

# 1945年パキスタン・Makran地震津波に基づく パキスタン沿岸域での津波ハザードの検討

## Tsunami hazard assessment along the coast of Pakistan based on the 1945 Makran tsunami

柳澤英明<sup>1</sup>・越村俊一<sup>2</sup>・今村文彦<sup>3</sup>・渡部弘之<sup>4</sup>・江頭達郎<sup>4</sup>

Hideaki YANAGISAWA, Shunichi Koshimura, Fumihiko IMAMURA  
Hiroyuki WATABE and Tatsuro EGASHIRA

Tsunami hazard assessment along the coast of Pakistan was carried out based on modeling of the 1945 Makran tsunami. We first modeled the 1945 Makran tsunami, which is the largest recorded tsunami in Pakistan, to examine its hydrodynamic feature. As a result, we found that the arrival time of maximum tsunami wave at Pakistan coast is prone to be late because tsunami waves are trapped and duplicated on continental shelf with a gentle slope. We further simulated potential tsunami hazard in Pakistan coast developing the scenarios based on historic earthquakes. The results showed that 5-10 m tsunami would strike Ormara and Gwadar city, which are populated areas in Pakistan coast.

### 1. はじめに

2004年インド洋大津波を教訓として、自然災害に脆弱なインド洋沿岸地域では津波に対する早期警戒能力の向上が強く求められている。インド洋において巨大津波を発生させる地震の震源域は、インド洋大津波を発生させた Sunda / Java 海溝とパキスタン・イラン沖合の Makran 沈み込み帯に特定される (Okalら, 2007)。インド洋大津波以後、インドネシアやタイなどの津波被災地では、津波対策の強化が積極的に実施され、津波への警戒体制が整備されつつある。しかし一方で、Makran 沈み込み帯に近接する地域では、津波を評価するための技術や社会的な環境が整っておらず十分な津波対策が実施されているとはいえない。特にパキスタンでは、1945年に  $M_w8.1$  の地震によって巨大津波が発生し多くの人的・物的被害が生じており (Pandse, 1946)、早期に津波警戒体制を整備することが求められている。そこで本研究では、過去の地震記録に基づき津波の数値解析を実施し、パキスタン沿岸での津波ハザードを検討する。

### 2. 1945年 Makran 地震津波

Makran 沈み込み帯に隣接するパキスタン沿岸では、これまで幾度となく大きな地震が発生している。その中でも1945年の Makran 地震 ( $M_w8.1$ ) は、巨大な津波を発生させ、アラビア海全体で最大4000人以上もの人的被害と

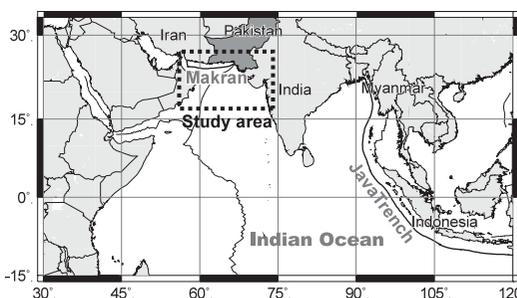


図-1 インド洋におけるプレート境界と解析範囲

なる巨大災害をもたらした (Okalら, 2007) (Pandse (1946) ではこの地震・津波による人的被害は300人程度としている)。ここでは、パキスタン沿岸域で既往最大の津波となる1945年 Makran 地震津波の被害実態を整理するとともに、数値解析を実施し、その特徴を明らかにする。

#### (1) 1945年 Makran 地震・津波とその被害実態

1945年11月27日、パキスタン沖合6kmの地点において (図-2: 25.15N, 63.48E),  $M_w8.1$ , 震源深さ27kmの地震が発生した (Byrneら, 1992)。さらに、この地震によって発生した津波はアラビア海全体に伝播し、沿岸地域に大きな被害を与えた。以下、アラビア海沿岸地域における津波の伝播状況とそれによる被害を整理する (図-2)。

#### a) パキスタン沿岸

震源に最も近い Pasni では、地震発生より約33分後に津波が確認された。このときには内陸深くには遡上することはなかったが、地震発生より約3時間後に再び襲来した津波は最大12-15mにも達し、大きな人的・物的被害をもたらした (Pandse, 1946)。また震源より東115 kmに

1 正会員 博(工) 東電設計株式会社  
2 正会員 博(工) 東北大学准教授大学院工学研究科  
3 正会員 工博 東北大学教授大学院工学研究科  
4 東京海上日動リスクコンサルティング株式会社

位置するOrmaraでは約5mの津波が襲来し、大きな被害が生じた (Hussain et al., 2002). Ambraseys and Melville (1982) の報告では, PasniとOrmara周辺に襲来した津波は, 5-10m程度としている. 一方, 震源より東340kmのKarachiには, 約2時間, 3.5時間, 4.8時間後に最大1.4-1.5m程度の津波が到達し, 被害が発生した (Pandse, 1946). また, インダス川下流のDubbo, Keti Bandar, Jadiwariや震源より西方120kmのGwadarなどでも人的被害が生じている.

この地震に伴い, Ormaraで2mの沈降, Pasniで微少な隆起が確認された (Sondhi, 1947; Ambraseys and Melville, 1982). またPasni-Ormara, Ormara-Karachi, Gwadar沖合ではこの地震による泥火山の噴火によって, 20m以上の局所的な地盤隆起が生じ, 沖合に小さな島が形成された (Sondhi, 1947).

b) その他の地域 (インド, セーシェル)

インド・Mombayでは, 地震発生後4.8時間後に2.0 mの津波が襲来し, 小規模な被害が生じた (Pandse, 1946). 一方, インド・Karwarでは河川のクリークを遡上して氾濫したが, 大きな被害には至っていない (Ambraseys and Melville, 1982). またセーシェルでは約0.5mの津波が観測された (Bilhamら, 2007).

(2) 1945年Makran地震津波の数値解析

a) 津波波源モデル

まず1945年Makran地震の断層位置を制約するため, 波向き線法を用いて津波の逆伝播図を作成した. 図-3の点線は, 津波の到達時間が確認されているPasni, Karachi, Mombayからの逆伝播図で地震発生時の波峰線を示している. 図-3によれば, 波峰線 (点線) と余震分布 (黒点) はよく対応しており, 津波発生源は余震域とほぼ一致しているといえよう. 次に $M_w 8.1 \pm 1$  (Byrneら, 1992) を考慮し, 以下の経験則に基づいて断層パラメータを決定する (Wells and Coppersmith, 1999; 金森, 1991).

$$\text{Log}(A) = a + b \times M_w \dots\dots\dots(1)$$

$$L = 2W \dots\dots\dots(2)$$

ここで,  $A (=L \times W)$  は断層面積,  $L$  は断層長さ,  $W$  は断層幅,  $a (= -3.49)$  および  $b (= 0.91)$  は定数である. 断層破壊面の位置に関しては, 津波の逆伝播図を考慮しつつ, 現地における地盤変動量を満たすように決定した. 以上の条

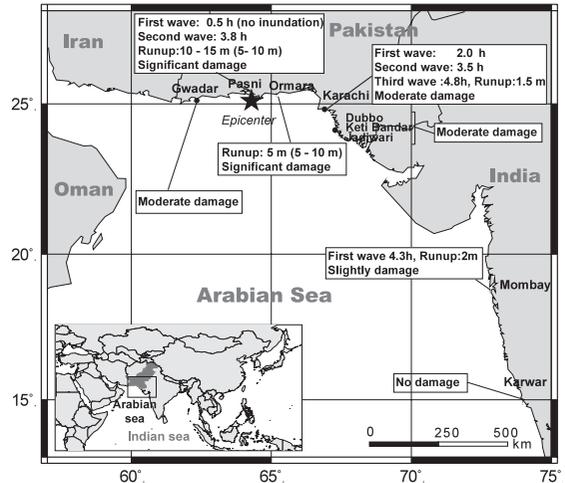


図-2 1945年Makran地震津波によるアラビア海における被害状況

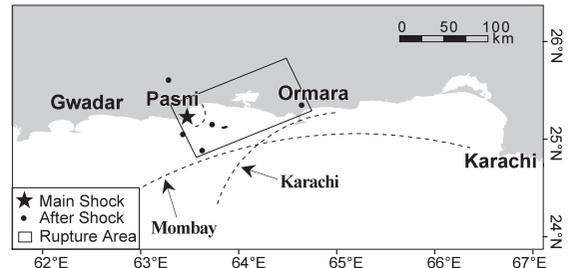


図-3 1945年Makran地震津波の断層位置. 点線は, Pasni, Karachi, Mombayからの逆伝播図で, 地震発生時の波峰線を示す.

件によって決定された断層パラメータを表-1に示す. また図-3には, 設定した断層位置を示した.

b) 数値解析手法

解析領域をオマーンからインド西岸までの範囲とし (図-1), 広領域にはグリットサイズ1,350m, 狭領域には450mの地形データを作成した. データには, 海図 (1:20,000 - 1:50,000) と General Bathymetry Chart of the Oceans (GEBCO) を利用し, 津波解析にはManning粗度を考慮した非線形長波方程式を用いた. パキスタン沿岸の堆積物は, 主にインダス川からの供給によって形成されており (Byrneら, 1992), また1945年の断層近傍には泥火山が存在しているため (Sondhi, 1947), 底質の粒径は一般と比較し細かいと考えられる. そこで本研究では, 海底面の粗度係数  $n$  をパキスタン沿岸の底質分布 (Uchupiら, 2005) に基づいて評価するため, 以下のマニ

表-1 1945年Makran地震津波の断層パラメータ

Origin of the fault (°)		Length (km)	Width (km)	Dislocation (m)	Dip (°)	Slip (°)	Strike (°)	Depth (km)
Latitude	Longitude							
25°13' 23.5"	64°45' 46.4"	130	65	8	7	90	246	15

ング・ストリクラー式を利用した。

$$n = 0.13k_s / \sqrt{g} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $k_s$ は相当粗度 (=底質の代表粒径とする)、 $g$ は重力加速度である。

c) 解析結果

図-4 (a) に、数値解析によって評価された最大津波高と観測記録との比較を示す。ただし文献で記述されている津波の高さは、遡上高もしくは浸水深であるかの定義はなされていないため、ここでは最大津波高と定義し解析結果との比較を行った。図によれば、計算値はどの地点においても観測記録を過小に評価する結果となった。特に、巨大な津波 (> 5 - 10m) が襲来したとされる Pasni や Ormara における計算津波高は4m以下と評価されており、十分な再現性が得られていないことがわかる。これより、地震断層の経験則より想定した津波波源では、明らかに1945年 Makran 地震津波の津波高を再現できないことがわかった。次に、断層モデルの到達時間と波形特性に関する再現性について検討する。図-4 (b) は、Pasni と Karachi における計算波形を示したものであり、図には津波が観測された時間も示した (Pandse, 1946)。図によれば、津波の第1波、2波までの計算結果は、観測された到達時間をよく再現していることがわかる。また Pasni で観測された最大波の遅延 (第2波) についても、非常によく再現されている。以上の解析結果では、津波高の再現性に課題を残しているものの、到達時間や最大波の遅延については再現可能であることがわかった。

d) 津波高の再現性に関する考察

前項において設定した津波波源モデルは、津波の到達時間や最大波の遅延を再現できる一方で、津波高については過小に評価する結果となっていた。この結果から類推すると、津波波源の位置については、おおむね妥当な設定がなされているものの、水面の初期変動量に関しては適切な設定が行われていないと考えられる。ここでは、前項の波源モデルの位置を参考にいくつかの小波源域を設定することで、津波波源の特徴を把握していく。図-5 に示すような5つの小波源 (S1~S5: 幅65km×長さ20km) を設定し、それぞれの波源で数値解析を実施した。深さ、走行、傾斜角、すべり角は前項での断層モデルに従い決定し、すべり量に関してはD=20mと設定した。

図-6は、各小波源による Pasni における時間波形である。これによれば、小波源 S1 - S2 が第2波を卓越させる一方で、小断層 S3 - S5 が第1波を増幅させる傾向を持っていた。観測記録では、Pasni における津波の第1波は浸水することなく、第2波が大きな被害をもたらしたとされており (Pandse, 1946)、小波源 S3 - S5 は1945年 Makran 地震津波の特徴を再現する波源ではないことがわかる。こ

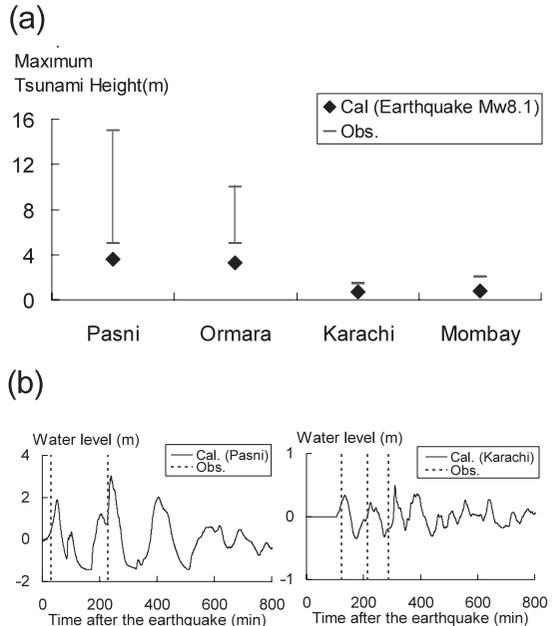


図-4 計算結果と観測記録との比較(a) 計算最大津波高と津波痕跡高(b) 計算時間波形と観測到達時間

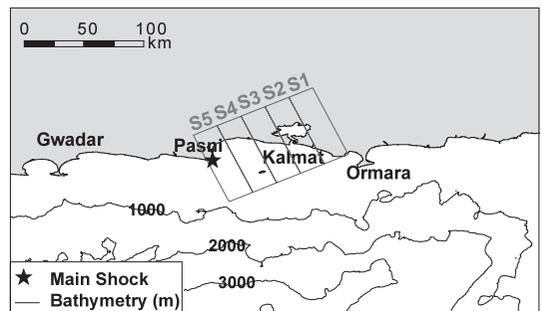


図-5 小波源の設定位置。実線コンターは水深を示す。

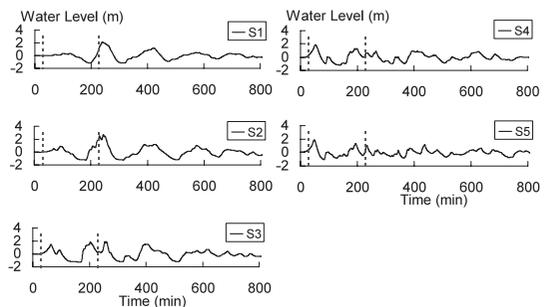


図-6 各小波源による津波のPasniでの計算時間波形

れより、小波源 S1 - S2 における津波が、1945年 Makran 地震津波に大きく影響していた可能性が示された。

このような局所的な津波波源が存在する要因を考察すると、以下の二つの状況が仮定される。

- (I) 断層の不均一性 (アスペリティ) の影響
- (II) 地震運動による地盤変動以外の要素の発生 (泥

火山の噴火や地すべりなど)

(I)を考慮した場合、大きなアスペリティが存在する周辺地域では隆起量も卓越してくると考えられる。しかし、Ormaraで観測された地盤隆起量は2m程度であり、M8程度の地震においては、卓越した隆起量とはなっておらず、(I)の仮定では現象の説明は難しいといえる。一方(II)の仮定に関して、1945年Makran地震の発生時、泥火山のガス噴火にともなう局所的な地盤上昇(20m以上)により、Ormara-Kalimat間、Gwadar西、そしてOrmara-Karachi間に島が発生し、その中でもOrmara-Kalimat間では二つの島が発生し、島の大きさも他と比較し大きなものが形成された(Sondhi, 1947)、このOrmara-Kalimat間の島が確認されている位置(25°10'N, 64°12'5"E; 25°9'5", 64°14'5")は小波源S1-S2とよく一致しており、この類推から、1945年Makran地震津波が泥火山の噴火によって発生した局所的な水面変動に大きく影響された可能性があることが示唆される。

e) 1945年Makran地震津波のモデル化

前項より、1945年にMakranで発生した津波は、地震による断層運動と泥火山の噴火などによる局所的な海面変動によって発生したものと類推された。そこで、地震の断層運動(Mw8.1)によって決定される津波波源に、局所的な変動を付加することで初期水位分布を仮定し、1945年Makran地震津波の再現を試みる。泥火山噴火によるものと考えられる局所的な海面変動を正確に再現することは困難であるため、ここでは小波源S1とS2の断層パラメータによる地盤変動量(隆起部分のみ)を参考とし、Ormara-Kalimat間における局所的な水面変動量を試行錯誤的に決定した(表-2)。

図-7(a)(b)に、数値解析結果と観測記録との比較を示す。津波高に関しては、Pasniで7.8m、Ormaraで5.6mとなり、観測記録に近い結果を示した。また時間波形に関しても、PasniやKarachiでの到達時間がある程度再現しており、さらにはPasniにおける最大波の遅延についてもよく再現している(図-7(b))。以上より、Ormara-Kalimat間における局所的な海面変動と地震による断層運動を考慮した波源モデルを利用することで、1945年Makran地震津波を再現可能であることが示された。

ここで、Pasniに発生した最大波の遅延に関するメカニズムを数値解析より検討する。解析結果によれば、約30-90分の間に第一波がPasniやOrmaraに到達する。その

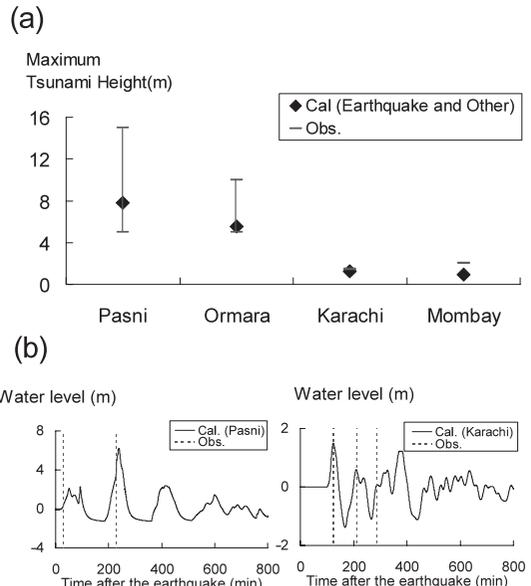


図-7 計算結果と観測記録との比較(a) 計算最大津波高と津波痕跡高(b)計算時間波形と観測到達時間

後、大陸棚で反射を繰り返し、240分後にPasniで最大波が発生していた。これより、1945年Makran地震津波で観測された最大波の遅延は、大陸によって反射した波が浅瀬にトラップされ、いくつかの波が重複する多重反射波によって生じたことが数値解析より明らかとなった。パキスタン沿岸地域は、浅瀬が続き、その後急激に深くなるような地形を形成しており、津波のエネルギーをトラップしやすくなっているといえよう。

3. パキスタン沿岸域における津波ハザード

過去の地震記録に基づき想定断層を設置し、パキスタン沿岸での津波ハザードを検討する。

(1) 想定断層の設定

想定地震の震源は過去発生した大きな地震(1765年, 1851年, 1945年)を参考に設定し(Byrneら, 1992)、断層破壊面は震源の中央、左端、右端に設定した(図-8)。地震の規模は、既往最大となる1945年Makran地震を参考にMw8.1と設定し、断層面積およびすべり量は相似則によって評価した(表-1, 式1)。地震断層の走行は、Makran沈み込み帯周辺で発生した地震を考慮し、246°, 270°, 294°の3ケースを想定した。震源の深さはプレート境界に基づいて決定し、傾斜角、すべり角は1945年の

表-2 1945年Makran地震津波に関する波源のパラメータ

Factor	Origin of the fault (°)		Length (km)	Width (km)	Dislocation (m)	Dip (°)	Slip (°)	Strike (°)	Depth (km)
	Latitude	Longitude							
Earthquake	25°21' 9.36"	64°45' 46.4"	130	65	8	7	90	246	15
Other	25°13' 23.5"	64°23' 42.0"	40	65	30	7	90	246	15

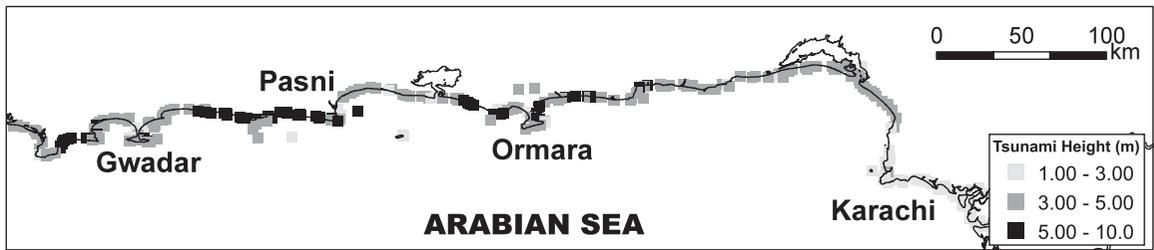


図-9 パキスタン沿岸域における津波ハザード

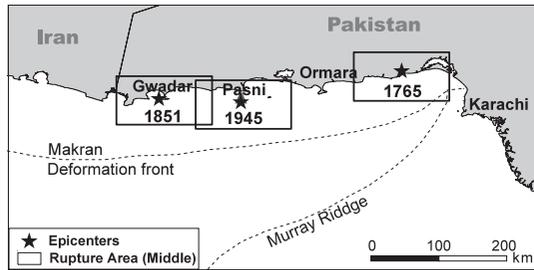


図-8 断層の想定位置 (走行270°, 震源中央のケース)

地震を参考とした (Byrneら, 1992). 今回想定した地震断層は全27ケースである. ただし, ここでは不確実性の高い火山噴火や地滑りなどによる局所的な水面変動は考慮しないこととした.

## (2) 津波ハザードの検討結果

図-9に, 想定断層によってシミュレーションされた海岸線における最大津波高分布を示す. これによれば, パキスタン西岸では津波のハザードが高く, 特にGwadar, Ormaraでは5-10m以上の津波が襲来している. 2004年インド洋大津波の事例によれば, 3m以上の津波が襲来した場合に人的・物的被害が大きくなることが示されており (大家ら, 2006), これらの地域では特に津波対策の強化が求められる. また津波高1-3mであっても被害が発生する危険性が高く, KarachiやJiwani, Pasniなどの人口密集地域では津波対策を実施することが望まれる.

## 4. まとめ

本研究で得られた成果を以下に列挙する.

- (1) 1945年Makran地震津波の波源は, 地震の断層運動以外の局所的な水面変動を考慮することで, 観測記録, 被害状況を説明可能となることがわかった.
- (2) 1945年Makran地震津波における最大波の遅れの原因は, 数値シミュレーションの結果, 大陸によって反射した波が浅瀬にトラップされ, いくつかの波が重複する多重反射波によって生じていたことが明らかとな

った. パキスタン沿岸では最大波が数時間後に発生する可能性もあり, 避難解除までに長時間の警戒体制の維持が必要といえる.

- (3) 津波発生シナリオに基づきパキスタン沿岸の津波ハザードを検討した. その結果, OrmaraやGwadarで5-10m以上の津波が襲来するリスクがあることがわかった. ただしこの解析では, 泥火山の噴火などによる局所的な水面変動を考慮しておらず, 今後, 局所的な水面変動の可能性を含めて津波ハザードを議論する必要がある.

## 参考文献

- 大家隆行, 越村俊一, 柳澤英明, 今村文彦 (2006) : 2004年インド洋大津波によるバンダ・アチェ市街地の津波氾濫解析と被害評価, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 221-225.
- 金森博雄 (1991) : 地震の物理, 岩波書店, 279p..
- Ambraseys, N. N. and C. P. Melville (1982) : A history of Persian earthquakes, Cambridge University Press, New York, 219p..
- Bilham, R., S. Lodi, S. Hough, S. Bukhary, A. M. Khan and S. F. A. Rafeeqi (2007) : Seismic hazard in Karachi, Pakistan: uncertain past, uncertain future, Seismological research letters, Vol.78, pp.601-613.
- Byrne, D. E., L. R. Sykes and D. M. Davis (1992) : Great thrust earthquakes and aseismic slip along the plate boundary of the Makran subduction zone, Journal of geophysical research, Vol.97, No.B1, pp.449-478.
- Hussain, j., A. K. Butt and K. Pervaiz (2002) : Makran coast: A potential seismic risk belt, Geological bulletin Univ. Peshawar, Vol.35, pp.43-56.
- Okal, E. A. and C. E. Synolakis (2007) : Far-field tsunami hazard from mega-thrust earthquakes in the Indian Ocean, Geophysical journal international, Vol.172, pp.995-1015.
- Pandse, C. G. (1946) : The Mekran Earthquake of the 28th November 1945, Sci.Notes, India meteorological department, pp.141-145.
- Sondhi, V. P. (1947) : The Makran earthquake, 28th November 1945: The birth of new Islands, Indian minerals, pp.147-158.
- Wells, D.L. and K.J. Coppersmith (1994) : New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, Bulletin of the seismological Society of America, Vol.84, pp.974-1002.