

令和5年度

修士論文

既存 RC 建物の耐津波性能評価と
避難施設としての活用に関する研究

指導教員 川口 淳 教授

三重大学大学院工学研究科建築学専攻

阪口 大河

既存 RC 建物の耐津波性能評価と避難施設としての活用に関する研究

目次

第 1 章 序	1
1.1 研究背景	1
1.2 既往の研究	1
1.3 研究目的	4
1.4 研究方法	4
第 2 章 既存RC建物の耐津波性能評価方法	5
2.1 耐津波性能評価の流れ	5
2.2 津波荷重の算定方法	6
2.2.1 津波荷重の算定	6
2.2.2 水深係数	7
2.2.3 開口部による津波荷重の低減率	8
2.2.4 浮力の算定方法	8
2.2.5 建物重量	9
2.3 滑動の有無の確認方法	9
2.4 転倒の有無の確認方法	10
2.5 倒壊の有無の確認方法	11
2.6 スケルトン化の算定方法	12
2.6.1 スケルトン化による津波荷重の低減率	12
2.6.2 スケルトン化による建物重量の補正值	12
第 3 章 既存RC建物の耐津波性能評価と耐震性能	13
3.1 O小学校のケーススタディ	13
3.1.1 O小学校の建物概要	13
3.1.2 O小学校の開口部による津波の低減率	17
3.1.3 O小学校の建物重量	17
3.1.4 既存の建物性能でのO小学校の限界浸水深算定結果	21
3.2 O小学校のスケルトン化の検討	22
3.2.1 O小学校のスケルトン化による津波の低減率	23
3.2.2 O小学校のスケルトン化による建物重量の補正值	25
3.2.3 O小学校のスケルトン化後の浮力を考慮した建物重量	25
3.2.4 O小学校のスケルトン化後の限界浸水深算定結果	28
3.3 O小学校のスケルトン化後の必要保有水平耐力及び保有水平耐力	30
3.3.1 O小学校のスケルトン化後の地震力の算定	30
3.3.2 O小学校の必要保有水平耐力の算定	31

3.3.3	O小学校の保有水平耐力の算定	32
3.3.4	建物の崩壊形	32
3.3.5	保有水平耐力と必要保有水平耐力の比較	33
3.3.6	保有水平耐力における懸念点	33
3.3.7	O小学校のケーススタディまとめ	34
3.4	S小学校のケーススタディ	35
3.4.1	S小学校の建物概要	35
3.4.2	S小学校の開口部による津波の低減率	38
3.4.3	S小学校の建物重量	38
3.4.4	既存の建物性能でのS小学校の限界浸水深算定結果	42
3.5	S小学校のスケルトン化の検討	45
3.5.1	S小学校のスケルトン化による津波の低減率	45
3.5.2	S小学校のスケルトン化による建物重量の補正值	45
3.5.3	S小学校のスケルトン化後の浮力を考慮した建物重量	46
3.5.4	S小学校のスケルトン化後の限界浸水深算定結果	49
3.6	S小学校のスケルトン化後の必要保有水平耐力及び保有水平耐力	51
3.6.1	S小学校のスケルトン化後の地震力の算定	51
3.6.2	S小学校の必要保有水平耐力の算定	52
3.6.3	保有水平耐力と必要保有水平耐力の比較	52
3.7	既存RC建物のケーススタディまとめ	53

第4章 耐津波性能に対するスケルトン化の効果の検証 54

4.1	基準となるモデル建物の設定	54
4.2	スケルトン化前後の津波荷重の低減率と建物重量の補正值	58
4.3	滑動におけるスケルトン化の効果	59
4.3.1	滑動時の限界浸水深算定結果	59
4.3.2	滑動時の津波荷重の大きさがスケルトン化の効果に与える影響	66
4.3.3	滑動時の摩擦係数がスケルトン化の効果に与える影響	67
4.3.4	滑動時の基礎部の空気層がスケルトン化の効果に与える影響	68
4.3.5	滑動時の空気層の増減がスケルトン化の効果に与える影響	70
4.3.6	滑動時の津波の低減率と滑動耐力の低減率の関係	71
4.3.7	滑動時におけるスケルトン化の効果まとめ	73
4.4	転倒におけるスケルトン化の効果	74
4.4.1	転倒時の限界浸水深算定結果	74
4.4.2	転倒時の限界浸水深と滑動時の限界浸水深の比較	80
4.4.3	転倒時の津波荷重の大きさがスケルトン化の効果に与える影響	88
4.4.4	転倒時の基礎部の空気層がスケルトン化の効果に与える影響	88
4.4.5	転倒時の空気層の増減がスケルトン化の効果に与える影響	88
4.4.6	転倒時の津波の低減率と滑動耐力の低減率の関係	89

4.4.7 転倒時におけるスケルトン化の効果まとめ	89
4.5 耐津波性能に対するスケルトン化の効果の検証まとめ	90
第 5 章 結	91
5.1 まとめ	91
5.2 今後の課題	91
参考文献	92
謝辞	93
付録A 津波荷重の大きさがスケルトン化の効果に与える影響	94
付録B 摩擦係数がスケルトン化の効果に与える影響	102
付録C 基礎部の空気層がスケルトン化の効果に与える影響	106
付録D 津波の低減率と滑動耐力の低減率の関係	110

第1章 序

- 1.1 研究背景
- 1.2 既往の研究
- 1.3 研究目的
- 1.4 研究方法

第1章 序

1.1 研究背景

2011年に起こった東日本大震災では地震動による建物への被害だけでなく、津波による滑動や転倒、倒壊といった被害も顕著に現れた。さらに、南海トラフ巨大地震においても、東日本大震災と同等以上の建築物への津波被害の発生が懸念される。それに対し、震災による津波の対策として各市町村では津波避難ビルや津波避難タワーの指定、建設が進められている。しかし、国土交通省が各都道府県に実施した津波発生時に安全に避難できる施設「津波避難ビル等」についての指定の状況などに関するアンケート調査の結果¹⁾によると、津波避難ビル等の新設、改修は進んでおらず、既存の建築物をそのまま津波避難ビル等として指定している場合がほとんどである。だが、法律で定められている耐震設計基準と違い、耐津波性能に関しては国土交通省の耐津波性能評価に関するガイドライン²⁾が推進段階であり、法整備がされていないため、耐津波性能の計算はされていないことも考えられ、既存RC建物が耐津波性能を有しているかは不明瞭となっている。なので、津波避難ビル等の運営に際し、既存建物が耐津波性能を有しているかを明らかにすることが必要とされている。

1.2 既往の研究

文献3)では、ピロティの有無と開口部の有無を組み合わせた3タイプの3層建物模型を用いた津波水槽実験により、津波の状況や、波圧分布、浮力や揚力による鉛直力の影響について検討しており、加えて、実験を再現した津波シミュレーション解析を行い、実験結果と比較し、開口部とピロティを有する中低層建築物の津波作用時における力学的メカニズムについて考察している。

この実験で、建物模型を水槽に設置して、遡上波と砕波段波に対する模型前面の浸水深を計測しているが、開口部が大きいほど、浸水深の上昇と上階へのせき上げ効果が低減し、波圧の作用領域が小さくなることが確認できた。

また、図1-1にピロティなし・開口部なし、ピロティなし・開口部あり、およびピロティあり・開口部ありのそれぞれの場合の遡上波と砕波段波に対する水平力と鉛直力の時間変化を示す。縦軸の F_x が水平波力、 F_z が鉛直力を示しており、横軸は時間を示している。グラフから開口部が大きいほど、最大水平波力は小さくなることがわかり、ピロティなし・開口部ありの場合、ピロティなし・開口部なしに比べ、約20%低減され、ピロティあり・開口部ありの場合、ピロティなし・開口部なしに比べ、約35%低減される。また、開口部があることで鉛直力 F_z は下向きに作用している。これは、開口部がない場合、浮力のみが作用するのに対し、開口部があることで水が流入し、浮力以上の重力が作用するからである。

したがって、開口部を大きくし、波圧の作用領域、水平波力、鉛直力を小さくできるピロティ構造は耐津波性能を向上させる手法として有効であると考えられる。

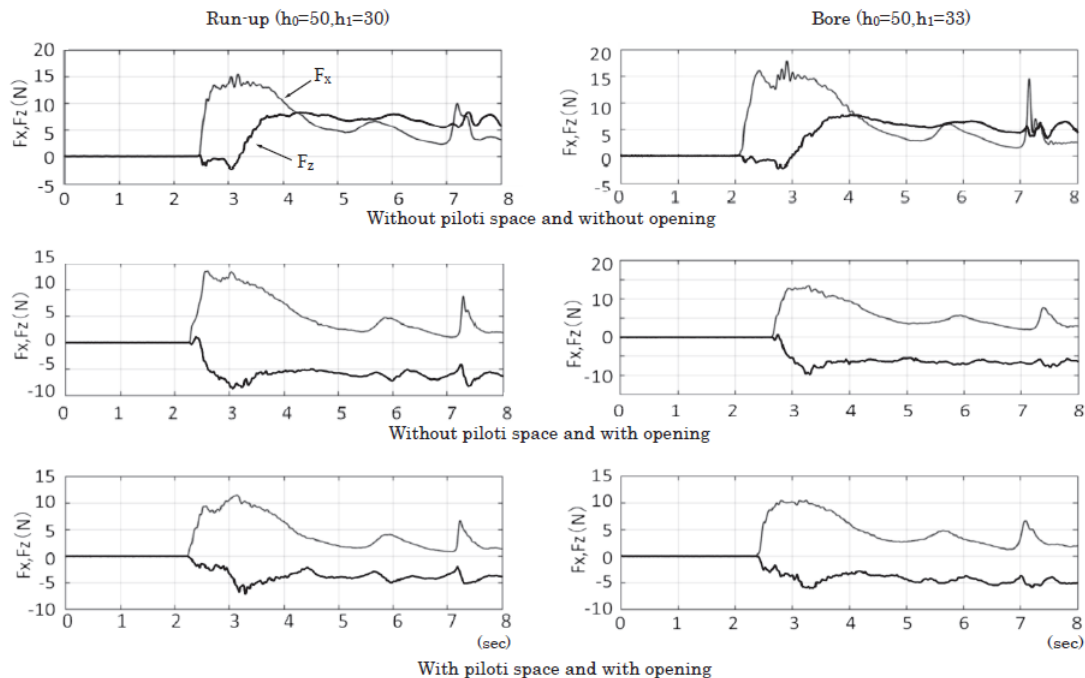


Fig. 10 Time variation of horizontal and vertical forces

図 1-1 それぞれの条件における遡上波と碎波段波に対する水平力と鉛直力の時間変化 (上段：ピロティなし・開口部なし，中段：ピロティなし・開口部あり，下段：ピロティあり・開口部あり) 出典：濱本ら(2017) p.365

文献 4)では、開口の大きさや位置が津波荷重に与える影響について、水理模型実験と数値解析によって検討している。

開口の無いケース、前面と背面に開口があるケース、前面にのみ開口があるケースで実験を行っており、図 1-2、図 1-3、図 1-4 にそれぞれのケースでの水平荷重・時間変動を示す。縦軸は実践が水平荷重、破線が鉛直荷重を示しており、横軸は時間を示している。前面と背面に開口がある Case2 (開口率 30%)、Case7 (開口率 65%) では、水平荷重は時間的変化が開口の無い Case1 と同様であるが、最大値は開口率の大きさに対応して変化し、鉛直荷重は水の流入により、下向きの荷重が発生する。一方、前面にのみ開口がある Case8 (開口率 30%)、Case9 (開口率 65%) では、開口の無い Case1 と同等以上の最大荷重が確認され、特に開口の大きなケースで最大水平荷重も大きくなった。これは、流れが背後に透過できないため、前面開口が大きいと流入する遡上流の勢いが減衰されず、内部および背部の受圧面に作用する荷重が大きくなることを示している。

したがって、開口部によって津波荷重を低減させ、耐津波性能を向上させる場合、前面の開口率だけではなく、津波の透過を妨げる壁面を考慮する必要がある。

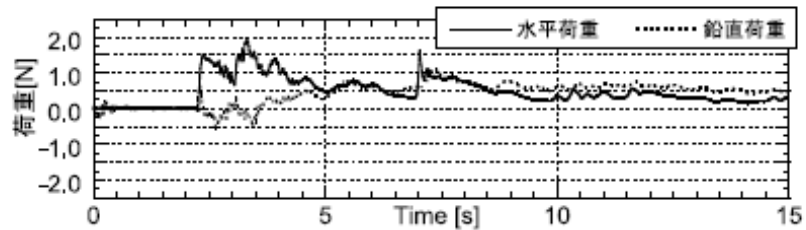


図 1-2 水平・鉛直荷重の時間変動(Case1) 出典：長谷部ら(2014) p.833

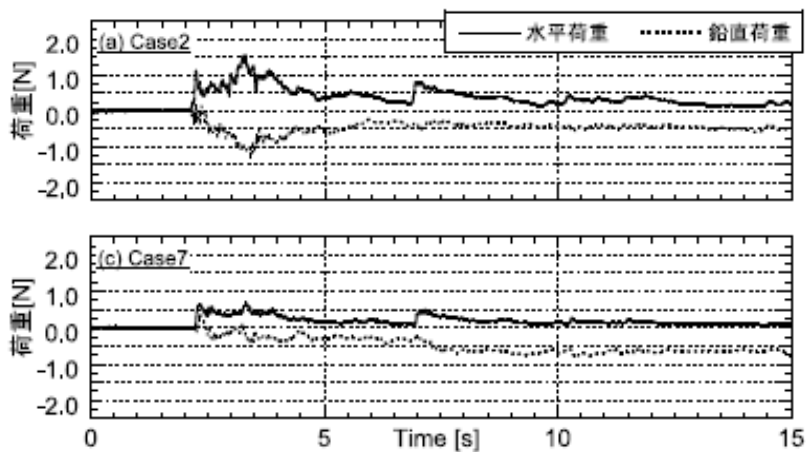


図 1-3 水平・鉛直荷重の時間変動(Case2,7) 出典：長谷部ら(2014) p.833 (一部修正)

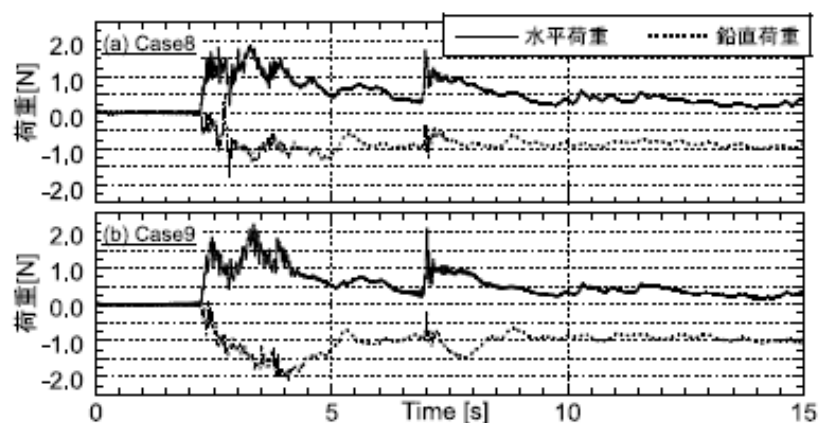


図 1-4 水平・鉛直荷重の時間変動(Case8,9) 出典：長谷部ら(2014) p.834

文献 5) では AIJ の津波荷重に関する指針が示されており、その適用範囲や、算定方針が示されている。適用範囲では、対象となる建築物や工作物の条件、検証対象となる津波の条件、建設地点での設計用浸水深と設計用流速の条件、密度等の海水の条件、フルード数の範囲が示されている。また、算定方針では、津波荷重は津波先端部の荷重、津波非先端部の荷重、静水時の荷重、漂流物による荷重の 4 種類を考慮し、これらを適切に組み合わせて、想定する津波荷重、建築物の表裏に作用する津波波力、津波荷重と他の荷重との組み合わせ等が示されている。なお、算定方法は、浸水深と流速の時系列、最大浸水深と最大流速、最大浸水深の 3 つに大別して算定する。これら 3 つの中から利用できるパラメータによって、津波荷重の算定ルートが決まり、ルートによって、津波荷重は津波先端部の荷重、津波非先端部の荷重、静水時の荷重、漂流物による荷重の組み合わせが決まるが、いずれのルートにおいても静水時の荷重を考慮する必要がある。

この静水時の荷重が本研究で扱った国土交通省の定める暫定指針²⁾と同じであり、ハザードマップ等から設定できる設計用浸水深のみで計算できるので、国土交通省のガイドラインとして採用されたと考えられる。また、本研究では公共団体との共同研究のため、説明資料として、国のガイドラインを用いた方が適切であると考え、国土交通省のガイドラインを使用した。

1.3 研究目的

指定されている津波避難建物が想定されている津波に対して十分な耐力を有しているかを確認するために、M 町協力のもと 2 件の既存 RC 建物の調査を行い、既存建物をそのまま津波避難場所として利用する際の課題を明確化する。

また、本研究では既存 RC 建物の耐津波性能向上手法として、建物の壁をすべて取り除くことで、津波の受圧面を小さくし、水を流入させることで浮力を小さくするスケルトン化を提案し、スケルトン化によって耐津波性能が向上する条件を明確化することを目的とする。

1.4 研究方法

国土交通省の耐津波性能評価に関するガイドライン²⁾をもとに、既存 RC 建物によるケーススタディを行う。その結果から、スケルトン化の効果にばらつきがあったので、ベースとなる建物を設定し、その建物の X 方向の建物幅、Y 方向の建物幅、階数、基礎底部から GL までの高さを変更し、スケルトン化によって耐津波性能が向上する条件を検証する。

第 2 章 既存 RC 建物の耐津波性能評価

2.1 耐津波性能評価の流れ

2.2 津波荷重の算定方法

2.2.1 津波荷重の算定

2.2.2 水深係数

2.2.3 開口部による津波荷重の低減率

2.2.4 浮力の算定方法

2.2.5 建物重量

2.3 滑動の有無の確認方法

2.4 転倒の有無の確認方法

2.5 倒壊の有無の確認方法

2.6 スケルトン化の算定方法

2.6.1 スケルトン化による津波荷重の低減率

2.6.2 スケルトン化後の建物重量

第 2 章 既存 RC 建物の耐津波性能評価

M 町の既存 RC 建物の耐津波性能を国土交通省の定める暫定指針²⁾に従い、評価した。本章では、耐津波性能評価方法やそれに関わる係数などについて述べる。

2.1 耐津波性能評価の流れ

図 2-1 に耐津波性能評価方法の流れを示す。最初に設計図書をもとに津波荷重、浮力を算定する。その後、崩壊要因として、滑動、転倒、倒壊の 3 種類を想定し、滑動耐力、転倒耐力および倒壊耐力を算定する。津波荷重がそれぞれの耐力に達する津波浸水深を限界浸水深とし、該当地域のハザードマップなどで想定されている津波の高さと限界浸水深を比較することで、耐津波性能を満足しているか判断する。滑動耐力およびの転倒耐力算定方法は 2.3 および 2.4 に示す。倒壊耐力は必要保有水平耐力と津波荷重を比較し、必要保有水平耐力が津波荷重以上であれば、耐力を満足していると判断した。また、耐津波性能評価は津波がすべての方向から来ることを想定し、建築物の東西南北面それぞれに対して津波荷重が作用した場合の検討を行った。これは、押し波だけでなく、引き波によって建築物に大きな津波荷重が発生する可能性があるためである。

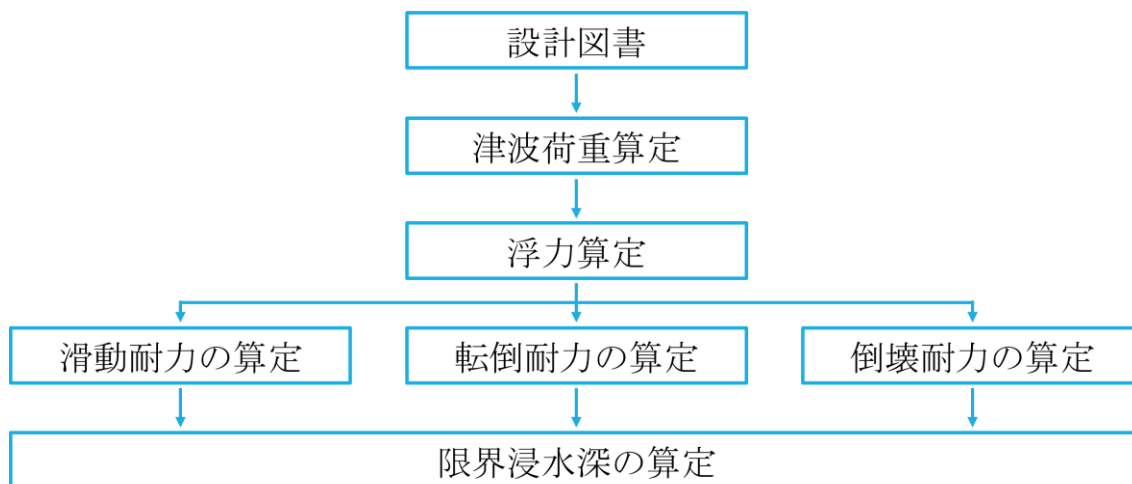


図 2-1 耐津波性能評価方法の流れ

2.2 津波荷重の算定方法

2.2.1 津波荷重の算定

津波荷重は国土交通省の「津波避難ビル等の構造上の要件の解説」²⁾に従って計算を行った。浸水深、水深係数を変化させ、各方面における建物の津波耐力を求め、その耐力に達する浸水深を限界浸水深とした。津波荷重は(1)式により算定した。図 2-2 に津波荷重概念図を示す。

滑動、転倒の有無を検討する場合、図 2-3 のように津波荷重分布の建築物高さまでの津波荷重の合計を津波波力とし、分布図形の高さ方向の重心位置を作用位置とする。 ah が建築物の高さ以下であれば、作用高さは三角形の重心位置である $1/3ah$ となり、図 2-3 のように ah が建築物高さを上回る場合、津波荷重の作用高さは藍色で塗られた台形の重心位置となる。

倒壊の有無を検討する場合、図 2-4 のように各階に作用する津波荷重は、1つ下の階の階高の $1/2$ の高さから当該階の $1/2$ の高さまでに作用する合計となる。津波荷重は、当該階のスラブ位置に集中荷重として作用させる。

$$Q_{tun} = \rho g \int_{z_1}^{z_2} (ah - z) B dz \quad (1)$$

Q_{tun} : 構造設計用の進行方向の津波波力 (kN)

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)

a : 水深係数

B : 当該部分の受圧面の幅 (m)

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

z_2 : 受圧面の最大高さ ($z_1 \leq z_2 \leq ah$) (m)

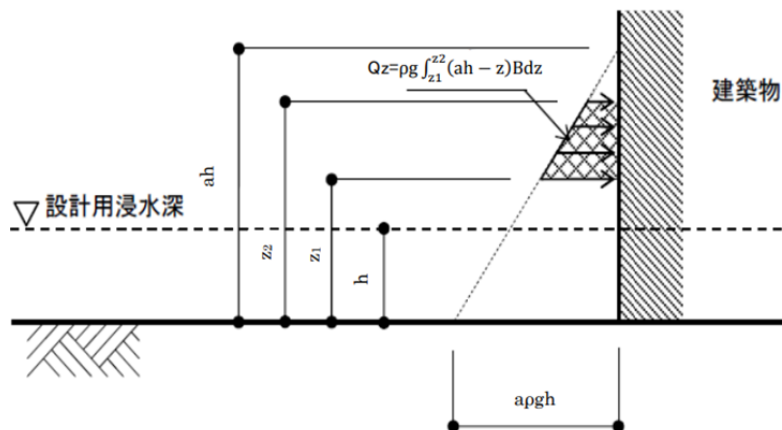


図 2-2 津波荷重概念図 (出典:津波避難ビル等の構造上の要件の解説,2012.3)

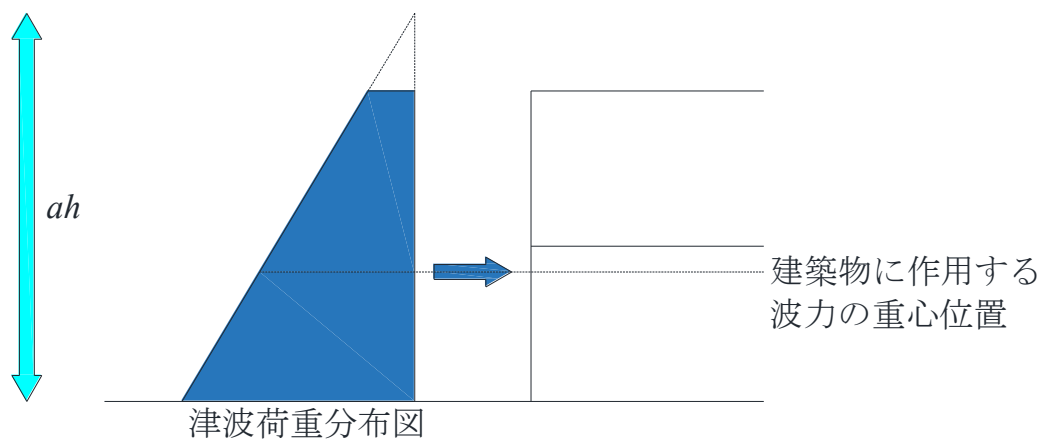


図 2-3 津波荷重概念図（滑動、転倒の有無の検討用）

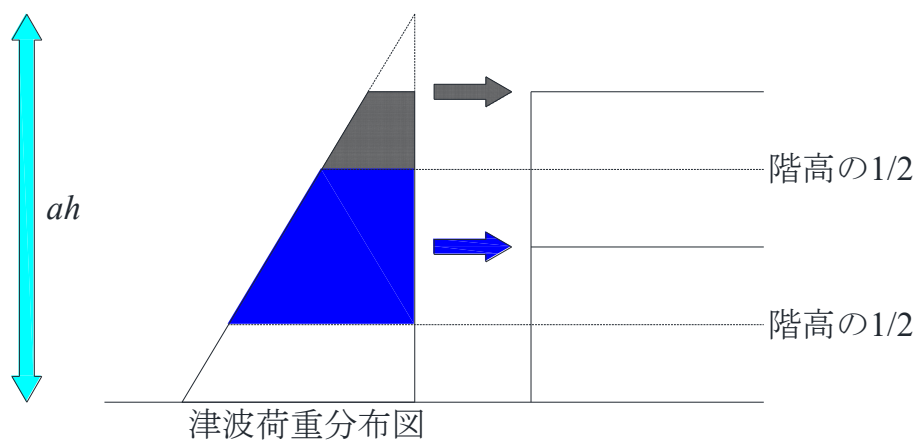


図 2-4 津波荷重概念図（倒壊の有無の検討用）

2.2.2 水深係数

津波荷重は設計用浸水深の a 倍に相当する静水圧による水平荷重として算定する。この倍率を水深係数といい、対象建築物の周辺状況によって値が変化する。堤防や前面の建築物等により軽減が見込まれる場合の水深係数を 2.0 とし、軽減効果が見込まれ、かつ海岸や河川から 500 m 以上離れている場合の水深係数を 1.5 とし、上記以外の場合の水深係数を 3.0 とする。これら水深係数 a の模式図を図 2-5 に示す。

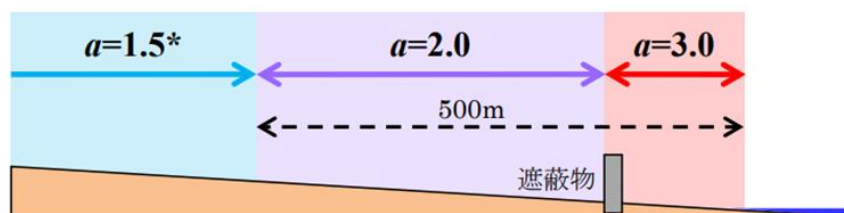


図 2-5 水深係数の模式図（出典:津波避難ビル等の構造上の要件の解説,2012.3）

2.2.3 開口部による津波荷重の低減率

受圧面に開口部がある場合、受圧面に対する開口部の面積の割合によって津波荷重を低減できる。文献 2)によれば、津波荷重低減の方法については、以下のように明確化されている。本研究では(2)の計算方法によって津波荷重を算定した。

- (1) 津波作用幅から開口部の幅の総和を除いて計算する
- (2) 下式のように津波作用面積から開口部の面積の総和を除いた面積を津波作用面積で除して得た数値を乗じて計算する。

$$(\text{低減率}) = 1 - (\text{開口部面積の総和} / \text{津波作用面積}) \quad (2)$$

この場合、当該低減率は 0.7 を下回らないものとする。

2.2.4 浮力の算定方法

津波による滑動、転倒の検討をする際に建物重量を用いる必要があるが、浮力により建物重量が小さくなるので浮力を考慮した建物重量を用いた。津波によって発生する浮力は下式により算定した。

$$Q_z = \rho g V \quad (3)$$

Q_z : 浮力 (kN)

ρ : 水の単位体積質量 (t/m^3)

g : 重力加速度 (m/s^2)

V : 津波に浸かった建物の体積 (m^3)

また、津波の水位上昇速度が不明なので、建物内に水が流入しない場合と流入した場合それぞれで浮力の計算を行った。浸水状況は建物に水が流入しない条件(a)、水が流入し、階段室から他層への流入が無い条件(b)、水が流入し、階段室から他層へも流入する条件(c)の 3 条件で計算した。それぞれの概略図を図 2-6 に示す。

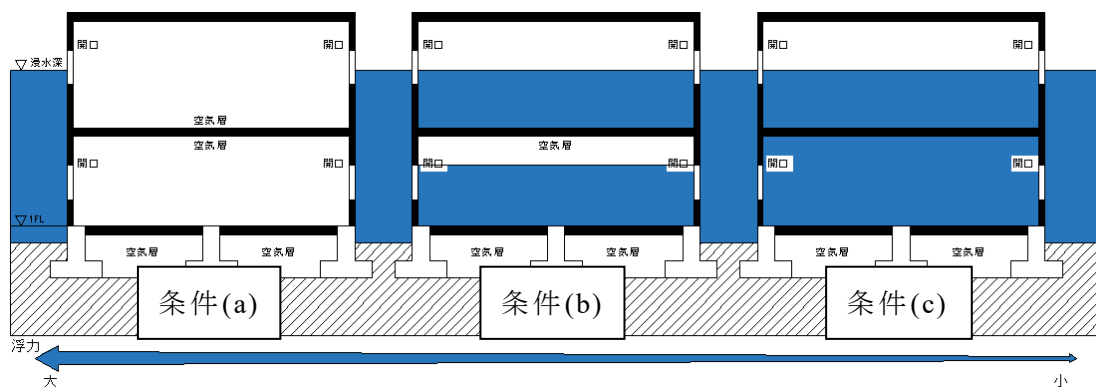


図 2-6 各条件における建物浸水概略図

2.2.5 建物重量

建物重量は各階の床面積に単位床面積重量を乗じることで求めた。今回の単位床面積重量は国土交通省の「許容浸水深表による津波に対する安全性を確かめる方法について」⁶⁾を参考に、基礎階、一般階ともに 13 kN/m^2 とした。また、浸水時の RC 建物の重量は水中の鉄筋コンクリートの単位体積重量 14 kN/m^3 と空気中の鉄筋コンクリートの単位体積重量 24 kN/m^3 の比から建物重量に低減率として $1-14/24=0.42$ を乗じることで水中の建物重量を求めた。

2.3 滑動の有無の確認方法

図 2-7 に滑動に影響する力の概略図を示す。滑動の有無は建物全体に作用する津波荷重（図 2-7 に示す青色の矢印）に対し、浮力を考慮した建物重量による建物の滑動耐力（図 2-7 に示す赤色の矢印）または杭の滑動耐力（図 2-7 に示す黄色の矢印）が上回ることを(4)式により確認する。また、直接基礎で計算する場合、基礎滑り時の動摩擦係数は $0.4\sim 0.6$ とした。

$$Q_{tun} \leq M_g \cdot \mu \text{ or } Q_{as} \cdot t \quad (4)$$

Q_{tun} : 津波荷重 (kN)

M_g : 浮力を考慮した建物重量 (kN)

μ : 摩擦係数 (0.4~0.6)

Q_{as} : 杭の許容せん断耐力 (kN)

t : 杭本数

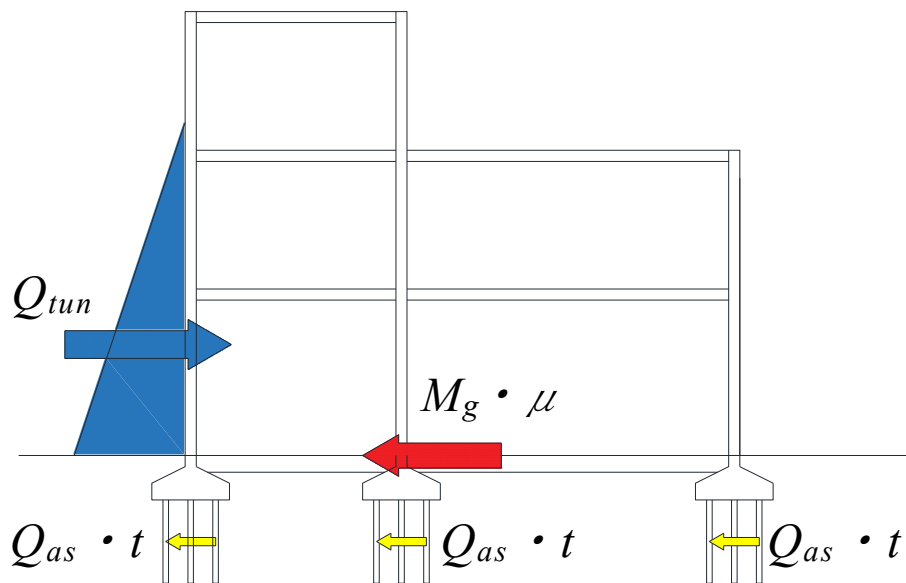


図 2-7 滑動に影響する力の概略図

2.4 転倒の有無の確認方法

図 2-8 に転倒に影響する力の概略図を示す。転倒の有無は津波荷重による転倒モーメント（図 2-8 に示す支点における青色の矢印によるモーメント）に対し、浮力を考慮した建物重量による転倒抵抗モーメント（図 2-8 に示す支点における赤色の矢印によるモーメント）と杭の引き抜き耐力による転倒抵抗モーメント（図 2-8 に示す支点における黄色の矢印によるモーメント）が上回ることを(5)式により確認する。

$$Q_{tun} \cdot \frac{1}{3}ah \leq M_g \cdot X_g + R_a \cdot t \cdot X_a \quad (5)$$

Q_{tun} : 津波荷重 (kN)

M_g : 浮力を考慮した建物重量 (kN)

X_g : 重心から支点までの距離 (m)

R_a : 杭の引き抜き耐力 (kN)

X_a : 杭から支点までの距離 (m)

t : 杭本数

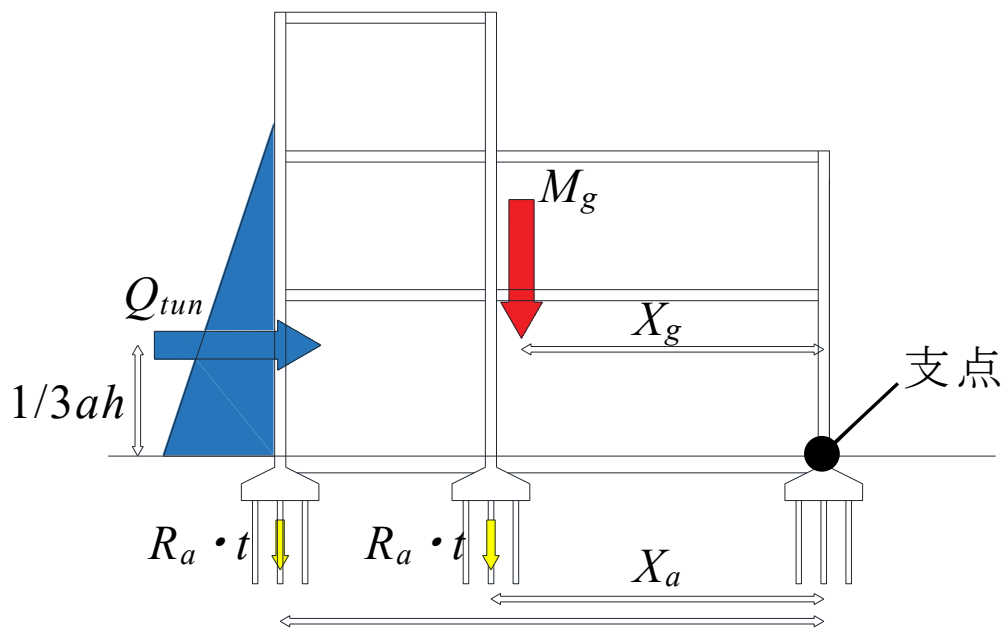


図 2-8 転倒に影響する力の概略図

2.5 倒壊の有無の確認方法

図 2-9 に転倒に影響する力の概略図を示す。倒壊の有無は各層、各方向にかかる津波荷重（図 2-8 に示す青色の矢印）に対し、各層の保有耐力が上回ることを(6)式により確認する。なお、必要保有水平耐力が津波荷重以上であれば、津波により倒壊しないので、保有水平耐力を求める必要はない。

$$Q_{tun} \leq Q_u \quad (6)$$

Q_{tun} : 津波荷重 (kN)

Q_u : 保有耐力 (kN)

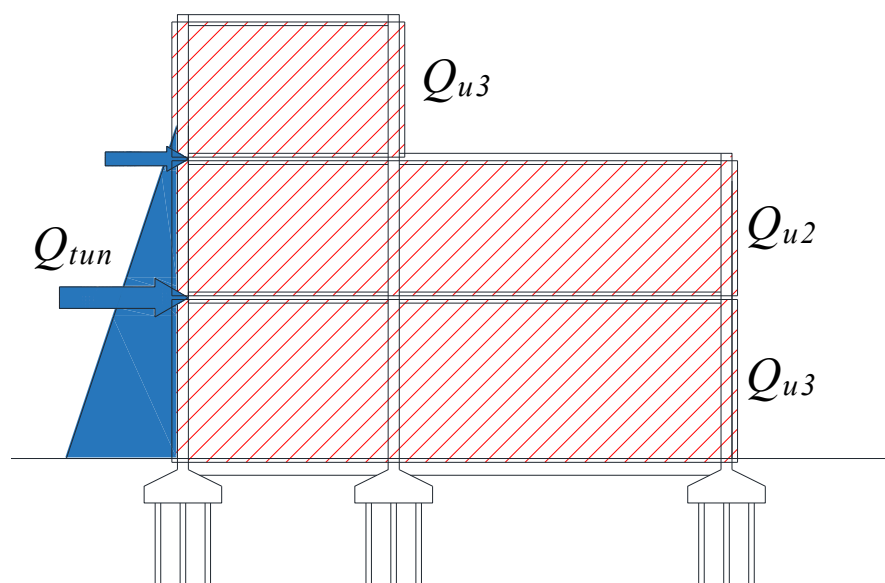


図 2-9 転倒に影響する力の概略図

2.6 スケルトン化の算定方法

限界浸水深の向上を図るためにスケルトン化を提案する。スケルトン化とは、壁を取り除き、柱や梁などの構造躯体のみにすることであり、これにより津波を受ける受圧面積を小さくすることで津波荷重を低減させ、水の流入により浮力を小さくし、限界浸水深の向上を図ることを指す。

2.6.1 スケルトン化による津波荷重の低減率

スケルトン化による津波荷重の低減率は 2.2.3 節と同様に(2)式によって求めた。スケルトン化の場合、壁面積がすべて開口部の面積となる。また、文献 2) より、開口部による津波荷重の低減率の下限は 0.7 とするが、ピロティ部分については開口部と異なり低減率の下限を設けないとされているため、スケルトン化後の津波荷重の低減率も下限を設けないものとする。

2.6.2 スケルトン化による建物重量の補正值

スケルトン化によって取り除かれた壁量分の建物重量の低下が発生するのでその補正值を求める必要がある。建物重量の補正值は(7)式のように各階の壁面積の総和を除いた面積を各階の壁面積と床面積の和で除して得た数値を 2.2.5 節の方法で求めた各階重量に乗じて算定した。

$$(\text{補正值}) = 1 - (\text{各階の壁面積}) / (\text{各階の壁面積} + \text{各階の床面積}) \quad (7)$$

第3章 既存RC建物の耐津波性能評価と耐震性能

3.1 O 小学校のケーススタディ

3.1.1 O 小学校の建物概要

3.1.2 O 小学校の開口部による津波の低減率

3.1.3 O 小学校の建物重量

3.1.4 既存の建物性能での O 小学校の限界浸水深算定結果

3.2 O 小学校のスケルトン化の検討

3.2.1 O 小学校のスケルトン化による津波の低減率

3.2.2 O 小学校のスケルトン化による建物重量の補正值

3.2.3 O 小学校のスケルトン化後の浮力を考慮した建物重量

3.2.4 O 小学校のスケルトン化後の限界浸水深算定結果

3.3 O 小学校のスケルトン化後の必要保有水平耐力及び保有水平耐力

3.3.1 O 小学校のスケルトン化後の地震力の算定

3.3.2 O 小学校の必要保有水平耐力の算定

3.3.3 O 小学校の保有水平耐力の算定

3.3.4 建物の崩壊形

3.3.5 保有水平耐力と必要保有水平耐力の比較

3.3.6 保有水平耐力における懸念点

3.3.7 O 小学校のケーススタディまとめ

3.4 S 小学校のケーススタディ

3.4.1 S 小学校の建物概要

3.4.2 S 小学校の開口部による津波の低減率

3.4.3 S 小学校の建物重量

3.4.4 既存の建物性能での S 小学校の限界浸水深算定結果

3.5 S 小学校のスケルトン化の検討

3.5.1 S 小学校のスケルトン化による津波の低減率

3.5.2 S 小学校のスケルトン化による建物重量の補正值

3.5.3 S 小学校のスケルトン化後の浮力を考慮した建物重量

3.5.4 S 小学校のスケルトン化後の限界浸水深算定結果

3.6 S 小学校のスケルトン化後の必要保有水平耐力及び保有水平耐力

3.6.1 S 小学校のスケルトン化後の地震力の算定

3.6.2 S 小学校の必要保有水平耐力の算定

3.6.3 保有水平耐力と必要保有水平耐力の比較

3.7 既存RC建物のケーススタディまとめ

第3章 既存 RC 建物の耐津波性能評価

今回のケーススタディでは、M 町内の小学校区再編の事業の中で閉校することになり、跡地利用の検討として、津波避難場所としての利用が考えられている 2 件の小学校を対象に調査を行った。まず、現状の施設の耐津波性能評価を行い、必要に応じてその性能を向上させる手法としてスケルトン化を検討した。なお、今回の研究対象となった建物の該当地域はどちらも、津波浸水想定より予想されていた津波高さは最大 5.0 m とされていたので、本調査では浸水深 5.0 m まで算定した。

3.1 O 小学校の既存の建物性能での耐津波性能

3.1.1 O 小学校の建物概要

表 3-1 に本校舎の建物概要について示し、図 3-1～3-3 に各階平面図を示す。本校舎は RC 造 3 階建て、片廊下型の一般的な校舎であり、桁行方向の 1～3 階に RC 補強壁及び枠付き鉄骨ブレースによる耐震改修工事が行われている。

表 3-1 O 小学校の建物概要

竣工年	昭和 39 年 3 月	
構造種別	鉄筋コンクリート造ラーメン構造	
基礎	直接基礎	
地盤種別	第 2 種地盤	
建物規模	階数	3+0
	軒高	10.70 m
	基準階高さ	3.30 m
	各階床面積	
	3 階床面積	725.06 m ²
	2 階床面積	725.06 m ²
	1 階床面積	827.30 m ²
	延床面積	2277.42 m ²

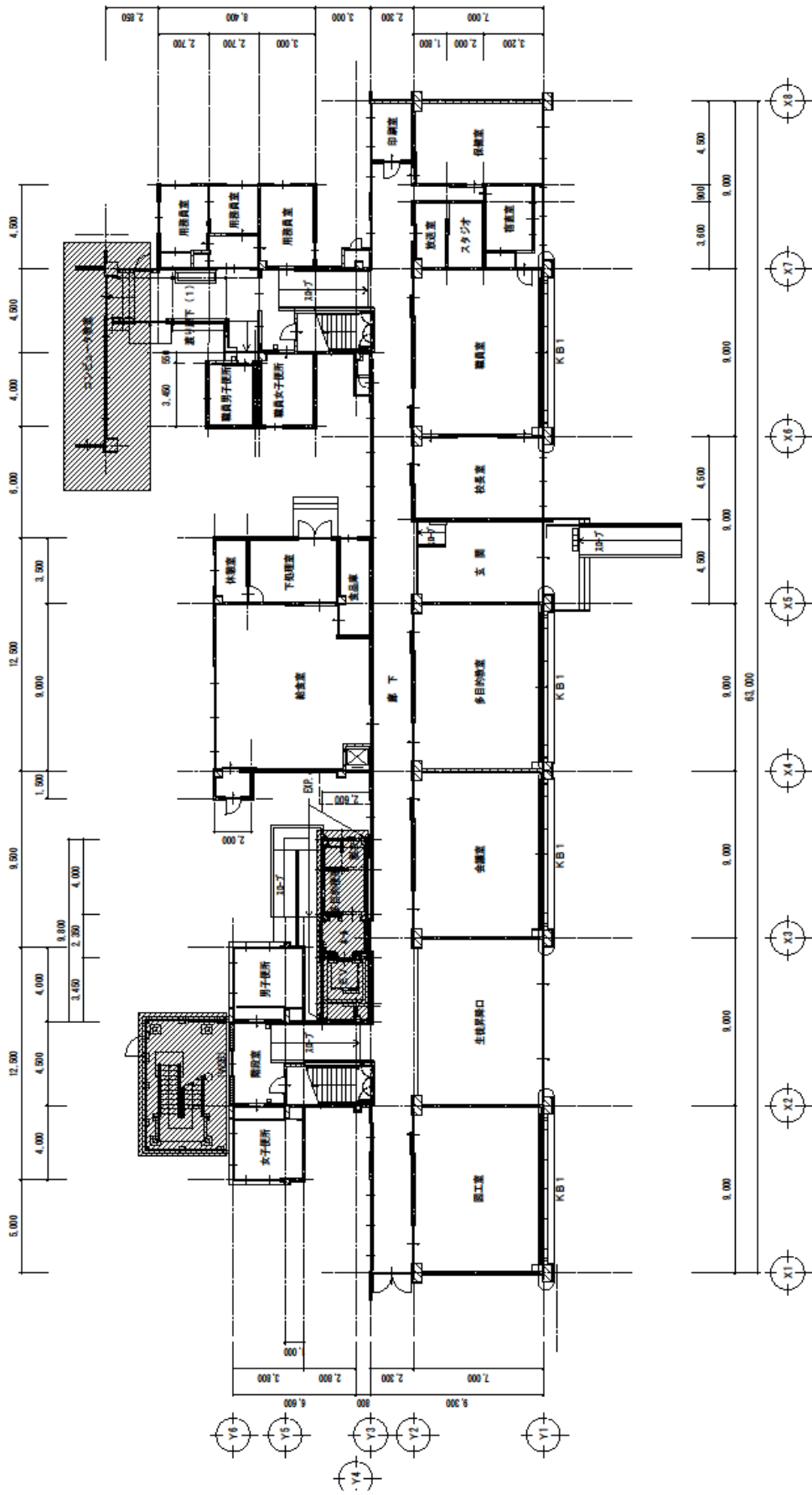


図 3-10 小学校 1 階平面図

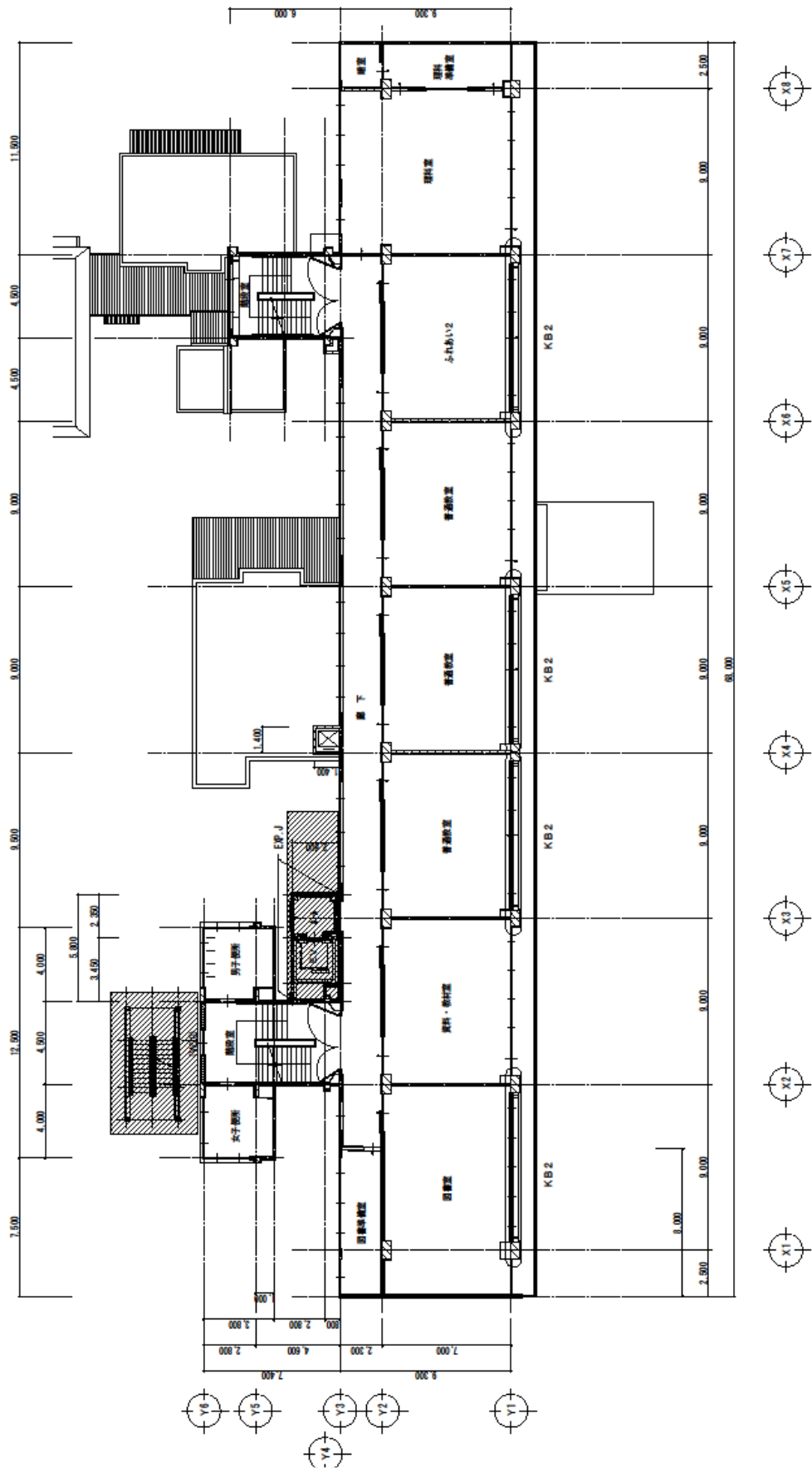


图 3-20 小学校 2 階平面図

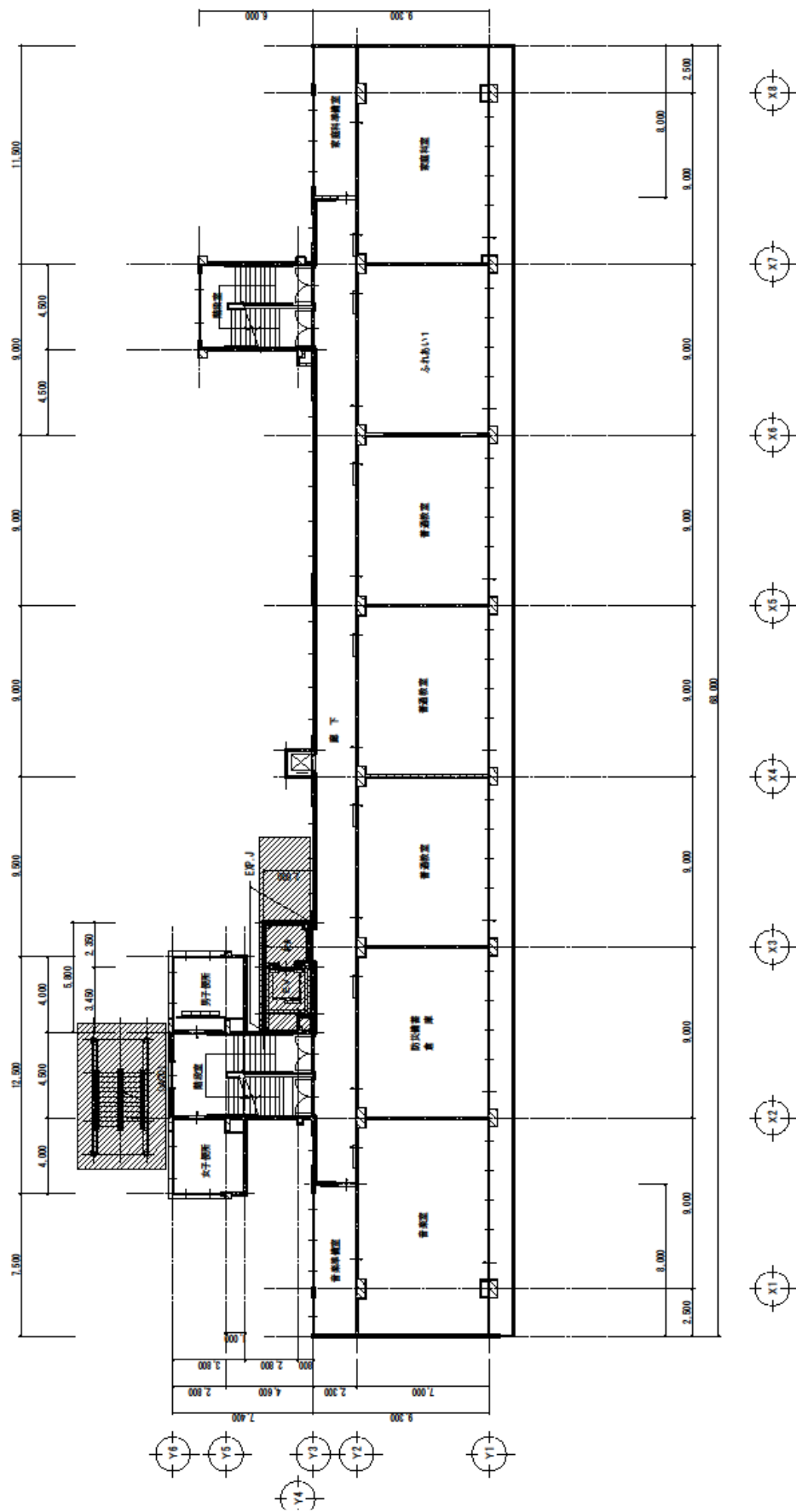


図 3-3 O 小学校 3 階平面図

3.1.2 O 小学校の開口部による津波の低減率

O 小学校の開口部による津波の低減率を 2.2.3 節のように算定した。表 3-2 に O 小学校の各方面における低減率の算定結果を示す。南面の低減率は 0.58 となったが、2.2.3 節で述べたように開口部による低減率の下限は 0.7 なので、低減率は 0.7 とした。建物用途が小学校なので、採光条件をよくするために、南北の開口部が多く、南北面の低減率が小さくなった。

表 3-2 各方面における開口部による津波荷重の低減率

受圧面	受圧面積(m ²)	開口部面積(m ²)	低減率
南面	760.8	319.3	0.7(0.58)
北面	761.0	172.5	0.77
東面	220.0	6.5	0.97
西面	218.9	10.4	0.95

3.1.3 O 小学校の建物重量

O 小学校の建物重量を 2.2.5 節のように算定した。O 小学校の各階の床面積、建物重量を表 3-3 に示し、2.2.4 節で示した各浮力条件での浮力を考慮した建物重量をそれぞれ表 3-4 に示す。O 小学校の場合、表 3-4-(a)で黄色く示したように、最も浮力の大きい条件(a)では浸水深が 3.2 m 以上で浮力が建物重量を上回る結果となり、この時点で現状の性能では、十分な耐津波性能を有していないことがわかった。

表 3 建物重量

各階床面積(m ²)		各階建物重量(kN)	
3 階床面積	725	3 階建物重量	9426
2 階床面積	725	2 階建物重量	9426
1 階床面積	827	1 階建物重量	10755
		基礎階重量	10755
		合計重量	40361

表 3-4-(a) 浮力条件(a)における浮力を考慮した建物重量

浮力を考慮した建物重量	
浸水深(m)	浮力を考慮した建物重量(kN)
5.0	-14770
4.8	-13148
4.6	-11527
4.4	-9905
4.2	-8284
4.0	-6662
3.8	-5041
3.6	-3419
3.4	-1798
3.2	-176
3.0	1445
2.8	3067
2.6	4688
2.4	6310
2.2	7931
2.0	9553
1.8	11174
1.6	12796
1.4	14417
1.2	16039
1.0	17660
0.8	19282
0.6	20903
0.4	22525
0.2	24146
0	40361

表 3-4-(b) 浮力条件(b)における浮力を考慮した建物重量

浮力を考慮した建物重量	
浸水深(m)	浮力を考慮した建物重量(kN)
5.0	4602
4.8	4873
4.6	5145
4.4	5417
4.2	6096
4.0	7717
3.8	9339
3.6	10960
3.4	12582
3.2	14203
3.0	15803
2.8	16677
2.6	17550
2.4	18423
2.2	19133
2.0	19354
1.8	19575
1.6	19797
1.4	20018
1.2	20239
1.0	20461
0.8	20682
0.6	20903
0.4	22525
0.2	24146
0	40361

表 3-4-(c) 浮力条件(c)における浮力を考慮した建物重量

浮力を考慮した建物重量	
浸水深(m)	浮力を考慮した建物重量(kN)
5.0	15343
4.8	15615
4.6	15886
4.4	16158
4.2	6096
4.0	7717
3.8	9339
3.6	10960
3.4	12582
3.2	14203
3.0	15803
2.8	16677
2.6	17550
2.4	18423
2.2	19133
2.0	19354
1.8	19575
1.6	19797
1.4	20018
1.2	20239
1.0	20461
0.8	20682
0.6	20903
0.4	22525
0.2	24146
0	40361

3.1.4 既存の建物性能での○小学校の限界浸水深算定結果

表 3-5、3-6 に滑動、転倒における限界浸水深の算定結果を示す。なお、倒壊は耐震補強工事がされているので、十分な水平耐力を有しているとして、算定は省略した。

滑動時、転倒時を比較すると、どの条件、どの受圧面であっても滑動の方が限界浸水深は小さくなった。これは、滑動では 1.0 未満である摩擦係数を乗じるのに対し、転倒では 10 m 以上となる支点から重心までの距離を乗じるため、滑動の方が耐力が小さくなり、限界浸水深が小さくなったと考えられる。

津波浸水想定より予想されていた津波高さは最大 5.0 m とされているが、滑動時の限界浸水深が上回ることはなく、既存 RC 建物をそのまま津波避難場所として運用する場合、十分な耐津波性能を有していないことが確認できた。

表 3-5 滑動時の限界浸水深(m)

浮力条件	条件(a)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
南面	1.6	1.6	1.8	2.0	2.0	2.2	2.2	2.4	2.4
北面	1.4	1.6	1.6	1.8	2.0	2.2	2.2	2.4	2.4
東面	2.0	2.0	2.2	2.4	2.4	2.6	2.6	2.6	2.8
西面	2.0	2.0	2.2	2.4	2.4	2.6	2.6	2.6	2.8
浮力条件	条件(b)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
南面	1.8	2.0	2.2	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6
北面	1.8	2.0	2.2	2.6	2.8	3.0	3.2	3.2	3.4
東面	2.6	3.0	3.0	3.4	3.6	3.8	3.8	4.0	4.0
西面	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	3.8	4.0	4.0
浮力条件	条件(c)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
南面	1.8	2.0	2.2	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6
北面	1.8	2.0	2.2	2.6	2.8	3.0	3.2	3.2	3.4
東面	2.6	3.0	3.0	3.4	3.6	3.8	3.8	4.0	4.0
西面	2.8	3.0	3.0	3.4	3.6	3.8	3.8	4.0	4.0

表 3-6 転倒時の限界浸水深(m)

浮力条件	条件(a)		
水深係数	$a=3.0$	$a=2.0$	$a=1.5$
南面	2.6	3.0	3.0
北面	2.6	2.8	3.0
東面	3.0	3.0	3.0
西面	3.0	3.0	3.0
浮力条件	条件(b)		
水深係数	$a=3.0$	$a=2.0$	$a=1.5$
南面	3.6	4.6	5.0 m 以上
北面	3.4	4.2	5.0 m 以上
東面	5.0 m 以上	5.0 m 以上	5.0 m 以上
西面	5.0 m 以上	5.0 m 以上	5.0 m 以上
浮力条件	条件(c)		
水深係数	$a=3.0$	$a=2.0$	$a=1.5$
南面	3.6	5.0 m 以上	5.0 m 以上
北面	3.4	5.0 m 以上	5.0 m 以上
東面	5.0 m 以上	5.0 m 以上	5.0 m 以上
西面	5.0 m 以上	5.0 m 以上	5.0 m 以上

3.2 O 小学校のスケルトン化の検討

3.1 節の結果を受け、限界浸水深の向上を図るために O 小学校のスケルトン化を提案した。スケルトン化とは壁を取り除き、柱や梁などの構造躯体のみにすることであり、これにより津波を受ける受圧面積を小さくすることで津波荷重を低減させ、水を流入させることで浮力の影響を小さくし、限界浸水深の向上を図る。しかし、壁を取り除く都合上、耐震性能が低下するので、その点を考慮する必要があり、耐震性能についても計算し直す必要がある。

3.2.1 O 小学校のスケルトン化による津波の低減率

スケルトン化による津波荷重の低減率を 3.1.2 節と同様に算定した。表 3-7 に O 小学校の各方面における低減率の算定結果を示す。スケルトン化の場合、受圧面の柱、梁以外の面積が開口部面積となる。

表 3-7 のカッコ内に示す値は既存の建物性能での低減率である。スケルトン化では 3.1.2 節と違い、低減率の下限 0.7 を設けないので、既存の建物性能での低減率に比べ、大幅に減少し、南北面、東西面どちらも半分程度となった。

表 3-7 各方面におけるスケルトン化による津波荷重の低減率

受圧面	受圧面積(m ²)	開口部面積(m ²)	低減率(スケルトン化前の低減率)
南面	760.8	243.5	0.32 (0.7)
北面	761.0	243.5	0.32 (0.77)
東面	220.2	94.7	0.43 (0.97)
西面	218.9	94.1	0.43 (0.95)

表 3-7 の結果をもとに一例として南面におけるスケルトン化前後の津波荷重の算定結果を表 3-8 に示す。スケルトン化が 2.2.1 節の(1)式で表される津波荷重の算定に与える変化は開口部による低減率のみなので、スケルトン化による津波荷重の低減率と開口部による津波の低減率の比がそのまま津波荷重の低減率となり、各方面およそ半減する結果となった。

表 3-8 南面におけるスケルトン化前後の津波荷重

南面に作用する津波荷重(kN)			
	スケルトン化前	スケルトン化後	スケルトン化前/スケルトン化後
$h \backslash a$	3.0	3.0	3.0
5.0	48313	22400	0.46
4.8	45180	20948	0.46
4.6	42048	19496	0.46
4.4	38916	18043	0.46
4.2	35784	16591	0.46
4.0	32652	15139	0.46
3.8	29520	13687	0.46
3.6	26458	12267	0.46
3.4	23565	10926	0.46
3.2	20839	9662	0.46
3.0	18282	8477	0.46
2.8	15894	7369	0.46
2.6	13674	6340	0.46
2.4	11622	5389	0.46
2.2	9739	4515	0.46
2.0	8024	3720	0.46
1.8	6477	3003	0.46
1.6	5099	2364	0.46
1.4	3889	1803	0.46
1.2	2848	1320	0.46
1.0	1974	915	0.46
0.8	1264	586	0.46
0.6	711	330	0.46
0.4	316	146	0.46
0.2	79	37	0.46
0	0	0	

3.2.2 ○ 小学校のスケルトン化による建物重量の補正值

スケルトン化による建物重量の補正值を 2.6.2 節と同様に算定した。表 3-9 に ○ 小学校の各階における補正值の算定結果を示す。各階の用途にあまり違いがないので、各階で建物重量の補正值はあまり変わらなかった。

スケルトン化によって津波荷重が 5 割ほどになったのに対し、建物重量は 8 割ほどで抑えられた。

表 3-9 各階におけるスケルトン化による建物重量の補正值

階	壁面積(m ²)	床面積(m ²)	建物重量の補正值
3 階	61.84	725.06	0.92
2 階	280.76	725.06	0.72
1 階	284.05	827.30	0.74
基礎階	228.24	827.30	0.78

3.2.3 ○ 小学校のスケルトン化後の浮力を考慮した建物重量

スケルトン化により建物重量が低下するので浮力を考慮した建物重量を再度算定した。建物重量は 3.1.3 節と同様に算定した。2.2.4 節で示した浸水条件におけるそれぞれの結果を表 3-10 に示す。なお、スケルトン化により必ず建物内に水が流入するので 2.2.4 節で示した浮力条件(a)については考慮しない。

○ 小学校では、スケルトン化によって建物重量が小さくなったことでもともと安全であった条件(b)においても、当該地区における津波浸水想定 of 最大値である 5.0 m となる津波の場合、建物重量が負の値となり、水に浮いてしまうためスケルトン化だけでは耐津波性能は不十分とわかる。これを解決するにはコンクリートを増し打ちするなどして建物重量を大きくする必要がある。しかし、コンクリートを増し打ちすることで受圧面積も大きくなるので、そのことを考慮する必要がある。

表 3-10-(b) スケルトン化後の浮力条件(b)における浮力を考慮した建物重量

スケルトン化した浮力を考慮した建物重量	
浸水深(m)	浮力を考慮した建物重量(kN)
5.0	-116
4.8	155
4.6	427
4.4	698
4.2	970
4.0	1241
3.8	1377
3.6	2999
3.4	4620
3.2	6242
3.0	7357
2.8	8230
2.6	9104
2.4	9977
2.2	10687
2.0	10908
1.8	11129
1.6	11351
1.4	11572
1.2	11793
1.0	12015
0.8	12236
0.6	12457
0.4	14079
0.2	15700
0	31915

表 3-10-(c) スケルトン化後の浮力条件(c)における浮力を考慮した建物重量

スケルトン化後の浮力を考慮した建物重量	
浸水深(m)	浮力を考慮した建物重量(kN)
5.0	6897
4.8	7169
4.6	7440
4.4	7712
4.2	7983
4.0	8255
3.8	1377
3.6	2999
3.4	4620
3.2	6242
3.0	7357
2.8	8230
2.6	9104
2.4	9977
2.2	10687
2.0	10908
1.8	11129
1.6	11351
1.4	11572
1.2	11793
1.0	12015
0.8	12236
0.6	12457
0.4	14079
0.2	15700
0	31915

3.2.4 ○ 小学校のスケルトン化後の限界浸水深算定結果

3.1.4 節と同様にスケルトン化後の滑動、転倒における限界浸水深を求めた結果を表 3-11、表 3-12 にそれぞれ示す。表中に緑色で示した条件がスケルトン化によって限界浸水深が向上した条件であり、黄色で示した条件がスケルトン化によって限界浸水深が低下した条件である。3.2.1 節で述べたようにスケルトン化によって津波荷重を半減したにも関わらず、限界浸水深が向上した条件より、むしろ限界浸水深が低下した条件の方が多く、転倒においては限界浸水深が向上した条件は存在しなかった。限界浸水深が向上しなかった原因は直接基礎の建物では建物底面の摩擦力や転倒モーメントで津波荷重に抵抗するため、建物重量の減少の影響を大きく受けるからだと考えられる。

表 3-11 スケルトン化後の滑動時の限界浸水深(m)

浮力条件	条件(b)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
南面(壁あり)	1.8	2.0	2.2	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6
南面(壁無し)	2.0	2.2	2.4	2.8	2.8	3.0	3.2	3.2	3.4
北面(壁あり)	1.8	2.0	2.2	2.6	2.8	3.0	3.2	3.2	3.4
北面(壁無し)	2.0	2.2	2.4	2.8	2.8	3.0	3.2	3.2	3.4
東面(壁あり)	2.6	3.0	3.0	3.4	3.6	3.8	3.8	4.0	4.0
東面(壁無し)	2.8	3.0	3.0	3.2	3.4	3.4	3.4	3.6	3.6
西面(壁あり)	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	3.8	4.0	4.0
西面(壁無し)	2.8	3.0	3.0	3.2	3.4	3.4	3.4	3.6	3.6
浮力条件	条件(c)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
南面(壁あり)	1.8	2.0	2.2	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6
南面(壁無し)	2.0	2.2	2.4	2.8	2.8	3.0	3.2	3.2	3.4
北面(壁あり)	1.8	2.0	2.2	2.6	2.8	3.0	3.2	3.2	3.4
北面(壁無し)	2.0	2.2	2.4	2.8	2.8	3.0	3.2	3.2	3.4
東面(壁あり)	2.6	3.0	3.0	3.4	3.6	3.8	3.8	4.0	4.0
東面(壁無し)	2.8	3.0	3.0	3.2	3.4	3.4	3.4	3.6	3.6
西面(壁あり)	2.8	3.0	3.0	3.4	3.6	3.8	3.8	4.0	4.0
西面(壁無し)	2.8	3.0	3.0	3.2	3.4	3.4	3.4	3.6	3.6

表 3-12 スケルトン化後の転倒時の限界浸水深(m)

浮力条件	条件(b)		
水深係数	$a=3.0$	$a=2.0$	$a=1.5$
南面(壁あり)	3.6	4.6	5.0m 以上
南面(壁無し)	3.4	3.8	4.2
北面(壁あり)	3.4	4.2	5.0m 以上
北面(壁無し)	3.4	3.6	4.2
東面(壁あり)	5.0m 以上	5.0m 以上	5.0m 以上
東面(壁無し)	3.8	4.6	4.6
西面(壁あり)	5.0m 以上	5.0m 以上	5.0m 以上
西面(壁無し)	3.8	4.6	4.6
浮力条件	条件(c)		
水深係数	$a=3.0$	$a=2.0$	$a=1.5$
南面(壁あり)	3.6	5.0m 以上	5.0m 以上
南面(壁無し)	3.4	5.0m 以上	5.0m 以上
北面(壁あり)	3.4	5.0m 以上	5.0m 以上
北面(壁無し)	3.4	5.0m 以上	5.0m 以上
東面(壁あり)	5.0m 以上	5.0m 以上	5.0m 以上
東面(壁無し)	5.0m 以上	5.0m 以上	5.0m 以上
西面(壁あり)	5.0m 以上	5.0m 以上	5.0m 以上
西面(壁無し)	5.0m 以上	5.0m 以上	5.0m 以上

3.3 ○ 小学校のスケルトン化後の必要保有水平耐力及び保有水平耐力

スケルトン化により壁が無くなるので地震に対する耐力が低下するため、スケルトン化後の○小学校にかかる地震力、スケルトン化後の必要保有水平耐力と保有水平耐力を算定し、必要保有水平耐力と保有水平耐力の比較した結果を示す。

3.3.1 ○ 小学校のスケルトン化後の地震力の算定

(8)式から地震層せん断力を求める。

$$Q_i = C_i \sum_{j=i}^3 W_j, \quad C_i = ZR_t A_i C_0 \quad (8)$$

(8)式内の文字式については地震地域係数 $Z=1.0$ 、振動特性係数 $R_t=1.0$ であり、標準せん断力係数 C_0 は中規模地震時の $C_0=0.2$ 、大規模地震時の $C_0=1.0$ の2つの条件で算定した。地震層せん断力の高さ方向分布係数 A_i は(9)式、(10)式より算定した。

$$A_i = 1 + \left(\frac{1}{\sqrt{\alpha_i}} - \alpha_i \right) \frac{2T}{1+3T} \quad (9)$$

$$\alpha_i = \sum_{j=i}^3 W_j / \sum_{j=1}^3 W_j \quad (10)$$

建物重量 W は 3.1.3 節で求めたように各階床面積に一般的な RC 建造物の単位床面積重量である 13 kN/m^2 を乗じたものに 3.2.2 節の表 3-9 と同様の補正値を乗じて算定した。建物重量、 A_i 分布についてまとめたものを表 3-13 に、地震荷重についてまとめたものを表 3-14 に示す。

表 3-13 建物重量と A_i 分布

階	階高(m)	床面積(m ²)	補正值	各階重量 $W_i(\text{kN})$	合計重量 $W(\text{kN})$	A_i 分布
3	3.5	725.06	0.92	8685	8685	1.33
2	3.3	725.06	0.72	6795	15480	1.15
1	3.3	827.30	0.74	8006	23486	1.00
F	—	827.30	0.78	8429	31915	—

※基礎部の地下の地震層せん断力は、地下の全荷重に水平震度 k を乗じた地震力と、地上から伝わる地震層せん断力との和より求めている。

表 3-14 地震荷重

階	中規模地震($C_0=0.2$)			大規模地震($C_0=1.0$)		
	層せん断 力係数 C	層せん断 力 $Q(\text{kN})$	層水平力 $H(\text{kN})$	層せん断 力係数 C	層せん断 力 $Q(\text{kN})$	層水平力 $H(\text{kN})$
3	0.27	2314	2314	1.33	11571	11571
2	0.23	3558	1244	1.15	17790	6220
1	0.20	4697	1139	1.00	23486	5696
F	0.1	5540	843	0.1	24329	843

3.3.2 ○ 小学校の必要保有水平耐力の算定

必要保有水平耐力は(11)式で求められる。

$$Q_{un} = D_s F_{es} Q_{ud} \quad (11)$$

Q_{un} :必要保有水平耐力

D_s :構造特性係数

F_{es} :形状係数

Q_{ud} :地震層せん断力

今回の計算では構造特性係数 D_s は最も条件の良い 0.3 と最も条件の悪い 0.55 の場合で行い、形状係数 F_{es} は 1.0 として必要保有水平耐力 Q_{un} を求めた。地震層せん断力 Q_{ud} は前節で求めたものを使用した。それぞれの場合の必要保有水平耐力 Q_{un} の算定結果を表 3-15 に示す。この必要保有水平耐力以上の保有水平耐力を有していれば本建物は安全といえる。

表 3-15 必要保有水平耐力

階	中規模地震、 $D_s=0.3$	中規模地震、 $D_s=0.55$	大規模地震、 $D_s=0.3$	大規模地震、 $D_s=0.55$
	3	694	1273	3471
2	1067	1957	5337	9785
1	1409	2583	7046	12917
F	1662	3047	7299	13381

3.3.3 ○ 小学校の保有水平耐力の算定

RC の保有水平耐力を「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 2018」⁽⁷⁾より、次の(12)式、(13)式を用いて柱、梁の保有水平耐力を求める。

$$\text{柱} : M_y = \{g_1 q + 0.5\eta_0(1 - \eta_0)\}\sigma_B b D^2 \quad (12)$$

$$g_1 = j_t / D$$

$$q = p_t \sigma_y / \sigma_B$$

$$p_t = a_t / (b D)$$

$$\eta_0 = N / (b D \sigma_B)$$

j_t = 引張圧縮鉄筋重心間距離

σ_y = 鉄筋の降伏応力

σ_B = コンクリートの圧縮強度

$$\text{梁} : M_y = 0.9 a_t \sigma_y d \quad (13)$$

a_t = 引張鉄筋断面積

d = 有効せい

3.3.4 建物の崩壊形

崩壊形は建物の壊れ方のことであり、柱、梁のヒンジの発生箇所によって決まる。崩壊形のメカニズムについて図 3-4 に示す。

崩壊形には各階の梁にヒンジが発生する全体崩壊と柱にヒンジが発生する層崩壊がある。その中でも長い時間をかけ各階にヒンジを発生させ、高いエネルギー吸収が期待でき、避難する時間を稼ぐことが出来る全体崩壊が望ましいとされている。そのため、本建物でも梁にヒンジが発生すると仮定し、梁の耐力を保有水平耐力とし、節点振り分け法により求めた。

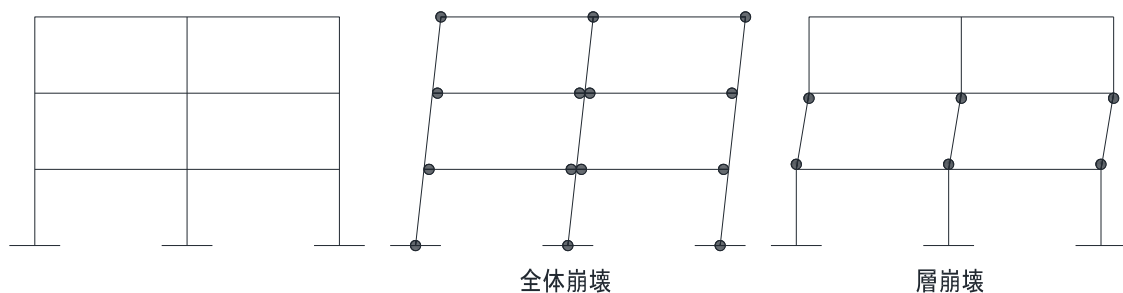


図 3-4 崩壊形のメカニズム

3.3.5 保有水平耐力と必要保有水平耐力の比較

保有水平耐力と必要保有水平耐力をまとめたものを表 3-16 に示す。保有水平耐力は長手方向と短手方向の揺れに対する保有水平耐力、必要保有水平耐力は中規模地震時における最も変形能力が高い場合の構造特性係数 $D_s=0.3$ と最も変形能力が低い場合の構造特性係数 $D_s=0.55$ 、大規模地震時における最も変形能力が高い場合の構造特性係数 $D_s=0.3$ と最も変形能力が低い場合の構造特性係数 $D_s=0.55$ の必要保有水平耐力を示している。表 3-16 からわかるように必要保有水平耐力をすべて満たしている条件は無く、大規模地震に対しては全くと言ってよいほど必要保有水平耐力を満たしていない。特に短手方向では耐力壁が無くなったことにより最も条件の緩い中規模地震かつ $D_s=0.3$ でも耐えることが出来ない結果となった。

そのため、スケルトン化して運用する場合、柱や梁にコンクリートを増し打ちするなどの補強が必須となるが、増し打ちにより受圧面が大きくなることでスケルトン化の効果も小さくなる。

表 3-16 保有水平耐力と必要保有水平耐力の比較(kN)

階	保有水平耐力		必要保有水平耐力			
	長手	短手	中規模地震 $D_s=0.3$	中規模地震 $D_s=0.55$	大規模地震 $D_s=0.3$	大規模地震 $D_s=0.55$
3	1520	1106	694	1273	3471	6364
2	1929	1002	1067	1957	5337	9785
1	2140	1277	1409	2583	7046	12917

3.3.6 保有水平における懸念点

今回の保有水平耐力の計算では略算式をそのまま使用している。しかし、〇小學校は昭和 38 年設立であり、フックはあるものの、異形鉄筋ではなく、丸鋼が使われている。近年の RC 造であれば鉄筋は異形鉄筋を使用することがほとんどであり、丸鋼は異形鉄筋に比べ、付着強度が小さいので今回使用した略算式をそのまま使用できるか疑問が残る。そのため、前節の結果の他に、安全側の評価を行うため、丸鋼と異形鉄筋の付着強度の比を補正值として保有水平耐力を計算した。補正值は(14)式で計算し、補正後の保有水平耐力と必要保有水平耐力の比較を表 3-17 に示す。表 3-17 より、付着強度の補正が妥当であれば長手方向であっても最も緩い条件である中規模地震、 $D_s=0.3$ でも耐えられなくなり、本校舎を補強しても避難場所として使用できるか疑問である。

$$(\text{付着強度による補正值}) = \frac{\text{丸鋼の付着強度}}{\text{異形鉄筋の付着強度}} = \frac{6}{100} \frac{F_c}{\frac{F_c}{10}} = 0.6 \quad (14)$$

表 3-17 補正後の保有水平耐力と必要保有水平耐力の比較

階	保有水平耐力		必要保有水平耐力			
	長手	短手	中規模地震 $D_s=0.3$	中規模地震 $D_s=0.55$	大規模地震 $D_s=0.3$	大規模地震 $D_s=0.55$
3	912	664	694	1273	3471	6364
2	1157	601	1067	1957	5337	9785
1	1284	766	1409	2583	7046	12917

3.3.7 O 小学校のケーススタディまとめ

本調査では O 小学校校舎の耐津波性能評価及び耐津波性能向上手法に関する調査研究を行った。調査の結果、O 小学校では転倒より滑動の方が厳しく、既存校舎の耐津波性能は不十分であり、既存の建物を津波避難場所として運用する場合、耐津波性能を有していない可能性があることがわかった。

そして、耐津波性能向上手法として O 小学校のスケルトン化を提案し、スケルトン化によって津波荷重を半減させることが出来た。しかし、直接基礎である O 小学校では、スケルトン化によって建物重量が小さくなることで津波に対する抵抗力が小さくなり、結果として耐津波性能の向上はほとんど見られず悪化した面もあった。加えて、スケルトン化によって耐力壁を取り除かれたことにより、耐震性能が大きく低下し、保有水平耐力が必要保有水平耐力を満たすのが非常に困難であることが分かった。

O 小学校ではスケルトン化の効果が期待していた結果を得られなかったが、直接基礎ではなく、杭基礎であれば津波による滑動に対し杭の許容せん断耐力で抵抗するので、スケルトン化による建物重量の低下の影響を受けず、限界浸水深の向上が見込める。しかし、転倒においては建物の抵抗モーメントと杭の引き抜き耐力で抵抗するため、建物重量の影響を受けるので注意が必要である。それでも、スケルトン化しても杭の引き抜き耐力に影響は無く、杭が存在する分、直接基礎より建物重量も大きくなると考えられるのでスケルトン化を最大限に活用するのであれば直接基礎より杭基礎が適切であると考えられる。

また、スケルトン化によって耐力壁を取り除いてしまう都合上、十分な耐震性能を確保するには壁依存度の低いラーメン構造が適切だと考えられる。

3.4 S 小学校のケーススタディ

3.4.1 S 小学校の建物概要

表 3-18 に本校舎の建物概要について示し、図 3-5、3-6 に各階平面図を示す。本校舎は RC 造 2 階建て、片廊下型の一般的な校舎であり、2 階の多目的ホールの屋根が鉄骨造となっている。

表 3-18 S 小学校の建物概要

竣工年	昭和 61 年	
構造種別	鉄筋コンクリート造ラーメン構造一部鉄骨造	
基礎	直接基礎	
地盤種別	第 2 種地盤	
建物規模	階数	2+0
	軒高	12.35 m
	基準階高さ	3.75 m
	各階床面積	
	2 階床面積	1112.93 m ²
	1 階床面積	1189.95 m ²
	延床面積	2277.42 m ²

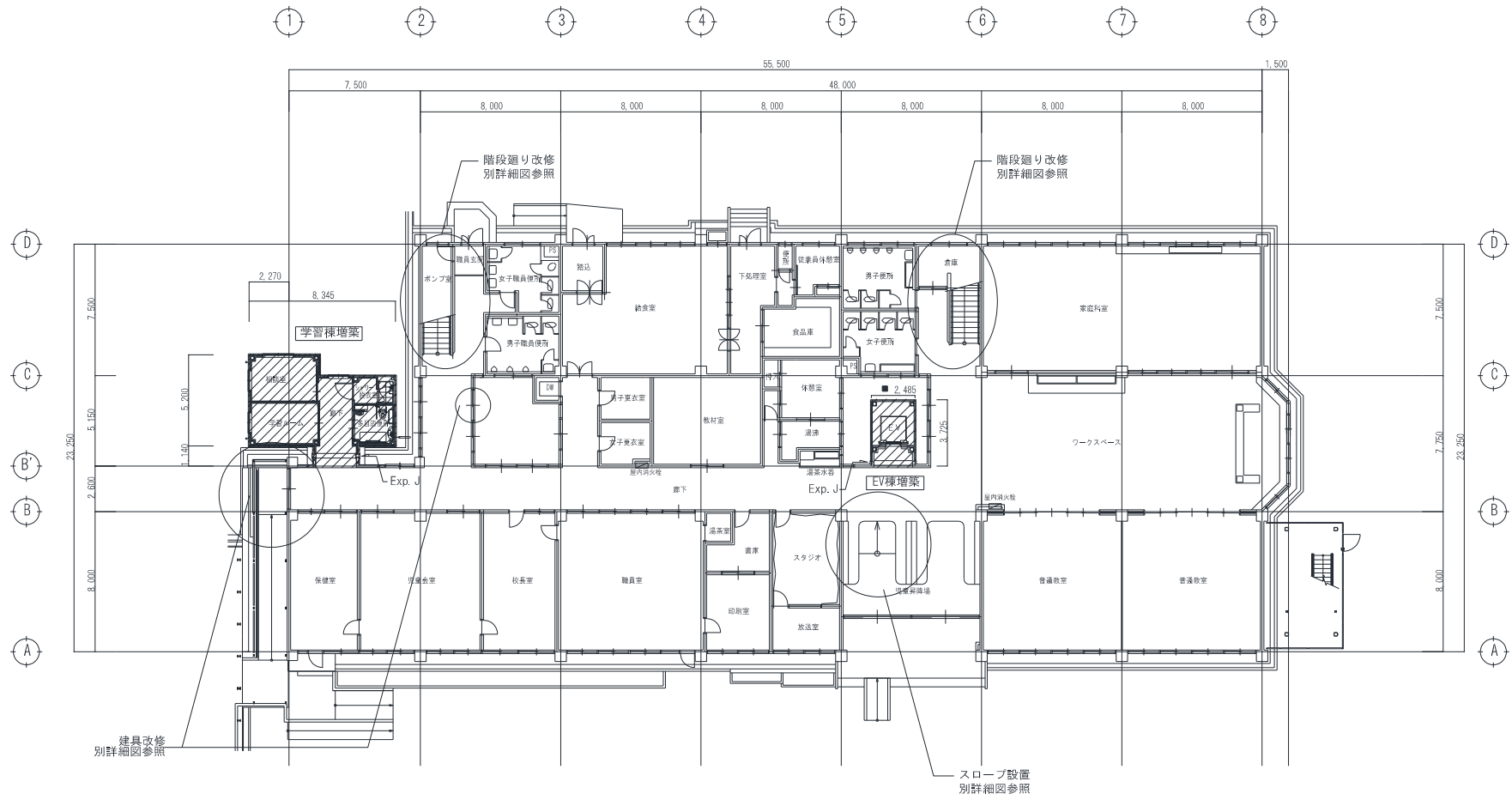


図 3-5 S 小学校 1 階平面図

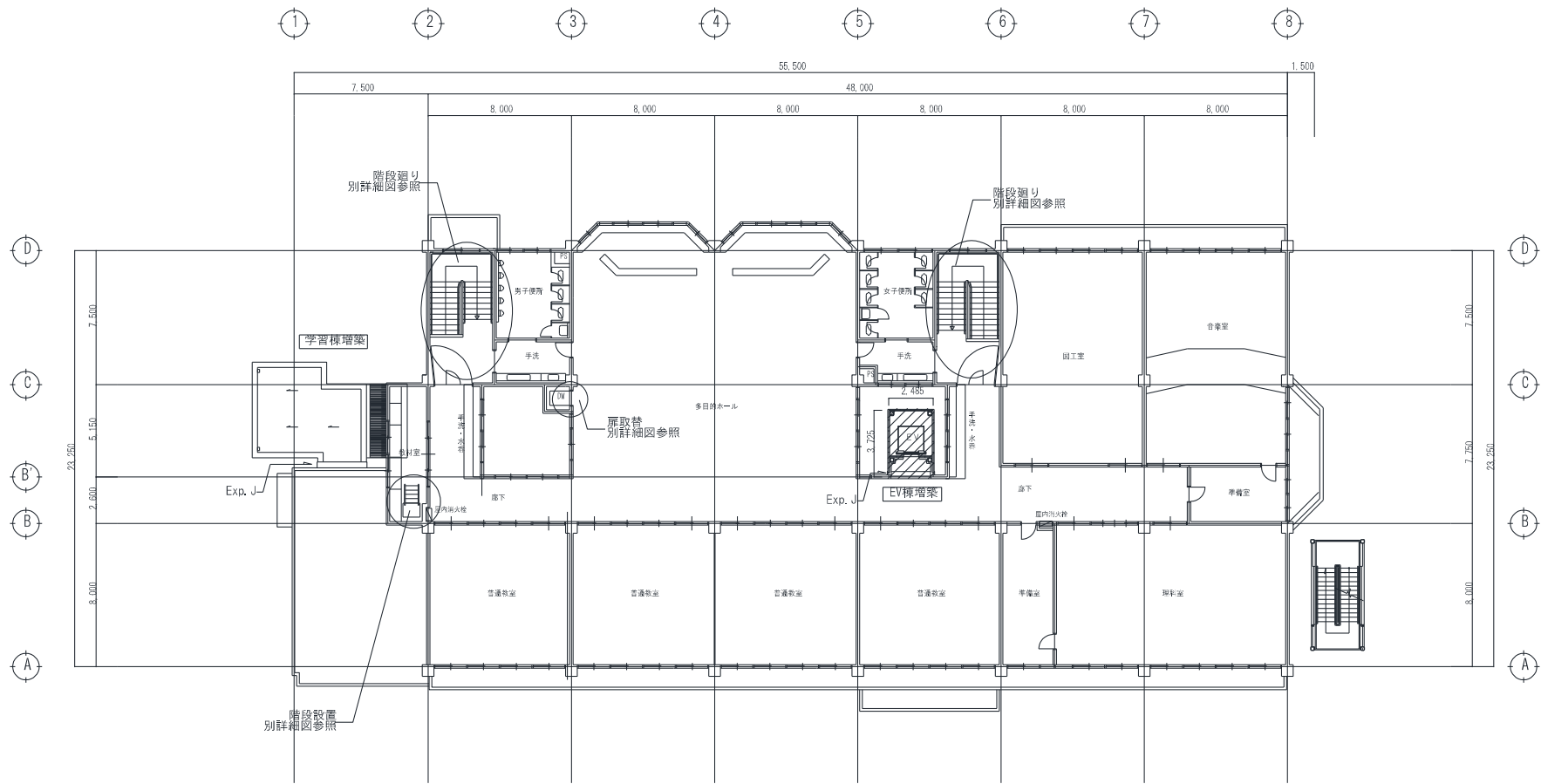


图 3-6 S 小学校 2 階平面图

3.4.2 S 小学校の開口部による津波の低減率

S 小学校の開口部による津波の低減率を O 小学校と同様に 2.2.3 節のように算定した。表 3-19 に S 小学校の各方面における低減率の算定結果を示す。南面の低減率は 0.63 となったが、2.2.3 節で述べたように開口部による低減率の下限は 0.7 なので、低減率は 0.7 とした。O 小学校同様、S 小学校の建物用途が小学校なので、採光条件をよくするために、南北の開口部が多く、南北面の低減率が小さくなった。

表 3-19 各方面における開口部による津波荷重の低減率

受圧面	受圧面積(m ²)	開口部面積(m ²)	低減率
南面	595.14	220.70	0.7 (0.63)
北面	597.11	144.73	0.76
東面	268.01	33.68	0.87
西面	272.84	13.71	0.95

3.4.3 S 小学校の建物重量

S 小学校の建物重量を 2.2.5 節のように算定した。S 小学校は図 3-7 に示すように 2 階の一部が S 造となっているので O 小学校のように RC 造建物の単位床面積重量 13 kN/m² を乗じるだけでは不十分だと考えられ、S 造建物の単位床面積重量 7 kN/m² も用いる必要があると考えられる。表 3-20 に RC 造と S 造の床面積を示す。この面積比から 2 階の単位床面積重量を設定した。2 階床面積重量は次式とした。

$$13 \times \text{RC 造床面積} / 2 \text{ 階床面積} + 7 \times \text{S 造床面積} / 2 \text{ 階床面積} = 11.99$$

また、屋階は高い片流れ屋根となっているため、体積は通常の半分とみなし、単位床面積重量も通常の半分として計算した。表 3-21 に建物重量を求めたものを示し、表 3-21 に 2.2.4 節で示した各浮力条件での浮力を考慮した建物重量をそれぞれ示す。黄色で示した値は浮力により負の値となった建物重量である。負の値となっているので、水に浮くため摩擦力や転倒に抵抗するモーメント等が発生せず、津波に抵抗できなくなる。建物内に水が流入しなかった場合、浸水深 2.4 m で水に浮くことになり、建物内に水が流入する工夫が必要である。S 小学校は 2 階建なので、O 小学校に比べて 1 階あたりの床面積が大きくなり、空気層の体積も大きくなるため、条件(a)のときの浮力の影響が大きく、O 小学校の 3.2 m より小さくなった。しかし、水が流入すれば階高も高い分、浮力の変化も少なく、O 小学校と建物重量にあまり変わりはない。

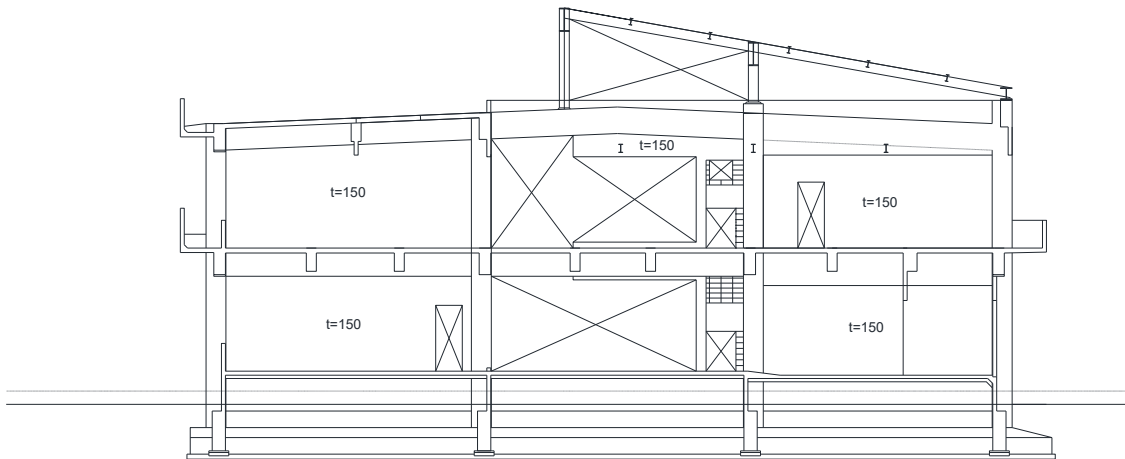


図 3-7 S 小学校軸組図

表 3-20 RC 造、S 造の床面積(m²)

階	RC	S
2 階	924.92	118.01
1 階	1189.95	0

表 3-21 建物重量

階	床面積(m ²)	単位床面積重量 (kN/m ²)	建物重量(kN)
屋階	213.10	3.5	746
2 階	1112.93	11.99	13340
1 階	1189.95	13	15469
基礎階	1189.95	13	15469
合計	3705.93		45025

表 3-22-(a) 浮力条件(a)における浮力を考慮した建物重量

浮力を考慮した建物重量	
浸水深(m)	浮力を考慮した建物重量(kN)
5.0	-32524
4.8	-30192
4.6	-27860
4.4	-25528
4.2	-23195
4.0	-20863
3.8	-18531
3.6	-16198
3.4	-13866
3.2	-11534
3.0	-9201
2.8	-6869
2.6	-4537
2.4	-2205
2.2	128
2.0	2460
1.8	4792
1.6	7125
1.4	9457
1.2	11789
1.0	14122
0.8	16454
0.6	18786
0.4	21118
0.2	23451
0	45025

表 3-22-(b) 浮力条件(b)における浮力を考慮した建物重量

浮力を考慮した建物重量	
浸水深(m)	浮力を考慮した建物重量(kN)
5.0	4276
4.8	4596
4.6	7072
4.4	9404
4.2	11133
4.0	11453
3.8	11773
3.6	12092
3.4	12412
3.2	12732
3.0	13052
2.8	13372
2.6	13692
2.4	14001
2.2	14308
2.0	14614
1.8	14921
1.6	15228
1.4	15534
1.2	15841
1.0	16147
0.8	16454
0.6	18786
0.4	21118
0.2	23451
0	45025

表 3-22-(c) 浮力条件(c)における浮力を考慮した建物重量

浮力を考慮した建物重量	
浸水深(m)	浮力を考慮した建物重量(kN)
5.0	9853
4.8	10173
4.6	7072
4.4	9404
4.2	11133
4.0	11453
3.8	11773
3.6	12092
3.4	12412
3.2	12732
3.0	13052
2.8	13372
2.6	13692
2.4	14001
2.2	14308
2.0	14614
1.8	14921
1.6	15228
1.4	15534
1.2	15841
1.0	16147
0.8	16454
0.6	18786
0.4	21118
0.2	23451
0	45025

3.4.4 既存の建物性能での S 小学校の限界浸水深算定結果

表 3-23、3-24 に滑動、転倒における限界浸水深の算定結果を示す。滑動時、転倒時を比較すると、O 小学校と同様にどの条件、どの受圧面であっても滑動の方が限界浸水深は小さくなった。また、S 小学校と O 小学校の限界浸水深を比較すると、滑動では S 小学校の方が限界浸水深が小さく、転倒では S 小学校の方が限界浸水深が大きくなった。これは S 小学校の方が床面積の大きいので、空気層が大きくなり、浮力の影響を受けやすいので、滑動耐力が小さくなりやすいが、転倒耐力は支点と重心の距離が大きいため、転倒時の限界浸水深が大きくなったと考えられる。

S 小学校の予想されていた津波高さは最大 5.0 m とされているが、滑動時の限界浸水深が上回ることはなく、S 小学校でも既存 RC 建物をそのまま津波避難場所として運用する場合、十分な耐津波性能を有していないことが確認できた。

表 3-23 滑動時の限界浸水深(m)

浮力条件	条件(a)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
南面	1.4	1.4	1.4	1.6	1.6	1.8	1.8	1.8	1.8
北面	1.2	1.4	1.4	1.6	1.6	1.6	1.8	1.8	1.8
東面	1.6	1.6	1.6	1.8	1.8	1.8	2.0	2.0	2.0
西面	1.4	1.6	1.6	1.8	1.8	1.8	1.8	2.0	2.0
浮力条件	条件(b)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
南面	1.6	1.8	2.0	2.4	2.8	3.0	3.2	3.6	3.8
北面	1.6	1.8	2.0	2.4	2.6	2.8	3.0	3.4	3.6
東面	2.4	2.6	2.8	3.2	3.6	3.8	4.2	4.4	4.4
西面	2.2	2.4	2.6	3.2	3.4	3.6	4.0	4.2	4.4
浮力条件	条件(c)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
南面	1.6	1.8	2.0	2.4	2.8	3.0	3.2	3.6	3.8
北面	1.6	1.8	2.0	2.4	2.6	2.8	3.0	3.4	3.6
東面	2.4	2.4	2.8	3.2	3.4	3.8	4.2	4.2	4.4
西面	2.2	2.4	2.6	3.2	3.4	3.6	4.0	4.2	4.4

表 3-24 転倒時の限界浸水深(m)

浮力条件	条件(a)		
水深係数	$a=3.0$	$a=2.0$	$a=1.5$
南面	2.0	2.0	2.0
北面	2.0	2.0	2.0
東面	2.0	2.2	2.2
西面	2.0	2.2	2.2
浮力条件	条件(b)		
水深係数	$a=3.0$	$a=2.0$	$a=1.5$
南面	4.2	4.6	5.0m 以上
北面	4.2	4.8	5.0m 以上
東面	5.0m 以上	5.0m 以上	5.0m 以上
西面	5.0m 以上	5.0m 以上	5.0m 以上
浮力条件	条件(c)		
水深係数	$a=3.0$	$a=2.0$	$a=1.5$
南面	4.2	5.0 m 以上	5.0 m 以上
北面	4.2	5.0 m 以上	5.0 m 以上
東面	5.0 m 以上	5.0 m 以上	5.0 m 以上
西面	5.0 m 以上	5.0 m 以上	5.0 m 以上

3.5 S 小学校のスケルトン化の検討

3.4 節の結果を受け、限界浸水深の向上を図るために S 小学校でも O 小学校同様にスケルトン化を提案した。S 小学校でも壁を取り除き、柱や梁などの構造躯体のみにし、受圧面積を小さくすることで津波を低減させ、水を流入させることで浮力の影響を小さくし、限界浸水深の向上を図る。しかし、壁を取り除く都合上、耐震性能が低下するので、S 小学校においても、耐震性能について計算し直す必要がある。

3.5.1 S 小学校のスケルトン化による津波の低減率

スケルトン化による津波荷重の低減率を 3.4.2 節と同様に算定した。表 3-25 に S 小学校の各方面における低減率の算定結果を示す。スケルトン化の場合、受圧面の柱、梁以外の面積が開口部面積となる。

表 3-25 のカッコ内に示す値は既存の建物性能での低減率である。スケルトン化では 3.4.2 節と違い、低減率の下限 0.7 を設けない。S 小学校では、既存の建物性能での低減率に比べ、低減率は開口部が多い南北面はおよそ 30%減少し、開口部が少ない東西面は半分以下となった。S 小学校でも、スケルトン化前後の津波荷重の低減率の比に対応して、津波荷重が減少した。

表 3-25 各方面におけるスケルトン化による津波荷重の低減率

受圧面	受圧面積(m ²)	開口部面積(m ²)	低減率(スケルトン化前の低減率)
南面	595.14	351.61	0.41 (0.7)
北面	597.11	327.25	0.45(0.76)
東面	268.01	153.71	0.43(0.87)
西面	272.84	165.10	0.39(0.95)

3.5.2 S 小学校のスケルトン化による建物重量の補正值

スケルトン化による建物重量の補正值を 2.6.2 節と同様に算定した。表 3-26 に S 小学校の各階における補正值の算定結果を示す。O 小学校と比べると、建物重量の補正值はあまり変わらないが、津波荷重の低減率は S 小学校の方が大きいので、S 小学校の方がスケルトン化の効果が得られにくい結果となった。これは、S 小学校の方が柱が多いので、スケルトン化後でも受圧面が大きくなったのだと考えられる。

表 3-26 各階におけるスケルトン化による建物重量の補正值

階	壁面積(m ²)	床面積(m ²)	建物重量の補正值
屋階	9.77	213.1	0.96
2 階	327.00	1112.93	0.77
1 階	459.58	1189.95	0.72
基礎階	361.16	1189.95	0.77

3.5.3 S 小学校のスケルトン化後の浮力を考慮した建物重量

スケルトン化により建物重量が低下するので浮力を考慮した建物重量を再度算定した。建物重量は O 小学校と同様に算定した。2.2.4 節で示した浸水条件におけるそれぞれの結果を表 3-27 に示す。なお、スケルトン化により必ず建物内に水が流入するので 2.2.4 節で示した浮力条件(a)については考慮しない。

S 小学校では、スケルトン化によって建物重量が小さくなったことで、O 小学校と違い、条件(b)だけでなく、条件(c)でも浮力により、水に浮く結果となった。これは、3.4.3 節でも述べたように、S 小学校は 1 階あたりの床面積が大きいことが浮力を大きくしてしまう原因であると考えられる。

表 3-27-(b) スケルトン化後の浮力条件(b)における浮力を考慮した建物重量

浮力を考慮した建物重量	
浸水深(m)	浮力を考慮した建物重量(kN)
5.0	-6195
4.8	-5875
4.6	-3399
4.4	-1067
4.2	159
4.0	479
3.8	799
3.6	1118
3.4	1438
3.2	1758
3.0	2078
2.8	2398
2.6	2718
2.4	3027
2.2	3334
2.0	3641
1.8	3947
1.6	4254
1.4	4560
1.2	4867
1.0	5173
0.8	5480
0.6	7812
0.4	10145
0.2	12477
0	34051

表 3-27-(c) スケルトン化後の浮力条件(c)における浮力を考慮した建物重量

浮力を考慮した建物重量	
浸水深(m)	浮力を考慮した建物重量(kN)
5.0	-1121
4.8	-801
4.6	-3399
4.4	-1067
4.2	159
4.0	479
3.8	799
3.6	1118
3.4	1438
3.2	1758
3.0	2078
2.8	2398
2.6	2718
2.4	3027
2.2	3334
2.0	3641
1.8	3947
1.6	4254
1.4	4560
1.2	4867
1.0	5173
0.8	5480
0.6	7812
0.4	10145
0.2	12477
0	34051

3.5.4 O 小学校のスケルトン化後の限界浸水深算定結果

3.4.4 節と同様にスケルトン化後の滑動、転倒における限界浸水深を求めた結果を表 3-28、表 3-29 にそれぞれ示す。黄色で示した条件がスケルトン化によって限界浸水深が低下した条件であるが、S 小学校ではすべての条件で限界浸水深が低下した。S 小学校、O 小学校では建物重量の減少量の割合はあまり変わらないが、南北面の低減率比が O 小学校の方が小さく、O 小学校で限界浸水深が大きくなった条件も南北面であったため、この差が S 系小学校の限界浸水深が大きくならなかった原因であると考えられる。

表 3-28 スケルトン化後の滑動時の限界浸水深(m)

浮力条件	条件(b)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
南面(壁あり)	1.6	1.8	2.0	2.4	2.8	3.0	3.2	3.6	3.8
南面(壁無し)	1.2	1.4	1.4	1.8	1.8	2.0	2.2	2.2	2.4
北面(壁あり)	1.6	1.8	2.0	2.4	2.6	2.8	3.0	3.4	3.6
北面(壁無し)	1.2	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.0	2.2	2.4
東面(壁あり)	2.4	2.6	2.8	3.2	3.6	3.8	4.2	4.4	4.4
東面(壁無し)	1.8	1.8	2.0	2.4	2.4	2.6	2.8	2.8	3.0
西面(壁あり)	2.2	2.4	2.6	3.2	3.4	3.6	4.0	4.2	4.4
西面(壁無し)	1.8	1.8	2.0	2.4	2.4	2.6	2.8	2.8	3.0
浮力条件	条件(c)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
南面(壁あり)	1.6	1.8	2.0	2.4	2.8	3.0	3.2	3.6	3.8
南面(壁無し)	1.2	1.4	1.4	1.8	1.8	2.0	2.2	2.2	2.4
北面(壁あり)	1.6	1.8	2.0	2.4	2.6	2.8	3.0	3.4	3.6
北面(壁無し)	1.2	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.0	2.2	2.4
東面(壁あり)	2.4	2.4	2.8	3.2	3.4	3.8	4.2	4.2	4.4
東面(壁無し)	1.8	1.8	2.0	2.4	2.4	2.6	2.8	2.8	3.0
西面(壁あり)	2.2	2.4	2.6	3.2	3.4	3.6	4.0	4.2	4.4
西面(壁無し)	1.8	1.8	2.0	2.4	2.4	2.6	2.8	2.8	3.0

表 3-29 スケルトン化後の転倒時の限界浸水深(m)

浮力条件	条件(b)		
水深係数	$a=3.0$	$a=2.0$	$a=1.5$
南面(壁あり)	4.2	4.6	5.0m 以上
南面(壁無し)	2.6	3.2	3.6
北面(壁あり)	4.2	4.8	5.0m 以上
北面(壁無し)	2.8	3.4	3.8
東面(壁あり)	5.0m 以上	5.0m 以上	5.0m 以上
東面(壁無し)	3.6	4.0	4.2
西面(壁あり)	5.0m 以上	5.0m 以上	5.0m 以上
西面(壁無し)	3.6	4.0	4.2
浮力条件	条件(c)		
水深係数	$a=3.0$	$a=2.0$	$a=1.5$
南面(壁あり)	4.2	5.0m 以上	5.0m 以上
南面(壁無し)	2.6	3.2	3.6
北面(壁あり)	4.2	5.0m 以上	5.0m 以上
北面(壁無し)	2.8	3.4	3.8
東面(壁あり)	5.0m 以上	5.0m 以上	5.0m 以上
東面(壁無し)	3.6	4.0	4.2
西面(壁あり)	5.0m 以上	5.0m 以上	5.0m 以上
西面(壁無し)	3.6	4.0	4.2

3.6 S 小学校のスケルトン化後の必要保有水平耐力及び保有水平耐力

3.3 節と同様、スケルトン化により壁が無くなるので地震に対する耐力が低下するため、スケルトン化後の S 小学校にかかる地震力、スケルトン化後の必要保有水平耐力と保有水平耐力を算定し、必要保有水平耐力と保有水平耐力の比較した結果を示す。

3.6.1 S 小学校のスケルトン化後の地震力の算定

3.3.1 節と同様に、地震層せん断力を求めた。建物重量、 A_i 分布についてまとめたものを表 3-30 に、地震荷重についてまとめたものを表 3-31 に示す。

表 3-30 建物重量と A_i 分布

階	階高(m)	床面積(m ²)	補正值	各階重量 W_i (kN)	合計重量 W (kN)	A_i 分布
2	3.76	1112.93	0.77	11027	11027	1.29
1	3.91	1189.95	0.72	11159	22186	1.00
F	—	1189.95	0.77	11867	34054	—

※基礎部の地下の地震層せん断力は、地下の全荷重に水平震度 k を乗じた地震力と、地上から伝わる地震層せん断力との和より求めている。

表 3-31 地震荷重

階	中規模地震($C_0=0.2$)			大規模地震($C_0=1.0$)		
	層せん断 力係数 C	層せん断 力 Q (kN)	層水平力 H (kN)	層せん断 力係数 C	層せん断 力 Q (kN)	層水平力 H (kN)
2	0.26	2847	2847	1.29	14237	14237
1	0.20	4437	1590	1.00	22186	7949
F	0.1	5624	1187	0.1	23373	1187

3.6.2 S 小学校の必要保有水平耐力の算定

3.3.2 節と同様に、構造特性係数 D_s は最も条件の良い 0.3 と最も条件の悪い 0.55 の場合で行い、形状係数 F_{es} は 1.0 として必要保有水平耐力 Q_{un} を求めた。それぞれの場合の必要保有水平耐力 Q_{un} の算定結果を表 3-32 に示す。この必要保有水平耐力以上の保有水平耐力を有していれば本建物は安全といえる。

表 3-32 必要保有水平耐力

階	中規模地震、 $D_s=0.3$	中規模地震、 $D_s=0.55$	大規模地震、 $D_s=0.3$	大規模地震、 $D_s=0.55$
2	975	1787	4874	8936
1	1331	2440	6656	12202
F	1687	3093	7012	12855

3.6.3 保有水平耐力と必要保有水平耐力の比較

保有水平耐力は、3.3.4 節と同様に全体崩壊形とし、梁の降伏耐力を保有水平耐力とした。保有水平耐力と必要保有水平耐力をまとめたものを表 3-33 に示す。

S 小学校では、O 小学校とは違い、中規模地震であれば、 $D_s=0.3$ と変形能力が高い場合に耐えられる結果となった。これは、S 小学校の方が柱、梁が多いので、耐力が大きくなったと考えられる。

しかし、S 小学校でも中規模地震で $D_s=0.3$ の場合のみであり、それ以外の条件では地震に耐えられない結果となった。

このことから、居室ごとに耐力壁が設けられているような壁依存度の高い建物ではスケルトン化は不適切であると考えられる。

O 小学校、S 小学校ともに、地震に対する耐力が不十分であるので、スケルトン化する場合、別途補強工事が必要となる。対策としては、柱、梁の断面積を大きくするために、コンクリートを増し打ちすることや、変形能力を向上させるために、鉄板や炭素繊維の巻き立て補強をすることなどが考えられる。

表 3-33 保有水平耐力と必要保有水平耐力の比較(kN)

階	保有水平耐力		必要保有水平耐力			
	長手	短手	中規模地震 $D_s=0.3$	中規模地震 $D_s=0.55$	大規模地震 $D_s=0.3$	大規模地震 $D_s=0.55$
2	3825	3849	975	1787	4874	8936
1	4692	4430	1331	2440	6656	12202

3.7 既存 RC 建物のケーススタディまとめ

この章では、津波避難場所としての運用が考えられている既存 RC 建物を対象に耐津波性能評価を行った。評価の結果、既存 RC 建物をそのまま利用する場合、十分な耐力を有していないことがわかった。

そこで、耐津波性能向上手法としてスケルトン化を提案し、津波荷重を半減させたが、限界浸水深の向上はあまり見られず、むしろ低下する条件もあった。これは、直接基礎であったため、建物重量の低下が耐力低下に大きな影響を与えたのだと考えられる。

また、壁を取り除いたことで、地震に対する耐力も大幅に減少し、十分な耐力を確保することが難しいことがわかった。

しかし、スケルトン化では津波荷重の大幅に減少することが確認でき、条件によっては限界浸水深の向上が見られたので、次章ではスケルトン化が有効となる建物の条件を検証する。

第4章 耐津波性能に対するスケルトン化の効果の検証

4.1 基準となるモデル建物の設定

4.2 スケルトン化前後の津波荷重の低減率と建物重量の補正值

4.3 滑動におけるスケルトン化の効果

4.3.1 滑動時の限界浸水深算定結果

4.3.2 滑動時の津波荷重の大きさがスケルトン化の効果に与える影響

4.3.3 滑動時の摩擦係数がスケルトン化の効果に与える影響

4.3.4 滑動時の基礎部の空気層がスケルトン化の効果に与える影響

4.3.5 滑動時の空気層の増減がスケルトン化の効果に与える影響

4.3.6 滑動時の津波の低減率と滑動耐力の低減率の関係

4.3.7 滑動時におけるスケルトン化の効果まとめ

4.4 転倒におけるスケルトン化の効果

4.4.1 転倒時の限界浸水深算定結果

4.4.2 転倒時の限界浸水深と滑動時の限界浸水深の比較

4.4.3 転倒時の津波荷重の大きさがスケルトン化の効果に与える影響

4.4.4 転倒時の基礎部の空気層がスケルトン化の効果に与える影響

4.4.5 転倒時の空気層の増減がスケルトン化の効果に与える影響

4.4.6 転倒時の津波の低減率と滑動耐力の低減率の関係

4.4.7 転倒時におけるスケルトン化の効果まとめ

4.5 耐津波性能に対するスケルトン化の効果の検証まとめ

第4章 耐津波性能に対するスケルトン化の効果の検証

3章では既存 RC 建物の耐津波性能向上手法として、スケルトン化を提案した。しかし、O 小学校では一部限界浸水深が向上したものの、S 小学校ではすべての条件で限界浸水深が低下し、スケルトン化で得られる効果に違いがあった。そこで、この章では建物のどのパラメータが耐津波性能に影響するかを調べる。

4.1 基準となるモデル建物の設定

建物のどのパラメータが耐津波性能に影響するかを検証するために基準となるモデル建物を設定した。床面積 16×30 m、基準階高さ 3.0 m の 3 階建ての RC 建物とし、GL から基礎底部までの高さを 1.5 m と設定した。図 4-1 に平面図、図 4-2、4-3 に Y 軸通り、X 軸通りの軸組み図、図 4-4 にアイソメ図を示す。この寸法は日本建築学会の「2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報」⁸⁾を参考に、X 方向と Y 方向の寸法値の比が 2:1 となるような建物として設定している。このモデル建物の寸法を変化させることで、耐津波性能の影響を調べる。寸法を変える都合上、長手面と短手面が変わるので、図 4-4 に示すように、X 方向の面を X 面、Y 方向の面を Y 面とする。

算定条件は表 4-1 に示す。パラメータは X 方向の寸法、Y 方向の寸法、階数、スケルトン化の有無、基礎底部から GL までの高さとした。黄色で示すパラメータがモデル建物から変更した値である。

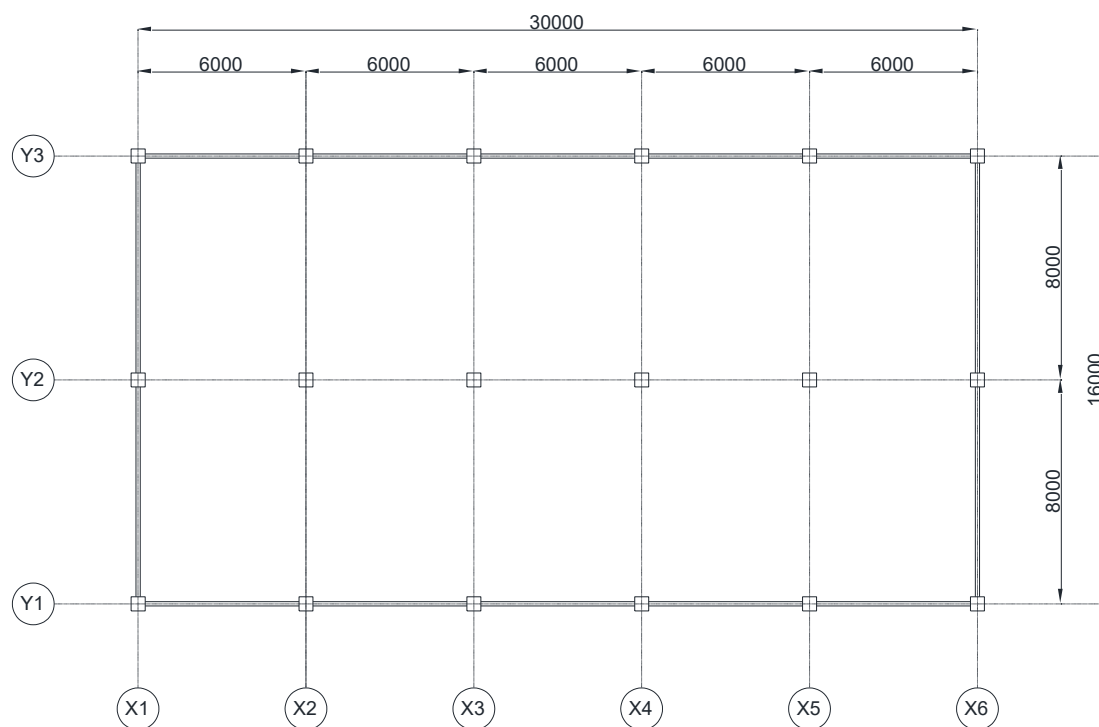


図 4-1 基準モデル 平面図

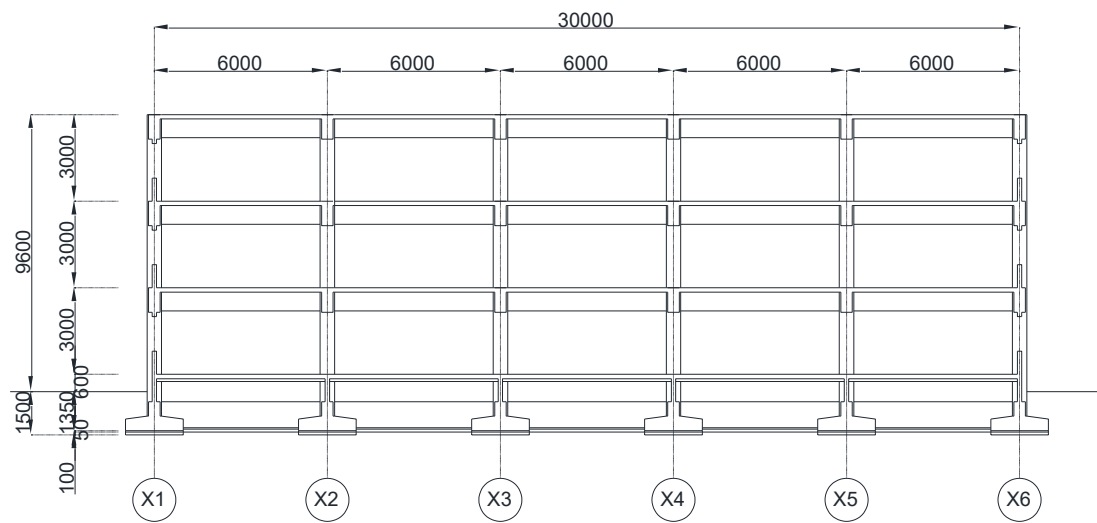


図 4-2 基準モデル Y 軸通り軸組図

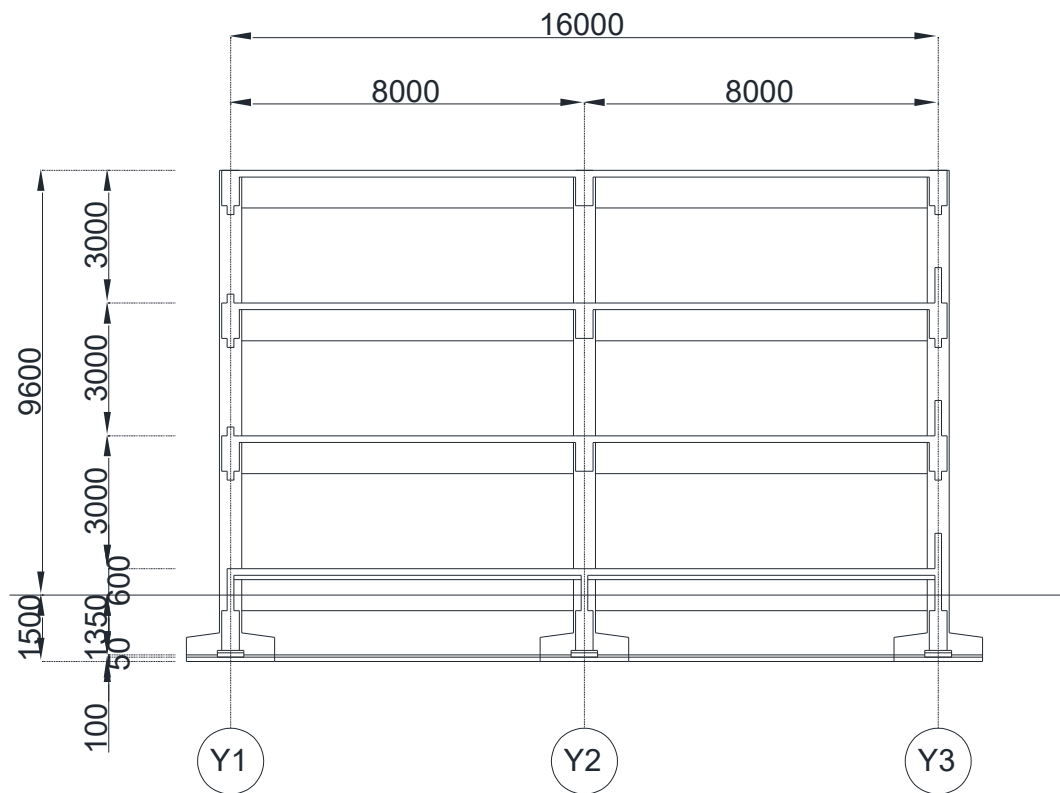


図 4-3 基準モデル X 軸通り軸組図

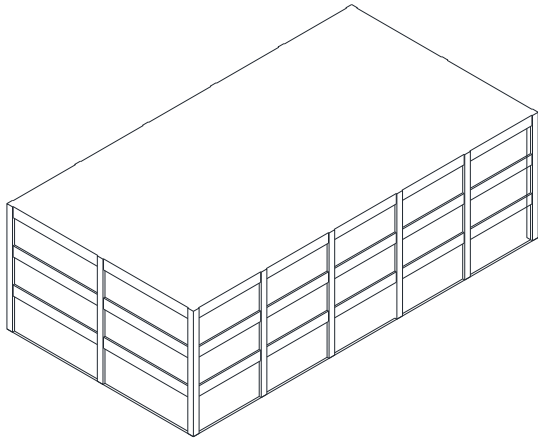


図 4-4 基準モデル アイソメ図

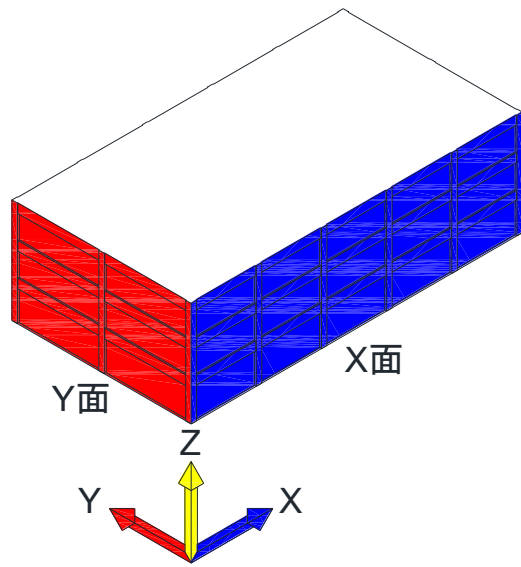


図 4-5 X面、Y面の概要

表 4-1 算定条件

条件	X	Y	階数	スケルトン化	基礎から GL までの高さ
条件 1	30 m	16 m	3 階	×	1.5 m
条件 2	30 m	16 m	3 階	○	1.5 m
条件 3	60 m	16 m	3 階	×	1.5 m
条件 4	60 m	16 m	3 階	○	1.5 m
条件 5	30 m	32 m	3 階	×	1.5 m
条件 6	30 m	32 m	3 階	○	1.5 m
条件 7	60 m	32 m	3 階	×	1.5 m
条件 8	60 m	32 m	3 階	○	1.5 m
条件 9	30 m	16 m	6 階	×	1.5 m
条件 10	30 m	16 m	6 階	○	1.5 m
条件 11	30 m	16 m	12 階	×	1.5 m
条件 12	30 m	16 m	12 階	○	1.5 m
条件 13	30 m	16 m	3 階	×	3.0 m
条件 14	30 m	16 m	3 階	○	3.0 m
条件 15	60 m	16 m	3 階	×	3.0 m
条件 16	60 m	16 m	3 階	○	3.0 m
条件 17	30 m	32 m	3 階	×	3.0 m
条件 18	30 m	32 m	3 階	○	3.0 m
条件 19	60 m	32 m	3 階	×	3.0 m
条件 20	60 m	32 m	3 階	○	3.0 m
条件 21	30 m	16 m	6 階	×	3.0 m
条件 22	30 m	16 m	6 階	○	3.0 m
条件 23	30 m	16 m	12 階	×	3.0 m
条件 24	30 m	16 m	12 階	○	3.0 m

4.2 スケルトン化前後の津波荷重の低減率と建物重量の補正值

2.2.3 節、2.6.1 節のように、開口部による津波の低減率、スケルトン化による津波荷重の低減率を算定した。なお、水の流入のために、開口部の高さ等は設定しているが、スケルトン化前の開口部による津波荷重の低減率は、計算しやすいように 1.0 とした。表 4-2 にスケルトン化前の算定条件である奇数番号の条件とスケルトン化後の算定条件である偶数番号の条件のスケルトン化前後の津波荷重の低減率の比、建物重量の補正值を示す。

スケルトン化前後の津波荷重の低減率比は、すべての条件で柱、梁の断面積、各階の階高を統一しているため、X 方向、Y 方向の寸法を倍にしても、受圧面、開口部ともに倍となるので、条件 2/条件 1～条件 8/条件 7、条件 14/条件 13～条件 20/条件 19 ではあまり変わらなかった。しかし、階数を増やす条件 10/条件 9、条件 12/条件 11、条件 22/条件 21、条件 24/条件 23 では、スケルトン化前後で受圧面が変わらない基礎部の影響が小さくなり、津波荷重の低減率の比が小さくなった。

建物重量の補正值は今回の計算では、内壁を考慮せず、外壁のみであったので、X 方向、Y 方向の寸法を倍にすると、建物内の密度が小さくなり、建物重量の補正值は大きくなった。なので、建物重量の点でも、壁依存度の低い建物がスケルトン化に適していると考えられる。

表 4-2 スケルトン化前後の津波荷重の低減率の比、建物重量の補正值

	X 面の津波荷重の 低減率の比	Y 面の津波荷重の 低減率の比	建物重量の補正值
条件 2/条件 1	0.38	0.39	0.78
条件 4/条件 3	0.38	0.39	0.81
条件 6/条件 5	0.38	0.38	0.84
条件 8/条件 7	0.38	0.38	0.88
条件 10/条件 9	0.36	0.37	0.76
条件 12/条件 11	0.35	0.36	0.74
条件 14/条件 13	0.38	0.39	0.78
条件 16/条件 15	0.38	0.39	0.81
条件 18/条件 17	0.38	0.38	0.84
条件 20/条件 19	0.38	0.38	0.88
条件 22/条件 21	0.36	0.37	0.76
条件 24/条件 23	0.35	0.36	0.74

4.3 滑動におけるスケルトン化の効果

4.3.1 滑動時の限界浸水深の算定結果

津波の浸水深の 15 m までの各条件の限界浸水深算定し、結果を表 4-3～4-8 に示す。また、15 m 以内に限界浸水深が無いものは **None** と表示している。

なお、スケルトン化後は必ず水が流入するので、水の流入しない浮力条件(a)は算定する必要はないが、今回の研究はスケルトン化の効果を検証するものであるため、スケルトン化の傾向などを知るために、スケルトン化後の算定条件である偶数番号の条件でも、浮力条件(a)の限界浸水深を算定した。

表 4-3 X 面浮力条件(a)の限界浸水深(m)

受圧面	X 面								
浮力条件	浮力条件(a)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
条件 1	1.71	1.84	1.96	2.22	2.37	2.49	2.59	2.73	2.84
条件 2	1.76	1.86	1.93	2.08	2.16	2.21	2.26	2.32	2.36
条件 3	1.71	1.85	1.97	2.23	2.37	2.49	2.60	2.74	2.84
条件 4	1.86	1.96	2.04	2.20	2.28	2.34	2.39	2.45	2.50
条件 5	2.15	2.29	2.41	2.67	2.80	2.90	3.00	3.11	3.19
条件 6	2.25	2.34	2.41	2.54	2.61	2.65	2.69	2.73	2.76
条件 7	2.15	2.30	2.42	2.67	2.81	2.91	3.00	3.11	3.20
条件 8	2.38	2.48	2.55	2.70	2.77	2.82	2.86	2.90	2.94
条件 9	2.67	2.91	3.12	3.62	3.90	4.14	4.37	4.66	4.91
条件 10	3.06	3.27	3.44	3.81	4.00	4.15	4.29	4.45	4.57
条件 11	4.04	4.44	4.79	5.63	6.14	6.57	6.99	7.56	8.04
条件 12	4.98	5.39	5.73	6.50	6.93	7.28	7.60	8.00	8.32
条件 13	1.22	1.31	1.38	1.54	1.63	1.69	1.75	1.82	1.88
条件 14	0.89	0.92	0.95	0.99	1.01	1.02	1.04	1.05	1.06
条件 15	1.23	1.31	1.39	1.54	1.63	1.69	1.75	1.83	1.88
条件 16	1.00	1.04	1.07	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.21
条件 17	1.50	1.58	1.65	1.79	1.86	1.91	1.96	2.01	2.05
条件 18	1.23	1.26	1.28	1.33	1.35	1.36	1.37	1.38	1.39
条件 19	1.50	1.58	1.65	1.79	1.86	1.91	1.96	2.01	2.05
条件 20	1.38	1.42	1.44	1.50	1.52	1.54	1.55	1.56	1.57
条件 21	2.34	2.55	2.73	3.14	3.38	3.57	3.75	3.99	4.19
条件 22	2.44	2.59	2.71	2.96	3.09	3.19	3.28	3.38	3.46
条件 23	3.81	4.19	4.51	5.30	5.77	6.17	6.55	7.07	7.51
条件 24	4.54	4.90	5.20	5.87	6.24	6.54	6.81	7.15	7.41

表 4-4 X 面浮力条件(b)の限界浸水深(m)

受圧面	X 面								
浮力条件	浮力条件(b)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
条件 1	2.04	2.26	2.46	2.92	3.13	3.31	3.47	3.75	4.05
条件 2	2.55	2.81	2.95	3.25	3.40	3.52	3.68	4.01	4.29
条件 3	2.05	2.27	2.47	2.93	3.14	3.32	3.48	3.76	4.06
条件 4	2.67	2.90	3.04	3.35	3.51	3.69	3.94	4.30	4.60
条件 5	2.81	3.02	3.20	3.59	3.94	4.25	4.56	4.99	5.36
条件 6	3.33	3.50	3.70	4.31	4.69	5.02	5.33	5.75	5.90
条件 7	2.82	3.03	3.20	3.60	3.96	4.27	4.58	5.01	5.38
条件 8	3.44	3.66	3.98	4.60	5.01	5.38	5.69	5.92	6.05
条件 9	3.03	3.32	3.56	4.30	4.77	5.19	5.62	6.09	6.45
条件 10	3.82	4.24	4.61	5.55	6.00	6.28	6.54	7.13	7.69
条件 11	4.39	4.90	5.35	6.39	7.06	7.70	8.34	9.16	9.83
条件 12	6.01	6.52	7.08	8.57	9.28	9.92	10.72	11.83	12.41
条件 13	1.49	1.66	1.81	2.19	2.41	2.61	2.80	2.95	3.08
条件 14	1.29	1.42	1.54	1.83	2.01	2.16	2.29	2.47	2.62
条件 15	1.50	1.67	1.82	2.19	2.42	2.62	2.81	2.96	3.08
条件 16	1.50	1.66	1.80	2.14	2.33	2.49	2.64	2.82	2.87
条件 17	2.07	2.29	2.48	2.88	3.03	3.15	3.26	3.39	3.48
条件 18	2.23	2.44	2.61	2.88	2.96	3.02	3.07	3.12	3.16
条件 19	2.08	2.30	2.49	2.89	3.04	3.16	3.26	3.39	3.49
条件 20	2.49	2.72	2.85	3.03	3.11	3.17	3.23	3.29	3.33
条件 21	2.74	3.01	3.22	3.78	4.19	4.56	4.93	5.45	5.87
条件 22	3.24	3.47	3.69	4.42	4.87	5.27	5.66	5.99	6.19
条件 23	4.17	4.64	5.07	6.10	6.67	7.27	7.88	8.74	9.34
条件 24	5.59	6.11	6.51	7.83	8.68	9.21	9.69	10.71	11.61

表 4-5 X 面浮力条件(c)の限界浸水深(m)

受圧面	X 面								
浮力条件	浮力条件(c)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
条件 1	2.04	2.26	2.46	2.92	3.13	3.31	3.47	4.24	4.59
条件 2	2.55	2.81	2.95	3.25	3.40	3.52	4.64	5.08	5.45
条件 3	2.05	2.27	2.47	2.93	3.14	3.32	3.48	4.25	4.60
条件 4	2.67	2.90	3.04	3.35	3.51	4.54	4.87	5.32	5.72
条件 5	2.81	3.02	3.20	3.59	4.46	4.82	5.18	5.68	5.96
条件 6	3.33	3.50	4.62	5.25	5.78	5.98	6.10	6.29	6.43
条件 7	2.82	3.03	3.20	4.06	4.48	4.84	5.20	5.70	5.97
条件 8	3.44	4.46	4.90	5.53	5.92	6.12	6.23	6.43	6.57
条件 9	3.03	3.32	3.56	4.52	5.02	5.46	5.88	6.33	7.11
条件 10	4.14	4.59	5.00	5.94	6.32	7.22	7.79	8.58	9.05
条件 11	4.49	5.01	5.47	6.51	7.40	8.07	8.74	9.51	10.58
条件 12	6.18	6.99	7.62	9.10	10.24	11.14	11.96	13.34	14.48
条件 13	1.49	1.66	1.81	2.19	2.41	2.61	2.80	2.95	3.08
条件 14	1.29	1.42	1.54	1.83	2.01	2.16	2.29	2.47	2.62
条件 15	1.50	1.67	1.82	2.19	2.42	2.62	2.81	2.96	3.08
条件 16	1.50	1.66	1.80	2.14	2.33	2.49	2.64	2.82	2.87
条件 17	2.07	2.29	2.48	2.88	3.03	3.15	3.26	3.39	3.48
条件 18	2.23	2.44	2.61	2.88	2.96	3.02	3.07	3.12	3.16
条件 19	2.08	2.30	2.49	2.89	3.04	3.16	3.26	3.39	3.49
条件 20	2.49	2.72	2.85	3.03	3.11	3.17	3.23	3.29	3.33
条件 21	2.74	3.01	3.22	4.03	4.47	4.86	5.25	5.80	6.14
条件 22	3.24	3.47	4.15	4.98	5.50	5.88	6.12	6.41	7.60
条件 23	4.27	4.76	5.20	6.23	7.03	7.66	8.30	9.12	10.03
条件 24	5.81	6.31	7.06	8.54	9.25	10.30	11.13	12.11	13.37

表 4-6 Y 面浮力条件(a)の限界浸水深(m)

受圧面	Y 面								
浮力条件	浮力条件(a)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
条件 1	2.10	2.24	2.36	2.62	2.75	2.86	2.95	3.07	3.16
条件 2	2.00	2.08	2.14	2.26	2.32	2.36	2.39	2.43	2.46
条件 3	2.54	2.68	2.79	3.02	3.13	3.21	3.28	3.36	3.42
条件 4	2.36	2.42	2.47	2.56	2.60	2.62	2.64	2.67	2.69
条件 5	2.11	2.25	2.37	2.63	2.76	2.87	2.96	3.08	3.16
条件 6	2.22	2.31	2.38	2.52	2.59	2.64	2.67	2.72	2.75
条件 7	2.55	2.69	2.80	3.02	3.13	3.22	3.29	3.37	3.43
条件 8	2.63	2.70	2.76	2.86	2.91	2.94	2.97	3.00	3.02
条件 9	3.37	3.65	3.88	4.42	4.72	4.96	5.18	5.47	5.69
条件 10	3.61	3.81	3.97	4.30	4.46	4.58	4.68	4.81	4.90
条件 11	5.21	5.69	6.11	7.09	7.66	8.14	8.59	9.19	9.69
条件 12	6.07	6.50	6.85	7.62	8.02	8.34	8.62	8.97	9.23
条件 13	1.47	1.55	1.62	1.76	1.84	1.89	1.94	1.99	2.03
条件 14	0.97	0.99	1.01	1.04	1.05	1.06	1.07	1.07	1.08
条件 15	1.72	1.80	1.86	1.97	2.02	2.06	2.09	2.13	2.15
条件 16	1.17	1.19	1.20	1.23	1.23	1.24	1.25	1.25	1.26
条件 17	1.47	1.56	1.63	1.77	1.84	1.89	1.94	2.00	2.04
条件 18	1.22	1.25	1.28	1.32	1.34	1.35	1.37	1.38	1.39
条件 19	1.73	1.80	1.86	1.97	2.02	2.06	2.09	2.13	2.15
条件 20	1.47	1.50	1.52	1.55	1.57	1.58	1.58	1.59	1.60
条件 21	2.94	3.17	3.36	3.80	4.04	4.23	4.40	4.62	4.80
条件 22	2.83	2.96	3.07	3.28	3.39	3.46	3.53	3.60	3.65
条件 23	4.91	5.35	5.74	6.64	7.17	7.60	8.02	8.56	9.01
条件 24	5.50	5.87	6.17	6.83	7.17	7.43	7.66	7.95	8.16

表 4-7 Y 面浮力条件(b)の限界浸水深(m)

受圧面	Y 面								
浮力条件	浮力条件(b)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
条件 1	2.71	2.95	3.12	3.51	3.81	4.12	4.42	4.84	5.20
条件 2	3.09	3.25	3.38	3.70	4.03	4.31	4.58	4.95	5.25
条件 3	3.40	3.65	3.98	4.64	5.08	5.48	5.80	6.02	6.19
条件 4	3.79	4.19	4.54	5.09	5.51	5.82	5.90	6.01	6.09
条件 5	2.73	2.96	3.14	3.53	3.84	4.14	4.45	4.87	5.23
条件 6	3.28	3.45	3.60	4.21	4.58	4.90	5.21	5.63	5.86
条件 7	3.42	3.68	4.01	4.66	5.11	5.51	5.82	6.04	6.21
条件 8	4.38	4.87	5.30	5.80	5.97	6.10	6.17	6.28	6.37
条件 9	3.92	4.36	4.74	5.72	6.17	6.52	7.00	7.71	8.34
条件 10	5.02	5.55	5.93	6.56	7.17	7.74	8.29	8.91	9.18
条件 11	5.90	6.46	7.01	8.50	9.29	10.01	10.82	11.93	12.66
条件 12	7.72	8.57	9.16	10.78	11.87	12.45	13.30	14.64	None
条件 13	2.00	2.21	2.40	2.83	2.98	3.10	3.21	3.34	3.44
条件 14	1.67	1.84	1.98	2.30	2.48	2.63	2.77	2.84	2.87
条件 15	2.71	2.90	3.02	3.28	3.41	3.50	3.58	3.83	4.05
条件 16	2.53	2.74	2.83	2.95	3.00	3.03	3.06	3.09	3.12
条件 17	2.01	2.23	2.41	2.84	2.99	3.11	3.22	3.35	3.45
条件 18	2.18	2.38	2.55	2.86	2.94	3.00	3.05	3.11	3.15
条件 19	2.73	2.91	3.03	3.29	3.42	3.51	3.59	3.85	4.06
条件 20	2.94	3.04	3.11	3.24	3.29	3.33	3.37	3.40	3.43
条件 21	3.48	3.83	4.17	5.01	5.54	5.94	6.23	6.61	7.13
条件 22	4.00	4.42	4.79	5.69	6.01	6.21	6.38	6.60	7.05
条件 23	5.61	6.16	6.63	8.02	8.88	9.46	10.18	11.27	12.09
条件 24	7.06	7.83	8.52	9.75	10.77	11.67	12.21	13.04	14.07

表 4-8 Y 面浮力条件(c)の限界浸水深(m)

受圧面	Y 面								
浮力条件	浮力条件(c)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
条件 1	2.71	2.95	3.12	3.51	4.31	4.66	5.01	5.50	5.86
条件 2	3.09	3.25	3.38	4.67	5.12	5.52	5.82	6.01	6.15
条件 3	3.40	4.20	4.63	5.28	5.82	6.06	6.21	6.46	7.82
条件 4	4.87	5.46	5.86	6.06	6.25	6.38	6.45	6.58	8.87
条件 5	2.73	2.96	3.14	3.53	4.34	4.69	5.04	5.53	5.88
条件 6	3.28	3.45	4.47	5.11	5.63	5.92	6.04	6.24	6.38
条件 7	3.42	4.24	4.67	5.32	5.84	6.08	6.23	6.48	7.87
条件 8	5.45	5.92	6.13	6.32	6.51	8.60	8.67	8.97	9.12
条件 9	4.12	4.58	4.98	5.96	6.41	7.23	7.74	8.61	9.13
条件 10	5.44	5.94	6.25	7.83	8.63	9.07	9.40	11.00	11.82
条件 11	6.01	6.59	7.35	8.88	9.89	10.77	11.65	12.91	14.03
条件 12	8.30	9.10	10.04	12.00	13.41	14.56	None	None	None
条件 13	2.00	2.21	2.40	2.83	2.98	3.10	3.21	3.34	3.44
条件 14	1.67	1.84	1.98	2.30	2.48	2.63	2.77	2.84	2.87
条件 15	2.71	2.90	3.02	3.28	3.41	3.50	3.58	5.06	5.38
条件 16	2.53	2.74	2.83	2.95	3.00	3.03	3.06	3.09	3.12
条件 17	2.01	2.23	2.41	2.84	2.99	3.11	3.22	3.35	3.45
条件 18	2.18	2.38	2.55	2.86	2.94	3.00	3.05	3.11	3.15
条件 19	2.73	2.91	3.03	3.29	3.42	3.51	3.59	5.09	5.40
条件 20	2.94	3.04	3.11	3.24	3.29	3.33	3.37	3.40	3.43
条件 21	3.48	4.08	4.44	5.34	5.88	6.21	6.52	7.62	8.24
条件 22	4.51	4.99	5.41	6.14	6.43	7.65	8.17	8.86	9.13
条件 23	5.75	6.30	6.98	8.45	9.25	10.22	11.05	12.11	13.29
条件 24	7.69	8.54	9.13	11.20	12.15	13.44	14.49	None	None

4.3.2 滑動時の津波荷重の大きさがスケルトン化の効果に与える影響

4.3.1 節の結果から、スケルトン化前の算定条件である奇数番号の条件とスケルトン化後の算定条件である偶数番号の条件の限界浸水深を、津波荷重の大きさに着目して比較した。津波荷重の大きさに着目して比較したグラフを付録 A に示す。一例として、X 方向の見付幅を 2 倍にした条件 3、条件 4 の Y 面の限界浸水深の比較をしたものを図 4-6 に示す。他の条件は巻末の付録 A に示す。縦軸はスケルトン化前後の限界浸水深の比を表し、これが赤い破線で示した 1.00 以上であればスケルトン化により限界浸水深が向上したものである。横軸は水深係数 a の違いを示している。青色の線が浮力条件(a)、赤色の線が浮力条件(b)、緑色の線が浮力条件(c)であり、円形の点が摩擦係数 $\mu=0.4$ 、三角形の点が摩擦係数 $\mu=0.5$ 、四角形の点が摩擦係数 $\mu=0.6$ となっている。そのため、線で繋がれた点は同じ滑動耐力であり、津波荷重のみに違いがある条件である。

グラフを見ると、右下がりの傾向があり、水深係数 $a=3.0$ のものが最も大きく、水深係数 $a=1.5$ のものが最も小さくなる傾向がある。これは、開口部による津波荷重の低減率は同じであるが、津波荷重が減少する量は津波荷重が大きいほど増えるので、滑動耐力との差が小さくなりやすいのだと考えられる。そのため、同じ条件であれば、Y 方向の見付幅が 2 倍となる条件 6/条件 5、条件 18/条件 17 以外は X 面の方が受圧面積が大きいので、スケルトン化の効果が大きく、O 小学校でもスケルトン化により限界浸水深が向上したのは長手面であった。

また、赤丸で示したように一部津波荷重が小さい方が限界浸水深の向上が見られる場合があるが、これは滑動耐力の方に原因があり、空気層の増減による急激な滑動耐力の変化でこのようなことが起こると考えられる。そのため、空気層が一定量増え続ける浮力条件(a)では、例外なく水深係数 $a=3.0$ のものが最も大きく、水深係数 $a=1.5$ のものが最も小さくなる。

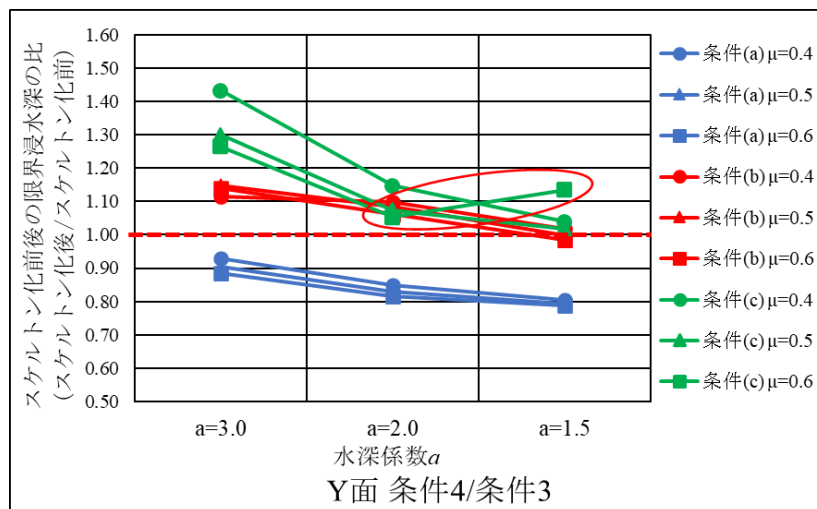


図 4-6 スケルトン化における水深係数 a の限界浸水深への影響の比較

4.3.3 滑動時の摩擦係数がスケルトン化の効果に与える影響

4.3.1 節の結果から、スケルトン化前の算定条件である奇数番号の条件とスケルトン化後の算定条件である偶数番号の条件の限界浸水深を、摩擦係数に着目して比較した。摩擦係数に着目して比較したグラフを付録 B に示す。一例として、X 方向の見付幅を 2 倍にした条件 3、条件 4 の X 面の限界浸水深の比較をしたものを図 4-7 に示す。他の条件は巻末の付録 B に示す。前節と同様に、縦軸はスケルトン化前後の限界浸水深の比を表し、これが赤い破線で示した 1.00 以上であればスケルトン化により限界浸水深が向上したものである。横軸は摩擦係数 μ の違いを示している。青色の線が浮力条件(a)、赤色の線が浮力条件(b)、緑色の線が浮力条件(c)であり、円形の点が水深係数 $a=3.0$ 、三角形の点が水深係数 $a=2.0$ 、四角形の点が水深係数 $a=1.5$ となっている。そのため、線で繋がれた点は同じ津波荷重の大きさであり、摩擦係数のみに違いがある条件である。

グラフを見ると、右下がりの傾向があり、摩擦係数 $\mu=0.4$ のものが最も大きく、摩擦係数 $\mu=0.6$ のものが最も小さくなる傾向がある。これは、スケルトン化による建物重量の補正值は同じであるが、滑動耐力が減少する量は摩擦係数が大きいほど増えるので、津波荷重との差が大きくなるのだと考えられる。

そのため、O 小学校でもスケルトン化により、限界浸水深が向上した条件の中で、浮力条件(b)、水深係数 $a=2.0$ のとき、摩擦係数 $\mu=0.4$ だけが向上し、摩擦係数 $\mu=0.5$ 、 0.6 では向上しないといったことが起こった。

また、赤丸で示したように一部摩擦係数が小さい方が限界浸水深の向上が見られる場合があるが、これも前節と同様、空気層の増減による急激な滑動耐力の変化でこのようなことが起こると考えられる。そのため、空気層が一定量増え続ける浮力条件(a)では、例外なく摩擦係数 $\mu=0.4$ のものが最も大きく、摩擦係数 $\mu=0.6$ のものが最も小さくなる。

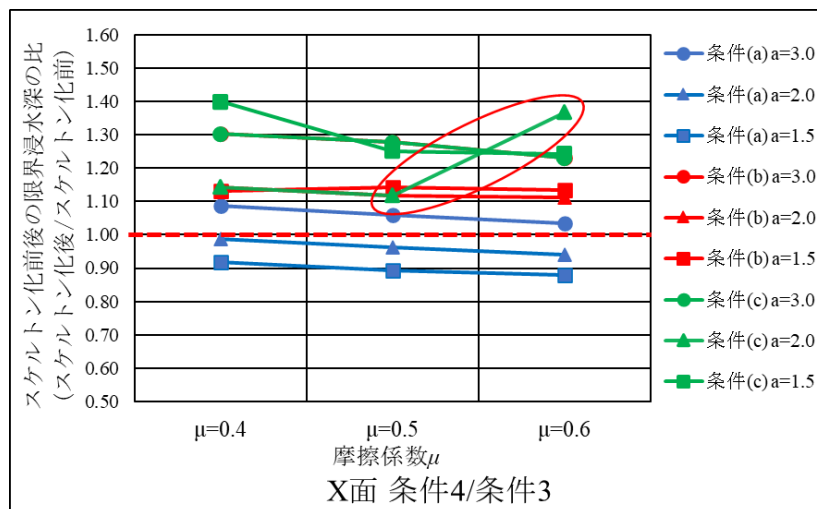


図 4-7 スケルトン化における摩擦係数 μ の限界浸水深への影響の比較

4.3.4 滑動時の基礎部の空気層がスケルトン化の効果に与える影響

4.3.1 節の結果から、スケルトン化前の算定条件である奇数番号の条件とスケルトン化後の算定条件である偶数番号の条件の限界浸水深を、基礎底部から GL の高さの違いに着目して比較した。基礎底部から GL の高さの違いに着目して比較したグラフを付録 C に示す。

前節と同様に、縦軸はスケルトン化前後の限界浸水深の比を表し、これが赤い破線で示した 1.00 以上であればスケルトン化により限界浸水深が向上したものである。横軸は基礎底部から GL の高さの違いを示している。青色の線が浮力条件(a)、赤色の線が浮力条件(b)、緑色の線が浮力条件(c)であり、円形の点が水深係数 $a=3.0$ 、三角形の点が水深係数 $a=2.0$ 、四角形の点が水深係数 $a=1.5$ となっており、実線かつ塗りつぶされた点が摩擦係数 $\mu=0.4$ 、実線かつ白抜きされた点が摩擦係数 $\mu=0.5$ 、破線かつ塗りつぶされた点が摩擦係数 $\mu=0.6$ を示している。そのため、線で繋がれた点は津波荷重、滑動耐力の減少の仕方は同じで、浮力による初期の滑動耐力の減少量だけが違う。

一例として、基準モデルとなる条件 1、条件 2 と基準モデルの基礎部の高さを 2 倍にした条件 13、条件 14 の X 面の限界浸水深の比を比較したものを図 4-8 に示す。他の条件は巻末の付録 C に示す。この 2 つを比べたとき、条件 10/条件 9 と条件 22/条件 21 の浮力条件(c)のときの Y 面の比較を除き、基礎底部から GL の高さが 1.5 m の方が大きくなっている。これは浸水深が低いほど、津波荷重が小さく、スケルトン化による津波荷重の減少量も小さくなるため、初期の滑動耐力が小さく、限界浸水深が小さい基礎底部から GL の高さが 3.0 m の方が小さくなったと考えられる。

このため、基礎の空気層が大きいほどスケルトン化の効果が小さいのではなく、空気層が大きいほど限界浸水深が小さくなりやすく、結果的に津波荷重が小さく、スケルトン化による津波荷重の減少量も小さい。なので、4.3.2 節、4.3.3 節でも浮力条件(a)のものが一番小さく、浮力条件(c)のものが一番大きい傾向がある。

なお、条件 10/条件 9 と条件 22/条件 21 浮力条件(c)のときの Y 面のみ基礎底部から GL の高さが 3.0 m の方が大きくなったのは、図 4-9 に赤丸で示したように条件 21 では 3 階の床高である 6.6 m に達する前に、限界浸水深に到達するが、条件 22 では図 4-10 に赤丸で示したように 3 階の床高である 6.6 m に達しても限界浸水深に到達せず、その後、3 階の開口から水が流入することで耐力が復活するので、限界浸水深の向上効果が大きくなった。また、1.5 m の方でこのようなことが起こると、図のグラフの差はさらに大きくなる。

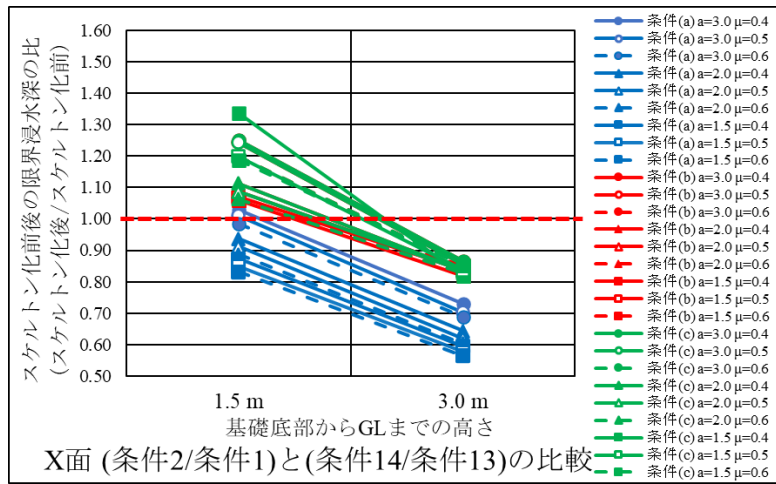


図 4-8 スケルトン化における基礎部空気層の影響の比較

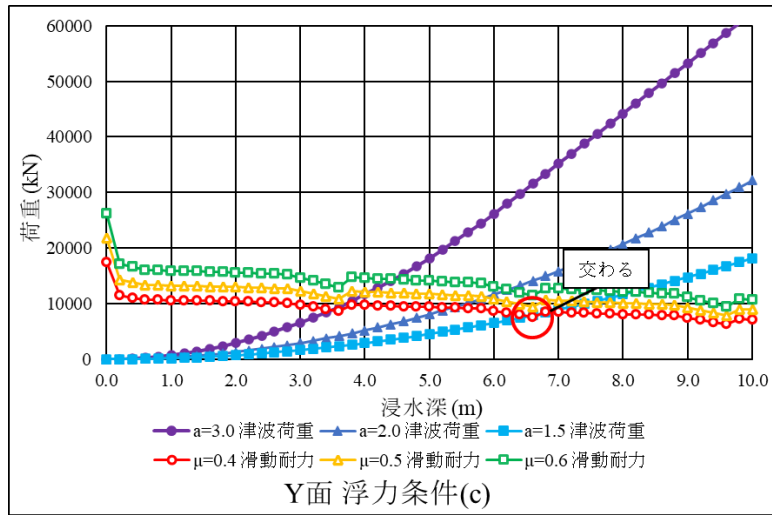


図 4-9 条件 21 の浮力条件(c)ときの Y 面のグラフ

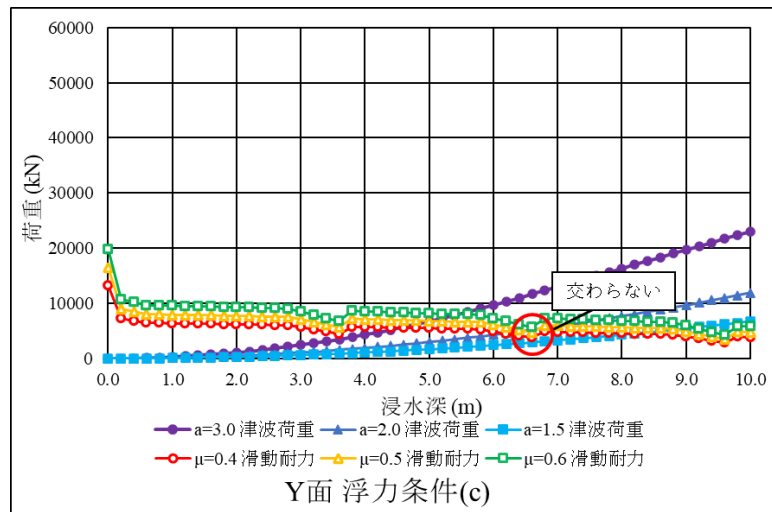


図 4-10 条件 22 の浮力条件(c)ときの Y 面のグラフ

4.3.5 滑動時の空気層の増減がスケルトン化の効果に与える影響

図 4-11 に一例として条件 7 と条件 8 の浮力条件(c)、水深係数 $a=3.0$ 、摩擦係数 $\mu=0.4$ のときの X 面のグラフを示す。青色の塗りつぶされた曲線がスケルトン化前の津波荷重、青色の白抜きされた曲線がスケルトン化後の津波荷重とし、赤色の塗りつぶされた直線がスケルトン化前の滑動耐力、赤色の白抜きされた直線がスケルトン化後の滑動耐力を示す。空気層が増加していると、滑動耐力の低下の勾配は急となり、スケルトン化前後の限界浸水深の差は小さくなる。空気層が増加しないとき、滑動耐力の低下の勾配は緩やかになり、スケルトン化前後の限界浸水深の差は大きくなる。

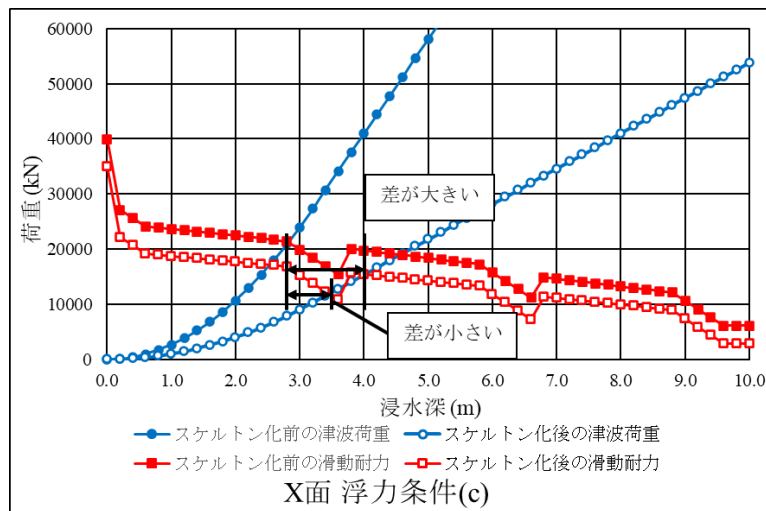


図 4-11 条件 7 と条件 8 の浮力条件(c)、 $a=3.0$ 、 $\mu=0.4$ のときの X 面

4.3.6 滑動時の津波の低減率と滑動耐力の低減率の関係

4.3.2～4.3.5節までの結果ではスケルトン化の効果を得られやすい条件を述べてきたが、スケルトン化前後の限界浸水深が 1.0 以上となる条件ではない。なので、スケルトン化により限界浸水深が向上する条件を探す。

津波荷重を Q_{tun} 、滑動耐力を Q_u とすると限界浸水深は下式のときの浸水深 h となる。

$$Q_{tun} = Q_u \quad (15)$$

スケルトン化による津波荷重の低減率を γ 、滑動耐力の低減率を β とすると、スケルトン化後の限界浸水深は下式のときの浸水深 h となり、(17)式のように変形できる。

$$\gamma Q_{tun} = \beta Q_u \quad (16)$$

$$Q_{tun} = \frac{\beta}{\gamma} Q_u \quad (17)$$

津波荷重の低減率 γ は開口部による津波荷重の低減率とスケルトン化による津波荷重の低減率の比と同値であり、滑動耐力の低減率 β はスケルトン化前後の浮力を考慮した建物重量の比となり、浸水深 h の関数となる。 γ は定数であり、 β は h によって変化するため、限界浸水深の違いで、スケルトン化の効果が異なることの説明ができ、 β/γ が 1.0 以上となる条件が限界浸水深が向上する条件であると仮定した。

付録 D にスケルトン化前後の限界浸水深の比を示した表と、 β/γ とスケルトン化による限界浸水深の向上条件を示したグラフをまとめたものを示す。

付録 D の表は、列が浮力条件、水深係数、摩擦係数といった滑動耐力による条件を示し、行が建物の寸法などの算定条件を示している。また、緑色で塗りつぶされた値が、スケルトン化によって限界浸水深が向上したものであり、黄色で塗りつぶされた値が、スケルトン化によって限界浸水深が低下したものである。

また、付録 D の図は、縦軸が β/γ を示し、横軸が浸水深を示している。黒色の曲線が β/γ の変化を表しており、縦線がスケルトン化前の限界浸水深となっている。この β/γ の曲線と縦線の交点が、赤色の破線で示された $\beta/\gamma=1.0$ 以上であれば、スケルトン化により限界浸水深が向上すると考えた。

一例として、浮力条件(a)のときの条件 2/条件 1 の結果を下に示す。他の条件は巻末の付録 D に示す。表 4-9 の値では $a=3.0$ で $\mu=0.4, 0.5$ のときのみ限界浸水深が向上している。図 4-12 のグラフでは、交点が赤色の破線以上となっているのは $a=3.0$ で $\mu=0.4, 0.5$ のときであり、表の条件と一致しており、条件 20/条件 19 の浮力条件(c)以外では、 β/γ が 1.0 以上であれば限界浸水深が向上した。

条件 20/条件 19 の浮力条件(c)で一部成り立たなかった原因は、図 4-13 中に赤丸で示したように、浸水深が 3.6 m ほどで一度浮力により建物重量が負の値を取り、その後に浸水深が 2 階の階高まで上がることで、水の流入により耐力が復活する。同様に、図 4-14 のように β/γ も一度 0 に振れ、その後上昇する形を取るが、浮力により建物重量が負の値を取った時点で、津波避難場所として運用には不適と考え、それ以降の耐力も 0 とすると、 β/γ も 0 となり、条件 20/条件 19 の浮力条件(c)で成り立たなかった点も解消できる。

よって、 β/γ が 1.0 以上であれば限界浸水深が向上するという考えは正しいと考えられる。

ただし、 β/γ はあくまで限界浸水深が向上するかどうか判別できるだけであり、どれだけ限界浸水深が増減したか定量的に表せるものではないので、どれだけ効果があるかは計算しなければわからない結果となった。

表 4-9 浮力条件(a)のときの条件 2/条件 1 の限界浸水深の比

受圧面	X 面								
浮力条件	条件(a)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数 μ	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
条件 2/条件 1	1.03	1.01	0.98	0.94	0.91	0.89	0.87	0.85	0.83

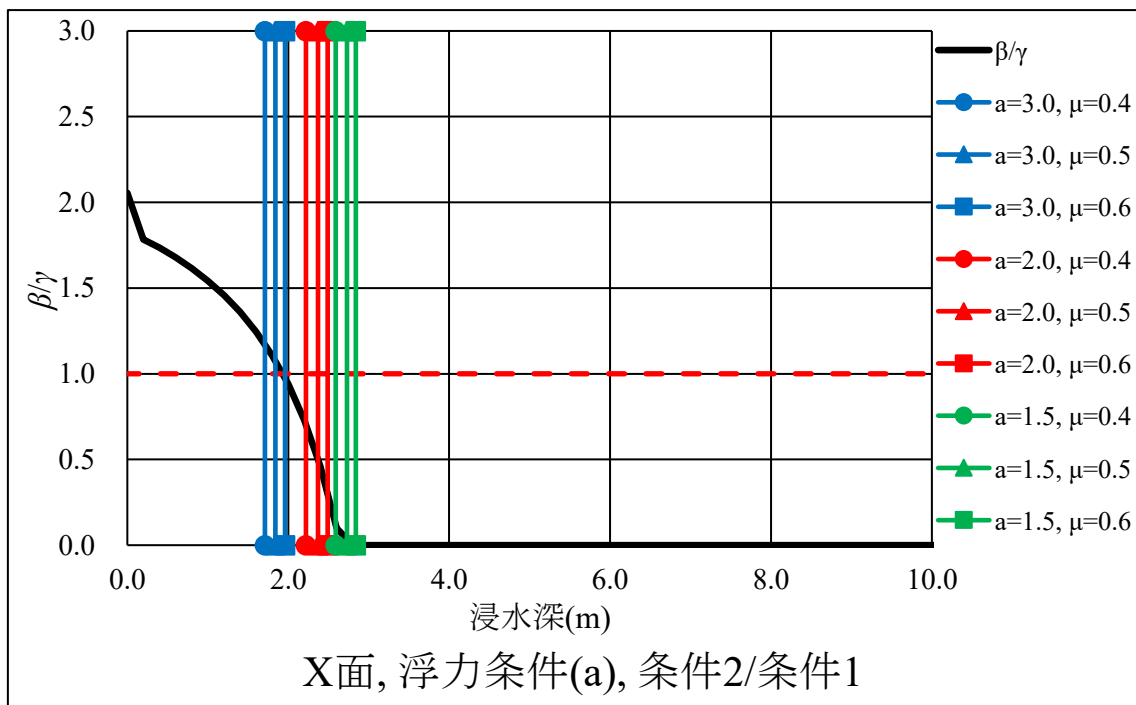


図 4-12 浮力条件(a)のときの条件 2/条件 1 の β/γ

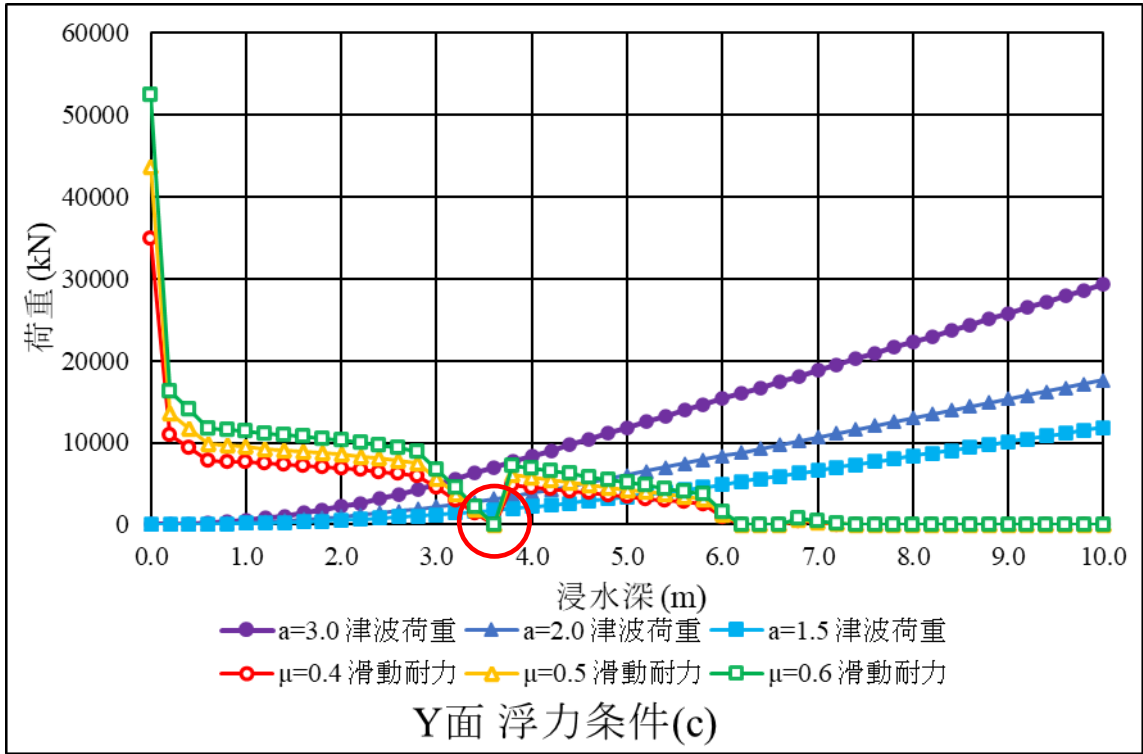


図1 条件20/条件19の浮力条件(c)の津波荷重と滑動耐力

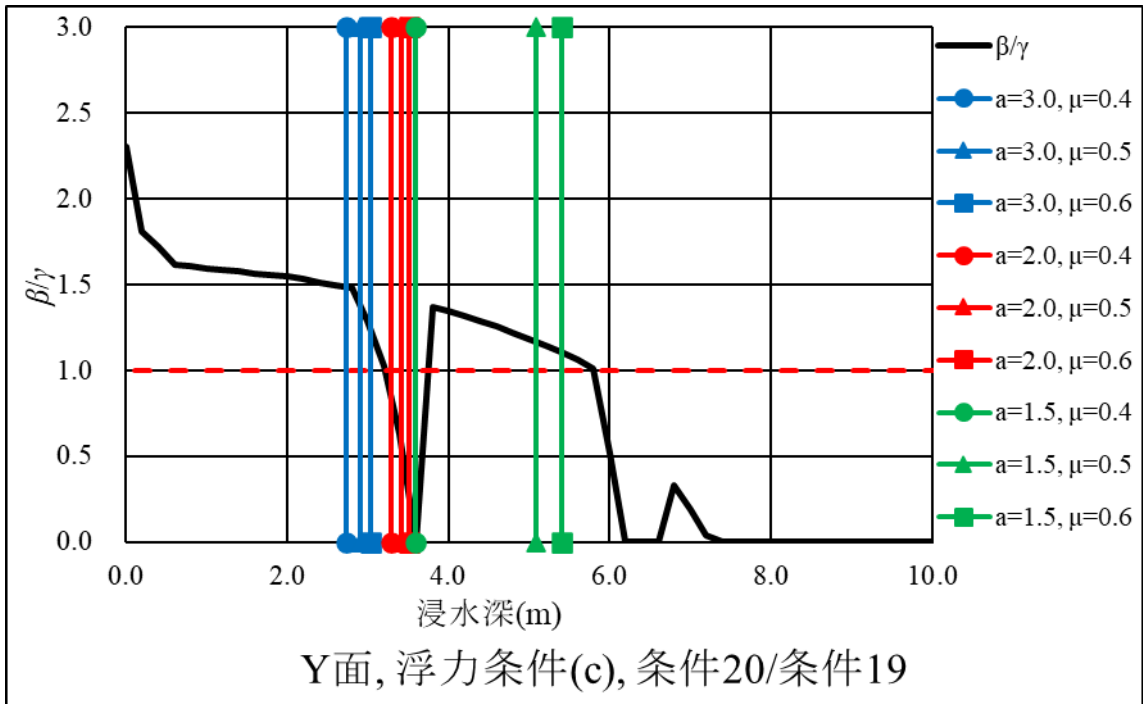


図2 条件20/条件19の浮力条件(c)の β/γ

4.3.7 滑動時におけるスケルトン化の効果まとめ

滑動時はスケルトン化によって、津波荷重が大きく、摩擦係数が小さい方が、津波荷重と滑動耐力の差が小さくなりやすく、限界浸水深は向上しやすいことがわかった。一方、空気層が大きく、さらに限界浸水深が空気層が増加している高さだとスケルトン化の効果が小さい傾向があった。

また、スケルトン化前後の津波荷重の低減率の比 γ とスケルトン化前後の浮力を考慮した建物重量の比 β から、 β/γ が 1.0 以上であれば限界浸水深が向上することがわかった。しかし、 β/γ は限界浸水深が向上するかを判断するものであり、どれだけ限界浸水深が向上するかは、別途計算する必要がある。

4.4 転倒時におけるスケルトン化の効果

4.4.1 転倒時の限界浸水深の算定結果

4.3.1 節と同様に、津波の浸水深を 15 m まで算定し、各条件の限界浸水深の算定結果を表 4-13～4-18 に示す。また、15 m 以内に限界浸水深が無いものは None と表示している。なお、転倒でもスケルトン化後は必ず水が流入するので、水の流入しない浮力条件(a)は算定する必要はないが、今回の研究はスケルトン化の効果を検証するものであるため、スケルトン化の傾向などを知るために、スケルトン化後の算定条件である偶数番号の条件でも、浮力条件(a)の限界浸水深を算定した。

表 4-13 X 面浮力条件(a)の限界浸水深(m)

受圧面	X 面		
浮力条件	浮力条件(a)		
水深係数	$a=3.0$	$a=2.0$	$a=1.5$
条件 1	2.93	3.40	3.60
条件 2	2.42	2.54	2.58
条件 3	2.93	3.40	3.60
条件 4	2.56	2.70	2.74
条件 5	3.45	3.67	3.74
条件 6	2.86	2.91	2.92
条件 7	3.45	3.67	3.74
条件 8	3.04	3.10	3.12
条件 9	4.54	5.79	6.56
条件 10	4.40	5.01	5.24
条件 11	6.44	8.78	10.59
条件 12	7.01	8.81	9.78
条件 13	2.02	2.19	2.25
条件 14	1.09	1.10	1.11
条件 15	2.02	2.19	2.25
条件 16	1.25	1.27	1.27
条件 17	2.21	2.27	2.29
条件 18	1.42	1.43	1.43
条件 19	2.21	2.27	2.29
条件 20	1.62	1.63	1.63
条件 21	4.02	5.00	5.54
条件 22	3.45	3.77	3.88
条件 23	6.15	8.32	9.96
条件 24	6.45	7.92	8.70

表 4-14 X 面浮力条件(b)の限界浸水深(m)

受圧面	X 面		
浮力条件	浮力条件(a)		
水深係数	$a=3.0$	$a=2.0$	$a=1.5$
条件 1	3.98	5.56	6.33
条件 2	4.21	5.59	6.05
条件 3	3.99	5.58	6.34
条件 4	4.53	5.85	6.17
条件 5	6.30	7.20	8.22
条件 6	6.26	6.47	6.57
条件 7	6.31	7.22	8.23
条件 8	6.42	6.74	7.27
条件 9	5.47	7.66	9.49
条件 10	6.24	8.66	9.95
条件 11	7.15	10.36	13.31
条件 12	8.76	12.24	None
条件 13	3.13	3.81	4.61
条件 14	2.79	2.98	3.03
条件 15	3.14	3.82	4.61
条件 16	2.92	3.12	3.19
条件 17	4.07	5.07	5.76
条件 18	3.27	3.35	3.37
条件 19	4.08	5.08	5.76
条件 20	3.44	3.53	3.55
条件 21	4.99	6.87	8.81
条件 22	5.51	6.88	8.55
条件 23	6.88	9.93	12.71
条件 24	8.23	11.60	14.41

表 4-15 X 面浮力条件(c)の限界浸水深(m)

受圧面	X 面		
浮力条件	浮力条件(a)		
水深係数	$a=3.0$	$a=2.0$	$a=1.5$
条件 1	4.50	6.05	7.84
条件 2	5.46	6.27	8.66
条件 3	4.52	6.06	7.86
条件 4	5.77	6.39	8.87
条件 5	8.64	9.41	10.25
条件 6	9.17	9.47	9.74
条件 7	8.67	9.41	10.27
条件 8	9.32	9.66	10.43
条件 9	5.66	8.26	10.72
条件 10	6.53	9.44	12.26
条件 11	7.38	10.89	14.29
条件 12	9.12	13.52	None
条件 13	3.13	4.69	5.80
条件 14	2.79	2.98	3.03
条件 15	3.14	4.70	5.81
条件 16	2.92	3.12	3.19
条件 17	5.50	6.12	6.37
条件 18	3.27	3.35	3.37
条件 19	5.51	6.13	6.37
条件 20	3.44	3.53	3.55
条件 21	5.22	7.59	9.43
条件 22	5.93	8.59	10.90
条件 23	7.12	10.50	13.77
条件 24	8.73	12.48	None

表 4-16 Y 面浮力条件(a)の限界浸水深(m)

受圧面	Y 面		
浮力条件	浮力条件(a)		
水深係数	$a=3.0$	$a=2.0$	$a=1.5$
条件 1	3.40	3.65	3.73
条件 2	2.54	2.59	2.60
条件 3	3.68	3.76	3.78
条件 4	2.76	2.77	2.77
条件 5	3.41	3.66	3.74
条件 6	2.85	2.91	2.92
条件 7	3.68	3.76	3.78
条件 8	3.10	3.12	3.13
条件 9	5.80	6.82	7.29
条件 10	5.00	5.30	5.40
条件 11	8.80	11.35	12.97
条件 12	8.76	10.09	10.65
条件 13	2.19	2.27	2.29
条件 14	1.10	1.11	1.11
条件 15	2.27	2.29	2.30
条件 16	1.27	1.28	1.28
条件 17	2.19	2.27	2.29
条件 18	1.42	1.43	1.43
条件 19	2.27	2.29	2.30
条件 20	1.63	1.63	1.63
条件 21	5.01	5.72	6.01
条件 22	3.77	3.90	3.94
条件 23	8.34	10.63	12.03
条件 24	7.90	8.93	9.33

表 4-17 Y 面浮力条件(b)の限界浸水深(m)

受圧面	Y 面		
浮力条件	浮力条件(a)		
水深係数	$a=3.0$	$a=2.0$	$a=1.5$
条件 1	6.17	6.92	7.98
条件 2	5.95	6.17	8.84
条件 3	8.43	8.92	9.03
条件 4	6.42	6.49	6.52
条件 5	6.19	6.95	8.00
条件 6	6.21	6.44	6.56
条件 7	8.46	8.93	9.04
条件 8	7.27	7.67	7.88
条件 9	8.02	10.58	12.51
条件 10	9.05	11.02	12.22
条件 11	10.40	14.86	None
条件 12	12.20	None	None
条件 13	3.91	4.94	5.65
条件 14	2.98	3.05	3.07
条件 15	5.48	5.86	5.93
条件 16	3.21	3.23	3.23
条件 17	3.92	4.95	5.67
条件 18	3.26	3.35	3.37
条件 19	5.49	5.86	5.93
条件 20	3.53	3.56	3.57
条件 21	6.96	9.33	11.34
条件 22	7.02	8.94	9.35
条件 23	9.97	14.21	None
条件 24	11.55	None	None

表 4-18 Y 面浮力条件(c)の限界浸水深(m)

受圧面	Y 面		
浮力条件	浮力条件(a)		
水深係数	$a=3.0$	$a=2.0$	$a=1.5$
条件 1	8.10	9.26	9.88
条件 2	6.56	9.18	9.36
条件 3	10.89	None	None
条件 4	9.56	9.94	10.25
条件 5	8.15	9.28	9.92
条件 6	9.09	9.42	9.59
条件 7	10.93	None	None
条件 8	10.77	13.49	None
条件 9	8.91	12.24	None
条件 10	11.82	None	None
条件 11	10.93	None	None
条件 12	13.58	None	None
条件 13	5.22	6.06	6.33
条件 14	2.98	3.05	3.07
条件 15	6.32	6.48	6.56
条件 16	3.21	3.23	3.23
条件 17	5.25	6.06	6.33
条件 18	3.26	3.35	3.37
条件 19	6.33	6.48	6.56
条件 20	3.53	3.56	3.57
条件 21	7.92	11.13	13.94
条件 22	9.00	12.02	14.85
条件 23	10.55	None	None
条件 24	12.44	None	None

4.4.2 転倒時の限界浸水深と滑動時の限界浸水深の比較

転倒時の限界浸水深と滑動時の限界浸水深を比較し、転倒と滑動どちらで耐津波性能が決まるのかを考える。表 4-19～表 4-24 に転倒時の限界浸水深と滑動時の限界浸水深を比較したものを示す。これは同じ条件下の転倒時の限界浸水深を滑動時の限界浸水深で除したものであり、表の値が 1.00 以上であれば、転倒時の限界浸水深の方が大きく、耐津波性能は滑動によって決まることを示す。また、None と表示されているものは、限界浸水深が計算範囲外であったため、限界浸水深が算定できなかったものである。

表 4-19～表 4-24 の結果を見ると、すべての条件で値が 1.00 以上となっており、耐津波性能は滑動によって決まることがわかる。このようになった原因は、滑動耐力は建物重量に 0.4～0.6 を乗じ、小さくするのに対し、転倒耐力は支点から重心までの距離を乗じるので、建物重量を 10 倍ほどに大きくする。転倒時の津波荷重にも、津波分布の重心高さまでの長さを乗じるが、この重心高さも建物高さを超えることはないので、超高層の建物に大規模な津波が襲来しない限り、転倒によって耐津波性能が決まることはないと考えられる。

表 4-19 X 面浮力条件(a)の転倒と滑動の限界浸水深の比較

受圧面	X 面								
浮力条件	浮力条件(a)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$	$\mu=0.6$	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$	$\mu=0.6$	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$	$\mu=0.6$
条件 1	1.71	1.59	1.49	1.53	1.43	1.37	1.39	1.32	1.27
条件 2	1.38	1.30	1.25	1.22	1.18	1.15	1.14	1.11	1.09
条件 3	1.71	1.58	1.49	1.52	1.43	1.37	1.38	1.31	1.27
条件 4	1.38	1.31	1.25	1.23	1.18	1.15	1.15	1.12	1.10
条件 5	1.60	1.51	1.43	1.37	1.31	1.27	1.25	1.20	1.17
条件 6	1.27	1.22	1.19	1.15	1.11	1.10	1.09	1.07	1.06
条件 7	1.60	1.50	1.43	1.37	1.31	1.26	1.25	1.20	1.17
条件 8	1.28	1.23	1.19	1.15	1.12	1.10	1.09	1.08	1.06
条件 9	1.70	1.56	1.46	1.60	1.48	1.40	1.50	1.41	1.34
条件 10	1.44	1.35	1.28	1.31	1.25	1.21	1.22	1.18	1.15
条件 11	1.59	1.45	1.34	1.56	1.43	1.34	1.52	1.40	1.32
条件 12	1.41	1.30	1.22	1.35	1.27	1.21	1.29	1.22	1.18
条件 13	1.66	1.54	1.46	1.42	1.34	1.30	1.29	1.24	1.20
条件 14	1.22	1.18	1.15	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.05
条件 15	1.64	1.54	1.45	1.42	1.34	1.30	1.29	1.23	1.20
条件 16	1.25	1.20	1.17	1.12	1.10	1.09	1.08	1.06	1.05
条件 17	1.47	1.40	1.34	1.27	1.22	1.19	1.17	1.14	1.12
条件 18	1.15	1.13	1.11	1.08	1.06	1.05	1.04	1.04	1.03
条件 19	1.47	1.40	1.34	1.27	1.22	1.19	1.17	1.14	1.12
条件 20	1.17	1.14	1.13	1.09	1.07	1.06	1.05	1.04	1.04
条件 21	1.72	1.58	1.47	1.59	1.48	1.40	1.48	1.39	1.32
条件 22	1.41	1.33	1.27	1.27	1.22	1.18	1.18	1.15	1.12
条件 23	1.61	1.47	1.36	1.57	1.44	1.35	1.52	1.41	1.33
条件 24	1.42	1.32	1.24	1.35	1.27	1.21	1.28	1.22	1.17

表 4-20 X 面浮力条件(b)の転倒と滑動の限界浸水深の比較

受圧面	X 面								
浮力条件	浮力条件(b)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$	$\mu=0.6$	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$	$\mu=0.6$	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$	$\mu=0.6$
条件 1	1.95	1.76	1.62	1.90	1.78	1.68	1.43	1.31	1.22
条件 2	1.65	1.50	1.43	1.72	1.64	1.59	1.32	1.22	1.15
条件 3	1.95	1.76	1.62	1.90	1.78	1.68	1.09	1.05	1.02
条件 4	1.70	1.56	1.49	1.75	1.67	1.59	1.05	1.03	1.01
条件 5	2.24	2.09	1.97	2.01	1.83	1.69	1.85	1.69	1.57
条件 6	1.88	1.79	1.69	1.50	1.38	1.29	1.26	1.17	1.12
条件 7	2.24	2.08	1.97	2.01	1.82	1.69	1.41	1.36	1.33
条件 8	1.87	1.75	1.61	1.47	1.35	1.25	1.18	1.16	1.14
条件 9	1.81	1.65	1.54	1.78	1.61	1.48	1.36	1.23	1.14
条件 10	1.63	1.47	1.35	1.56	1.44	1.38	1.20	1.12	1.08
条件 11	1.63	1.46	1.34	1.62	1.47	1.35	1.23	1.12	1.05
条件 12	1.46	1.34	1.24	1.43	1.32	1.23	None	None	None
条件 13	2.10	1.89	1.73	1.74	1.58	1.46	1.44	1.38	1.34
条件 14	2.16	1.96	1.81	1.63	1.48	1.38	1.09	1.07	1.06
条件 15	2.09	1.88	1.73	1.74	1.58	1.46	1.29	1.20	1.14
条件 16	1.95	1.76	1.62	1.46	1.34	1.25	1.04	1.03	1.02
条件 17	1.97	1.78	1.64	1.76	1.67	1.61	1.79	1.72	1.67
条件 18	1.47	1.34	1.25	1.16	1.13	1.11	1.10	1.08	1.07
条件 19	1.96	1.77	1.64	1.76	1.67	1.61	1.60	1.50	1.42
条件 20	1.38	1.26	1.21	1.17	1.14	1.11	1.05	1.04	1.03
条件 21	1.82	1.66	1.55	1.82	1.64	1.51	1.41	1.33	1.24
条件 22	1.70	1.59	1.49	1.56	1.41	1.31	1.34	1.30	1.21
条件 23	1.65	1.48	1.36	1.63	1.49	1.37	1.25	1.13	1.05
条件 24	1.47	1.35	1.26	1.48	1.34	1.26	1.18	1.11	1.02

表 4-21 X 面浮力条件(c)の転倒と滑動の限界浸水深の比較

受圧面	X 面								
浮力条件	浮力条件(c)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$	$\mu=0.6$	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$	$\mu=0.6$	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$	$\mu=0.6$
条件 1	2.21	1.99	1.83	2.07	1.93	1.83	2.26	1.85	1.71
条件 2	2.14	1.94	1.85	1.93	1.84	1.78	1.87	1.70	1.59
条件 3	2.20	1.99	1.83	2.07	1.93	1.83	2.26	1.85	1.71
条件 4	2.16	1.99	1.90	1.91	1.82	1.41	1.82	1.67	1.55
条件 5	3.07	2.86	2.70	2.62	2.11	1.95	1.98	1.80	1.72
条件 6	2.75	2.62	1.98	1.80	1.64	1.58	1.60	1.55	1.51
条件 7	3.07	2.86	2.71	2.32	2.10	1.94	1.98	1.80	1.72
条件 8	2.71	2.09	1.90	1.75	1.63	1.58	1.67	1.62	1.59
条件 9	1.87	1.70	1.59	1.83	1.65	1.51	1.82	1.69	1.51
条件 10	1.58	1.42	1.31	1.59	1.49	1.31	1.57	1.43	1.35
条件 11	1.64	1.47	1.35	1.67	1.47	1.35	1.64	1.50	1.35
条件 12	1.48	1.30	1.20	1.49	1.32	1.21	None	None	None
条件 13	2.10	1.89	1.73	2.14	1.95	1.80	2.07	1.97	1.88
条件 14	2.16	1.96	1.81	1.63	1.48	1.38	1.32	1.23	1.16
条件 15	2.09	1.88	1.73	2.15	1.94	1.79	2.07	1.96	1.89
条件 16	1.95	1.76	1.62	1.46	1.34	1.25	1.21	1.13	1.11
条件 17	2.66	2.40	2.22	2.13	2.02	1.94	1.95	1.88	1.83
条件 18	1.47	1.34	1.25	1.16	1.13	1.11	1.10	1.08	1.07
条件 19	2.65	2.40	2.21	2.12	2.02	1.94	1.95	1.88	1.83
条件 20	1.38	1.26	1.21	1.17	1.14	1.11	1.10	1.08	1.07
条件 21	1.91	1.73	1.62	1.88	1.70	1.56	1.80	1.63	1.54
条件 22	1.83	1.71	1.43	1.72	1.56	1.46	1.78	1.70	1.43
条件 23	1.67	1.50	1.37	1.69	1.49	1.37	1.66	1.51	1.37
条件 24	1.50	1.38	1.24	1.46	1.35	1.21	None	None	None

表 4-22 Y 面浮力条件(a)の転倒と滑動の限界浸水深の比較

受圧面	Y 面								
浮力条件	浮力条件(a)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$	$\mu=0.6$	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$	$\mu=0.6$	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$	$\mu=0.6$
条件 1	1.62	1.52	1.44	1.39	1.33	1.28	1.26	1.21	1.18
条件 2	1.27	1.22	1.19	1.15	1.12	1.10	1.09	1.07	1.06
条件 3	1.45	1.37	1.32	1.25	1.20	1.17	1.15	1.13	1.11
条件 4	1.17	1.14	1.12	1.08	1.07	1.06	1.05	1.04	1.03
条件 5	1.62	1.52	1.44	1.39	1.33	1.28	1.26	1.21	1.18
条件 6	1.28	1.23	1.20	1.15	1.12	1.10	1.09	1.07	1.06
条件 7	1.44	1.37	1.31	1.25	1.20	1.17	1.15	1.12	1.10
条件 8	1.18	1.15	1.12	1.09	1.07	1.06	1.05	1.04	1.04
条件 9	1.72	1.59	1.49	1.54	1.44	1.38	1.41	1.33	1.28
条件 10	1.39	1.31	1.26	1.23	1.19	1.16	1.15	1.12	1.10
条件 11	1.69	1.55	1.44	1.60	1.48	1.39	1.51	1.41	1.34
条件 12	1.44	1.35	1.28	1.32	1.26	1.21	1.24	1.19	1.15
条件 13	1.49	1.41	1.35	1.29	1.23	1.20	1.18	1.15	1.13
条件 14	1.13	1.11	1.09	1.07	1.06	1.05	1.04	1.04	1.03
条件 15	1.32	1.26	1.22	1.16	1.13	1.11	1.10	1.08	1.07
条件 16	1.09	1.07	1.06	1.04	1.04	1.03	1.02	1.02	1.02
条件 17	1.49	1.40	1.34	1.28	1.23	1.20	1.18	1.15	1.12
条件 18	1.16	1.14	1.11	1.08	1.07	1.06	1.04	1.04	1.03
条件 19	1.31	1.26	1.22	1.16	1.13	1.11	1.10	1.08	1.07
条件 20	1.11	1.09	1.07	1.05	1.04	1.03	1.03	1.03	1.02
条件 21	1.70	1.58	1.49	1.51	1.42	1.35	1.37	1.30	1.25
条件 22	1.33	1.27	1.23	1.19	1.15	1.13	1.12	1.09	1.08
条件 23	1.70	1.56	1.45	1.60	1.48	1.40	1.50	1.41	1.34
条件 24	1.44	1.35	1.28	1.31	1.25	1.20	1.22	1.17	1.14

表 4-23 Y 面浮力条件(b)の転倒と滑動の限界浸水深の比較

受圧面	Y 面								
浮力条件	浮力条件(b)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$	$\mu=0.6$	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$	$\mu=0.6$	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$	$\mu=0.6$
条件 1	2.28	2.09	1.98	1.97	1.82	1.68	1.81	1.65	1.53
条件 2	1.93	1.83	1.76	1.67	1.53	1.43	1.37	1.27	1.20
条件 3	2.48	2.31	2.12	1.92	1.76	1.63	1.56	1.50	1.46
条件 4	1.69	1.53	1.41	1.28	1.18	1.12	1.11	1.08	1.07
条件 5	2.27	2.09	1.97	1.97	1.81	1.68	1.80	1.64	1.53
条件 6	1.89	1.80	1.73	1.53	1.41	1.31	1.26	1.17	1.12
条件 7	2.47	2.30	2.11	1.92	1.75	1.62	1.55	1.50	1.46
条件 8	1.66	1.49	1.37	1.32	1.28	1.26	1.28	1.25	1.24
条件 9	2.05	1.84	1.69	1.85	1.71	1.62	1.79	1.62	1.50
条件 10	1.80	1.63	1.53	1.68	1.54	1.42	1.47	1.37	1.33
条件 11	1.76	1.61	1.48	1.75	1.60	1.48	None	None	None
条件 12	1.58	1.42	1.33	None	None	None	None	None	None
条件 13	1.96	1.77	1.63	1.75	1.66	1.59	1.76	1.69	1.64
条件 14	1.78	1.62	1.51	1.33	1.23	1.16	1.11	1.08	1.07
条件 15	2.02	1.89	1.81	1.79	1.72	1.67	1.66	1.55	1.46
条件 16	1.27	1.17	1.13	1.09	1.08	1.07	1.06	1.05	1.04
条件 17	1.95	1.76	1.63	1.74	1.66	1.59	1.76	1.69	1.64
条件 18	1.50	1.37	1.28	1.17	1.14	1.12	1.10	1.08	1.07
条件 19	2.01	1.89	1.81	1.78	1.71	1.67	1.65	1.54	1.46
条件 20	1.20	1.16	1.14	1.10	1.08	1.07	1.06	1.05	1.04
条件 21	2.00	1.82	1.67	1.86	1.68	1.57	1.82	1.72	1.59
条件 22	1.73	1.56	1.44	1.57	1.49	1.44	1.47	1.42	1.33
条件 23	1.78	1.62	1.50	1.77	1.60	1.50	None	None	None
条件 24	1.64	1.48	1.36	None	None	None	None	None	None

表 4-24 Y 面浮力条件(c)の転倒と滑動の限界浸水深の比較

受圧面	Y 面								
浮力条件	浮力条件(c)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$	$\mu=0.6$	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$	$\mu=0.6$	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$	$\mu=0.6$
条件 1	2.99	2.75	2.60	2.64	2.15	1.99	1.97	1.80	1.69
条件 2	2.12	2.02	1.94	1.97	1.79	1.66	1.61	1.56	1.52
条件 3	3.20	2.59	2.35	None	None	None	None	None	None
条件 4	1.96	1.75	1.63	1.64	1.59	1.56	1.59	1.56	1.16
条件 5	2.99	2.75	2.60	2.63	2.14	1.98	1.97	1.79	1.69
条件 6	2.77	2.63	2.03	1.84	1.67	1.59	1.59	1.54	1.50
条件 7	3.20	2.58	2.34	None	None	None	None	None	None
条件 8	1.98	1.82	1.76	2.13	2.07	1.57	None	None	None
条件 9	2.16	1.95	1.79	2.05	1.91	1.69	None	None	None
条件 10	2.17	1.99	1.89	None	None	None	None	None	None
条件 11	1.82	1.66	1.49	None	None	None	None	None	None
条件 12	1.64	1.49	1.35	None	None	None	None	None	None
条件 13	2.61	2.36	2.18	2.14	2.03	1.95	1.97	1.90	1.84
条件 14	1.78	1.62	1.51	1.33	1.23	1.16	1.11	1.08	1.07
条件 15	2.33	2.18	2.09	1.98	1.90	1.85	1.83	1.30	1.22
条件 16	1.27	1.17	1.13	1.09	1.08	1.07	1.06	1.05	1.04
条件 17	2.61	2.35	2.18	2.13	2.03	1.95	1.97	1.89	1.83
条件 18	1.50	1.37	1.28	1.17	1.14	1.12	1.10	1.08	1.07
条件 19	2.32	2.18	2.09	1.97	1.89	1.85	1.83	1.29	1.21
条件 20	1.20	1.16	1.14	1.10	1.08	1.07	1.06	1.05	1.04
条件 21	2.28	1.94	1.78	2.08	1.89	1.79	2.14	1.83	1.69
条件 22	2.00	1.80	1.66	1.96	1.87	1.57	1.82	1.68	1.63
条件 23	1.83	1.67	1.51	None	None	None	None	None	None
条件 24	1.62	1.46	1.36	None	None	None	None	None	None

4.4.3 転倒時の津波荷重の大きさがスケルトン化の効果に与える影響

4.3.2 節と同様に、スケルトン化前の算定条件である奇数番号の条件とスケルトン化後の算定条件である偶数番号の条件の限界浸水深を、津波荷重の大きさに着目して比較した。津波荷重の大きさに着目して比較したグラフを付録 A に示す。

転倒においても滑動と同様に、グラフは右下がりの傾向があり、水深係数 $a=3.0$ のものが最も大きく、水深係数 $a=1.5$ のものが最も小さくなる傾向がある。このような結果になったのも、開口部による津波荷重の低減率は同じであるが、津波荷重が減少する量は津波荷重が大きいくほど増えるので、転倒耐力との差が小さくなりやすいのだと考えられる。

4.4.4 転倒時の基礎部の空気層がスケルトン化の効果に与える影響

4.3.4 節と同様に、スケルトン化前の算定条件である奇数番号の条件とスケルトン化後の算定条件である偶数番号の条件の限界浸水深を、基礎底部から GL の高さの違いに着目して比較した。基礎底部から GL の高さの違いに着目して比較したグラフを付録 C に示す。

この 2 つを比べたとき、滑動と同様に、基礎底部から GL の高さが 1.5 m の方が大きくなっている。このような結果になったのも、浸水深が低いほど、津波荷重が小さく、スケルトン化による津波荷重の減少量も小さくなるため、初期の転倒耐力が小さく、限界浸水深が小さい基礎底部から GL の高さが 3.0 m の方が小さくなったと考えられる。このため、基礎の空気層が大きいくほどスケルトン化の効果が小さいのではなく、空気層が大きいくほど限界浸水深が小さくなりやすく、結果的に津波荷重が小さく、スケルトン化による津波荷重の減少量も小さくなったと考えられる。

4.4.5 転倒時の空気層の増減がスケルトン化の効果に与える影響

4.3.5 節と同様に、転倒でも空気層が増加していると、滑動耐力の低下の勾配は急となり、スケルトン化前後の限界浸水深の差は小さくなる。空気層が増加しないとき、滑動耐力の低下の勾配は緩やかになり、スケルトン化前後の限界浸水深の差は大きくなる。

4.4.6 転倒時の津波の低減率と滑動耐力の低減率の関係

4.3.6 節と同様の方法で、スケルトン化による津波荷重の低減率を γ 、転倒耐力の低減率を β としたとき、 β/γ が 1.0 以上となるときに限界浸水深が向上するか確認した。付録 D にスケルトン化前後の限界浸水深の比を示した表と、 β/γ によるスケルトン化による限界浸水深の向上条件を示したグラフをまとめたものを示す。

付録 D の表は、列が浮力条件、水深係数といった転倒耐力による条件を示し、行が建物の寸法などの算定条件を示している。また、緑色で塗りつぶされた値が、スケルトン化によって限界浸水深が向上したものであり、黄色で塗りつぶされた値が、スケルトン化によって限界浸水深が低下したものである。

転倒でも、滑動と同様に、条件 20/条件 19 の浮力条件(c)以外では、 β/γ が 1.0 以上であれば限界浸水深が向上した。条件 20/条件 19 の浮力条件(c)で一部成り立たなかった理由は、滑動と同様に一度浮力を考慮した建物重量が 0 に振れ、2 階の階高まで、浸水深が上昇することで、耐力が復活することが原因であると考えられる。

よって、滑動、転倒どちらでも β/γ が 1.0 以上であれば限界浸水深が向上することが成り立ち、この仮説は正しいと考えられる。

4.4.7 転倒時におけるスケルトン化の効果まとめ

転倒時でも滑動と同様に、スケルトン化によって、津波荷重が大きい方が、津波荷重と滑動耐力の差が小さくなりやすいので、限界浸水深は向上しやすく、空気層が大きく、さらに限界浸水深が空気層が増加している高さだとスケルトン化の効果が小さい傾向があった。

しかし、同様の効果はあったものの、スケルトン化により限界浸水深が向上した条件は滑動の方が多く、転倒で限界浸水深が向上した条件は少なく、O 小学校、S 小学校でも転倒では限界浸水深が低下した。このようになった原因も、転倒の方が耐力が大きいので、スケルトン化による建物重量の低減率の減少量が大きいことが考えられる。

だが、4.4.2 節で示したように、スケルトン化後の限界浸水深も転倒時の方が大きいので、滑動時の限界浸水深が向上するのであれば、スケルトン化を施工する意味がある可能性がある。

また、転倒でもスケルトン化前後の津波荷重の低減率の比 γ とスケルトン化前後の浮力を考慮した建物重量の比 β から、 β/γ が 1.0 以上であれば限界浸水深が向上することが成り立つことが確認できた。

4.5 耐津波性能に対するスケルトン化の効果の検証まとめ

本章では、3章で既存 RC 建物に対して、期待していたほどのスケルトン化の効果が得られなかったため、ベースとなる建物を設定し、寸法などのパラメータを変更することで、建物のどのパラメータが耐津波性能に影響するかを調べた。

その結果、スケルトン化によって、津波荷重が大きく、摩擦係数が小さい方が、津波荷重と滑動耐力の差が小さくなりやすいので、限界浸水深は向上しやすい。一方で、空気層が大きく、さらに限界浸水深が空気層が増加している高さだとスケルトン化の効果が小さい傾向があった。さらに、転倒よりも滑動の方がスケルトン化の効果を得やすく、耐津波性能は滑動によって決まることから、滑動時の限界浸水深が向上するのであれば、スケルトン化を施工する意味がある可能性があるといえる。

また、スケルトン化前後の津波荷重の低減率の比 γ とスケルトン化前後の浮力を考慮した建物重量の比 β から、 β/γ が 1.0 以上であれば限界浸水深が向上することがわかった。しかし、 β/γ は限界浸水深が向上するかを判断するものであり、どれだけ限界浸水深が向上するかは、別途計算する必要がある。

第5章 結

5.1 まとめ

5.2 今後の課題

第5章 結

5.1 まとめ

本研究では、既存 RC 建物の耐津波性能に関するケーススタディと耐津波性能に対するスケルトン化の効果について検証した。

ケーススタディでは、既存 RC 建物をそのまま津波避難場所として運用する場合、十分な耐津波性能を有していない危険性があることがわかり、それに対し、耐津波性能向上手法として、スケルトン化を提案したが、直接基礎では津波の低減効果より耐力の低下が激しく、期待していた効果は得られなかった。

耐津波性能に対するスケルトン化の効果について検証では、スケルトン化は、津波荷重が大きく、摩擦係数が小さい方が、限界浸水深は向上しやすく、空気層が大きく、空気層が増加している状態だとスケルトン化の効果が小さい傾向があった。さらに、転倒よりも滑動の方がスケルトン化の効果を得やすく、耐津波性能は滑動によって決まるので、滑動時の限界浸水深が向上するのであれば、スケルトン化する意味がある可能性がある。また、スケルトン化前後の津波荷重の低減率の比 γ とスケルトン化前後の浮力を考慮した建物重量の比 β から、 $\beta\gamma$ が 1.0 以上であれば限界浸水深が向上することがわかった。

杭がしっかりと整備されている建物は新耐震基準のものが多く、新耐震基準は滑動耐力、転倒耐力および倒壊耐力が高くなると考えられる。しかし、今回ケーススタディで取り扱ったような耐震基準が古く、杭が無い建物も存在する。そのような、耐震補強をされていても耐津波性能を有しているか不明瞭な建物に対し、本研究が運用の判断の一助となることを願う。

5.2 今後の課題

本研究では、スケルトン化について検証してきたが、壁を抜く都合上、津波による倒壊や、耐震性能への影響について検証することが難しく、十分な考察ができていない。また、杭の許容耐力で津波に抵抗することで、建物重量の影響を受けにくく、スケルトン化の運用において有利だと考えられる杭基礎についても検証できていないため、新たに杭基礎のケーススタディなどを行い、事例の蓄積が必要である。

参考文献

参考文献

- 1) 国土交通省, 「津波避難ビル等に関する実態調査結果」について, 2011.6
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 津波避難ビル等の構造上の要件の解説, 2012.3
- 3) 濱本卓司ほか, 開口部と解放部を有する中低層建築物の津波水槽実験, 日本建築学会構造系論文集 第 82 巻 第 733 号, pp.359-369
- 4) 長谷部雅伸ほか, 開口を有する建築物を対象とした津波荷重に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol. 70, No. 2, 2014, pp831-835
- 5) 日本建築学会, 建築物荷重指針・同解説 2015, 2015, 2
- 6) 国土交通省, 許容浸水深表による津波に対する安全性を確かめる方法について, 2021.3
- 7) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 2018, 2018, 12, 5
- 8) 日本建築学会, 2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報, 2011, 7

謝辭

謝辞

本研究を遂行するにあたり、ご指導いただいた川口淳教授に厚くお礼申し上げます。

三重大学 教授（工学）三田紀行先生、准教授（工学）佐藤公亮先生におかれましては、論文審査を通して貴重なご意見をいただきました。ここに厚くお礼申し上げます。

また、研究にご協力いただいた三重県の職員の方々に感謝の意を表します。

そして、研究活動をするにあたり、多くのご協力及びご助言いただきました新美治利氏に感謝の意を表します。

さらに、川口研究室の皆さまには、日々の議論を通じて多くの知識や支援をしていただきました。ご協力いただきました近藤尚文氏、辻創氏、土屋涼介氏、林稜真氏、南山英器氏、安藤祐二氏、大久保祐哉氏、田代航大氏、西出匠杜氏、平野颯也氏に感謝申し上げます。

付録 A 津波荷重の大きさがスケルトン化の効果に与える影響

付録 A 津波荷重の大きさがスケルトン化の効果に与える影響

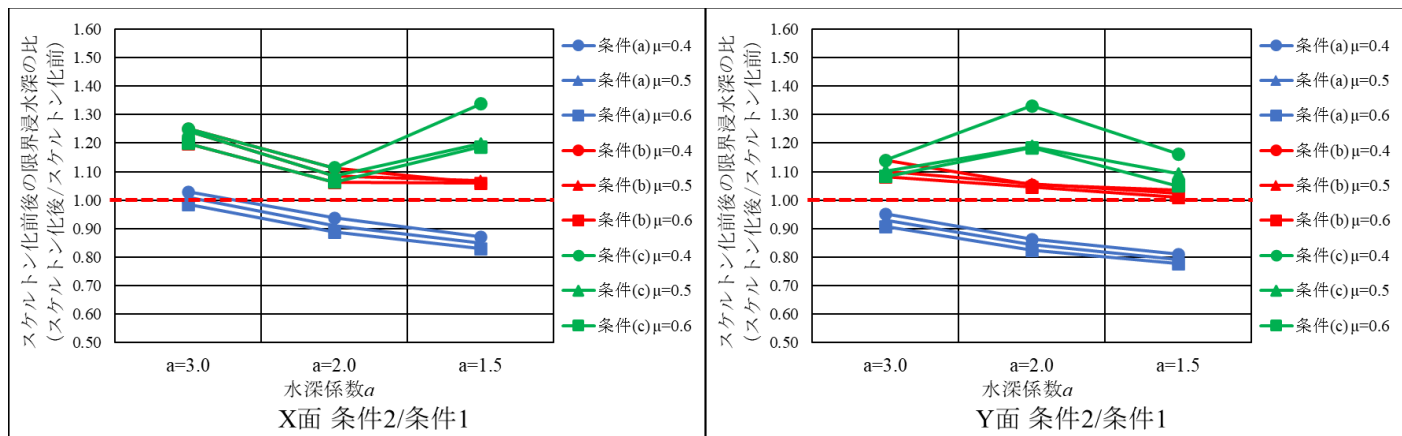


図 A-1 滑動 基準モデル

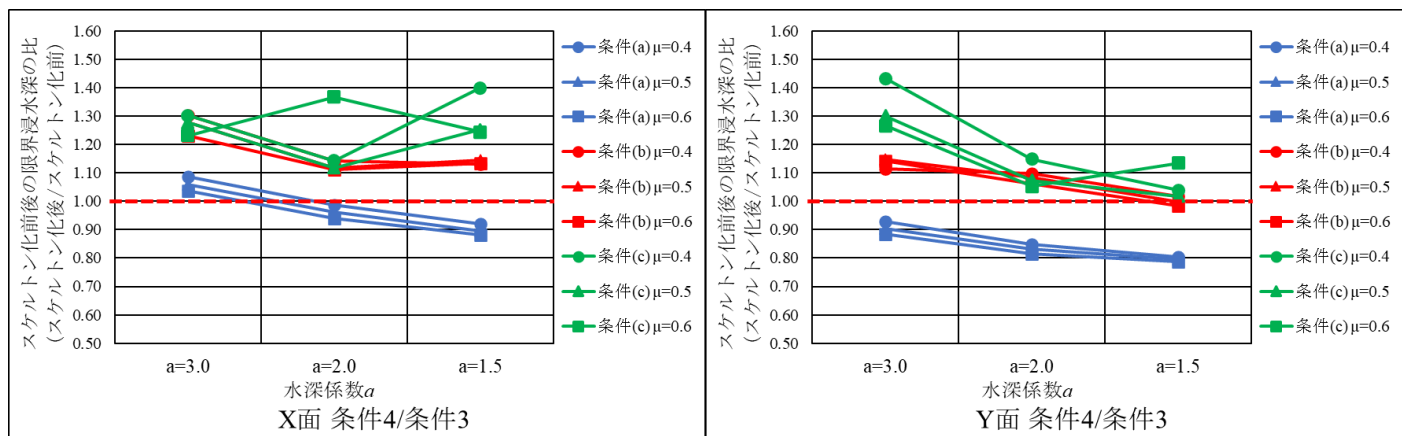


図 A-2 滑動 X2 倍

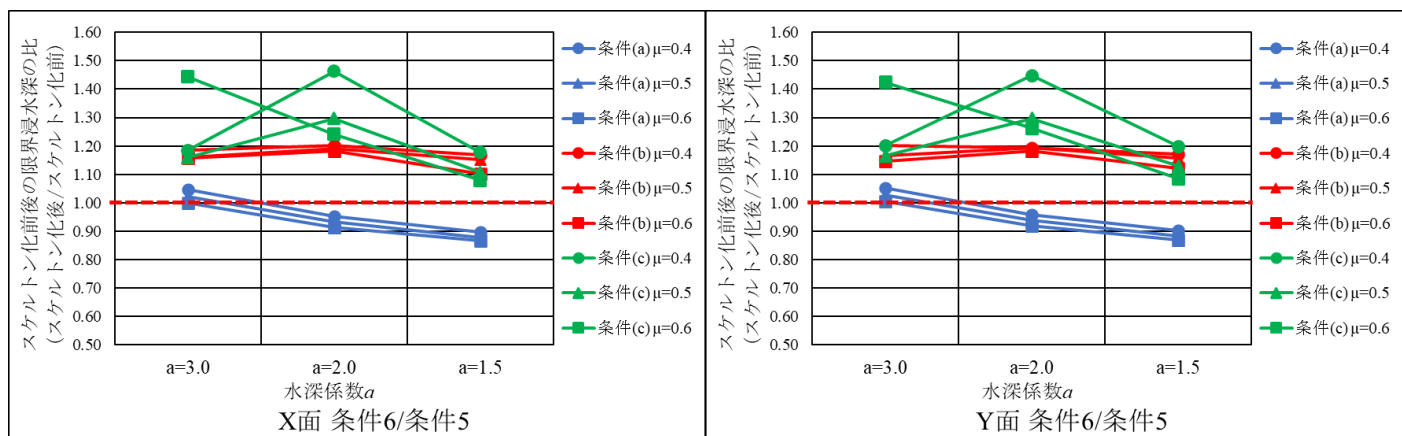


図 A-3 滑動 Y2 倍

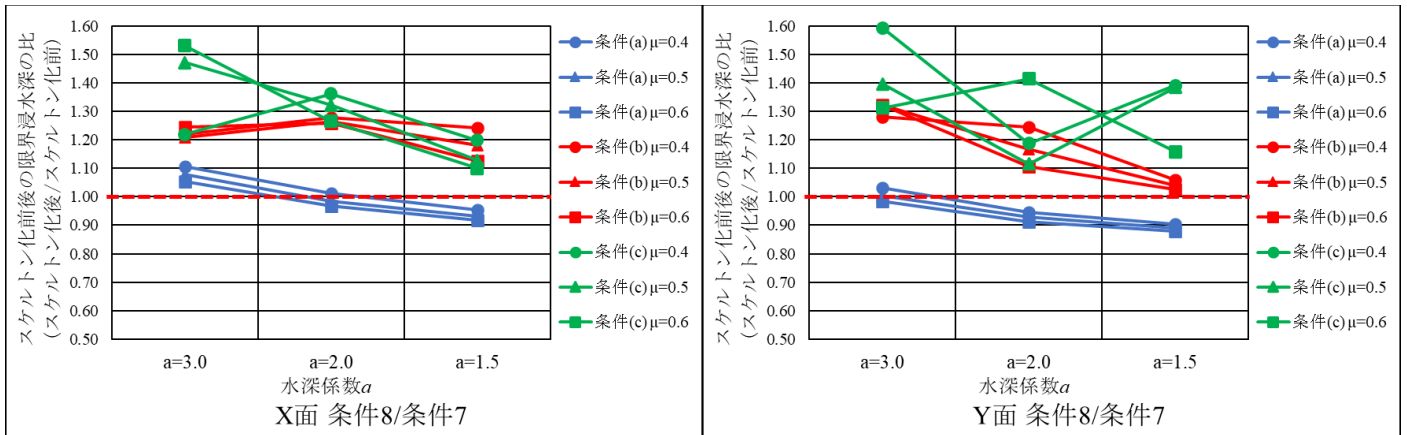


図 A-4 滑動 XY2倍

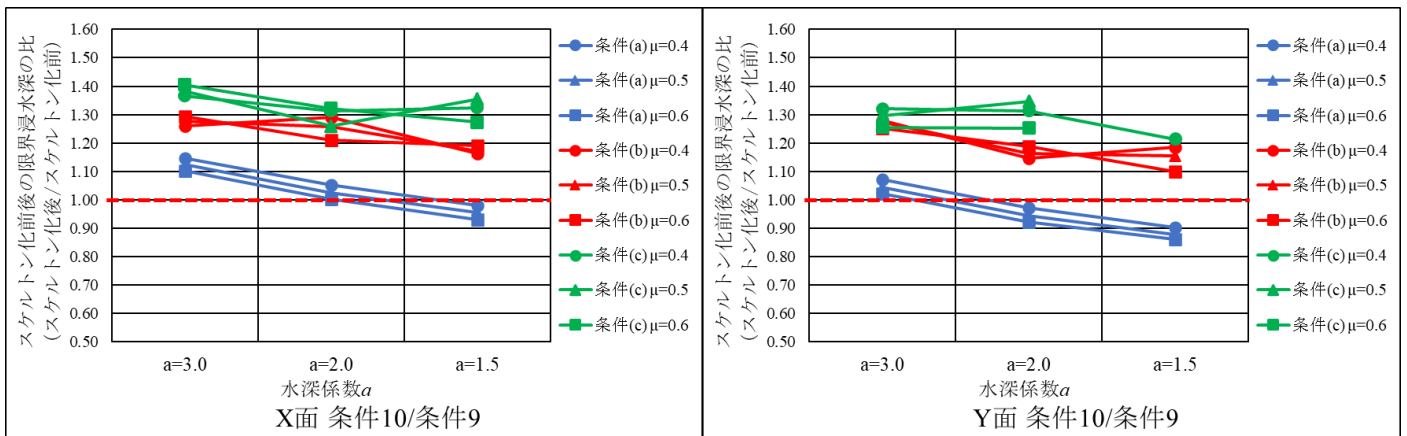


図 A-5 滑動 Z2倍

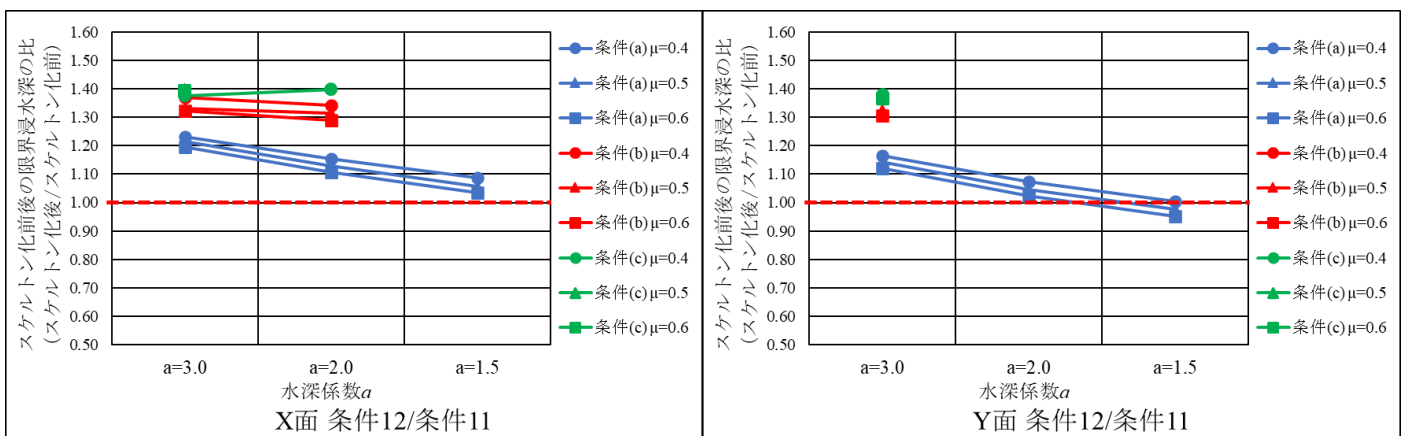


図 A-6 滑動 Z4倍

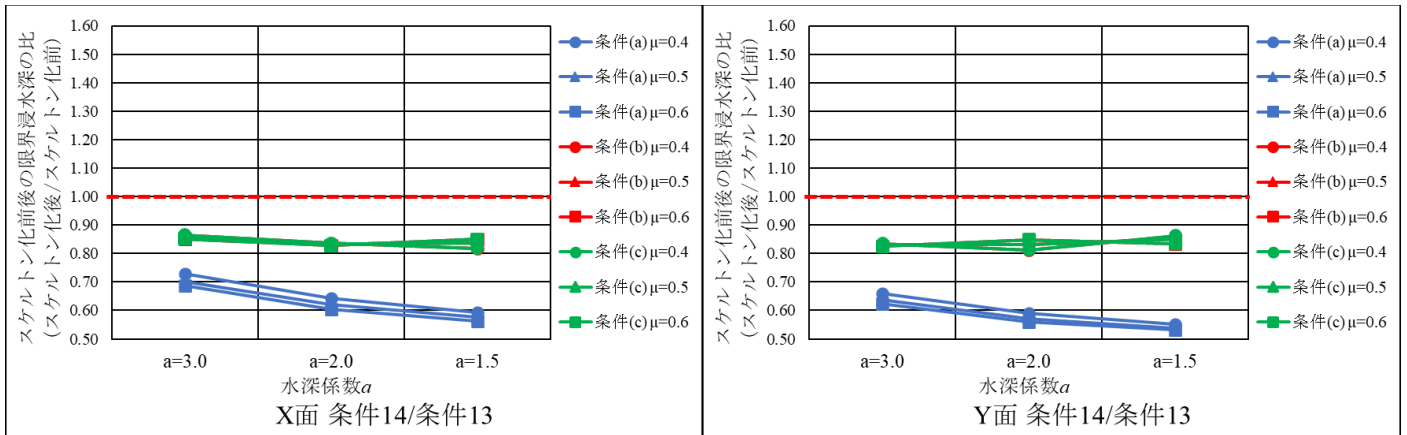


図 A-7 滑動 基準モデル 基礎 2 倍

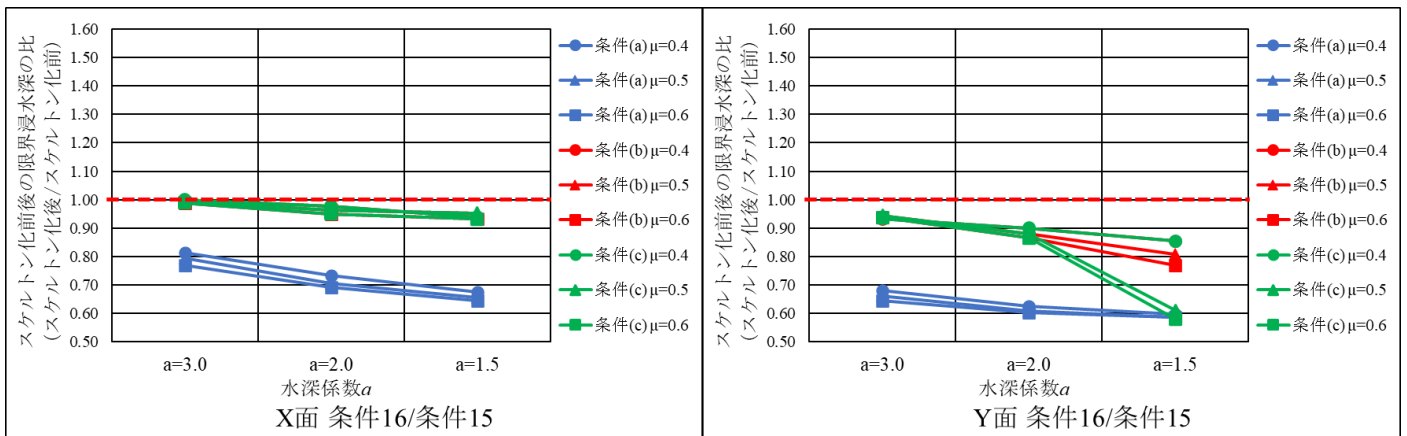


図 A-8 滑動 X2 倍 基礎 2 倍

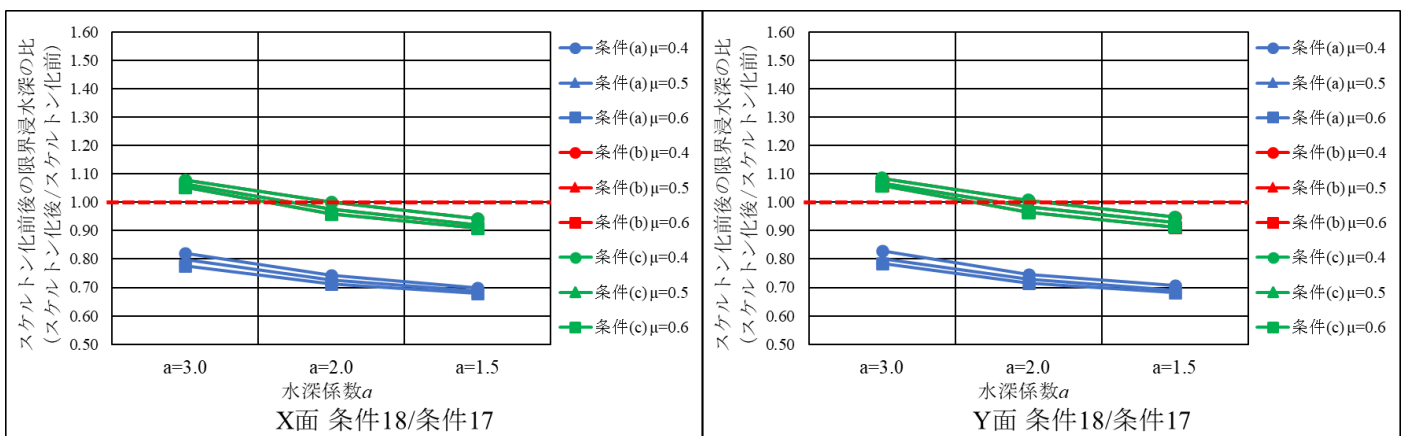


図 A-9 滑動 Y2 倍 基礎 2 倍

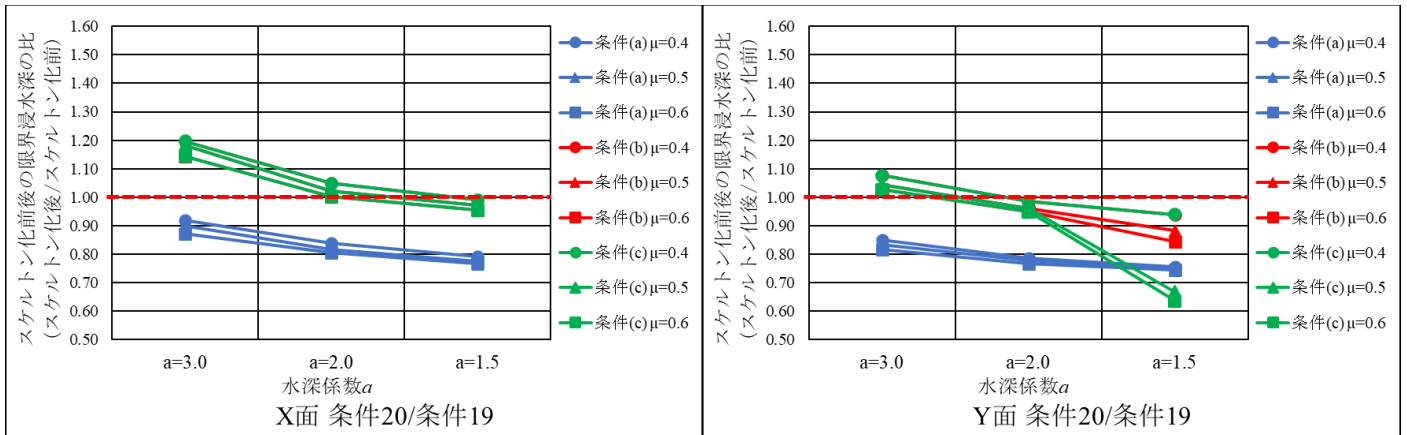


図 A-10 滑動 XY2倍 基礎2倍

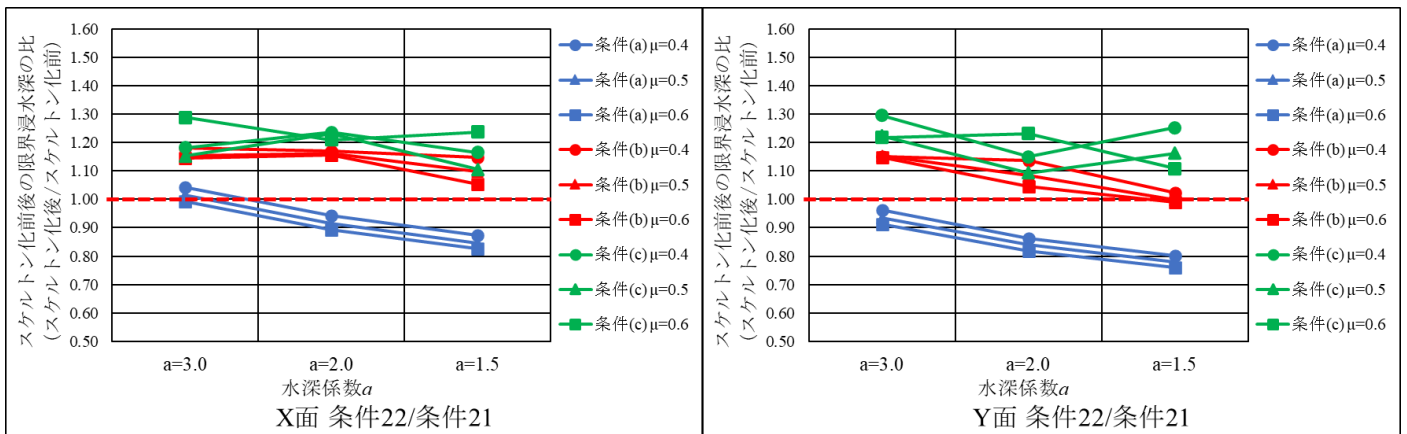


図 A-11 滑動 Z2倍 基礎2倍

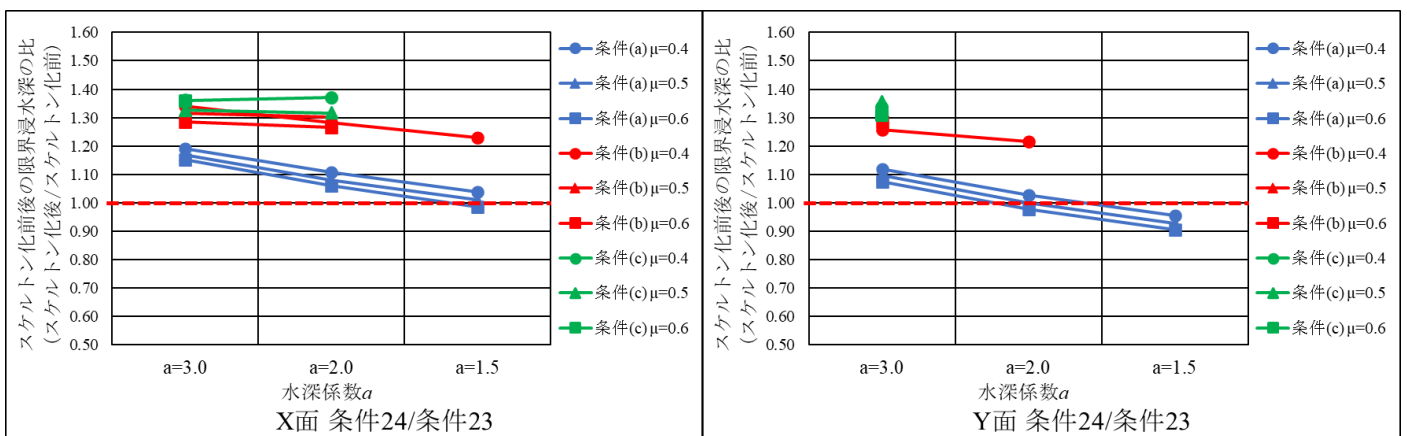


図 A-12 滑動 Z4倍 基礎2倍

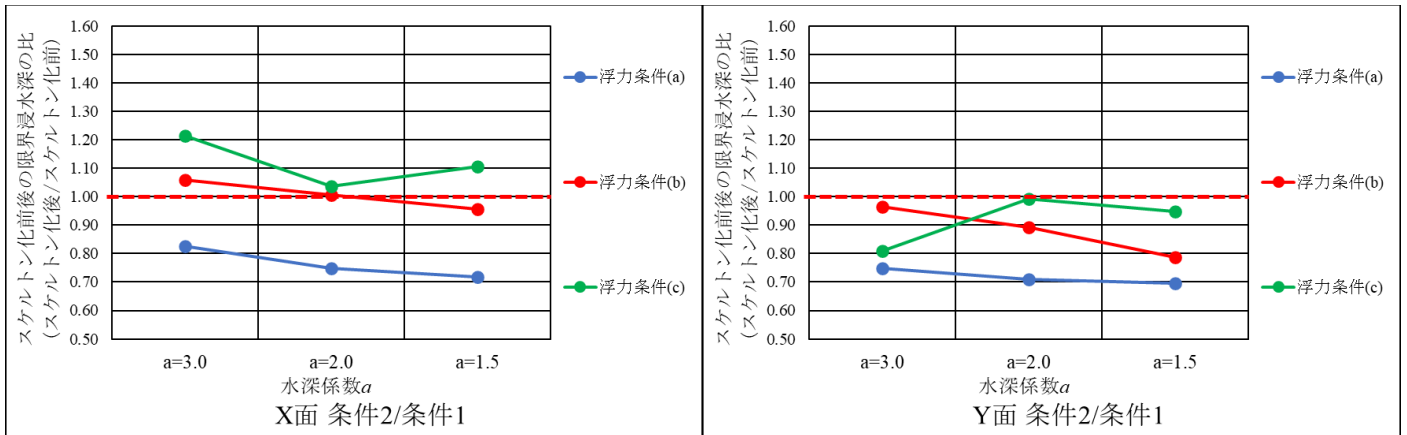


図 A-13 転倒 基準モデル

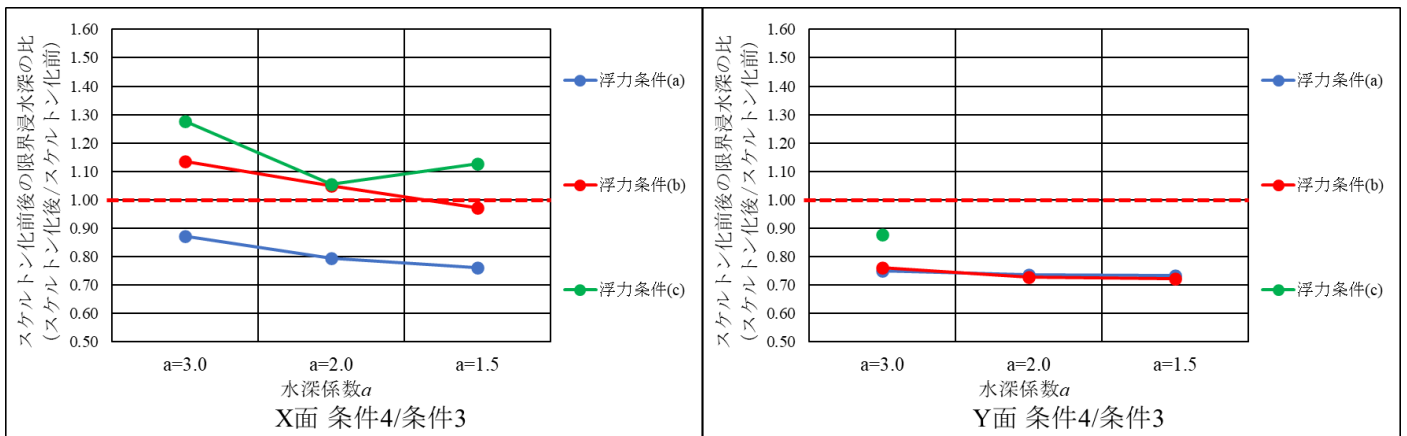


図 A-14 転倒 X2倍

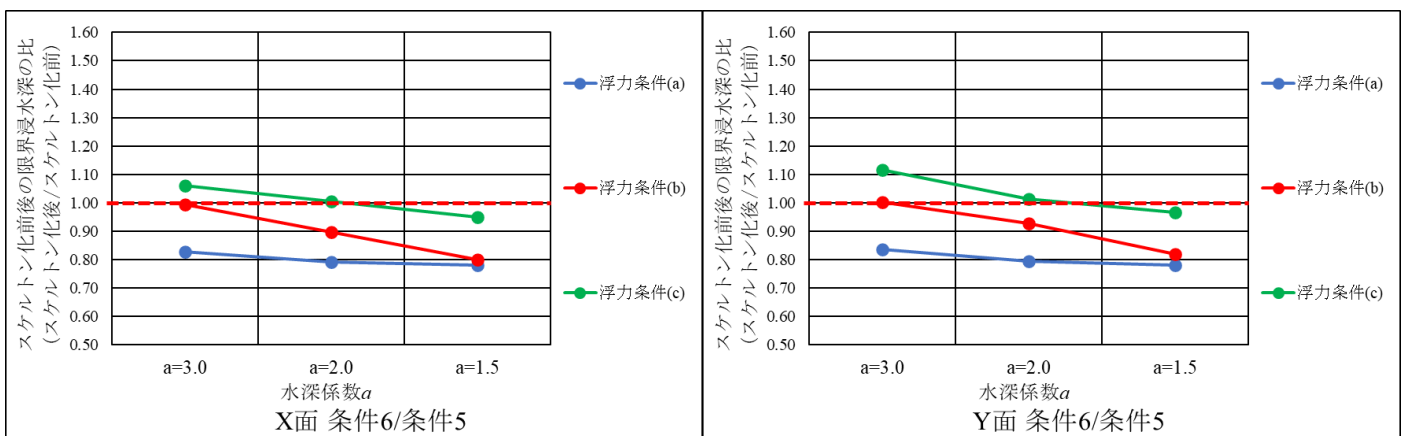


図 A-15 転倒 Y2倍

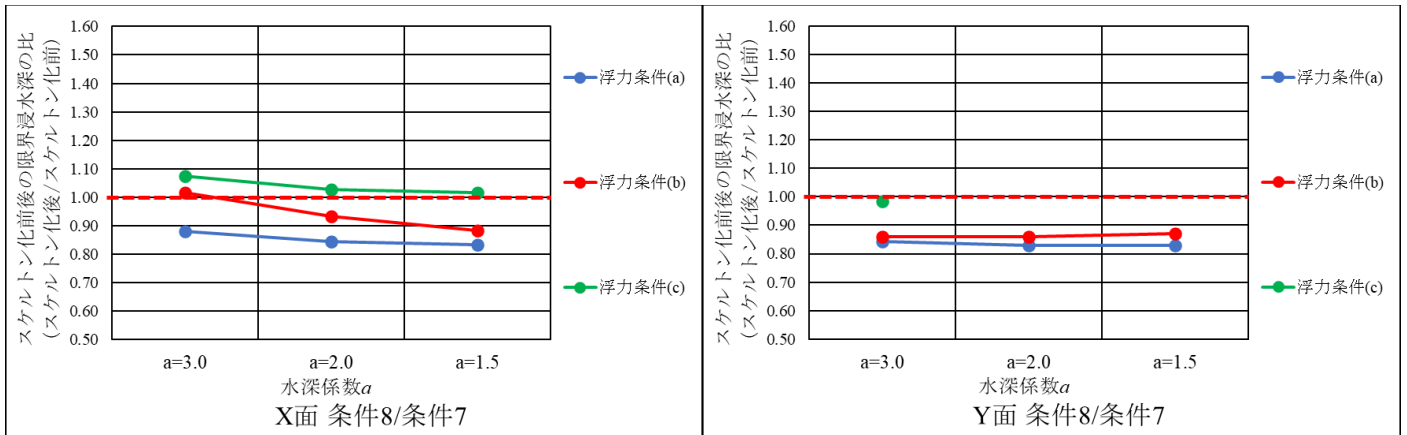


図 A-16 転倒 XY2 倍

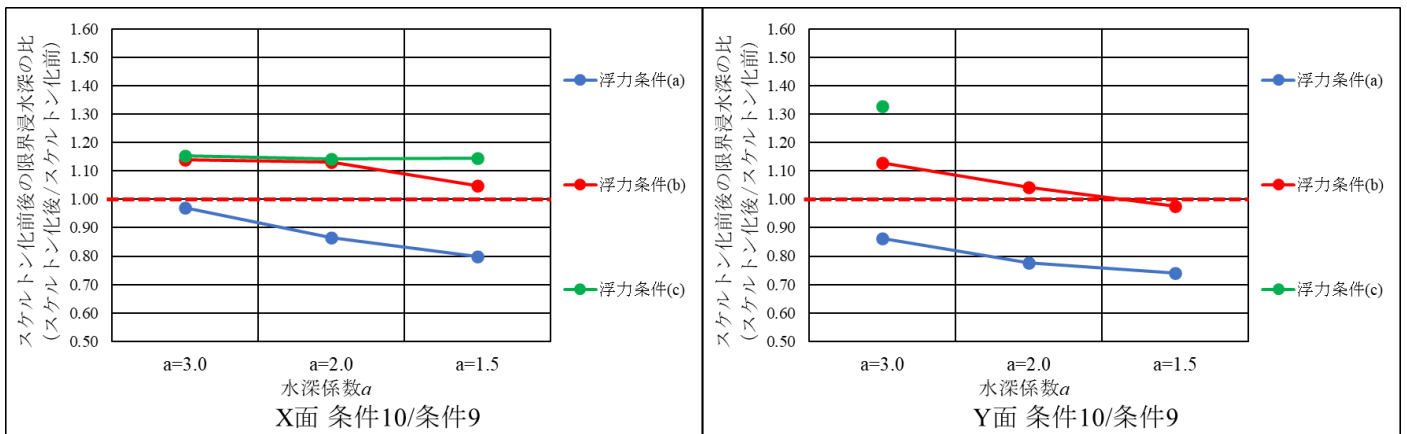


図 A-17 転倒 Z2 倍

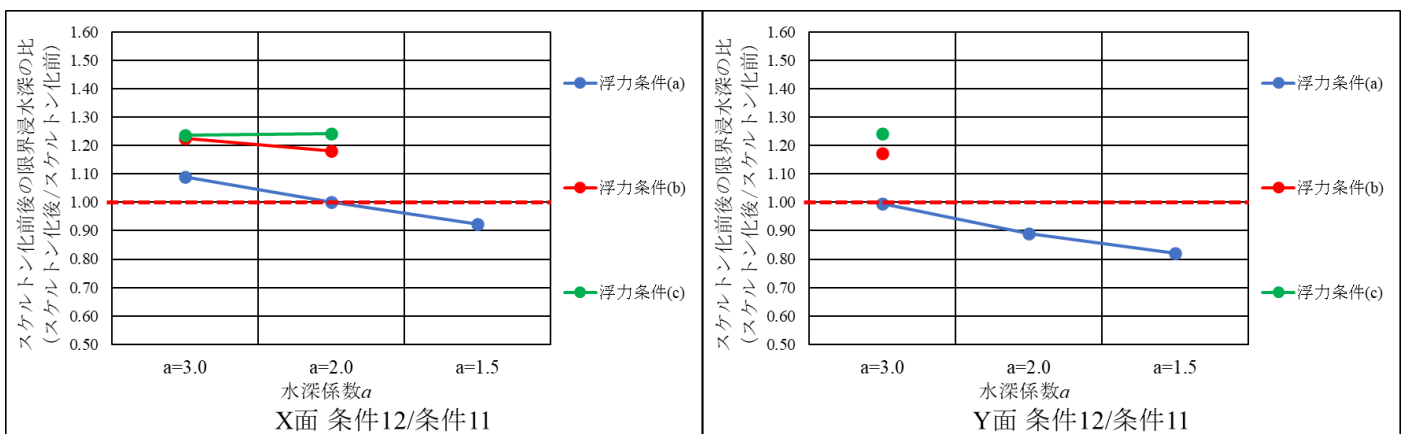


図 A-18 転倒 Z4 倍

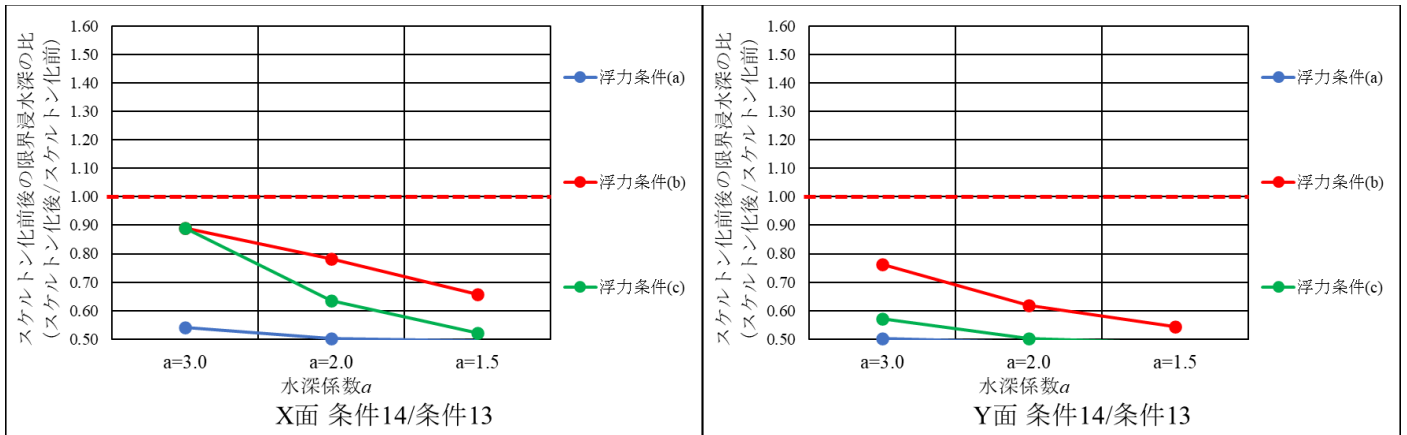


図 A-19 転倒 基準モデル 基礎 2 倍

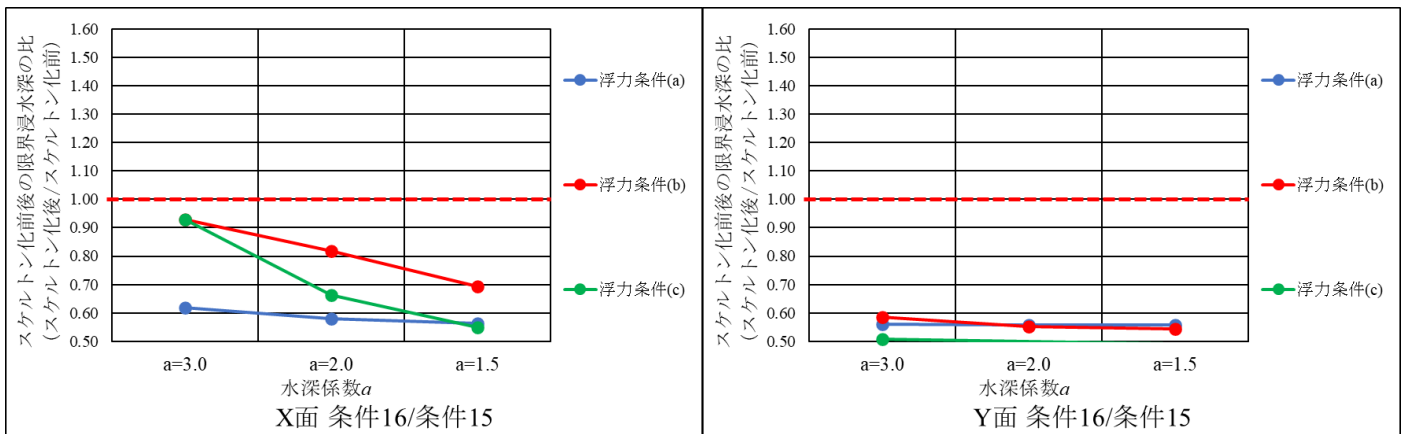


図 A-20 転倒 X2 倍 基礎 2 倍

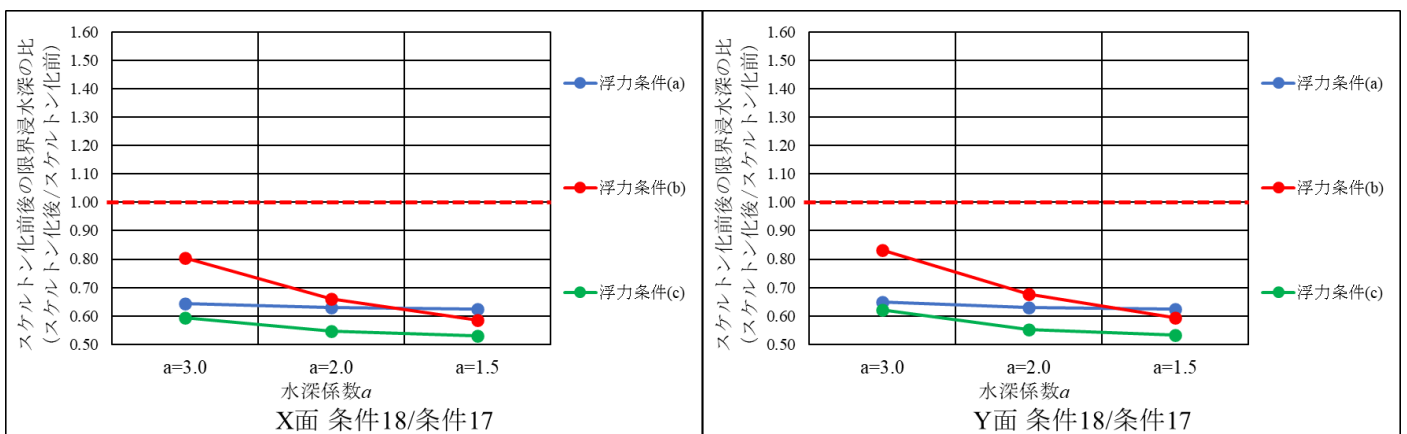


図 A-21 転倒 Y2 倍 基礎 2 倍

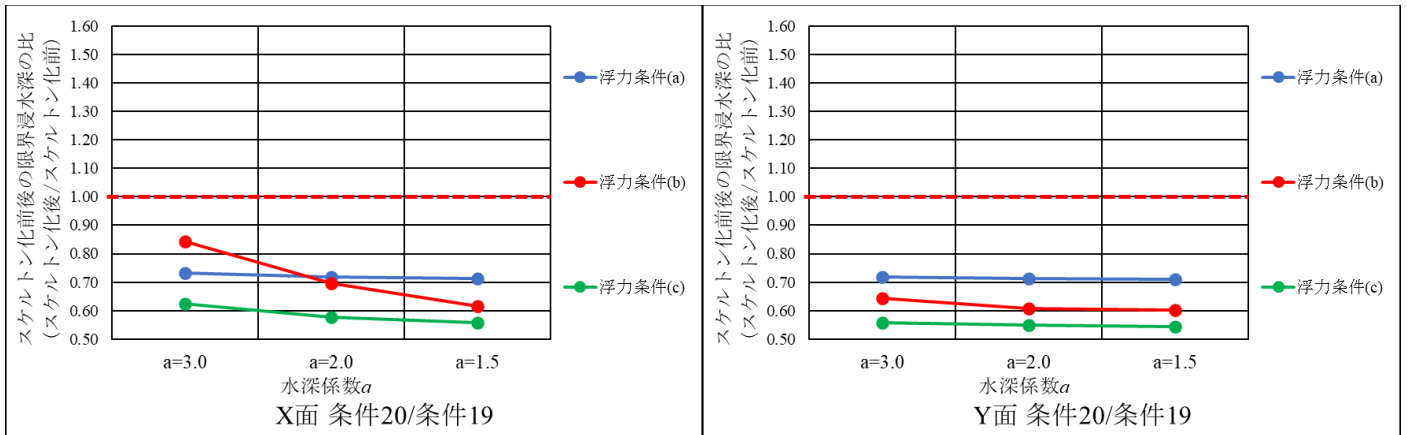


図 A-22 転倒 XY2倍 基礎2倍

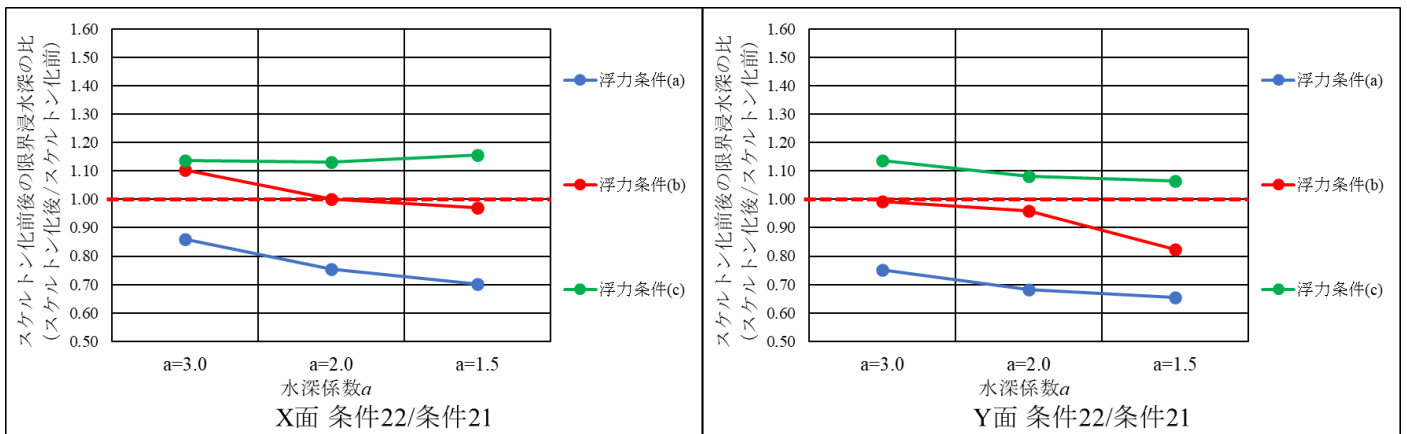


図 A-23 転倒 Z2倍 基礎2倍

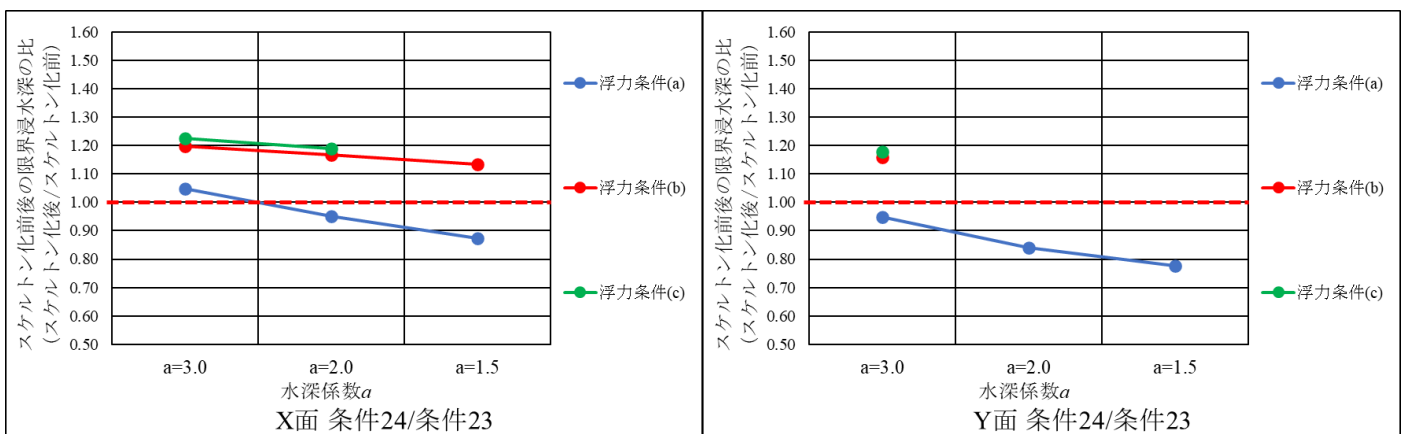


図 A-24 滑動 X2倍 基礎2倍 浮力条件(c)

付録 B 摩擦係数がスケルトン化の効果に与える影響

付録 B 摩擦係数がスケルトン化の効果に与える影響

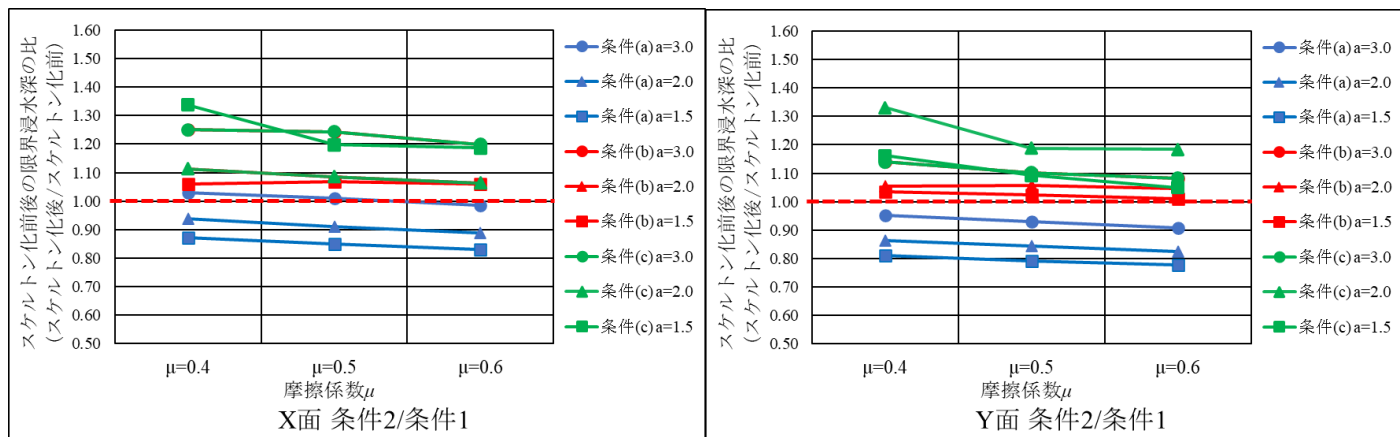


図 B-1 滑動 基準モデル

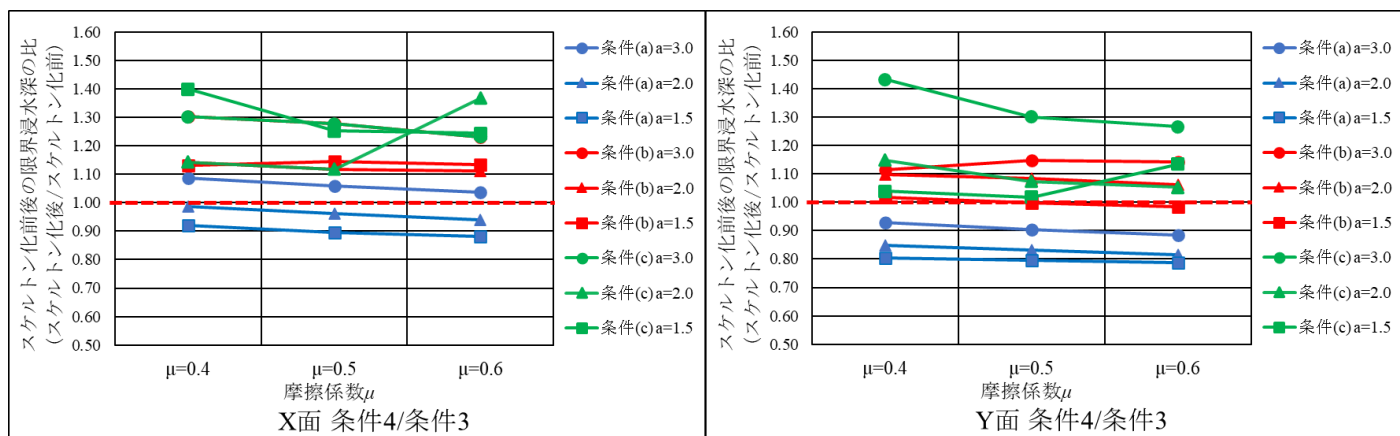


図 B-2 滑動 X2倍

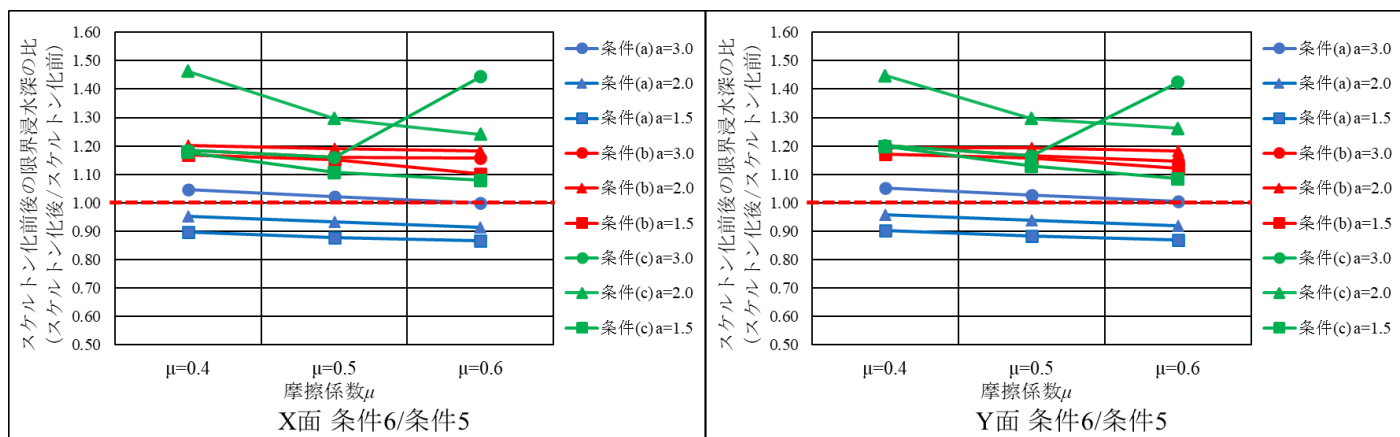


図 B-3 滑動 Y2倍

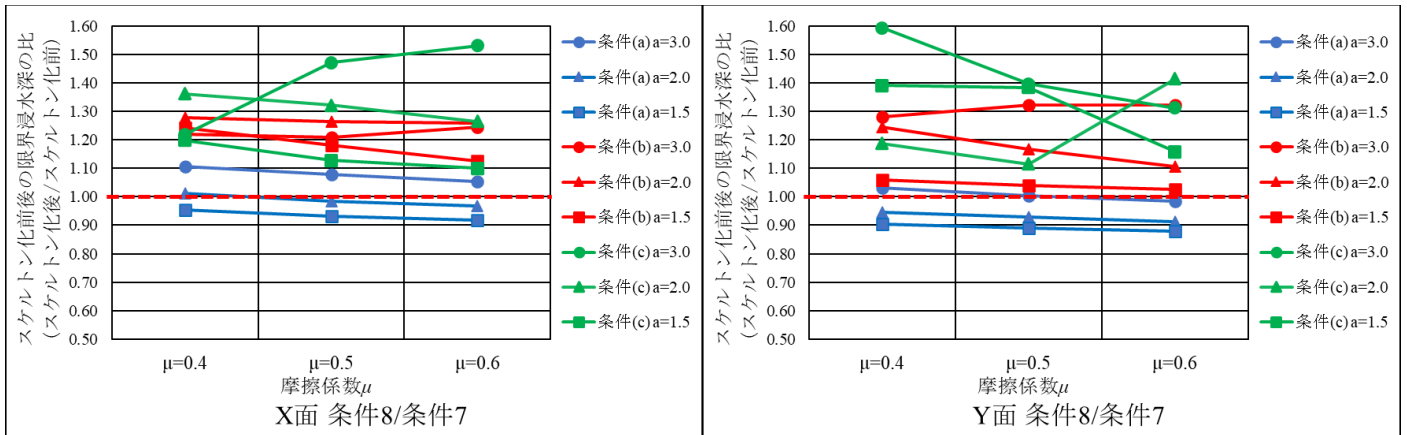


図 B-4 滑動 XY2倍

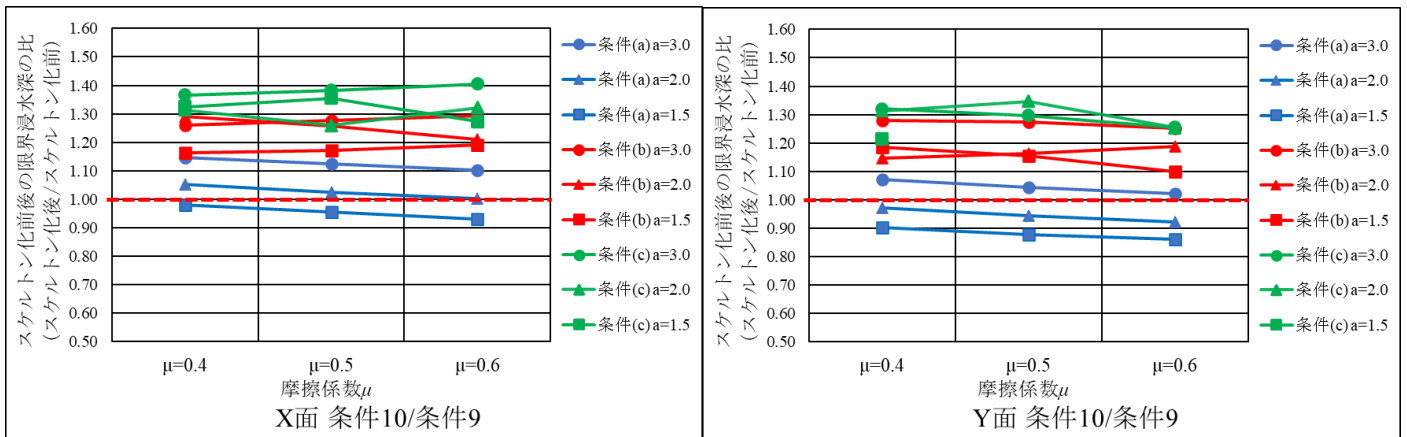


図 B-5 滑動 Z2倍

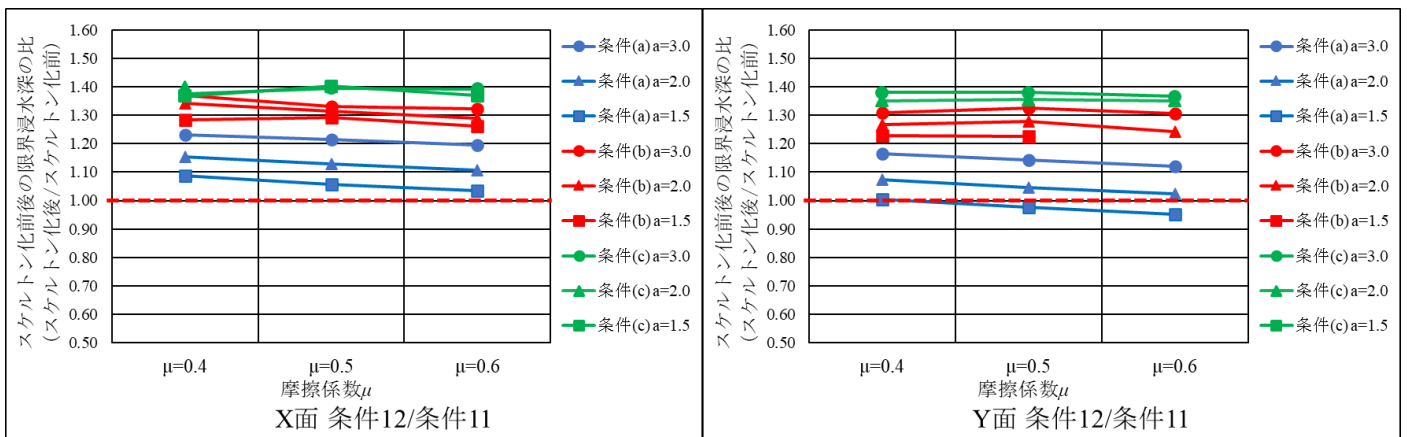


図 B-6 滑動 Z4倍

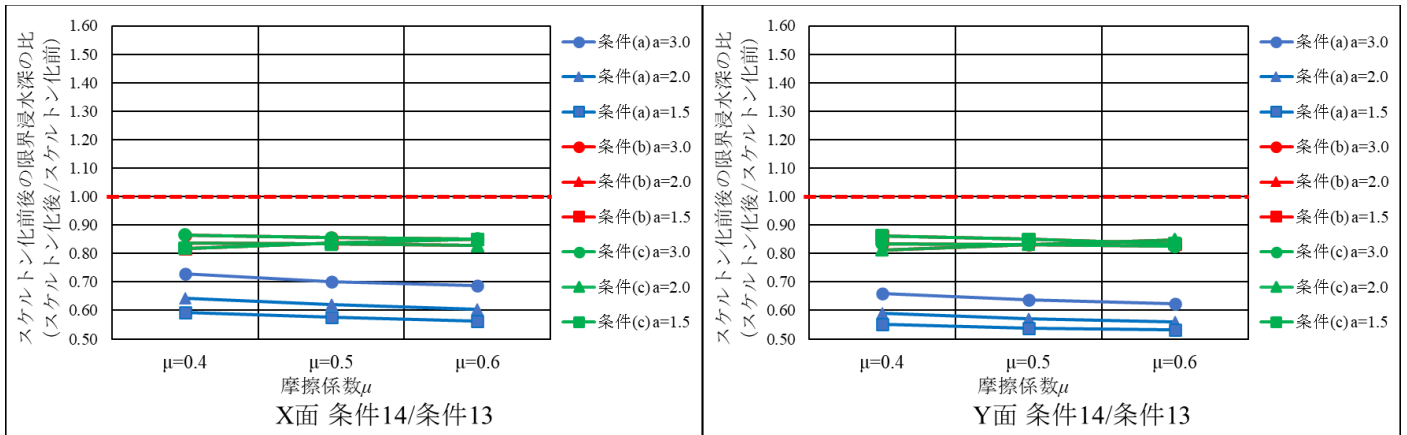


図 B-7 滑動 基準モデル 基礎 2 倍

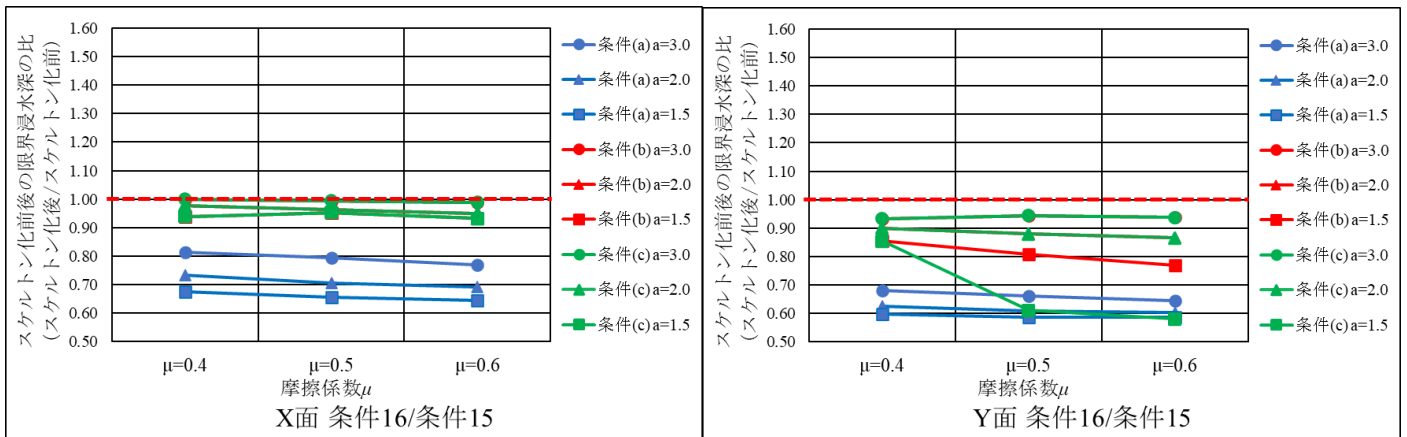


図 B-8 滑動 X2 倍 基礎 2 倍

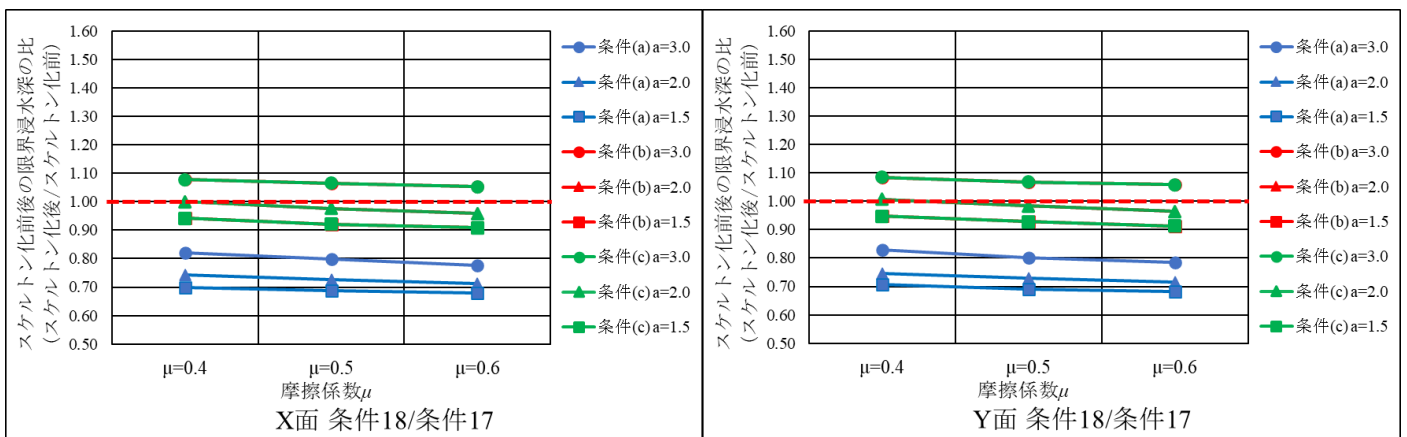


図 B-9 滑動 Y2 倍 基礎 2 倍

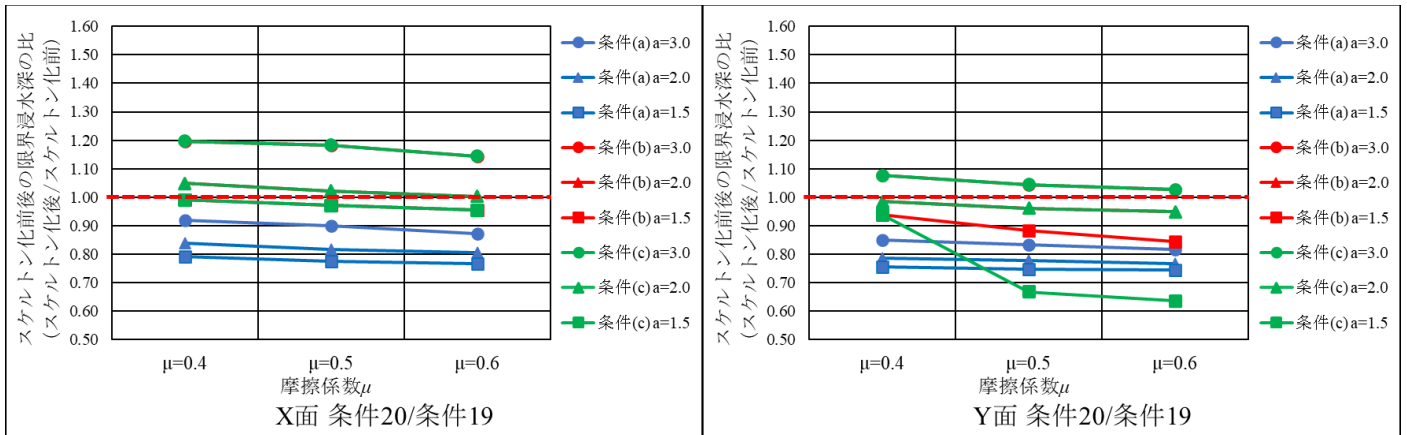


図 B-10 滑動 XY2倍 基礎2倍

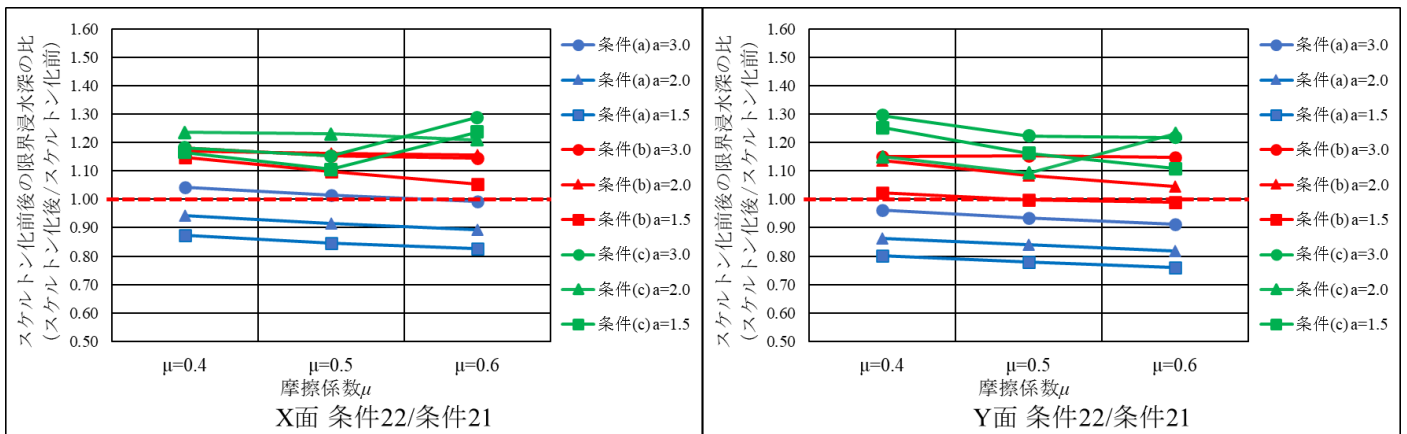


図 B-11 滑動 Z2倍 基礎2倍

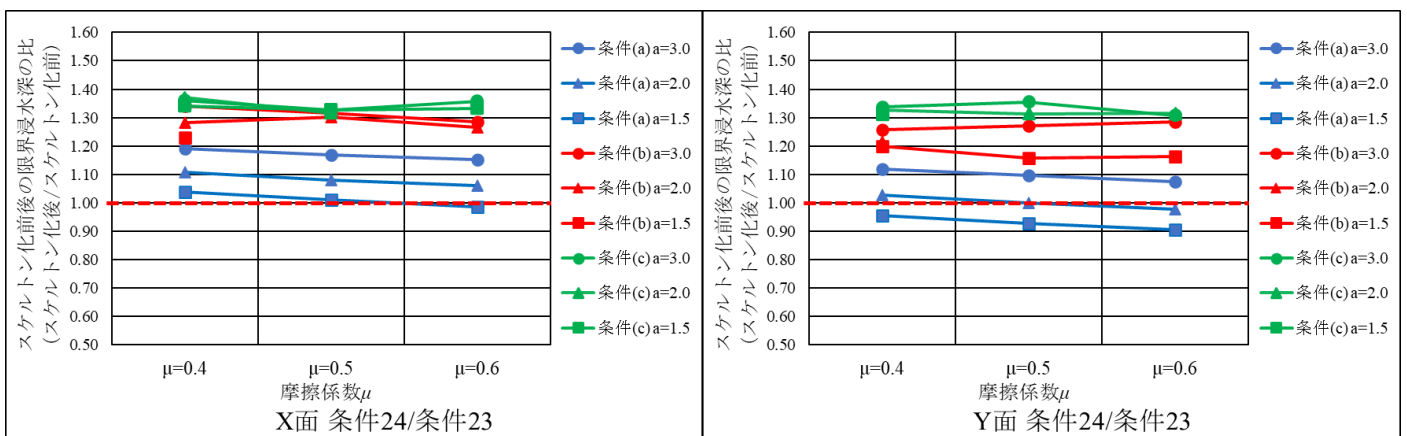


図 B-12 滑動 Z4倍 基礎2倍

付録 C 基礎部の空気層がスケルトン化の効果に与える影響

付録 C 基礎部の空気層がスケルトン化の効果に与える影響

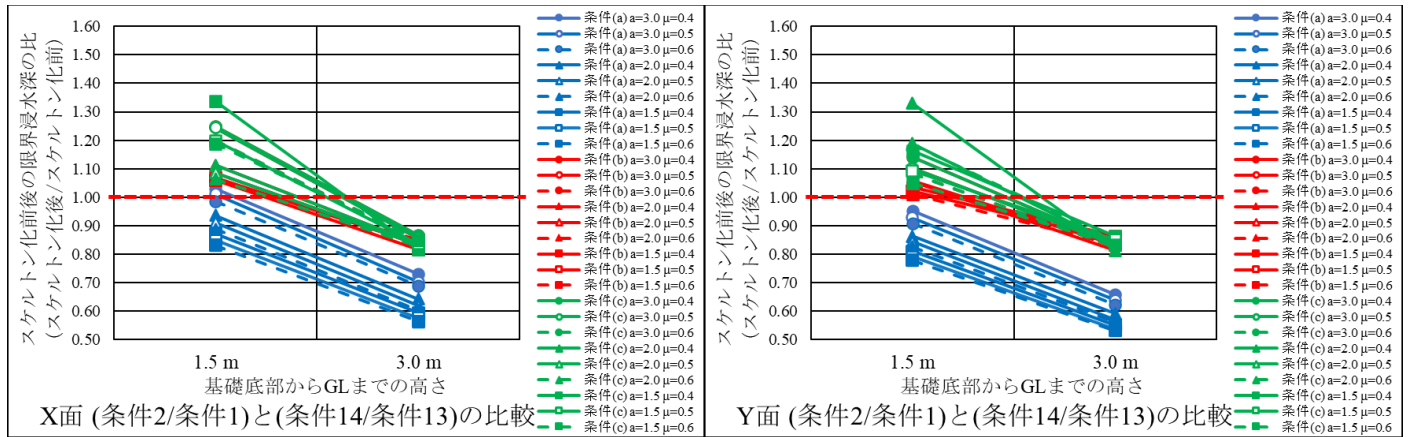


図 C-1 滑動 基準モデル

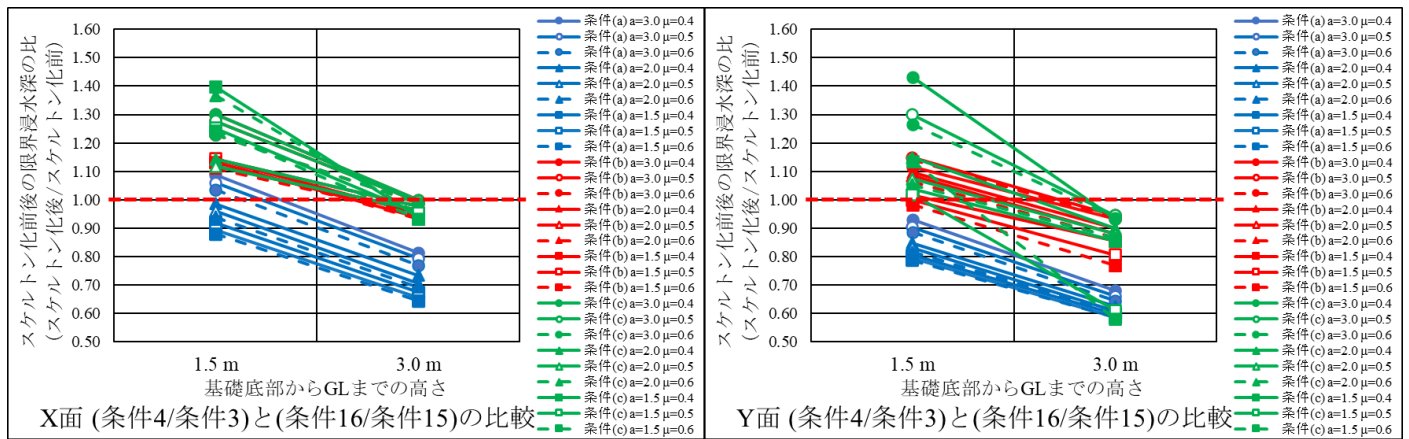


図 C-2 滑動 X2 倍

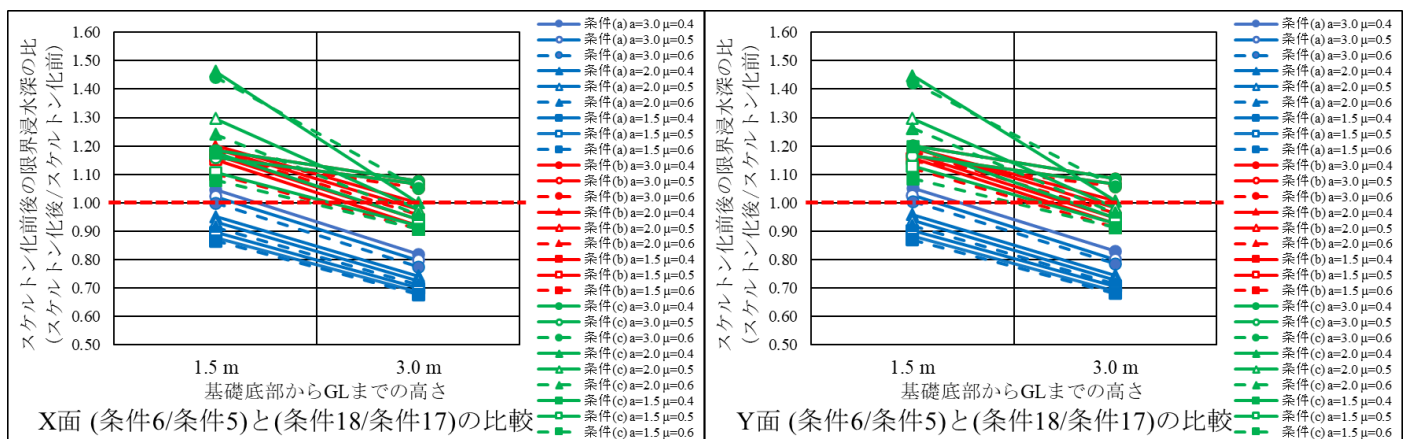


図 C-3 滑動 Y2 倍

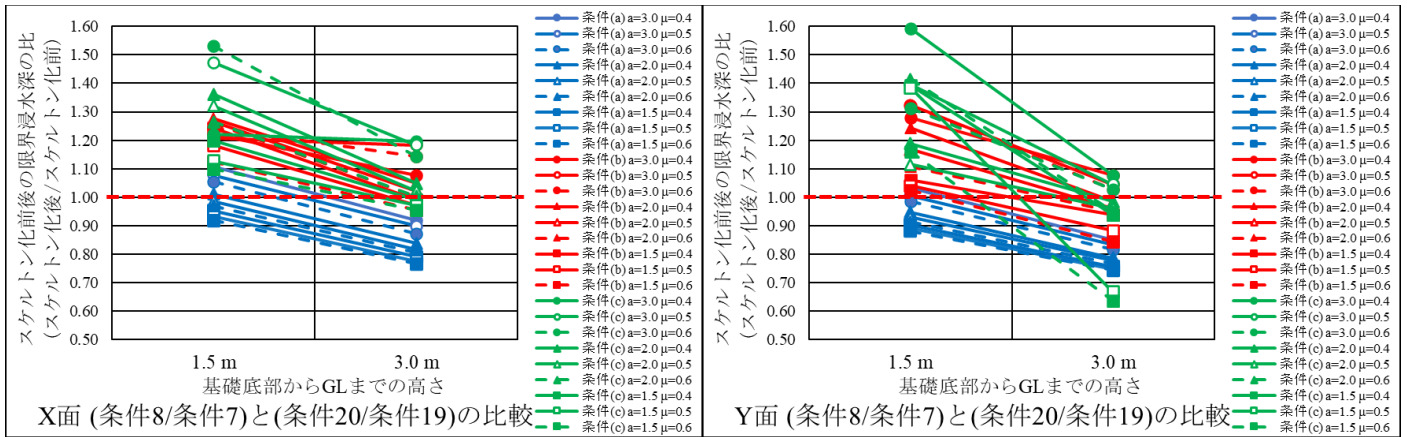


図 C-4 滑動 XY2 倍

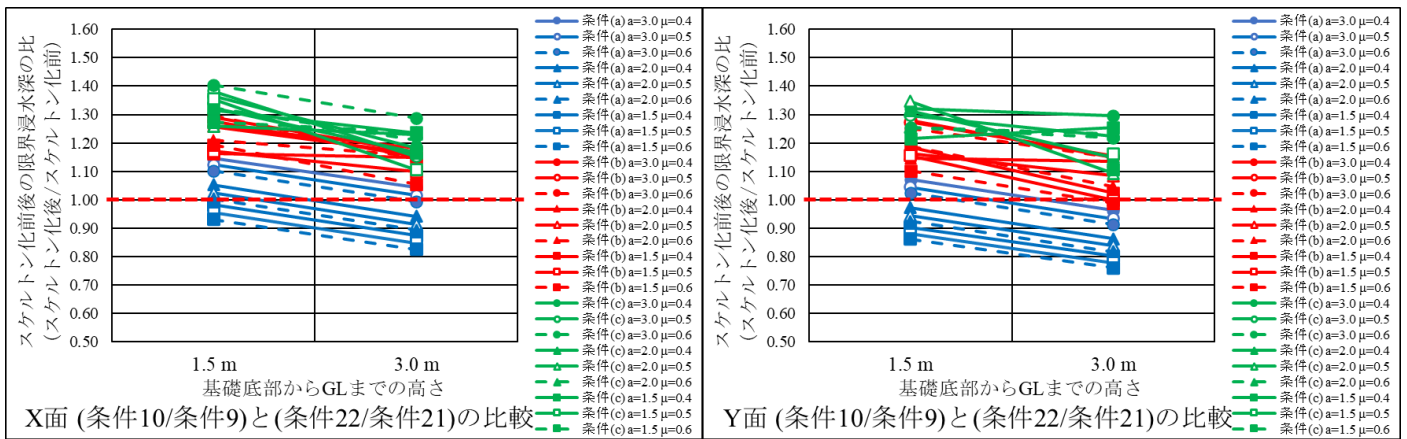


図 C-5 滑動 Z2 倍

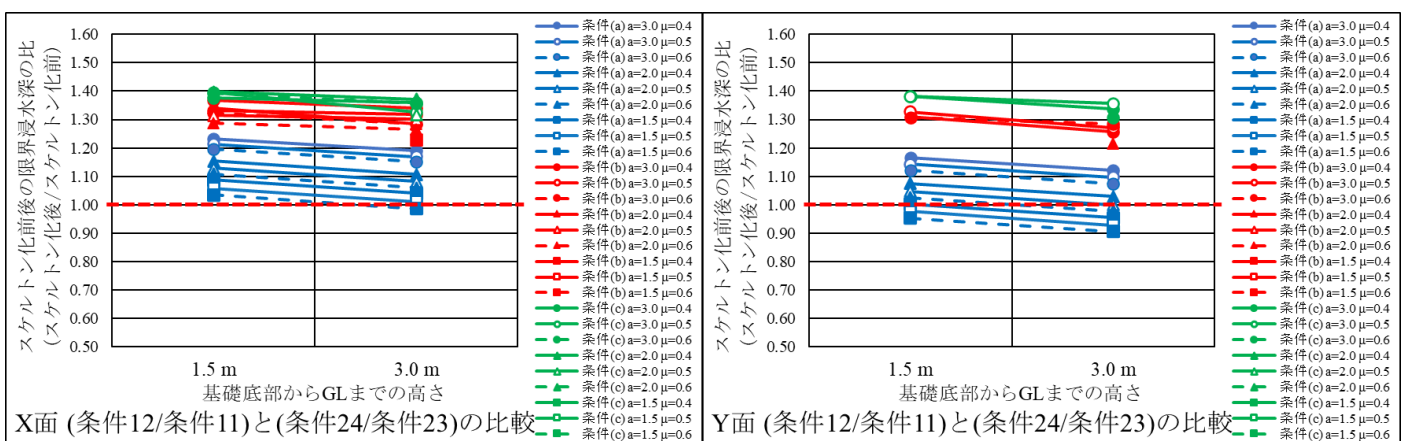


図 B-6 滑動 Z4 倍

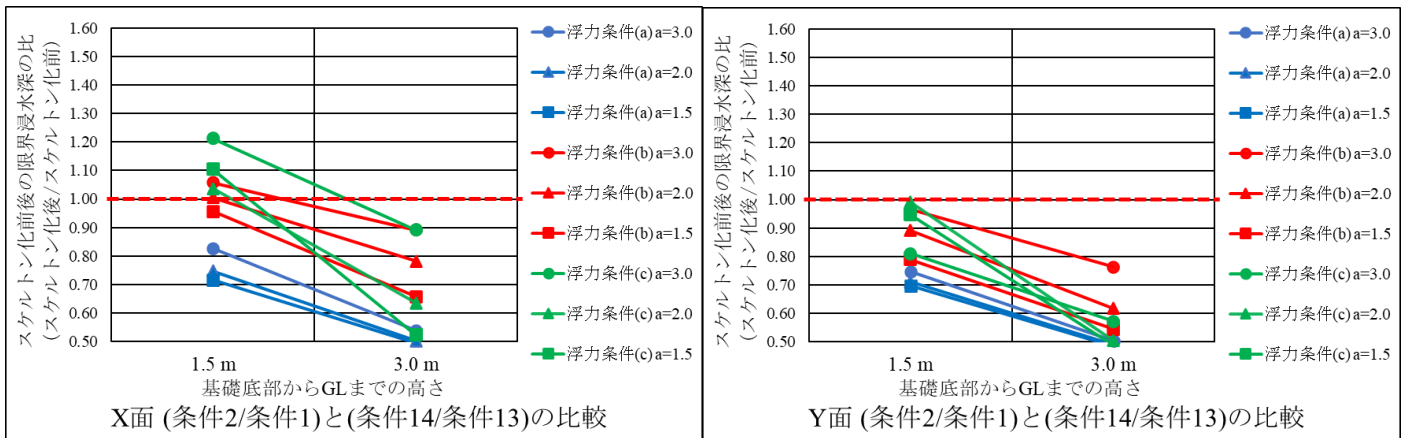


図 C-7 転倒 基準モデル

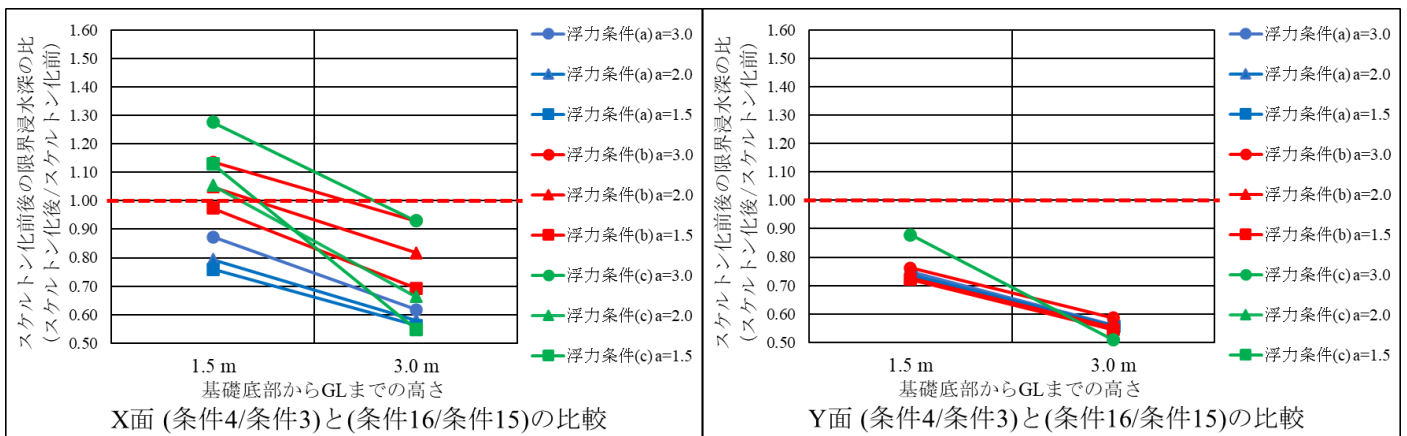


図 C-8 転倒 X2倍

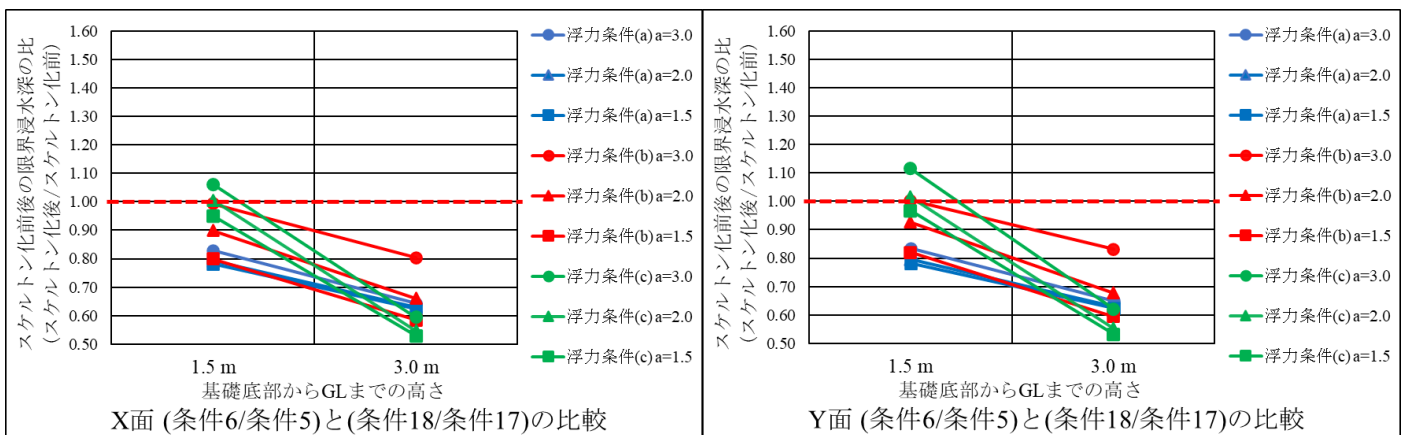


図 C-9 転倒 Y2倍

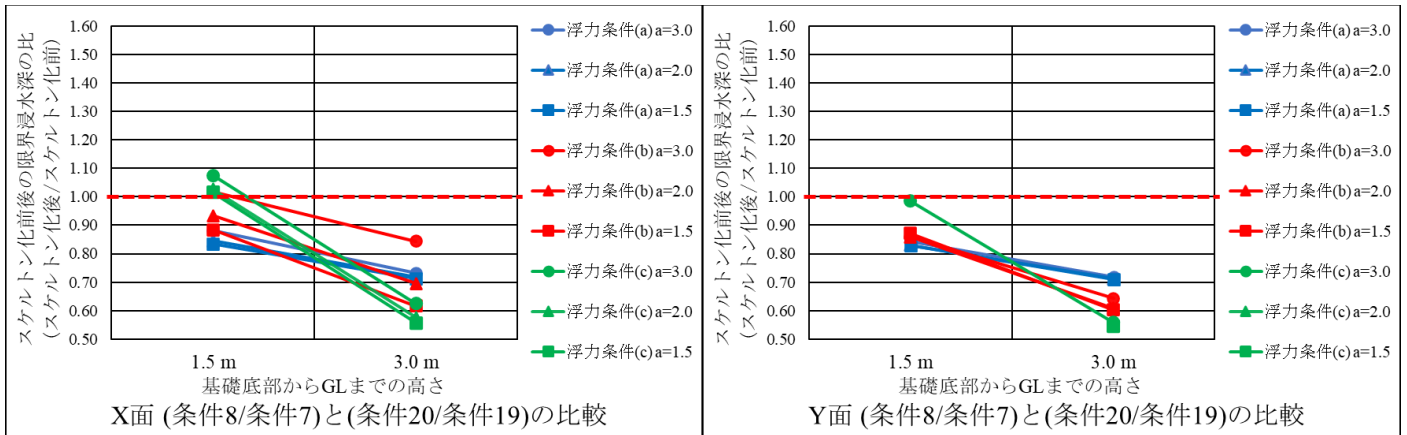


図 C-10 転倒 XY2 倍

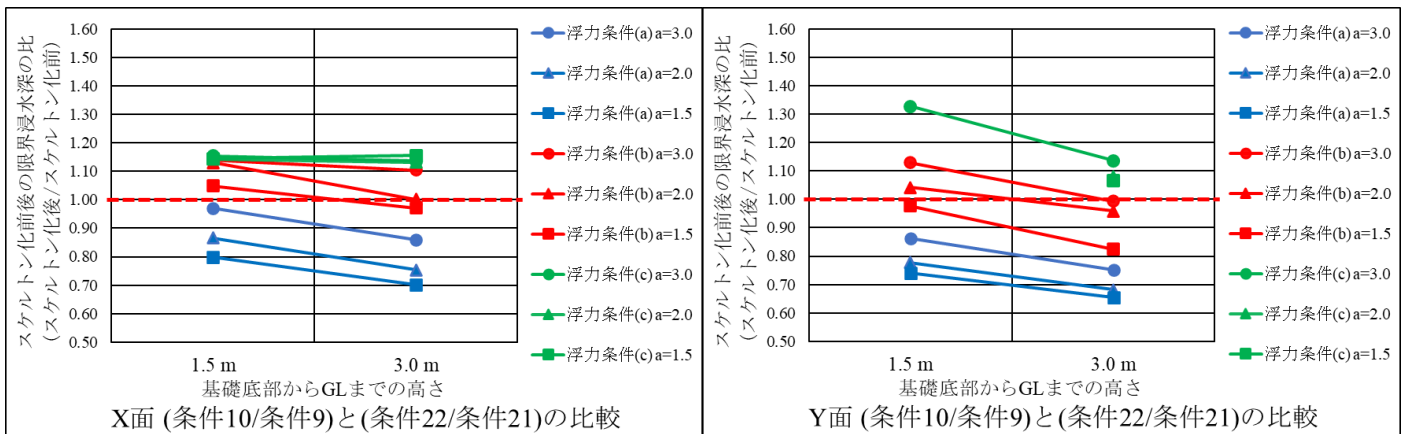


図 C-11 転倒 Z2 倍

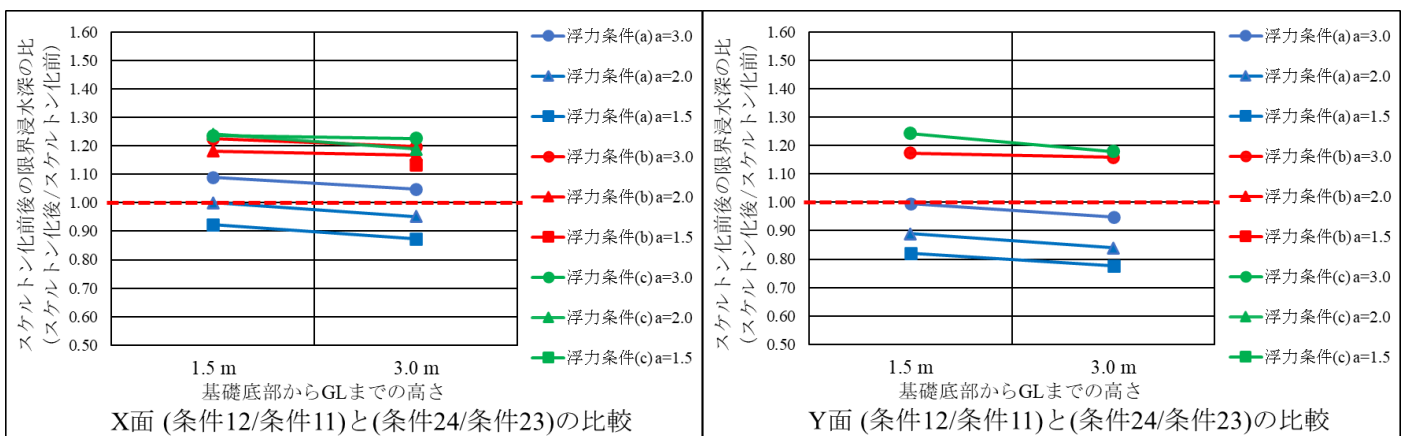


図 C-12 転倒 Z4 倍

付録 D 津波の低減率と滑動耐力の低減率の関係

付録 D 津波の低減率と滑動耐力の低減率の関係

表 D-1 滑動時の浮力条件(a)の X 面のスケルトン化前後の限界浸水深の比

受圧面	X 面								
浮力条件	条件(a)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数 μ	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
条件 2/条件 1	1.03	1.01	0.98	0.94	0.91	0.89	0.87	0.85	0.83
条件 4/条件 3	1.09	1.06	1.04	0.99	0.96	0.94	0.92	0.89	0.88
条件 6/条件 5	1.05	1.02	1.00	0.95	0.93	0.91	0.90	0.88	0.87
条件 8/条件 7	1.11	1.08	1.05	1.01	0.99	0.97	0.95	0.93	0.92
条件 10/条件 9	1.15	1.12	1.10	1.05	1.03	1.00	0.98	0.95	0.93
条件 12/条件 11	1.23	1.21	1.20	1.15	1.13	1.11	1.09	1.06	1.03
条件 14/条件 13	0.73	0.70	0.69	0.64	0.62	0.60	0.59	0.58	0.56
条件 16/条件 15	0.81	0.79	0.77	0.73	0.71	0.69	0.67	0.66	0.64
条件 18/条件 17	0.82	0.80	0.78	0.74	0.73	0.71	0.70	0.69	0.68
条件 20/条件 19	0.92	0.90	0.87	0.84	0.82	0.81	0.79	0.78	0.77
条件 22/条件 21	1.04	1.02	1.00	0.94	0.91	0.89	0.87	0.85	0.83
条件 24/条件 23	1.19	1.17	1.15	1.11	1.08	1.06	1.04	1.01	0.99

表 D-2 滑動時の浮力条件(b)の X 面のスケルトン化前後の限界浸水深の比

受圧面	X 面								
浮力条件	条件(b)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数 μ	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
条件 2/条件 1	1.25	1.24	1.20	1.11	1.09	1.06	1.06	1.07	1.06
条件 4/条件 3	1.30	1.28	1.23	1.14	1.12	1.11	1.13	1.14	1.13
条件 6/条件 5	1.19	1.16	1.16	1.20	1.19	1.18	1.17	1.15	1.10
条件 8/条件 7	1.22	1.21	1.24	1.28	1.27	1.26	1.24	1.18	1.12
条件 10/条件 9	1.26	1.28	1.29	1.29	1.26	1.21	1.16	1.17	1.19
条件 12/条件 11	1.37	1.33	1.32	1.34	1.31	1.29	1.29	1.29	1.26
条件 14/条件 13	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.83	0.82	0.84	0.85
条件 16/条件 15	1.02	1.01	1.01	0.98	0.96	0.95	0.94	0.95	0.93
条件 18/条件 17	1.08	1.07	1.05	1.01	0.98	0.96	0.94	0.92	0.91
条件 20/条件 19	1.20	1.18	1.14	1.05	1.02	1.00	0.99	0.97	0.95
条件 22/条件 21	1.18	1.15	1.15	1.17	1.16	1.16	1.15	1.10	1.05
条件 24/条件 23	1.34	1.32	1.28	1.28	1.30	1.27	1.23	1.23	1.24

表 D-3 滑動時の浮力条件(c)の X 面のスケルトン化前後の限界浸水深の比

受圧面	X 面								
浮力条件	条件(c)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数 μ	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
条件 2/条件 1	1.25	1.24	1.20	1.11	1.09	1.06	1.34	1.20	1.19
条件 4/条件 3	1.30	1.28	1.23	1.14	1.12	1.37	1.40	1.25	1.24
条件 6/条件 5	1.19	1.16	1.44	1.46	1.30	1.24	1.18	1.11	1.08
条件 8/条件 7	1.22	1.47	1.53	1.36	1.32	1.26	1.20	1.13	1.10
条件 10/条件 9	1.37	1.38	1.40	1.31	1.26	1.32	1.32	1.36	1.27
条件 12/条件 11	1.38	1.40	1.39	1.40	1.38	1.38	1.37	1.40	1.37
条件 14/条件 13	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.83	0.82	0.84	0.85
条件 16/条件 15	1.02	1.01	1.01	0.98	0.96	0.95	0.94	0.95	0.93
条件 18/条件 17	1.08	1.07	1.05	1.01	0.98	0.96	0.94	0.92	0.91
条件 20/条件 19	1.20	1.18	1.14	1.05	1.02	1.00	0.99	0.97	0.95
条件 22/条件 21	1.18	1.15	1.29	1.24	1.23	1.21	1.17	1.11	1.24
条件 24/条件 23	1.36	1.33	1.36	1.37	1.32	1.34	1.34	1.33	1.33

表 D-4 滑動時の浮力条件(a)の Y 面のスケルトン化前後の限界浸水深の比

受圧面	Y 面								
浮力条件	条件(a)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数 μ	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
条件 2/条件 1	0.95	0.93	0.91	0.86	0.84	0.83	0.81	0.79	0.78
条件 4/条件 3	0.93	0.90	0.89	0.85	0.83	0.82	0.80	0.79	0.79
条件 6/条件 5	1.05	1.03	1.00	0.96	0.94	0.92	0.90	0.88	0.87
条件 8/条件 7	1.03	1.00	0.99	0.95	0.93	0.91	0.90	0.89	0.88
条件 10/条件 9	1.07	1.04	1.02	0.97	0.94	0.92	0.90	0.88	0.86
条件 12/条件 11	1.17	1.14	1.12	1.07	1.05	1.02	1.00	0.98	0.95
条件 14/条件 13	0.66	0.64	0.62	0.59	0.57	0.56	0.55	0.54	0.53
条件 16/条件 15	0.68	0.66	0.65	0.62	0.61	0.60	0.60	0.59	0.59
条件 18/条件 17	0.83	0.80	0.79	0.75	0.73	0.71	0.71	0.69	0.68
条件 20/条件 19	0.85	0.83	0.82	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74
条件 22/条件 21	0.96	0.93	0.91	0.86	0.84	0.82	0.80	0.78	0.76
条件 24/条件 23	1.12	1.10	1.07	1.03	1.00	0.98	0.96	0.93	0.91

表 D-5 滑動時の浮力条件(b)の Y 面のスケルトン化前後の限界浸水深の比

受圧面	Y 面								
浮力条件	条件(b)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数 μ	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
条件 2/条件 1	1.14	1.10	1.08	1.05	1.06	1.05	1.04	1.02	1.01
条件 4/条件 3	1.11	1.15	1.14	1.10	1.08	1.06	1.02	1.01	0.98
条件 6/条件 5	1.20	1.17	1.15	1.19	1.19	1.18	1.17	1.16	1.12
条件 8/条件 7	1.28	1.32	1.32	1.24	1.17	1.11	1.06	1.04	1.03
条件 10/条件 9	1.28	1.27	1.25	1.15	1.16	1.19	1.18	1.16	1.10
条件 12/条件 11	1.31	1.33	1.31	1.27	1.28	1.24	1.23	1.23	None
条件 14/条件 13	0.84	0.83	0.83	0.81	0.83	0.85	0.86	0.85	0.83
条件 16/条件 15	0.93	0.94	0.94	0.90	0.88	0.87	0.85	0.81	0.77
条件 18/条件 17	1.08	1.07	1.06	1.01	0.98	0.96	0.95	0.93	0.91
条件 20/条件 19	1.08	1.04	1.03	0.98	0.96	0.95	0.94	0.88	0.84
条件 22/条件 21	1.15	1.15	1.15	1.14	1.08	1.05	1.02	1.02	1.01
条件 24/条件 23	1.26	1.27	1.29	1.22	1.21	1.23	1.20	1.16	1.16

表 D-6 滑動時の浮力条件(c)の Y 面のスケルトン化前後の限界浸水深の比

受圧面	Y 面								
浮力条件	条件(c)								
水深係数	a=3.0			a=2.0			a=1.5		
摩擦係数 μ	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
条件 2/条件 1	1.14	1.10	1.08	1.33	1.19	1.18	1.16	1.09	1.05
条件 4/条件 3	1.43	1.30	1.27	1.15	1.07	1.05	1.04	1.02	1.13
条件 6/条件 5	1.20	1.17	1.42	1.45	1.30	1.26	1.20	1.13	1.09
条件 8/条件 7	1.59	1.40	1.31	1.19	1.11	1.41	1.39	1.38	1.16
条件 10/条件 9	1.32	1.30	1.26	1.31	1.35	1.25	1.21	1.28	1.29
条件 12/条件 11	1.38	1.35	1.37	1.35	1.36	1.35	None	None	None
条件 14/条件 13	0.84	0.83	0.83	0.81	0.83	0.85	0.86	0.85	0.83
条件 16/条件 15	0.93	0.94	0.94	0.90	0.88	0.87	0.85	0.61	0.58
条件 18/条件 17	1.08	1.07	1.06	1.01	0.98	0.96	0.95	0.93	0.91
条件 20/条件 19	1.08	1.04	1.03	0.98	0.96	0.95	0.94	0.67	0.64
条件 22/条件 21	1.30	1.22	1.22	1.15	1.09	1.23	1.26	1.16	1.11
条件 24/条件 23	1.34	1.36	1.31	1.33	1.31	1.32	1.31	None	None

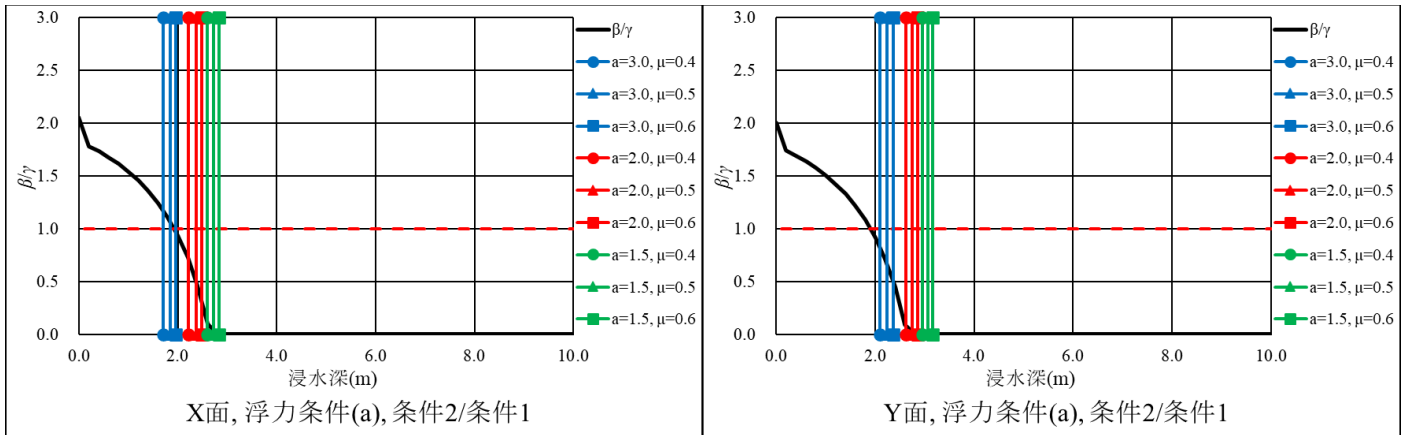


図 D-1 滑動 基準モデル 浮力条件(a)

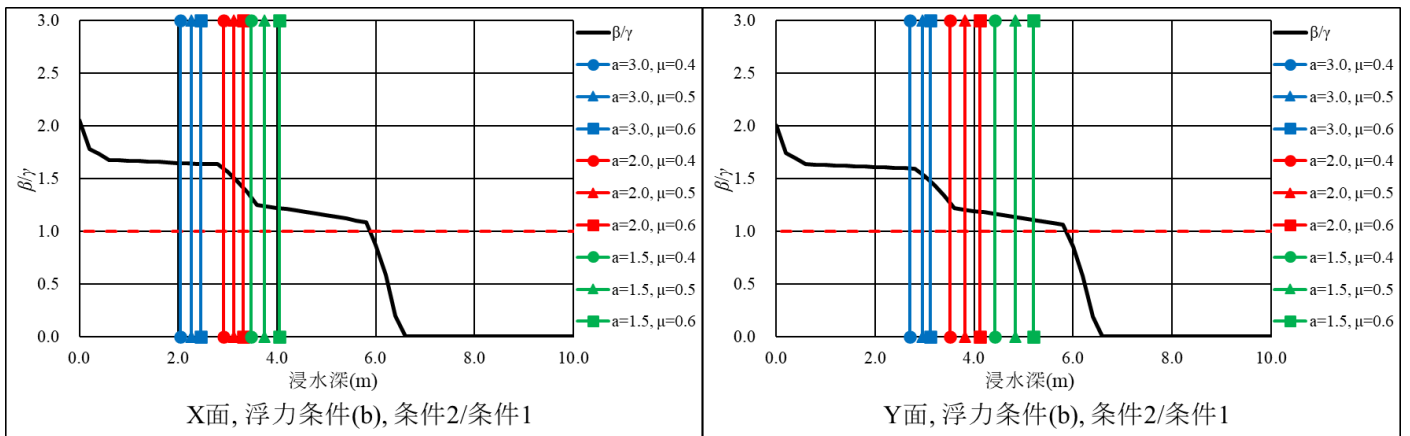


図 D-2 滑動 基準モデル 浮力条件(b)

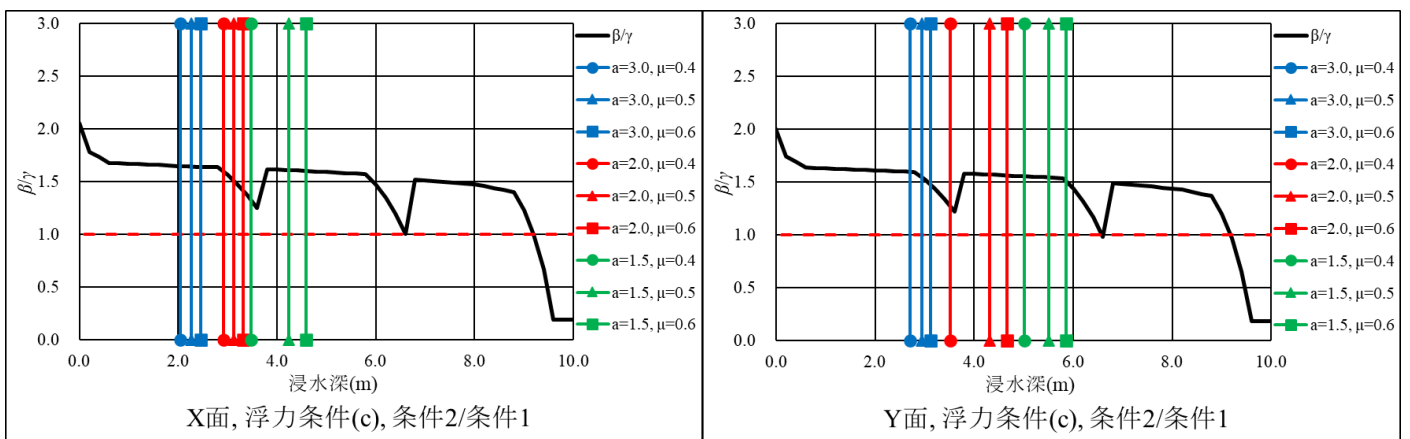


図 D-3 滑動 基準モデル 浮力条件(c)

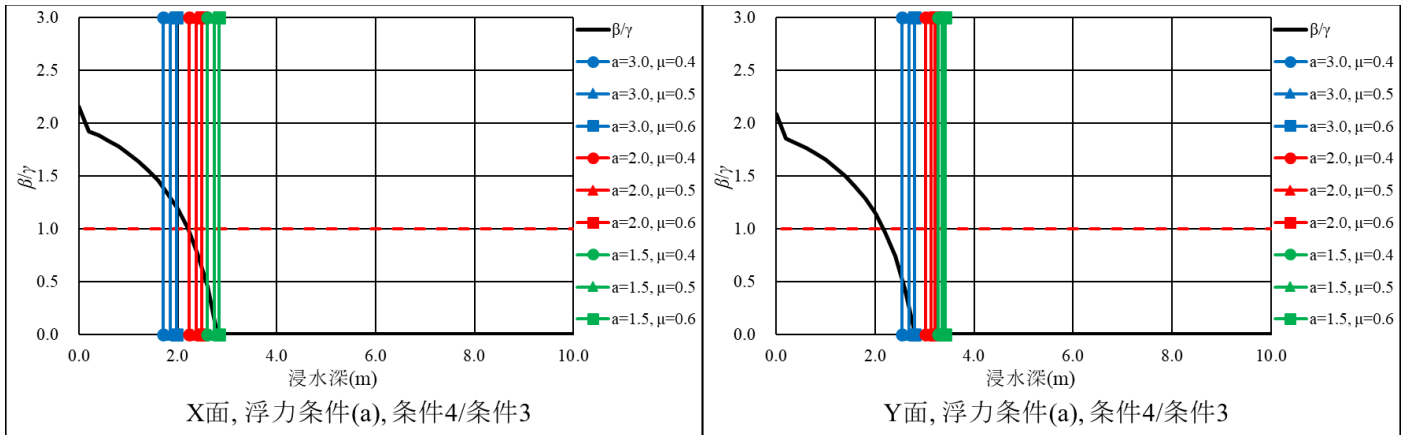


图 D-4 滑动 X2 倍 浮力条件(a)

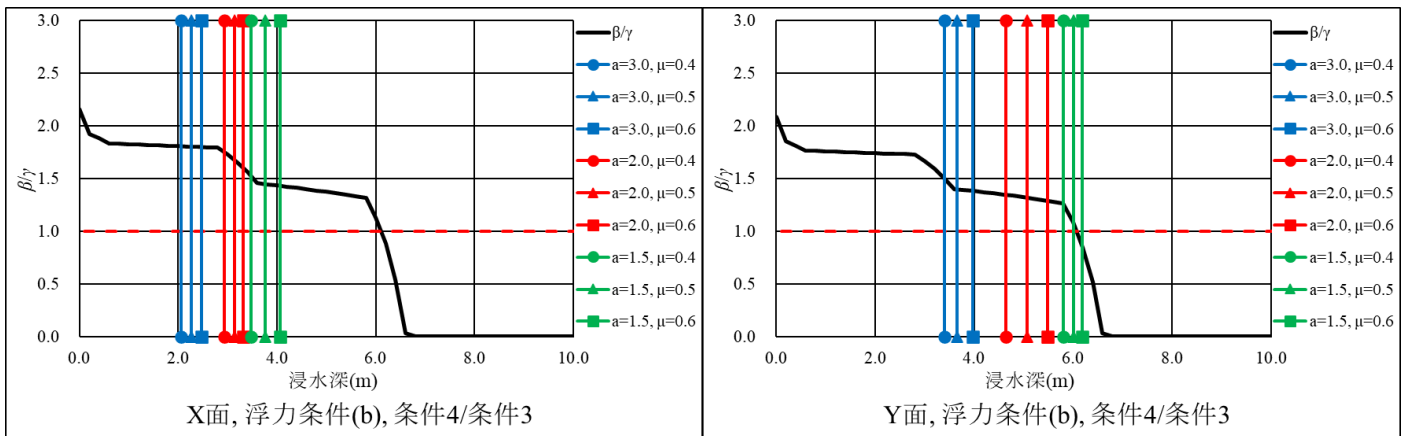


图 D-5 滑动 X2 倍 浮力条件(b)

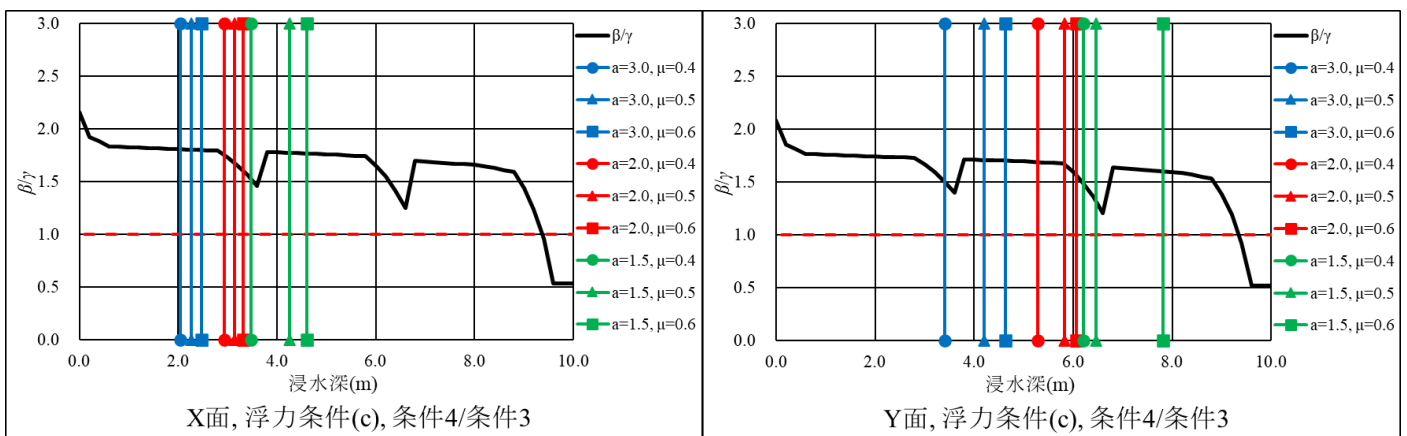


图 D-6 滑动 X2 倍 浮力条件(c)

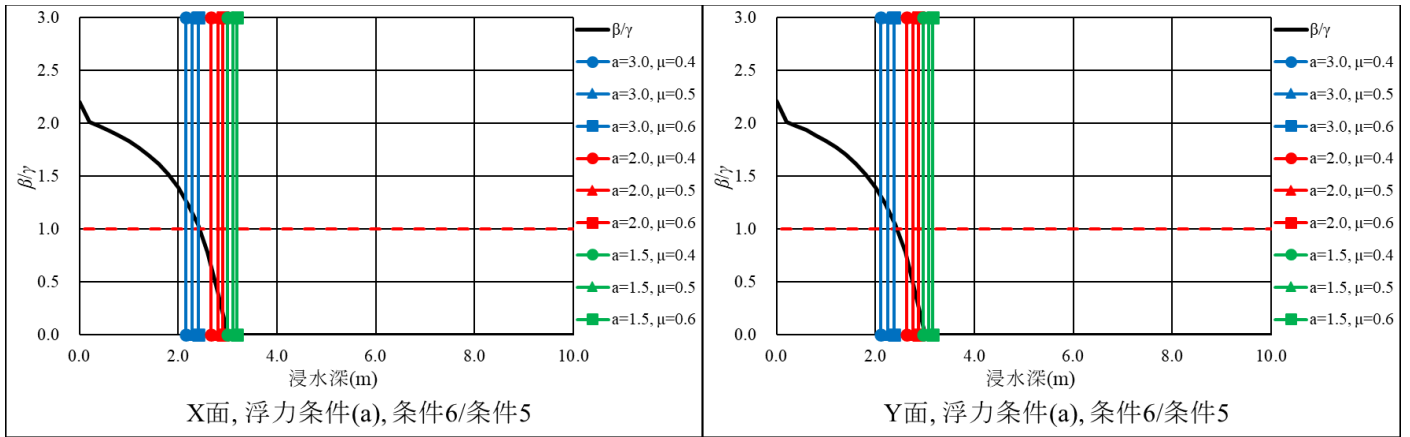


图 D-7 滑动 Y2 倍 浮力条件(a)

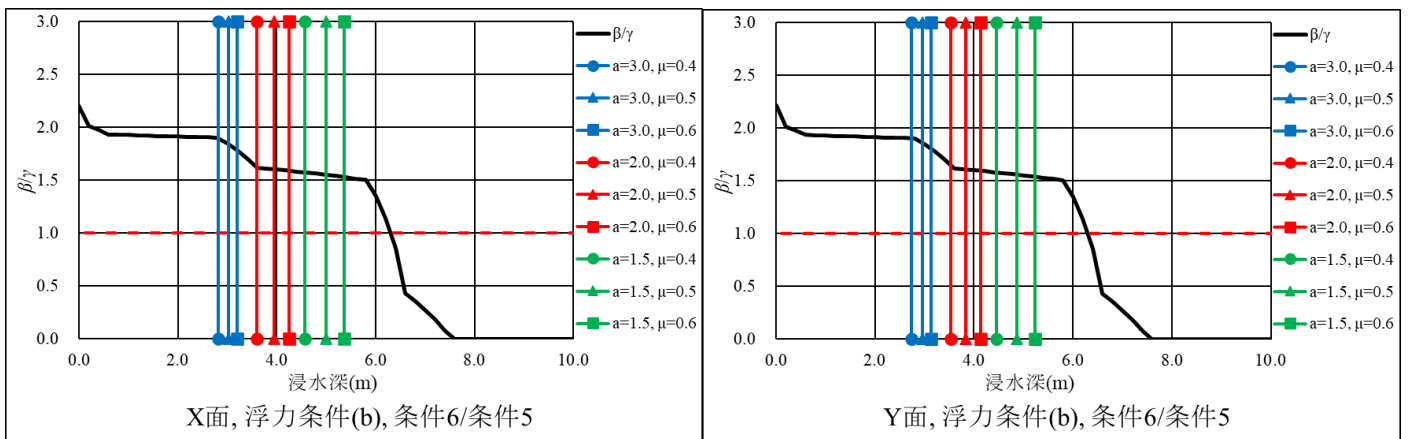


图 D-8 滑动 Y2 倍 浮力条件(b)

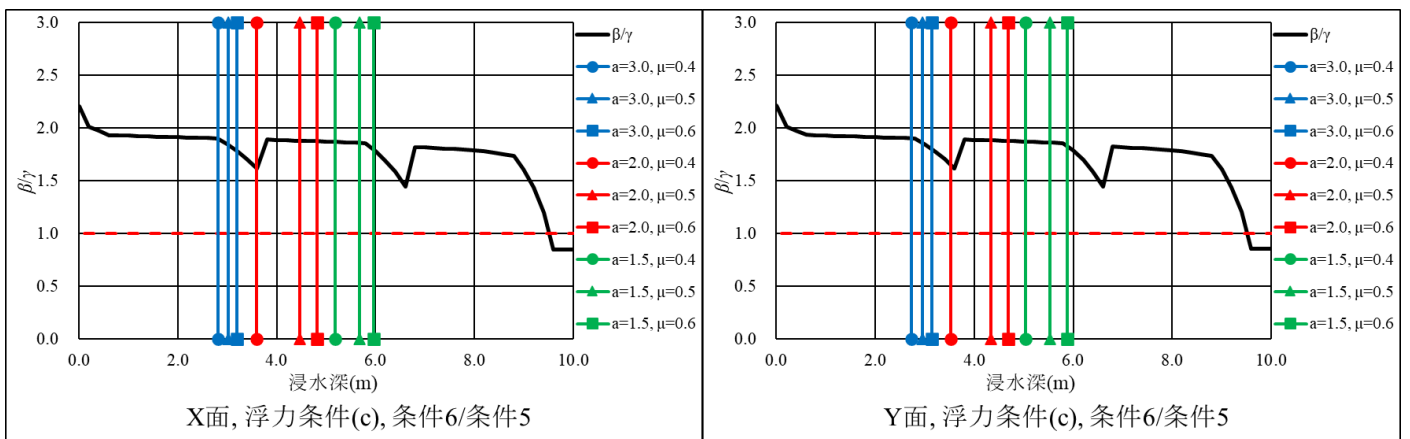


图 D-9 滑动 Y2 倍 浮力条件(c)

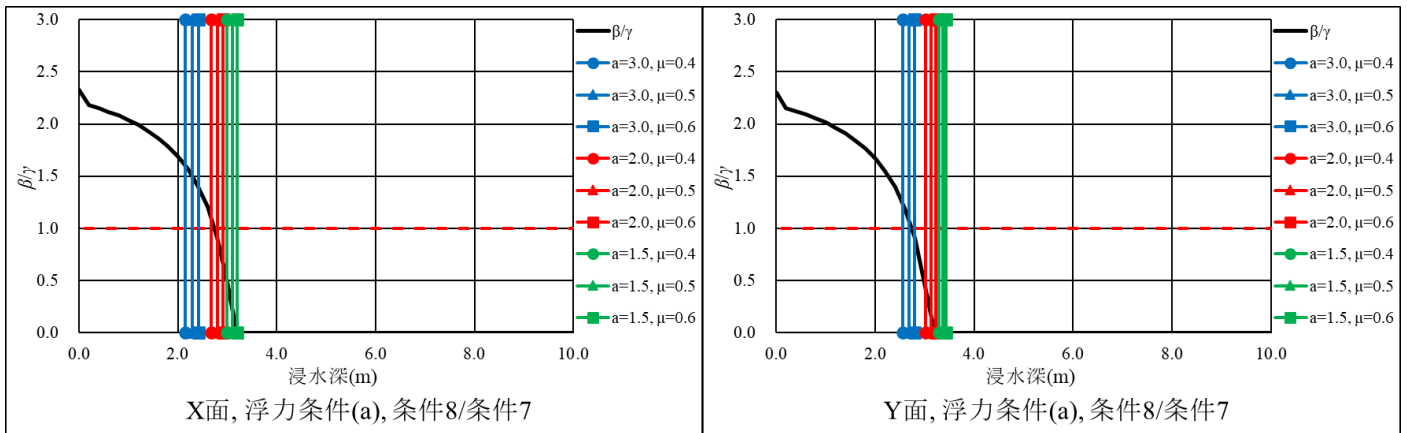


图 D-10 滑动 XY2 倍 浮力条件(a)

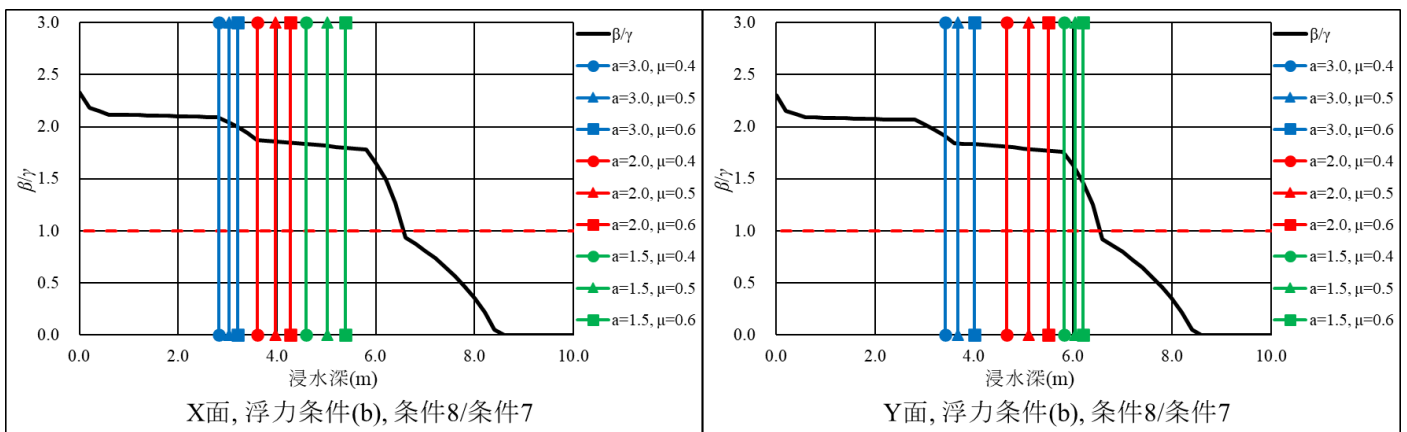


图 D-11 滑动 XY2 倍 浮力条件(b)

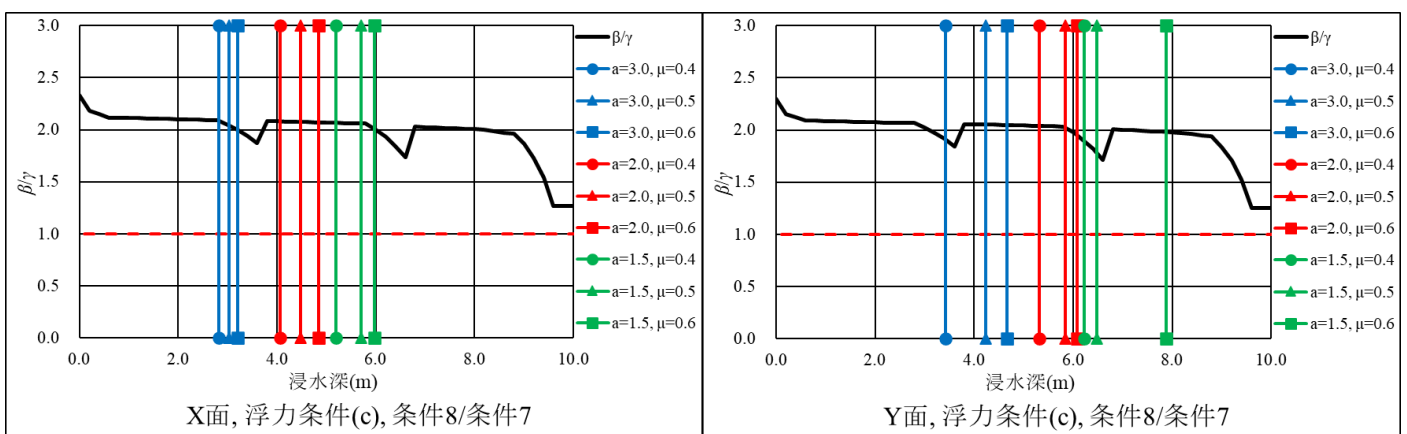


图 D-12 滑动 XY2 倍 浮力条件(c)

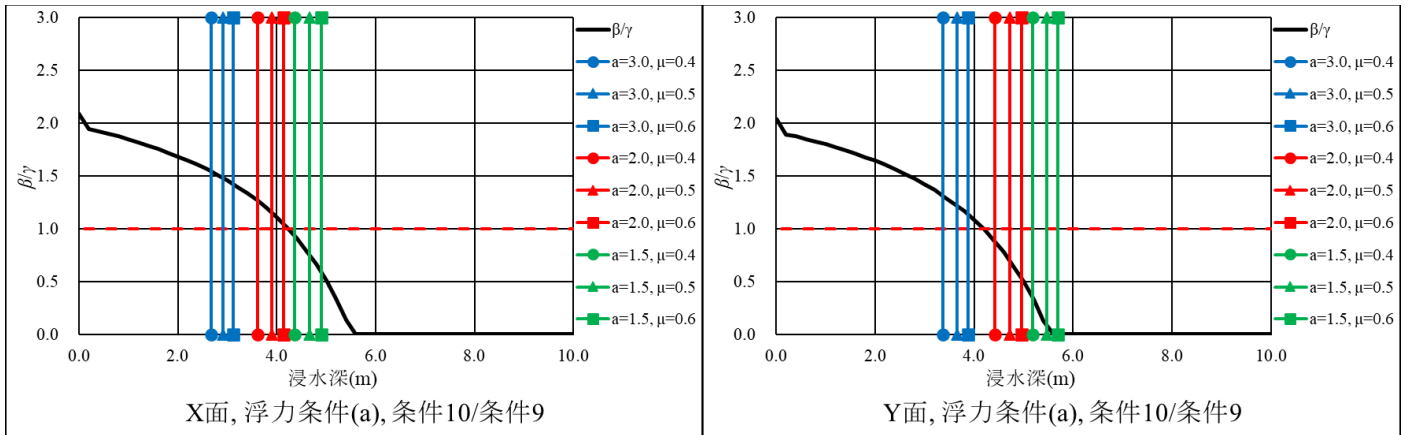


图 D-13 滑动 Z2 倍 浮力条件(a)

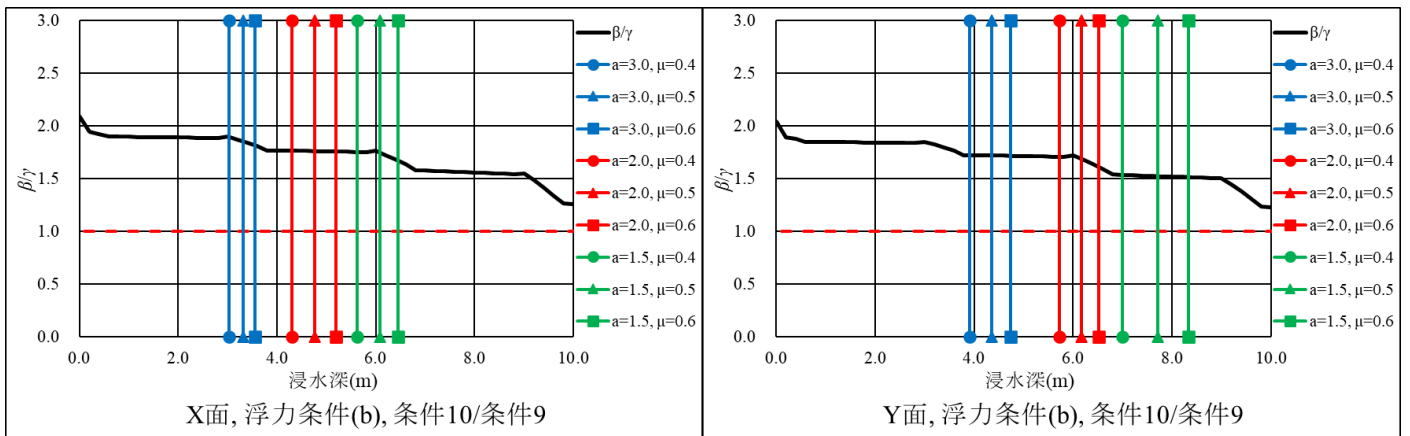


图 D-14 滑动 Z2 倍 浮力条件(b)

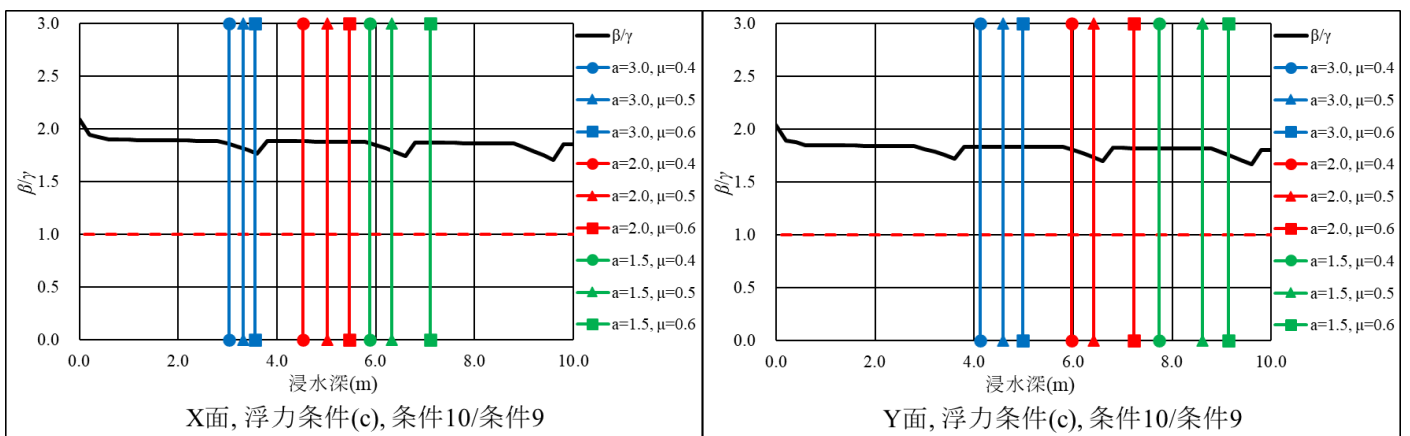


图 D-15 滑动 Z2 倍 浮力条件(c)

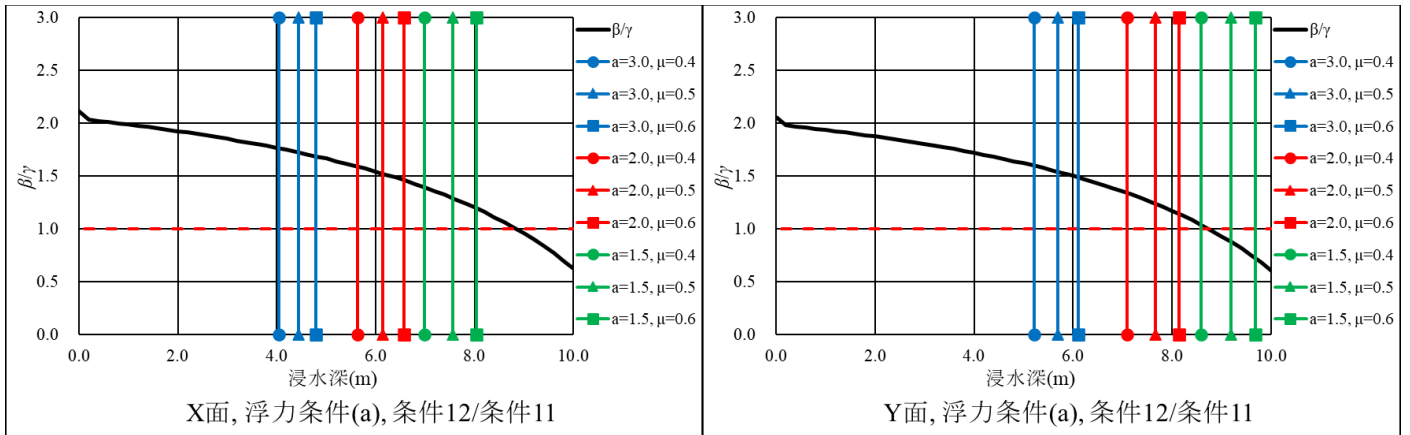


図 D-16 滑動 Z4 倍 浮力条件(a)

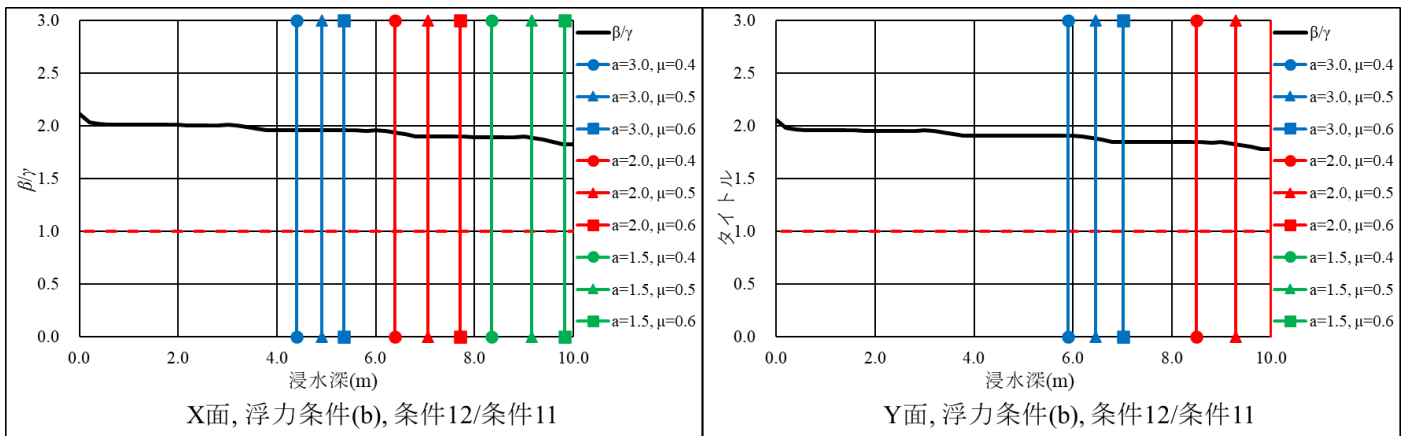


図 D-17 滑動 Z4 倍 浮力条件(b)

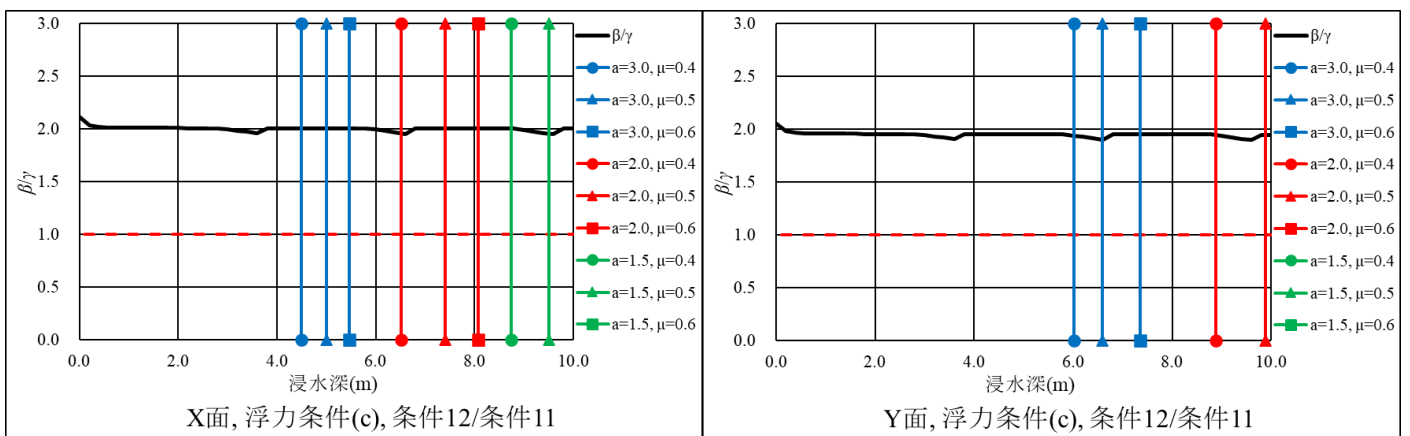


図 D-18 滑動 Z4 倍 浮力条件(c)

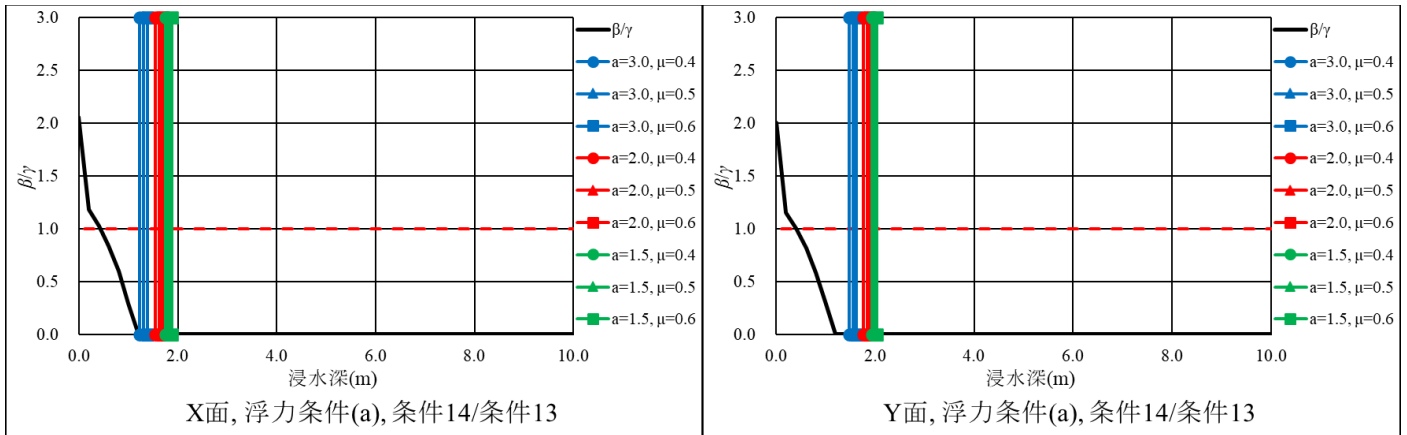


図 D-19 滑動 基準モデル 基礎 2 倍 浮力条件(a)

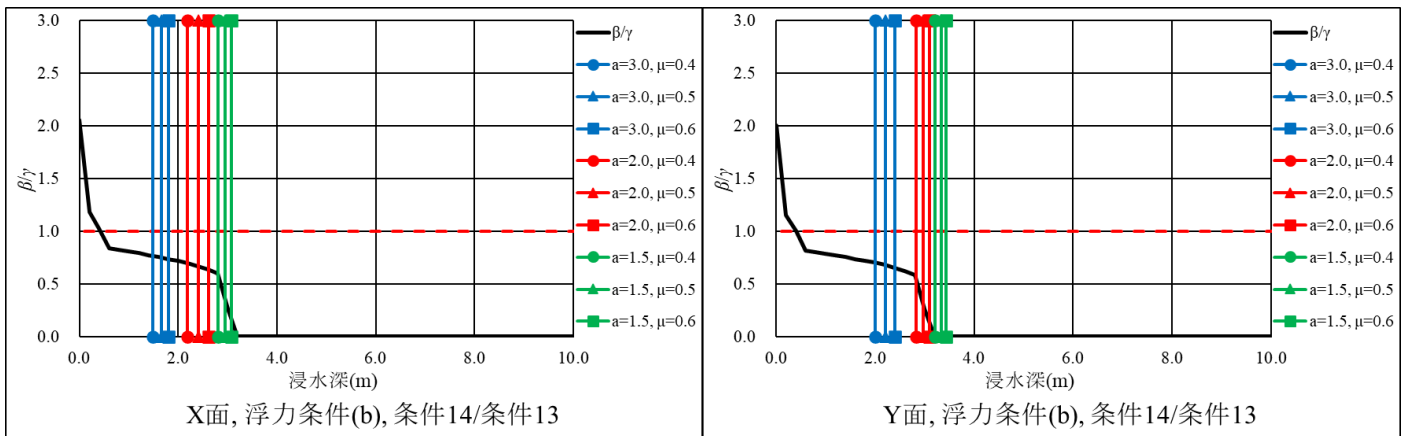


図 D-20 滑動 基準モデル 基礎 2 倍 浮力条件(b)

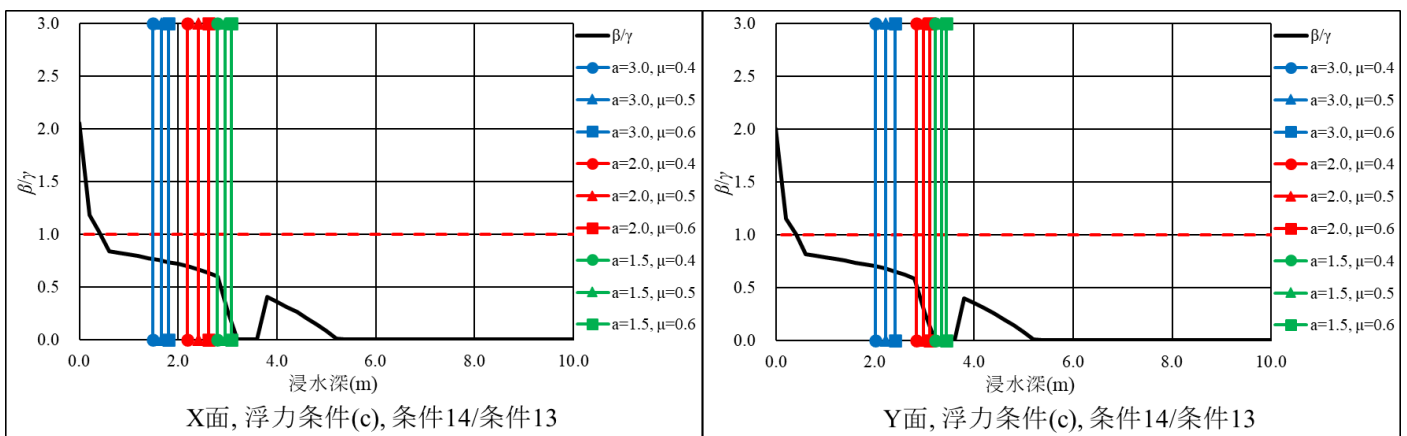


図 D-21 滑動 基準モデル 基礎 2 倍 浮力条件(c)

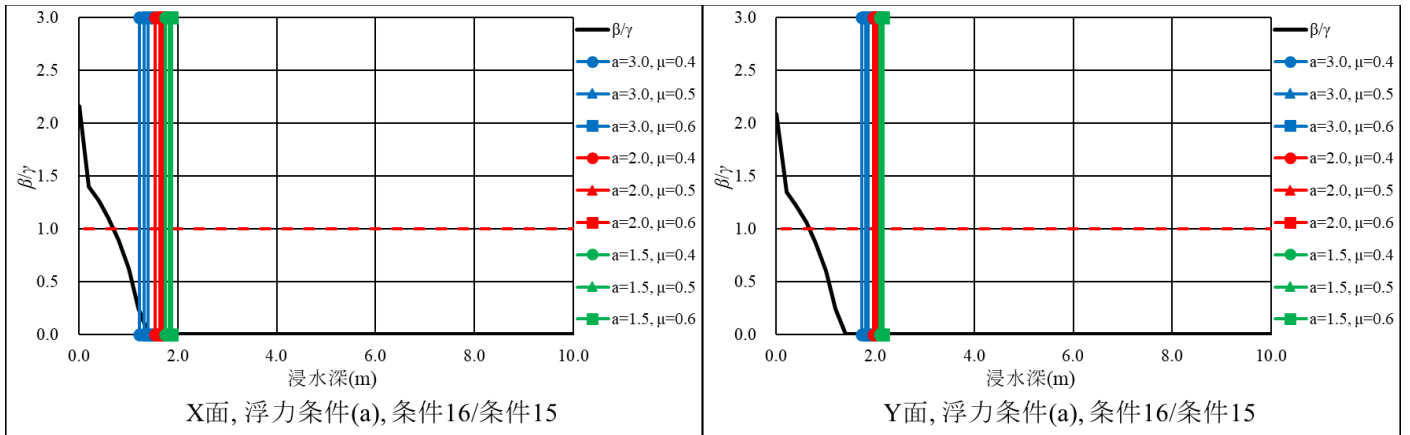


图 D-22 滑动 X2倍 基础2倍 浮力条件(a)

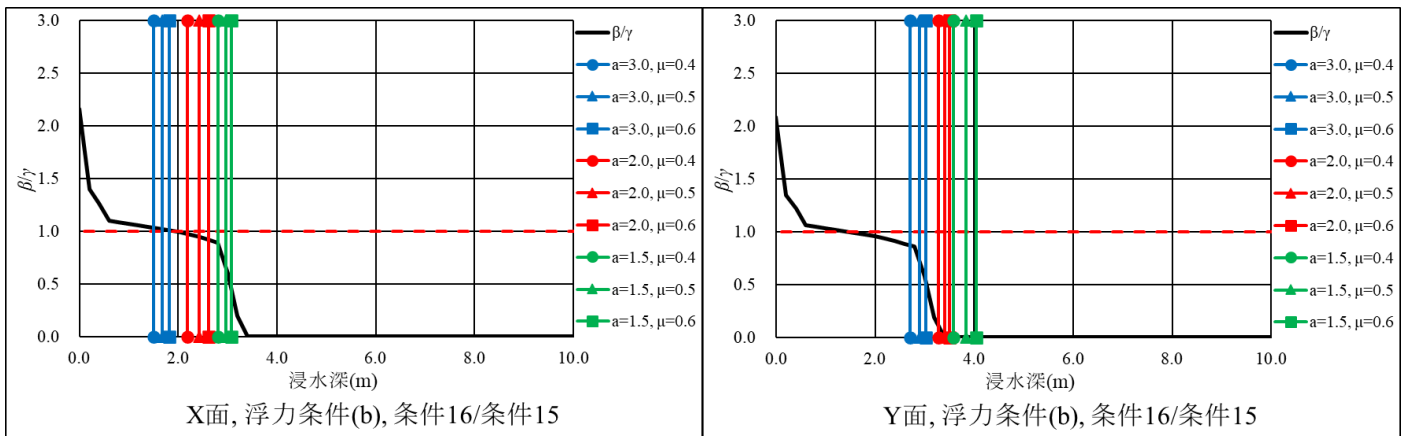


图 D-23 滑动 X2倍 基础2倍 浮力条件(b)

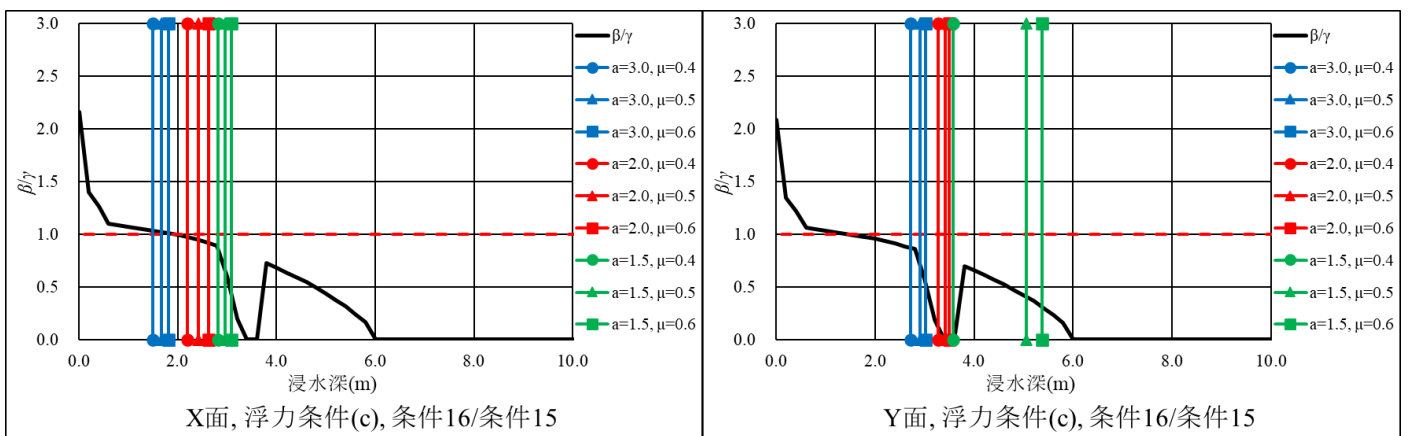


图 D-24 滑动 X2倍 基础2倍 浮力条件(c)

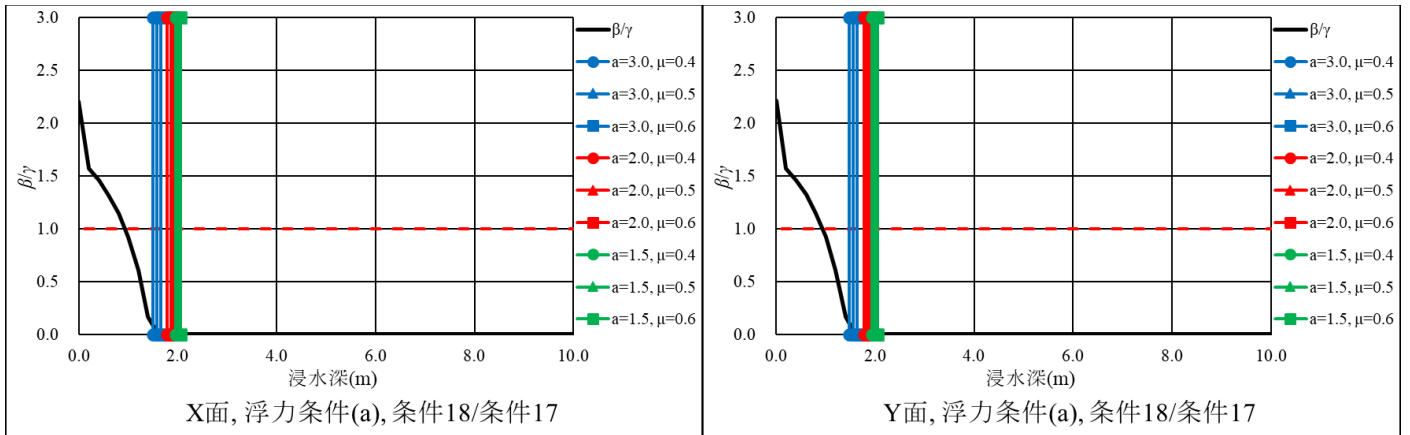


図 D-25 滑動 Y2倍 基礎2倍 浮力条件(a)

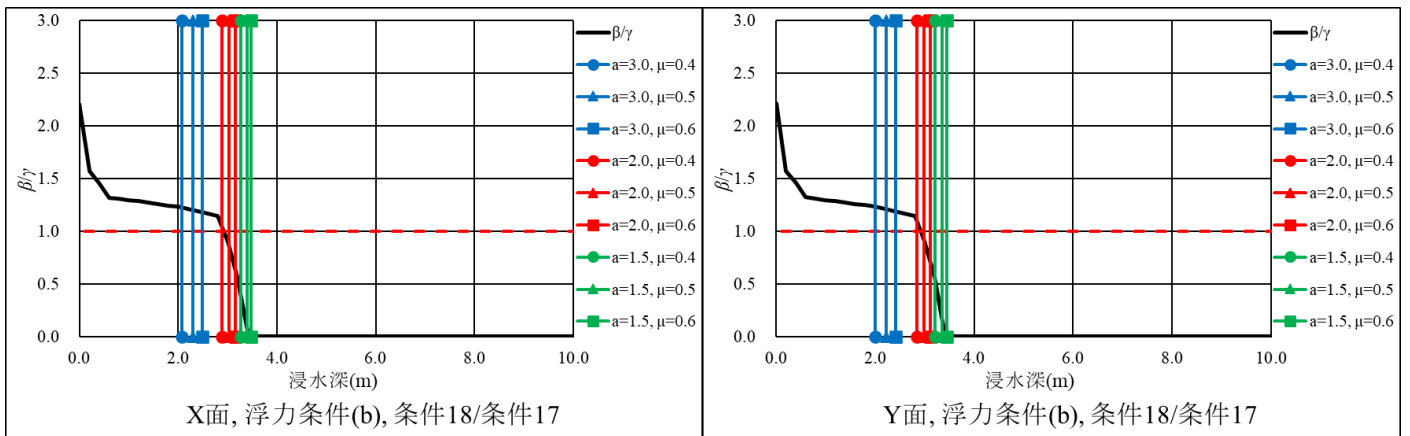


図 D-26 滑動 Y2倍 基礎2倍 浮力条件(b)

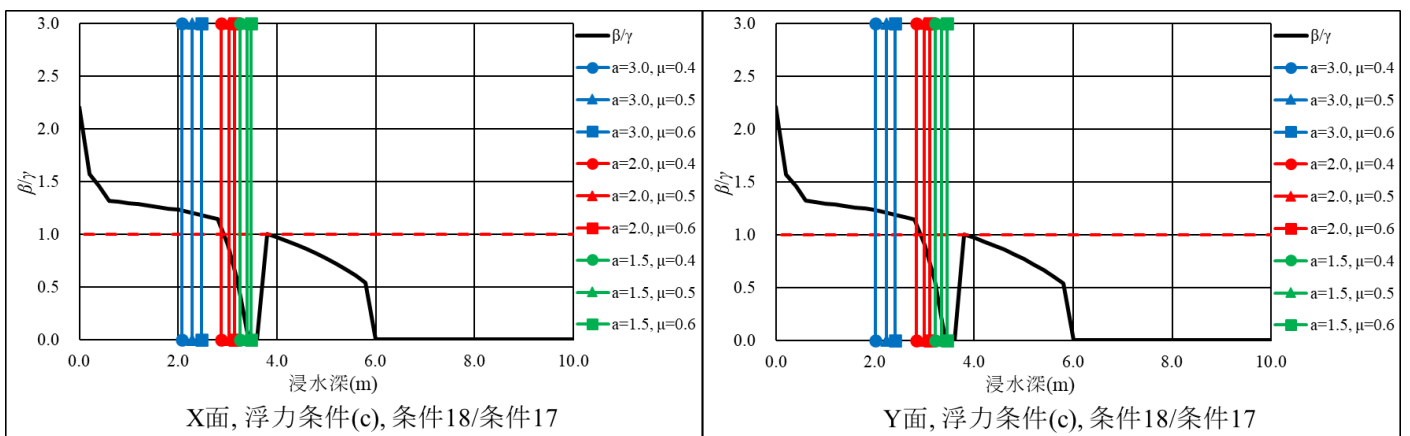


図 D-27 滑動 Y2倍 基礎2倍 浮力条件(c)

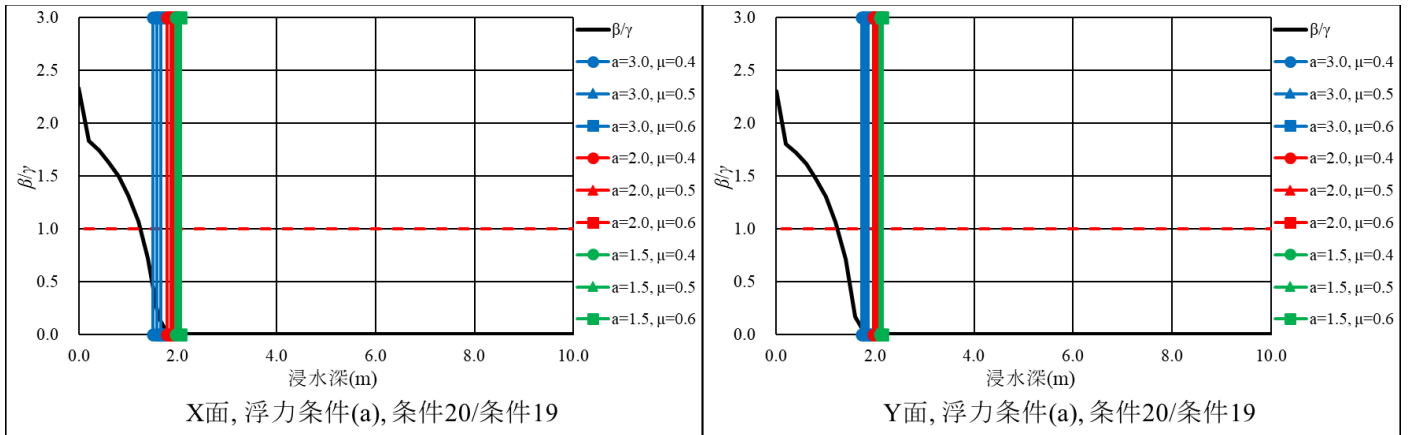


图 D-28 滑动 XY2 倍 基础 2 倍 浮力条件(a)

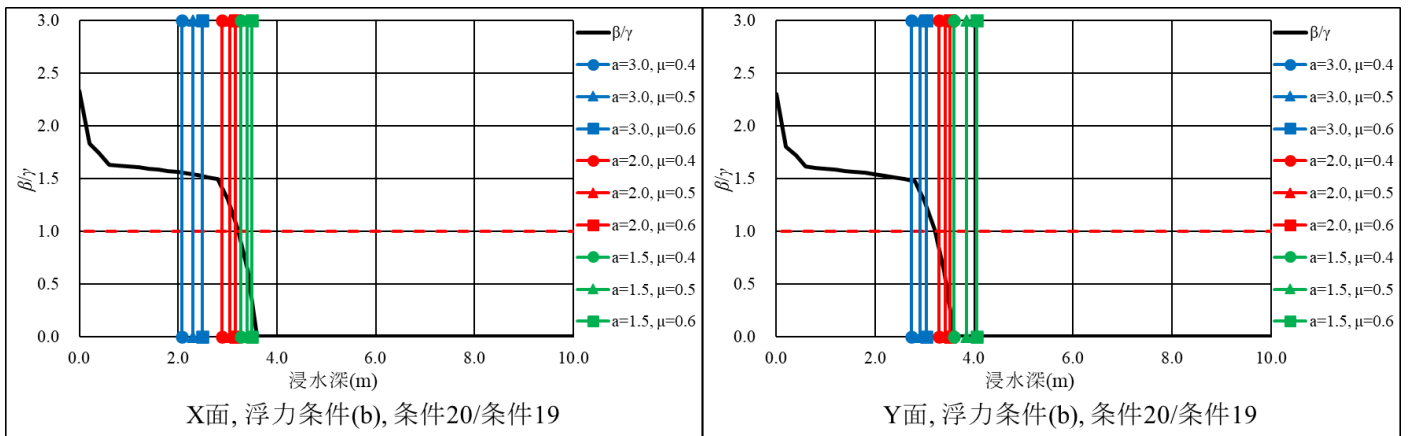


图 D-29 滑动 XY2 倍 基础 2 倍 浮力条件(b)

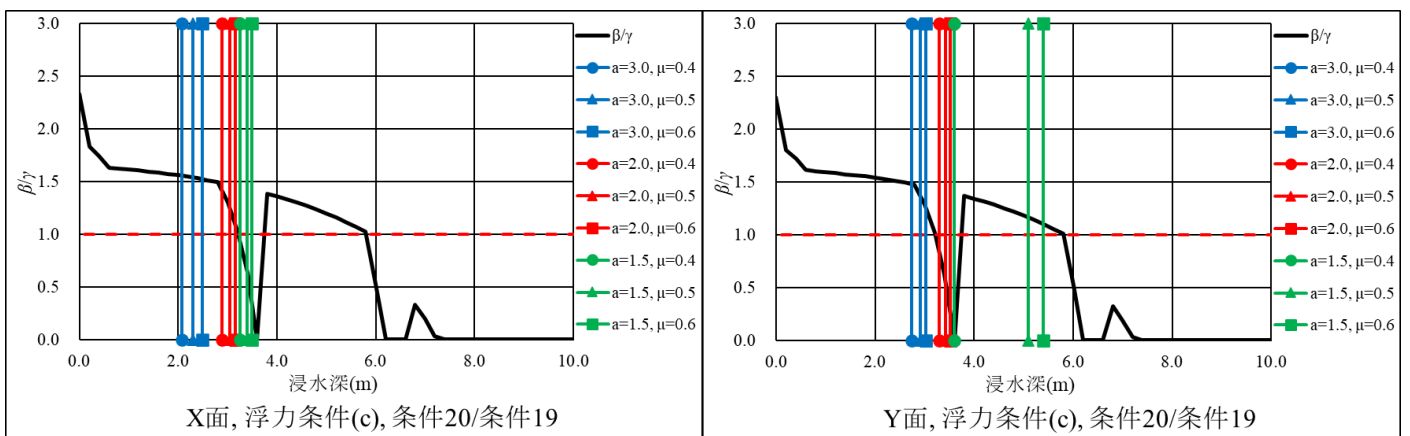


图 D-30 滑动 XY2 倍 基础 2 倍 浮力条件(c)

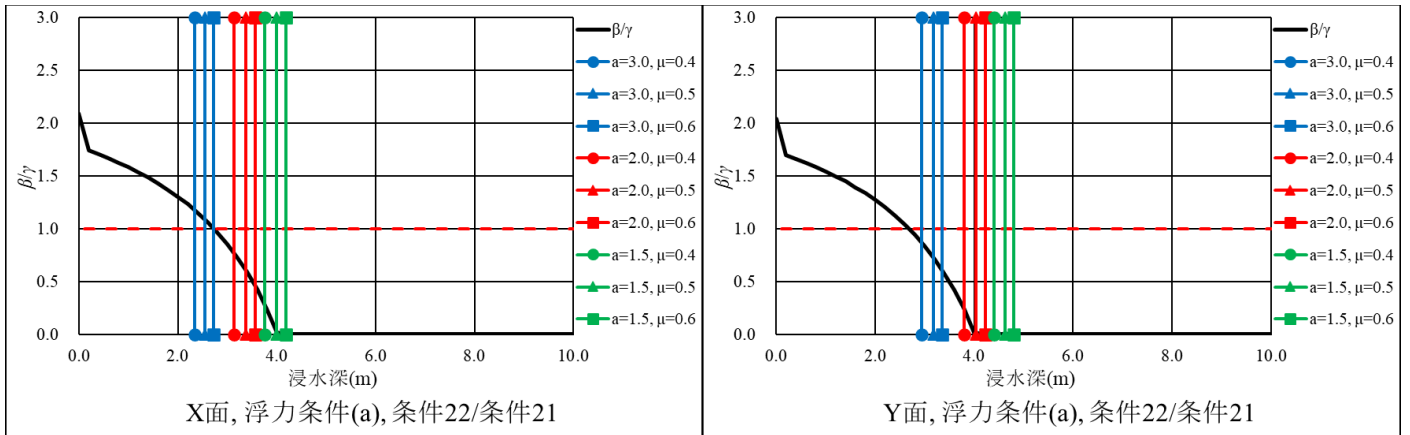


图 D-31 滑动 Z2 倍 基础 2 倍 浮力条件(a)

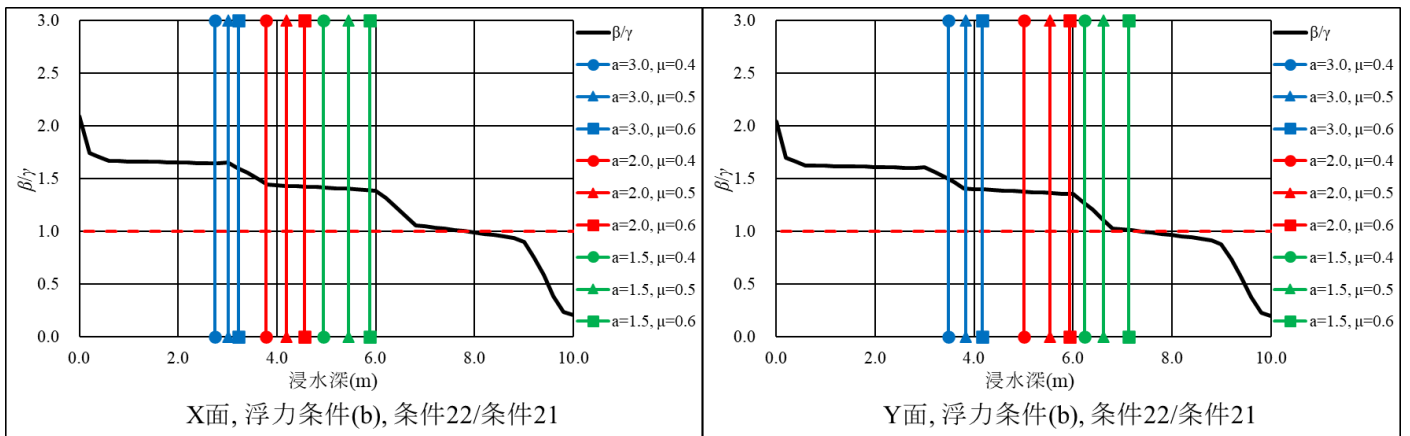


图 D-32 滑动 Z2 倍 基础 2 倍 浮力条件(b)

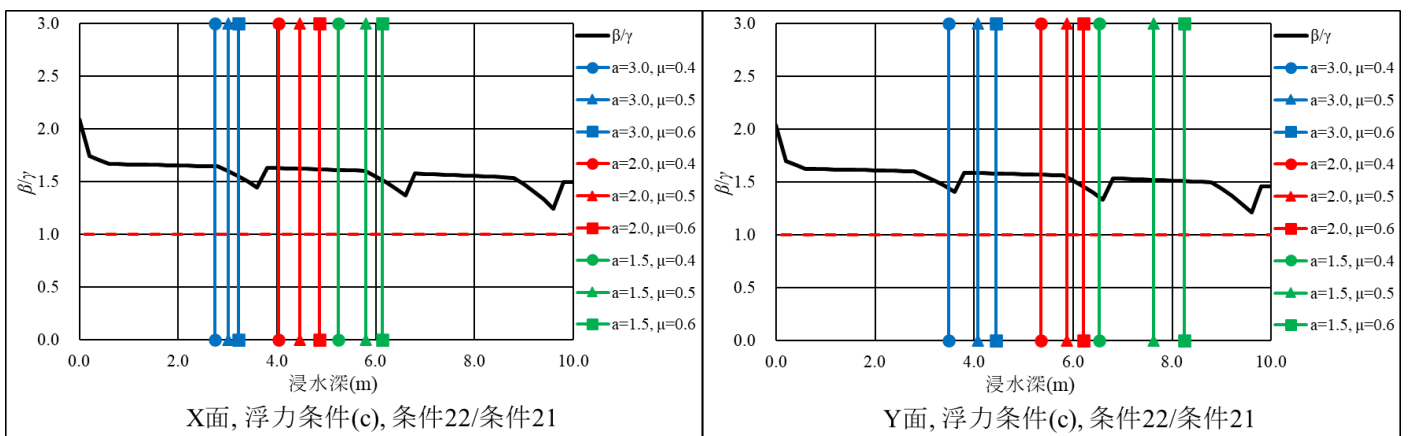


图 D-33 滑动 Z2 倍 基础 2 倍 浮力条件(c)

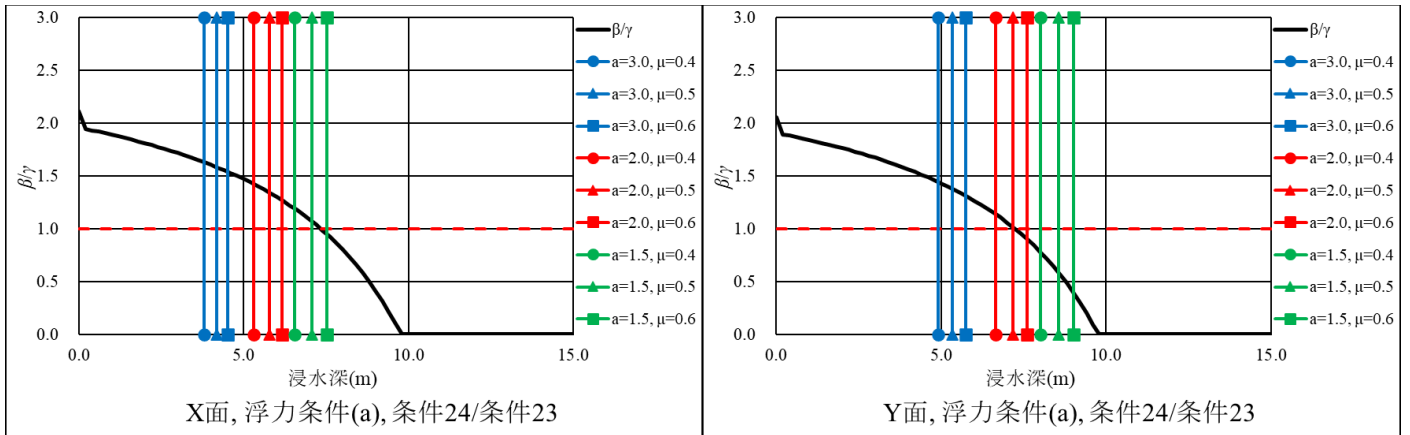


图 D-34 滑动 Z4 倍 基础 2 倍 浮力条件(a)

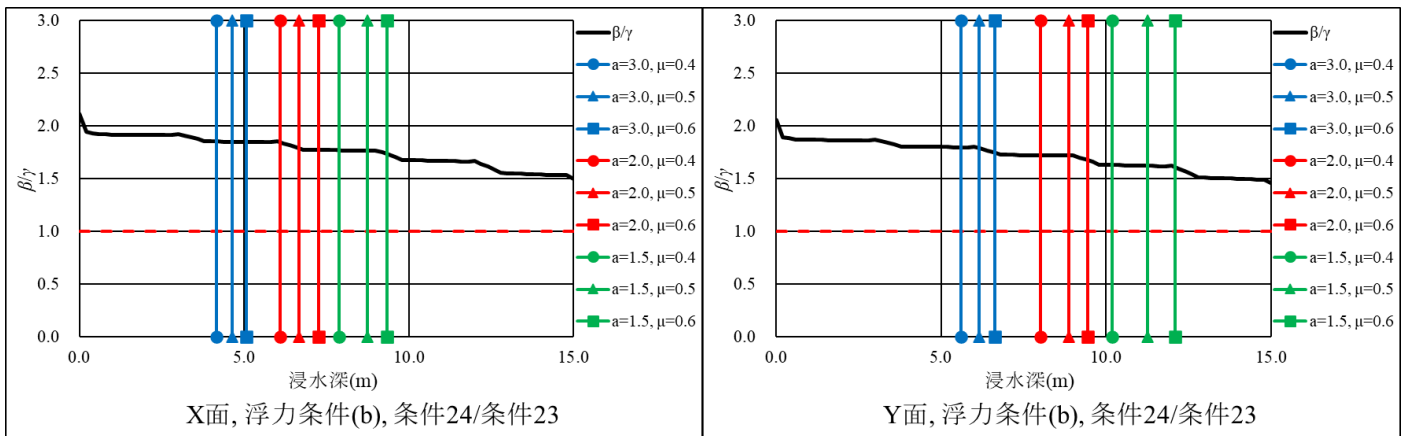


图 D-35 滑动 Z4 倍 基础 2 倍 浮力条件(b)

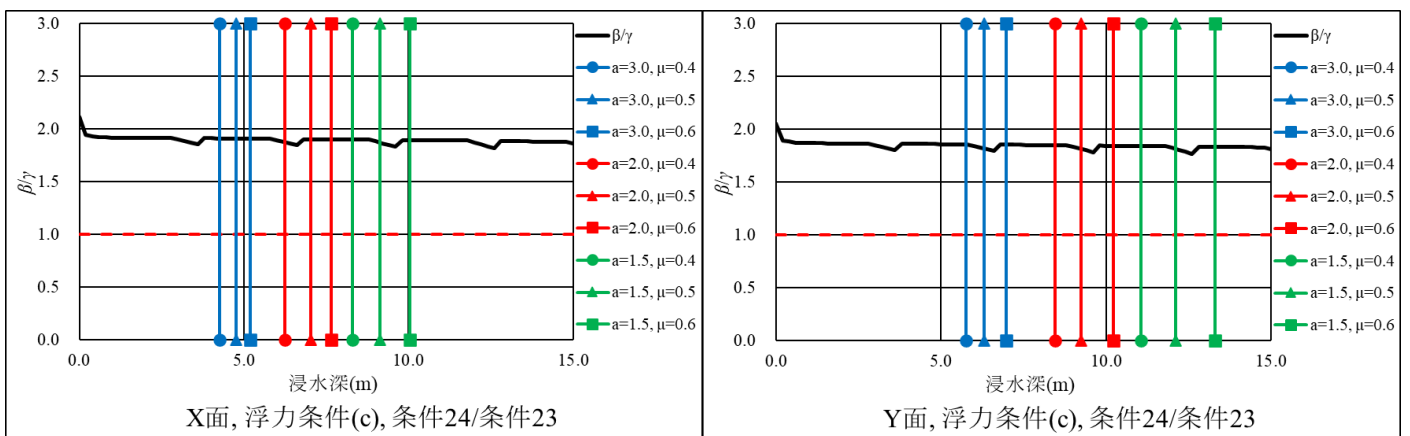


图 D-36 滑动 Z4 倍 基础 2 倍 浮力条件(c)

表 D-7 X 面のスケルトン化前後の限界浸水深の比

受圧面	X 面								
	条件(a)			条件(b)			条件(c)		
水深係数 a	3.0	2.0	1.5	3.0	2.0	1.5	3.0	2.0	1.5
条件 2/条件 1	0.83	0.75	0.72	1.06	1.01	0.96	1.21	1.04	1.10
条件 4/条件 3	0.87	0.79	0.76	1.14	1.05	0.97	1.28	1.05	1.13
条件 6/条件 5	0.83	0.79	0.78	0.99	0.90	0.80	1.06	1.01	0.95
条件 8/条件 7	0.88	0.84	0.83	1.02	0.93	0.88	1.07	1.03	1.02
条件 10/条件 9	0.97	0.87	0.80	1.14	1.13	1.05	1.15	1.14	1.14
条件 12/条件 11	1.09	1.00	0.92	1.23	1.18	None	1.24	1.24	None
条件 14/条件 13	0.54	0.50	0.49	0.89	0.78	0.66	0.89	0.64	0.52
条件 16/条件 15	0.62	0.58	0.56	0.93	0.82	0.69	0.93	0.66	0.55
条件 18/条件 17	0.64	0.63	0.62	0.80	0.66	0.59	0.59	0.55	0.53
条件 20/条件 19	0.73	0.72	0.71	0.84	0.69	0.62	0.62	0.58	0.56
条件 22/条件 21	0.86	0.75	0.70	1.10	1.00	0.97	1.14	1.13	1.16
条件 24/条件 23	1.05	0.95	0.87	1.20	1.17	1.13	1.23	1.19	None

表 D-8 Y 面のスケルトン化前後の限界浸水深の比

受圧面	Y 面								
	条件(a)			条件(b)			条件(c)		
水深係数 a	3.0	2.0	1.5	3.0	2.0	1.5	3.0	2.0	1.5
条件 2/条件 1	0.75	0.71	0.70	0.96	0.89	0.79	1.09	0.99	0.95
条件 4/条件 3	0.75	0.74	0.73	0.76	0.73	0.72	0.88	None	None
条件 6/条件 5	0.84	0.80	0.78	1.00	0.93	0.82	1.12	1.02	0.97
条件 8/条件 7	0.84	0.83	0.83	0.86	0.86	0.87	None	None	None
条件 10/条件 9	0.86	0.78	0.74	1.13	1.04	0.98	1.33	None	None
条件 12/条件 11	1.00	0.89	0.82	1.17	None	None	1.24	None	None
条件 14/条件 13	0.50	0.49	0.48	0.76	0.62	0.54	0.57	0.50	0.48
条件 16/条件 15	0.56	0.56	0.56	0.59	0.55	0.54	0.51	0.50	0.49
条件 18/条件 17	0.65	0.63	0.62	0.83	0.68	0.59	0.62	0.55	0.53
条件 20/条件 19	0.72	0.71	0.71	0.64	0.61	0.60	0.56	0.55	0.54
条件 22/条件 21	0.75	0.68	0.66	1.01	0.96	0.82	1.14	1.08	1.07
条件 24/条件 23	0.95	0.84	0.78	1.16	None	None	1.18	None	None

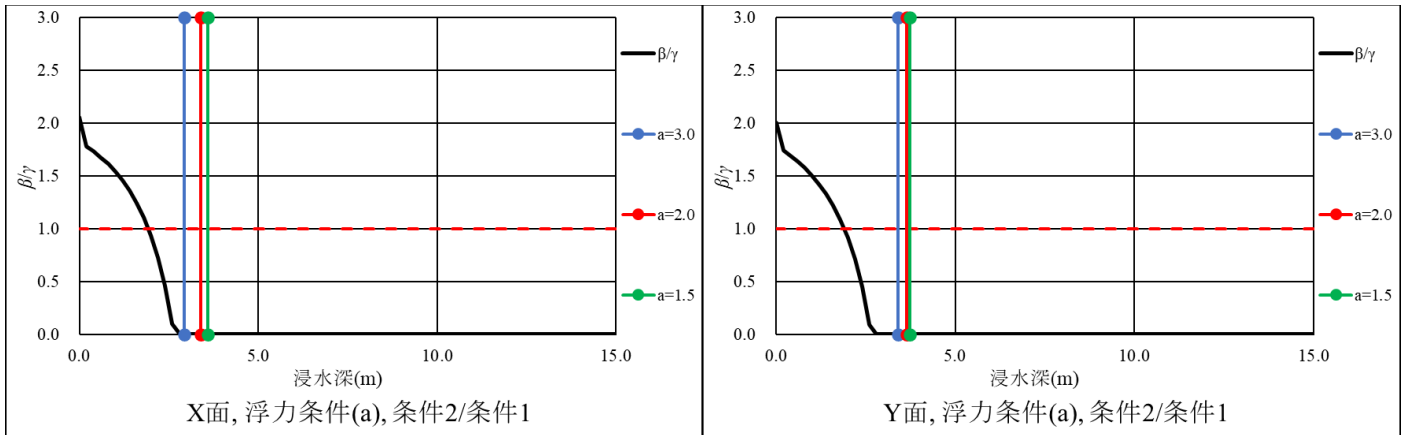


図 D-37 転倒 基準モデル 浮力条件(a)

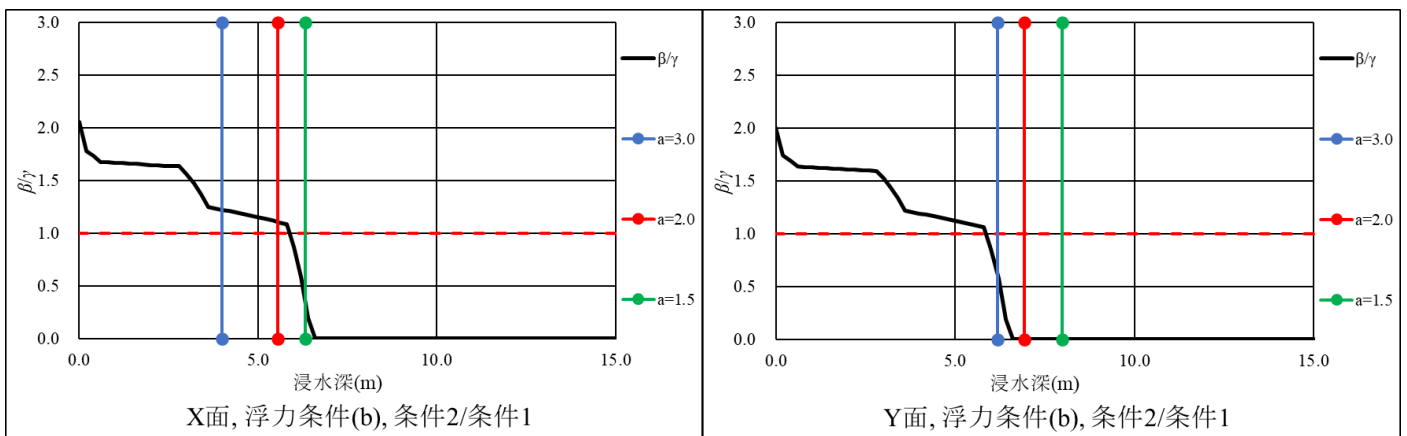


図 D-38 転倒 基準モデル 浮力条件(b)

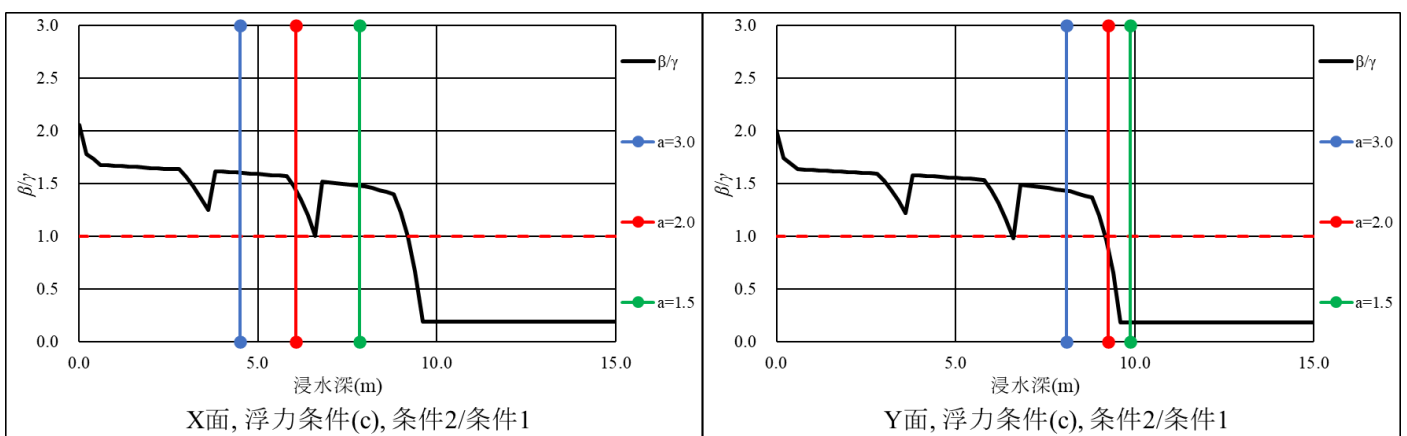


図 D-39 転倒 基準モデル 浮力条件(c)

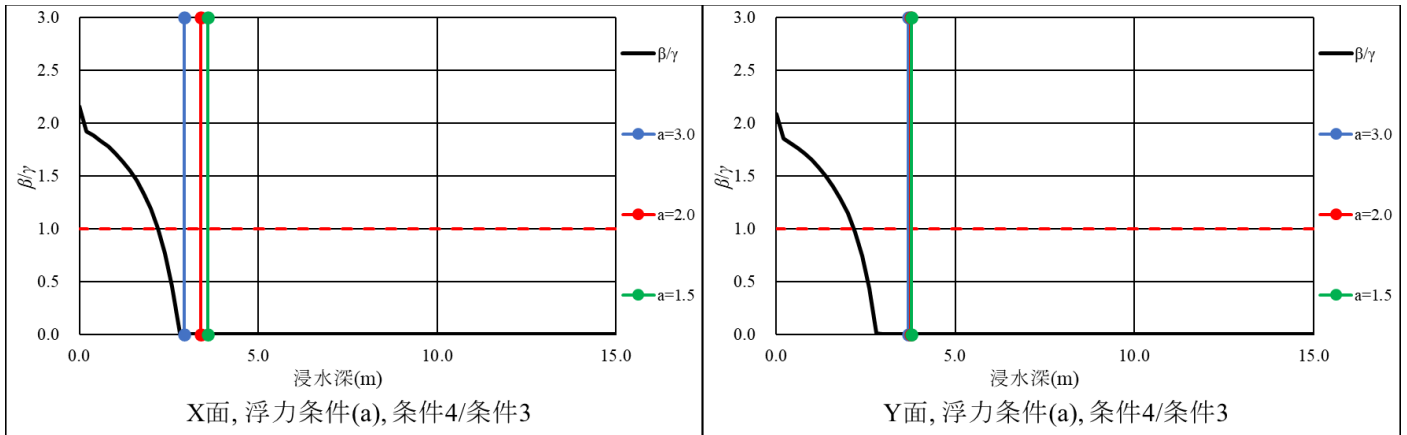


図 D-40 転倒 X2倍 浮力条件(a)

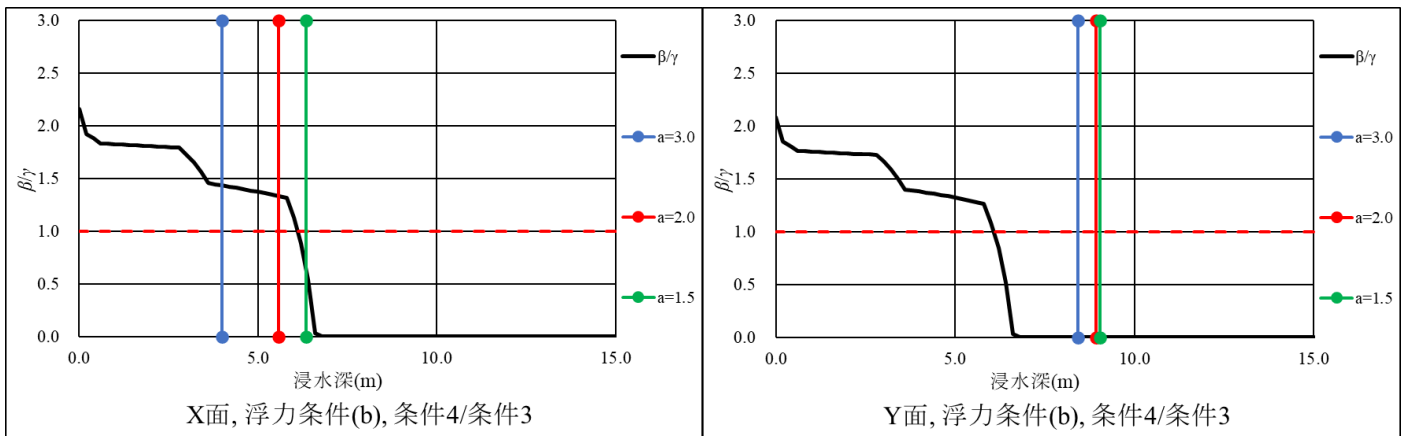


図 D-41 転倒 X2倍 浮力条件(b)

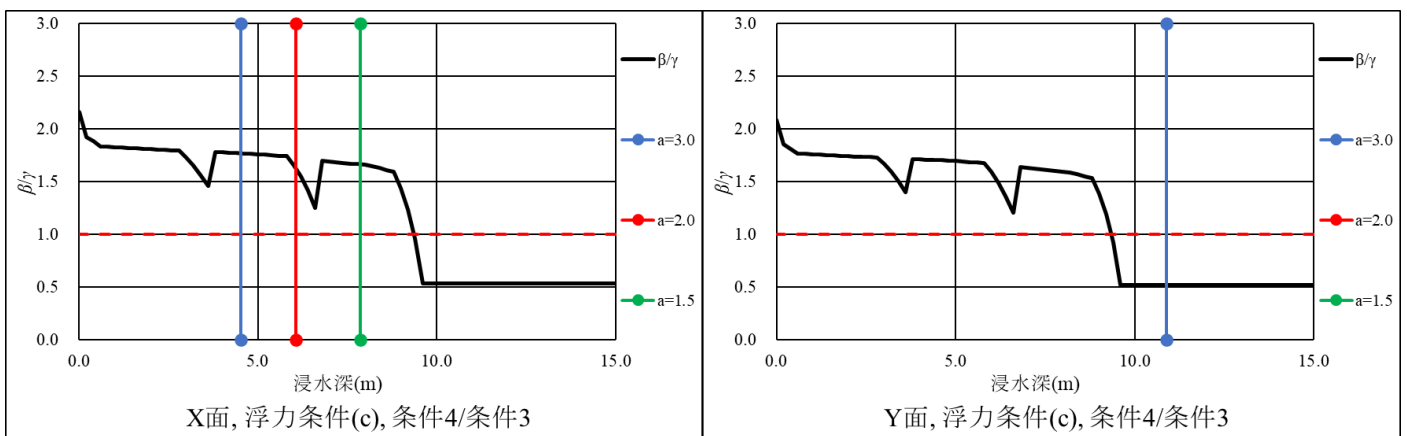


図 D-42 滑動 X2倍 浮力条件(c)

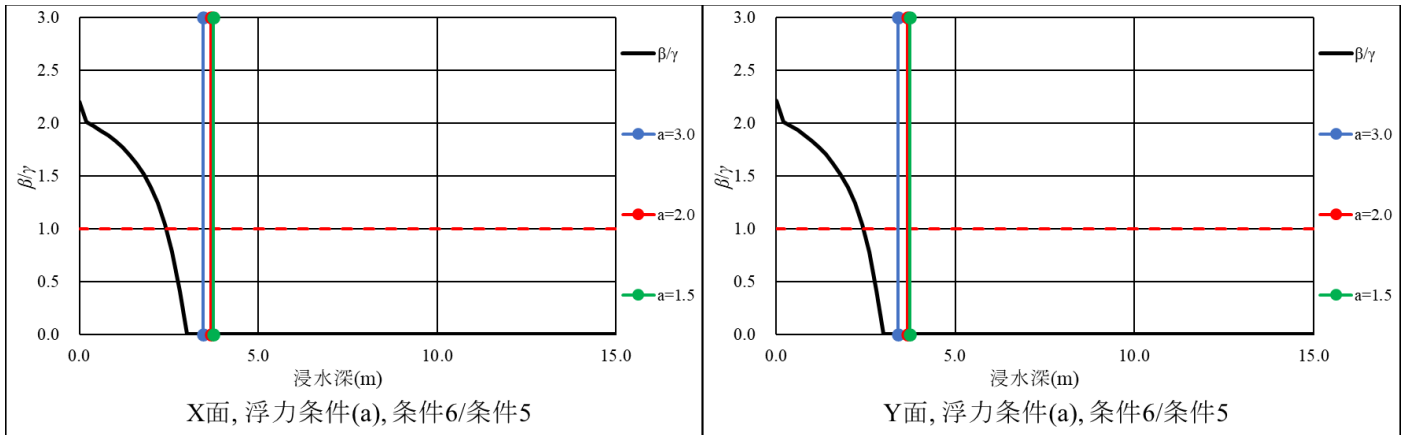


図 D-43 転倒 Y2 倍 浮力条件(a)

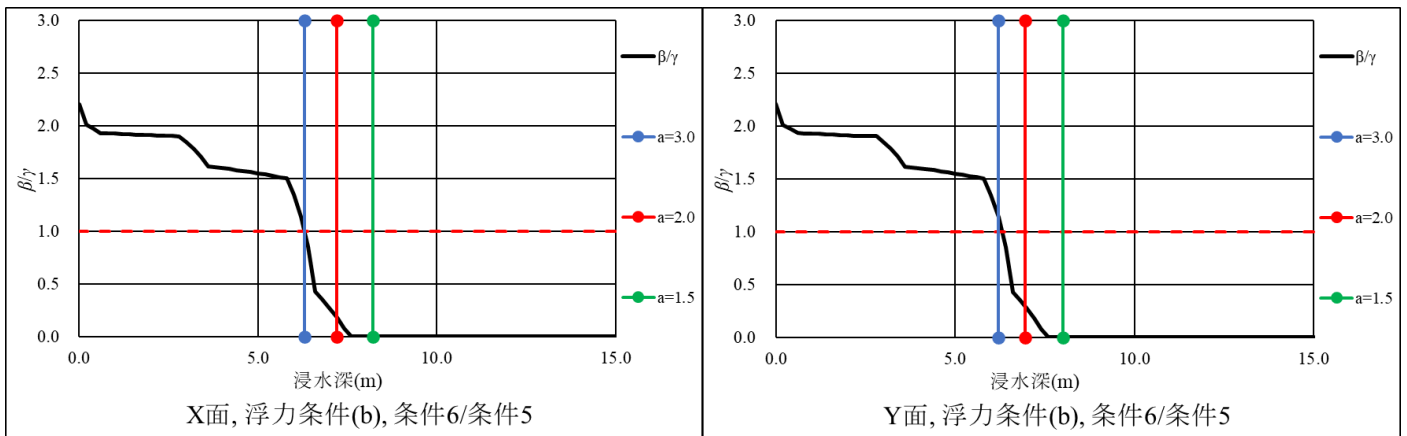


図 D-44 転倒 Y2 倍 浮力条件(b)

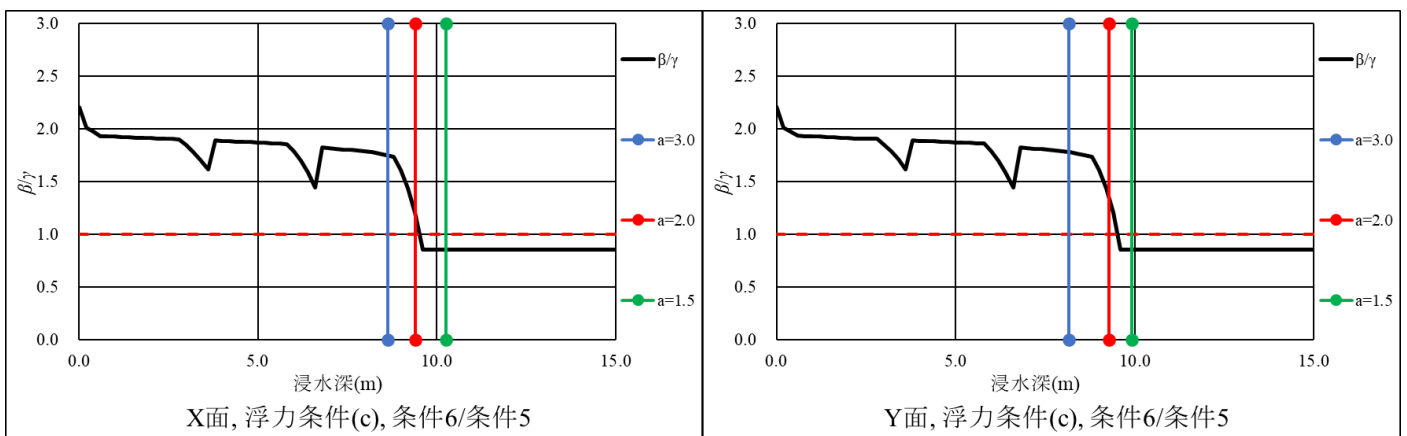


図 D-45 転倒 Y2 倍 浮力条件(c)

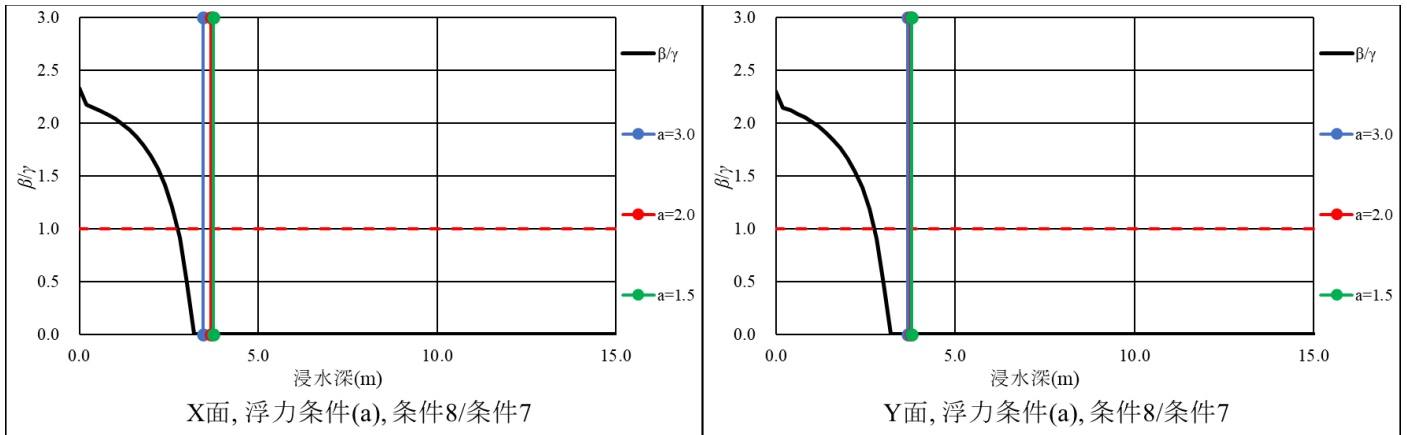


图 D-46 滑动 XY2 倍 浮力条件(a)

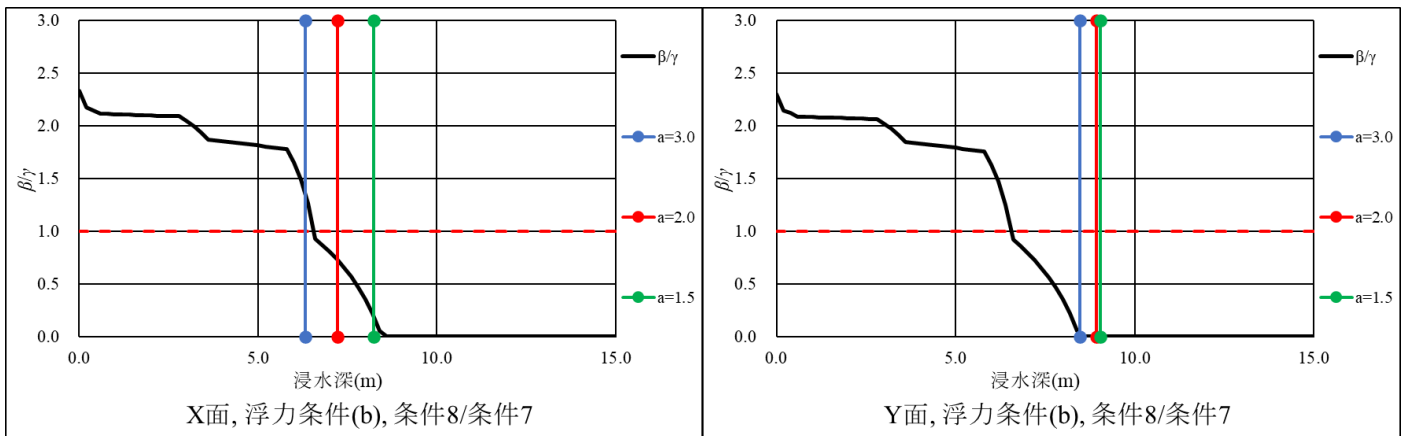


图 D-47 転倒 XY2 倍 浮力条件(b)

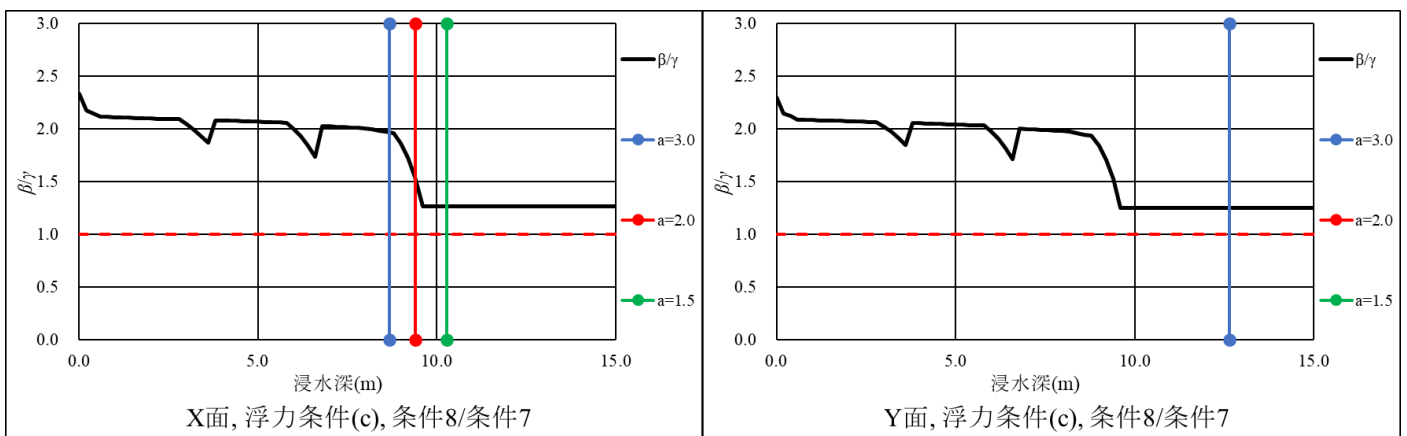


图 D-48 転倒 XY2 倍 浮力条件(c)

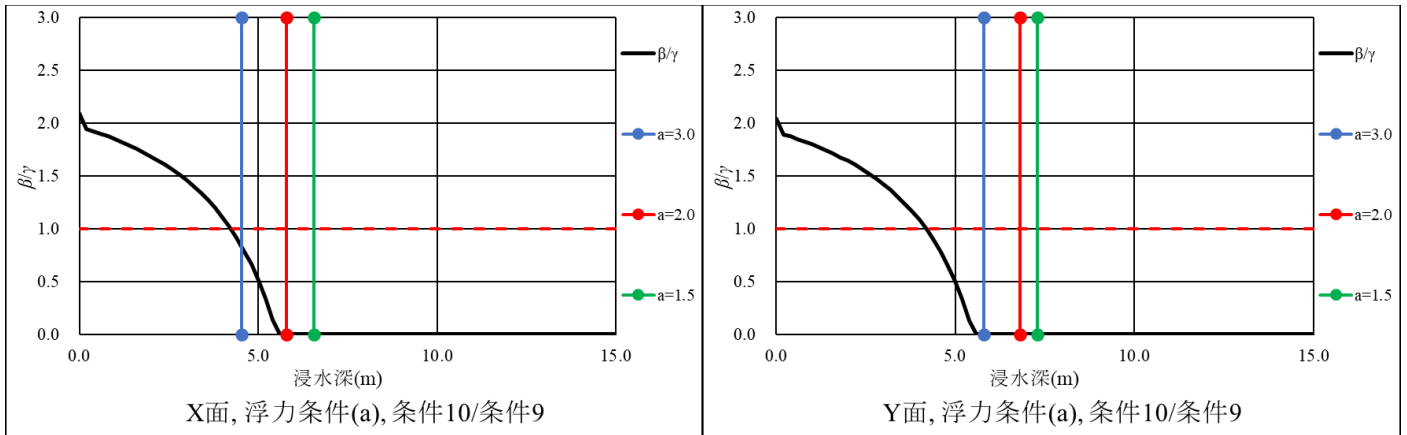


图 D-49 転倒 Z2 倍 浮力条件(a)

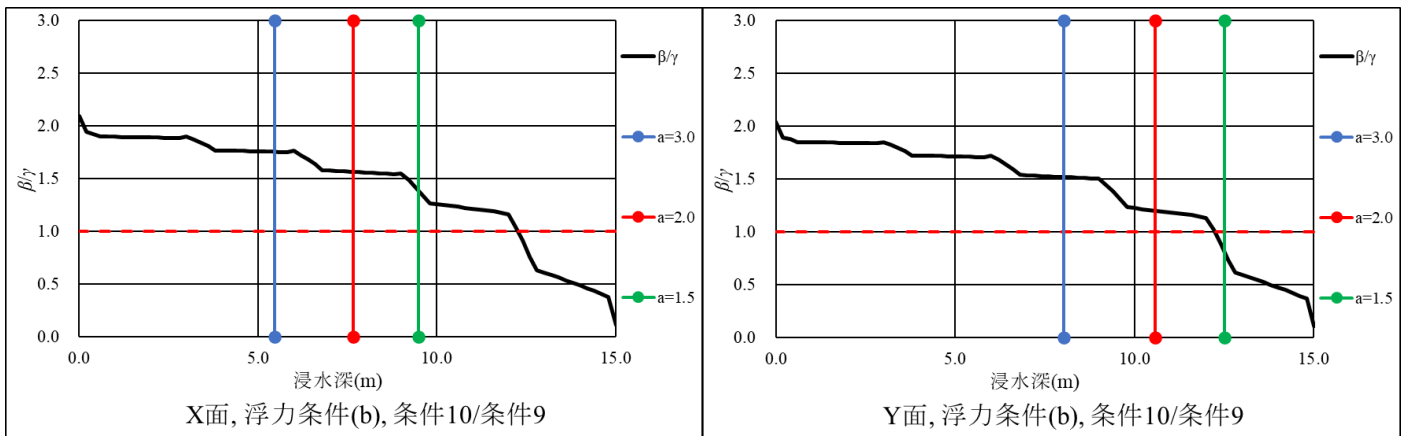


图 D-50 転倒 Z2 倍 浮力条件(b)

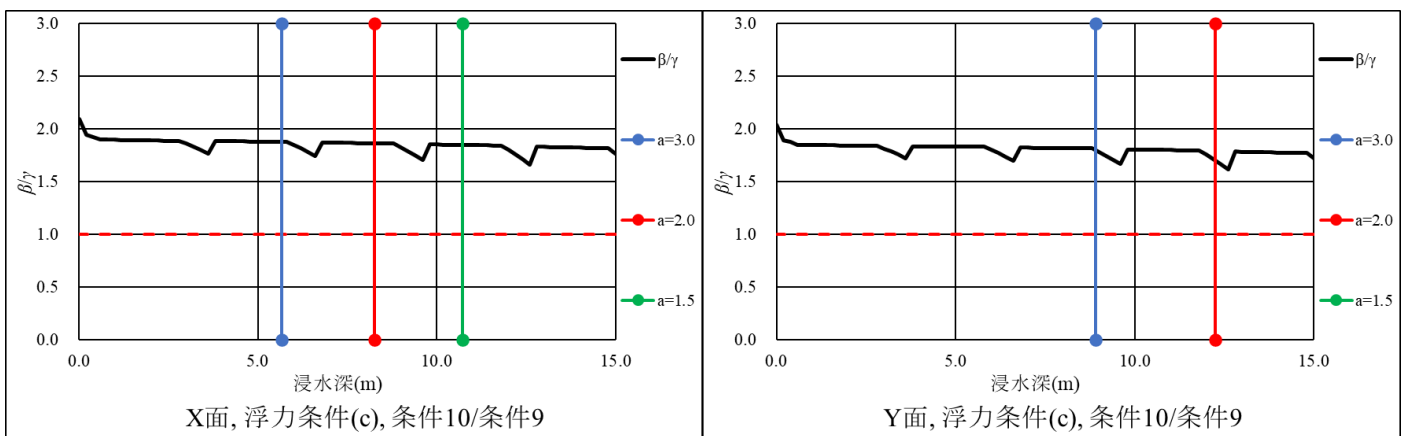


图 D-51 転倒 Z2 倍 浮力条件(c)

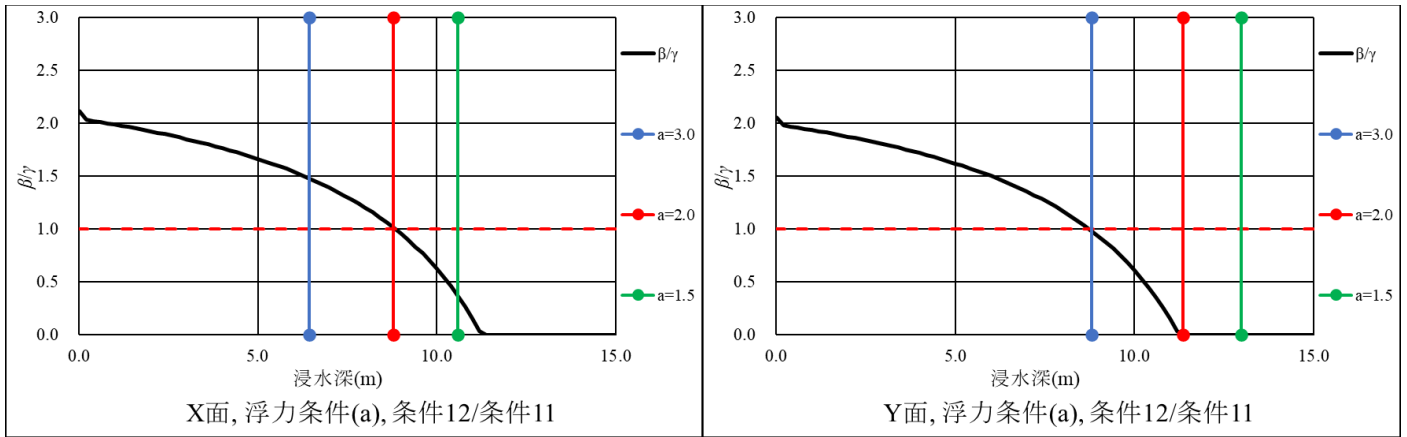


図 D-52 転倒 Z4 倍 浮力条件(a)

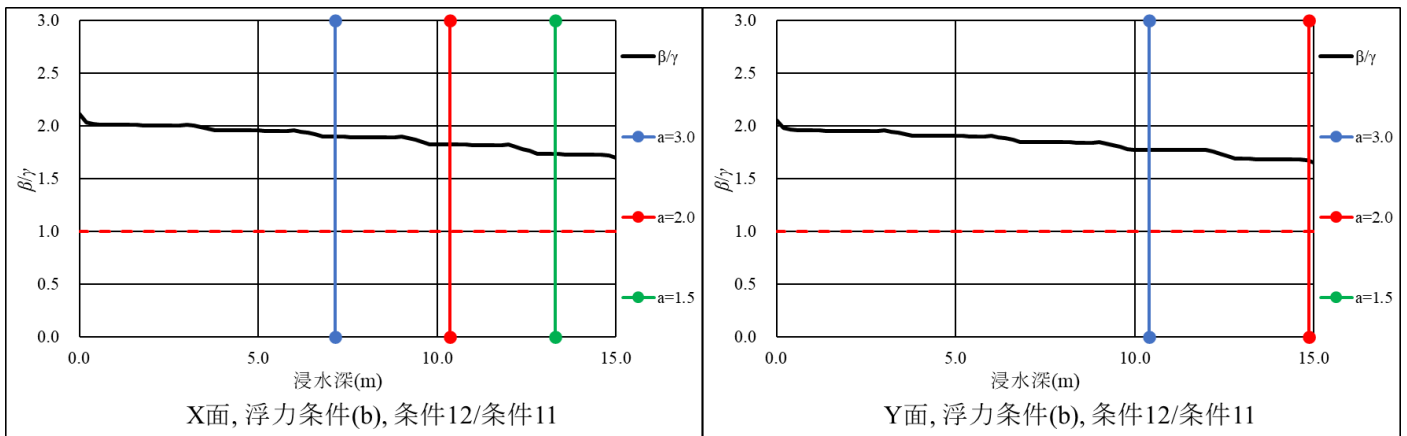


図 D-53 転倒 Z4 倍 浮力条件(b)

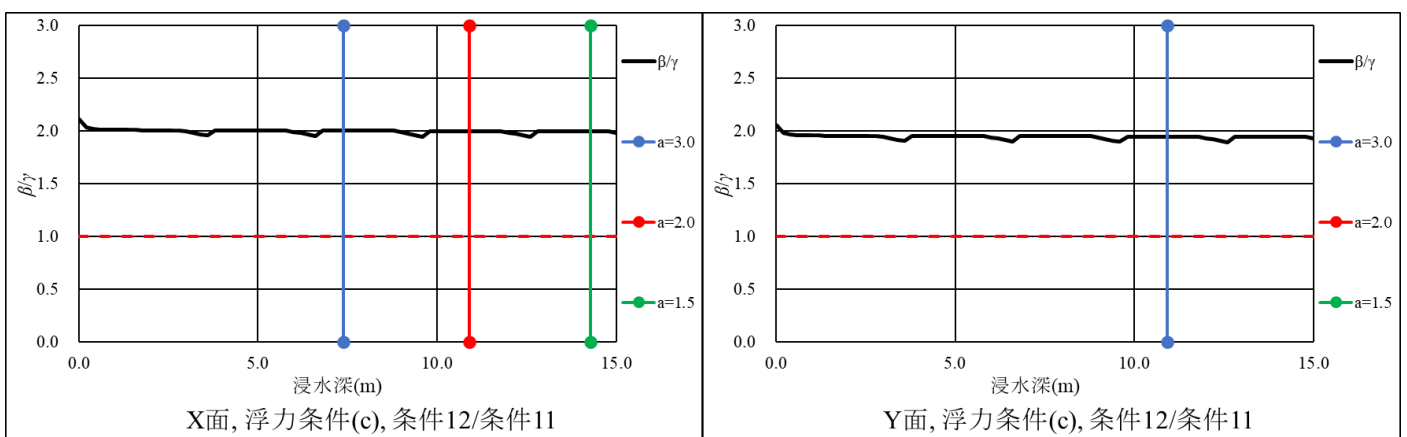


図 D-54 転倒 Z4 倍 浮力条件(c)

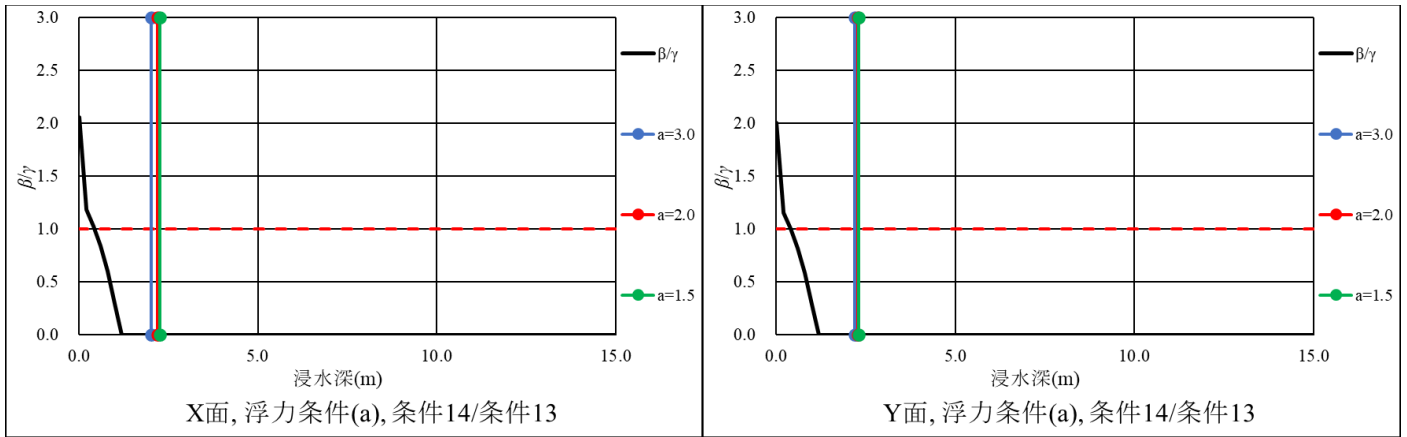


図 D-55 転倒 基準モデル 基礎 2 倍 浮力条件(a)

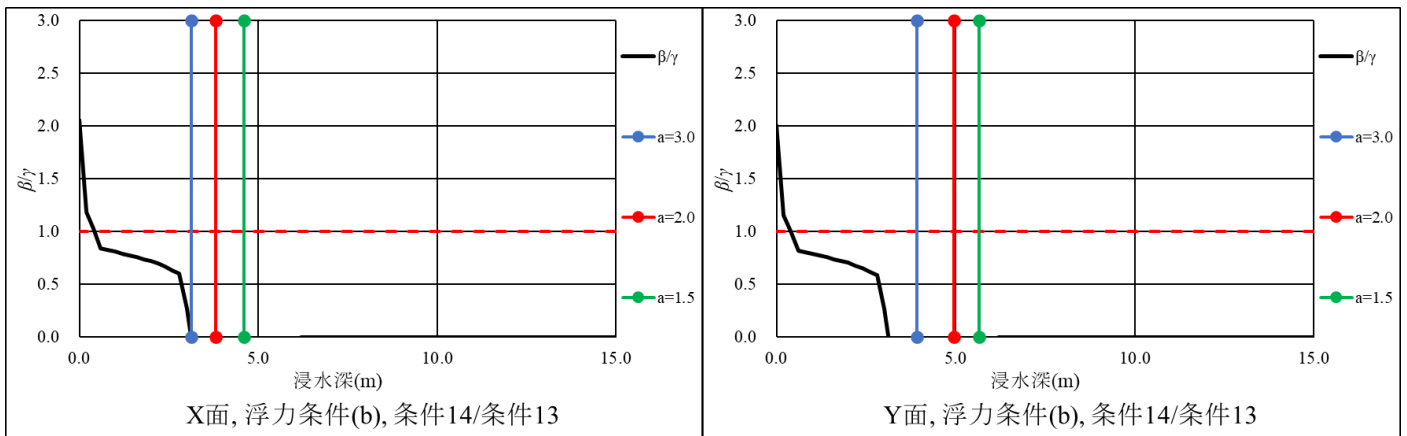


図 D-56 転倒 基準モデル 基礎 2 倍 浮力条件(b)

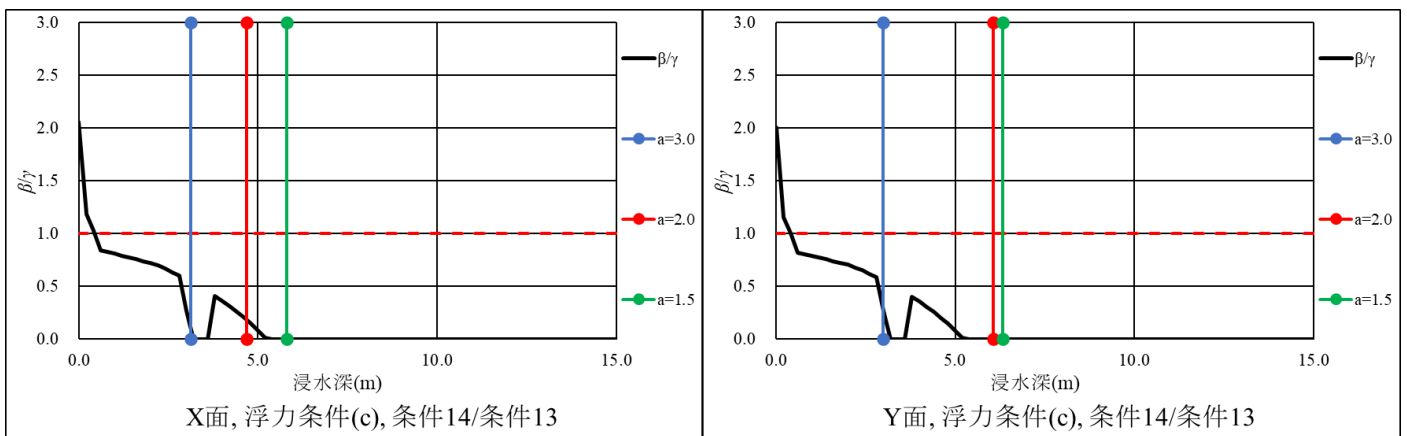


図 D-57 転倒 基準モデル 基礎 2 倍 浮力条件(c)

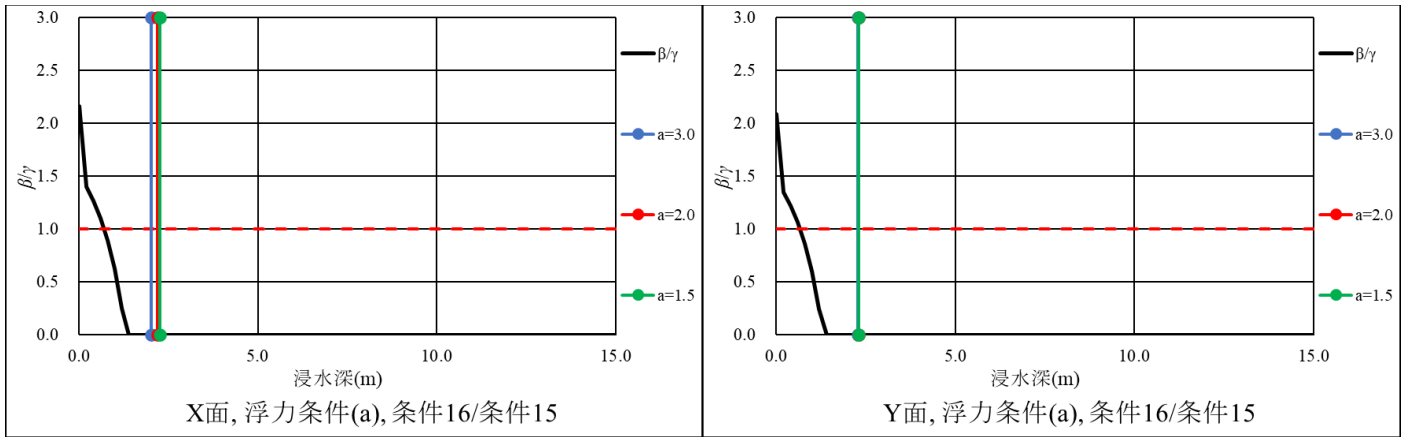


図 D-58 転倒 X2倍 基礎2倍 浮力条件(a)

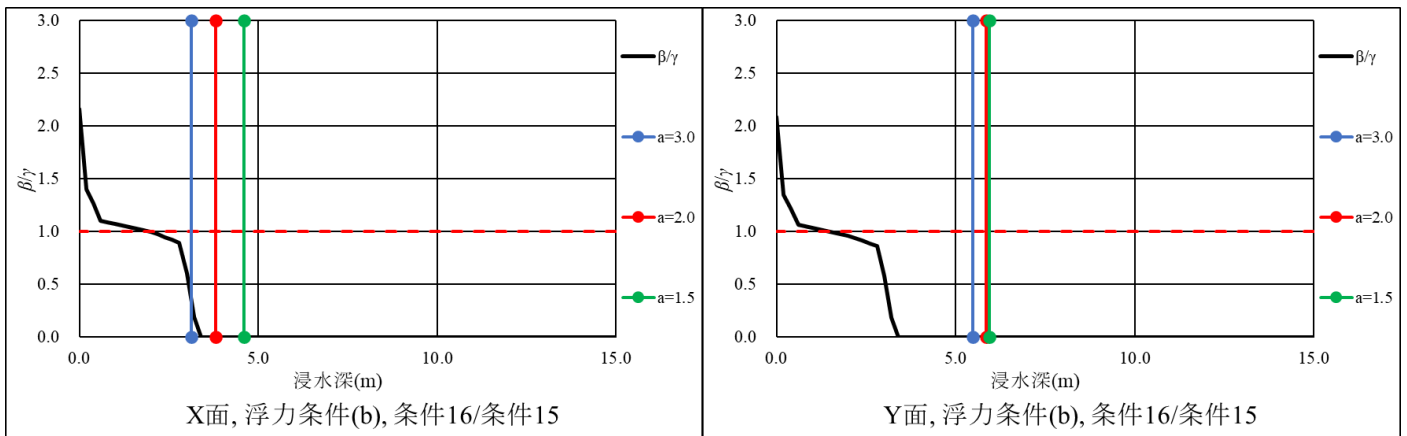


図 D-59 転倒 X2倍 基礎2倍 浮力条件(b)

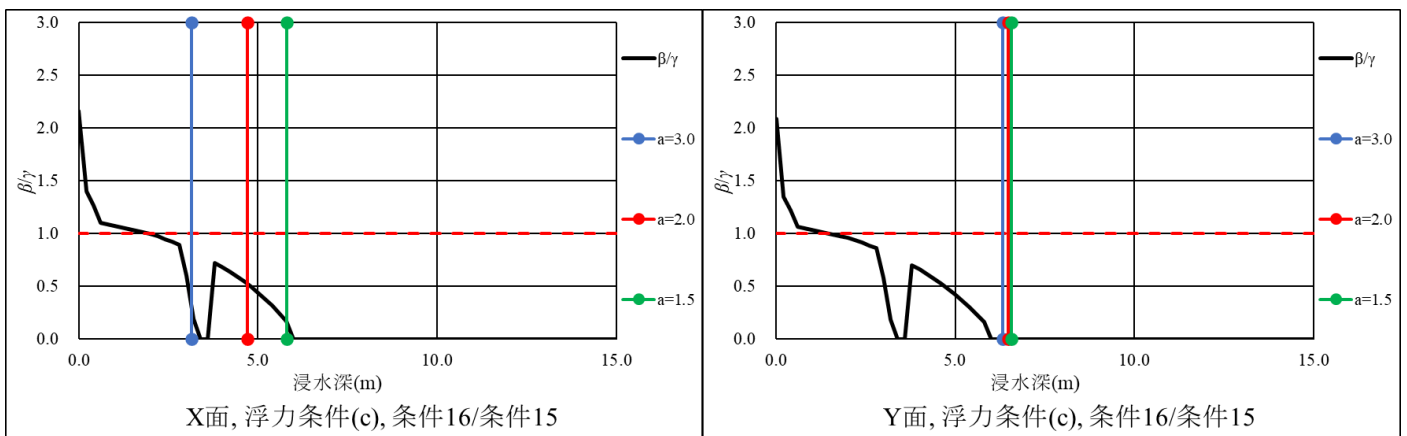


図 D-60 転倒 X2倍 基礎2倍 浮力条件(c)

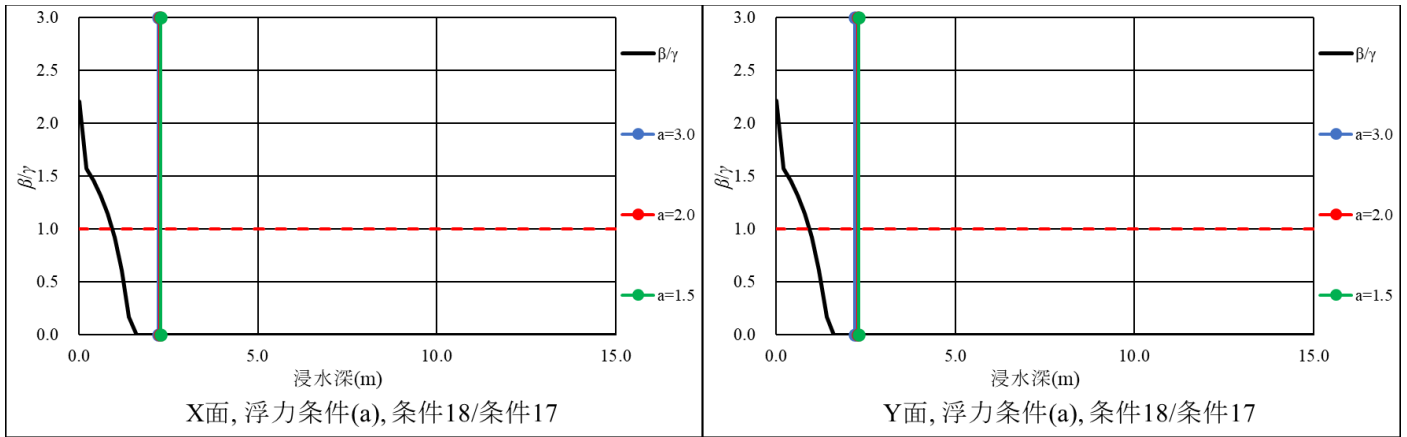


図 D-61 転倒 Y2倍 基礎2倍 浮力条件(a)

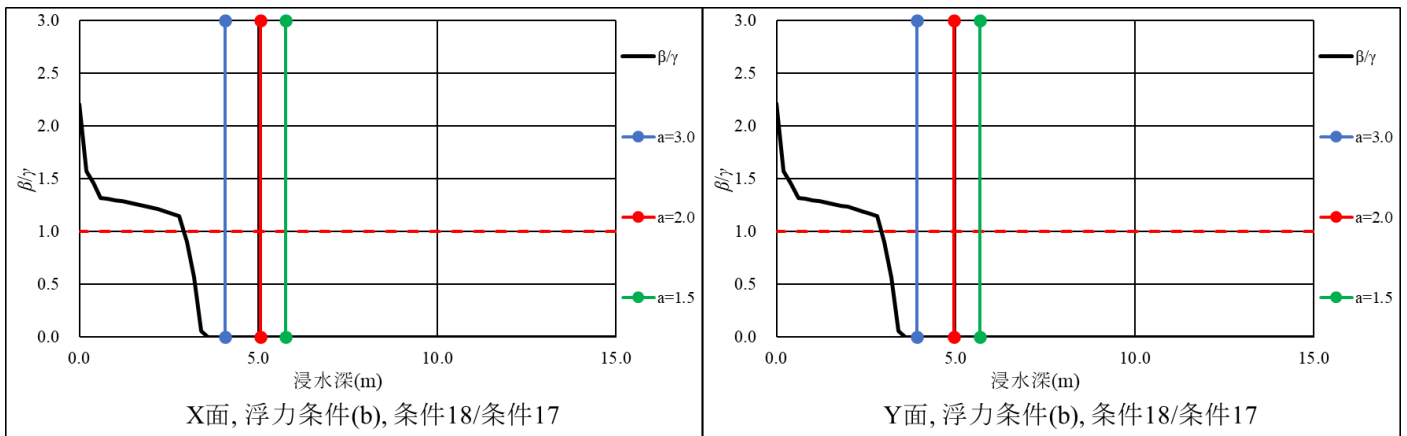


図 D-62 転倒 Y2倍 基礎2倍 浮力条件(b)

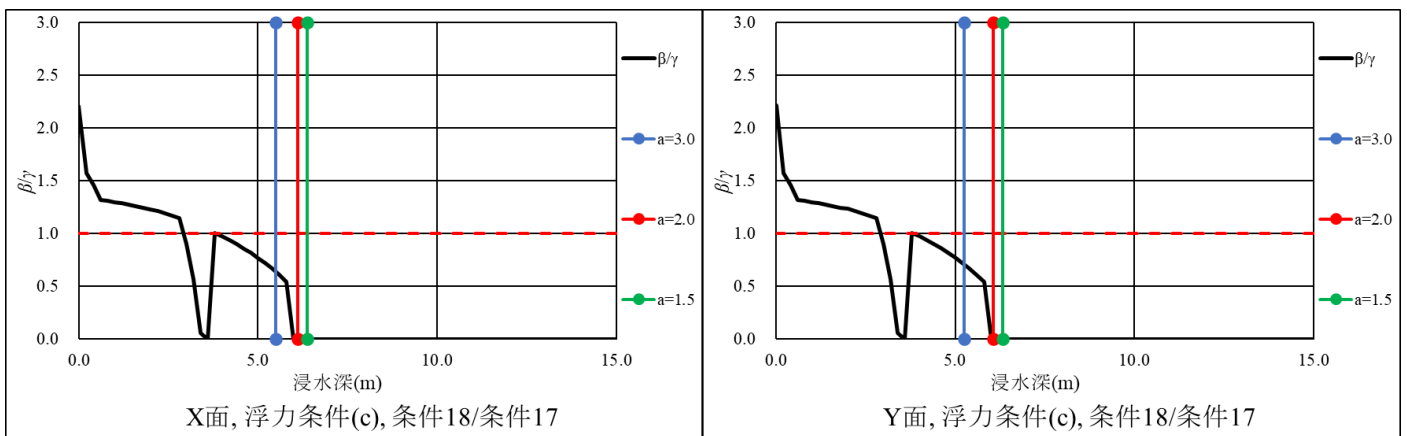


図 D-63 転倒 Y2倍 基礎2倍 浮力条件(c)

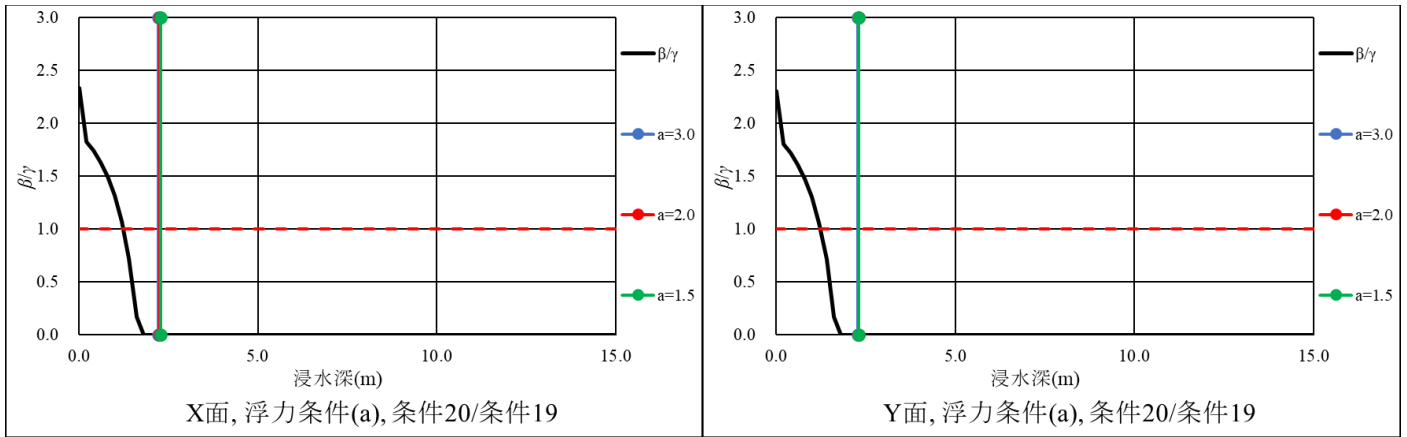


图 D-64 転倒 XY2 倍 基礎 2 倍 浮力条件(a)

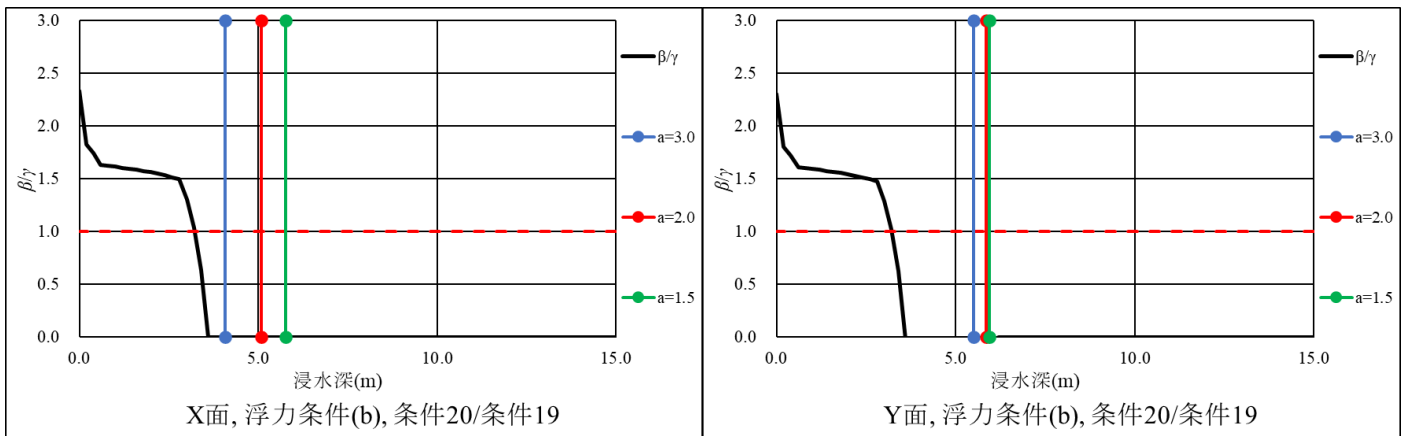


图 D-65 転倒 XY2 倍 基礎 2 倍 浮力条件(b)

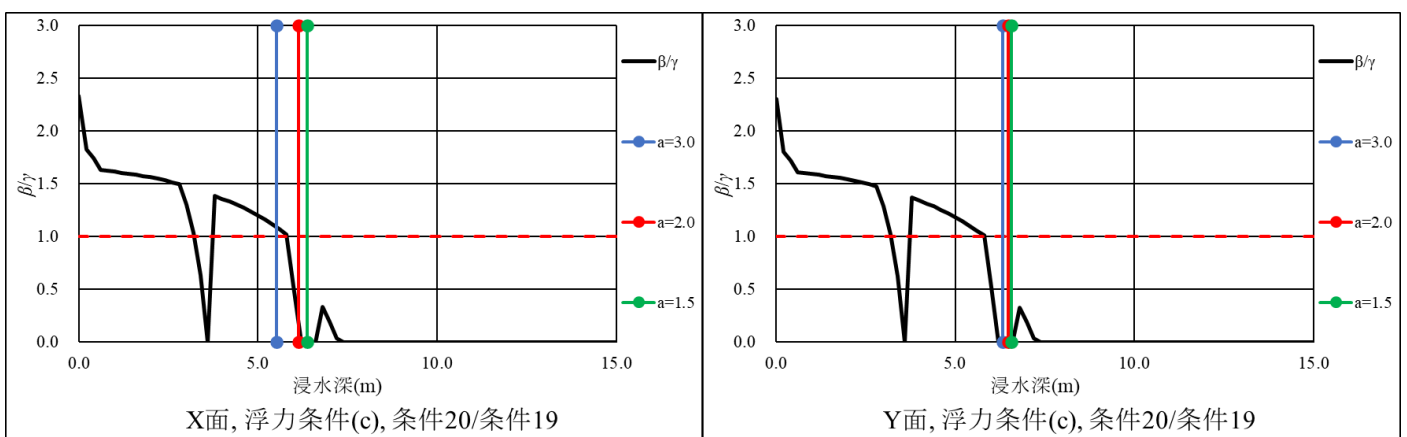


图 D-66 転倒 XY2 倍 基礎 2 倍 浮力条件(c)

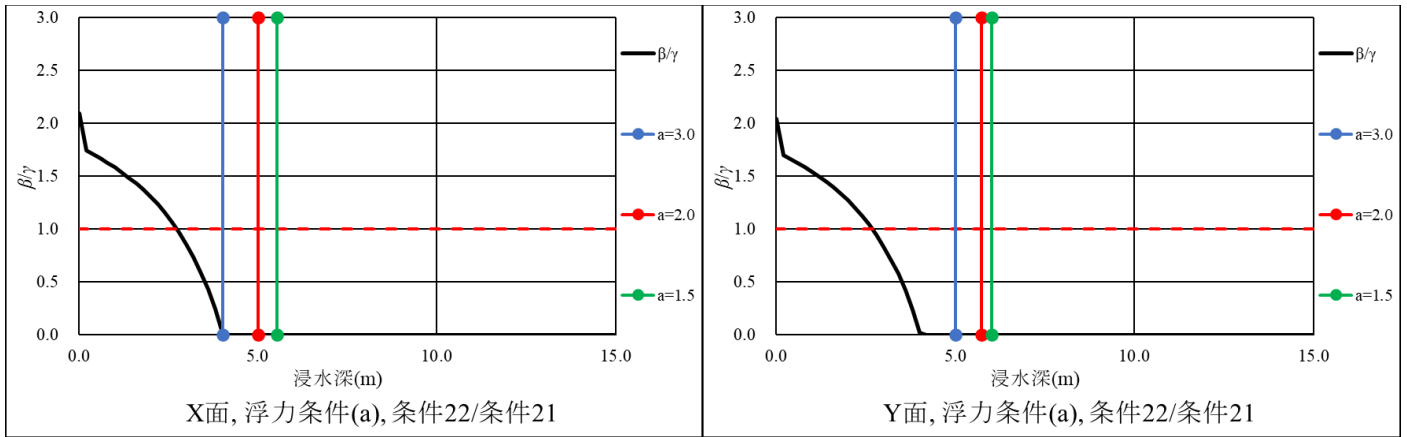


图 D-67 転倒 Z2 倍 基礎 2 倍 浮力条件(a)

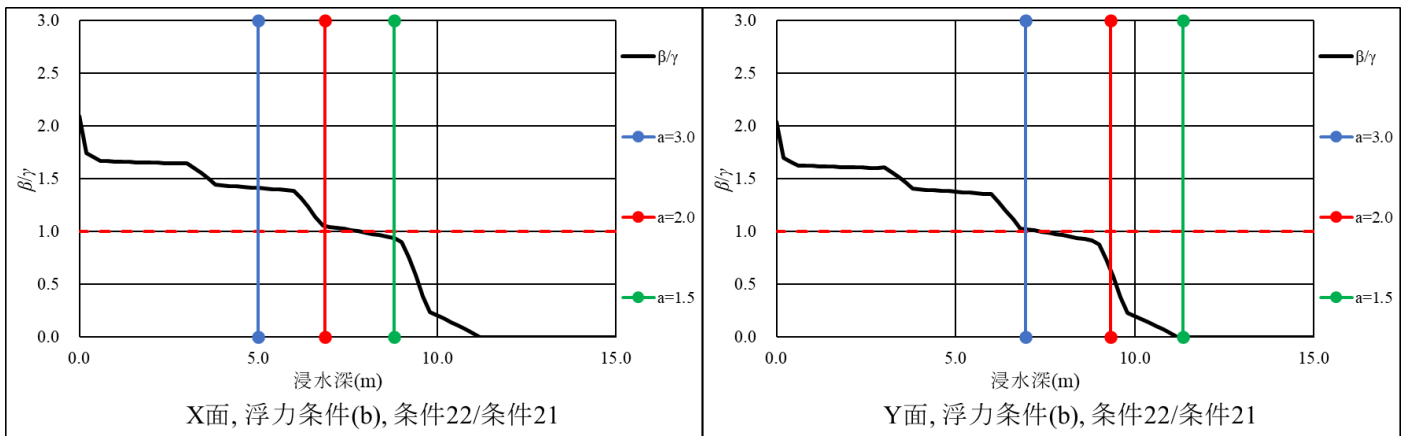


图 D-68 転倒 Z2 倍 基礎 2 倍 浮力条件(b)

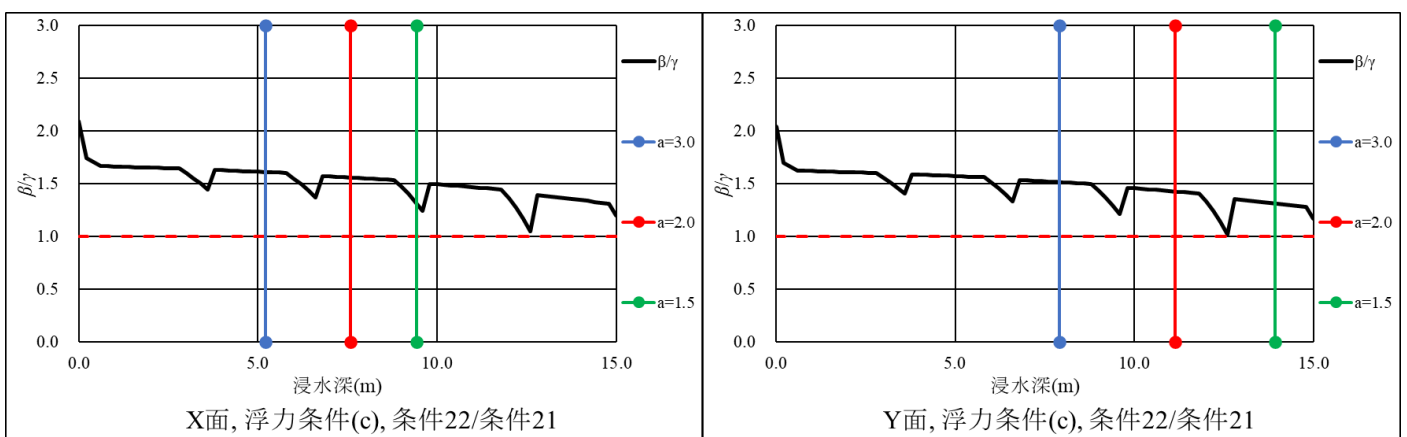


图 D-69 転倒 Z2 倍 基礎 2 倍 浮力条件(c)

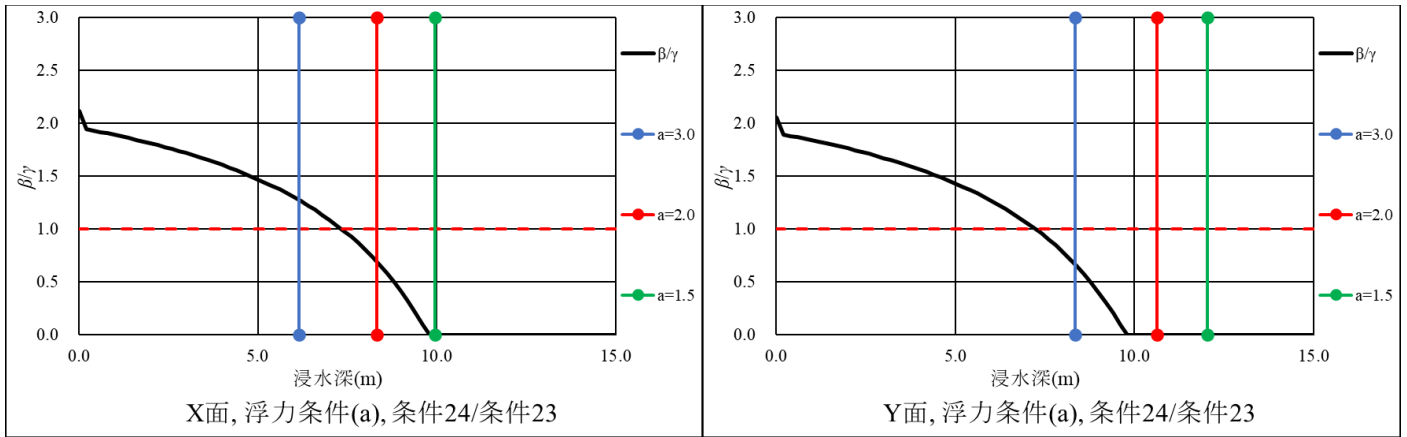


图 D-70 転倒 Z4 倍 基礎 2 倍 浮力条件(a)

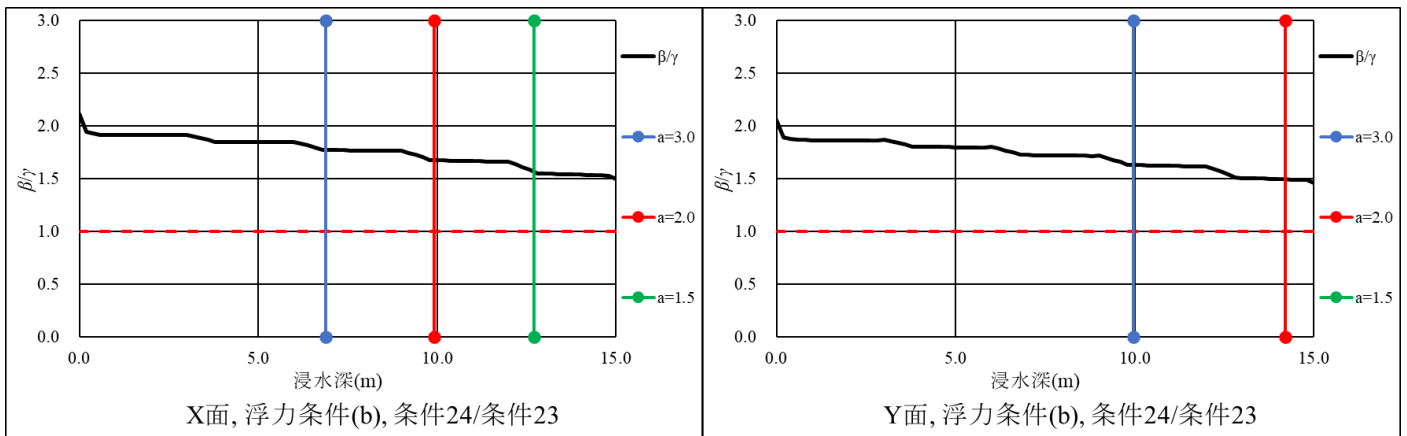


图 D-71 転倒 Z4 倍 基礎 2 倍 浮力条件(b)

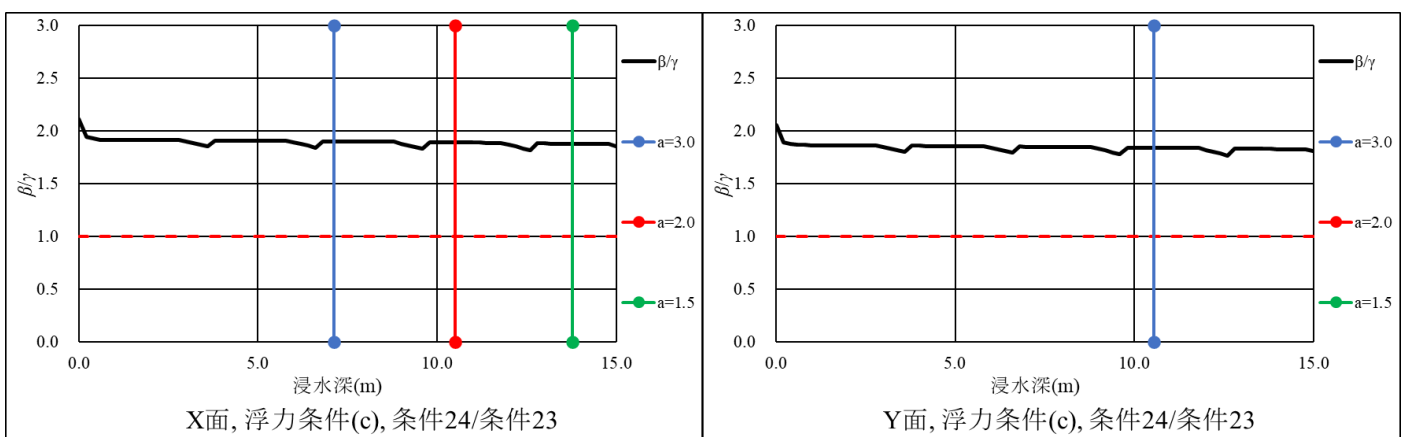


图 D-72 転倒 Z4 倍 基礎 2 倍 浮力条件(c)