

構造物の維持補修技術研究会(RAMS)平成23年度第1回特別講演会 2012.01.20

Steel Structure Laboratory

石巻市・女川町の被害状況について

徳山工業高等専門学校
土木建築工学科
海田 辰得

Tokuyama College of Technology

報告内容

1. 石巻市の被害状況
 - 1-1 日和ヶ丘からの眺望・旧石巻市街
 - 1-2 石巻港・大曲地区
 - 1-3 門脇地区 (門脇小学校)
 - 1-4 釜谷地区 (大川小学校・新北上大橋)
 - 1-5 雄勝地区 (雄勝公民館)
2. 女川町の被害状況
 - 2-1 女川町立病院からの眺望
 - 2-2 女川浜・女川街道
 - 2-3 女川湾周辺
3. 津波による建造物の転倒に対する考え方の一例
 - 3-1 4階建RC造の転倒 (女川町)
 - 3-2 PC桁橋の転倒・流失 (田老地区)

Steel Structure Laboratory Page 2

石巻市・女川町の調査日程および調査地域

2011年8月28日：移動日 周南市→仙台市 (合流)

2011年8月29日：石巻市役所ヒアリング調査
日和ヶ丘 鹿島御児神社
石巻市立門脇小学校・門脇地区
新北上大橋
石巻市立大川小学校・釜谷地区
石巻港周辺・大曲地区等

2011年8月30日：女川町役場ヒアリング調査
女川町立病院
女川漁港・女川浜周辺
五部浦湾・女川原子力発電所周辺
崎山展望台
石巻市雄勝地区

2011年8月31日：移動日 仙台市→周南市

Steel Structure Laboratory Page 3

1. 石巻市の被害状況

Steel Structure Laboratory Page 4

1-1 日和ヶ丘 (日和山公園) からの眺望・旧石巻市街

図-2 旧石巻市街の簡易マップ
(河北新報ニュース 5.11 <http://www.kahoku.co.jp/>)

Steel Structure Laboratory Page 5

1-1 日和ヶ丘 (日和山公園) からの眺望・旧石巻市街

写真-1 旧石巻市街 門脇地区方向①
写真-2 旧石巻市街 門脇地区方向②

- ✓ 木造建物は**ほぼ全滅** (解体撤去済み)
- ✓ 鉄骨造の建物が点在するも、**1~2階は骨組みだけ**の状態
- ✓ **火災**に遭ったと思われる鉄骨造の建物もわずかに現存
- ✓ 散水しながらの瓦礫撤去作業が続く

Steel Structure Laboratory Page 6

1-1 日和ヶ丘（日和山公園）からの眺望・旧石巻市街

写真-3 旧北上川河口と日和大橋
 写真-4 瓦礫集積地

- ✓ 日和大橋（第1次緊急輸送路指定）は2010年度に耐震補強完了。橋脚基部の洗掘以外はほぼ無傷
 → 耐震ダンパー、鋼板巻き立て等
- ✓ 右岸の魚類加工場は壊滅
- ✓ 左岸の瓦礫の所々から白煙

Steel Structure Laboratory Page 7

1-1 日和ヶ丘（日和山公園）からの眺望・旧石巻市街

写真-5 旧北上川上流方向の中州
 写真-6 河岸地域の被災状況

- ✓ 津波は遡上しながら両岸に越流し、護岸を破壊。コンクリートブロックや土壌で応急処置。しかし河川の水位は高い
- ✓ 両岸の家屋は2階部分まで破壊されており、浸水高さは4m以上

Steel Structure Laboratory Page 8

1-1 日和ヶ丘（日和山公園）からの眺望・旧石巻市街

写真-7 コンクリート岸壁の破壊
 写真-8 浸透圧による堤内地への浸水

- ✓ 河口の水位が堤内地よりも高いため、河岸近くの所々で浸透圧による浸水を確認（写真-8）
 ↓
 水が抜けない状況 → 海岸付近で多くみられた

Steel Structure Laboratory Page 9

1-2 石巻港・大曲地区

写真-9 石巻港の漁港施設
 写真-10 岸壁付近の浸水状況

- ✓ 港内の岸壁から約100m以内の広い範囲で浸水
 ↓
 液化化+津波による洗掘 = 1m近く地盤沈下（？）
 ↓
 詳細な原因は不明

Steel Structure Laboratory Page 10

1-2 石巻港・大曲地区

写真-11 盛土による仮設道路
 写真-12 満潮時の岸壁の水位

- ✓ 砂利などで盛土した部分のみ通行可能
- ✓ 満潮が近づくと浸水範囲が拡大

Steel Structure Laboratory Page 11

1-3 門脇地区（門脇小学校）

写真-13 全焼した門脇小学校

- ✓ 車や家屋が津波によって炎上しながら本校に衝突し、全焼
- ✓ 学校にいた230人は墓地脇の階段から日和山に避難し、無事

日頃の避難訓練は津波を想定し、日和山に逃げることを鉄則としていた

Steel Structure Laboratory Page 12

1-3 門脇地区 (門脇小学校)

写真-14 焼け残った西側1Fの教室 写真-15 全焼した東側1Fの教室

- ✓ 校舎の西側よりも東側の室内が激しく炎上
- ✓ 天井の内装材が崩落し、津波による瓦礫までもが炎上 (写真-14)

Steel Structure Laboratory Page 13

1-3 門脇地区 (門脇小学校)

写真-16 津波の痕跡 (H=175cm) 写真-17 門脇地区の鉄骨住宅

- ✓ 本校1Fの浸水深は1.75m
- ✓ 門脇地区の場所によっては2~3階の高さ (4~6m) まで到達

Steel Structure Laboratory Page 14

1-4 釜谷地区 (大川小学校・新北上大橋)

石巻市街の北東約15km
 河口より約3km
 児童74/108人死亡・不明

14:46 地震発生
 15:00 校庭への避難完了
 15:25 三角帯へ避難開始
 15:37 津波襲来

防災マニュアルに避難指示あるも具体的な避難先までも明記せず
 裏山に倒木・積雪あり
 RC造2F建の校舎に屋上が無い

図-3 大川小学校・新北上大橋の位置
 河北新報ニュース 09.08 <http://www.kahoku.co.jp/>

Steel Structure Laboratory Page 15

1-4 釜谷地区 (大川小学校・新北上大橋)

写真 被災直後の大川小学校
http://blogs.yahoo.co.jp/autumn_snake_1995/

Steel Structure Laboratory Page 16

1-4 釜谷地区 (大川小学校・新北上大橋)

写真-18 正面玄関 写真-19 中庭から各教室

- ✓ 円弧上に教室を配置し、2F部分は片流れ屋根のRC造2F建て校舎
- ✓ 1~2階とも、ほとんどの教室の外壁が破壊されている

Steel Structure Laboratory Page 17

1-4 釜谷地区 (大川小学校・新北上大橋)

写真-20 1F教室の天井 写真-21 2Fの床スラブ・壁の破壊

- ✓ 1階教室が水没すると同時に天井を突き上げ、2階の床スラブを破壊
- ✓ ベランダ側は、腰壁・垂れ壁ともに破壊・流失

Steel Structure Laboratory Page 18

1-4 釜谷地区 (大川小学校・新北上大橋)




写真-22 2Fの男子トイレ

写真-23 津波の浸水高さ

約10m

- ✓ トイレの仕切り・タンク・便器などが流失
- ✓ 2階天井に残された痕跡から、浸水深は約10mと推定

Steel Structure Laboratory Page 19

1-4 釜谷地区 (大川小学校・新北上大橋)




校舎側

体育館

写真-24 RC造渡り廊下の倒壊

写真-25 校舎側より

津波

ねじれるように倒壊

- ✓ 校舎側には伸縮継手あり→自由端
- ✓ 体育館外壁にて支持あり→固定端

Steel Structure Laboratory Page 20

1-4 釜谷地区 (大川小学校・新北上大橋)




写真-26 梁の破壊状況

写真-27 橋脚基部の破壊状況

Steel Structure Laboratory Page 21

1-4 釜谷地区 (大川小学校・新北上大橋)



【新北上大橋】
7径間鋼単純ワーレントラス橋
単スパン84.8m (橋長566m)
河口より約4kmに位置する

流失した上部工

写真-28 新北上大橋の落橋・流失状況 (上流側より撮影)

- ✓ 津波によって左岸2径間の上部工が落橋・流失
→中間橋脚+プレカスター (仮設橋) を延長する応急復旧工事中
→10月17日に完了するも、本格復旧工事の見通しは立たず
- ✓ 流失した上部工は約300m上流にて水没している

Steel Structure Laboratory Page 22

1-4 釜谷地区 (大川小学校・新北上大橋)




写真-29 下流側の様子

津波

図-4 本橋周辺の河川の平面形状

- ✓ トラス構造につき、スパンの割に自重が小さい
- ✓ 高欄や斜材が漂流物を留め易い ⇒ 抗力の増大 = 転倒モーメントの増大
- ✓ 左岸側の越流に加え、蛇行流による非定常的な流れ (2次流れ) が形成され、内岸 (左岸) 側の流れが増速 ⇒ 左岸側2径間の流失 (?)

Steel Structure Laboratory Page 23

1-5 雄勝地区 (雄勝公民館)




写真-30 石巻市図書館分館 (雄勝公民館)

写真-31 図書館裏のグラウンド

- ✓ 図書館屋上に漂着した大型観光バス (重量=約13t)
- ✓ 浸水深は13~15m以上 (雄勝中学校の被災状況より推定)
- ✓ グラウンドは被災車両と瓦礫の集積場

Steel Structure Laboratory Page 24

1-5 雄勝地区 (雄勝インフォメーションセンター)

写真-32 雄勝インフォメーションセンター
 写真-33 RC建物基礎の洗掘

- ✓ 津波の流体抗力による壁の曲げ破壊 (写真-30)
- ✓ 外周約2m以内の洗掘によって杭基礎が露出 (写真-31)

建物外周の洗掘は、津波に向かい合う辺および建物隅角部で著しい

Steel Structure Laboratory Page 25

2. 女川町の被害状況

Steel Structure Laboratory Page 26

2. 女川町の被害概要

写真-36 女川町の航空写真 (震災前)
<http://maps.locos.yahoo.co.jp/>
 図-5 女川町市街地 (震災後)

- ✓ リアス式海岸によってできた湾内に広がる女川町市街地
- ✓ 湾口防波堤を設置
- ✓ 津波の遡上高さ (潮位から津波最大到達点までの高さ) = 最大35m
- ✓ 町の中心部にある高台 = 女川町立病院 (地盤高さ17.4m)

Steel Structure Laboratory Page 27

2-1 女川町立病院からの眺望

写真-37 マリンビル女川と江島共済会館
 写真-38 RC5階建のホテル

- ✓ 転倒し、元位置より約20m移動したRC4階建 (写真-37) ⇒ 転倒計算
- ✓ 基部を洗掘されるも、転倒を免れたRC5階建 (H=17.5m) (写真-38)

手前の江島共済会館が障害となり、津波の流れを妨げた可能性
 浸水深は5階建屋上にまで達している

Steel Structure Laboratory Page 28

2-1 女川町立病院からの眺望

写真-39 RC3階建物の転倒
 写真-40 女川街道の様子

- ✓ 木造だけでなく、RC2~4階建および鉄骨造の建物までもが転倒・倒壊している

津波が増幅されやすく・集中しやすい地形

Steel Structure Laboratory Page 29

2-2 女川浜・女川街道

写真-41 江島共済会館の正面
 写真-42 引き抜かれた基礎杭

- ✓ 建物の転倒によって、海側の基礎杭 (φ300mm, 長さ6m, RC) が全て引き抜かれており、一部が基礎にぶら下がった状態

Steel Structure Laboratory Page 30

2-2 女川浜・女川街道

写真-43 RC3階建物の転倒 (正面) 写真-44 べた基礎底面

- ✓ 壁式構造のRC3階建
- ✓ 割石を敷き詰めた上にコンクリートを打設する『べた基礎』
- ✓ 津波に対しては杭のような引き抜き抵抗は期待できず、自重のみ

Civil Eng. & Architecture Steel Structure Laboratory Page 31

2-2 女川浜・女川街道

写真-45 石巻署女川交番の転倒 写真-46 引き抜かれた基礎杭

- ✓ ラーメン構造のRC2階建て
- ✓ 転倒方向と津波の向きの関係

女川町では、RC造や鉄骨造の破壊・転倒が目立つ

Civil Eng. & Architecture Steel Structure Laboratory Page 32

2-2 女川浜・女川街道

写真-47 海岸近くのSRC建物跡地 写真-48 SRC柱の破壊状況

- ✓ 基礎だけ残して破壊したSRC（鉄骨鉄筋コンクリート）構造の建物
- ✓ コンクリート内部の角柱鋼管が完全に露出しており、破断した先端が全て山側に曲がっている

Civil Eng. & Architecture Steel Structure Laboratory Page 33

2-2 女川浜・女川街道

写真-49 女川町立病院への避難階段 写真-50 RC柱のせん断破壊

病院1F部分まで 17.4m

Civil Eng. & Architecture Steel Structure Laboratory Page 34

2-3 女川湾周辺

写真-51 満潮時に冠水する防波堤① 写真-52 満潮時に冠水する防波堤②

Civil Eng. & Architecture Steel Structure Laboratory Page 35

2-3 女川湾周辺

写真-53 津波による斜面・道路崩壊 写真-54 流された舗装面

Civil Eng. & Architecture Steel Structure Laboratory Page 36

2-3 女川湾周辺 (女川湾口防波堤)




写真-55 崎山展望台からのながめ
写真-56 景色から消えた湾口防波堤

- ✓ 最も陸側のケーソン1個を除き、全て倒壊・水没
- ✓ 引き波 (バックアタック) による背面基礎部の洗掘・欠損が原因か

Steel Structure Laboratory Page 37

2-3 女川湾周辺 (女川湾口防波堤)




写真-57 残ったケーソン
写真-56 景色から消えた湾口防波堤

- ✓ 最も陸側のケーソン1個を除き、全て倒壊・水没
- ✓ 引き波 (バックアタック) による背面基礎部の洗掘・欠損が原因か

前面だけでなく消波ブロック等による背面の強化

Steel Structure Laboratory Page 38

3. 津波による建造物の転倒に対する考え方の一例

Steel Structure Laboratory Page 39

3-1 4階建RC造の転倒 (女川町 江島共済会館)

1. 目的
津波による転倒モーメントMと転倒に対する建物の抵抗モーメントM₀を概略計算し、それらの比M₀/Mを求める。

M ₀ /M > 1.0	: 安全
M ₀ /M < 1.0	: 危険

いわゆる、津波による転倒に対する安全率のような指標もちろん、幾つかの仮定を導入する。

2. 考慮すべき力とモーメント

- ① 津波による流体抗力 (P) . . . (転倒モーメント)
- ② 浮力 (B) . . . (転倒モーメント)
- ③ 自重 (W) . . . (抵抗モーメント)
- ④ 杭の引き抜き力 (F) . . . (抵抗モーメント)

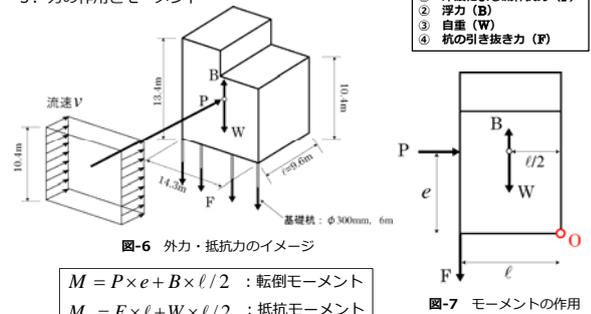


写真-58 江島共済会館

Steel Structure Laboratory Page 40

3-1 4階建RC造の転倒 (女川町 江島共済会館)

3. 力の作用とモーメント



① 津波による流体抗力 (P)
② 浮力 (B)
③ 自重 (W)
④ 杭の引き抜き力 (F)

図-6 外力・抵抗力のイメージ

$$M = P \times e + B \times \ell / 2 \quad \text{: 転倒モーメント}$$

$$M_0 = F \times \ell + W \times \ell / 2 \quad \text{: 抵抗モーメント}$$

図-7 モーメントの作用

Steel Structure Laboratory Page 41

3-1 4階建RC造の転倒 (女川町 江島共済会館)

4. それぞれの力の計算 (仮定1) 津波は建物側面に垂直に作用する (仮定2) 建物を越流する場合はC_D=1.05~1.20

① 流体抗力 (P)

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_D$$

ρ: 海水の密度 1.04 [tf/m³]
v: 津波の速度 11 [m/sec] (40[km/h])
A: 投影面積 148.7 [m²]
C_D: 抗力係数 2.0 (7ス^ク外比B/D=0.55)

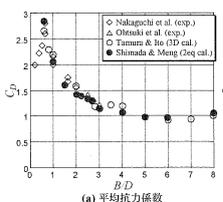


図-7 抗力係数

$$P = \frac{1}{2} \times 1.04 \times 11^2 \times 148.7 \times 2.0 = 18712 \text{tf}$$

Steel Structure Laboratory Page 42

3-1 4階建RC造の転倒 (女川町 江島共済会館)

4. それぞれの力の計算

②③ 重量 (W) および浮力 (B)

(仮定3) RC建物の重量/m² (固定荷重+積載荷重)

1F : 2.0 [tf/m²] ※基礎部分含む

2F以上 : 1.4 [tf/m²] ※ただし4Fは床面積半分

PCパイプ重量 : 0.708 [tf/本] (6m)

RCの単位体積重量 $\gamma_c=2.5$ [tf/m³]

床面積 A=112.97 [m²/階]



$W = 2.0 \times 112.97 + 1.4 \times 112.97 \times 2 + 1.4 \times 112.97 / 2 + 0.708 \times 20 = 635.46 \text{tf}$

体積 $V=W/\gamma_c=254.2$ [m³]
 $B = 1.04 \times 254.2 = 264.3 \text{tf}$

(仮定4) 室内は全て水没し、**空気は残らない**とする
(垂れ壁より上の空間を浮力に考慮した計算例もある)

Steel Structure Laboratory Page 43

3-1 4階建RC造の転倒 (女川町 江島共済会館)

4. それぞれの力の計算

④ 杭の引き抜き力 (F)

杭1本あたりの引き抜き力=杭の側面支持力と考える

Meyerhofの式

$R_f = 40 \times N \times A_p$: 先端支持力

$R_f = \bar{N} \times A_p / 5$: 側面支持力

(仮定5) 平均N値は $\bar{N}=10 \sim 20$ とする

$R_f = \frac{\bar{N} \times A_p}{5} = \frac{10 \times \pi \times 0.3 \times 6}{5} = 11.3 \text{tf}$

杭長 = 6m
杭外径 = 0.3m

杭10本なので

$F = 10 \times R_f = 113 \text{tf}$

Steel Structure Laboratory Page 44

3-1 4階建RC造の転倒 (女川町 江島共済会館)

5. モーメントの計算

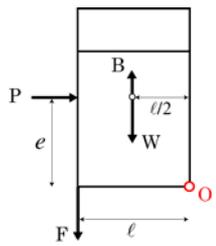
$M = P \times e + B \times \ell / 2$: 転倒モーメント

$M_0 = F \times \ell + W \times \ell / 2$: 抵抗モーメント

$M = P \times e + B \times \ell / 2 = 18712 \times 4.94 + 264.3 \times 7.9 / 2 = 93481$ [tf·m]

$M_0 = F \times \ell + W \times \ell / 2 = 113.00 \times 7.90 + 635.46 \times 7.9 / 2 = 3403$ [tf·m]

$\frac{M_0}{M} = \frac{3403}{93481} \approx 0.036 \ll 1.0$



Steel Structure Laboratory Page 45

3-1 4階建RC造の転倒 (女川町 江島共済会館)

6. 考察

$M = P \times e + B \times \ell / 2 = 18712 \times 4.94 + 264.3 \times 7.9 / 2 = 93481$ [tf·m]

$M_0 = F \times \ell + W \times \ell / 2 = 113.00 \times 7.90 + 635.46 \times 7.9 / 2 = 3403$ [tf·m]

$\frac{M_0}{M} = \frac{3403}{93481} \approx 0.036 \ll 1.0$

✓ 浮力により、自重が半分近くまで相殺される可能性がある
 ✓ 津波から受ける抗力の影響が極めて大きく、その他の力によるモーメントよりも1~2桁オーダーが違う

津波による抗力、特に津波の速度および抗力係数を減らねばならない
また、基礎の洗掘を防ぐとともに基礎と地盤の定着を強固にする必要がある

Steel Structure Laboratory Page 46

3-2 PC桁橋の転倒・流失 (田老地区)



写真-59 田老港河口橋梁 (名称不明)



写真-60 落橋防止鋼材

✓ 津波により落橋 → 上部工のPC T桁橋 (5主桁) は水没 (写真-59)
 ✓ 端横桁に差し込まれていた落橋防止鋼材 (2本×4) が上流側に曲がっている

橋げたが津波を受けて回転、転倒したことは明らか
(桁が上流側に裏返しの状態で水没していることを確認)

Steel Structure Laboratory Page 47

3-2 PC桁橋の転倒・流失 (田老地区)

1. 目的

津波による転倒モーメントMと転倒に対する橋梁の抵抗モーメントM₀を概略計算し、それらの比M₀/Mを求める。

$M_0/M > 1.0$: 安全
 $M_0/M < 1.0$: 危険

2. 考慮すべき力とモーメント

① 津波による流体抗力 (P) : (転倒モーメント)
 ② 浮力 (B) : (転倒モーメント)
 ③ 自重 (W) : (抵抗モーメント)



写真-60 落橋防止鋼材

落橋防止鋼材による桁の鉛直方向への拘束力は無い。
つまり、自重のみで抵抗すると考える。
また、桁が浮き上がって転倒しているので鋼材のせん断耐力も考慮しない。

Steel Structure Laboratory Page 48

3-2 PC桁橋の転倒・流失（田老地区）

3. 力の作用とモーメント

(仮定) 現物が水没しているため、寸法は概算値または予想値を想定

① 津波による流体抗力 (P)
② 浮力 (B)
③ 自重 (W)

図-8 外力・抵抗力のイメージ

$$M = P \times e + B \times \ell / 2 \quad \text{: 転倒モーメント}$$

$$M_0 = W \times \ell / 2 \quad \text{: 抵抗モーメント}$$

Steel Structure Laboratory Page 49

3-2 PC桁橋の転倒・流失（田老地区）

4. それぞれの力の計算・・・省略

3-1とほぼ同じ考え方・条件にて計算 ※ 桁下空間内の浮力を考慮
※ 抗力係数 $C_D=1.6\sim 1.8$ を採用

5. モーメントの計算

$$M = P \times e + B \times \ell / 2 \quad M_0 = W \times \ell / 2$$

$$= 6066 \times 1.06 + 183.48 \times 10.3 / 2 \quad = 428.59 \times 10.3 / 2$$

$$= 7375 \quad [\text{tf} \cdot \text{m}] \quad = 2207 \quad [\text{tf} \cdot \text{m}]$$

$$\frac{M_0}{M} = \frac{2207}{7375} \approx 0.30 \ll 1.0$$

6. 考察

- ✓ 自重に対する浮力の影響は大きい (B/W=0.43)
- ✓ 抗力係数だけでなく、重心位置を低く抑えることが必要
- ✓ アンカーボルトなどで橋台に強固に定着させる必要性

Steel Structure Laboratory Page 50

おわりに

1. 石巻市・女川町における被害の特徴

- ・津波による洗掘現象が顕著であり、構造物の安定性に大きく影響している
- ・岸壁付近での地盤沈下が著しく、水が抜けない状況が続いている
- ・地形によって集中・増幅される津波がもたらす脅威 (RC・鉄骨構造物の転倒・倒壊、湾口防波堤の倒壊など)

津波を受けるも倒壊を免れた構造物を調査し、今後に活かす必要性

- ・津波と火災の連動
- ・病院や学校、役場などの防災拠点の被災が目立つ

2. 津波による構造物の転倒に対する考察

- ・津波による抗力が発生させる転倒モーメントは極めて大きい
- ・自重に対する浮力の影響は大きく、自重の4~5割に上る可能性がある
- ・地盤や下部工に強固に定着させるとともに、如何にして抗力によるモーメントを減らせるか

Steel Structure Laboratory Page 51

ご静聴ありがとうございました。

Steel Structure Laboratory Page 52