

2004年スマトラ島沖地震津波の被害調査結果に基づく津波避難施設的设计外力評価

DESIGN LOAD EVALUATION FOR TSUNAMI SHELTERS BASED ON DAMAGE OBSERVATIONS AFTER INDIAN OCEAN TSUNAMI DISASTER DUE TO THE 2004 SUMATRA EARTHQUAKE

中埜良昭 — * 1

Yoshiaki NAKANO — * 1

キーワード：
2004年スマトラ島沖地震, 津波, 津波避難施設, 設計用津波荷重

Keywords：
2004 Sumatra Earthquake, Tsunami, Tsunami shelter, Design load

Since great earthquakes significantly affecting coastal regions are expected to occur in the near future in Japan, tsunami shelters are of highest priority to mitigate casualties by earthquake-induced killer waves. Although the design guidelines recently developed by a task committee under the Japanese Cabinet Office propose design loads for practical shelter design, they are fundamentally based on laboratory tests but not on damage observations. In this report, structures that experienced the Indian Ocean tsunami caused by the 2004 Sumatra Earthquake were surveyed, and the relationship between their damage, strengths, and tsunami height is quantitatively investigated to examine the design load proposed in the guidelines.

1. はじめに

東海地震, 東南海・南海地震に代表される海溝型地震では, 震動被害とともに津波被害の軽減も重要な課題であり, 津波避難ビルの設置は重要な震災対策の一つにあげられている。内閣府においても津波避難ビルの選定基準が議論され, 「津波避難ビル等に係るガイドライン (以下ガイドライン)」では津波に対する安全性を確認する際の津波荷重算定式が提示されている¹⁾。津波避難ビルの実務設計時に参照しうる簡便な荷重算定式としては, 現時点ではこれが唯一の算定式であるが, これは直立護岸を越流する津波を想定した2次元水理模型実験結果²⁾に基づくものであり, 津波を経験した実在建造物の耐力と被害程度の比較により設計用津波荷重の妥当性を定量的に議論した事例は, 建築耐震構造の研究分野と異なり, ほとんど見られない。そこで筆者は, 津波を経験した建造物の水平耐力とその被害程度の比較に基づきガイドラインで提示された設計用津波荷重の妥当性を検討すべく, 2004年12月26日に発生したスマトラ島沖地震による被災地域であるスリランカおよびタイを調査した。本報ではその調査概要ならびに設計用津波荷重の検討結果を報告する。なお, 本報告は主として文献³⁾の内容を加筆・修正したものである。

2. 調査概要

2.1 調査地域

調査は2005年2月19日~26日にスリランカ北東部 (Trincomalee) および南部 (Galle, Matara, Hambantota ほか) で, 3月9日~13日にタイ・プuket島およびカオラック周辺でそれぞれ実施した。調査地域を図1に示す。これらの調査地域は震央からそれぞれ約1600km

および約500km 離れており, 被害に対する震動の直接的影響はない。

2.2 調査の基本方針

調査は多種多様な構造被害の実態をアーカイブすることを目的に約80地点で行ったが, それらの内, 以下の(1)~(3)を満たす構造物について津波荷重と構造耐力の関係を検討すべく, 採寸, 配筋調査を含む詳細調査を行った³⁾。

- (1) 調査対象の耐力が実測結果から比較的容易に推定できること
- (2) 調査対象位置での津波高さが明確であること
- (3) 津波荷重を直接的かつ単純に評価できること

(1)の条件としては, ①断面 (寸法や配筋量) が確認できること, ②破壊部分と残存部分の境界条件が単純であること (破壊メカニズムが単純であること), ③架構全体の破壊時耐力が比較的容易に評価可能な程度の小規模構造物, あるいは整形平面・立面形状であるこ

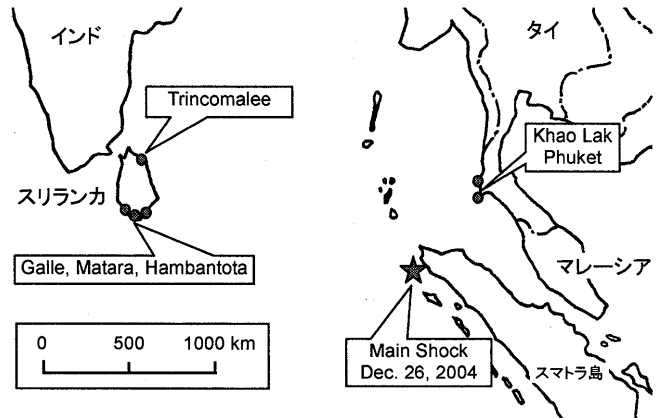


図1 調査地域と震央位置

*1 東京大学生産技術研究所 教授・工博
(〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

*1 Prof., Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Dr. Eng.

と、を具体的な要件とした。

(2)については、主として建物の壁面等に残る津波痕を調査し、さらに周辺樹木の被害等参考となる事実の収集や、必要に応じて津波高さに関するヒアリングも実施した。なお本調査の主目的は地上に建つ構造物に作用する津波荷重と構造耐力の関係の検討であるため、津波高さは調査位置での地盤面からの最大浸水深として定義した。

(3)の条件を満たすためには、地上での障害物等による影響が少なく、直接津波が来襲したと考えられる構造物が望ましい。そこで、本調査では可能な限り海岸直近の構造物をその対象とした。

なお調査対象の被害は津波によるもののみならず、漂流物の衝突によるものもある。そこで衝突痕の残る事例や、ヒアリングから衝突が明らかとなった事例、ならびにその可能性がある事例については、データ整理の際にこれを加味して評価した。

2.3 調査構造物と調査・記録項目

2.2節の条件に基づき、(a)単純な架構形式の建築物、(b)塀、(c)RC造柱（門柱等）、(d)高架水槽、(e)仏廟、(f)屋外トイレ・小屋、を水平耐力の評価対象とし、無被害を含む28件で詳細にデータを収集した（ただし内1件（ID:T02）は配筋詳細不明につき4章以降の検討対象から除外した）。詳細調査における記録項目は以下の通りである。
①周辺の特徴（平坦地、海岸直近等）、②最大浸水深とその推定方法

（実測／ヒアリング）、③調査対象の用途と構造種別（RC、B（煉瓦）、CB（ブロック）等）、④被害程度、⑤部材断面寸法（ $B \times D \times H$ 等）、⑥鉄筋径、間隔、位置、⑦調査対象の全景・周辺写真／スケッチ
調査対象一覧を表1に、代表的な被害状況を写真1にそれぞれ示す。特に前記(d)～(f)はスリランカでは類似した構造形式の事例が多数見られたため、被害の有無にかかわらず積極的にデータ収集した。

3. 水平耐力の評価

観察された破壊形式に応じて、曲げ降伏耐力 M_y 、曲げ破断（主筋破断）耐力 M_u 、転倒耐力 M_T 、せん断耐力 V_u を算定した。ここでRC部材の曲げ耐力については耐力算定時に用いられることの多い(1)式および(2)式に示す一般的な算定式に基づくものとしたが、対象部材の大半は軸力レベルが低い梁材とみなして原則として(1)式で評価し、2層の架構をなすS53（写真1の(8)参照）のみ(2)式で評価した。ただしS53の柱は「かぶり厚さ／柱せい」が日本の一般的な柱よりも大きかったため、(2)式中の係数0.8を実情に応じて修正した。なおいずれの評価式にあっても、鉄筋強度（降伏強度 σ_y 、引張強度 σ_u ）は現地で入手したサンプル鉄筋（スリランカで2試験片、タイで6試験片）の引張試験結果を用いた。一方、煉瓦壁のせん断耐力 V_u は、架構形式や品質を考慮して一律に0.4 N/mm²と仮定

表1 調査建物の耐力、係数 a 、被害一覧（網掛け部分は津波抵抗要素が柱部材の構造物）

ID	調査対象	構造 ^{*1}	所在地	M_y, M_u, M_T (kNm)	V_u (kN)	最大浸水深 η_{max} (m) ^{*2}	係数 a ^{*3}	構造被害 ^{*4}	備考（比較検討した耐力、被害の特徴ほか）
S01	医療施設の門柱	RC	Trincomalee	20	—	(≤ 0)	1.98	○(×)	M_y /漂流物衝突の可能性
S06	隣地境界塀①	RC+B	Trincomalee	50.5	—	0.9	1.73	×	M_T /海岸直近
S08	屋外トイレ①	B	Trincomalee	35	—	1.3	2.38	×	煉瓦間モルタルの付着破壊時の転倒耐力 M_T
S12	フェンス円形柱	RC	Galle	6.6	—	0	1.13	×	M_y /漂流物衝突の可能性/等価矩形断面で検討
S15	高架水槽②	RC	Galle	104	—	2.4	3.03	(×)	M_T /敷地内のバスが漂流衝突
S16	自動車工場事務 所棟の正面柱	RC	Galle	26 33	— —	2.4 "	1.76 2.04	○ ○(×)	M_y /バスの衝突していない柱は健全 M_u /鉄筋破断/バス漂流衝突
S19	隣地境界塀②	RC+CB	Galle	135	—	2.35	1.01	×	M_u /鉄筋破断/CB壁は耐力算定に考慮せず
S23	学校教室の壁	B	Galle	—	349	1.55	4.03	(△)	引き波でひび割れ被害の可能性（衝突痕有り）
S24	屋外小屋①	B	Galle	—	480	1.6	>5.0	○	S23の裏
S25	屋外トイレ④	B	Galle	—	130	1.6	3.68	○	S23の裏/開口：津波直交方向
S26	仏廟③	B	Galle	—	182	1.6	>5.0	○	S23の裏
S32	高架水槽③	B	Hambantota	—	9.5	2.95	0.54	×	煉瓦間モルタルの付着破壊時のせん断耐力 V_u
S33	屋外トイレ⑤	B	Hambantota	—	83	0.95	4.07	○	開口：津波直交方向
S37	高架水槽④	B	Hambantota	—	305	2.6	4.42	○	海岸から遠い
S38	高架水槽⑤	B	Hambantota	—	925	(≤ 0)	2.92	○	水運河口付近
S45	屋外トイレ⑦	B	Kottogoda	—	170	(≤ 0)	2.55	○	開口：津波直交方向/ η_{max} は仏像との比較証言による
S46	屋外小屋②	B	Matara	—	263	2.05	3.93	○	開口：津波直交方向
S48	屋外トイレ⑨	B	Matara	—	90	2.05	2.22	○	
S53	女子学校	RC+B	Matara	—	1316	2.85	2.31	○	RC造2階建て/簡易耐震診断実施
S57	工事中の建物の RC柱	RC	Hikkaduwa	18 23	— —	(≤ 0) "	0.54 0.59	×	M_y /柱15本中8本倒壊、7本大破 M_u
T01	Wine Cellar	B	Patong Beach	—	680	1.75	>5.0	○	海岸から約100m
T02	Kamala Beach Hotel & Resort	RC+B	Kamala Beach	—	(1473)	3.95	(1.60)	○	海岸から約60m/配筋詳細不明→プロット省略
T07	海軍ブロック塀	RC+CB	Thap Lamu	10	—	2.65	0.43	×	M_y /鉄筋の抜け出し/CB無視/海岸から1km
T09	海軍フェンス柱	RC	Phang Nga	4.5 6.3	— —	2.65 "	1.14 1.39	×	M_y /鉄筋の抜け出し、降伏、破断の事例が混在 M_u /海岸から1km
T10	棧橋の建物の柱	RC	Thap Lamu, Phang Nga	4.7 6.6	— —	2.65 "	0.93 1.05	×	M_y /鉄筋の降伏、破断の事例が混在/海岸直近 M_u
T13	Khao Lak Merlin Resort コテージ	RC+B	Khao Lak, Phang Nga	—	<317>	<4.23>	<1.16>	△×	V_u に煉瓦壁(380cm)考慮/11棟中9棟崩壊・流失
T15	La Flora Khao Lak Hotel のRC柱	RC	Bang Niang Phang Nga	12.9 19.9	— —	0 "	0.70 0.87	×	M_y /海岸直近 M_u
T17	建設現場の RC柱	RC	Phang Nga	28.6 43.9	— —	0.3 "	1.62 2.02	×	M_y /海岸から遠い（推定で1km程度以上） M_u

*1 RC:RC柱, B:無筋煉瓦壁, CB:無筋コンクリートブロック壁 *2 調査地点でのGLからの高さ ()はヒアリング等による推定値 *3 $a=(M_y, M_u, M_T, V_u)$ 相当時の水深 h (計算値)/ η_{max} (実測値) T02は配筋詳細不明につき()の値は図4にプロットせず、T13は高床式架構のため<>の値は参考値として図4にプロット。 *4 ○:無被害, △:損傷, ×:傾斜大・崩壊, ():漂流物の衝突による被害(○, △, ×の併記は各被害の混在を表す)

した終局時せん断応力度 τ_u に津波作用方向の煉瓦壁断面積を乗じて求めた（直交方向の煉瓦壁の寄与は無視した）。

なお、前述の S53は比較的単純な架構形式であったため、上記の部材強度をもとに F 値を RC 柱で1.27、煉瓦壁で0.8と仮定した簡易第2次耐震診断を行い、 $F=0.8$ での建物全体の水平耐力を V_u とした。

$$M_y (Mu) = 0.9 a_t \sigma_y (\sigma_c) d \quad (1)$$

$$M_y = 0.8 a_t \sigma_y D + 0.5 N D [1 - N / (B D F_c)] \quad (2)$$

a_t : 引張鉄筋断面積, F_c : コンクリート圧縮強度

B : 断面幅, D : 断面せい, d : 有効せい, N : 軸力

4. 津波荷重の評価と実被害との比較

構造物に作用した津波荷重は(3)式で表される文献1)の設計用津波波圧算定式を参考に(4)式の形式で設定し、これによる波力と3章で求めた耐力が等しくなる係数 a を調査対象ごとに逆算した。

$$q_x = \rho g (3 h - z) \quad (3)$$

$$p_x = \rho g (a \eta_{max} - z) \quad (4)$$

q_x : 文献1)による構造設計用の津波波圧 (kN/m²)

ρ : 水の単位体積質量 (t/m³) (本検討では1.0を仮定した)

g : 重力加速度 (m/s²)

h : 設計用浸水深 (m)

z : 当該部分の地盤面からの高さ (m)

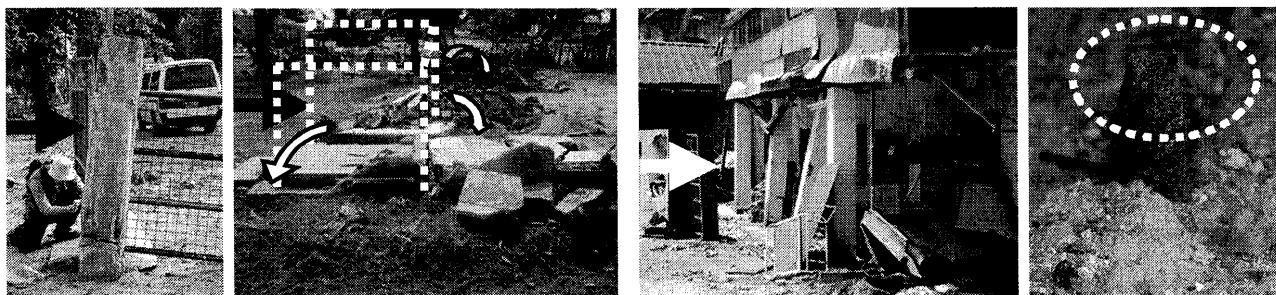
(3)式で $0 \leq z \leq 3 h$ (4)式で $0 \leq z \leq a \eta_{max}$

p_x : 最大浸水深 η_{max} 時の津波波圧 (kN/m²)

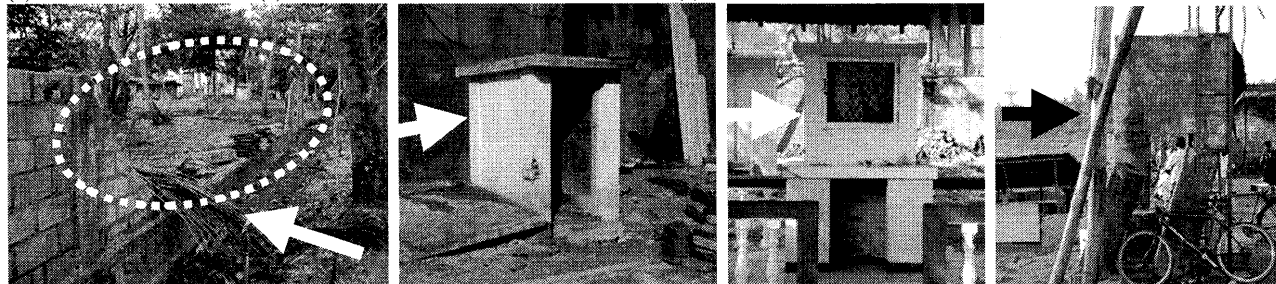
a : [耐力相当時の水深 η'] / [最大浸水深 η_{max}]

η_{max} : 最大浸水深 (GL からの実測値で定義) (m)

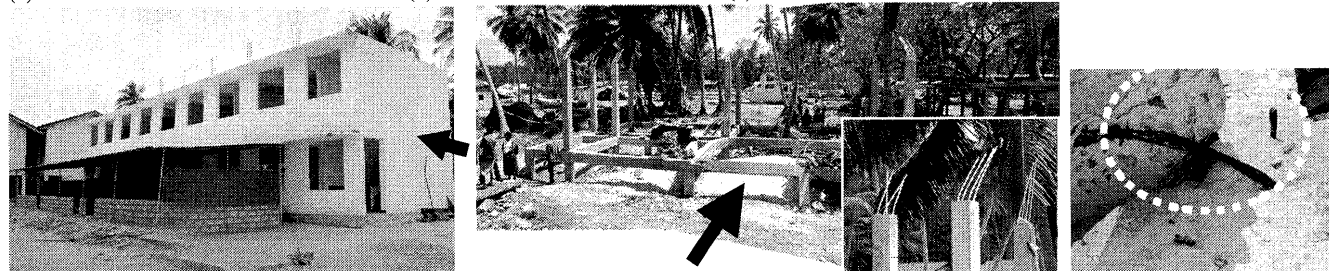
(3)式による波圧分布は、図2に示す通り設計用浸水深 h の3倍の高さに達する三角形分布（波圧分布の最下部で静水圧の3倍となる最大波圧）を想定したものである。(4)式と耐力から逆算される係数 a は、耐力相当時の水深 η' (計算値) の最大浸水深 η_{max} (実測値)



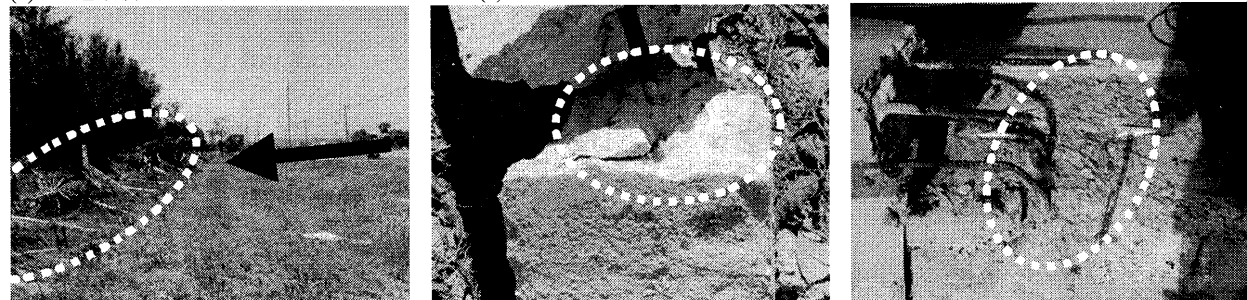
(1) RC 造門柱 (S01) (2) 煉瓦造屋外トイレ (S08) (3) 自動車工場事務所棟の RC 柱と主筋の破断 (S16)



(4) 隣地境界塀 (S19: RC 柱+CB 壁) (5) 煉瓦造屋外トイレ (S25) (6) 煉瓦造仏廟 (S26) (7) 煉瓦造高架水槽 (S32)



(8) RC 造学校 (S53: 簡易耐震診断実施) (9) 工事中の建物 (S57: 施工途中の鉄筋が湾曲, RC 柱が曲げ破壊, 一部は鉄筋破断)



(10) 海軍のフェンス柱 (T09: 主筋破断を伴い破壊) (11) La Flora Khao Lak (T15: 主筋破断)

写真1 代表的な調査構造物の被害状況 (“S01”等は表1の建物ID番号を, →は津波の方向をそれぞれ表す)

に対する比率 ($a = \eta' / \eta_{\max}$) で、もし $a = 3$ で被害と無被害が区分されれば(3)式が妥当であることを示す。なお津波荷重は津波高さ、構造物の高さ、立面形状等の影響を受けるため、文献1)ではいくつかのケースで評価法が提示されているが、ここでは最も基本と考えられる図3の2ケースを対象とした。係数 a の具体的な算定手順は以下の通りである。

- ① 調査対象の耐力をその破壊形式に応じて算定する (3章参照)。
- ② (4)式の波圧分布により構造物の損傷位置 (地盤からの高さ u) に作用する力 (またはモーメント) がその耐力に等しいとして算出される水深 η' ($= a \eta_{\max}$) を求める。 η' が構造物の高さ H を超える場合は、 η' の上限を H として図3の台形波圧分布 (ケース2) を仮定する。
- ③ η' ($= a \eta_{\max}$) と調査地点における最大浸水深 η_{\max} との比率として係数 a を算定する。

最大浸水深 η_{\max} と係数 a を表1に示す。また両者の関係を、壁部材は図4(a)に、柱部材は同図(b)にそれぞれプロットして示す。なお同形式の構造物で漂流物の衝突の有無等により異なる被害程度を示すものについてはそれぞれの記号を同位置に重複して表示した。

図4(a)から漂流物の衝突の可能性が高い事例 (S23) を除き、 a が2.5程度以上であれば被害が生じていないことがわかる。したがって(3)式における係数 3 はおおむね妥当な値であると考えられる。

なお、漂流物が衝突する場合には S23のように $a = 4$ 程度でも損傷を受けた事例があり、漂流物対策は別途検討する必要がある。

一方、図4(b)によると柱部材については壁部材よりも被害・無被害を区分する a の値は若干低く、漂流物の衝突がなければ 2 程度がその境界値である。すなわち震動被害を受けない程度の耐震性を有

すれば、津波来襲時には面材よりも線材の方が津波外力に対して抵抗機構上有利であることを示唆している。ただし、この場合も $a = 2 \sim 3$ 程度では漂流物の衝突被害の回避は困難で (S01, S15, S16)、前述の壁部材と同様、漂流物対策は別途検討する必要がある。

5. まとめ

津波被害を経験した構造物の調査結果に基づき設計用津波荷重の妥当性を検討したところ、ガイドラインで提示されている「浸水深の3倍の高さに達する三角形分布を仮定した静水圧分布に基づく津波荷重評価」はおおむね妥当であるが、漂流物対策については別途検討する必要があることがわかった。

謝辞

本調査は「平成16年度科学技術振興調整費 スマトラ島沖大地震及びインド洋津波被害に関する緊急調査研究」の一環として行ったものである (調査リーダー：目黒公郎・東京大学生産技術研究所教授)。データ収集に当たっては庄司学・筑波大学大学院講師に多大な協力をいただいた。またデータの分析に際しては一部 (財) トステム建材産業振興財団 平成17年度研究助成金「津波を経験した建物の耐力に基づく設計用津波荷重の評価とそのデータアーカイブ (研究代表者：中埜良昭)」によった。ここに記して関係各位に深謝する。

参考文献

- 1) 内閣府・津波避難ビル等に係るガイドライン検討会：津波避難ビル等に係るガイドライン、http://www.bousai.go.jp/oshirase/h17/tsunami_siry02.pdf
- 2) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷毅, 高尾誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森政則：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集 第47巻(2000), pp. 911-915.
- 3) 中埜良昭, 朴珍和：構造耐力との比較に基づく2004年スマトラ島沖地震津波による津波荷重の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol. C-2 (構造IV), pp. 723-726, 2005.9.

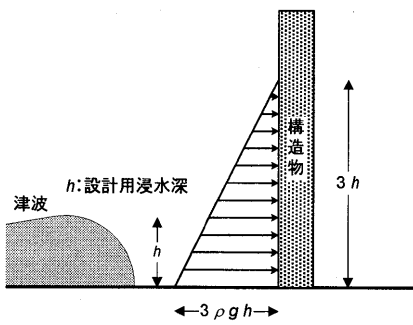


図2 設計用津波波圧分布¹⁾

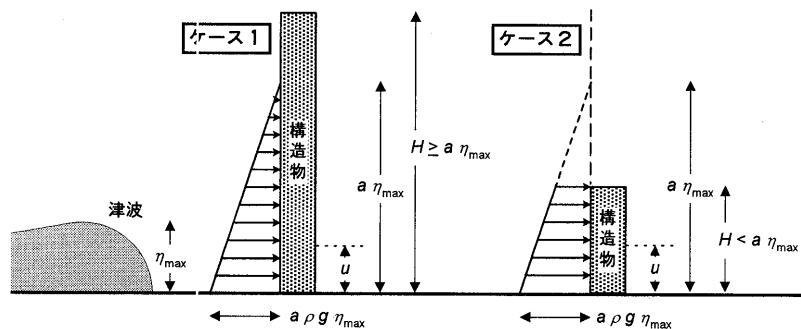


図3 本検討で想定した最大浸水深 η_{\max} 、構造物高さ H と波圧分布 p_x の関係³⁾

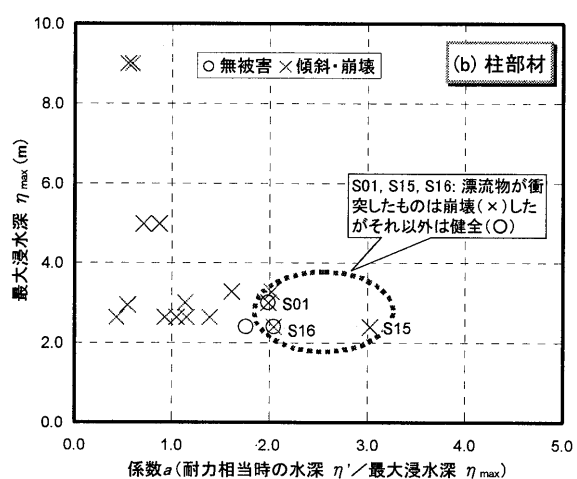
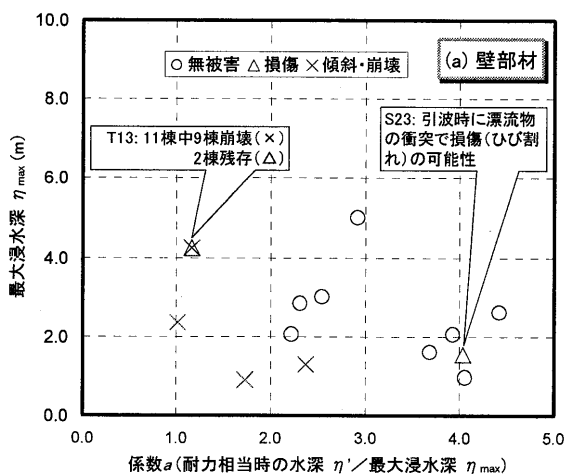


図4 係数 a と最大浸水深 η_{\max} の関係 (図中の番号は表1の調査対象のIDを表す)

[2006年10月19日原稿受理 2007年2月19日採用決定]