

長周期うねりの護岸越波特性とその対策工提案の試み

Experimental Study on Wave Overtopping Rate of Long Period Swell on Seawall

加島寛章¹・平山克也²・長谷川 巖³

Hiroaki KASHIMA, Katsuya HIRAYAMA and Iwao HASEGAWA

Recently, coastal disasters due to swells induced by heavy storms increase at any harbors. The wave overtopping rate of long period swell banded narrow spectra is different from that of wind wave because of the characteristics on the wave grouping and the wave height distribution. In the study, the model experiments were conducted to measure the wave overtopping rate of the long period swell on seawall and to propose the countermeasure to be able to be efficiently decreased the wave overtopping rate. As a result, it is possible to estimate the wave overtopping rate of the long period swell by applying the existing design method and to reduce the wave overtopping rate of long period swell by placing the permeable detached breakwater formed in concrete blocks in front of the seawall.

1. はじめに

近年、地球温暖化の影響によると思われる台風の経路変化や大型化に伴い、我が国沿岸において大規模な被害が多発している。たとえば、2006年9月に発生した岩手県久慈港護岸の越波災害や2008年2月に発生した伏木富山港の防波堤滑動被災は、設計波に比べて波高は小さいものの、それぞれ周期14s程度のうねり性波浪が来襲したことが原因とされている。本論文では、平石ら(2008)にならない、設計波に比べて波高が小さいものの、周期が長いために大きな外力をもたらす波浪を偶発波浪の1つとして捉え、“長周期うねり”と呼ぶことにする。

一般に、このような波浪は、風波に比べてより水深の深い沖から屈折や浅水変形が生じ、浅瀬や海岸上ではより大きな波高となって防波堤や護岸に作用する。また、長周期うねりは狭帯域にエネルギーが極端に集中するスペクトルを有するため、波高分布や波群特性が風波と異なり、護岸上の不規則波の越波量にも違いが生じることが懸念される。

そこで本研究では、35m断面水路内に風波および長周期うねりを想定した不規則波浪を造波し、長周期うねりの護岸越波特性を明らかにするとともに、長周期うねりに対する護岸越波流量を効率的に低減しうる対策工断面の提案を試みた。

2. 長周期うねりの波浪特性

沖で発生した周期14s程度の長周期うねりは、通常の風波と異なり、水深のより深い沖から海底地形の影響を受けて屈折や浅水変形を伴いながら沿岸域に伝播し、高波

浪となって越波災害や小型船舶の転覆事故等を引き起こす場合がある。たとえば、東京湾口に面した久里浜湾では、2004年に発生した台風2号が関東地方のはるか沖を通過した後に、晴天であるにもかかわらず、長周期うねりの来襲により小型船舶の転覆事故が発生した。この時に久里浜湾内のアシカ島において観測された長周期うねりの水面波形(有義波高 $H_{1/3}=2.24\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=16.7\text{s}$)を図-1に示す。この図より、顕著な包絡波形を伴う高波の連なり現象が明瞭に現れていることがわかる。図-2に、この水面波形に対する周波数スペクトルを実線で示す。さらに、観測された有義値に対するプレットシュナイダー・光易型スペクトルを一点鎖線で、JONSWAP型スペクトルを破線で示す。なお、スペクトル尖鋭度は $\gamma=25.7$ である。この図より、長周期うねりの周波数スペクトルは、港湾設計等で通常採用されるプレットシュナイダー・光

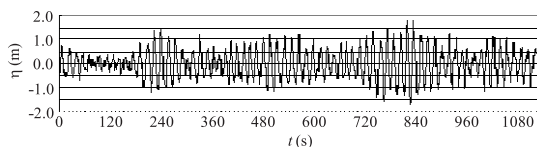


図-1 久里浜湾で観測された長周期うねりの水面波形

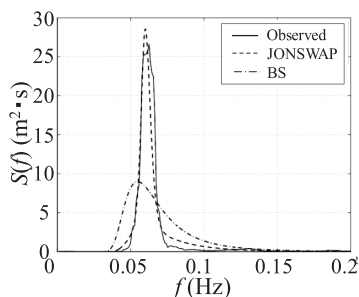


図-2 久里浜湾で観測された長周期うねりの周波数スペクトル ($H_{1/3}=2.24\text{m}$, $T_{1/3}=16.7\text{s}$, JONSWAP型スペクトルの $\gamma=25.7$)

1 正会員 修(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部
2 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部
3 正会員 修(工) 株式会社エコー 防災・水工部

易型スペクトルに比べてピークの尖った形状をしており、スペクトル尖鋭度を適切に設定したJONSWAP型スペクトルで表現可能であることがわかる。ただし、平山ら(2009)によると、このように特異な γ 値が推定された原因は、観測点であるアシカ島周辺の急峻な地形特性に伴う屈折により、長周期うねりの成分波が選別されたことによるものであると指摘している。一方、アシカ島沖に位置する伊豆大島の波浮港で観測した周波数スペクトルや久慈港の越波災害を引き起こした長周期うねりを観測した常陸那珂港のデータでは、長周期うねりの周波数スペクトルは、 $\gamma=4.0$ 程度としたJONSWAP型スペクトルで近似できることが確認されている。

このように、長周期うねりは、通常の風波に比べて単に周期が長い波だけでなく、非常に長い距離を伝播する過程で屈折変形などの効果により成分波が選別され、波向きの一方向化と周波数の狭帯域化が進んだ結果、浅海域において、風波とは異なる伝播・変形特性を有すると考えられる。

3. 水理模型実験の概要

(1) 実験方法

水理模型実験では、図-3に示すような勾配1/30の海底勾配と護岸模型が設置された長さ35m、幅0.6m、高さ1.3mの断面水路内に通常の風波および長周期うねりを想定した不規則波群を造波し、それらに対する護岸背後への越波量の計測を行った。なお、模型縮尺は1/40とし、特に断らない限り、以下では現地量で表記する。

実験に用いた不規則波群は、入射波周期 $T_{1/3}$ が8.0s, 14.0s, 17.0sのJONSWAP型スペクトルを有する不規則波群とし、通常の風波を想定した8.0sでは $\gamma=1.0$ 、長周期うねりを想定した14.0sおよび17.0sでは、スペクトル尖鋭度による違いが明瞭となるように $\gamma=1.0, 10.0$ とした。なお、 $\gamma=1.0$ のJONSWAP型スペクトルは、プレットシュナイダー・光易型スペクトルに相当する。入射波高は、一様水深で直立壁の設置位置における通過波の有義波高が4.0mとなるように調節を行った。また、波の不規則性を確保するため、それぞれの入射波に対して初期乱数を変えて3種類の異なる波群特性を有するものを設定した。換算沖波波高 H_0' は、入射波高を造波板前面の一様水深部の水深(実験水深)に対応する浅水係数で割り戻して算出した。実験水深は20.0および18.0mの2種類とし、護岸天端高 h_c は、実験水深に対応づけてそれぞれ6.0および8.0m(護岸前面水深は8.0および6.0m)とした。

対象護岸の断面形状は、「直立護岸」、「消波護岸」のほかに、越波低減機能を発揮しうる対策断面として提案する「消波護岸と同断面面積を有する消波ブロックで形成される透過離岸堤を直立護岸より少し沖合に配置

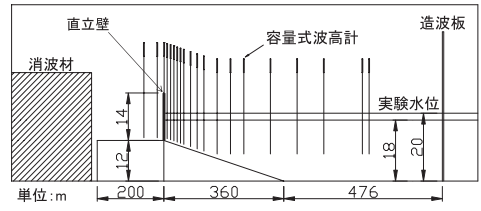
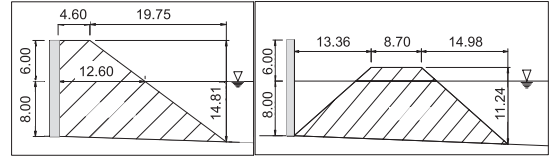


図-3 実験水槽(断面図)



(a)「消波護岸」 (b)「透過離岸堤を有する直立護岸」

図-4 護岸模型の断面形状

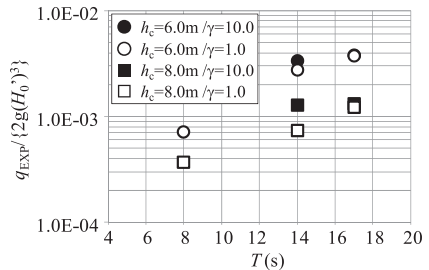


図-5 「直立護岸」に対する平均越波流量

した護岸 (=透過離岸堤を有する直立護岸)」を設定した(図-4)。

(2) 計測・解析方法

直立護岸背後の水平床部に設置された越波水塊集水ますに計測時間内に溜まった越波水塊の総量を計測し、計測時間による時間平均操作を施して作用波に対する護岸背後への平均越波流量 q_{EXP} を算出した。また、護岸背後へ越波した一波分の越波量をその周期で除した一波ごとの越波流量(以下では、短時間越波流量と表記する)も同時に計測した。計測波数は各ケースとも250波程度とした。

4. 直立護岸に対する越波特性

(1) 平均越波流量

図-5に「直立護岸」に対する平均越波流量と周期および護岸天端高、スペクトル形状の関係を示す。図の縦軸は換算沖波波高で無次元化した平均越波流量であり、3波群の平均値を表している。

周期と平均越波流量の関係は、容易に予測されるように、周期が長くなると平均越波流量が増大する。また、護岸天端高が低くなれば、越波しやすい状況になるため、いずれの周期に対しても一様に平均越波流量が増大している。さらに、同一周期においては、スペクトル尖鋭度

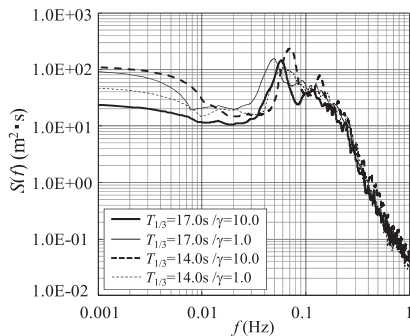


図-6 直立護岸前面におけるスペクトル密度

が大きいほど、平均越波流量が増大する傾向にある。特に、周期17.0sに比べて周期14.0sの場合において、この傾向が顕著に現れている。

スペクトル尖鋭度が大きい長周期うねりでは、波群が形成されやすくなる。また、このような波群性波浪では、成分波間の干渉により水面の長周期変動が発生する（たとえば、Sand, 1982）。したがって、護岸前面でこの長周期変動と来襲波の位相が一致する時には、護岸越波流量が増大するため、長周期変動の有無が護岸越波流量に大きな影響を与えることが推察される。一方、越波現象は波の波頂面が護岸天端高を超えることにより生じる現象であるため、直立護岸前面における波による水位変動（クレスト振幅や波高）が重要となる。本実験では、直立護岸前面に1/30勾配の海底斜面が設置されているため、沖から伝播した波はこの斜面上の浅水効果により波長が短縮され、波高が増大する傾向にある。

そこで、以上の2つの観点（水面の長周期変動、波による水位変動）からスペクトル尖鋭度と護岸越波流量の関係について整理した。ここでは、紙面の都合上、これらの関係性がより顕著に現れた護岸天端高が高い場合（ $h_c=8.0\text{m}$ ）について考察を加えた。

図-6に示すのは、直立護岸前面の水面変動から算出した周波数スペクトルである。この図より、特に周期14.0sにおいて、スペクトル尖鋭度が大きいほど長周期変動成分のエネルギーが大きいことがわかる。ただし、周期17.0sにおいてこの関係が逆転している原因は、現段階において不明である。なお、入射波の周波数スペクトルは、設定したJONSWAP型スペクトルで再現されていた。

一方、図-7に示すのは、直立護岸前面において計測された水面波形のクレスト振幅の超過確率分布である。図中に合わせて示したレイリー分布による超過確率と比較すると、実験値はレイリー分布よりも危険側にずれていることがわかる。これは、より波峰の切り立った波形が計測されたことを意味しており、護岸前面に設置した海底斜面による浅水効果が顕著に表れたためと考えられ

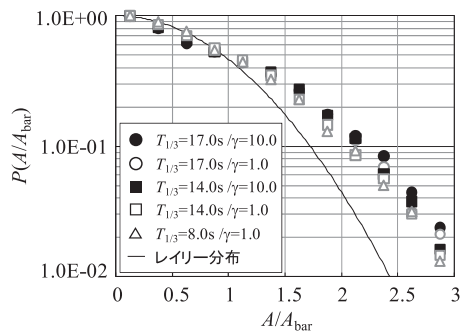


図-7 直立護岸前面におけるクレスト振幅の確率密度分布

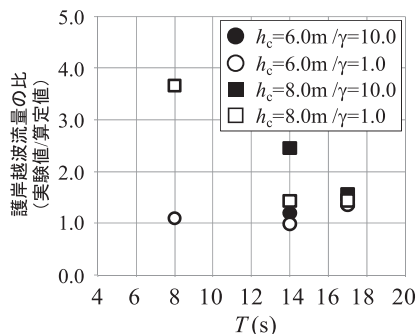


図-8 実験値と算定値による護岸越波流量の比較

る。さらに、実験結果では、周期が長く、スペクトル尖鋭度が大きいほど、護岸前面の水位の高くなる確率が大きくなる。このような傾向は護岸天端高の低い場合においても同様であった。なお、入射波のクレスト振幅の分布は、レイリー分布にほぼ従っていた。

以上より、図-5に示す実験結果は、概ね以下のように考察される。すなわち、護岸天端高が高い場合には、周期14.0sの場合においてスペクトル尖鋭度が大きくなると、大きなクレスト振幅（波による大きな水位変動）の出現確率が大きくなるとともに、顕著な長周期変動が発生することにより、護岸越波流量が増大する。一方、周期17.0sの場合では、周期14.0sの場合と同様に、スペクトル尖鋭度の増加とともに大きなクレスト振幅の出現確率は大きくなるものの、少なくとも今回の実験結果では水面の長周期変動が小さくなるため、両者の影響が相殺され、スペクトル尖鋭度による護岸越波流量に顕著な違いが表れなかったものと考えられる。

次に、今回得られた実験値の妥当性を確認するため、港湾設計等で採用されている既存の越波流量算定図（合田, 1975）による算定値と比較した結果を図-8に示す。この図より、越波量が少なかった護岸天端高の高い一部のケースを除き、周期が長くなるにつれて、実験値と算定値との比が1.0倍から次第に大きくなるものの、概ね1.5倍以内（算定誤差範囲内）に収まっている。なお、こ

の傾向は、スペクトル尖鋭度が大きいほど顕著である。この原因の1つには、この算定図の作成に用いられた実験結果は、いずれもプレットシュナイダー・光易型スペクトルに対する護岸越波流量であったため、本研究で対象としたようなスペクトル尖鋭度による違いが考慮されていないことが挙げられる。

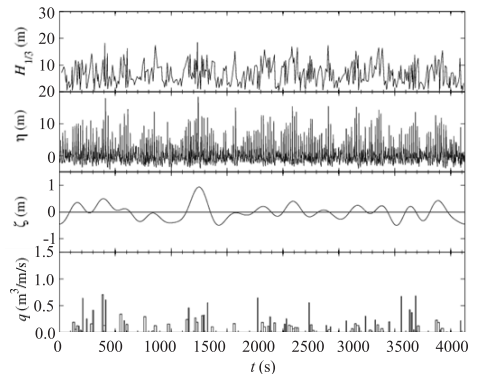
このように、スペクトル尖鋭度の大きい長周期うねりであっても、通常の設計波よりも周期が長いことに十分配慮すれば、長周期うねりに対する護岸越波流量は、既存の越波流量算定図を用いて算定することが概ね可能であることがわかった。しかしながら、スペクトル尖鋭度の増加とともに、護岸越波流量は算定値よりもやや大きめの値をとる傾向にあることに注意が必要である。

(2) 短時間越波流量

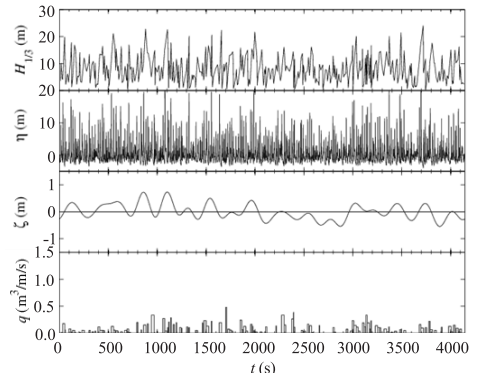
護岸や堤防の天端高の設計では、時間平均越波流量だけを評価対象とするのではなく、不規則波の波群特性や短時間越波流量を考慮することが非常に重要である（関本ら、1992）。たとえば、井上ら（1989）は、不規則波浪の1波毎の越波量を測定することにより、短時間越波流量が平均越波流量の5～10倍、条件によっては20倍程度にも達することを明らかにし、不規則波の波群特性や短時間越波流量の重要性を指摘している。そこで、護岸前面で計測した水位変動の波群特性と短時間越波流量の関係について整理した。

図-9に示すのは、護岸天端高が高い場合における波群特性と短時間越波流量の関係であり、各図の上段から順に、直立護岸前面波高、前面水位変動、前面水位の長周期変動、短時間越波流量を表している。護岸前面波高および水位変動をみると、周期が長く、スペクトル尖鋭度が大きくなるほど、波群の形成や高波高の波の連なりを確認することができる。また、長周期変動および短時間越波流量を合わせて考えると、スペクトル尖鋭度が大きい場合には、波群の形成が確認された時期に顕著な長周期変動が発生し、その水位上昇時と高波の連なりの位相が一致する時間帯に短時間越波流量が増大している。なお、スペクトル尖鋭度が小さい場合にも同様に、長周期変動の卓越時期に短時間越波流量の増大を確認することができるが、その程度は小さい。

図-10に最大短時間越波流量と平均越波流量の比率を示す。この図より、護岸天端高にかかわらず、スペクトル尖鋭度が小さい場合には、周期によらず、最大越波流量と平均越波流量の比（平均値）は概ね3.5～4.5倍であるのに対し、スペクトル尖鋭度が大きい周期14.0s、17.0sの場合では、3.8～6.5倍となり、波群による長周期変動や高波の連なりの影響を強く受けて短時間越波流量が増加することが確認できる。なお、これらの比率は、算定対象とする波数（全波数あるいは越波した波数）や海底



(a) $T=17.0\text{s}$, $\gamma=10.0$



(b) $T=17.0\text{s}$, $\gamma=1.0$

図-9 波群特性と短時間越波流量の関係

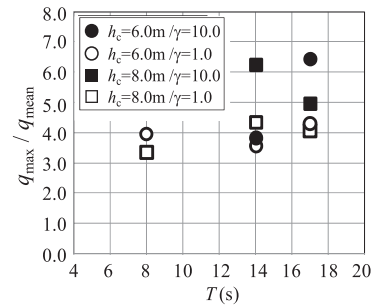


図-10 最大短時間越波流量と平均越波流量の比

勾配等の違いにより、井上ら（1989）による比率とは直接比較することはできない。

このように、周期が長く、スペクトル尖鋭度が大きい波浪（長周期うねり）が護岸に襲来する場合には、数十分間の平均的な越波量だけでなく、短時間に集中して発生する越波量に対して護岸背後の安全性を十分に確保する護岸設計が求められる。

5. 越波低減機能を発揮しうる護岸断面の提案

図-11に、護岸形状の違いによる越波低減効果を比較した結果を示す。ここで、図の縦軸は、「直立護岸」に

対する越波流量を100としたときの各護岸形状に対する越波流量を表した値 R であり、この値が小さいほど、越波低減効果が大きいことを意味する。なお、これらのプロットは3波群の平均値を示している。

護岸天端高が低い場合では、「消波護岸」に対する越波流量は、「直立護岸」に比べ、周期8.0sでは1割未満、周期14.0sでは3割程度、周期17.0sでは4割程度に低減する。また、「消波護岸」の消波ブロック被覆工と断面積がほぼ等しい「透過離岸堤を有する直立護岸」に対する越波流量は、「直立護岸」に比べ、周期8.0sでは1割未満、周期14.0sでは1割程度、周期17.0sでは2割程度に低減する。さらに、両者を比較すると、「透過離岸堤を有する直立護岸」の越波流量は、「消波護岸」に比べて概ね1/3程度に低減している。

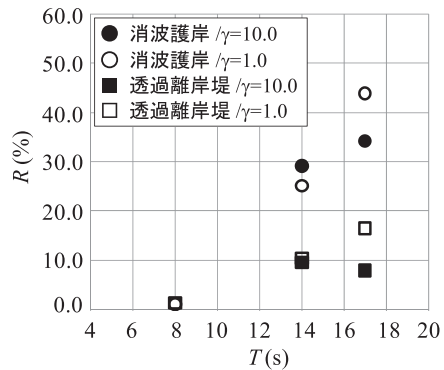
「消波護岸」では、来襲波のエネルギーは護岸前面まで減衰せず、護岸直前に設置した消波ブロック内を波が通過することによりそのエネルギーが減衰し、結果的に越波流量が低減される。一方、「透過離岸堤を有する直立護岸」では、消波ブロック内部を波が通過することにより波エネルギーが減衰することに加え、消波ブロックを護岸から少し沖側の離れた位置に設置することにより、護岸前面ではなく、護岸より少し沖側で強制的に碎波を促進させて波のエネルギーを減衰させている。そのため、「消波護岸」よりも「透過離岸堤を有する直立護岸」において越波流量を低減させる効果が大きくなったと考えられる。また、護岸より少し沖側に消波ブロックを設置することにより、「消波護岸」の場合よりも消波ブロックの法面を駆け上った水塊による越波の発生が抑制されたことも要因の一つであると考えられる。

一方、護岸天端高が高い場合でも、上記とほぼ同様な傾向が確認できる。しかしながら、護岸天端高が低い場合に比べて越波流量の絶対値が小さいため、消波工や透過離岸堤による越波流量の低減効果はより顕著に表れている。なお、護岸天端高にかかわらず、消波工や透過離岸堤による越波流量の低減効果は、スペクトル尖鋭度が大きい場合により顕著に表れている。したがって、これらの越波低減対策は、通常の風波による高波浪だけでなく、長周期うねりに対してより有効に機能することが期待される。

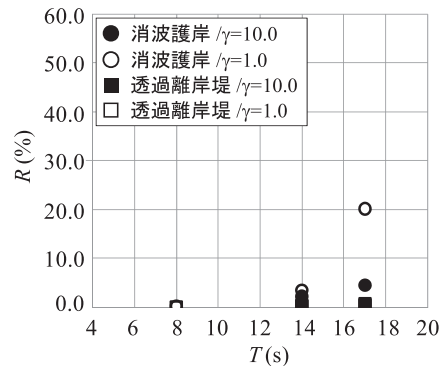
6. おわりに

本研究では、断面水路を用いた水理模型実験により、長周期うねりに対する護岸越波特性を明らかにするとともに、長周期うねりに対する越波低減機能を発揮しうる対策工断面の提案を試みた。

実験結果より、長周期うねりに対する護岸越波流量は、周期が長いことに留意して従来の設計手法を適用するこ



(a) 護岸天端高が低い場合 ($h_c=6.0\text{m}$)



(b) 護岸天端高が高い場合 ($h_c=8.0\text{m}$)

図-11 各護岸形状の越波流量低減効果

とにより推定可能であることが確認された。ただし、長周期うねりに顕著な波群の影響を受けて護岸越波流量が局所的に増大する危険性があることがわかった。また、護岸天端高を相対的に高上げする効果を発揮する消波ブロック被覆工の代わりに、これとほぼ同等の断面積を有する透過離岸堤を直立護岸の前面に設置することにより、通常の高波浪だけでなく、長周期うねりに対しても護岸越波流量を低減させる効果が期待できることがわかった。

参考文献

- 井上雅夫・島田昭・殿最浩司 (1989): 不規則波における越波量の出現分布特性, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.618-622.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊 (1975): 不規則波による棒は護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号, pp.3-44.
- 関本恒浩・国栖広志・清水琢三・京谷 修・鹿島遼一 (1992): 人工島防波護岸の短時間越波特性について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.581-585.
- 平石哲也・平山克也・加島寛章・春尾和人・宮里一郎 (2008): 偶発波浪荷重による被害例とその特性, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.981-985.
- 平山克也・加島寛章・仲井圭二 (2009): 長周期うねりのスペクトルと波群特性に関する考察, 海洋開発論文集, Vol.25, pp.635-640.
- Sand, S. E. (1982): Long waves in directional seas, Coastal Engineering, Vol.6 (3), pp.196-504.