論文　津波作用荷重による建築物の基礎抵抗性状に関する検討

壁谷澤　寿一[*1]・福山　洋[*2]・加藤　博人[*3]・田尻　清太郎[*4]

要旨：津波荷重に対する建築物の基礎破壊メカニズムを検証することを目的として，東日本大震災による津波で被災し，上部構造および基礎の詳細情報が得られた鉄筋コンクリート造建築物 3 棟について基礎転倒および滑動に関する解析的な検討を行った。津波荷重は現地調査結果から推定された流速に基づき静水圧荷重とし，開口に応じた波力低減効果を考慮した。杭引抜き耐力は PC 鋼線の引張破断強度から算定し，浮力は開口上端から天井までの空気体積分を考慮した。本検討により浸水深，開口，杭，浮力，土圧等の影響因子を適切に考慮することで津波による建築物基礎被害を評価しうることを示した。

キーワード：東日本大震災，津波，鉄筋コンクリート造建築物，基礎転倒，浮力

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では津波により東北地方沿岸部の一部地域では 10m を超える非常に大きな浸水深が計測され [1)]，同地域の建築物では木造のみならず，鉄筋コンクリート造や鉄骨造においても層崩壊や転倒等の甚大な構造被害が確認されている。

独立行政法人 建築研究所および国土交通省 国土技術政策総合研究所は地震発生後 3 週間後から合計 3 回に及ぶ津波被害調査(初動調査)を実施した。調査は合計約 80 棟の建築物および工作物を対象とし，(1)津波被害事例の収集，(2) 浸水深の計測，(3)建築物の形状や配筋といった構造詳細の把握を目的としている。これらの調査結果については東北地方太平洋沖地震 被害調査報告書(速報)として公開されている [1)]。

また，建築研究所は建築基準整備促進事業において津波避難ビル等の構造設計法等の検討委員会(委員長：東京大学生産研究所 中埜 良昭教授)において，計測された浸水深と倒壊・残存した構造物の耐力の関係から，構造物に作用した津波作用荷重を推定し，津波避難ビル等の建築物の耐津波設計等に資する検討を行ってきた。検討結果は中間報告書として取りまとめられ [2)]，津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る技術的助言に反映されている [3)]。また，検討結果の一部については既報 [4)] で紹介されている。

本稿では現地調査を行った建築物の中で基礎の情報が得られた鉄筋コンクリート造建築物について転倒に関する詳細な解析的検討を行った結果について示す。建築物の転倒抵抗耐力については構造図面や実測値などに基づき，杭や浮力の影響を考慮している。また，本検討は強震動により構造物は無被害であることを前提とした。

2. 東日本大震災における津波による建築物の転倒

東日本大震災において津波により建築物が移動または転倒する事例が 4 階建てまでの建築物において確認された。移動や転倒した建築物は直接基礎が多いが，杭基礎が引き抜かれている事例も見られた。これらの杭は杭径 300mm の既成 PC 杭であった。また，同規模の建築物で比較すると開口が少ないものに転倒が多く見られたことから，開口が転倒に大きく影響したと考えられる。

また，木床を有する建築物やコンクリートブロック造建築物などでは比較的低い浸水深でも転倒被害が確認されている。

写真－1　津波による鉄筋コンクリート造建築物の転倒

3. 基礎抵抗性状に対する検討方法

3.1 津波荷重の算定方法

2005 年に内閣府から示された「津波避難ビル等に係るガイドライン [5)]」(図-1)では，設計用浸水深の 3 倍の静

*1 独立行政法人 建築研究所 構造研究グループ 研究員　博士(工学)　(正会員)
*2 独立行政法人 建築研究所 構造研究グループ 上席研究員　博士(工学)　(正会員)
*3 独立行政法人 建築研究所 構造研究グループ 主任研究員　(正会員)
*4 独立行政法人 建築研究所 構造研究グループ 主任研究員　博士(工学)　(正会員)

水圧荷重 Ps を与えている(式(1))。

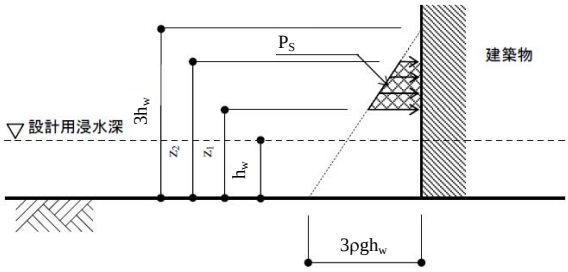

図-1 津波避難ビルガイドラインの設計用津波荷重

$$P_S = B\int_0^h (\rho g(3h_w - z))\,dz \qquad (kN) \qquad (1)$$

ここで，B: 建築物幅(m)，ρ :水密度(ton/m^3)，g :重力加速度(m/s^2)，h_w: 設計用浸水深(m)，h: 設計用浸水深(m)の 3 倍($3h_w$)または建築物高さのうち小さい値とする。

しかし，式(1)で静水圧の浸水深に乗じている「係数 3」は建築物に作用する津波荷重は流速や衝撃力により最大限大きくなることを想定した値であり，建築物に作用する津波荷重は浸水深のみならず流速により変化する。前述した静止中の物体に生じる水圧(静水圧)に対して，流体中の物体に作用する荷重(抗力)P_F は式(2)で表される。

$$P_F = B\int_0^{h0} (0.5 C_d\, \rho v^2)\,dz \qquad (kN) \qquad (2)$$

ここで，h0: 設計用浸水深または建築物高さのうち小さい値，C_d: 抗力係数(ここでは，建築物は流体中における角柱と同様とし 2.0 とする), v:平均的な流速(m/s)とする。

また，津波の流勢は長波伝播速度($\sqrt{gh_w}$)に対する流速(v)の比であるフルード数 Fr によって示される。式(1)および式(2)の比較より，浸水深が建築物高さを上回らない範囲では抗力は浸水深にフルード数 Fr と 1.4 を乗じた高さの静水圧と等しい荷重を与える。

図-2 に本震災の津波被害調査地域において建築物の背面で計測された浸水深と流速の関係を示す。津波の流速は松冨により提案されている建築物の前面と背面の浸水深に基づく推定式[6] (式(3))を用いた。なお，建築物の前面および背面の浸水深は東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの計測値[7]を使用している。

$$v = C_v\sqrt{2g(h_f - h_b)} \qquad (m/s) \qquad (3)$$

ここで，h_f: 建築物前面の浸水深(m)，h_b: 建築物背面の浸水深(m)，C_v: 流速係数(ここでは 1.0 と仮定)とする。

本検討より東日本震災の津波において，浸水深の低い地域では大きなフルード数が観測されているもの，鉄筋コンクリート造建築物の転倒被害が確認されている浸水深 10m 以上の地域では陸上を遡上する津波のフルード数が概ね 0.7 程度であった。したがって，本稿における津波作用荷重はこれに対応する値として浸水深の静水圧荷重(0.7×1.4≒1.0)を仮定した。

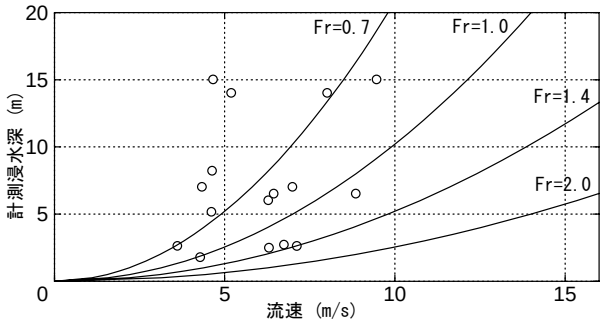

図-2 現地調査地域における津波の浸水深と流速

以下の検討では津波荷重によって生じる転倒モーメントと被災した建築物の抵抗モーメントの比率について示す。また，建築物に作用する荷重は抗力型の外力分布(等分布)も考えられるが, 既往の模型実験結果[8]や衝撃力を考慮して転倒の検討についても静水圧分布を仮定している。また，津波荷重は直接作用する構面の開口による波力低減効果を考慮し，立面に対する開口面積の割合だけ作用荷重を低減させている。転倒の回転中心は津波作用面反対側の基礎底部とした。建築物の転倒抵抗力としては自重および杭引抜き耐力とし，浮力による転倒モーメントも考慮している(**図-3** 参照)。

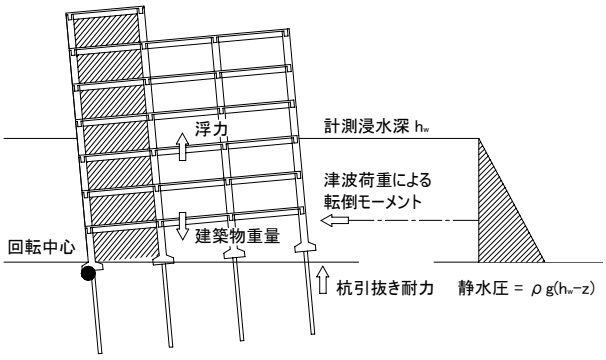

図-3 建築物転倒に関する考え方

3.2 浮力の算定方法

浮力は建築物内部に水が流入しない場合は浸水している建築物容積に相当するが, 4.3 節で後述するように建築物の被害調査において完全に水没した直接基礎の建築物が転倒していない事例が確認されたことを考慮すると, 本仮定は明らかに過大な浮力の評価となっている。そこで，本稿では水の流入を考慮した浮力の算定を行った。

現地被害調査において残存した建築物内部には梁下または垂壁高さ位置に水跡が確認されており(**写真－2**), これより上には空気が残留していたと考えられる。したがって，開口上端から天井までの部分の空気体積に相当する浮力は考慮する。

本検討では上記以外の建築物容積については水が流入することにより浮力は発生しないとした。厳密には建築物が津波荷重作用面および側面に有する開口面積と津波の水位上昇速度から，津波が最大浸水深に達する前に建築物内部に水が充満していることを確認する必要があるが，映像記録等から今回の震災では水位上昇が非常に遅かったこと [9]を考慮して水がすでに流入していると仮定した。なお，開口からの水の流入により最大浸水深に達する前に建築物内部に水が充満していることは，トリチェリの定理に基づいた流入速度を仮定する検討方法により確認することができる [2]。

写真－2 残存建築物の垂壁に残留する水跡

3.3 杭引張耐力およびせん断耐力の算定方法

杭引張抵抗力は杭周面摩擦力および引張鉄筋破断強度のいずれか小さい方の値とした。4.1 節および 4.2 節で検討している転倒被害が生じた杭基礎建築物 2 棟はいずれも宮城県女川町に所在し，付近の公共建築物において標準貫入試験結果(N 値)が得られている。ボーリング調査は合計 8 点で実施されている。対象建築物は一部埋め立て地に立地しており，基盤深度が深くなっている部分(調査点 4 点)では約 10m 程度まで概ね N 値が 10 以下となっている。一方，基盤深度が浅くなっている部分(調査点 4 点)では表層から砂質土の N 値が 20～30 程度となっている(**表－1** 参照)。

また，検討を行った建築物の杭については杭径と主筋径および本数のみ確認されている。そこで，本検討では既往の無軸力下における既成 PC 杭(杭径 300 mm)の実験結果 [10] を参照し，終局平均せん断応力度(σ =0.85 N/mm^2)から，杭せん断耐力を略算した。ただし，本値は無軸力下の既成 PC 杭の平均終局せん断応力度を想定した値である。津波により浮力が生じた場合は引張力が作用しうるため，終局せん断応力度はこれより小さくなる可能性も考えられることに注意する必要がある。

表－1 女川町におけるボーリング調査結果(例)

深度 (m)	土質	単位体積重量 (t/m^3)	標準貫入試験 N 値
1.3	埋土（砂礫）	2.10	31
2.3		2.10	42
3.3		2.10	9
4.3		2.10	46
5.3	埋土（ヘドロ）	1.50	1
6.3	シルト	1.75	2
7.3		1.75	2
8.3		1.75	2
9.3	礫混じり粘土	1.50	19
10.3		1.50	18
11.3		1.50	19
12.3		1.50	38
13.3		1.50	40

4. 被災建築物に関する検討例

4.1 杭基礎を有する建築物 A に関する検討

転倒した建築物 A は宮城県女川町に所在する杭基礎を有する 1980 年に竣工の鉄筋コンクリート造 2 階建てである(**写真－3**)。平面は 2×1 スパンの耐震壁付きラーメン構造である。建築物の幅および奥行はそれぞれ 10.5m，4.5m である。また，建築物高さは 6.1m である。海岸からは南東 110m 程度離れた場所に位置している。本建築物は津波により杭が引き抜かれ，海岸方向に直交する方向(北方向，張間方向)に転倒していた。これは南東方向に位置する残存建築物が津波を遮蔽したためであると考えられる。周辺建築物で計測された浸水深(前面および背面で観測された最大痕跡高さ)は 15m である。建築物立面の見つけ面積に対する開口率はそれぞれ 0.109 (南側)，0.198 (北側)，0.114 (東側)，0.733 (西側)であった。特に津波が直接作用したと考えらえる南側構面で開口率(0.109)が最も小さく，大きな津波荷重が生じたと考えられる。

写真－3 転倒した建築物 A

杭は既成 PC 杭であり，張間 1 構面について合計 7 本の杭が使用されている。杭径は 300mm，杭長は 10m 杭を打継ぎし，試験杭により杭長を決定しているが，被災状況からは杭が打継されている部分は確認できなかった。杭頭はパイルキャップ下面から 200mm 埋設されている。また，構造図面における定着長さが最少 300mm であることから，杭主筋は 6-φ7(PC 鋼線 A 種，引張破断強度 58.3 kN)と仮定した。杭 1 本当たりのせん断耐力は 49 kN，引張破断強度は 350kN となる。

杭周辺地盤摩擦力 R_{TC} は基礎構造設計指針[11]に基づき式(4)から算定される。

$$R_{TC} = (\sum \tau_{ST} L_S + \sum \tau_{CT} L_C)\varphi + W_p \quad (kN) \quad (4)$$

ここで，τ_{ST}: 砂質土層の周面摩擦応力度 (kN/m^2) (≒ 2N)，τ_{CT}: 粘土層の周面摩擦応力度 (kN/m^2) (≒5N/0.8)，Ls: 砂質土層長さ(m)，Lc: 粘土層長さ(m)，φ: 杭周長さ(m)，W_p: 杭自重 (kN)，N: 標準貫入試験における N 値の平均値とする。

前節に示した周辺建築物の標準貫入試験結果に基づき杭周面摩擦力を算定した。杭径 300mm，杭長 10m の場合，基盤が浅くなっている部分の杭周面摩擦力の平均値は 507 kN，調査点全体の杭周面摩擦力の平均値は 389 kN であり，これらの値は PC 鋼線の引張破断強度よりも大きな値を示した。したがって，本検討では建築物の杭引抜耐力は杭筋の破断強度とした。

建築物重量は構造図面に基づき算定した。コンクリート単位体積重量は 2.3ton/m^3 とし，仕上げ重量については鉄筋コンクリート構造計算資料集[12]を参照したが，積載荷重ついては考慮していない。基礎を含めた本建築物の総重量は 1920kN となる。徐々に津波の水位が変動したと仮定した場合に，最終的に建築物に作用する浮力は基礎梁高さ(0.60m)，２，３階梁高さ(0.45m)，屋上垂壁高さ(1.00m)にそれぞれ床面積(10.5m×4.5m)乗じた体積に相当するため 950 kN となる(柱や壁等の鉛直支持部材のコンクリート体積については基礎部分で接地しているため浮力として考慮していない)。

建築物総重量 W_b から浮力 F_v を差し引いた鉛直荷重は 970 kN となる。杭引抜き耐力 F_p は 1 本当たり 350 kN，全体で 2450 kN とした。これらの値に転倒回転中心(圧縮側基礎下)からの距離(回転中心－重心間距離 2.25m，回転中心－引張杭群間距離 4.5m)を乗じることによって算定される抵抗モーメント M_b は 13207 kNm となる(式(5)参照)。

$$M_b = (W_b - F_v) \times 2.25 + F_p \times 4.5 \qquad (kNm) \qquad (5)$$

一方，津波が建築物に作用する転倒モーメント M_h は開口による荷重低減率をζとすると，式(6)により算定される。津波波圧は静水圧分布とし，建築物高さを超過する部分の波圧については考慮していない。浸水深 15m における転倒モーメント M_h は 16750 kN m となる。

$$M_h = \int_0^h (\rho g x (h_w - x) \times B(1-\zeta))\, dx \quad (kNm) \qquad (6)$$

両値の比較から，建築物の抵抗モーメント M_b は静水圧により作用する転倒モーメント M_h の 79%程度であり，解析結果は建築物が転倒した実被害結果と整合する。

本建築物の既成 PC 杭は合計 14 本であり，1 本当たりのせん断耐力は 49kN，建築物の基礎水平せん断耐力は 686kN となる。津波荷重は 6686kN であり，杭のせん断抵抗力は静水圧荷重の約 1/10 程度であった。なお，本研究では杭基礎を有する建築物において，杭頭せん断破壊後に杭主筋が定着されている場合，建築物に原位置からの移動が生じるかどうか定かではないため，転倒および滑動に対する両抵抗性状を検討している。

4.2 杭基礎を有する建築物 B に関する検討

転倒した建築物 B は宮城県女川町に所在する杭基礎を有する鉄筋コンクリート造 4 階建てである(**写真－4**)。床面積は 4×6m であるが，最上階のみ張間方向に 1m セットバックしている。建築物高さは 12m である。原位置は海岸からは約 200m 程度離れた場所であるが，津波作用方向(張間方向)に転倒し，原位置から 70m 程度離れた場所で横倒しの状態で確認された。周辺建築物から確認された計測浸水深(前面および背面で観測された最大痕跡高さ)は 15m である。

写真－4 転倒した建築物 B

杭は既成 PC 杭であり，基礎下に合計 32 本設けられており，転倒した張間方向の引張杭本数は 12 本である。杭径は 300mm，主筋は PC 鋼線(6-φ7，PC 鋼線 A 種)であった。これは前節で検討した建築物と同じ形状および配筋の PC 杭であり，両建築物とも宮城県女川町に所在す

るため，杭引抜き耐力はPC鋼線の破断荷重とした。

建築物総重量は基礎を含めて単位面積重量を13 kN/m^{2}と仮定して略算し，1482 kNとした。津波荷重が直接作用する構面における開口率ζは0.052である。浮力については各階の垂壁高さ(4階1.0m，3階0.9m，2階0.8m，1階 1.3m)に床面積を乗じた体積に相当するため，883 kNとなる。

建築物総重量W_bから浮力F_vを差し引いた鉛直荷重は600 kNとなる。杭引抜き強度F_pは1本当たり350 kN，全体で4200 kNとした。これらの値に転倒回転中心(圧縮側基礎下)からの距離(回転中心－重心間距離2.0m，回転中心－引張杭群間距離 3.5m)を乗じることによって算定される抵抗モーメントM_bは15900 kNmとなる(式(7)参照)。

$$M_b = (W_b - F_v) \times 2.0 + F_p \times 3.5 \qquad (kNm) \qquad (7)$$

一方，津波が建築物に作用する転倒モーメントM_hは開口による荷重低減率をζとすると，式(6)により算定される。浸水深15mにおける転倒モーメントM_hは28108 kNmとなる。

両値の比較から，建築物の抵抗モーメントM_bは静水圧により作用する転倒モーメントM_hの57%程度であり，解析結果は建築物が転倒した実被害結果と整合する。

本建築物の既成PC杭は合計32本であり，1本当たりのせん断耐力は 49kN，建築物の基礎水平せん断耐力は1568kNとなる。津波荷重は6023kNであり，杭のせん断抵抗力は静水圧荷重の約1/4程度であった。

4.3 直接基礎を有する建築物Ｃ に関する検討

残存した建築物Ｃは岩手県陸前高田市に所在する直接基礎を有する鉄筋コンクリート造３階建てであり，1958年に竣工している(**写真－5**)。床面積は15.3×40mであり，最上階にペントハウスを有しているが本解析では考慮していない。建築物は地下部分(GL -2.4m)を有している。階高は各階3.6mであるが，基礎梁(高さ0.6m)は地盤面から露出しているため，地盤面からの建築物高さは 11.4mである。

津波は建築物の張間方向に作用しており，張間構面の開口率ζは調査時に実測し，0.274となっている。建築物前面に残留する浸水の最大痕跡高さは14mであったが，本検討では建築物背面に残留する痕跡高さ(10 m)を浸水深とした。

建築物総重量は基礎を含めて単位面積重量を13 kN/m^{2}と仮定して略算し，31824 kNとした。浮力については各階の垂壁高さ(浸水する1階および2階部分のみ0.7m，地下階は開口を有していないため1階階段から水が流入したとして浮力を考慮しない)に床面積を乗じた体積に相当し，8401 kNとなる。なお，本建築物において開口から水が流入することを考慮せず，浸水した全体積に相当する浮力が生じると仮定すると浸水深 5.3m で建築物が浮き上がることとなる。

写真－5 残存した建築物Ｃ

建築物総重量W_bから浮力F_vを差し引いた鉛直荷重は23423kNとなる。また，本検討では建築物が地下階を有しているため受働土圧Fs [11]を考慮した。建築物に作用する受働土圧は式(8)により算定し，10165kNとなる。なお，土圧外力分布は三角形分布とした。これらの値に転倒回転中心(圧縮側基礎下)からの距離(回転中心－重心間距離7.65m，回転中心－土圧力重心間距離0.8m)を乗じることによって算定される抵抗モーメントM_bは187319 kNmとなる(式(9)参照)。

$$F_S = 0.5\gamma g K_p Z_f{}^2 B \qquad (kN) \qquad (8)$$

$$M_b = (W_b - F_v) \times 7.65 + F_S \times 0.8 \qquad (kNm) \qquad (9)$$

ここで，γ:土密度 (1.8 ton/m^3)，K_p:受働土圧係数 (砂の内部摩擦角は概ね 25～30°前後と推定されるのでここでは5.0とした)，Z_f:基礎深さ(m)，B:基礎幅(m)とする。

一方，津波が建築物に作用する転倒モーメントM_hは開口による荷重低減率をζとすると，式(6)により算定される。浸水深10mにおける転倒モーメントM_hは81624 kNmとなる。両値の比較から，受働土圧を含めた建築物の抵抗モーメントM_bは静水圧により作用する転倒モーメントM_hの約2.3倍であり，解析結果は建築物が残存した調査結果と整合する。

著者は既往の研究において，解体中の既存鉄筋コンクリート造建築物を利用して，直接基礎の静的載荷実験を行っている [13]。本実験において基礎と捨てコンクリート間の付着が充分に切れた(十分に水平変形した)状態における基礎底面すべり摩擦係数は1.0以上の値が確認されている。静水圧により本建築物に作用した津波荷重は

14237kN であり，既往の実験結果を考慮すると，基礎底面の摩擦抵抗力は津波作用荷重を十分に上回っていたと考えられ，建築物に滑動が生じていなかった調査結果と整合している。

5. まとめ

本検討では東日本大震災による津波によって被災した鉄筋コンクリート造建築物 3 棟について，基礎転倒や滑動に関する詳細な解析的検討を行った。本検討において浸水深，開口，杭，浮力，土圧等の影響を適切に考慮することで，津波により生じた建築物転倒等の被害を説明しうることが示された。今後，これらの影響因子について模型を用いた実験などにより検証する予定である。

謝辞

本研究は国土交通省国土技術政策総合研究所および独立行政法人 建築研究所の津波現地調査結果を活用し，国土交通省 建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」において実施された。また，陸前高田市役所，女川町役場には建築物に関する貴重な情報を提供頂いた。関係各位に記して謝意を表します。

参考文献

1) 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 : 平成 23 年(2011 年) 東北地方太平洋沖地震 調査研究(速報)，国土技術政策総合研究所資料 No.636／建築研究資料 No.132，2011.5 http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/20110311/0311quickreport.html
2) 東京大学 生産研究所：平成 23 年度 建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書Ⅱ，2011.11
3) 国土交通省：津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る技術的助言，2012.11
4) 壁谷澤寿一，福山 洋，奥田 泰雄，加藤 博人，石原 直，田尻 清太郎，谷 昌典，2011 年東北地方太平洋沖地震による建築物等の被害調査結果に基づく津波荷重の評価（その 2）鉄筋コンクリート造建築物被害に基づく検討，日本地震工学会，日本地震工学会年次大会 2011 梗概集，pp54-55，2011.11
5) 内閣府 : 津波避難ビル等に係るガイドライン, 2005.6
6) 松冨英夫，飯塚秀則：津波の陸上流速とその簡易推定法，海岸工学論文集，Vol.45， pp361-365， 土木学会，1998.4
7) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ：計測データ, 2011/09/01 参照, HP: http://www.coastal.jp/ttjt
8) ファウジアフマド, 鴨原良典, 藤間功司, 水谷法美：陸上構造物に作用する津波波力の推定手法に関する考察，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.B2-65，No.1，pp321-325，2009.3
9) 東北大学 越村研究室：東北地方を襲った津波の流況と建物被害(PDF)，東北大学による東日本大震災 3 ヶ月後報告会，2011.6
10) 松尾俊之，倉橋修雄，城攻，柴田拓二，大野和男：PC 杭の曲げ剪断抵抗性状について(軸力 σ_0=0 の場合)，北海道支部研究報告集，No.54，pp60-63，日本建築学会，1981.3
11) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，1998
12) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造設計資料集，2001.11
13) 壁谷澤寿一，壁谷澤寿海，金裕錫，細川洋治，新潟県中越地震で被災した鉄筋コンクリート造学校校舎の直接基礎の水平載荷実験，日本建築学会，構造工学論文集，Vol.57B，p621-628，2011.4