

(2)端部での波圧

図4.4-22は、Type5の堤防模型の側面で測定した各点の波圧最大値を最大水深とともに示している。図中の実線は、最大水深に対応する底面での静水圧を示している。堤防の表のりとは異なり、側面の波圧は、最大でも最大水深に対応する静水圧をわずかに上回る程度である。

図4.4-23は、Type5の模型に潮位3.8m、波高0.4mを与えたケースでの、各点の波圧の最大値を示している。Type3(図中:表のり)と比べると、表のり端部の波圧は底面から0.3mの範囲で半分以下となっており、側面端部やその陸側に位置する天端側面の波圧はさらに小さくなっている。このケースより潮位を上げたケースでも、側面の波圧は表のりより小さかった。以上のことから、表のり端部の波圧はその周辺と比べて著しく大きくなることはなく、側面の波圧は表のりよりかなり小さくなると思われる。

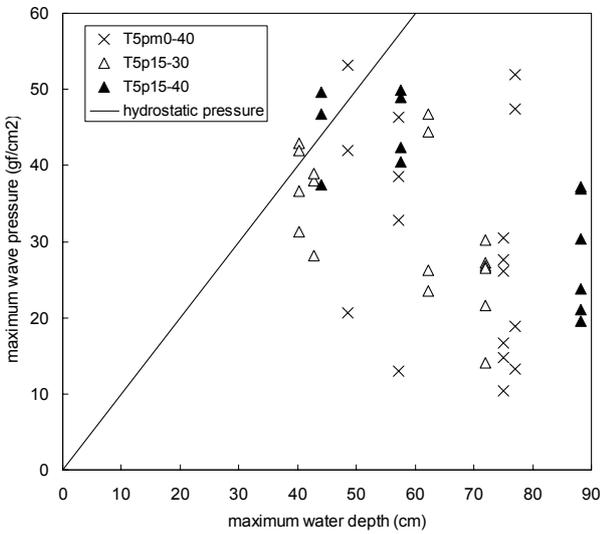


図4.4-22 側面での最大水深と最大波圧

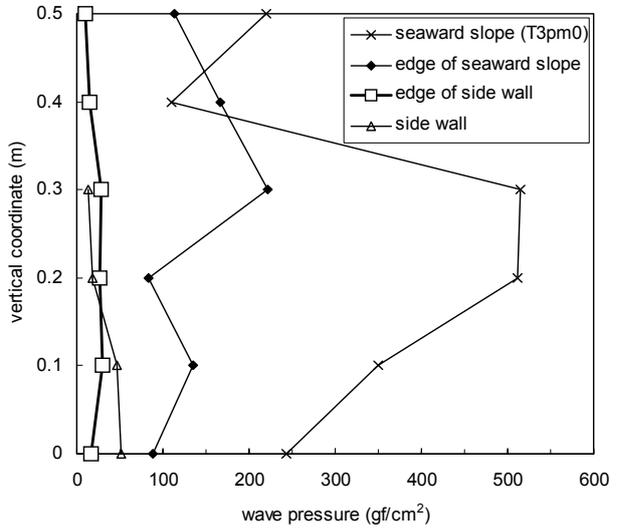


図4.4-23 端部の波圧最大値

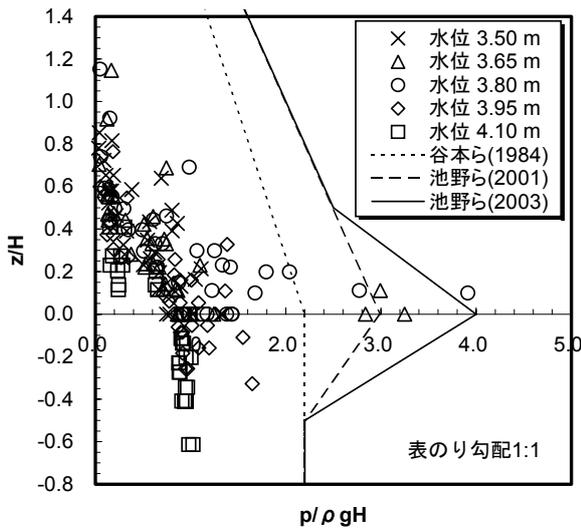


図4.4-24 波圧の鉛直分布(表のり勾配1:1)

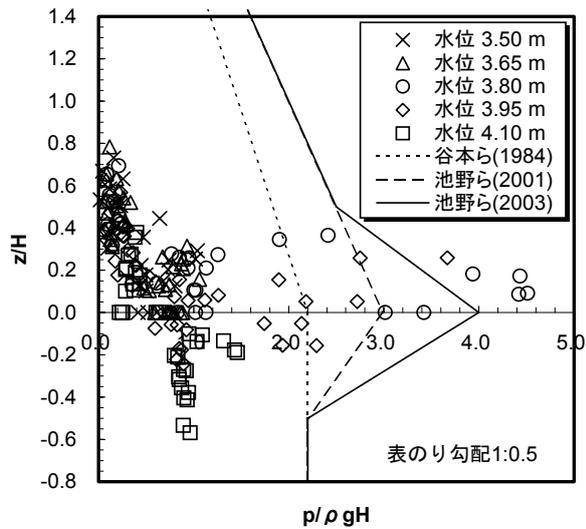


図4.4-25 波圧の鉛直分布
(表のり勾配1:0.5)

⑤ 考察

(1) 表のりの波圧

図4.4-24～25は、表のりの波圧の鉛直分布を示している。横軸は堤脚での波高Hなどを用いて無次元化した最大波圧、縦軸は静水面を基準として無次元化した鉛直座標である。図中には、押波初動の正弦波が垂直の防波堤に衝突する模型実験による谷本ら⁷⁾の算定式、ゲート急開に伴う段波が海域の垂直壁に衝突する模型実験による池野ら⁸⁾の算定式、ゲート急開に伴う段波が陸上の垂直壁に衝突する模型実験による池野ら⁹⁾の算定式による波圧の鉛直分布も合わせて示している。表のり勾配1:1では、多くのケースで谷本ら⁷⁾に従って得られる波圧より小さく、池野ら⁹⁾の算定式を使えばほとんど全てのケースで過小評価とならない。一方、表のり勾配1:0.5では、堤脚が汀線となるケースを中心に、静水面より少し上方での波圧が池野ら⁹⁾の算定式でも過小評価となることがある。

(2) 裏のり・背後の波圧

図4.4-26は、裏のり尻付近の最大波圧を水谷・今村¹⁰⁾の式で得られる線とともに示している。水谷・今村¹⁰⁾は、水平床上に設置した堤防模型を段波が越流する模型実験を行い、越流による堤防背後の最大波圧の算定式を提案している。実験データはこの算定式で得られる値を上回るものでないことから、孤立波の場合でも前述の式を適用できると判断される。

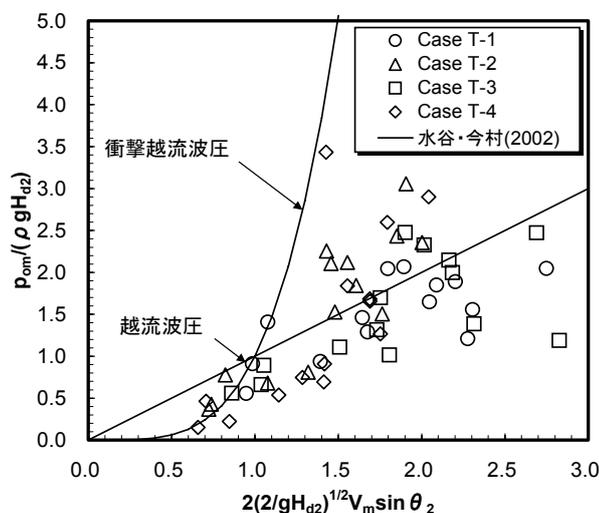


図4.4-26 最大越流波圧

⑥ 結論

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- ・斜面を遡上してきた孤立波が汀線付近の傾斜堤に衝突する際に、表のりで瞬間的に大きな波圧が局所的に生じるケースがあった。そのような衝撃的な波圧の発生には、堤防付近での砕波が影響している。

・表のりの波圧最大値は、下部で比較的大きいが、表のりの勾配が1:0.5の場合、表のりの上部に津波が激しく衝突して著しく大きくなることがあった。また、汀線が堤脚にある場合、池野ら(2003)の算定式で得られる値を上回ることがある。

・裏のりの勾配が1:1.5の場合、裏のり尻で瞬間的に波圧が大きくなるケースがあった。また、裏のりの波圧最大値は、裏のり勾配により最大点の位置が変わるものの、水谷・今村(2002)の算定式で評価できることが確認された。

・表のりの端部において波圧が著しく高くなることはなかった。また、堤防側面の波圧最大値は、水深の最大値に対応する底面での静水圧をわずかに上回る程度である。

今回の実験では堤防の直交方向から孤立波を入射している。堤防に対して津波が斜めに入射する場合、端部では今回の実験より大きい波圧が生じる可能性があり、今後の検討が必要である。

3) 橋桁に加わる津波波力¹¹⁾

①概要

津波が衝突するおそれのある構造物としては、海岸堤防以外にも、河口付近の河川橋などが挙げられる。実際、2004年スマトラ島沖地震・津波の際にも、橋桁が流出した事例がいくつか報告されている¹²⁾。一方、わが国では津波により近代的な橋梁が被災した事例がなく、津波衝突時に橋桁にどのような力が作用するのかが検討されていないため、津波来襲時の橋梁の安全性評価はほとんどなされていないのが現状である。ここでは、水路を用いた模型実験を実施し、波力等の計測結果を整理、分析することにより、橋梁の津波安全性あるいは被災度の評価に用いる波力について考察する。

②模型実験

図4.4-27のように、長さ140[m]、幅2[m]、深さ5[m]の水路に固定床の斜面(海域:1/20勾配、陸域1/100勾配)を造成し、縮尺1/18の橋桁模型(鋼製、幅員50[cm]、高さ15[cm])を設置した。波力を計測する対象となる部分の長さ(橋軸方向)は50[cm]であり、これを水路の中央に設置し、両端に同じ断面で幅75[cm]の橋桁模型を設置することにより、2次元性が確保されている。

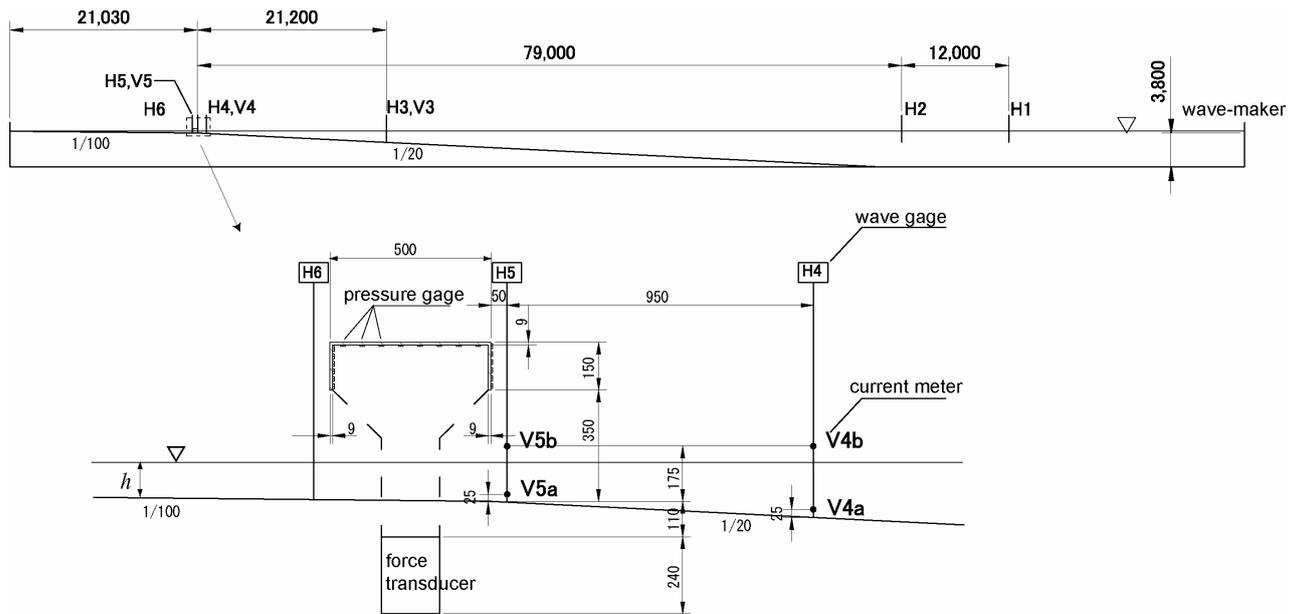


図4.4-27 水路に設置した橋桁模型 (unit: mm).

造波する孤立波の初期波高 H_0 と静水深 h を表 4.4-3 に示す 15 の組み合わせに設定し、それぞれの組み合わせで3回ずつ実験を行った。図 4.4-27 のとおり、分力計で水平波力と鉛直波力を計測したほか、橋桁に波圧計を 20、橋桁の周辺を中心に容量式波高計と流速計を設置した。サンプリング周期は $0.002[s]$ とし、衝撃的な波力も測定できるようにした¹³⁾。橋桁は薄い鋼板で支えられているが、橋桁のみを除去した実験を行い、鋼板に作用する波力は小さく無視できることを確認している。

表 4.4-3 実験で設定した初期波高 H_0 と静水深 h

H_0 [cm]	h [cm]
20	15, 30
30	7.5, 10, 12.5, 15, 30
40	7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 30

③計測された波力

図 4.4-28 は $H_0=40[cm]$, $h=17.5[cm]$ の場合に水平波力が最大となった瞬間の状況を示している。これは全ケース中で最大水平・鉛直波力がともに最も大きかったケースであり、孤立波は橋桁模型に衝突する前後に砕波している。図 4.4-29 はケースごとの最大波力(3回の平均値)を比較したものであるが、同じ H_0 であれば h が小さいほど下流側、大きいほど上流側で砕波するため、最大波力はこのケースよりも小さくなっており、最大波力は波がどこで砕波するかに大きく影響されることが分かる。

同じ $H_0=40[cm]$, $h=17.5[cm]$ の場合に分力計で計測した水平・鉛直波力の時刻歴を図 4.4-30 に示す。水平波力は上流側、鉛直波力は上方が正である。

水平波力には大きいピークがいくつかみられるが、波圧の時刻歴との比較により、最初と3番目のピークがそれぞれ、波が橋桁模型の下流側および上流側鉛直面に衝突した時刻にほぼ一致することが分かった。これら以外の2番目および4番目以降のピークは、模型と分力計で構成される系の振動によるものと考えられる。このため、最初と3番目のピーク、すなわち図 4.4-29 に示した最大波力にも、この系の振動による影響が含まれているものと推察される。

津波衝突後1秒足らずでこの系の振動は減衰して小さくなり、ほぼ定常であるが漸減する力が作用するようになる。このとき、橋桁模型の下流側鉛直面では中央が最も大きく、上端あるいは下端ほど小さい波圧分布となっていることから、この力は抗力であることが確認できる。抗力が漸減するのは、波高および流速が徐々に低下していくためである。

鉛直波力には大きなピークが1つあり、水平波力とほぼ同時に最大値となっている。鉛直波力の最大値は水平波力よりも大きく、継続時間が短い揚力が作用し、その後水平波力と同様に漸減している。



図 4.4-28 橋桁に衝突する孤立波($H_0=40$ [cm], $h=17.5$ [cm]).

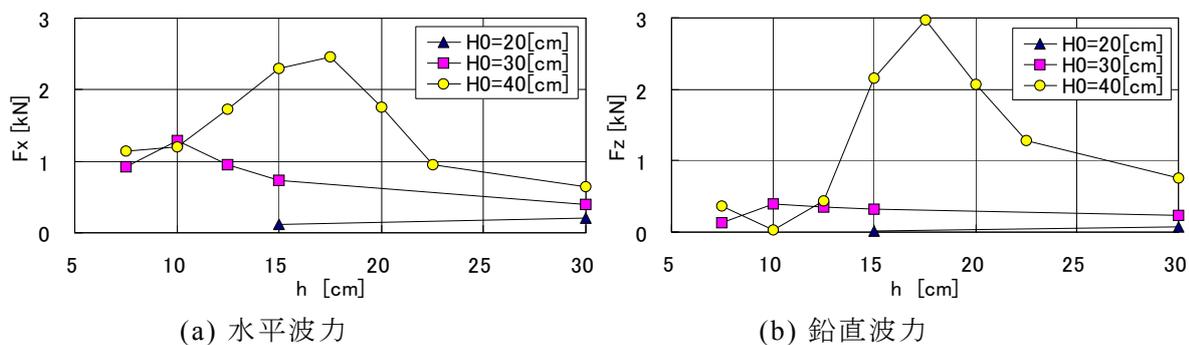


図 4.4-29 最大波力と初期波高・静水深の関係(幅 50cm の橋桁模型)

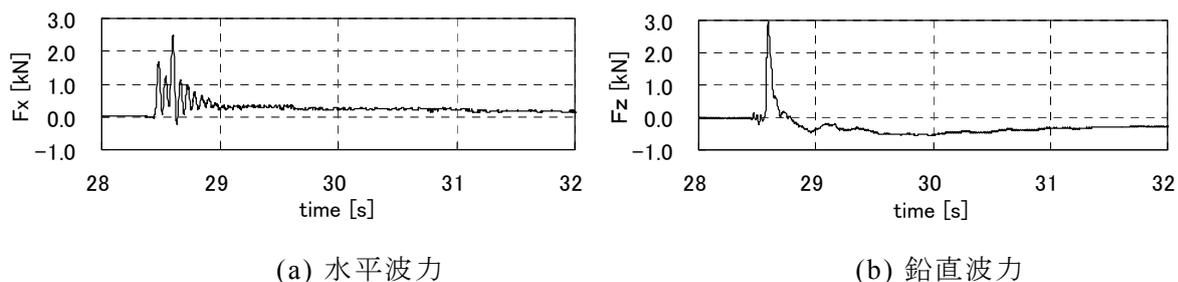


図 4.4-30 橋桁に作用した波力の時刻歴 ($H_0=40$ [cm], $h=17.5$ [cm]).

③衝撃波力

実験で得られた水平波力の最大値は、図 4.4-29 に示したとおり、 $H_0=40[\text{cm}]$ 、 $h=17.5[\text{cm}]$ の場合に $2.5[\text{kN}]$ である。これを実際の橋梁(模型の 18 倍)に作用する圧力に換算すると、フルードの相似則により圧力が 18 倍となること、橋桁模型の受圧部分の橋軸方向長さが $0.5[\text{m}]$ であることから、実物大に換算した圧力は以下のようになる。

$$2.5/(0.5 \times 0.15) \times 18 = 600 [\text{kN/m}^2]$$

したがって単位橋軸方向長さに作用する波力は

$$600 \times (0.15 \times 18) = 1.6 \times 10^3 [\text{kN/m}]$$

となる。

一方、道路橋の橋桁の死荷重は幅員 $12[\text{m}]$ 、支間 $40[\text{m}]$ の鋼 I 桁で単位橋軸方向長さあたり $1.5 \times 10^2[\text{kN/m}]$ 程度¹⁴⁾であり、継続時間は短いが生荷重の 10 倍以上の水平力が作用することになる。ただし、このときの波高は橋桁模型付近では $60[\text{cm}]$ 以上になっているため、この値は、 $10[\text{m}]$ 以上の津波が来襲し、さらに橋梁付近で砕波した場合の波力に相当するものと考えられるから、津波衝突時に常にこのような極めて大きい波力が作用するわけではない。

揚圧力も含め、このような衝撃波力が作用した場合には、支承、落橋防止構造が大きな損傷を受ける可能性がある。しかし、橋梁付近で砕波するか否かは津波波高と静水深に依存する問題であること、また特に鉛直方向の衝撃波力に対する支承の耐力が不明であることから、津波衝突時の支承の損傷程度を荷重と耐力の比較に基づいて行うことは困難である。したがって現時点では、津波に対する橋梁の被災度評価に際し、越流すれば支承、落橋防止構造が損傷する可能性があると思なすなど、荷重と耐力の評価を省略した簡便な評価を行うことも考慮する必要がある。

④水平抗力

衝撃波力により支承や落橋防止構造が損傷したとしても、橋桁が流出しなければ、限定的でも早期に橋梁の機能を回復できる場合がある。したがって道路橋の被災度を交通機能障害の程度で評価する場合には、構造的な損傷だけでなく、橋桁が流出するかどうかにも評価する必要がある。

実際には衝撃波力により移動し始めた橋桁が水平抗力により流出に至るといった過程を経ることも考えられるが、ここでは衝撃波力よりも水平抗力の方が橋桁の流出には影響が大きいと考え、水平抗力の評価について検討した。

模型の振動が十分小さくなった時点から 3 秒後(それ以前に波力がゼロになる場合は打ち切り)まで、0.5 秒間隔で水平波力の平均値を計算した値を縦軸に、港湾基準式で計算した水平波力を横軸にして描いたものが図 4.4-31 である。この図によれば、港湾基準式で計算した水平波力は、実験で計測した水平抗力の上限を抑えており、港湾基準式により水平抗力の安全側の評価ができることを示している。なお、図 4.4-31 には $H_0=40[\text{cm}]$ の場合のみを示したが、初期波高が異なるケースについても同様であった。

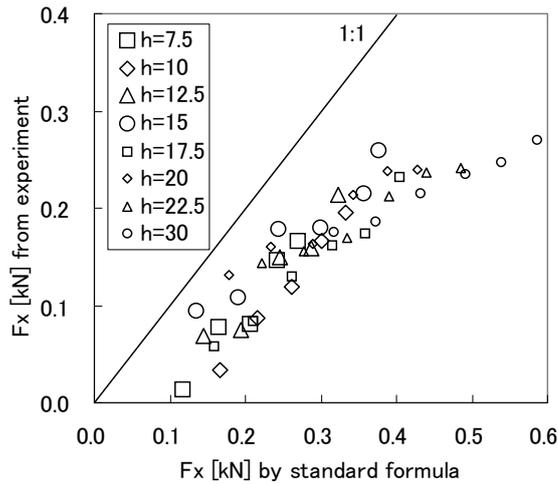


図 4.4-31 実験で得られた抗力($H_0=40$ [cm], 幅 50[cm])と港湾基準式から算定される波力との比較

⑤ 結論

本研究では、水路を用いた模型実験を行い、その結果に基づいて、橋梁の津波安全性評価に用いる波力について考察した。得られた結論を列挙すると以下の通りである。

1. 津波が橋梁付近で砕波すると、極めて大きな衝撃波力が水平・鉛直方向に作用する。
2. 衝撃波力と支承・落橋防止構造の耐力とを比較してこれらの損傷程度を評価することは困難であり、より簡便な評価を行うことも考慮する必要がある。
3. 力積で比較すると衝撃波力よりも水平抗力の方が大きく、橋桁の流出可能性の評価には水平抗力を用いる必要がある。
4. 橋桁に作用する水平抗力は港湾基準式で上限が抑えられるため、港湾基準式により安全側の評価ができる。

4) コンテナの漂流シミュレーション

津波が来襲した際の漂流物としてコンテナを対象にエプロン上の漂流シミュレーションを実施した。

1) 計算条件

計算モデルとして単純な2次元水路を仮定した。計算条件を以下に示す。

① 津波計算

- ・ 波高4m, 周期5分
- ・ 海底地形(図4.4.1-26), 奥行き100m
- ・ 水路延長報告格子間隔(X方向): 10m, 横断方向(Y方向): 10m

② コンテナモデル

コンテナは20ftを対象とし，図4.4-33のように直径1mの要素モデルを6×3×3の54個を用いて構成した．コンテナは図4.4-32の1550mの位置（護岸から50m）に蔵置した．コンテナ重量は，空（2.2t），半載（11t），満載（22t）の3種類を設定した．

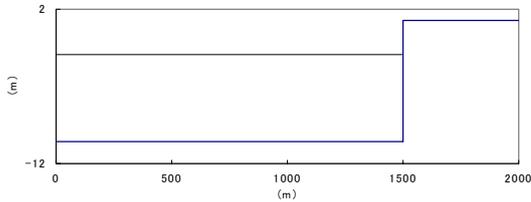


図 4.4-32 海底地形



図 4.4-33 コンテナモデル

2) 計算結果

3種類の重量による違いにより移動量が異なることがわかる．空コンテナの移動量が大きく，満載時はほとんど移動していない．コンテナへの作用力の時刻歴は，移動量と対応した結果が出ている．

衝突力の計算に当たっては，粒子の位置を海から50m離れた護岸上と20m離れた場合を想定した．衝突力は粒子から10m背後に固定壁を設置した．ただし，津波計算時には固定壁を設置せず，水流を乱さず衝突力を計測した場合を想定した．図 4.4-35 及び図 4.4-36 に衝突力の時刻歴波形を示す．満載は移動しないため，衝突力を生じないが，他の2ケースは瞬間的に大きな値を示した．力は受圧壁の値を示しているため，負の値をとる．

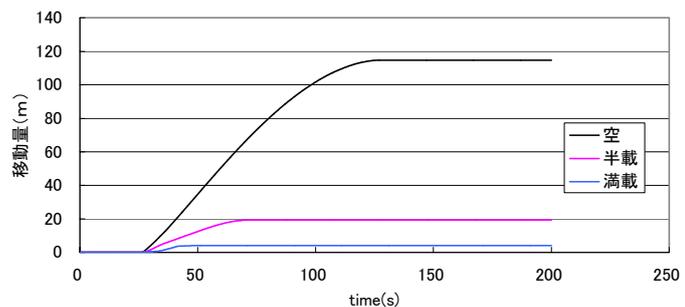


図 4.4-34 コンテナの移動量

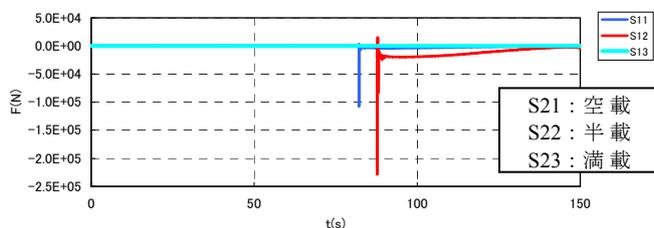


図 4.4-35 衝突力の時間変化
(粒子初期位置護岸から50m)

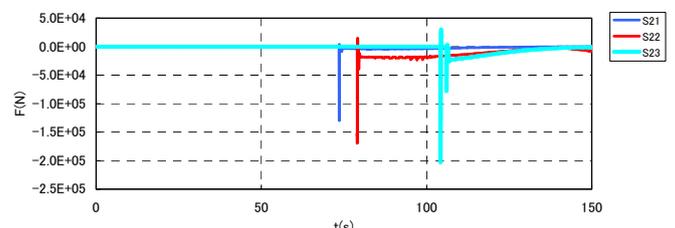


図 4.4-36 衝突力の時間変化
(粒子初期位置護岸から20m)

以上のように、平面2次元の漂流・衝突シミュレーションを実施した。その結果、漂流挙動や衝突力を表現できることが確認できた。また衝突力の値は既往実験と同オーダーであり、漂流と衝突現象を同時に表現できることを示した。

4.4.2 対象物の被災度評価

1) 海岸堤防およびその背後地¹⁷⁾

①概要

中央防災会議や自治体による津波被害の想定では、現況の海岸堤防の存在を仮定していることが多い。海岸堤防はコンクリート造またはコンクリート等で被覆されていることが多いが、地震動や津波により破壊され、背後地の被害が増大する可能性がある。背後地被害の低減にどのような堤防改良(嵩上げ,耐震化,耐波性能の強化など)が有効か判断するためには、地震動による堤防沈下や洗掘等による破堤など堤防被災を考慮した被害想定手法を確立する必要がある。また、インド洋大津波の被災地で見られたように、河口砂州や砂浜は津波により変形することがある。河口砂州の変形は津波の河川遡上に、砂浜の変形は海岸堤防の安定性に影響することから、津波の被害想定においては津波による地形変化を考慮する必要がある。以上を踏まえ、津波および地震動による海岸堤防および地形の変状を考慮した背後地の人的・物的被害の定量的評価手法を提案した。

②津波シミュレーション

図4.4-37に示す高知県の仁淀川河口周辺を対象に、波源として中央防災会議の東南海・南海地震同時発生モデルを採用して津波被害想定のカースタディを行った。表4.4-4のように地震動による堤防沈下、津波掃流力による地形変化、法先洗掘による海岸堤防の破堤を考慮して、非線形長波方程式を用いて津波の伝播・遡上を計算した。ネスティングにより計算格子間隔を2700mから11mまで細かくし、潮位は朔望平均満潮位(T.P.+0.945m)とした。なお、水門は・樋門は全て閉まっているものとした。

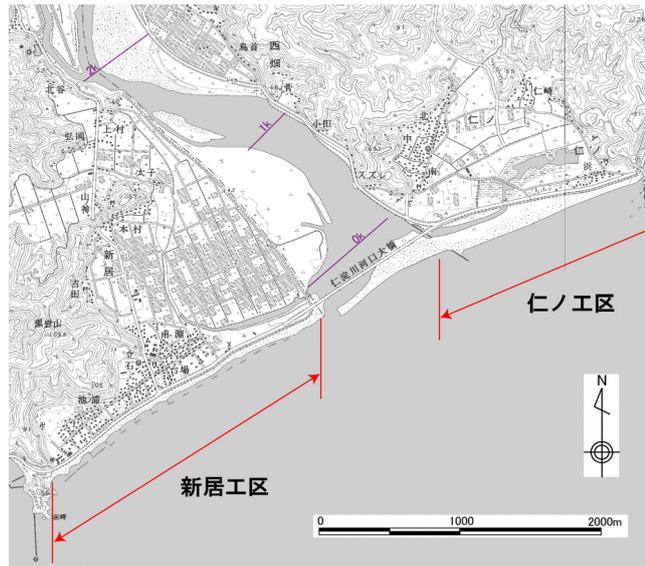


図 4.4-37 ケーススタディの対象地域

表 4.4-4 ケース設定

ケース	堤防沈下	地形変化	破堤
A1	なし	なし	なし
A2	あり	なし	なし
B3	あり	あり	なし
B4	あり	あり	あり

堤防沈下量は、地殻変動量(対象海岸では2m程度の沈降)とは別に、東南海・南海地震が同時発生した場合の地震外力(M8.6)をレベル2の地震動と位置づけた堤体土の動的FEM解析の結果を用いた。動的FEM解析では、被覆コンクリートの効果を、表のりの土被りが小さい仁ノ工区(河口東, 天端高T.P.+9.81m)では無視し、表のりの土被りが大きい新居工区(河口西, 天端高T.P.+10.13m)では考慮した。その結果、堤防沈下量は仁ノ工区で3.44m, 新居工区で0.09mとなり、沈下後の天端高はそれぞれT.P.+4.39m, T.P.+8.02mに設定した。

掃流力による地形変化の計算は、高橋ら¹⁸⁾に従って、流砂量式としてマニング則による海底摩擦力をBrown式に与え、砂の連続式として渡辺ら¹⁹⁾の式を用いた。堤防は被覆されているので、侵食が生じないようにそのメッシュでは砂層厚を0とした。砂の中央粒径は2mm, 空隙率は0.4とした。図4.4-38のように、破堤に関わる堤防近傍の地形変化は掃流力とともに越流時の水塊の鉛直落下により生じると考え、野口ら²⁰⁾の実験式により堤防での越流量から法先部の洗掘深を算定した。破堤は、堤防背後地盤が堤体内の残留水位(T.P.+0.54m)まで洗掘された時点で堤防高が背後地盤まで下がると仮定した。

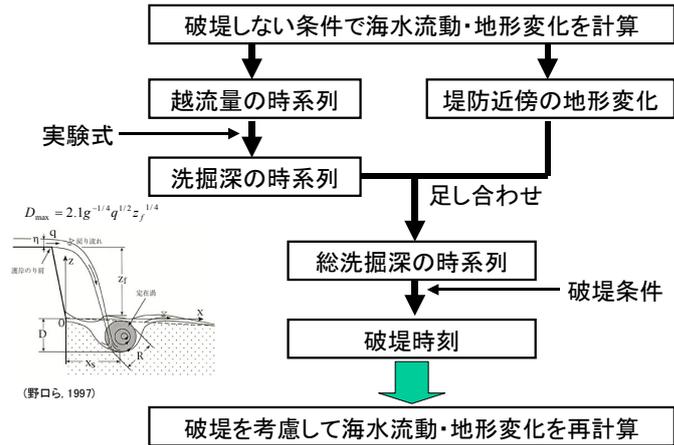


図4.4-38 破堤を考慮した津波・地形変化計算

図4.4-39は、ケースB3およびB4における仁ノ工区堤防前面の水位・流速の計算結果である。ケースB3では、水位は、地震発生から約30分後に最大値6.53m(地殻変動後)となり、その後も増減を繰り返している。しかし、水位最大時付近の押し波でしか越流しないため、その時だけ岸向きの流速が大きくなっている。このように、破堤を考慮しない場合、仁ノ工区では第一波しか越流せず、引き波による越流は生じない。一方、破堤を考慮したケースB4では、最高水位は5.39mに低下するが、第二波以降も押し波と引き波により流速が大きかった。なお、堤防沈下がわずかである新居工区では、越流が生じなかった。

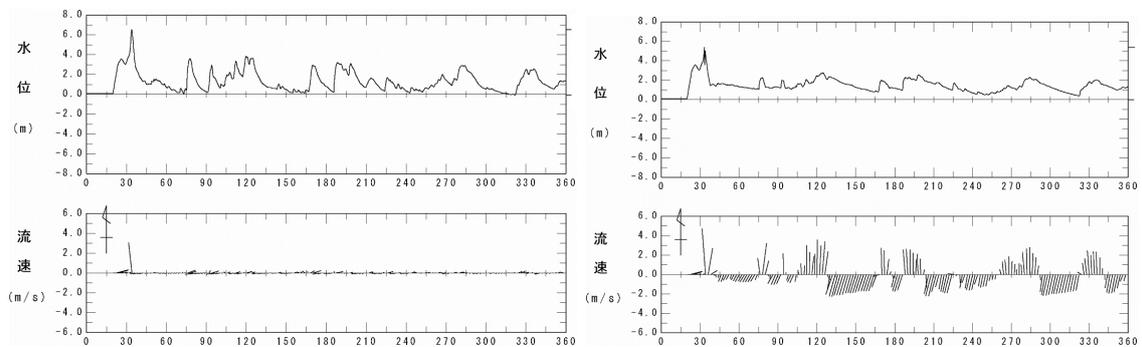


図 4.4-39 仁ノ工区堤防前面の水位・流速(左:ケース B3, 右:ケース B4)