材が、所定の風圧力の作用に対して、損傷が進展し一定以上の大きさの開口にならないこと。

5. 飛来物耐衝撃試験の概要

前章での検討結果を踏まえ、表 2-1 で分類した施設に対し、A.竜巻試験と B.台風試験での加撃体の仕様(表 5-2)と風圧力の大きさを定めた(表 5-1)。表 5-1 の○数字(①、②、③、④、⑤、⑥)は表 5-2 の加撃体の区分を表し、h は外装材の取り付け位置(高さ m)を示す。また、表 5-3 の P_{pos} と P_{neg} は建築物の正と負の風圧力で、建築基準法に基づき稀に生じる暴風(再現期間 50 年相当)の値(N)に表 5-1 の風圧力倍率を乗じて求めた基準速度圧から算出する。

表 5-2 は、海外の基規準(ASTM E 1996¹⁾、ISO 16932⁵⁾などを参考に定めた加撃体の仕様である。平成 25 年度において、日本の過去の飛来物の事例を収集し(参考資料 飛来物による外装材の耐衝撃性能 第 2 章参照)、数値シミュレーションにより竜巻や台風での飛来物の大きさや質量と速度の関係を明らかにし(参考資料 飛来物による外装材の耐衝撃性能 第 3 章参照)、ASCE^{1,2)}、ISO⁵⁾で定めた加撃体の運動エネルギーで分類することで、加撃体のランク分けを行い、加撃体の仕様を決めた(参考資料 飛来物による外装材の耐衝撃性能 第 4 章参照)。

飛来物耐衝撃性能試験(参考資料 飛来物による外装材の耐衝撃性能 第 5 章参照)は、4.2 に示す外装材の性能を確認する手法として、図 5-1 の装置を用いて、表 5-2 で定めた加撃体を外装材に衝突させて、外装材の損傷の程度を評価するものである。試験には、飛来物衝突試験だけの A.竜巻試験と飛来物衝突試験後に表 5-3 に示す繰り返し圧力载荷を行う B.台風試験があり、A と B の両方の試験を実施する。

表 5-1 加撃体の種類と風圧力

建築物の種類	A.竜巻試験 (飛来物衝突試験)		B.台風試験 (飛来物衝突試験+圧力载荷試験)		風圧力 倍率
	加撃体		加撃体		
	10m \geq h	h >10m	10m \geq h	h >10m	
I: 危険物貯蔵施設	⑥JEF3 超	⑤JEF3	④	③	1.8
II: 災害拠点施設	⑤JEF3	④JEF2	③~④	③	1.6
III: 避難所	④JEF2	③JEF1	③~④	③	1.6
IV: 不特定多数利用施設	④JEF2	③JEF1	③	②	1
V: 住宅等のその他施設	-	-	③	②	1

表中の○数字は、表 5-2 の加撃体の区分を表す

h: 外装材の位置 (高さ) m

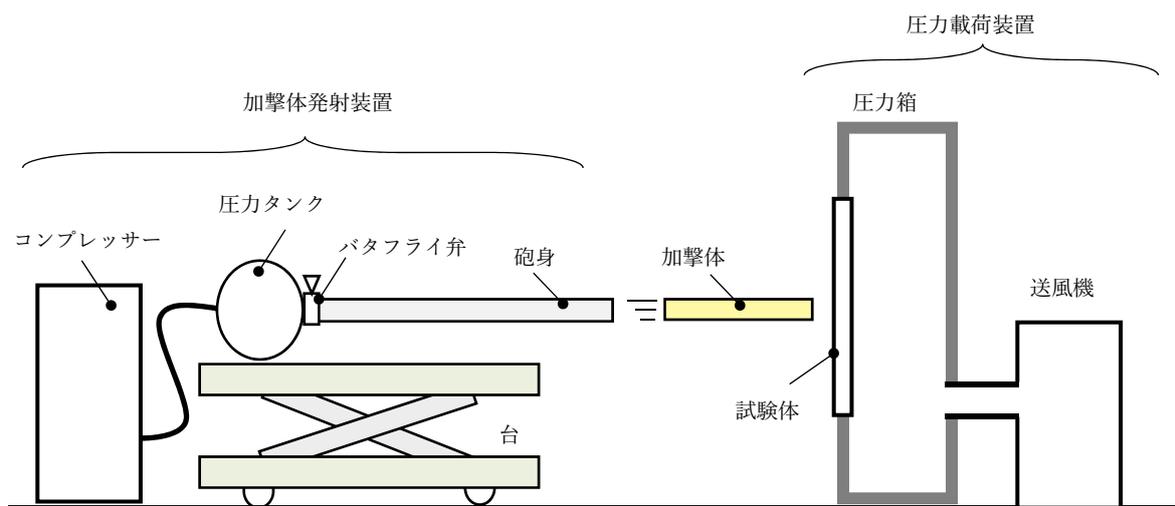


図 5-1 外装材飛来物耐衝撃試験装置の例 ¹²⁾

表 5-2 加撃体の仕様

加撃体	想定竜巻スケール	質量 (kg)	速度 (m/s)	運動エネルギー (J)	対応する既存の基規準
①	JEF0 未満	0.91	15	約 100	ASTM-B
②	JEF0	2.0	12	約 200	ASTM-C ISO-B
③	JEF1	4.1	15	約 500	ASTM-D ISO-C
④	JEF2	4.1	24	約 1000	ASTM-E ISO-D
⑤	JEF3	6.8	22	約 2000	ISO-E
⑥	JEF3 超	6.8	35	約 5000	FEMA361、ICC-500 (トルネード) の下限値

表 5-3 繰り返し圧力載荷

載荷順	荷重の向き	圧力サイクル	繰り返し数
1	正	0.2 P_{pos} から 0.5 P_{pos}	3500
2	正	0.0 P_{pos} から 0.6 P_{pos}	300
3	正	0.5 P_{pos} から 0.8 P_{pos}	600
4	正	0.3 P_{pos} から 1.0 P_{pos}	100
5	負	0.3 P_{neg} から 1.0 P_{neg}	50
6	負	0.5 P_{neg} から 0.8 P_{neg}	1050
7	負	0.0 P_{neg} から 0.6 P_{neg}	50
8	負	0.2 P_{neg} から 0.5 P_{neg}	3350

*1 正は外装材を建築物の外側から押す圧力

6. 外装材飛来物耐衝撃試験の例示

表 6-1 は、現在市販されて一般に入手可能な建材を試験体として、外装材飛来物耐衝撃試験を実施した結果の例示である。現時点では、衝撃力の大きい加撃体に対して合格と判定されたものは、RC 壁のほか、ALC パネル（厚さ 150mm）、片開き・両開き鋼製ドア、180mil 合わせガラスなどである。

表 6-1 外装材飛来物耐衝撃試験結果

部材	試験体	加撃体					
		① JEF0 未満	② JEF0	③ JEF1	④ JEF2	⑤ JEF3	⑥ JEF3 超
壁	RC 壁 100 mm シングル配筋	-	-	-	○	○	○
	ALC 50mm	○	○	×	-	-	-
	ALC 100mm	-	○	○	-	-	-
	ALC 150mm	-	-	○	○	○	-
	押し出し成形セメント板	○	○	×	×	-	-
開口	重量シャッター	-	-	○	○	-	-
	片開き鋼製ドア	-	-	-	○	○	○
	両開き鋼製ドア	-	-	-	○	○	○
	Fix 窓	-	○	×	-	-	-
	外開き窓	-	○	×	-	-	-
ガラス	合わせガラス (5+60+5)	-	○	×	×	-	-
	合わせガラス (5+180+5)	-	-	-	-	○	×

7. 災害拠点施設等の外装材の検討例

平成 25 年度に実施した外装材飛来物耐衝撃の結果（表 6-1）に基づいて、災害拠点施設等の外装材として使用可能なものを検討した。表 5-1 より、災害拠点施設等では、表 5-2 の⑤（外装材の取り付け位置が 10m 以下）もしくは④（外装材の取り付け位置が 10m 超）の加撃体に対して損傷しないことが求められる。表 5-2 の⑤の加撃体は JEF3 の竜巻等の突風で発生する最大級の運動エネルギーをもつ飛来物に相当するものであるが、表 6-1 に示すように、現時点での建材でも RC 壁のほか、ALC パネル（厚さ 150mm）、鋼製ドア、180mil 合わせガラスが、災害拠点施設等の外装材として用いることが可能であることが分かった。④の加撃体であれば、上記に加えて、重量シャッターも適用できる。

また、外装材には通常の建材を用いて、災害拠点機能を有する部屋や一部区画を安全性が確認できた RC 壁や鋼製ドア等で仕切る、といったことも設計上可能と考えられる。

さらに、今後、この外装材の飛来物耐衝撃試験方法が一般に普及すれば、建材メーカーがその基準に合格する建材を開発することも期待される。

8. まとめ

本技術資料では、外装材の対飛来物衝撃設計法と題して、台風および竜巻等の突風による外装材耐衝撃性能試験法や評価法を提案した。外装材耐衝撃性能試験法には台風試験と竜巻試験があり、竜巻試験は加撃体の衝突試験のみであるが、台風試験では加撃体の衝突試験後に風圧力の繰り返し載荷を行う。また、災害拠点施設等のほか、危険物貯蔵施設、避難所など建築物を分類し、それぞれの要求性能とそれに基づく構造骨組みや外装材等の風圧力の作用や飛来物の衝突に対する性能を明らかにした。

参考文献

- 1) ASTM E1996 - 17 Standard Specification for Performance of Exterior Windows, Curtain Walls, Doors, and Impact Protective Systems Impacted by Windborne Debris in Hurricanes
- 2) ASTM E1886 - 13a Standard Test Method for Performance of Exterior Windows, Curtain Walls, Doors, and Impact Protective Systems Impacted by Missile(s) and Exposed to Cyclic Pressure Differentials
- 3) FEMA P-361, Safe Rooms for Tornadoes and Hurricanes: Guidance for Community and Residential Safe Rooms, Third Edition (2015)
- 4) ICC 500, ICC/NSSA Standard for the Design and Construction of Storm Shelters (2014)
- 5) ISO 16932: Glass in building — Destructive-windstorm-resistant security glazing — Test and classification (2016)
- 6) 内閣府：竜巻等突風対策局長級会議
平成 25 年度 <http://www.bousai.go.jp/fusuigai/tatsumakikyokuchou/h25.html>
平成 24 年度 <http://www.bousai.go.jp/fusuigai/tatsumakikyokuchou/>
- 7) 平成 6 年建設省告示第 2379 号「国家機関の建築物及びその附属施設の位置、規模及び構造に関する基準」http://www.mlit.go.jp/gobuild/kijun/070619_itiki.pdf
- 8) 国土交通省：官庁施設の総合耐震・対津波計画基準
<http://www.mlit.go.jp/common/001092825.pdf>
- 9) 気象庁：日本版改良藤田スケール <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/toppuu/tornado1-2-2.html>
- 10) 平成 12 年建設省告示第 1454 号「E の数値を算出する方法並びに V0 及び風力係数の数値を定める件」<http://www.kenken.go.jp/japanese/research/lecture/h16/slide/06-1/ref/No6.htm>
- 11) 平成 12 年建設省告示第 1458 号「屋根ふき材及び屋外に面する帳壁の風圧に対する構造耐力上の安全性を確かめるための構造計算の基準を定める件」
<http://www.kenken.go.jp/japanese/research/lecture/h16/slide/06-1/ref/No1.htm>
- 12) 丸山 敬・河井宏允・西村宏昭・加茂正人：試作された耐衝撃性能試験用エアークャノンの性能、京都大学防災研究所年報第 52 号 B、p.481-489、2009

技術資料⑥

建築設備の機能維持技術

建築設備の機能維持技術

目次

1. 地震対策
2. 水損防止（津波対策）
3. ライフライン途絶への対応性の確保（設備システムの機能維持性向上技術に関する検討）
 - 3.1 冗長化
 - 3.2 備蓄・補給
 - 3.3 補修性向上
 - 3.4 仮設設備
 - 3.5 非常用エレベーターの仮運転による物資運搬
4. 機能維持に有効な新技術
 - 4.1 大災害におけるインフラの途絶に対応した防災型超々節水衛生設備システム
 - 4.2 被災後におけるエネルギー自立技術

1. 地震対策

建築設備の耐震対策としては、機器や配管の固定が中心であり、東日本大震災の教訓として、揺れの長時間化が原因と思われる吊りボルトの抜けや破損による天井設置機器の落下や変圧器の一次端子接続部の破断などが生じ、機器や配管の触れ止めや耐震ストッパーを適切に設置することの重要性が確認された。以下に具体的な対策例を示す。

① 変電設備

【被害事例・課題】

- ・受変電設備での配線が揺れて接触したことによる短絡事故が多数発生した。スプリング防振を設置しているトランスでは、地震時に頭部の揺れが大きくなり、余長が少なかった配線が被害を受け短絡事故が起きた。
- ・受変電設備は耐震基準に適合しているが、長期にわたる振動に対しての配慮がされていないため損壊を生じる可能性がある。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・受変電設備における揺れ対策として、ストッパーを設置することで、配線部分の破断を防ぐ対応を取ることとする。

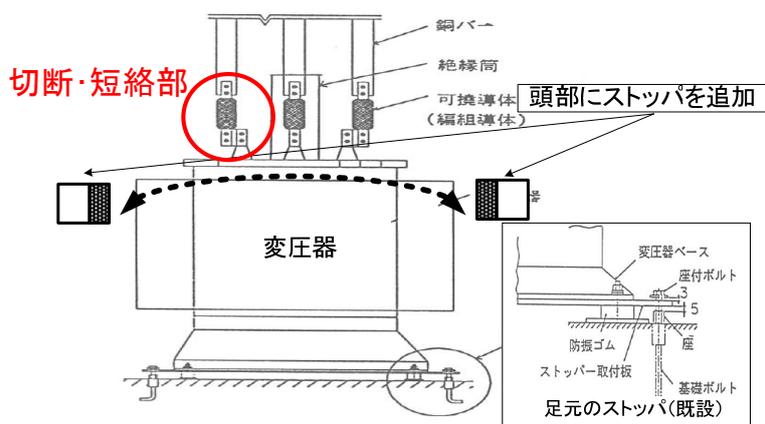


図 1-1 モールドトランス耐震対策の事例

- ・キュービクルの納期に大きな影響があるのは、受注生産である変圧器である。
予備の変圧器を用意することも考えられるが、費用がかかる・保管場所が必要・変圧器の据付の時間がかかる・品質確保が難しいなど問題があるので、変圧器の耐震対策をすることが適当である。特に、モールド変圧器は損壊し易い為対応が必要である。

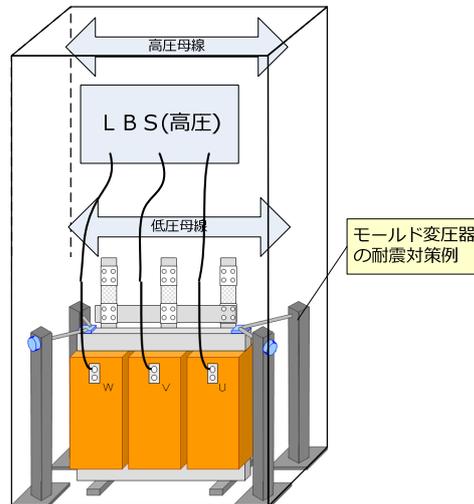


図 1-2 モールドトランス耐震対策の例

- ・継電器は、地震による接点の誤作動を起こす可動機構による有接点方式をさけ静止形とする。
- ・モールド変圧器の耐震対策装置は、小容量はあるが大容量はなく今後の開発が必要である。

② 天井設置機器（エアコン屋内機等）

【被害事例・課題】

- ・東日本大震災では、天井吊空調機器の地震被害が多かったとの報告がなされている。原因は長期間の揺れで金属疲労が生じて吊材が破断し天井吊機器が脱落したと考えられている。
- ・機器の落下防止の基本は、機器の“揺れ”によるアンカーや吊ボルトの損傷を防ぐことにあり、結果として機器近傍の配管などや吊ボルトの損傷も防止することになる。
- ・東日本大震災の地震では、天井と天井面設置機器の“揺れ特性”の違いにより相互に緩衝し、天井材が被害を受けた例が報告されている。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・天井吊空調機器を採用する場合には、今まで規定のなかった重量が 1 kN 以下の機器でも吊材を極力短くすることや、振れ止めを設けるなどの耐震措置による落下防止を図る必要がある。
- ・地震に伴う揺れによる天井材の破損防止のために「建築物における天井脱落対策

試案（平成 24 年 7 月 31 日）国土交通省住宅局建築指導課、国土技術政策総合研究所」では天井面と設備機器の間に 100mm の相互クリアランスを確保することとなっている。ただし、天井面と一体で挙動する建築設備に関してはこの限りではないとされている。

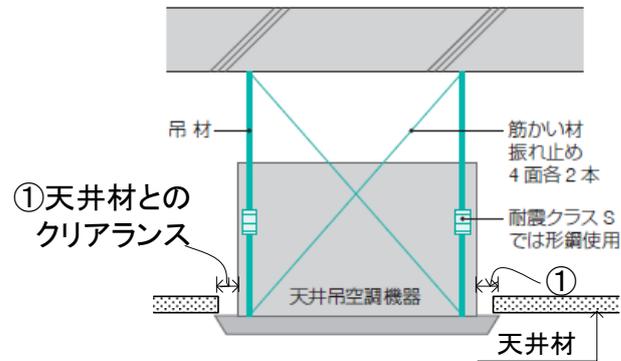


図 1-3 天井吊り設置機器の振れ止めと天井材と設備機器のクリアランス

2. 水損防止（津波対策）

津波対策としては、インフラ設備の主要部分を津波浸水階以上の階に設置するのが合理的である。地震の揺れを考慮すると、重要設備機器は揺れの少ない建物低層階に設置するのが望ましいが、津波が予想される地域では受変電設備や発電機、空調熱源機器等は、原則、津波浸水階以上の階に設置すべきである。以下に具体的な対策例を示す。

① 変電設備・発電機設備

【被害事例・課題】

- ・東日本大震災では、地下階設置の受変電設備、発電機設備が津波の被害を受けた事例がある。
- ・インフラ（電力）は復旧したが、キュービクルが津波に流され、新たな製作に5ヶ月弱かかり、復電が遅れた事例がある。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・津波被害後も施設に電源供給する受変電設備、発電機設備は、津波の影響を受けない浸水防止ライン以上の階に設置する。
- ・発電設備に燃料を供給する地下タンクを設置する場合、移送ポンプは浸水防止型とし、ポンプ制御盤は発電設備と同じ階に設置する。また、地下タンクの通気管も浸水防止ライン以上まで立ち上げる。
- ・電源は、浸水被害を受ける系統と受けない系統に分ける。

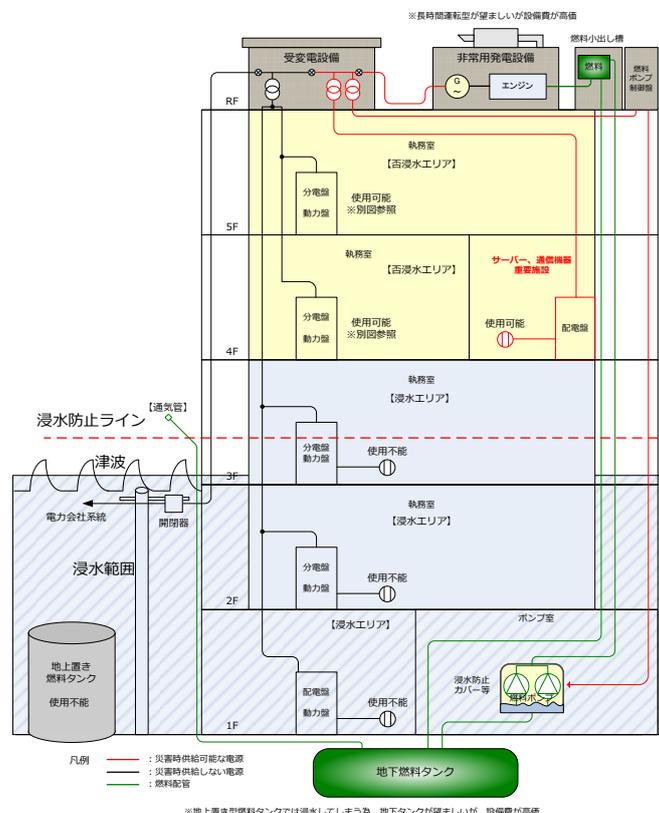


図 2-1 受変電設備、発電設備の浸水防止ライン以上への設置と発電設備燃料供給事例

② 水槽等

【被害事例・課題】

- ・東日本大震災の津波地域では、津波により1階あるいは屋外設置の受水槽や給水ポンプ、動力盤の流失・破損・汚損や供給電源の喪失により上水が供給できなくなるなどの被害が見られた。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・津波後の飲料水やトイレ洗浄水の確保のため、津波想定階以上の場所に高置水槽を設置し、高置水槽で災害時の使用水の必要容量を確保することが考えられる。
- ・一般的な高置水槽容量は時間平均給水量の1時間分であるが、必要に応じて増加させる必要がある。
- ・非常時の上水の貯留時間が5日以上となる場合、残留塩素の減少等の水質劣化を防止するために塩素滅菌装置等の設置を検討する。
- ・水温が高い場合には、残留塩素の減少速度は早まるのでは急激に減少するので、高置水槽が外気や直射日光にさらされる屋外設置の場合には注意が必要である。
- ・水槽の水位が下がると、残留塩素は急激に減少するので、水槽水深が低い場合には、飲料水としての利用には注意が必要である。
- ・受水槽を設置せず高置水槽のみで給水する本システムについては、水道局や保健所との協議が必要である。
- ・高置水槽容量について一般的に規制はないが、貯留量と使用量との関係から常時の水質についてチェックが必要である。

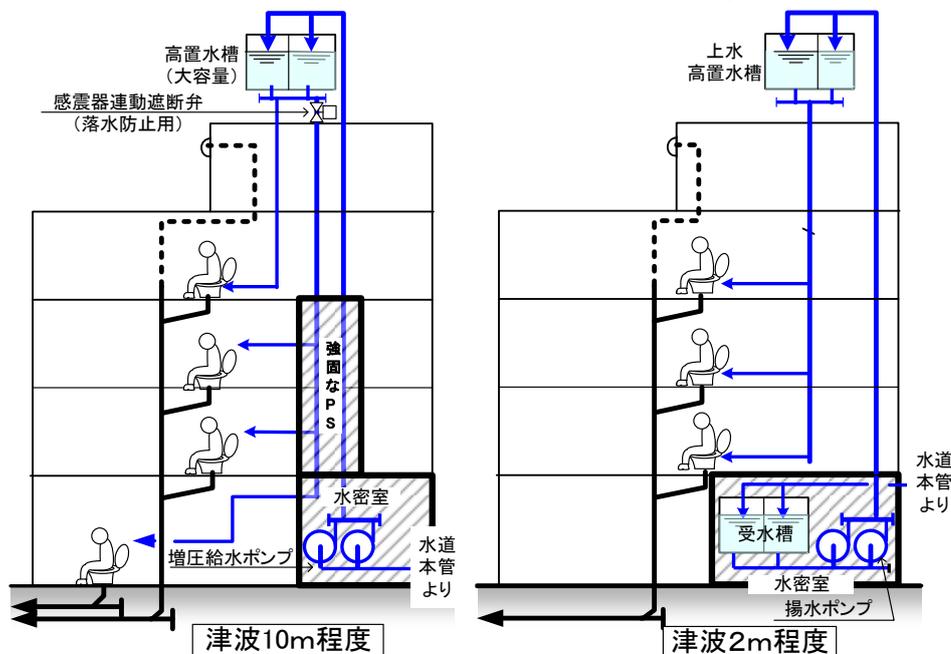


図 2-2 給排水設備の浸水上下階でのシステム分離とシャフトの保護の事例

③ 衛生機械室の避水・排水対策

【被害事例・課題】

- ・ 東日本大震災では、機械室扉の気密性が高い場合、津波の浸水深以下の階に設置された機械室内においても扉の防水により機械室内への浸水量が削減でき、設備機器の水損被害を軽減できた事例が見られた。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・ 低層階に設置される衛生機械室扉は頑丈で気密性の高いエアタイト仕様とし、比較的小規模の浸水時には機械室への浸水を最小限に限定し、受水槽や給水ポンプへの水損被害を軽減する。
- ・ 低層階の衛生機械室内の受水槽や給水ポンプ、動力制御盤等の主要機器の基礎高さを通常よりも高くすることで機器の水損被害を軽減する。
- ・ なお、衛生機械室が設けられた階での浸水水位が想定できる場合、衛生機械室の壁や建具の水密性能を把握したうえで、衛生機械室内にピットと排水（水中）ポンプを設置し、浸水による水損の低減を図ることを検討する。

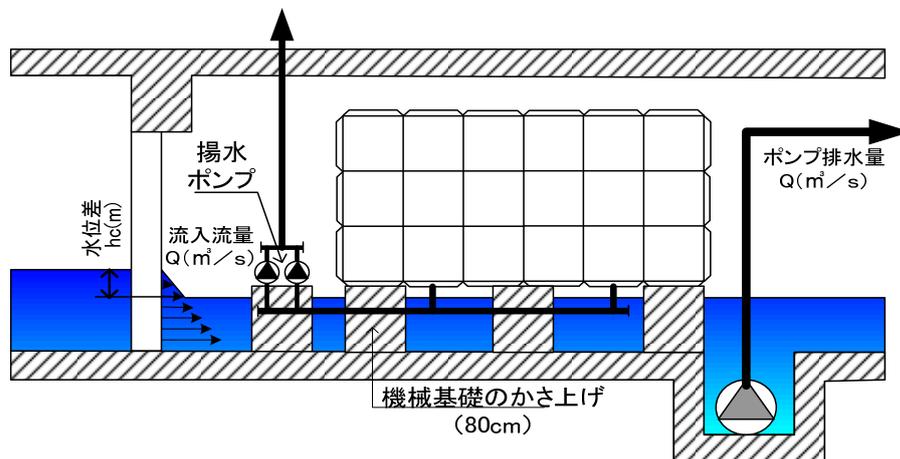


図 2-3 機械室に浸水した水を設定水位以下に抑制する場合

④ 空調機器

【被害事例・課題】

- ・ 東日本大震災では、地上屋外や低層階に設置された空調室外機等が津波の被害を受け、災害拠点室等の重要室の空調機能を喪失した事例があった。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・ 津波直後からの使用が必要な施設や主要な設備機器は、津波による設備システムの停止を防止するため津波被害想定階以上の階に設置する。

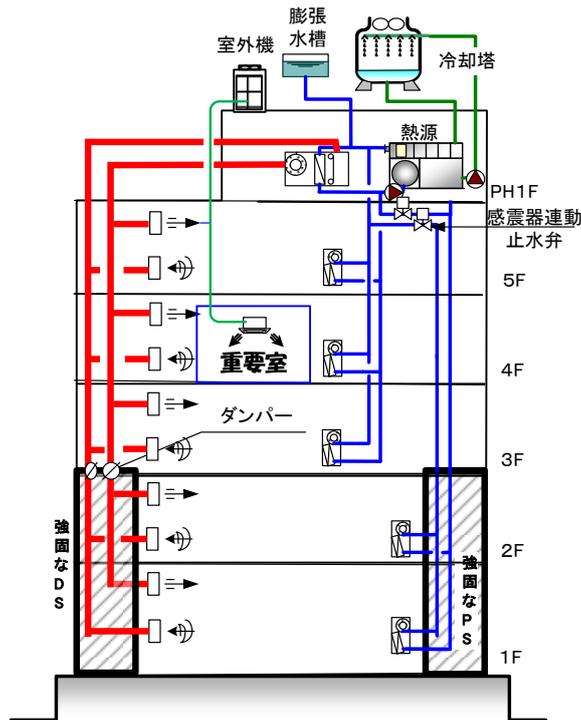


図 2-4 空調主要設備の屋上設置

⑤ 消火設備

【被害事例・課題】

- ・東日本大震災では、低層階の衛生機械室に設置された消火ポンプ等が津波の被害を受け機能を喪失した事例がある。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・災害拠点施設の消火設備は、消火ポンプ・消火水槽等を津波の影響を受けない想定される最高の水位以上の位置に設置する。
- ・なお、消火配管についても、津波の到達想定階の上下で配管系統を分離し、非浸水階の消火配管からの落水防止を考慮する必要がある。

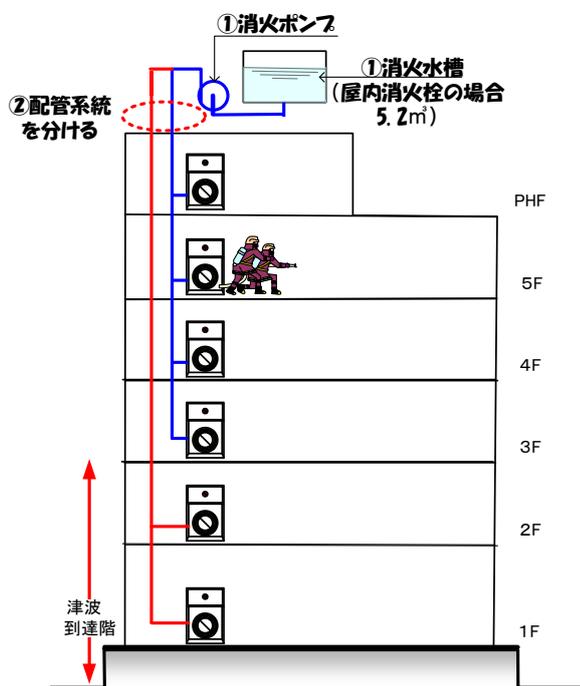


図 2-5 消火水槽や消火ポンプを屋上に設置した場合の事例

3. ライフライン途絶への対応性の確保（設備システムの機能維持性向上技術に関する検討）

災害後の設備システムの機能維持性を向上させる手法として、様々な方式が考えられる。ここでは、これらの方式を冗長化、備蓄・補給、補修性向上、仮設設備の4つに整理して解説する。

3.1 冗長化

施設の基幹となる重要設備システムは、地震や津波等により、システムの一部に何らかの被害が発生した場合においても、システム全体の機能を大きく損なうことなく主な性能が維持し続けられるように予備装置等を設置する必要がある。以下に具体的な対策例を示す。

① 発電機

【被害事例・課題】

- ・ 商用電源停電時、非常用発電機稼動したが、点検後の再稼動しなかった事例があった。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・ 発電装置本体、燃料タンク、移送ポンプ、燃料小出し槽、燃料配管系統を二重化、冗長化し、発電設備の信頼性の向上を図るのが望ましい。

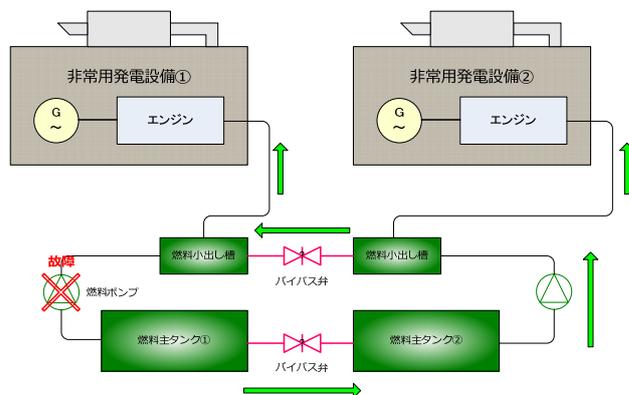


図 3-1 非常用発電機及び燃料供給施設の二重化対応のイメージ

- ・発電機設備の燃料切れや不測の停止となった場合の最重要負荷への対応として災害時にも被害が少なく途絶しにくい中圧ガスを燃料とする小容量発電機を設置できれば望ましい。

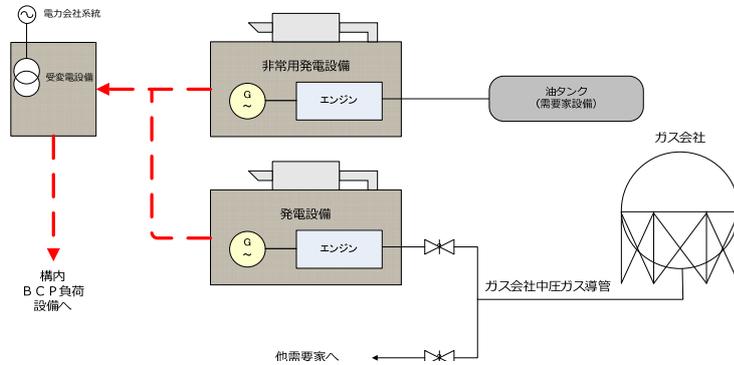


図 3-2 中圧ガスを用いた非常用発電設備のイメージ

- ・防災負荷（消火ポンプ・排煙機等）用の大容量発電機とは別に保安負荷（給水ポンプ・照明等）用の小容量発電機を設置することも考えられる。保安用の小容量発電機は、対象となる発電機負荷を限定することで燃料消費量を大きく削減できるので、同じ燃料タンク容量で長時間の発電運転が可能となる。

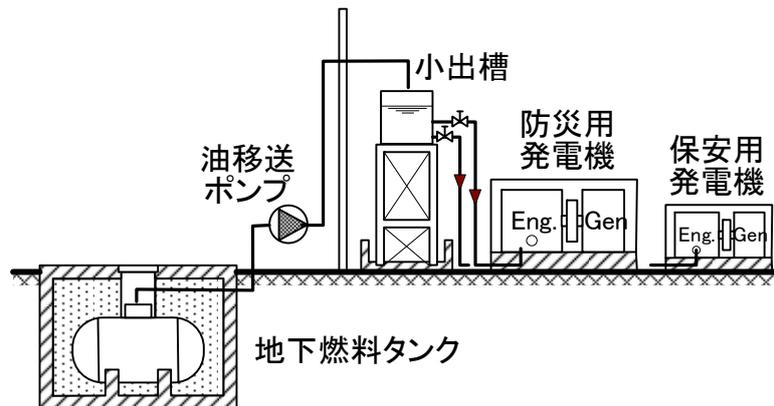


図 3-3 保安用小容量発電機設置のイメージ

② 太陽光発電装置

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・太陽光発電設備は、蓄電池付とし、商用停電時は防災拠点で必要な電源が供給できるようにシステムから切り離し、太陽光発電の自立運転を行う。夜間、曇りの時など発電出力が不足する場合は蓄電池から供給する。

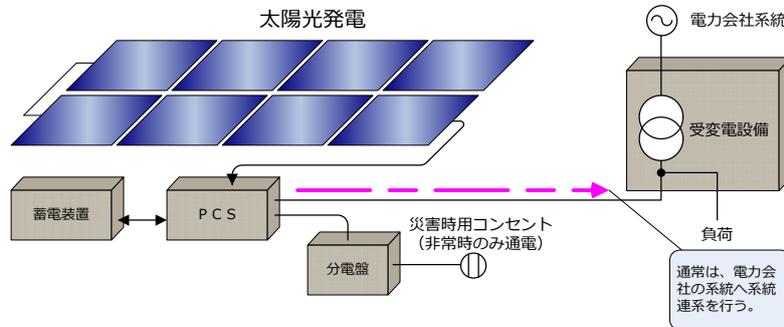


図 3-4 災害時対応可能な太陽光発電設備構成のイメージ

- ・曇り時の太陽光発電電力を有効利用する方法として、PCS を小型分割設置し、曇り時の状況に応じて太陽光パネルを並列接続し、PCS の高い電力変換効率を維持する方法が考えられるが、技術・コスト・運用面などの検討が必要である。

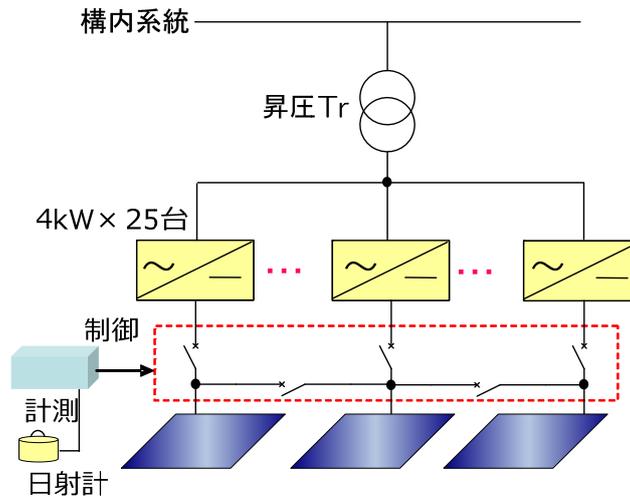


図 3-5 PCS分割設置による太陽光発電効率化運転のイメージ

③ 通信機器

【被害事例・課題】

- ・東日本大震災では、津波によるインフラの通信基地本局の被害及び停電により通信設備が機能しなくなった事例がある。特に、通信基地本局の被災は、復旧まで時間がかかり長期間通信設備が機能しなくなる。
- ・防災行政無線の被害が少なく、有効に機能した事例がある。
- ・衛星携帯電話は、機能していた事例がある。
- ・携帯電話は、1社が2日後中継車を準備し復旧、残り2社は、1週間後復旧した事例がある。
- ・病院と役場の連絡に、消防団トランシーバー(通話範囲1km)と衛星電話を使用した事例がある。
- ・各機関の無線電話は周波数が異なるので相互連絡には使えなかった事例がある。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・災害時の被災状況の把握は、救急活動において、非常に重要であり通信設備の役割は非常に大きい。また、相互連絡により、より早く情報収集が可能となる。特に、孤立しそうな場所には、通信手段を準備しておく。
- ・様々な会社の携帯電話、衛星電話、防災無線、PHS、トランシーバーなど複数の通信設備の準備と停電していても使用できるように、ソーラー、蓄電池、発電機など多くの電源から供給できるようにする。
- ・大地震に備えて、衛星通信及び行政無線の設備対応の優先性は高いので、導入を十分に検討する。

・衛星電話

通信衛星と直接通信する電話機を使用した電話網を提供するサービスである。特徴として、通信可能地域が広いほか、地上設備が少ない通信網が技術的には提供可能であり地震などの災害に強い。しかし、無線局の免許や規制などの関係で自由に使用できない地域もある。また、地上の障害物のため通信しにくいことがある。

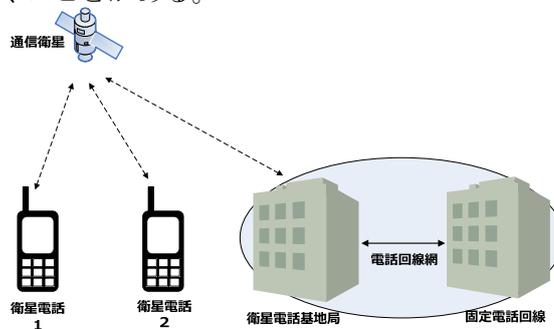


図 3-6 衛星電話を用いた連絡手段のイメージ

- ・防災行政無線

屋外拡声器や戸別受信機を介して、市町村役場から住民等に対して直接・同時に防災情報や行政情報を伝達するシステムである。特徴として、専用の無線回線であり信頼性が高い設備であり、通信の輻輳がなく、電話応答装置や地区情報収集装置などを付属することが可能で拡張性が高い。また、運用や設置について事前協議が少なく早期設置が可能である。

- ・移動系地域防災無線

車載型や携帯型の移動局と市町村役場との間で通信を行うもので、行政機関内の通信手段である。なお、地域防災無線は、交通及び通信手段の途絶した孤立地域からの情報や病院、学校、電気、ガス等の生活関連機関と市町村役場等との間の通信を確保することを目的とした移動系の通信網である。

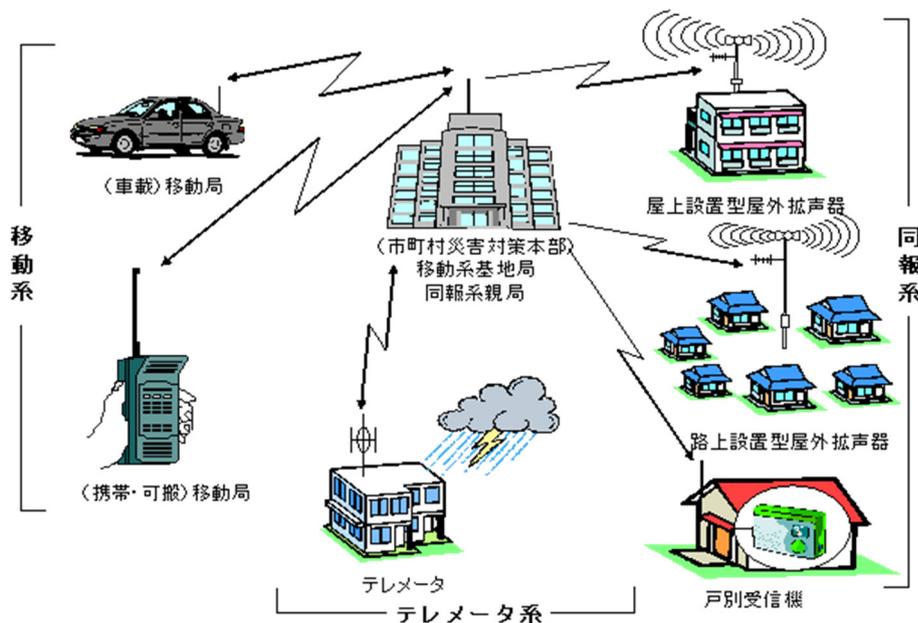


図 3-7 防災行政無線のイメージ(参照:総務省)

- ・携帯電話

有線通信の通信線路(電話機等)に接続する基地局・端末の間で電波による無線通信を利用するものである。特徴として、移動しながらの通信が可能であるが、基地局でカバーする通信エリアが数kmであり大規模災害時に弱い設備である。また、災害時は回線の使用量が過多となり非常に繋がり難くなる。

- ・PHS

システムとしては、携帯電話と同じであるが、小型の基地局装置を設置するだけであり、低コストである。特徴として、通信が途切れ易く、基地局装置がカバーするエリアは半径500m程度であり、災害に弱い設備である。

- ・トランシーバー

無線電波の送信機能と受信機能を兼ね備えた無線機である。特徴としては通信距離が短く限定的であるが、付帯設備が不要であるため災害に強く建物内などでの通信に適している。トランシーバーの使用用途と通信出力の大きさにより免許の届出が必要となる場合がある。

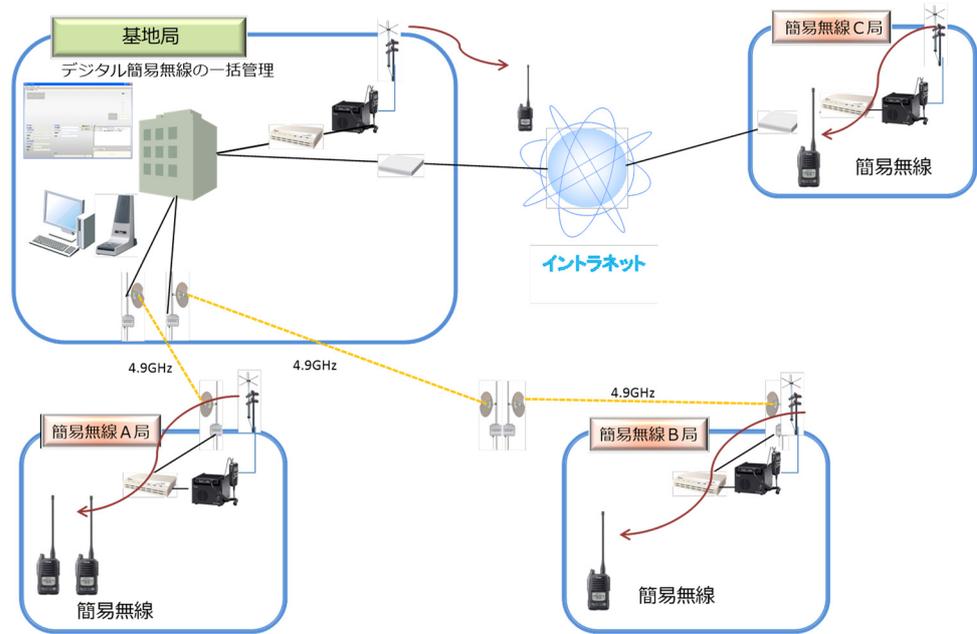


図 3-8 トランシーバーを用いた連絡手段の事例

- ・通信設備にはいろいろなシステムがあるが、災害時のシステムの連携など総合的な検討が必要である。

④ 雑用水槽の大型化と2系統給水

【被害事例・課題】

- ・東日本大震災後には給水ライフラインの断水の長期化により、トイレ洗浄水用が足りなくなった例がある。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・対策としては、大容量の雑用水槽を設置するとともに、雨水を貯留するなど多様な水源を利用することが考えられる。
- ・常時に使用する一日分以上の上水を貯留する場合、大容量の雑用水槽を設置するとともに、雨水を貯留するなど多様な水源を利用することが考えられる。そのため給水配管系統も水質の問題から、飲料水とトイレ洗浄水の二系統に分離する必要がある。
- ・二系統給水の採用には、“配管二重化による建設コスト増”と“雑用水槽の設置場所の確保”の問題を検討する必要がある。

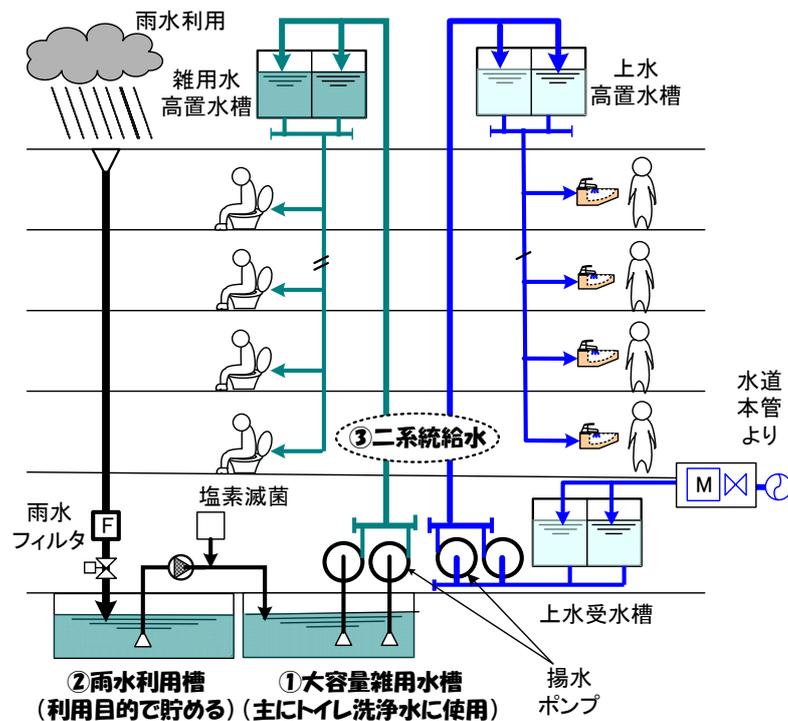


図 3-9 二系統給水方式のイメージ

⑤ 雨水利用

【被害事例・課題】

- ・東日本大震災では、給水ライフラインの断水が長期にわたったため、トイレ洗浄水が不足した例が報告されている。
- ・雨水などの比較的水質が劣る水源でもトイレ洗浄水としての利用は可能である。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・雨水を濾過・貯留しトイレ洗浄水等に使用することで、給水ライフライン断水時のトイレ洗浄水をすこしでも確保することができる。
- ・雨水を貯留するための雨水貯留槽が必要になる（雨水流出抑制が義務づけられている地域では雨水利用のための雨水貯留槽以外に雨水流出抑制槽が必要になる）。これらの水槽は一般的には地下ピット内に設けることが多いが、ピットのない小規模の建物では雨水貯留タンクが別途必要になる。
- ・雨水利用システムの機器管理上や省資源・ランニングコスト低減の観点から、貯留した雨水を常時もトイレ洗浄水等に使用することが望ましいが、水質の問題から配管を上水とは別系統とする（二重化）ことが必要となる。トイレ洗浄水として要求する水質によっては砂ろ過や滅菌装置の設置も必要となる。

⑥ 井水利用

【設計・運用上の配慮事項等】

災害時に井水をトイレ洗浄水等に使用することで、給水ライフライン断水時のトイレ洗浄水を確保することができる。

- ・非常時であっても、井水を飲用水として利用することは水質の問題から困難な場合が多いので注意が必要である。
- ・災害用井戸は規制上の水量が十分ではないため、水槽に貯留して使用するとともに井水を供給するトイレ下流側にマンホールトイレを設置し、マンホールトイレの下部に汚物がたまるのを防止するなどの工夫が考えられる。

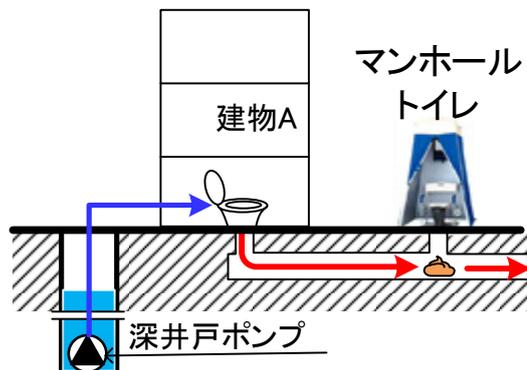


図 3-10 井水利用とマンホールトイレのイメージ

⑦ 緊急汚水槽

【被害事例・課題】

- ・東日本大震災では、震災や津波により排水処理施設が被害を受けた場合、下水機能の復旧が数か月単位で長期化する例が見られた。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・ある程度の規模以上の施設では、公共排水処理施設の停止あるいは公共下水本管の断絶に備えて、緊急汚水槽の設置を検討する。
- ・緊急汚水槽の貯留量は一人当たり 34 L(飲用水 4L+雑用水 30L)の 3 日分とする。
- ・緊急汚水槽を建物内に設ける場合、維持管理の軽減の観点から常時は空堀とし、非常時には隣接する汚水槽のポンプを停止し連通管経由で汚水を貯留することが考えられる。
- ・緊急汚水槽の上部には公共下水道復旧後の排水と清掃が容易なように投げ込みポンプ投入やバキューム用ホースを挿入するためのマンホールを設置する。
- ・緊急汚水槽を建物外に設ける場合、汚水枳のインバート上部に止水蓋により閉鎖した空堀への配管を接続し、非常時には止水蓋をはずしインバート出口配管を閉鎖することで外部空堀を緊急汚水槽として利用することが考えられる。

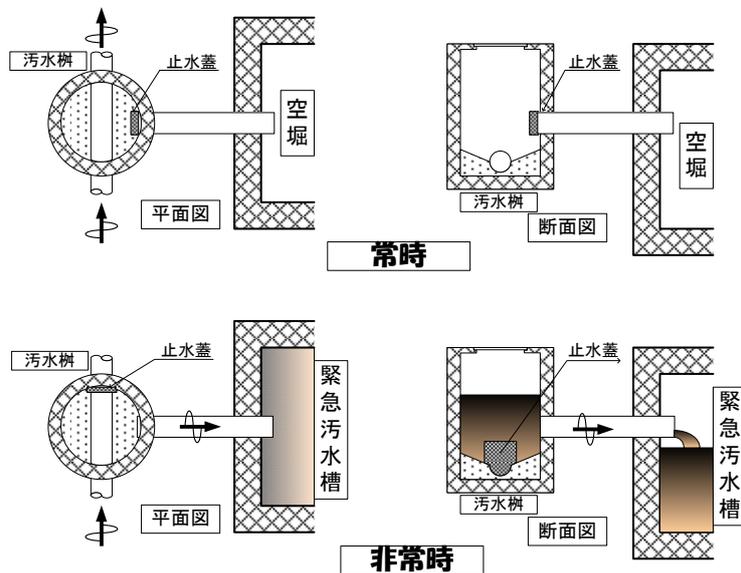


図 3-11 緊急汚水槽を屋外に設けた場合のイメージ

⑧ 空調システムの個別化

【被害事例・課題】

- ・東日本大震災では、地上屋外や低層階に設置された空調室外機等が津波の被害を受け、災害拠点室等の重要室の空調機能を喪失した事例がある。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・重要室の空調は、インフラ途絶や空調システム全体の停止の影響を避けるために建物全体とは単独の個別空調方式とする。
- ・個別空調の室外機は津波の影響を受けないように“施設が立地する場所において想定される最高の水位以上の位置に設置する。
- ・重要室の空調が機能するためには、電源が供給させることが前提である。

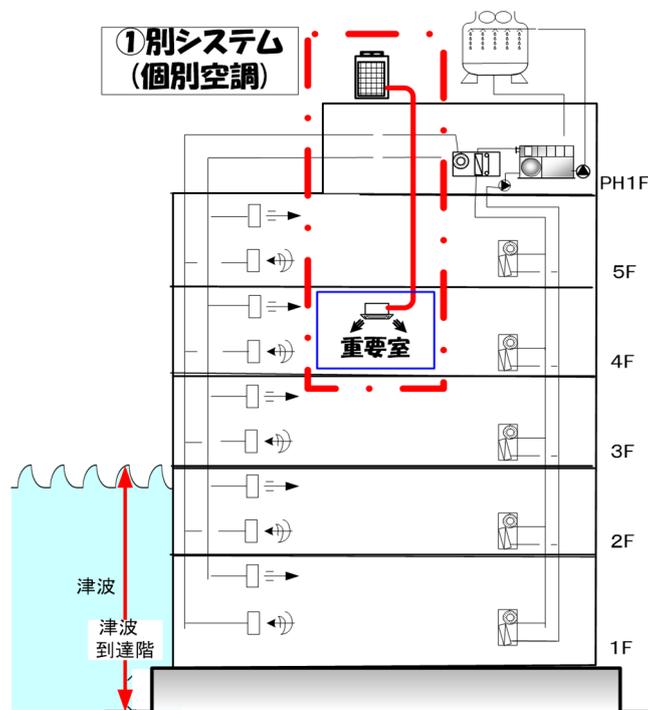


図 3-12 重要室の個別空調化

3.2 備蓄・補給

災害活動拠点や災害拠点病院では、インフラの途絶に備えた燃料・水・食料等の備蓄を計画する必要がある。インフラ途絶が長期化すると、備蓄では対応しきれなくなり、補給手段の確保が必要となる。これらはいずれも近隣社会からの援助や協定による取り決めが不可欠である。以下に具体的な対策例を示す。

① 可搬型発電装置

【被害事例・課題】

- ・インフラの復旧が長期間に及び長時間の停電にたいして、大型の発電機・小型の発電機・可搬型の発電機などを調達し、必要最低限の照明・揚水ポンプ・防災無線の電源とした事例があった。

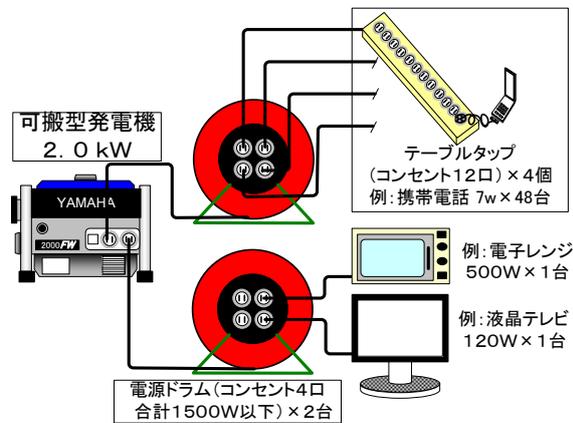


図 3-13 可搬型発電機のイメージ

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・発電機設備の燃料切れや不測の停止となった場合の最重要負荷への対応、予定外の場所での電源供給が必要になったときに備えて、可搬型低圧発電装置（蓄電池含む）を建物内に用意しておく。
- ・可搬型低圧発電装置には、ガソリン燃料、ガス燃料、カセットこんろ用ボンベなど種類があり、施設の実態により、種類、容量、台数を選定する。また、逆送電防止のためのインターロック機能付供給口を準備することにより安全に対応できる。
- ・可搬型蓄電池装置があるが、高価であり、一旦放電してしまうと、充電に 8 時間以上を要する。

② 受水槽の大型化

【被害事例・課題】

- ・東日本大震災では、給水ライフラインの断水の長期化により、給水ライフラインの復旧以前に早期に受水槽の水を使い切った例が多い。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・受水槽等の容量は常時ばかりでなく非常時の使用水量を確認する必要があり、非常時には使用水量の制限を前提に計画することになる。
- ・上水受水槽の貯水量は、原則、常時の使用量の半日分が目安となっているが、庁舎の場合の一人一日使用量が 80～100ℓ とされるため、半日分の貯水量は 40～50ℓ となり、非常時の一人一日使用量である 33ℓ（飲料水 3ℓ、雑用水 30ℓ、表 3-1 参照）の約 1～1.5 日分となる。
- ・非常時に 3 日分の貯水をする場合、貯水量は一人当たり約 100ℓ となり、受水槽容量は 1 日分（1 回転/日）となるため、貯水量に関して衛生面の検討が必要となり、保健所や水道局との協議が必要となる。
- ・受水槽または高置水槽を大型化し常時の 1 日以上貯水量を確保する場合、残留塩素の減少等の水質劣化を防止するために塩素滅菌装置等の設置を検討する必要がある。また、給水システムを後述する 2 系統給水とし、比較的水質基準や貯水量の規制の少ない雑用水（トイレ洗浄水）水槽を大型化するのも検討の価値がある。

表 3-1 震災後の 1 人 1 日あたり上水使用量の目安

用途	飲料水のみ	飲料水+トイレ +簡易洗濯	飲料水+トイレ +簡易洗濯 +簡易シャワー
飲用	3 ※1	3 ※1	21 ※2
炊事			
洗面	—	6 ※2	6 ※2
入浴	—	—	38 ※2
洗濯	—	10 ※3	19 ※2
トイレ	—	14 ※2	14 ※2
その他	—	—	2 ※2
合計(q2)	3	33	100

※1: 成人の生命維持に必要な水分量 2ℓ～2.5ℓ/(日・人)に若干の余裕を加えた水量

※2: 「そこで、やってみました！ 節水実験」(国土交通省HP:

http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/tisiki/kassui/kassui_6.html)

より引用

※3: 衣類程度を手洗いするとして、上記文献の半分の量とした

③ 給水車による給水

【被害事例・課題】

- ・東日本大震災では、給水ライフラインの断水が長期にわたったため、受水槽が空になり、給水車により外部設置の受水槽に頻繁に給水を行い、施設での業務を継続した例が報告されている。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・受水槽が建物内部に設置される場合には、長期の断水に備えて給水車等による建物外部から受水槽への水の補給が容易となるように補給水ルートを確認する。
- ・受水槽の設置場所によっては、給水車から受水槽までの補給水ルートに配管抵抗や高低差による揚程が必要な場合があるので、その場合には常設の揚水ポンプ・給水ポンプを利用できるように仮設配管用バルブを常設ポンプに設ける工夫をする。

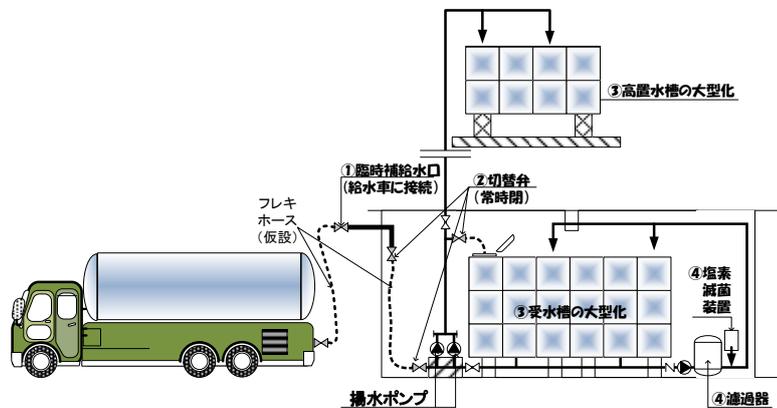


図 3-14 仮設給水ルートの確保のイメージ

3.3 補修性向上

敷地内あるいは施設内のインフラの被害により、都市インフラが復旧しても施設の運用に支障が生じる場合がある。また、施設インフラの被害が小さくとも、部品の調達や補修に困難が伴う場合も同様である。設備機器の選定には、部品調達が容易な汎用品を選定するとともに、機器の補修や部品交換・機器の入れ換え等が容易なように施設を計画することが重要である。以下に具体的な対策例を示す。

① 受変電設備

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・ 高圧遮断器など機器の定格を統一し、互換性を持たせる。
- ・ 高圧電力ヒューズや低圧ヒューズ類などの備品の準備は常にしておく。

② 発電機と燃料の調達

【被害事例・課題】

- ・ 商用電源停電時、非常用発電機稼動したが、点検後の再稼動しなかった事例があった。
- ・ 発電機への燃料供給は、自衛隊からの支給・ポリタンクを水面に浮かべてボートにて運搬・毎日燃料を運搬した事例があった。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・ 非常用発電機は長時間連続運転形とし、具体的な連続運転時間についてはメーカーにより違うので、確認する必要がある。長時間連続運転とは、定格出力での連続運転時間が1時間を超え必要な時間を運転する発電機のことであり40秒以内で電力供給する長時間形と10秒以内で電力供給する即時長時間形がある。
- ・ 発電機のエンジンの種類には、ディーゼル方式とガスタービン方式の2種類があり施設の特性により選定する。燃費効率を考慮する場合は、ディーゼル方式の方がガスタービン方式の約2倍で有利である。また、ディーゼル方式は耐震対策上有利である冷却水を必要としないラジエーター一体型を選定する。
- ・ 発電機の燃料種別では、A重油、軽油、灯油があり施設の特性により選定する。灯油は、ディーゼル方式の場合発電機の定格出力が低くなる。
- ・ 非常用発電機を手動停止運転するときの始動用バッテリーへの配慮など緊急時の運転マニュアルが必要である。
- ・ 燃料及び潤滑油の定期的な品質確認と必要に応じた油の交換が必要である。
- ・ 始動バッテリーの充電状態の点検と劣化時の交換が必要である。

③ その他

- ・メンテナンススペースの確保

設備機器や配管・配線等の日常のメンテナンススペースを十分に確保することは、災害時に速やかに設備被害の有無を確認するために重要である。人が立ち入って確認するためには 600mm のクリアランスが必要である。例えば、受水槽であれば受水槽六面体のすべてに 600mm の有効スペースを確保する必要がある。

- ・搬入経路の確保

設備機器の搬入スペースを確保することは、機器更新時の作業性を向上させるばかりでなく、災害後の復旧工事の迅速性・容易性に大きく影響する。標準機器も分割搬入ではなく製品形状のまま一体で搬入できれば現地での作業も最小化することができ、復旧工事の容易性が向上する。

- ・施工スペースの確保

設計時に施工スペースを十分確保することは、品質のよい施工が期待できるばかりでなく、災害後の復旧工事の迅速性・容易性に多く影響する。人が立ち入って作業するためには 600mm のクリアランス、小口径配管を手を入れて作業するだけの場合でも配管の隙間は 300mm が必要である。

- ・代替スペースの確保

設備機器更新用の代替スペースを確保することは、機器更新時の設備システム停止の時間を短縮するばかりでなく、設備機器が災害による損傷を受けた場合の機器更新工事の迅速性・容易性に大きく影響する。受変電機器や非常用発電機、給水ポンプ、重要室の空調屋外機等の主要な機械については代替スペースを確保することが望ましい。

- ・汎用品の使用

設備機器に汎用品を用いることは、常時の故障時や消耗部品交換時のコストや手配の容易性ばかりでなく、設備機器が災害による損傷を受けた場合の部品交換の迅速性・手配の容易性に大きく影響する。

3.4 仮設設備

電力や給水などの都市インフラの途絶が長期化した場合、あるいは施設内のインフラ設備が被害を受けた場合、施設を使用するには仮設の応急設備を設けて、都市インフラや施設内インフラ設備の復旧まで施設を利用することが考えられる。以下に具体的な対策例を示す。

① 移動電源車

【被害事例・課題】

- ・東日本大震災では、商用電源、自家発電設備の双方と電源供給不能になった事例がある。
- ・また、キュービクルが津波に流され、インフラは復旧したが、新たな製作に5ヶ月弱かかり、復電が遅れた事例がある。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・移動用電源車による商用電源の代替として供給可能としておく。
- ・移動用電源車は、高圧、低圧両方あり施設規模により電源の接続部の対応をする。また、開閉所などの接続部が浸水防止ラインの関係で2階以上の場合仮設ケーブルを最初から布設しておくことが望ましい。
- ・商用系、発電機系と代替系統が同一とならないようにインターロック対策をする。

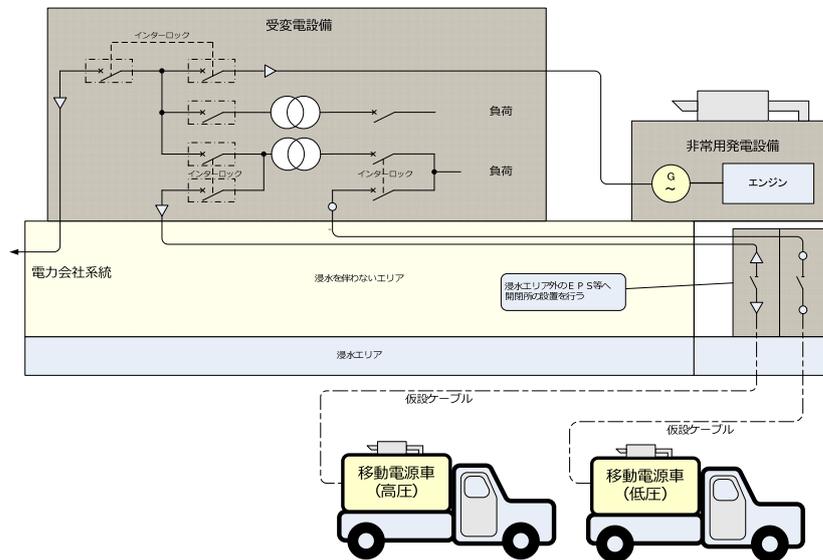


図 3-15 受変電設備バックアップ回路構成の事例

② 河川水利用

【被害事例・課題】

- ・東日本大震災では、給水ライフラインの断水が長期にわたったため、トイレ洗浄水が不足した例が報告されている。
- ・河川水などの比較的水質が劣る水源でも、トイレ洗浄水としての利用は可能な

め、非常時には水源として臨時に使用できる計画とする。

- ・災害時に建物近傍の河川水をトイレ洗浄水等に使用することで、給水ライフライン断水時のトイレ洗浄水を確保することができる。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・河川水を建物内に導入するために、河川に投げ込むフレキシブルな吸い込みホースや高揚程の仮設ポンプが必要となる。

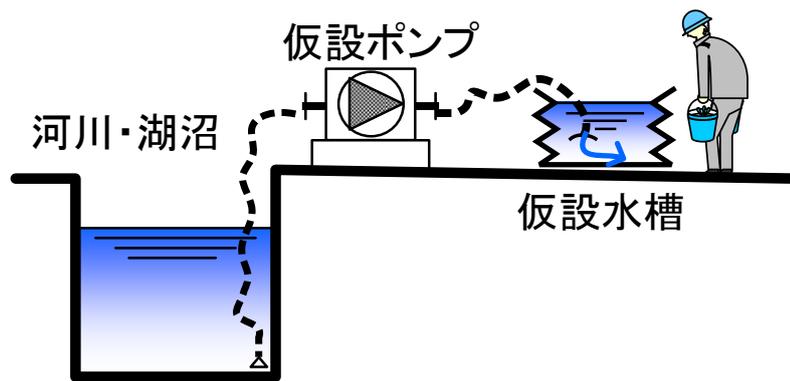


図 3-16 河川水利用のイメージ

3.5 非常用エレベーターの仮運転による物資運搬

【被害事例・課題】

- ・東日本大震災では、主に高層建物でシャフト内ロープの引っ掛かりの事例があり、エレベーターの復旧に長時間を要した例があった。
- ・エレベーターの復旧に長時間を要すると、建物内の人の移動に支障が生じる以上に食料や水などの物資の運搬にも大きな支障が生じることが問題である。

【設計・運用上の配慮事項等】

- ・エレベーターの本格復旧にはエレベーターの専門技術者の点検と補修が必要であり、大地震直後には非常に多くのエレベーターが停止していること、交通事情が悪化していることにより専門技術者による短期の復旧は期待できない。仮に短期で復旧したとしても、大地震直後には規模の大きな余震の発生が見込まれ、エレベーターが再度停止することも予想される。
- ・エレベーター設備に被害が察性した場合には、補修部品の入手に長時間を要することが予想される。
- ・エレベーターの本格復旧が短期に見込めない場合、エレベーター、特に停電時にも非常電源により運転が可能な非常用エレベーターを仮復旧し、人員が利用しない食料や水などの“物資の運搬のみ”に利用することが考えられる。

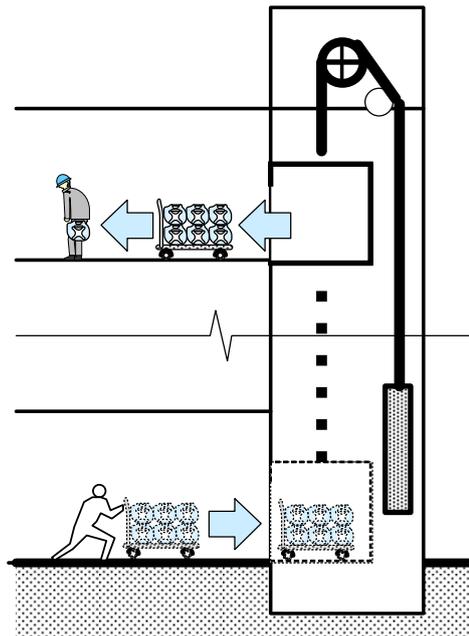


図 3-17 非常用エレベーターの物資運搬利用のイメージ

以下の対策を採用することにより、エレベーターの仮運転による物資輸送が可能となる可能性が高くなる。

・長尺物揺れ管制運転の採用

エレベーターには、建築物の固有周期での揺れの大きさや揺れの継続時間などによって、昇降路内で引っ掛かり被害が発生しやすいロープやテールコードなど長尺物が存

在するため、巻上機などの耐震性能向上とともにシャフト内突起物への引っ掛かり防止措置が重要である。

エレベーターの耐震性能の向上を図ることで、震災時の被害を軽減するとともに、震災後のエレベーターの復旧が迅速に行えるように、エレベーターのロープや制御ケーブルなどの長尺物の振れによる被害を軽減する長尺物揺れ管制運転を導入する。

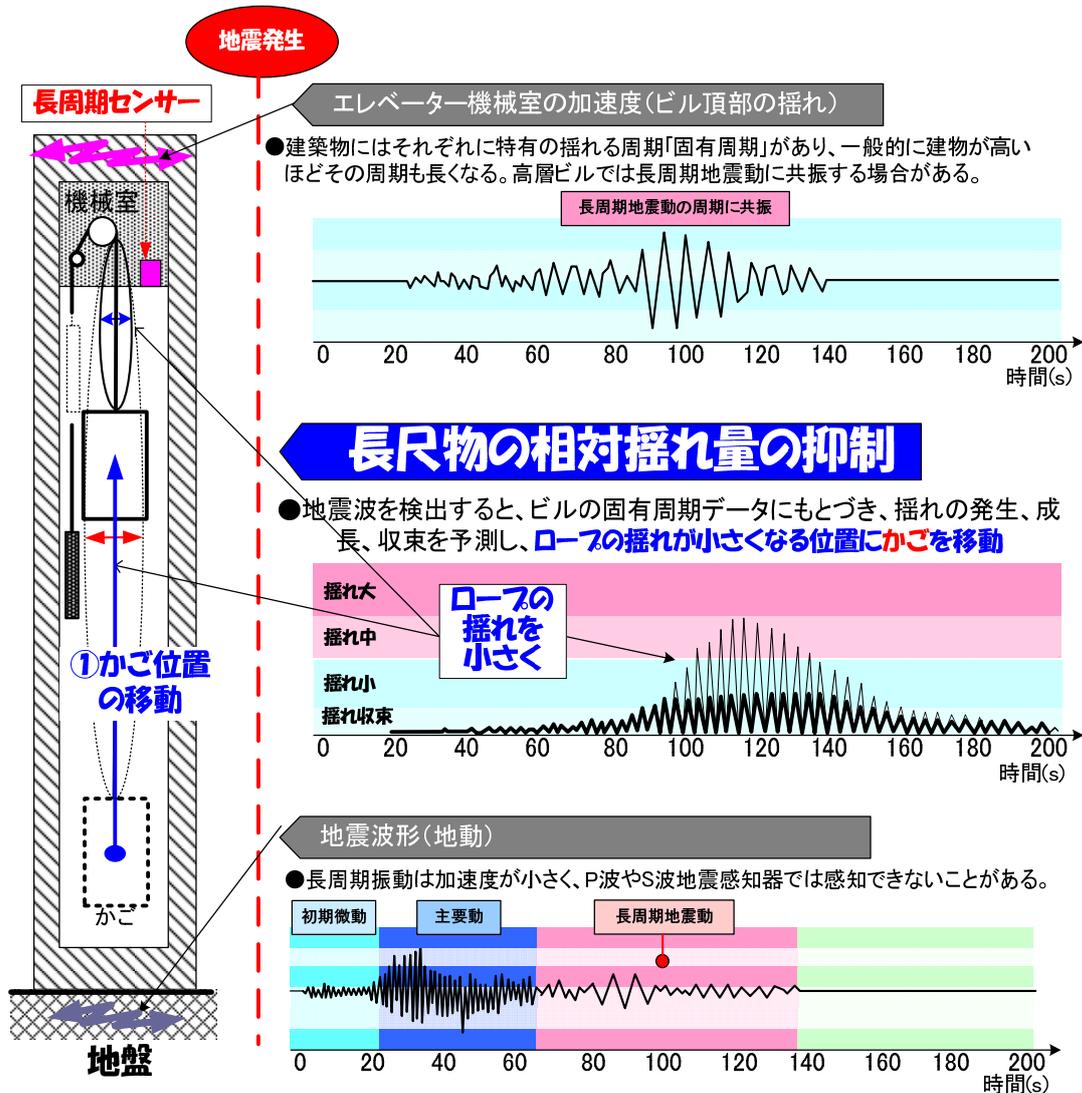
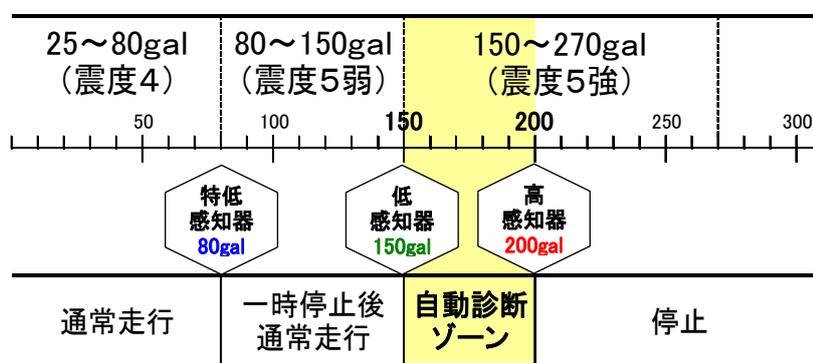


図 3-18 エレベーターの長周期振動対策(長尺物揺れ管制運転)の概要イメージ
(株日立製作所 HP <http://www.hitachi.co.jp/products/urban/em/elevator> を参考に新たに作図)

・自動診断仮復旧運転プログラムの採用

- ・地震後に早期の復旧が求められるエレベーターでは、地震時管制運転により一旦エレベーターが停止しても、専門技術者の点検を待たずに自動診断を行い、異常がない場合には自動的に仮復旧させる自動診断仮復旧運転の採用を検討する。
- ・自動診断仮復旧運転を付加することで、200 gal 程度までは自動的な仮復旧が可能となる（図 3-19）。ただし、あくまで仮復旧であり、専門技術者の点検後に本復旧となる。
- ・200gal 以上では、エレベーターに損傷が生じないことが前提だが、専門技術者の確認後の再運行が原則となるため、エレベーター管理会社と“優先点検・復旧”のための契約等についても確認することが望まれる。



(震度と gal の関係は目安である)

図 3-19 自動診断仮復旧運転プログラムのイメージ

(三菱ビルテクノサービス(株)HP <http://www.meltec.co.jp> の掲載図を参考に新たに作図)

4. 機能維持に有効な新技術

4.1 大災害におけるインフラの途絶に対応した防災型超々節水衛生設備システム

(1) システムの概要

国立研究開発法人 建築研究所の研究によって構築された「建築物の防災型超節水衛生設備システム」は、超々節水設備とこれに対応した給排水設備（急勾配排水設備、排水配管洗浄設備、排水再利用設備、雨水利用設備等）によって構成される^{1)~3)}。

通常の水洗便所と比較して1/20~1/10程度の洗浄水量しか必要とせず、屋外に排水する量が極めて少なくなるため、通常の水洗便所では困難な、雨水利用システム、オンサイト汚水処理技術（土壌処理、系統別最適処理等）の導入が非常に容易である点が特徴である。

(2) システムを構成する要素技術

①超々節水便器

通常の便器は、便器の表面を衛生的に保つためだけでなく、排水トラップ内の汚物を排出し、排水管内での搬送性を確保できる洗浄水量を設定しているため、多量の洗浄水を必要とすることとなる。

メーカーは、この汚物搬送性を確保しつつ、便器の節水化を進めてきた（図4-1）。

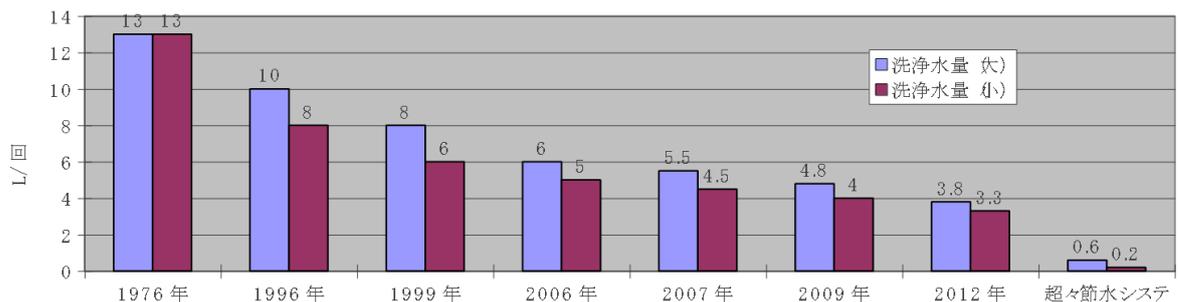


図4-1 水洗便器における節水化の現状

汚物搬送性を確保するため、洗浄水をポンプで加速する等の対策が講じられているが、現時点においては、洗浄水量4L程度が技術的な限界と考えられている。

一方、建築研究所が開発した防災型超節水衛生設備システムでは、便器を徹底的に節水化している（1~0.6L/回以下程度）。

このシステムでは、便器の表面を衛生的に洗浄できる水量を確保するとともに、封水式の排水トラップを設けず機械的な機構によって排水配管からの汚物、臭気、衛生害虫による被害を防止しつつ汚物を排水配管内に送り出し、排水管内の汚物搬送性については次項に示す給排水システムによって担保している。

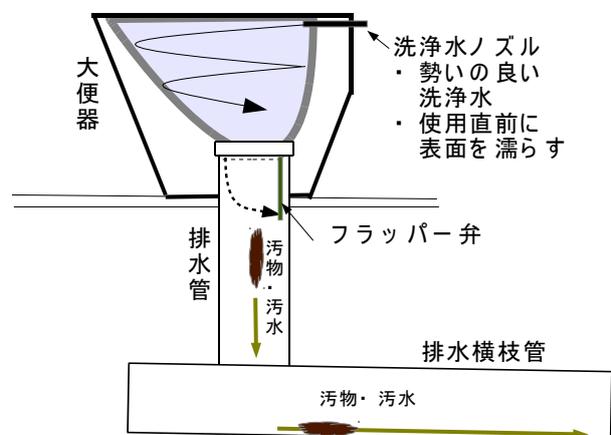


図4-2 超々節水大便器の構造（例）

この徹底的に節水化した便器を超々節水便器*としている。図 4-2 は、超々節水便器の一例を示したものであり、汚物の洗浄に必要な水量は 0.6L/回である。

このシステムでは、超々節水便器に対応した給排水設備との組み合わせが必須となるが、汚物の搬送性という機能を給排水設備に分担させることにより、大幅な節水化が可能となっている。

* 洗浄時に必要な洗浄水量を 1~0.6 L/回以下とすることができる便器を超々節水便器としている。平常時は多量の洗浄水を用いるよう運用することも可能であり、被災後の状況等に応じて、1~0.6L/回よりも更に節水して運用することが可能なシステムとすることも可能となる。

② 超々節水便器に対応した給排水設備

超々節水便器は、便器の洗浄水だけでは通常の排水設備では汚物搬送性を確保することが難しいため、次のいずれかの方法によって汚物搬送性を確保することとなる。

- ・超々節水便器の汚物搬送性に対応した少水量急勾配排水管（必要により、サイホン給水タンク、サイホン排水槽を組み合わせる）による給排水設備（図 4-3~4-4）
- ・ポンプによる排水配管洗浄方式を適用した排水設備

なお、排水配管における汚物の搬送性能を確保するためには、短時間に多量の水を搬送水として流す必要がある。

しかし、短時間に多量の水を流すだけのために、設備全体の容量が大きくなってしまいうのは不合理なので、上記のシステムではサイホンを有効に活用することによって、ポンプ容量等、設備をミニマムなものとするを可能としている。

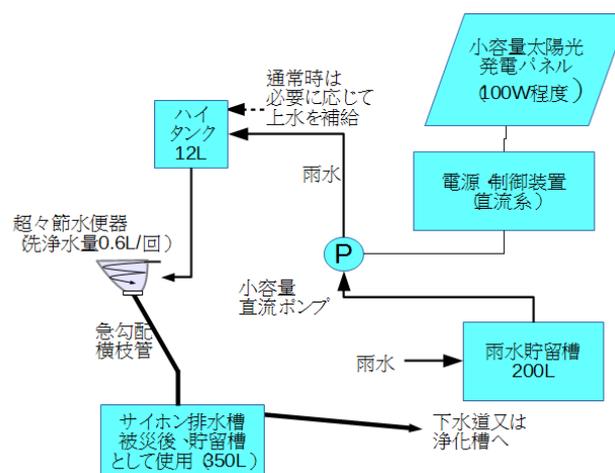


図 4-3 雨水を活用する防災型超々節水システム（戸建て住宅用）
（雨天・曇天時も運用可能）

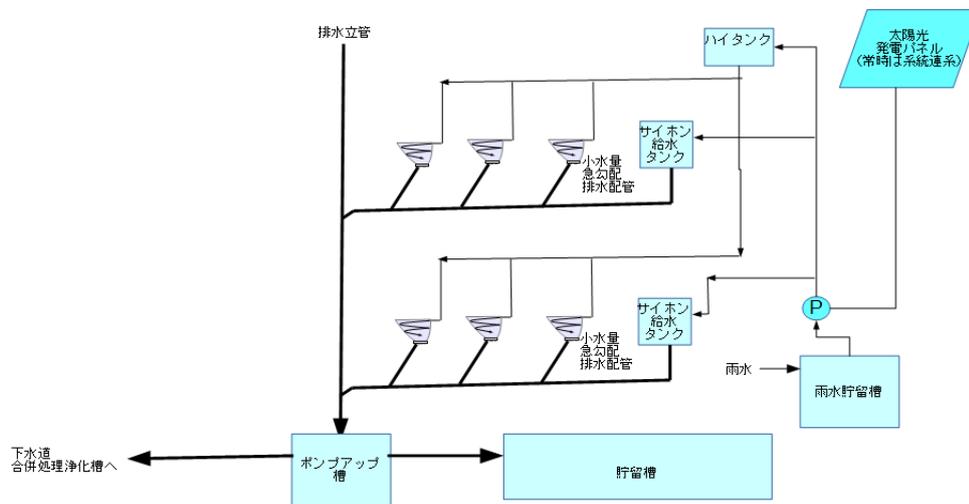


図 4-4 システムの構成例（防災用水源＋貯留型）
（雨天・曇天時も運用可能なシステム）

（3）雨水の有効活用と災害時対応性の向上

「雨水の利用の推進に関する法律」において「雨水の利用」とは、「雨水を一時的に貯留するための施設に貯留された雨水を水洗便所の用、散水の用その他の用途に使用すること」としており、国、地方公共団体、独立行政法人等は、「雨水の利用」に関して目標を設定し、その推進に務めることとされている。

しかし降雨は、水需要とは無関係に発生し、長期間にわたって雨が降らないことがある一方、短期間に相当量の降雨に見舞われることも珍しくないため、相当な容量の雨水貯留施設を設けなければ、雨水を有効に利用することは難しく、かつ、雨水の貯留能力限界まで雨水を貯留した場合には豪雨対策としての有効性が損なわれ、貯留量が少ない場合は有効利用が困難となる点が、雨水利用の B/C を検討する上での課題となっていた。

建築物を超節水化した場合、少量の雨水でも有効に機能する衛生システムの構築が容易となることから、結果として、このジレンマからある程度開放され、雨水の有効性が飛躍的に高まることとなる。

特に、長期間に渡る断水が想定される大規模災害時（南海トラフ巨大地震では、最大 2 ヶ月の上水途絶が想定されている）においては、超節水＋雨水利用は、被災後における LCP 実現のための有効な選択肢となる。

表 4-1 に、雨水を便器洗浄水として使用する戸建て住宅（4 人居住）を想定し、平常時における便器洗浄水に占める「雨水の比率」、被災により上水が途絶した場合における「被災後の使用可能日数」について試算した結果を示す（降水量は、2011 年つくば市におけるアメダスデータを使用）。

この試算では、戸建住宅において超々節水便器(洗浄水量 0.6L/回)を使用した場合には、200-300L 程度の雨水貯留槽でも非常に大きな便益（雨水の有効利用、防災性）が得られることが示されている。

一方、通常の節水便器（洗浄水量 5L/回）を使用した場合には、200L-300L 程度の雨水貯留槽では大きな便益を得ることができず、通常の水洗便器（洗浄水量 13L/回）を使用した場合には、3000L の雨水貯留槽を設けても、十分な防災上の便益が得られていないことが示されている。

表 4-1 防災型超々節水衛生設備システムにおける雨水利用効果（戸建住宅）

容積 便器の種別と水量	雨水貯留槽200L			雨水貯留槽300L			雨水貯留槽3000L		
	雨水の比率	被災後使用可能日数*1	被災後使用可能日数*2	雨水の比率	被災後使用可能日数*1	被災後使用可能日数*2	雨水の比率	被災後使用可能日数*1	被災後使用可能日数*2
通常の水洗便器 (洗浄水量13L/回、200L/日)	12.4%	1.5	1.9	17.1%	2.3	2.8	58.9%	22.5	30.1
超節水便器 (洗浄水量5L/回、80L/日)	28.7%	3.8	4.8	36.0%	5.6	7.3	87.8%	56.3	92.6
超々節水便器 (洗浄水量0.6L/回、12L/日)	77.8%	25.0	39.6	85.9%	37.5	62.3	100.0%	365.0	365.0

*1 は、次の①、②及び③条件の下に算定。 *2は、次の①、②及び③' の条件の下に算定。

- ①被災後、洗浄水量は1/3まで削減して運用 ②雨水貯留槽の半分は非常用水とし、常時は不使用
- ③被災後の降水を評価し、最短の日数を計算
- ③' 被災後の降水を評価し、平均使用可能日数を計算

c. 茅場町計画（フロア完結型二層吹抜自然換気システム）

各フロア端部に吹抜け空間を設けることで、意図的に熱溜まりを形成し温度差を換気動力とした自然換気を行う。外気取入部は前面開口部サッシと組み合わせた機構とし外気排気部は圧力バランス窓による成り行き排気とし、フロア完結とすることで、他フロアへの影響がなくなり、自然換気意識の向上(=使用頻度増)を図る。

d. 東京ガス平沼ビル建替プロジェクト（自然エネルギーの積極利用）

1. 吹き抜け空間の採用による自然採光と自然換気
2. ライトシェルフ
3. 屋上および西側壁面の緑化・テラコッタルーバー

e. 阿南市新庁舎（グリーンボイド自然換気）

自然換気は各階窓台の換気口から取り入れ、中間期の日中および夜間に、頂部に熱溜りを持つグリーンボイドから重力換気により排気する。グリーンボイドは南に面した全面ガラスボイドとして換気効果を高めている。またシーリングファンの気流感を付加することで快適性を補って自然換気期間を拡張し、熱源と空調機を運転せずに冷房負荷を処理できる期間を長くする制御を行い、中間期の省 CO2 を実現する。自然換気とシーリングファン、機械空調のハイブリッド空調により可能な限りエネルギー消費を抑制する空調システムとして、制御ロジックを構築している。

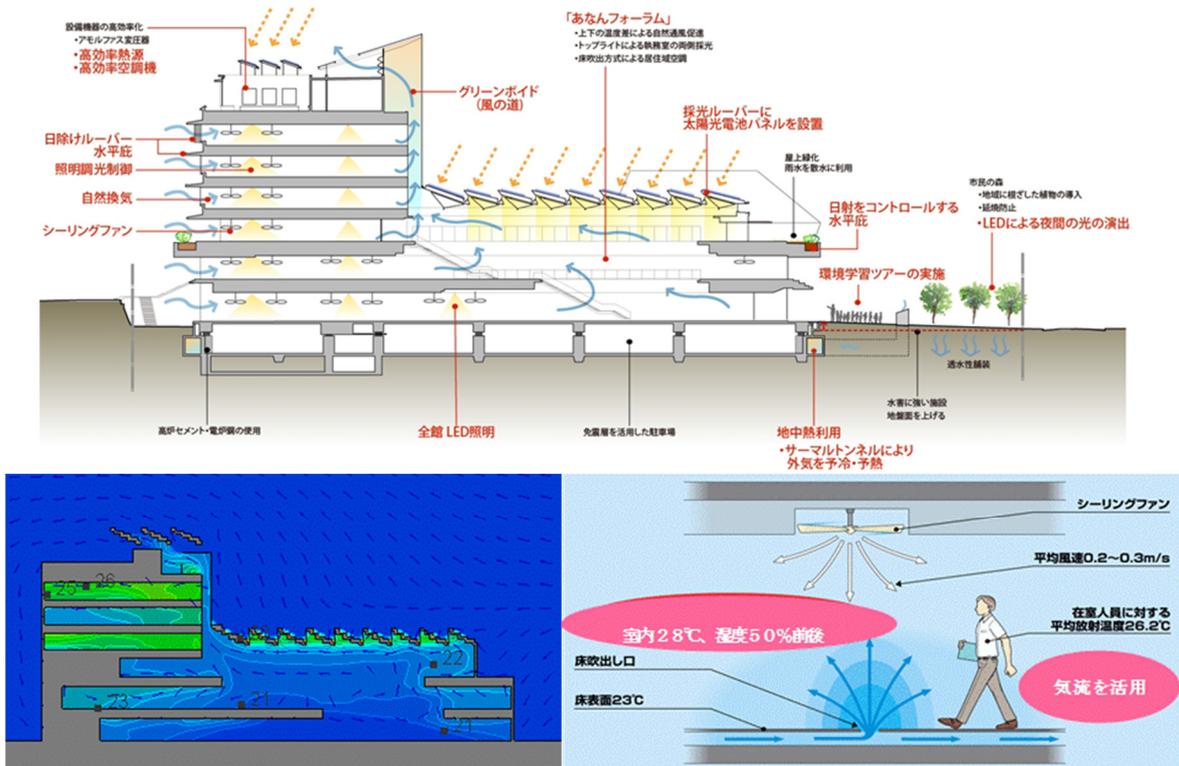


図 4-7 グリーンボイド自然換気、シーリングファン併用 概念図⁷⁾

(2) 自然採光

自然採光は、災害に伴うインフラ電力途絶時に電力がなくとも、施設内の照度環境を執務可能な状態に維持することが期待できる。

a. TODA Building（光ダクトによる自然光活用）

屋上の採光部から採り込んだ自然光を垂直方向に引込み、6階天井裏にて水平に展開し、窓のないELVホールの天井面から放光することで、自然光を他のエネルギーに変換せずにそのまま照明光源として利用する。

(3) 太陽光発電・風力発電

太陽光発電は、災害に伴うインフラ電力途絶時に館内に電力が供給できる

a. 北里大学病院（太陽光発電＋直流給電）

太陽光パネルが発電した直流電力を交流に変換することなく、そのままLED照明に給電する「直流給電」を実用化し、変換損損失を低減する



図 4-8 太陽光発電＋直流給電 概念図⁵⁾

b. 三谷産業グループ新社屋（トリプル発電＋蓄電池）

太陽光発電システムと風力発電システム、燃料電池による発電電力を蓄電池に蓄電し、ビル消費電力に利用するとともに非常用電源としての機能をもたせ、事務所ビル内の安全性能向上と快適性向上に寄与させる。これらの発電・蓄電機器は系統連係とし、電力需要側でのスマートグリッドのネットワーク化構想も視野に入れて使用状況の監視と運用改善を行う。

(4) 井水・地下水熱利用

井水・地下水熱利用は、災害に伴うインフラ電力途絶時に空調熱源が停止しても、施設内の空気の予熱予冷が期待できる。

a. 北里大学（共同溝クールヒートトンネル＋井水熱利用）

建物間を繋ぐ共同溝をクールヒートトンネルとし、取入れ外気を雑用水利用する井水熱でさらに予冷・予熱を行い、外気負荷を削減する。

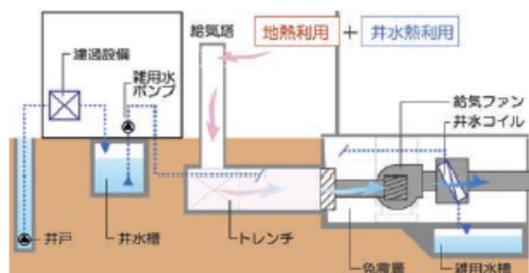


図 4-9 太陽光発電＋直流給電 概念図⁵⁾

d. 電算新本社（井水の最大限活用による空調負荷低減）

長野の豊富な地下水を活かし、熱源エネルギーを使わずに放射冷房を行う。井水熱源ヒートポンプ、冬季融雪として利用した後、雑用水の水源として井水を多段階に最大限利用する。また、低温再生型デシカントにより、井水ヒートポンプからの空調排熱を利用してローターを再生し除湿を行う。

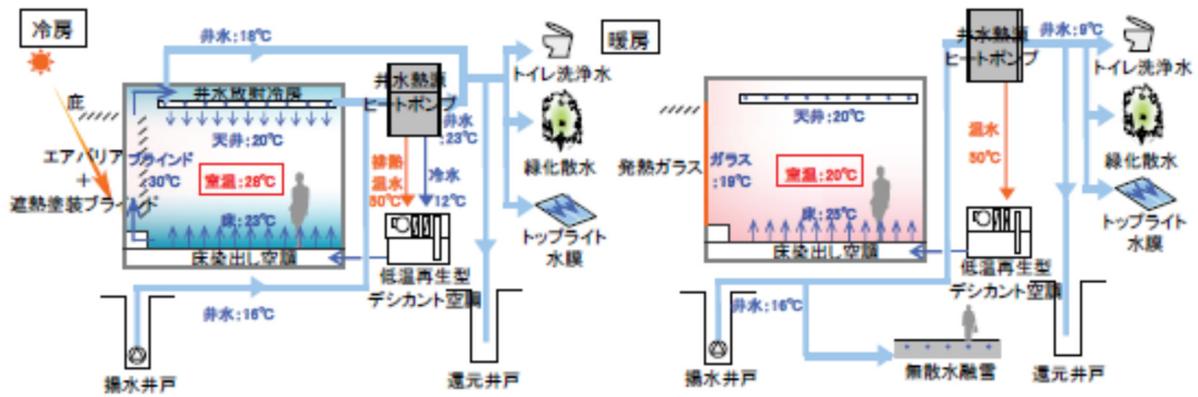


図 4-11 井水の最大限活用による空調負荷低減 概念図⁵⁾

e. 北九州総合病院（井水・雨水の雑用水利用）

井水・雨水を雑用水として利用し、上水利用を削減する。また、備蓄水槽確保に加え、非常時の水道破断に備えて敷地内に井戸を 2 本掘削し、屋根面に振った雨水とともにろ過の上雑用水として利用することで水源の多重化を図る。

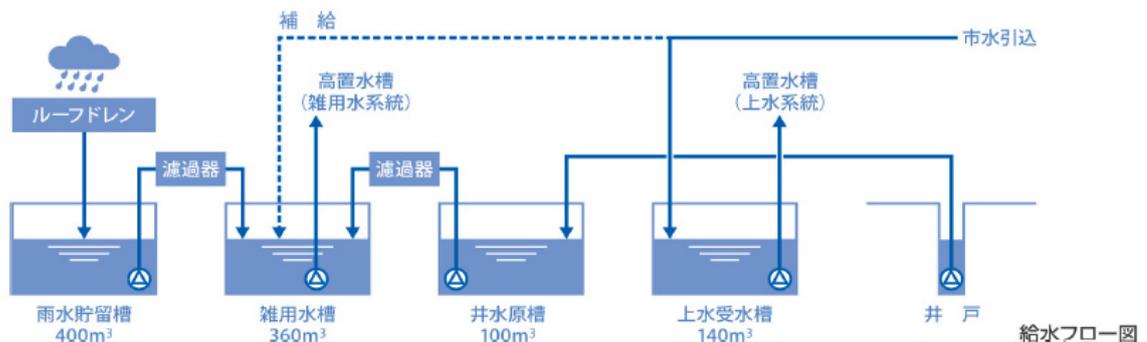


図 4-12 井水・雨水の雑用水利用 概念図¹⁰⁾

f. 塚鉄砲町地区（下水処理水の 2 次利用）

下水処理水は 2 次利用として、膜処理装置を介した上でトイレ等の雑用水に活用し、水道水の使用を最小化する。また、耐震受水槽によって地震時の水の確保を強化し、地域住民に貢献するなど、災害時の水資源の活用も図る。

(5) 日射遮蔽

日射遮蔽は、災害に伴うインフラ電力途絶時の空調熱源停止時にも、日射による執務空間の温度上昇を最小限にとどめるものである。

a. 京橋三丁目1地区（パッシブ手法とアクティブ手法を併用したハイブリッド外装）

環境負荷低減のパッシブとアクティブ手法を複数組み合わせ合わせた外装である。特徴的な点は、超高層テナントビルでは類例の無い1.8mもの彫りの深い庇である。日射遮蔽と眺望の両立を図るとともに、庇上部は外壁のメンテナンス歩廊を兼ねる計画となっており、メンテナンスのしやすさを考慮することで建物の長寿命化を期待している。なお、太陽高度の低い西日などは庇では防ぐことができないが、Low-E 複層ガラスと太陽光追尾電動ブラインドを併用することで、熱負荷低減を強化する。

b. 大伝馬ビル（庇+Low-E ペアガラス+木製ブラインドによる日射遮蔽外装）

水平庇とアウトフレームのPC柱を利用し日射遮蔽（北西面）を期待した計画である。窓面には表面温度が低く、視的快適性の高い木製ブラインドと日射遮蔽効果の高いLow-E ペアガラスを使用することにより、快適かつ日射遮蔽効果を期待した外装となっている。

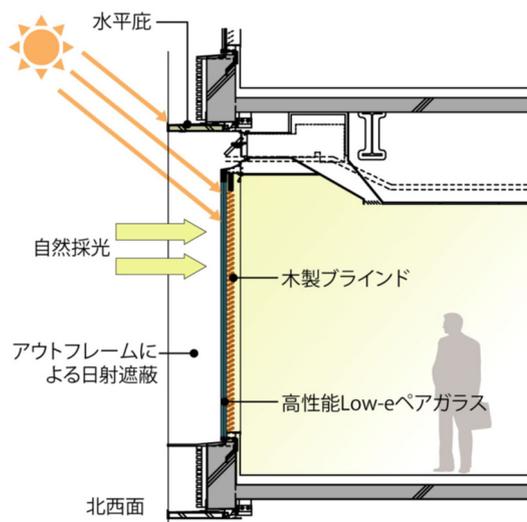


図 4-13 日射遮蔽外装 概念図⁵⁾

(6) クールヒートトレンチ

クールヒートトレンチは、災害に伴うインフラ電力途絶時にも、供給外気の予冷予熱が期待できる。

a. 佐久総合病院（クールヒートトレンチ+エコシャフトによる外気の予冷・予熱）

クールヒートトレンチを介して外気を病室へ導入し、地熱による予冷・予熱効果により、外気導入にかかる消費エネルギーを削減する。またクールヒートトレンチを“エコシャフト”と呼ばれるガラスシャフトと繋げ、冬期はこのエコシャフト上部から太陽熱を集熱することにより、さらなる予熱を行う。

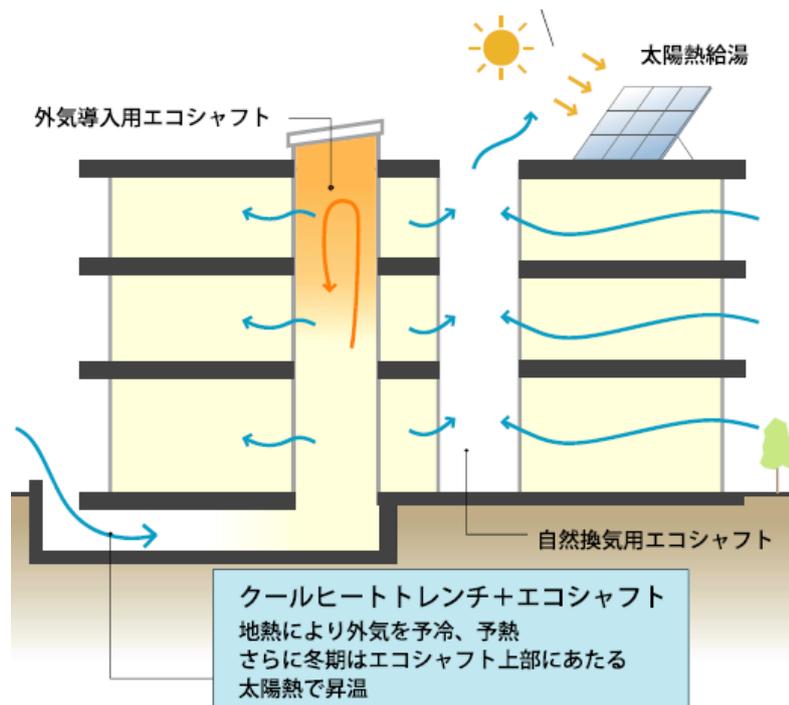


図 4-14 クールヒートトレンチ+エコシャフトによる外気の予冷・予熱効果 概念図⁵⁾

(7) コージェネレーション

コージェネレーションは、災害に伴うインフラ電力途絶時に施設内へ電力と温熱が供給できるものである

a. イオン大阪ドーム SC（防災兼用コージェネレーション）

分散型エネルギーシステムである防災兼用コージェネにより建物ピーク電力負荷の約40%を削減し、発電時に発生する排熱を排熱投入ナチュラルチャラーにて有効活用する。災害時には、コージェネ発電機により防災負荷・重要負荷の電源を確保することができる。

b. 芝浦二丁目計画（エネルギー自立と地域の防災拠点）

エネルギー自立の取り組みとして、中圧ガス管を利用したコージェネレーションと72時間対応した油焚非常用発電機によって、平常時のピーク電力の50%の電力を供給する。系統電力が断絶した非常時には、コージェネレーションと3建物の一括受電による建物間配電網を活用し、電力融通を行うことで街区の生活・業務継続性を向上させる。また、給排水は、72時間分の貯水と緊急排水槽を確保している。地域の防災拠点としては、港区と防災協定を締結し、地域防災備蓄倉庫を設置するとともに、オープンスペースを提供して帰宅困難者対策支援を行う。

c. 北九州総合病院（自立型熱源システム）

電力とガスをエネルギー源とする高効率熱源設備で構成し、コージェネレーションの排熱、太陽熱集熱の熱を、ガス熱源設備の冷水製造や暖房温水製造に利用するとともに給湯にも多段階に利用し、無駄なく使いきるカスケード利用システムとする。また、非常時には、備蓄燃料（油）によって稼働する蒸気ボイラーと非常用発電機のほかに、非常用発電機の電力によって運転可能な高効率空冷冷凍機を設置することで電力、給湯、空調を確保する。

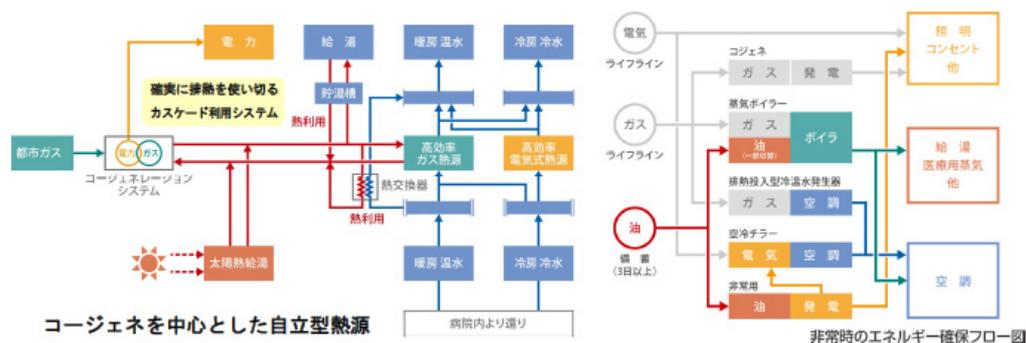


図 4-15 エネルギー自立と地域の防災拠点 概念図¹¹⁾

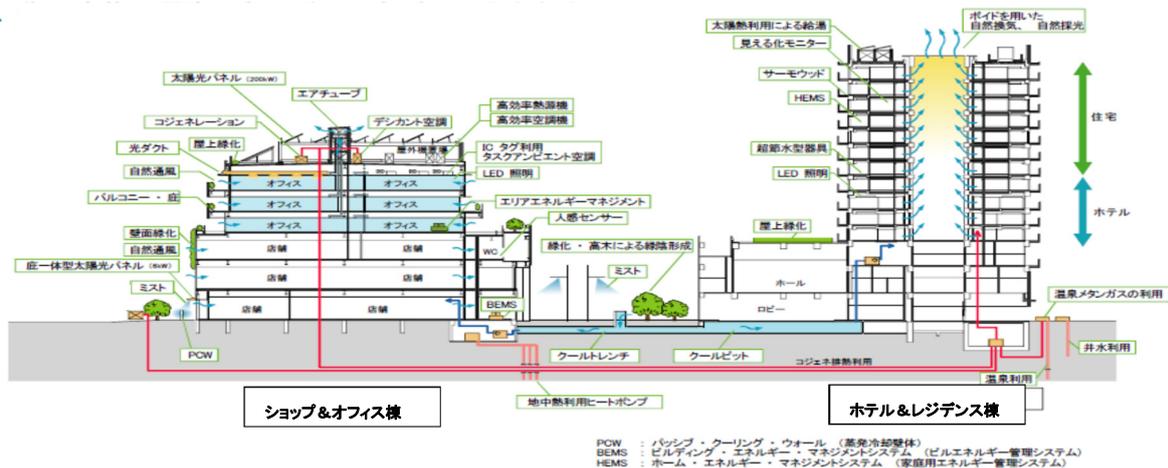
d. 常翔学園（災害レベルに応じた電力供給系統連系システム）

地域の防災拠点となるべく、低層部帰宅困難者受け入れ対応施設とし、地中熱や自然換気など自然エネルギーを積極的に活用することで、非常時には建物を持続的に維持可能な計画とする。特に電力供給は、信頼性の高い2回線別変電所受電とする平常時から、停電時（レベル1）、都市ガス停止時（レベル2）、非常用発電機停止時（レベル3）の災害レベルを想定し、コージェネレーション・非常用発電・太陽光発電・蓄電池を組み合わせた災害レベルの段階に応じた系統連系を構築する。太陽光発電の蓄電池は、モード切替スイッチにて、平常時は高層階、災害時はレベル分けに応じて低層階避難エリアの電力供給に活用する。

(8) その他

a. 柏の葉キャンパスシティプロジェクト 148 駅前街区新築工事

- ①太陽光発電: ショップ&オフィス棟の屋上に 200kW の太陽光発電を設置する。また、6kW の庇太陽光発電を設置する。
- ②光ダクトシステム: ショップ&オフィス棟 6 階オフィス部分の南側全体に光ダクトシステムを設置し、照明電力消費量を削減させる。
- ③コジェネレーションシステム: ガスコジェネレーションシステム 25kW×4 台を設置し、排熱はアコモデーション棟の給湯やショップ&オフィス棟の 6 階部デシカント空調に利用する。
- ④クールチューブ: ショップ&オフィス棟の商業部分の一部とホテル&レジデンス棟ホテル部分の一部でクールチューブによる外気を取り入れ、地中熱利用を行うことで外気負荷削減を図る。
- ⑤太陽熱給湯器: ホテル&レジデンス棟の屋上に太陽集熱パネルを設置し、太陽熱給湯システムによる給湯負荷の削減を図る。



b. 柏の葉キャンパスシティプロジェクト 148 駅前街区新築工事

中層建物の内部に配された大規模なボイドと、ボイドを中心に 1/4 フロアずつスキップしながらスパイラル状に連続する「メガスパイラルオフィス」である。本建物は、建築・設備計画の融合を図った環境装置として徹底した省 CO₂を図ると共に、自然との「交感」によって感性が豊かになった働く人々のコミュニケーションの活性化・プロダクティビティの向上を実現する。

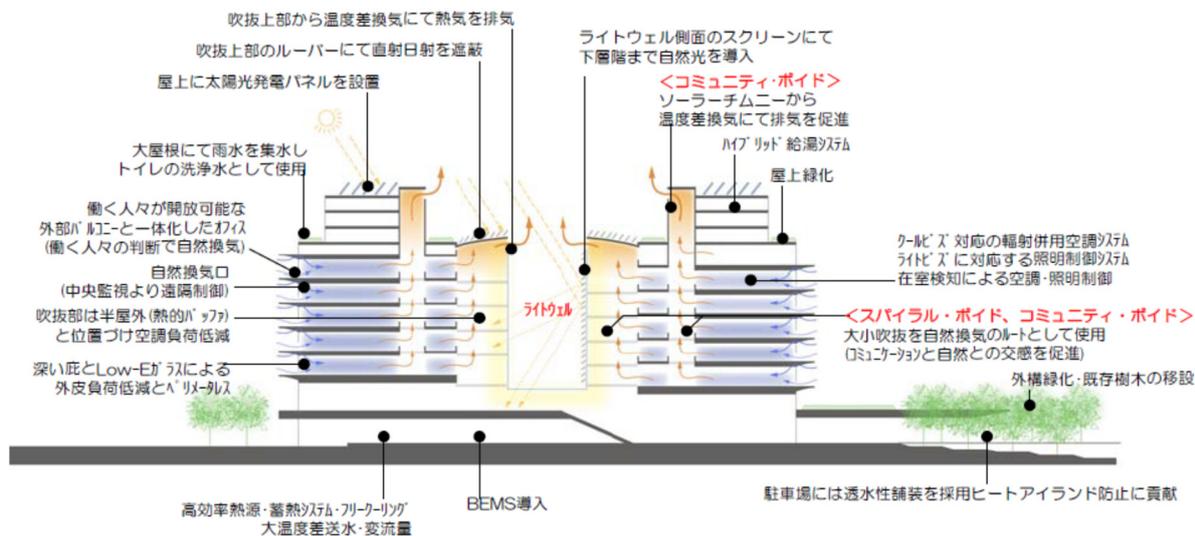


図 4-17 採用新技術イメージ 概念図⁸⁾

c. 東京経済大学（環境配慮型ファサード）

ライトシェルフ、自然風力換気窓、日射遮蔽用袖壁を組み込んだ外装システム、エキスパンドメタルによる遮光ルーバーと緑化ルーバーによる外装システム、エコボイドと日射を制御する木製ルーバーの組み合わせによるインナースキンの 3 つの周辺環境と共生した「エコスキン」による外皮・内皮の形成による熱負荷低減策。

d. 新潟日報社新社屋メディアシップ

① 自然痛風

ダブルスキンとサイドフィン形状（エアウィング）を利用した自然痛風システム

② 太陽光発電

30 kW 相当のシースルー太陽光発電パネルと多結晶型太陽光発電システム

③ 雨水利用

屋根に降った雨水を地下ピットに貯留し便所洗浄水や植栽散水に利用

e. イオンモール沖縄ライカム（省 CO₂ と防災機能を兼備した街づくりプロジェクト）

基地返還跡地における省 CO₂ と地域防災機能の向上を目指すプロジェクト。大型商業施設へのエネルギーサービスとして、LNG サテライトからの天然ガスを活用したコージェネレー

ションと省 CO2 熱源システムを導入し、周辺施設を含めたエネルギー供給者と利用者、自治体による省 CO2 推進協議会にて地域のエネルギーマネジメントを進める。また、災害時にはコージェネレーションによる BCP 電源を確保し、物流・避難拠点となる大型商業施設の機能を保持するとともに、電源の一部を隣接する災害復旧拠点施設にも融通し、地域防災の機能の向上を図る。

参考文献

- 1) Development of Hyper-Water-Saving System Corresponding to Large-Scale Disaster (CIBW062 Symposium 2015)
- 2) これからの建築防災に必要な視点(国連防災世界会議パブリックフォーラム「建築防災シンポジウム-拠点建築物の機能維持-」、2015)
- 3) 建築物の超節水化技術の開発と途上国展開(建築研究所講演会, 2015)
- 4) 住宅・建築物省 CO2 推進モデル事業(第 7 回)の報告 平成 23 年 10 月 12 日
(独)建築研究所、(一社) 日本サステナブル建築協会
(<http://www.kenken.go.jp/shouco2/past/symposium7.html>)
- 5) 住宅・建築物省 CO2 推進モデル事業(第 8 回)の報告 平成 24 年 2 月 3 日
(独)建築研究所、(一社) 日本サステナブル建築協会
(<http://www.kenken.go.jp/shouco2/past/symposium8.html>)
- 6) 住宅・建築物省 CO2 推進モデル事業(第 9 回)の報告 平成 24 年 3 月 13 日
(独)建築研究所、(一社) 日本サステナブル建築協会
(<http://www.kenken.go.jp/shouco2/past/symposium9.html>)
- 7) 住宅・建築物省 CO2 推進モデル事業(第 10 回)の報告 平成 24 年 8 月 23 日
(独)建築研究所、(一社) 日本サステナブル建築協会
(<http://www.kenken.go.jp/shouco2/past/symposium10.html>)
- 8) 住宅・建築物省 CO2 推進モデル事業(第 11 回)の報告 平成 25 年 1 月 23 日
(独)建築研究所、(一社) 日本サステナブル建築協会
(<http://www.kenken.go.jp/shouco2/past/symposium11.html>)
- 9) 住宅・建築物省 CO2 推進モデル事業(第 12 回)の報告 平成 25 年 10 月 4 日
(独)建築研究所、(一社) 日本サステナブル建築協会
(<http://www.kenken.go.jp/shouco2/past/symposium12.html>)
- 10) 住宅・建築物省 CO2 推進モデル事業(第 13 回)の報告 平成 26 年 2 月 14 日
(独)建築研究所、(一社) 日本サステナブル建築協会
(<http://www.kenken.go.jp/shouco2/past/symposium13.html>)
- 11) 住宅・建築物省 CO2 推進モデル事業(第 14 回)の報告 平成 26 年 10 月 9 日
(独)建築研究所、(一社) 日本サステナブル建築協会
(<http://www.kenken.go.jp/shouco2/past/symposium14.html>)

