

沿岸漂砂量の水深方向分布を考慮した海浜変形モデル

宇多高明*・山本幸次**・河野茂樹***

1. まえがき

近年、沿岸漂砂を阻止する構造物の下手側で顕著な侵食が生ずる例が目立って増えている(宇多ほか, 1988a; 宇多・山本, 1989). このような沿岸漂砂の不連続により生じる海浜地形の長期的変動を数値計算によって予測可能とすることは、工学的にも地形学的にも重要な課題である。従来、この種の地形変化の長期的予測に際しては、Pelnard-Considere (1954) によって開発された汀線変化モデルが利用されてきた(橋本, 1974). このモデルでは、海浜断面形が平行移動すると仮定して海岸線の変化を予測する。植木・出口 (1976) は、沿岸漂砂量の岸沖方向分布として台形・三角形を与えた汀線変化モデルを提案した。しかし、このモデルでは原理上、汀線より沖側の地形変化は予測できるが、陸域の地形変化予測は不可能である。一方、Bakker (1968) は two-line モデルを提案し、岸沖方向漂砂を導入して突堤周りの汀線変化に関する理論解を求めた。また、Perlin・Dean (1978) は、Bakker の方式を発展させた数値モデルを開発し、より一般的な n-line モデルを提案している。この研究では多数の等深線の変化を予測できるという利点を有するが、沿岸漂砂量の配分比の決定法が不明確であり、また海浜断面形の予測は行うことができない。最近、河野ほか (1986) や宇多ほか (1988b) は、汀線変化量を求めた後、実測値から定めた沿岸漂砂量の水深方向分布を用いて海浜断面形を予測するモデルを開発した。本研究では、これらの研究を発展させ、沿岸漂砂量の水深方向分布を一般的な関数で与えることにより、3 次元的海浜地形変化を予測可能なモデルを開発する。

2. 海浜変形のモデル実験

(1) 実験方法

最初に、波による海浜変形現象の理解を進めるとともに、海浜変形モデルの検証データを得るために移動床平

面実験を実施した。実験は平面水槽 (16×20×0.6 m) を用いて行った(図-1 参照)。実験は2ケースから成り、ケース①では汀線から 4m 沖合に堤長 4m の離岸堤を設置した。また、ケース②では半円形状の養浜を行った。離岸堤の模型は、木材を組んだ格子状スリット構造とした。海浜模型の平面形および断面形を図-1 に示す。養浜部を除く海浜模型は汀線付近の勾配が 1/10 と一定で、その沖には水深 20 cm の平坦面を設けた。なお、以後の解析に便利のように、沿岸方向に X 軸、これと直角沖向きに Y 軸を取った。海浜は中央粒径が約 0.28 mm、比重が 2.65 の細砂により整形した。作用波の諸元としては、波作用時に顕著な地形変化が生ずる限界水深が平坦部の水深より浅くなるように、換算沖波波高 $H_0' = 5.0$ cm, $T = 1.27$ s の条件を選んだ。この波浪条件の下で漂砂の移動限界水深 (h_i) を佐藤・田中 (1962) の表層移動限界水深式で計算すると $h_i \approx 14$ cm となる。実験では海浜地形変化状況を4回の地形測定によって調べるとともに、砕波点における入射角と砕波波高の沿岸方向分布を測定した。

(2) 実験結果

実験では初期地形を整形後、波浪を6時間作用させ

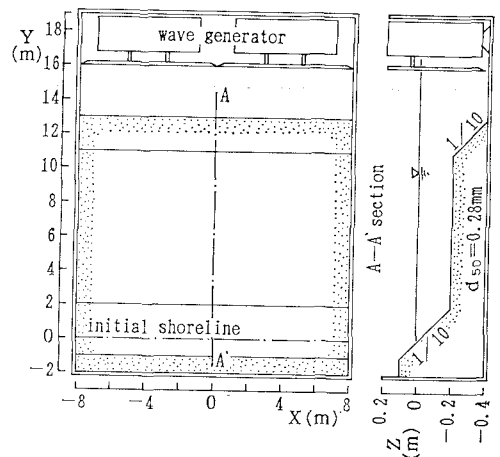


図-1 実験水槽概要

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長

** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室 研究員

*** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室部外研究員
(技研典業(株))

た。ケース①の初期地形と6時間後の地形を図-2に示す。構造物の背後域では、 $-8 \sim -20$ cm の等深線がほぼ初期形状を保っている。しかし、構造物の遮蔽域外では $-10 \sim -16$ cm の等深線はやや前進し、 -8 cm 以浅

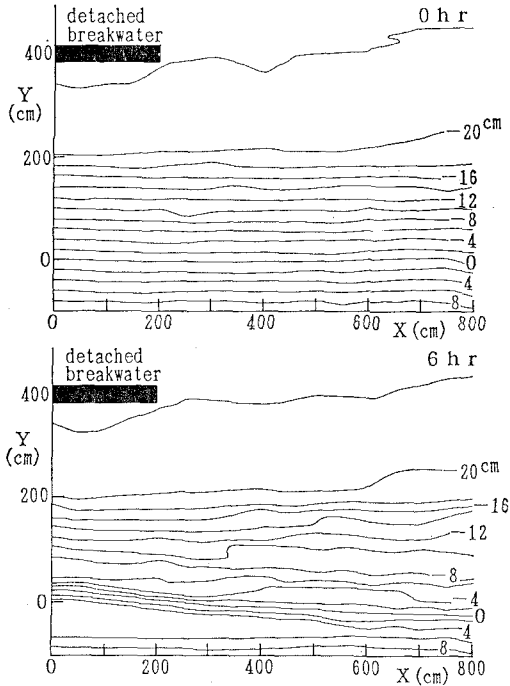


図-2 等深線図(ケース①)

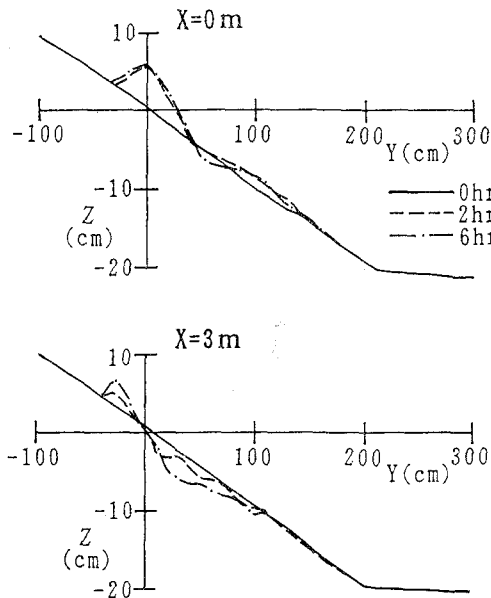


図-3 断面図(ケース①)

の等深線は後退している。このことは、構造物の外側の区域では冲向き漂砂により浅海部の底質の一部が沖方向に移動したことを示している。浅海域の $4 \sim 6$ cm の等深線は、構造物の背後では緩やかに前進し、舌状砂州が形成された。これと対照的に、構造物の背後域外ではこれらの等深線が後退した。全体として構造物の背後域外より内側へと沿岸漂砂によって底質が運ばれたことが明らかである。図-2によると、形成された舌状砂州の規模はそれほど大きくない。この理由は、離岸堤が透過性を有することと、離岸堤の堤長に対する離岸距離が大きいため構造物の開口部からの回折効果はかなり大きいことによる。

時間経過に伴う代表的断面形状の変化を図-3に示す。構造物の中央を横切る $X=0$ m 断面では、沿岸漂砂によって運ばれた底質が堆積した。 $-8 \text{ cm} \leq z \leq -4 \text{ cm}$ の間で部分的な侵食が見られるが、全体的には堆積量の方が多い。また、汀線付近で顕著な土砂堆積の見られる部分の海底勾配は初期の海底勾配 (1/10) に比べ、約 $1/3$ とかなり急勾配となった。断面内で一様な堆積が生じなかったのは、断面内において堀川ほか (1973) のタイプ分類のⅢ形に属する岸向漂砂による地形変化が生じたためである。 $X=3$ m 断面では $z=-10$ cm を移動限界として徐々に侵食が進んだ。この断面では、 $X=0$ m 断面と対照的に明らかに侵食量の方が多い。これらの断面では、一部冲向き漂砂による地形変化も生じた。この冲向き漂砂のために、図-2に示したように深浅図において $-10 \text{ cm} \sim -16 \text{ cm}$ の等深線が沖方向へ移動した。

次に、ケース②の実験結果について述べる。初期地形と6時間後の地形を図-4に示す。初期に半円形状であ

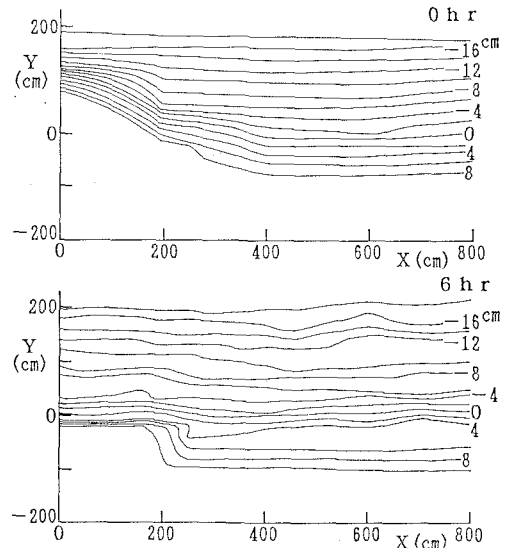


図-4 等深線図(ケース②)

った養浜区間の等深線形は、波の作用で急速に後退し、 -12 cm 以浅の等深線はほぼ X 軸と平行となった。養浜区間では浜崖が形成され、侵食された土砂は養浜区間外へ運ばれ堆積した。例えば土砂の堆積状況は $-4\text{ cm} \leq z \leq 4\text{ cm}$ 間の等深線が沖向きに大きく前進したことから理解される。一方、 -16 cm 以深の等深線はいずれの場所でも初期形状と比較してほとんど変化がない。このことより、養浜砂が主として沿岸漂砂によって沿岸方向に輸送されたことが分かる。

養浜区間の中央に位置する $X=0\text{ m}$ 断面、および養浜区間外の $X=2\text{ m}$ 断面の変化を図-5に示す。 $X=0\text{ m}$ 断面では、1時間後の断面形に特徴的なように、 -13.5 cm 以浅で侵食が生じている。また、0~1時間の間で侵食が著しく、1~3時間、3~6時間と時間が経過するにしたがい侵食量は小さくなっている。 $X=2\text{ m}$ 断面では、 $z=5\sim-5\text{ cm}$ の範囲に注目すると、1時間後に一旦堆積し、その後徐々に侵食が生じ、6時間後には0時間の断面形状とほぼ等しくなっている。すなわち履歴効果が現われている。

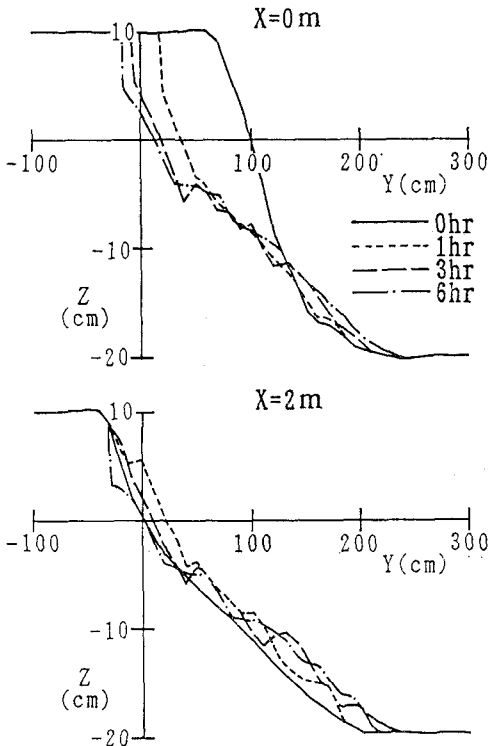


図-5 断面図(ケース②)

3. 沿岸漂砂の水深方向分布を考慮した海浜変形モデル

前節で例示した2ケースの実験結果では、地形変化は主として沿岸漂砂によって生じており、しかも沿岸漂砂

量が水深方向に分布形を有するために特徴ある地形変化が生じた。そこで以下ではこのような地形変化を予測するモデルの開発を行った。まず、全沿岸漂砂量 Q はサベージ公式(例えば、野田・橋本, 1981)を用いたとき式(1)で与えられる。

$$Q = f/8\rho g H_b^2 (C_g)_b \sin \alpha_b \cos \alpha_b \\ = F_0 \sin \alpha_b \cos \alpha_b \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 f :係数、 ρ :海水密度、 g :重力加速度、 H_b :砕波波高、 $(C_g)_b$:砕波点における群速度、 α_b :砕波点における入射角である。野田・橋本(1981, p. 89, 図-4.23)にしたがい、 α_b が十分小さいと仮定すると、次の近似式が成り立つ。ここに、沿岸方向に x 軸をとり、これより汀線までの沖向き距離を y とする。

$$Q = F_0 \sin \alpha_b \cos \alpha_b \approx F_0 \tan \alpha_b = F_0 \tan(\alpha_0 - \beta) \\ \approx F_0 \left(\tan \alpha_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \right) \dots \dots \dots (2)$$

n 本の等深線の変化を計算する方法には Bakker (1968) や Perlin・Dean (1978) の研究があるが、それらのうち Perlin・Dean (1978) を参考とし、図-6を参照し、 $k=1\cdots n$ に対応する水深における漂砂量を q_k としたとき、基準点から各等深線までの沖向き距離(等深線距離) y_k と q_k の間に式(2)と同様な関係が成立するとすれば、

$$q_k = F_0 \left(\tan \alpha_0 - \frac{\partial y_k}{\partial x} \right) \dots \dots \dots (3)$$

となる。ここに、 $F_0 k = F_0 \cdot \mu_k$ 、 $\sum \mu_k = 1$ である。 μ_k は各水深ごとの漂砂量を与える比例定数であり、漂砂量の水深方向分布を与えることにより決定される。式(3)が成立する場合、沿岸漂砂は平均的に見て常に同一水深を保って沿岸方向へ移動することになる。一方、漂砂の連続式より、

$$\frac{\partial q_k}{\partial x} + h_k \frac{\partial y_k}{\partial t} = 0; k=1\cdots n \dots \dots \dots (4)$$

が成立する。ここに、 h_k ($k=1\cdots n$) は各等深線によって代表される地形変化に関する漂砂の移動高である(図-6参照)。結局、 μ_k が与えられれば、式(3)、(4)を連立させて解くことにより各水深ごとに等深線の変化が算出される。

砕波波高 H_b を持つ波の作用で底質が移動する場合、地形変化が生ずる範囲は、波の打ち上げ高(h_R)から移動限界水深(h_C)の間である。沿岸漂砂量の水深方向分布について、最近現地データにより定められた分布形が報告されている。例えば河野ほか(1986, p. 290, 図-9)が富士海岸で求めた例では、規準化された沿岸漂砂量は、汀線付近をピークとして水深方向に単調に減少している。そこで、本研究では規準化された沿岸漂砂量の水深方向分布 $\xi(z)$ を図-7に示すように仮定した。 $\xi(z)$ が与えられたとき、 μ_k は式(5)によって算出さ

れる。

$$\mu_k = \int_{z_k}^{z_{k+1}} \xi(z) dz / \int_{h_c}^{h_R} \xi(z) dz \dots\dots\dots (5)$$

実際の計算は、沿岸方向に Δx 、時間間隔を Δt として式(3)、(4)を陽形式で差分化して解く。計算に際しては、陽形式差分を用いているために、安定条件として $\Delta t \leq h_k / F_{0k} \cdot (\Delta x)^2$ を満足しなければならない。実際の数値計算では、 $\Delta x = 20 \text{ cm}$ 、 $\Delta t = 30 \text{ s}$ とした。また、 h_R 、 h_c は実際には波高、周期、海底勾配などの関数となるが、ここでは実験値との比較により近似的に次のように H_b の関数として与えた。

$$h_R \doteq H_b \dots\dots\dots (6)$$

$$h_c \doteq -2.2 H_b \dots\dots\dots (7)$$

4. 実験値と計算値の比較

初期地形周りで測定された碎波波高、碎波波向の測定値を用いて、海浜変形を予測した。実際には、波浪変化計算を行って波高・波向分布を定める必要があるが、ここでは実験値を用いることとし、更にその経時変化は大きくないと仮定し、経時的に一定という単純な条件で計

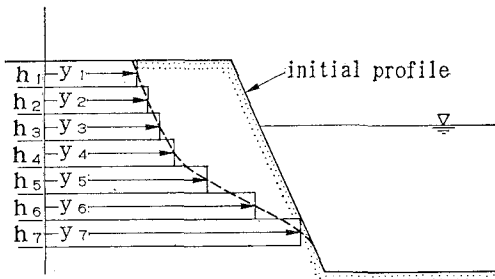


図-6 各等深線の移動高の定義図

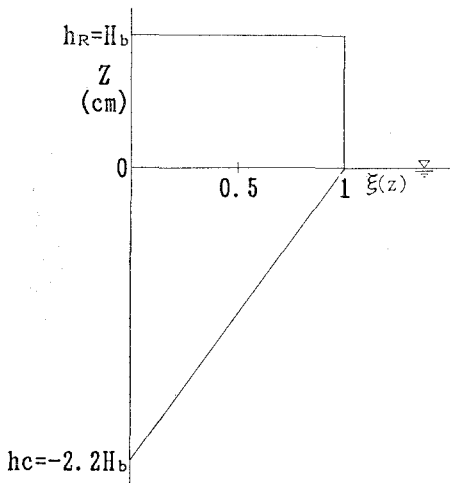


図-7 沿岸漂砂量の水深方向分布の定義図

算を行った。なお、構造物周りの波高・波向分布は、例えば放物型モデルを用いればかなり高い精度で計算できることが分かっている(本間ほか, 1985)。本研究ではこの部分の計算は省略し、海浜変形のモデル化を重点的に進めた。ケース①の実験に対応する計算結果を図-8に示す。6時間後の等深線形に着目すると、構造物岸側の $-12 \sim -20 \text{ cm}$ の範囲の等深線はほぼ初期形状を保っている。これに対し、浅海部の $6 \sim 10 \text{ cm}$ の等深線は、構造物の背後では緩やかに前進し、舌状砂丘が形成された。また、構造物の背後域外ではこれらの等深線は後退した。これらの特性は、実験値(図-2)と同一であり、実験で得られた構造物の背後域外より内側へと底質が運ばれる現象を良く再現している。 $X = 0, 3 \text{ m}$ の断面形の変化を図-9に示す。図-3に示した実験値と比較すると、侵食域では徐々に侵食が進む特性は良く再現されている。ただし、実験では沖向き漂砂による断面形の変化があるために、計算値の方が直線的な断面形となっている。

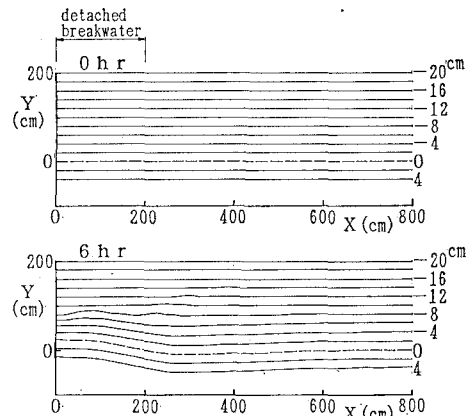


図-8 等深線図(ケース①の計算結果)

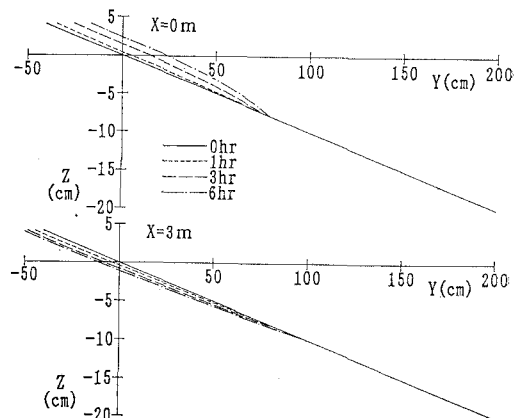


図-9 断面図(ケース①の計算結果)

同様にケース②の場合の計算を行った。計算に際しては、ケース①と同様に初期地形周りで測定された碎波点における波の入射角と碎波波高を計算に用いた。初期と6時間後の地形形状を図-10に示す。初期には半円形状であった養浜区間の等深線は波の作用で急速に後退した。特に汀線付近での変形が大きい。最終的に、-14 cm 以浅の等深線はほぼ X 軸と平行となったが、移動限界水深 $h_i=14$ cm より深い -16 cm 以深の等深線はいずれの場所でも初期形状と比較してほとんど変化がなく、初期地形がそのまま残されている。以上の特性は実験から得られた結果(図-4)と良く一致しており、かなり高い精度で計算により実験値の再現ができることが分かった。 $X=0, 2$ m 断面の変化を図-11に示す。 $X=0$ m 断面では、実験と同様に $z=-14$ cm を移動限界水深としてそれ以浅で侵食が進んでいる。また、0~1 時間の間での侵食が著しく、1~3 時間、3~6 時間と時間が経過するほど、侵食量は小さくなっていることも実験結果

と良く一致している。 $X=2$ m 断面では1時間後に堆積が生じ、その後徐々に侵食しており、実験と同様、履歴効果が明瞭に表われている。以上のことから、断面形状についても計算により実験の再現が可能であることが分かる。

5. 結 論

本研究で得られた成果を以下に要約する。

①沿岸漂砂量の水深方向分布を考慮し、各等深線の変化を one-line モデルの手法を準用した方法で計算するモデルを開発した。②開発したモデルを用いて計算した結果と、離岸堤背後の海浜変形、および養浜時の海浜変形に関するモデル実験の結果とは良く一致した。③このモデルは n 本の等深線の変化を予測する点において Perlin・Dean (1978) の研究と似ているが、沿岸漂砂量の水深方向分布を考慮することにより、海浜断面形の変化をも予測可能となった点が特徴である。

参 考 文 献

- 宇多高明・小林正一・種岡虎男 (1988a): 新潟県市振海岸における海岸構造物設置に伴う海浜変形, 地形, Vol. 9, pp. 35~52.
- 宇多高明・陶山幸夫・中村正敏・富士川洋一 (1988b): 皆生海岸の沖合部における地形変化とその予測, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 432~436.
- 宇多高明・山本幸次 (1989): 鈴鹿川河口周辺海岸の経年的地形変化, 地形, Vol. 10, pp. 53~62.
- 河野 宏・宇多高明・藪崎義之・水野益宏 (1986): 富士海岸の侵食実態と地形変化予測, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 287~291.
- 佐藤昭二・田中則男 (1962): 水平床における波による砂移動について, 第9回海岸工学講演会講演集, pp. 95~100.
- 榎木 亨・出口一郎 (1976): 海浜変形の予測に関する基礎的研究(第1報), 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 212~217.
- 野田英明・橋本 宏 (1981): 漂砂と海岸保全施設, 技報堂, 157p.
- 橋本 宏 (1974): 離岸堤による隣接海岸への影響予測モデル, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 181~184.
- 堀川清司・砂村継夫・鬼頭平三 (1973): 波による海浜変形に関する一考察, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 357~363.
- 本間 仁・堀川清司 (1985): 海岸環境工学, 東京大学出版会, 582p.
- Bakker, W. T. (1968): The dynamics of a coast with groyne system, Proc. 11th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 492~517.
- Pelnard-Considere, R. (1956): Essai de théorie de l'évolution des formes de vivage en plages de sable et de galets, IV éme Journées de l'Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question III, Rapport, No. 1, pp. 289~298.
- Perlin, M. and R. G. Dean (1978): Prediction of beach planforms with littoral controls, Proc. 16th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1818~1838.

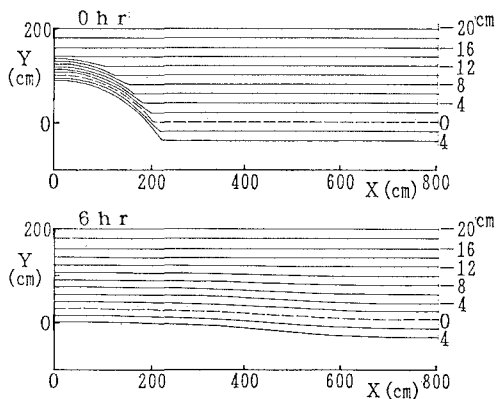


図-10 等深線図(ケース②の計算結果)

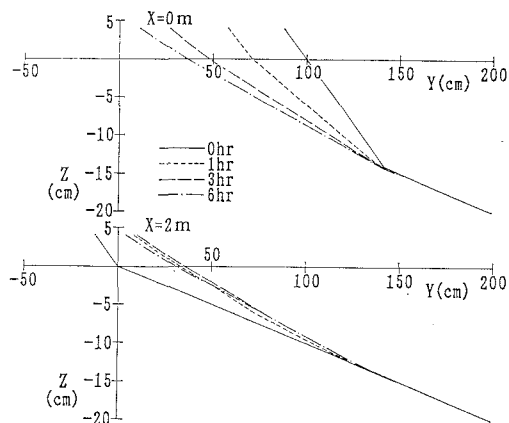


図-11 断面図(ケース②の計算結果)