

没水平版を有する遊水室型杭式防波堤による 透過波の低減機構とその効果について

中村孝幸*・米島幹雄**・田中 潔***

大水深の軟弱地盤海域での経済的な防波堤の建設を目的として、没水平版を有する遊水室型ジャケット式防波堤を提案した。この防波堤は、従来のカーテン防波堤と比較すると、複断面のカーテン壁構造になるものの、同程度の波浪制御効果を目標としてカーテン壁没水深を半減でき、結果的に水平波力も低減できるため支持杭構造を簡素化できる利点がある。また、遊水室型構造とすることで、同一断面の矩形堤に比較して、反射波の低減効果、さらには長周期側での透過波の低減効果に優れることなどが確認できた。ここでは、このような透過波の低減効果についても理論的に明らかにした。また、耐波安定性の面から、作用波力の特性についても検討した。

1. はじめに

一般的に、水深が20 mより深く、しかも軟弱地盤でかつ外洋性のうねりが作用する海域を対象にして、防波堤を経済的に建設することは非常に困難な状況にあると考えられる。軟弱地盤の海域でよく使用される防波堤形式として、カーテンウォール型の杭式防波堤がある。しかし、これは外洋性のうねりが作用する海域の場合、カーテン壁の吃水深をほぼ海底付近まで延伸することが必要とされることが多く、受ける水平波力も増大するため、杭径が大きくなるなど不経済な構造になりやすい。

本研究は、このような海域での経済的な防波堤の建設を目的として、新たに遊水室型のジャケット式防波堤を提案する。この防波堤は、図-1に概略を示すように、上部にカーテン版で構成される遊水室を持ち、その遊水室の下部に水平版を敷設した構造である。この防波堤は、遊水室内のピストンモードの波面運動に伴う前面開口部からの流体の出入による発散波を利用することで、比較的長周期の波に対する透過波の制御効果を高める方式である。遊水室内には、比較的短周期の波に対する反射波の低減のため、図中に示すように複数のカーテン版（図中の斜線で示すカーテン版）を設けることもできる。ここでは、比較的大水深の海域を想定して、このような遊水室型防波堤による波浪の制御効果、特に透過波の制御効果を理論と実験により明らかにすると共に効果的な断面設定法についても究明する。また、耐波安定性の面から、作用波力の特性についても検討する。

2. 実験装置および実験方法

(1) 模型堤体

模型堤体には、現地堤体を縮尺1/40で模型化した図-2

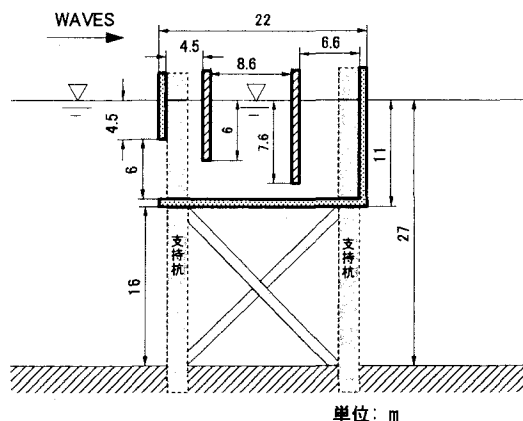


図-1 遊水室型杭式防波堤(現地量)

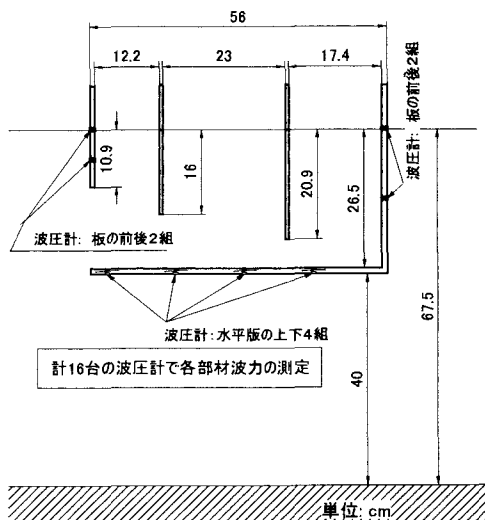


図-2 実験に用いた模型堤体と波圧計の配置

の断面のものをを用いた。実験では、遊水室内の2枚の付加的なカーテン版を取り除き、単純化した単一遊水室型構造のモデルも用いた。また、比較のため、最前面のカ

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科
** JFE エンジニアリング株式会社 鋼構造事業部
*** 学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科

ーテン壁下部の開口部を鉛直版で閉じて、下部透過型の矩形堤とした模型も検討対象にした。

これら堤体の横幅は、水槽幅とほぼ等しい99 cm としてあり、水槽側壁に接する面と堤体中央部には隔壁を設けて構造体を強化した。

(2) 実験水槽および測定装置

実験水槽には、長さ28 m、幅1 m、高さ1.2 mの造波水槽を用いた。水槽の一端にはピストン型の造波機が、他端には砕石よりなる消波工が設けてある。そして、模型堤体は、造波板よりほぼ16 mの位置に固定した。

実験では、計8台の容量式波高計を用いた。このうち、1台を入射波の測定、2台を入・反射波の分離測定用、4台を遊水室内の水面変動および最前カーテン版の前面の水位変動の測定、残りの1台を透過波の測定に充てた。

また、堤体に作用する波力を検討するため、図-2に示すように、計16台の波圧計を各部材の裏表で組にして設置した。各部材波力は、このように測定した波圧の作用方向を考慮して、まず差圧の時間波形を求め、これに鉛直方向の代表長を乗じて近似的に算出した。

(3) 実験条件

実験では水深 h は67 cmと一定にした。作用波の条件は、入射波高 H がほぼ10 cm~15 cmの範囲(砕波する場合を除く)を目安とした。このとき、周期 T は0.8 s~2.5 sの範囲で15種類(矩形堤では8種類)程度とした。

3. 透過波と反射波の低減効果

図-3, 4は、図-2に示す①遊水室型構造の模型防波堤(3重遊水室型構造)、②これを原型として遊水室内の2枚のカーテン壁を取り除いて簡略化した断面の堤体(単一遊水室型構造)、③遊水室の前面の開口部を閉じて矩形断面の堤体としたとき透過率 Cl 、反射率 Cr をそれぞれ示す。これらの図は、波周期による Cl 、 Cr の変化を示すもので、周期に関する無次元量として、波長堤体幅比 L/B が用いてある。

図中には、中村・井出(1997a)による減衰波理論に基づく数値算定結果も示す。理論算定では、等価線形抵抗係数 fc が必要になるが、遊水室型堤体については従来の研究(中村ら, 2003)を参照して $fc=0.20$ を、矩形堤については渦流れの生成が弱いことから $fc=0.15$ を用いた。

これら堤体の透過率の比較を示す図-4から、透過率は遊水室型構造とすることで、特に L/B の大きな長周期側で矩形堤の結果に比較して低下することが分かる。このような傾向は、理論算定結果にも見られる。これは後述するが、遊水室内のピストンモードの波動運動による動揺発散波と堤体の下部より伝達する流体運動に基づく透過波との位相干渉の結果によるものである。

そして、3重遊水室型構造と単一遊水室型構造の透過率の実験結果を比較すると、算定結果のような差異はほとんど見られず、両者はほぼ同程度か、むしろ単一遊水室型構造の結果が多少ながら低く現れている。このような多重遊水室構造とすることの透過率への影響は、現状では十分に把握できておらず、今後の検討課題としたい。いずれにしても、透過波の低減のみを目標とする場合には、遊水室内の付加的なカーテン壁は不要と考えられる。

次に反射率の結果を示す図-4に着目すると、矩形堤の反射率が最も高くなることは明白である。これに対して、遊水室型構造にすることで、反射率はほぼ4割以下に減勢されるなど、非常に効果的な工法と言える。

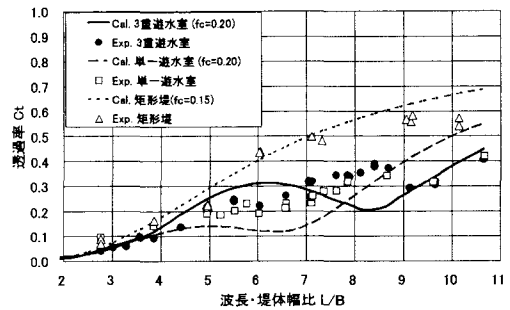


図-3 各堤体の透過率(10 cm < H < 15 cm)

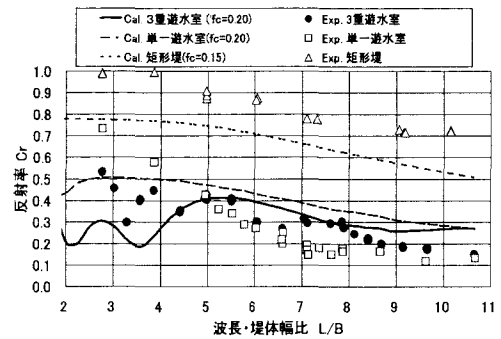


図-4 各堤体の反射率(10 cm < H < 15 cm)

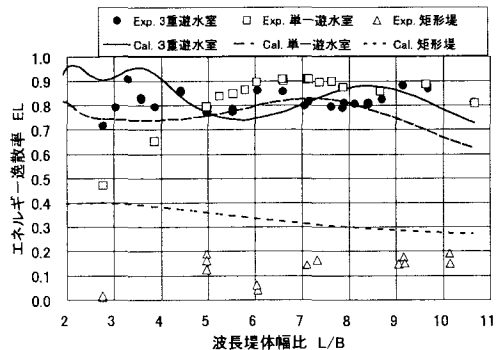


図-5 各堤体のエネルギー逸散率(10 cm < H < 15 cm)

また、遊水室を多重構造にすると、反射率は、特に L/B の小さな短周期側で低下することが確認できる。これは、既に中村ら(2003)により指摘されているように、多重遊水室型構造とすることで分割された各遊水室幅に対応するピストンモード波浪共振が新たに誘起され、各遊水室の前側カーテン壁下部に強い渦流れが生成され、結果的にこのような短周期波の条件下で反射波が低減されることによる。また、 L/B の大きな長周期側での反射率は、やはり矩形堤の結果に比較すると低減されており、これは総遊水室幅に対応するピストンモード波浪共振の出現によるエネルギー逸散によるものと考えられる。そして、この長周期側での反射率の低減に関する実験結果は、透過率と同様に、単一遊水室構造の方が多少ではあるが多重遊水室構造の場合よりも優れていることが認められる。

図-5は、図-3、4の結果から求めたエネルギー逸散率 EL の比較を示す。逸散率が高いのは、やはり遊水室型構造であることが再確認できる。ただし、多重遊水室型構造と単一遊水室型構造の EL を比較すると、短周期側を除けば有意な差は見られない。

4. 透過波の低減機構

既に遊水室型防波堤による反射波の低減機構については、中村ら(2003)により明らかにされている。ここでは、従来において検討されていない透過波の低減機構を、特に遊水室内のピストンモード波動運動に起因する前面開口部からの流体塊の出入による発散波の影響に着目して検討する。

図-6は、遊水室内の水表面のモデル化を示す。図(a)は、減衰波理論で用いられているような一般的なモデルに相当し、自由水表面としての取り扱いである。一方、図(b)は、遊水室内の水表面に重さのない十分に剛な仮想的な水平版を置いたモデルに相当する。後者のモデルにおいて、水平版は鉛直方向にのみ運動するものと仮定

する。このように鉛直運動のみに限定する背景は、従来の研究(中村ら, 2003)で知られているように、遊水室内ではピストンモードの波面運動が卓越することによる。

図-6(b)のモデルに基づき、波変形を算定するためには、まず①仮想水平版が固定状態された状態での反射・透過波を算定する。このとき、同時に水平版に作用する鉛直波力を求めておく。引き続き②静止水面状態を想定して、水平版が作用波と同一の周期で単位振幅の鉛直運動をするときの発散波および付加質量係数・造波減衰係数などの動的流体力係数を算定する。最後に③水平版の鉛直運動の振動方程式を、動的流体力係数および鉛直波力さらには静水力学の復元力をも考慮して導き、これを解くことで鉛直振動振幅などを求める。また、この振動振幅を考慮して、水平版運動時の発散波を求め、固定時の反射・透過波と重ね合わせることで最終的な反射・透過波が求められる。

このような算定法の利点は、運動体が固定された状態での反射・透過波と運動時の状態のそれらが別々に求められ、運動時の影響が明確になることにある。また、運動体の付加質量などの特性も把握できる。

ここでは、仮想水平版の振動算定法には、図-6(a)のモデルとの整合性を考慮して、やはり減衰波理論に基づく中村・井出(1997b)による浮体動揺の算定法を用いた。このとき、等価線形抵抗係数 fc は、同一の $fc=0.2$ を使用した。

図-7は、このような水平版の鉛直振動運動を考慮した算定法による透過率の算定結果を示す。堤体断面は、簡単であることから単一遊水室型構造とした。

図中には、上記した水平版固定時の透過率 Kt と最終的な運動時の透過率 Ct 並びに仮想水平版の鉛直振動振幅 $X2$ を L/B による変化で示す。本来、運動時の透過率 Ct は、図-3に示す自由水表面モデルによる透過率に、また、鉛直振動振幅は遊水室内の水位変動振幅に一致すべきものである。

そして、運動時の透過率 Ct に着目すると、これは図-3の単一遊水室型構造の Ct の結果にはほぼ逸していることが認められる。 L/B の小さな短周期側での両結果の相違は、遊水室内の波面モードがピストンモードと異なる腹節モードなどが出現するためと考えられる。

図-7において着目すべき点は、運動時の Ct が固定時の Kt よりも低く現れる事実である。この直接的な原因としては、上記したように仮想水平版の振動時の発散波の影響によると判定される。そして、このような影響は、水平版の鉛直振動振幅、すなわち遊水室内のピストンモードの波面運動の振幅がピークを示す波長条件の前に強く現れることが分かる。これは前面カーテン版よりの出入水塊量の大きさ(付加質量)とそれによる発散波と固

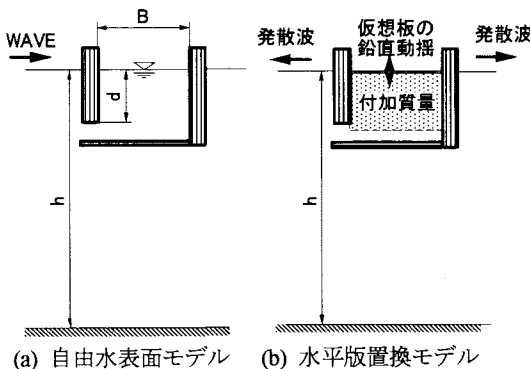


図-6 遊水室内の水表面のモデル化

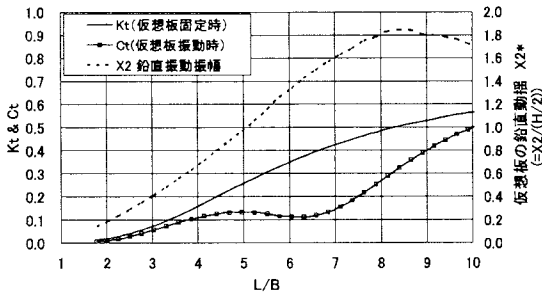


図-7 水平版置換モデルによる透過率と水平版の振動振幅 ($f_c=0.20$)

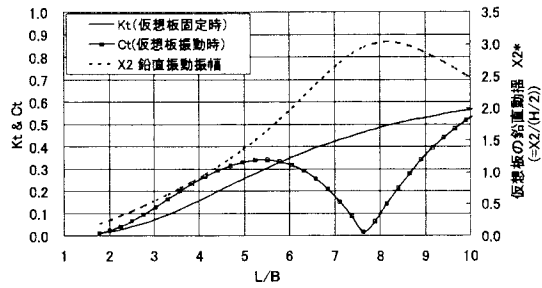


図-8 水平版置換モデルによる透過率と水平版の振動振幅 ($f_c=0.01$)

定時の透過波の位相関係によるものと考えられる。

図-8 は、図-7 に比較して、等価線形抵抗係数 f_c を 0.01 と十分に小さくしたときの結果を同様にして示す。両者の図の比較から、 f_c を小さくすると、透過率が極小となる L/B が長周期側に移行することやその絶対値もほぼ 0 になるなど、発散波の影響がより明確に現れるようになる。このとき、当然ながら、水平版の鉛直振動振幅はほぼ倍増する傾向にある。

また、水平版固定時の透過率を両図で比較すると f_c による差はほとんど見られず、前面カーテン版よりの出入水塊による渦流れの影響が波エネルギーの逸散に支配的なものであることも推測できる。

そして、制御の困難なより長周期側の透過波を低減するには、 f_c の小さな状況、すなわち前面カーテン版下部の渦流れなどの生成を抑制するような状況にすることで実現できる可能性がある。ただし、このときには反射波が増大することに注意する必要がある。

5. 透過波の低減特性に関するパラメータ

図-9、10 は、単一遊水室型構造を対象にして、それぞれ遊水室幅 B および前面カーテン壁の吃水深 d_l を変化させたときの透過率を示す。各図では、波長対固定寸法量との比を横軸に採用してある。これらの図より、透過率が一旦増加した後に極小となる L/d_l 、あるいは L/B の条件は、 B や d_l を増加させると長周期側に移行

することが分かる。これは遊水室内のピストンモードの波浪共振の発生条件が B や d_l を増加させると長周期側に変化するためと考えられる。

このように遊水型防波堤では、単一遊水室型構造でも、その透過率の低減特性が B や d_l により変化するため、消波対象波の条件が与えられても効果的な断面を設定することが難しい。

試みとして、従来の多重式カーテン防波堤の研究（中村ら、2003）で用いられている、断面特性長やそれを変形した特性長などの有効性を試行錯誤的に検討してみた。その検討結果の代表例を示すのが図-11 である。

図中では、断面特性長として遊水室の内縁間隔 B_i と前面カーテン版の吃水深 d_l を用いて定義される、 $R_p = B_i^{0.8} d_l^{0.2}$ が用いてある。この図に見られるように、波長とこの断面特性長の比を用いると、上記した各種の

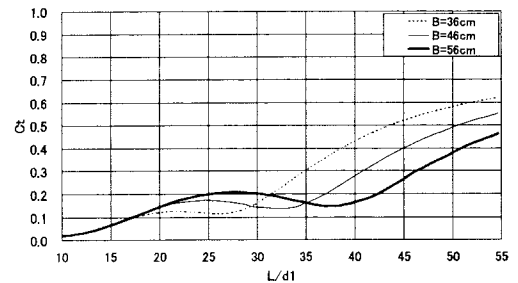


図-9 堤体幅 B による透過率の変化
(単一遊水室型構造, $d_l=11$ cm, $f_c=0.2$)

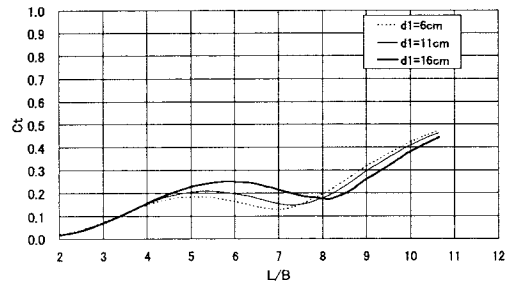


図-10 前面カーテン版吃水深 d_l による透過率の変化
(単一遊水室型構造, $B=56$ cm, $f_c=0.2$)

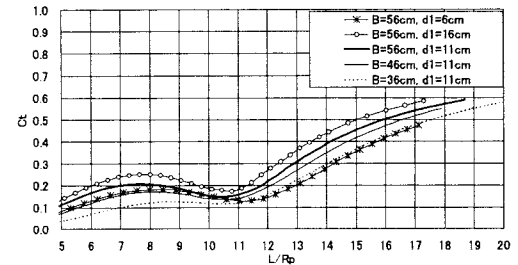


図-11 各種断面の透過率の断面特性長 R_p を用いた再整理
(単一遊水室型, $f_c=0.2$, $R_p = B_i^{0.8} d_l^{0.2}$)

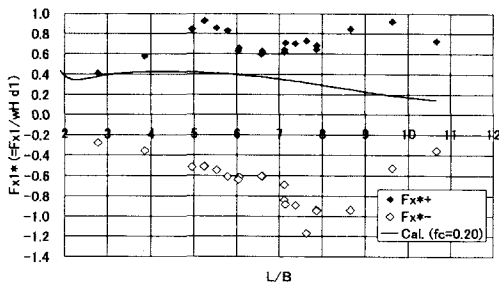


図-12 前面版に作用する水平波力 (単一遊水室型)

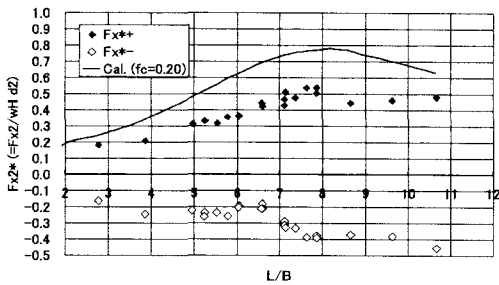


図-13 後面版に作用する水平波力 (単一遊水室型)

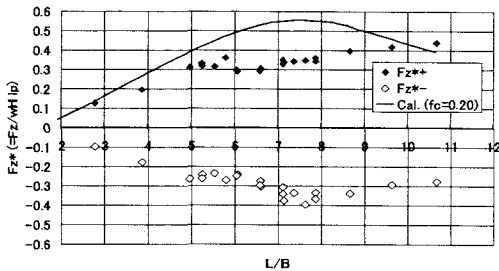


図-14 水平版に作用する鉛直波力 (単一遊水室型)

寸法の単一遊水室型構造の透過率がほぼ一定の変動傾向、例えば極小透過率の出現条件が $L/R_p=11\sim12$ 付近に現れるようになることが認められる。このような傾向になることの理論的な背景は現段階では不明であり、今後の検討課題としたい。

いずれにしても、上記の断面特性長を用いることで、かなり効率的に効果的な断面を見出すことが可能になるものと考えられる。

6. 作用波力の特性

図-12～14は、代表例として、単一遊水室型構造の前面カーテン版、後面カーテン版に作用する水平波力(F_{x1} , F_{x2})および下部水平版に作用する鉛直波力 F_z の結果をそれぞれ示す。各波力は堤体の単位幅当りの量に換算した後に、水の単位体積重量 w 、作用波高 H 、各部材の代表長で除した無次元波力強度で表示してある。

各部材の代表長は、カーテン版ではその吃水深を下部水平版についてはその長さ l_p を用いた。また、図中では正負波力が区別してあり、これらの正方向は波向き方向と鉛直上向きとした。図中には、比較のため、減衰波理論による算定結果も併せ示した。

これらの図より、前面カーテン版に作用する水平波力は、引き波時の波力が卓越するのに対して、後面版のそれは押し波時のものが卓越することが認められる。また、下部水平版に作用する鉛直波力は、上下方向ではほぼ同程度であることや、無次元波力強度で0.4程度とそれほど大きな波力でないことも分かる。これはやはり水面下に没しているためと考えられる。

算定結果と実験結果を比較すると、前面カーテン版を除くと、算定結果は実験結果を上回る予測になっている。前面カーテン版で算定波力が実験波力を下回る理由としては、算定結果において波の前面面上の影響を無視していることによると考えられる。

7. 結 語

- (1) 水平版を有する遊水室型防波堤は、前面開口部を閉じた矩形堤に比較すると、透過波および反射波の低減効果に優れる。特に透過波の低減効果は、長周期側で顕著であり、大水深海域での防波堤として適する。そして、このような低減効果は、減衰波理論に基づく算定法によりある程度推定できる。
- (2) 遊水室型防波堤は、従来から指摘されているように反射波についても有意な低減効果が認められる。このとき、遊水室内に複数枚のカーテン壁を付加すると、短周期側でも反射率を低くできる。
- (3) 遊水室型防波堤において、透過波が低減する機構は、遊水室前面の開口部からの流体塊の出入による発散波の位相干渉による。
- (4) 遊水室型防波堤の下部水平版に作用する鉛直波力は、無次元波力強度で0.4程度とそれほど大きくない。そして、この鉛直波力は、減衰波理論による算定結果に比較すると小さく現れる。

参 考 文 献

- 中村孝幸・井手善彦(1997a): 波の逸散現象を考慮した隅角物体まわりの波変形と作用波力の算定法, 海洋開発論文集, 第13巻, pp. 177-182.
- 中村孝幸・井手善彦(1997b): 減衰波中における浮体の動揺理論とその適用性に関する研究, 海工論文集, 第44巻, pp. 856-860.
- 中村孝幸・中山哲蔵・河野 徹・久保田二郎(2003): 有効周期帯拡大のための異吃水三重式カーテン防波堤の消波特性と断面設定法, 海工論文集, 第50巻, pp. 661-665.