

構造物沿いにステム波が形成される波浪場における 入射波の不規則性, 多方向性の影響

目見田 哲*・酒井 哲郎**

1. ま え が き

外海の大水深域での大規模な構造物のように, 隅角部を有する構造物に対して平行に近い角度で斜め入射波が作用する際の構造物前面の波浪場においては, 入射角が小さく, かつ構造物沿いの伝播距離が長いために構造物沿いの波高増加, 波高変動は顕著かつ複雑になるものと考えられる。

構造物への入射角が小さく, 構造物沿いに stem 波が形成される波浪場についての研究は多くみられる。Wiegel (1964) によると, 入射角が 20°以下の規則波が作用する直立壁前面の波浪場においては Mach-stem が形成されることが実験的に確認されている。また森屋ら (1995) は, 直立壁に斜め規則波が作用し stem 波が形成されている波浪場を対象とし, 実験値との比較検討によって, 構造物沿いの波高分布については, 非線形性を含み浅海域での回折現象を表せるブシネスク方程式が十分適用可能であるとしている。

しかし, 構造物への入射角が小さい波浪場での構造物沿いの波高分布および斜め入射波の反射特性における入射波の不規則性, 多方向性の影響についてはまだ検討さ

れていない。

当研究では, 隅角部を有し伝播距離が長い構造物 (入射波の波長の約 5 倍) に対してほぼ平行に近い角度で斜め入射波が作用する波浪場を対象とする。隅角部からの回折散乱波の影響による波高増加, 構造物沿いの stem 波の形成などの波浪場特性について検討し, そこでの入射波の不規則性, 多方向性の影響について評価する。

2. 実験装置および模型

地形と構造物の模型平面図を図-1 に示す。直立壁に平行に近い角度 (約 10°; 直角入射を 90°とする) で斜め入射波が作用し, 直立壁前面においては入射波, 直立壁からの反射波, および隅角部からの回折散乱波が共存する波浪場となる。平面水槽には 60 枚の造波板 (幅 30 cm/枚) から成る多方向不規則波造波装置が設置されている。入射波が地形モデルに到達するまでにエネルギーが拡散することを防止するため造波装置の両端から導波板を設置しているが, 直立壁からの反射波が導波板で再反射することの防止のために一部については透過性導波板とする。直立壁の天端高は当研究での波浪条件において越波現象が生じない高さとした。

3. 造波した実験波の特性

5 種類の単一方向不規則波 (ケース 1 U~5 U; 各々, 有義波高が 2.5 cm, 5.0 cm, 7.5 cm, 10.0 cm, 14.1 cm, 有義波周期はすべて 1.73 sec), 規則波 (ケース 1 R~5 R; 同一の波高, 周期), および有義波高, 有義波周期, 主波向の等しい多方向不規則波 (ケース 1 M~5 M) を用いる。周波数スペクトルは Bretschneider-光易型, 多方向不規則波の方向関数は光易型 ($S_{max}=25$), 主波向は造波装置と直角方向とした。多方向不規則波の造波信号はエネルギー等分割のダブルサンメーション法によって, 周波数 1,024 個, 波向き 91 個の成分波を合成して計算した。造

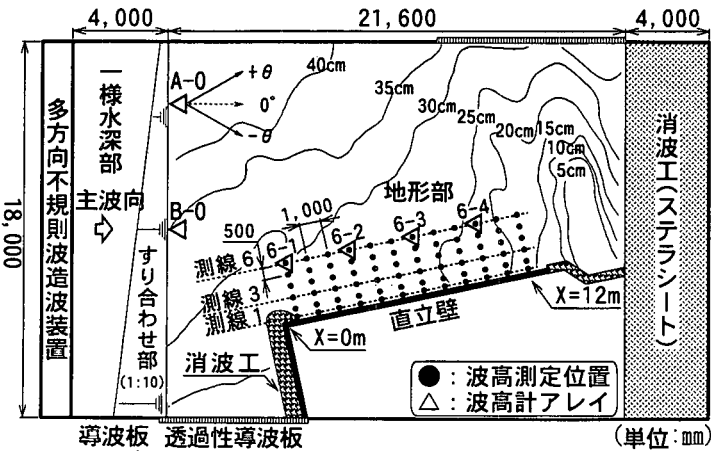


図-1 地形と構造物の模型平面図

* 正 会 員 工 修 関西電力(株) 総合技術研究所
** フェロー 工 博 京都大学教授 工学研究科 土木工学専攻

波した実験波を検定するために、地形開始部付近に造波装置の中心を含む2箇所(A-0, B-0; 図-1 参照)に4本の波高計で構成された波高計アレイを設置し、波高、周波数スペクトル、方向スペクトルを算定した。多方向不規則波(ケース2M, 5M)についての方向スペクトル(ベイズ法による解析)を図-2に示すが、目標とする方向スペクトルを有する実験波がほぼ造波できていないことが確認できる。なお、他の実験波についても目標の実験波が造波できていないことを確認した。

4. 構造物沿いの波高分布特性

著者ら(1998)はすでに当波浪場について規則波、単一方向不規則波での波高分布特性を比較検討した。ここでも後の議論のために簡単に紹介する。

規則波、単一方向不規則波の波浪場においては、回折散乱波の影響もあり、隅角部から離れるにつれて構造物沿いでの波高が連続的に増加する。単一方向不規則波について、各波浪条件(ケース1U~ケース5U)での直立壁沿い(測線1)の波高比分布を図-3に示す。なお、波高比は地形開始部(B-0: 図-1 参照)との比率で表す。ここでは、いずれの波浪条件においても隅角部から離れ

るにつれて波高が連続的に増加する傾向がみられ、ケース1U, 2Uでは隅角部から最も離れた付近($X=12\text{ m}$ 付近)で地形開始部での波高の約2.5倍にも増加する。入射波の波高の大きいケース3U, 4U, 5Uについては隅角部から離れるにつれて波高増加が顕著でなくなる傾向があるが、これは斜め入射波が砕波することの影響であり、砕波限界波高に達するまでは、各波浪条件ともに斜め入射波が同様に発達していく傾向が確認できる。なお、単一方向不規則波の波浪場での斜め入射波の発達における地形の影響(屈折、浅水変形)を把握するために、構造物がない波浪場での測線1に対応する位置での波高比分布(ケース4U, 5U)も図-3に示すが、ここでは砕波が発生せず、隅角部から離れるにつれての波高増加もみられない。よって、斜め入射波の発達における地形の影響はほとんどないものと考えられる。

次に、多方向不規則波($S_{\max}=25$)についての波高比分布(測線1)を図-4に示す。ここでは規則波、単一方向不規則波の波浪場とは大きく傾向が異なり、斜め入射波の砕波の有無にかかわらず、いずれの波浪条件においても隅角部から離れるにつれて波高が増加していく傾向がみられない。

5. 構造物沿いの波高分布特性における入射波の不規則性、多方向性の影響

ケース1, 2, 5について構造物沿い(測線1)での波高比分布(空間分布)を図-5に示す。

構造物沿いで砕波が発生しない波浪場(ケース1U, 1R, 2U, 2R)において、規則波と単一方向不規則波の波高分布を比較すると両者の波高比はほぼ等しく、入射波の不規則性の影響がほとんどあらわれない。単一方向不規則波を異なる周期の規則波の重ね合わせと考え、単一方向不規則波の波浪場においては波高の空間分布が平滑化されるために、規則波よりも波高分布が小さくなる

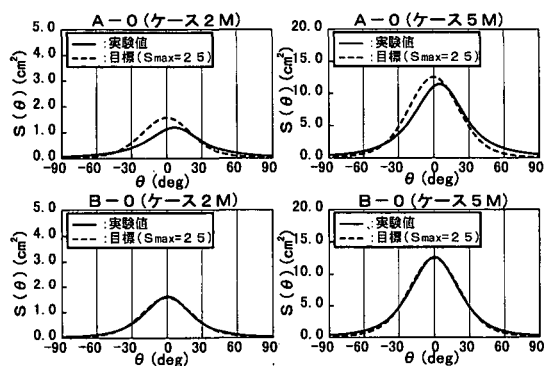


図-2 地形開始部の方向スペクトル (ケース2M, 5M)

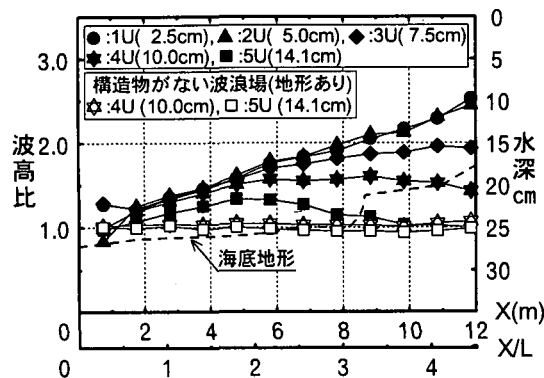


図-3 直立壁沿いの波高比の変化
(単一方向不規則波; 測線1)

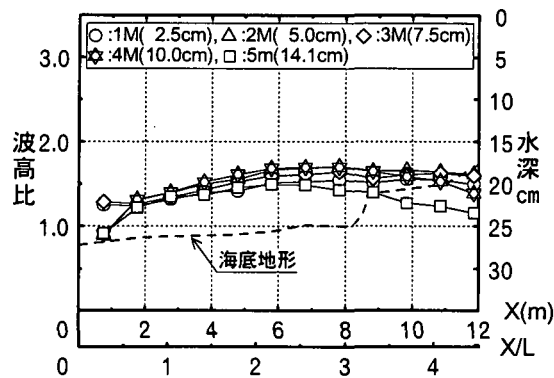


図-4 直立壁沿いの波高比の変化
(多方向不規則波; 測線1)

結果が予想できた。予想と相違したのは、造波水槽で再現可能であった $X=12\text{ m}$ 付近では伝播距離が短く、規則波、単一方向不規則波ともに波高がピーク値に達していないために両者での違いが小さかったものと考えられる。ただし、この現象において入射波の不規則性よりも方向分散性が支配的要因となっている可能性、つまり方向分散性のない規則波、単一方向不規則波では1波、1波の波峰が直線上に長く連なっているために両者が類似の波高分布特性を示した可能性も否定できない。

これに対して、入射波の方向分散性が大きい多方向不規則波の波浪場(ケース1 M, 2 M)においては、隅角部から離れるにつれて波高が連続的に増加していく傾向がみられない。これは、方向分散性を有する多方向不規則波では回折波成分の位相がずれるために空間分布が平滑化されたものと考えられる。その結果、 $X=12\text{ m}$ 付近において、単一方向不規則波での波高比が多方向不規則波での波高比の約1.5~1.6倍となる。

入射波高が大きく、構造物沿いで砕波が発生する波浪場においては、上記の傾向が大きく異なる。規則波、単一方向不規則波の波浪場(ケース5 R, 5 U)での砕波が発生する海域($X>6\text{ m}$ 付近)では砕波による波高低下とともに、砕波によって反射波が低減されるために入射波と反射波の合成による波高増加もほとんどみられない。これに対して、多方向不規則波の波浪場(ケース5 M)では、構造物沿いの方向成分波が砕波していても異なる方向成分波が砕波せずに存在するために、砕波が発生する海域においては規則波、単一方向不規則波の波浪場より

も波高が大きくなる傾向を示す。ちなみに、入射波と反射波が重合った規則波の砕波波高が単一波での砕波波高よりも大きいことと同様、多方向性が砕波波高を増大させることが影響している可能性も考えられる。

次に、ケース1, 2, 5について構造物前面1 mの海域(測線3)での波高比分布を図-6に示す。構造物沿いで斜め入射波が発達する波浪場(ケース1 U, 1 R, 2 U, 2 R)においては、測線1ほど顕著ではないものの、波高の連続的な増加が確認できる。また、ケース5 U, 5 Rでの隅角部から離れた海域($X=9\text{ m}$ 付近)のように、測線1で砕波が発生しているが測線3では砕波が発生していない波浪場については、測線3の波高(図-6)が測線1の波高(図-5)よりも大きくなる場合もみられる。なお、多方向不規則波の波浪場においては、測線3の海域でも斜め入射波の発達はみられないことが確認できる。

6. 構造物前面波浪場での stem 波, 反射波の形成

ここでは、構造物前面波浪場での stem 波(沿い波)の形成、反射波の形成について検討する。

Wiegel (1964) によると、入射角が 20° 以下で規則波が作用する直立壁前面の波浪場においては、Mach-stem および構造物からの反射波が形成されることが実験的に確認されている。

当研究においても入射波の方向分散性のない規則波および単一方向不規則波の波浪場においては、砕波波高に達するまでは、構造物に沿って stem 波が形成された状

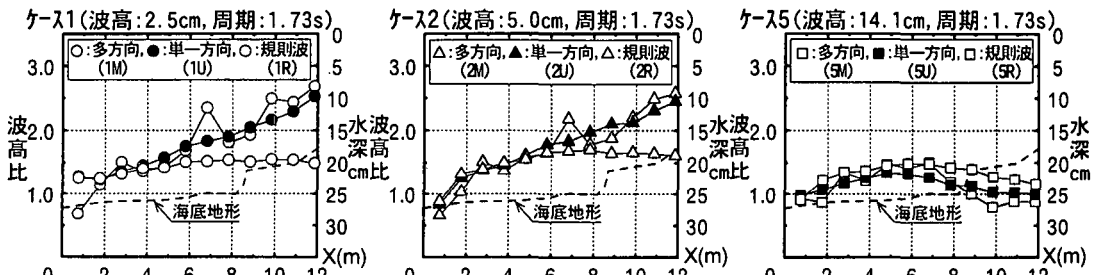


図-5 規則波, 単一方向不規則波, 多方向不規則波の直立壁沿いの波高比の比較 (測線1: ケース1, 2, 5)

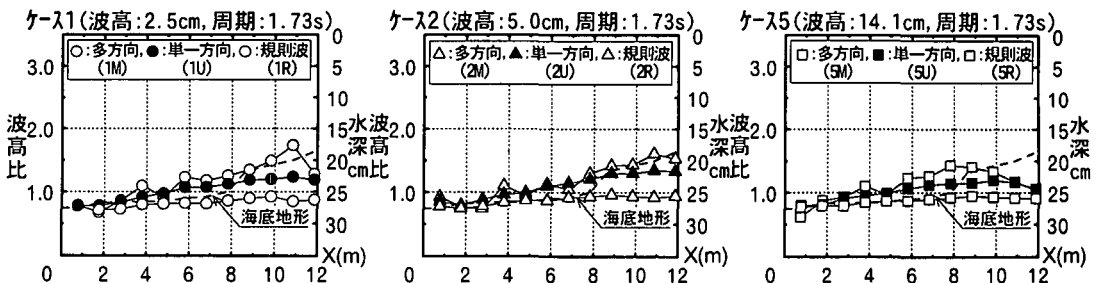


図-6 規則波, 単一方向不規則波, 多方向不規則波の直立壁沿いの波高比の比較 (測線3: ケース1, 2, 5)

態で波高が次第に増加していくことが実験水槽においても確認できる。構造物付近の波峰形状を観察すると、入射波、反射波、および構造物沿いの単一波が合わさりY字型をなしてみえるが、この単一波の部分がstem波であるといえる。規則波の波浪場(ケース2R)についての水位の時間変化($X=12\text{ m}$; 測線1~4)を図-7に示す。測線1, 2において急峻なピークをもつ波動が生じており、構造物沿いではstem波が形成されていることが確認できる。また、構造物より約半波長離れた海域である測線4付近においては波高が小さくなる傾向が確認できたが(著者ら, 1998), 測線4での水位変動が入射波と反射波の2つのピークをもつ双峰型となることから反射波が形成されていることが確認できる。

これに対して、多方向不規則波が作用する波浪場(ケース2M)においては、stem波の形成、構造物沿いの波高増加はともにみられない。

次に、構造物沿いで碎波が発生する波浪場での反射波の形成については入射波の多方向性が大きく影響する。ケース5M, 5U, 5Rでの波高比分布を図-8に示す。規則波(5R), 単一方向不規則波(5U)の波浪場での構造物沿いで碎波が発生する海域($X>6\text{ m}$ 付近)においては、構造物前面より約半波長離れた海域(測線4付近)で波高が低下する傾向はみられず、構造物前面で反射波が形成されていないものと考えられる。これに対し、多方向不規則波(5M)の波浪場においては、構造物沿いで碎波が発生していても構造物前面より約半波長離れた海域で波高が低下する傾向がみられる。これは、多方向不規則波の波浪場は構造物沿いの方向成分波が碎波していても異なる方向成分波が碎波せずに存在しており、それによる反射波が形成されているためと考えられる。ケース5Mの6-1, 6-4(図-1参照)の方向スペクトル形状を図-9に示すが6-4での方向スペクトル形状からも、屈折の影響を受けた入射波のピーク波向(-10° 付近)および反射波の伝播方向($+30^\circ$ 付近)の2方向を中心にエネルギーが分布していることが確認できる。

7. 構造物沿いの1/10最大波高の比較検討

構造物沿いでの碎波が発生していない波浪場の波高分布特性(有義波高で検討)において、入射波の多方向性の影響は斜め入射波の発達の有無として確認できた。しかし、多方向不規則波の波浪場においても、単一方向不規則波と同一方向成分波、つまり構造物に平行に近い方向成分波については斜め入射波の発達がみられる可能性が考えられ、1/10最大波高について検討すれば、隅角部から離れるにつれての波高増加がみられる可能性が考えられる。そこで、ケース2M, 2Uでの構造物沿い(測線1)の1/10最大波での波高比分布を $H_{1/10}$ での波高比

布とともに図-10に示す。なお、 $H_{1/10}$ の波高比は地形開始部での $H_{1/10}$ との比率で表す。

その結果、多方向不規則波の波浪場においては $H_{1/10}$ についても隅角部から離れるにつれて連続的に増加する傾向はみられない。単一方向不規則波と同一方向の方向成分波の構造物沿いの発達があるとしても、結果的には $H_{1/10}$ にもその影響があらわれないことが確認できる。

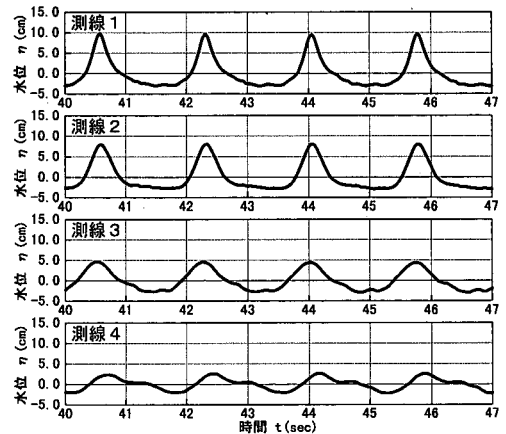


図-7 規則波の水位の時間変化(ケース2R; $X=12\text{ m}$)

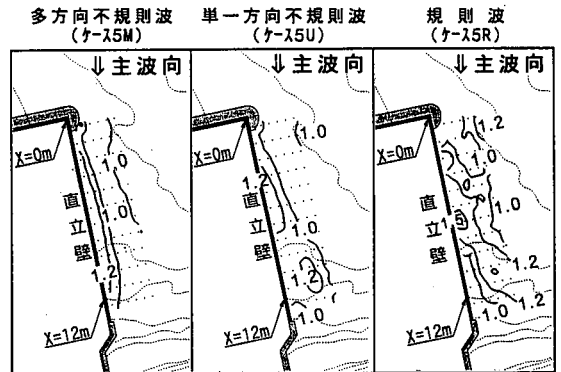


図-8 波高比分布図(ケース5M, 5U, 5R)

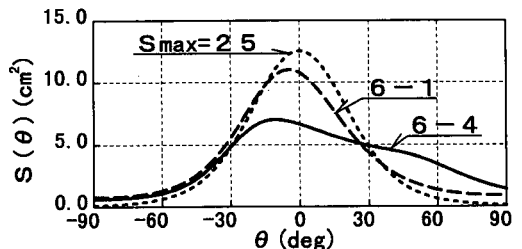


図-9 方向スペクトル(ケース5M; 6-1, 6-4)

8. 数値計算との比較

Berger ら (1976) は、規則波が作用する直立壁前面の波高分布について実験値と計算値(ヘルムホルツ方程式)を比較検討し, stem 波が形成される波浪場の構造物沿いの波高増加は回折現象として説明できるとしている。

ここでは、ヘルムホルツ方程式を解く三井の方法(三井ら, 1967)を用いて構造物沿いの波高分布を算定し、実験結果と比較検討する。三井の方法では隅角部位置での入射波の条件より、水深一様として、反射波、隅角部からの回折散乱波を考慮した計算を実施できる。三井の方法は規則波を対象としたものであるが、ここでは不規則波の成分波ごとに計算した結果を合成することによって、不規則波での波高比を算定する。入射波の周波数スペクトルについては Bretschneider-光易型(10分割; エネルギー等分割), 方向関数については光易型(45分割; 等分割)に設定する。また、隅角部位置の入射波の波高、波向は構造物がない条件での改良エネルギー平衡方程式(高山ら, 1991)の計算結果より決定する。

構造物沿いで碎波が発生しない波浪場(ケース 2 M, 2 U)の計算値を実験値とともに図-11 に示す。その結果、多方向不規則波の波浪場においては、実験値と計算結果が比較的良好に一致する。しかし、波高が連続的に増加す

る単一方向不規則波の波浪場においては、隅角部から離れるにつれて実験値よりも計算結果が小さくなる傾向を示す。これには、三井の方法において考慮できない非線形性が影響している可能性が考えられる。

また、改良エネルギー平衡方程式による計算結果をもとに図-11 に示すが、実験結果での斜め入射波の発達に計算結果ではみられない。入射波と反射波の位相干渉、回折散乱波を考慮できない点が、当波浪場での構造物沿いの波高分布特性の評価には適さないといえる。

9. 結 語

構造物にほぼ平行に斜め入射波が作用し、規則波、単一方向不規則波では構造物沿いに stem 波が形成される波浪場を対象として、多方向不規則波を用いた水理模型実験を併せて実施し、入射波の不規則性、多方向性の影響について考察した。その結果、入射波の不規則性の影響はあまりあらわれないが、多方向性の影響が大きくあらわれた。構造物沿いで碎波が発生しない場合、規則波、単一方向不規則波の波浪場では斜め入射波の発達、stem 波の形成が顕著にみられるのに対し、多方向不規則波の波浪場ではみられない。また、構造物沿いで碎波が発生する場合、規則波、単一方向不規則波の波浪場では反射波が低減されるのに対し、多方向不規則波の波浪場では異なる方向成分波が碎波せずに存在しているために、規則波、単一方向不規則波よりも波高が大きくなる。

今後、構造物への入射角の違いによる波浪場特性の把握が必要と考えられる。

最後に、計測にあたっては(株)日本工業試験所内西博氏、数値計算にあたっては(株)ニュージェック殿最浩司氏の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 高山知司・池田直太・平石哲也 (1991): 碎波および反射を考慮した波浪変形計算, 港研報告, 第30巻, 第1号, pp. 21-67.
- 三井 宏・村上仁士 (1967): 海岸構造物不連続部の波高分布について(第2報), 第14回海岸工学講演会論文集, pp. 53-59.
- 目見田哲・酒井哲郎 (1998): 構造物にほぼ平行に入射する不規則波による構造物沿いの波高分布特性, 海洋開発論文集, 第14巻(印刷中).
- 森屋陽一・菊地正行・松立博樹・水口 優 (1995): 浅海域における周期波のマッハ反射について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 6-10.
- Berger, U. and S. Kohlhase (1976): Mach-reflection as a diffraction problem, Proc. 15th Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 796-814.
- Wiegel, R. L. (1964): Water wave equivalent of Mach-reflection, Proc. 9th Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 82-102.

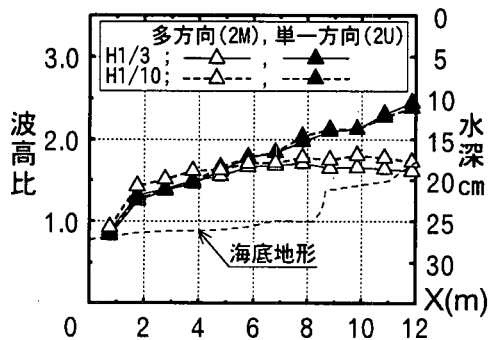


図-10 直立壁沿いの $H_{1/10}$ と $H_{1/3}$ の比較 (ケース 2)

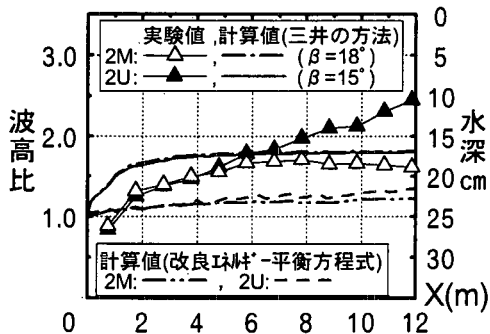


図-11 実験値と数値解析との比較 (ケース 2)