Japan Concrete Institute

コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 3, 1998

論文　繰り返しによる耐力低下が鉄筋コンクリート構造の地震応答に与える影響

境有紀[*1]・梅村恒[*2]・南忠夫[*3]・壁谷澤寿海[*4]

要旨：鉄筋コンクリート構造が繰り返し大変形を受けた時の耐力低下を考慮した復元力特性モデルを開発し，これを用いた一自由度系の弾塑性地震応答解析およびサイン波応答解析を行って，繰り返しによる耐力低下が地震応答に与える影響について検討した．その結果，入力地震動の繰り返し回数が多く，系の周期が地震動の卓越周期の半分以下の時は，地震応答は２倍から５倍以上となることがあるが，繰り返し回数の少ない地震動や繰り返し回数が多くても，地震動の卓越周期より系の周期が長い場合や両者が変わらない場合は，地震応答は変わらないか，逆に小さくなることがわかった．

キーワード：耐力低下，繰り返し大変形，Takedaモデル，地震応答解析，サイン波

１．はじめに

鉄筋コンクリート構造が繰り返し大変形を受ける時，同一変形で繰り返しても，繰り返す度に耐力が低下していく現象が見られ[1)]，このような現象が地震応答に影響を及ぼすと考えられるが，Takeda モデル[2)]等の地震応答解析でよく使われる復元力特性モデルでは，この繰り返しによる耐力低下が考慮されていない．

本研究では，繰り返しによる耐力低下を考慮した復元力特性モデルを開発し，これを用いた弾塑性地震応答解析およびサイン波応答解析を行って，繰り返しによる耐力低下が地震応答に与える影響について検討した．

２．繰り返しによる耐力低下を考慮した復元力特性モデル

鉄筋コンクリート造を対象とし，Takeda モデルに修正を加えることによって，繰り返し大変形時の耐力低下を考慮する（Fig.1）．

Takeda モデルでは，復元力０の点を横切る時に以前に経験したループのうち，反対側の最も内側のループの最大点を指向するが，本モデルでは，損傷が進行することによって指向する最大点が式(1)のように増大するように修正する．

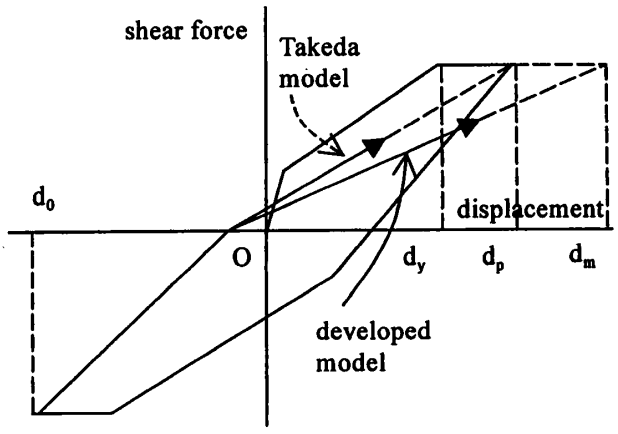


Fig.1 Hysteresis model considering strength degradation by cyclic loading

$$d_m = d_p + \chi \cdot \mu_0 \qquad (1)$$

ここで，μ_0：前回の反対方向の最大塑性率（$=d_0/d_y$，d_y：降伏変位），d_p：前回同一方向の最大変形，χ：指向する点の変形の増大率（耐力低下率）

指向する点の増大率χは，繰り返しによる

*1 東京大学助手　地震研究所　工博（正会員）
*2 東京大学大学院工学系研究科　（正会員）
*3 東京大学教授　地震研究所　Ph.D.
*4 東京大学教授　地震研究所　工博（正会員）

NII-Electronic Library Service

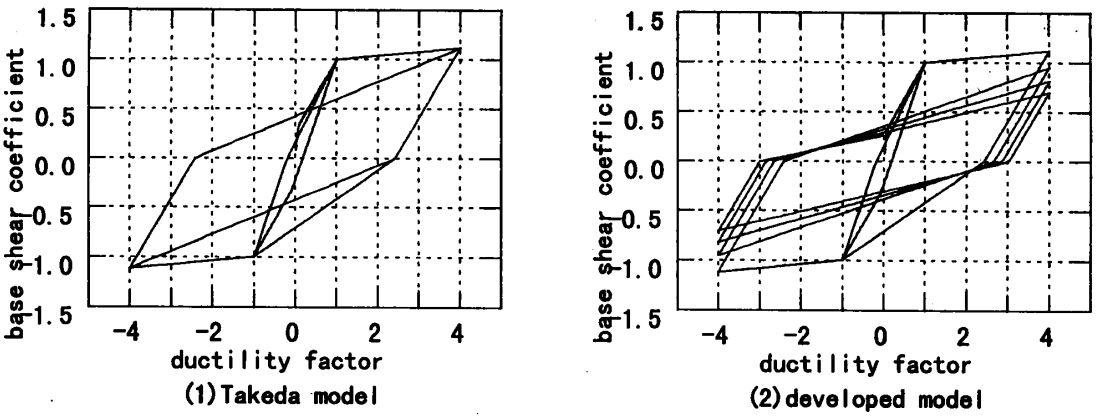


Fig. 2 Comparison between hysteresis model considering strength degradation by cyclic loading and Takeda model

耐力低下を表現する指標であり（以下耐力低下率と呼ぶ），これが大きいほど繰り返しによる耐力低下の度合いが大きくなる．このχは，例えば曲げ破壊する鉄筋コンクリート造柱の場合は，配筋詳細を考慮した横補強筋量，軸力の大きさ等によって決まってくる量である．

繰り返しによる耐力低下を考慮したモデル（$\chi=0.1$）を Takeda モデルと比較して Fig.2 に示す．開発したモデルは同じ変形で繰り返しても耐力が低下していくという現象を表現できることがわかる．

3．地震応答解析

まず一自由度系を用いた地震応答解析を行った．用いた入力地震動を Table 1 に示す．FKI と SCT は，長周期，KSR は短周期が卓越し，また，FKI は繰り返し回数が少なくパルス的な地震動であるのに対して，KSR と SCT は繰り返し回数が多い地震動である．

解析方法は，まず Takeda モデルを用いて，塑性率をある一定値に収めるために必要なベースシア係数を各地震動について振動系の弾性周期を 0.25, 0.5, 1.0, 2.0 秒と変化させて求める．ここでは大変形を想定し，許容塑性率は 4 とする．降伏点剛性低下率は 0.25，除荷剛性低下率は 0.5，降伏後の剛性は初期剛性の 0.01 倍と固定とする．次に求めた必要ベースシア係数をもつ振動系の復元力特性に，開発したモデルを用いた応答解析を行い，応答塑性率を求める．開発したモデルの耐力低下率は，0（Takeda モデルに等しい）から 0.3 まで変化させる．そして，求めた応答塑性率を Takeda モデルの応答塑性率（＝許容塑性率）で規準化した塑性率増大率によって，繰り返し大変形によって生じる耐力低下が地震応答に与える影響について考察する．なお，減衰は全て減衰定数 5%，瞬間剛性比例とした．

系の弾性周期が 0.5 秒の場合を例として，応答塑性率－応答ベースシア係数関係を耐力低下率が 0（Takeda モデルに等しい）と 0.3 の場合を比較して Fig.3 に示す．

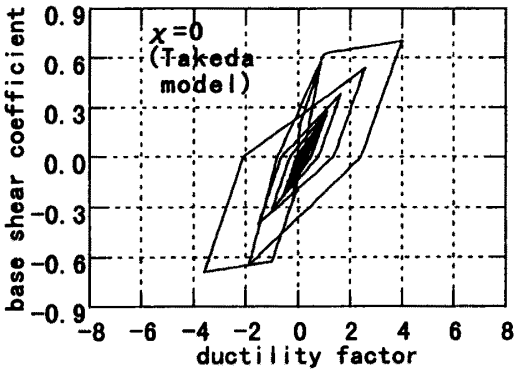
繰り返し回数の少ないパルス的な地震動であ

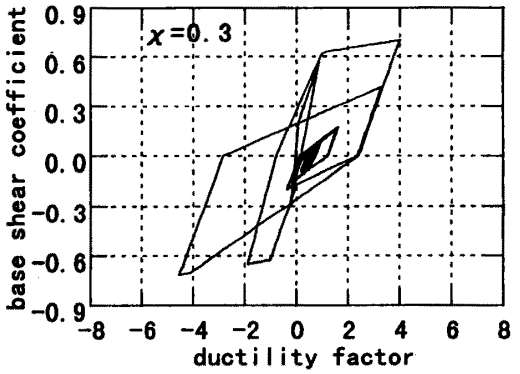
Table 1 Strong ground motions

ID	Station	direction	Earthquake	PGA*
FKI	Osaka Gas Fukiai Station	NS	1995 Hyogoken-Nanbu	802
SCT	SCT1	EW	1985 Mexico	168
KSR	Kushiro JMA	EW	1993 Kushiro-oki	711

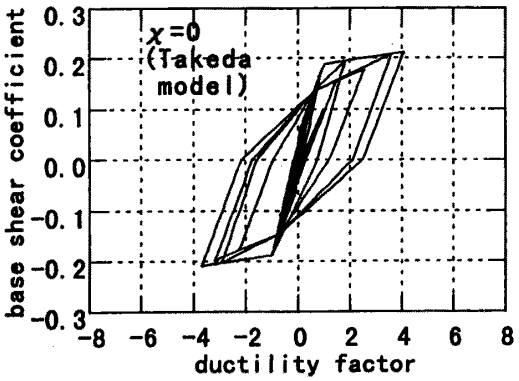
*PGA: peak ground acceleration(cm/sec.^{2})

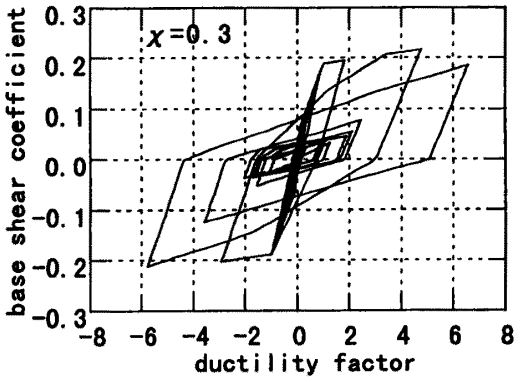
NII-Electronic Library Service



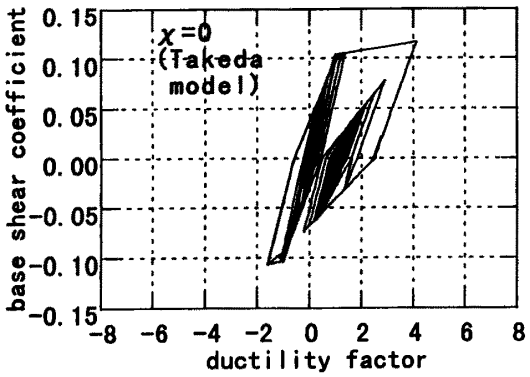


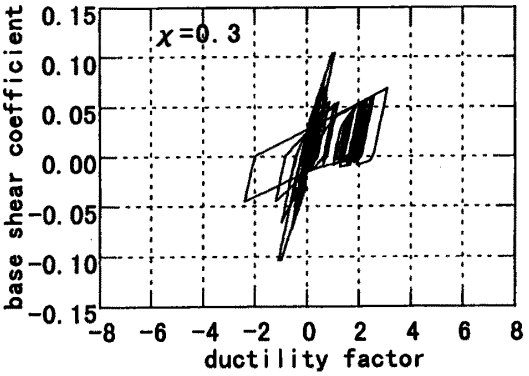
(1) FKI





(2) SCT





(3) KSR

Fig. 3 Examples of relation between response ductility factor and base shear coefficient

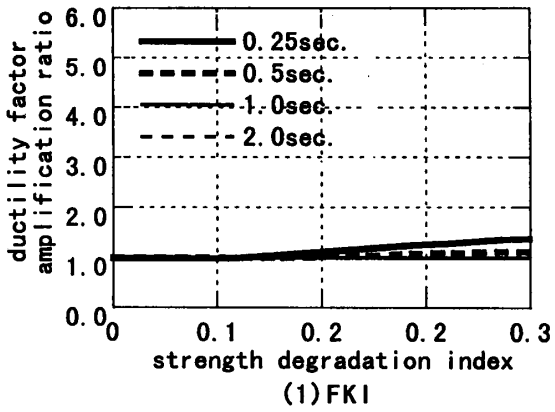
NII-Electronic Library Service

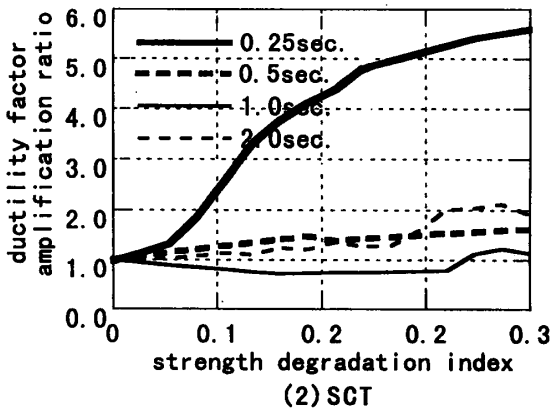
Japan Concrete Institute

る FKI は，繰り返しによる耐力低下の影響は小さいのに対して，繰り返し回数の多い SCT はその影響が大きく，耐力低下率 χ が 0.3 の場合の最大応答塑性率は，χ が 0 の場合の 1.5 倍以上になっている．

しかしながら，同じく繰り返し回数の多い KSR は，繰り返しによる耐力低下は起こっているが，χ が 0.3 の場合の最大応答塑性率は，χ が 0 の場合より逆に小さくなっている．

耐力低下率と塑性率増大率の関係を各地震動について Fig.4 に示す．繰り返し回数の多い KSR や SCT は耐力低下率によって塑性率増大率が大きく変化しているが，系の周期によっては，必ずしも耐力低下率が大きいほど塑性率増大率が大きくなっているとは限らない．これは，繰り返しによる耐力低下によって系の周期が伸びると，系の等価周期が地震動の卓越周期を越えてしまい，逆に応答が小さくなるためであると考えられる．





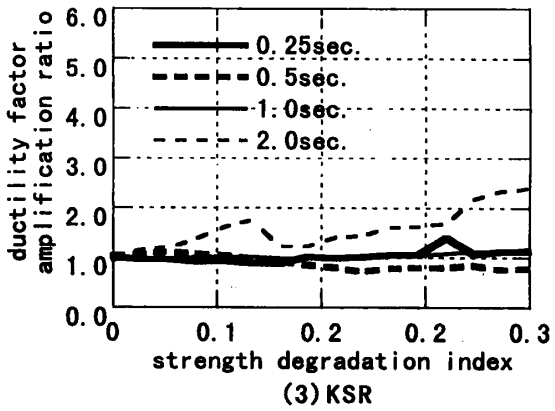


Fig.4 Relation between strength degradation index and ductility factor amplification ratio

4．サイン波を入力した応答解析

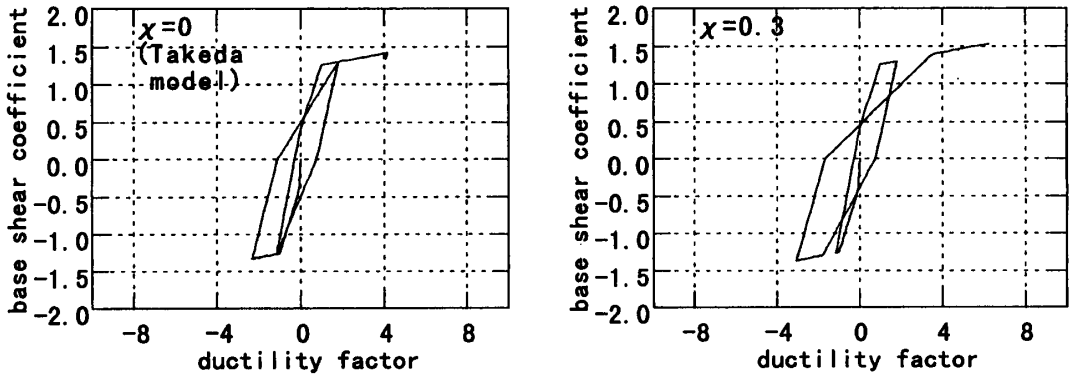
そこで，このことを単純な地震動で考察するために，一自由度系を用い，サイン波を入力した応答解析を行った．サイン波の応答は，最大加速度と系のベースシア係数の比とサイン波の周期と系の弾性周期の比によって決まるので，サイン波の最大加速度，周期はそれぞれ 1g（g：重力加速度），1秒と固定し，繰り返し数を1，2，4，8回と変化させた．サイン波の周期が1秒の時の系の弾性周期は，サイン波の周期を変化させた時の，系の弾性周期／サイン波の周期に相当するので，以下系の弾性周期を周期比と呼び，これを 0.125, 0.25, 0.5, 1.0 と変化させる．

解析方法は3．地震応答解析と同様に，耐力低下率を変化させた時の Takeda モデルからの塑性率増大率を求める．

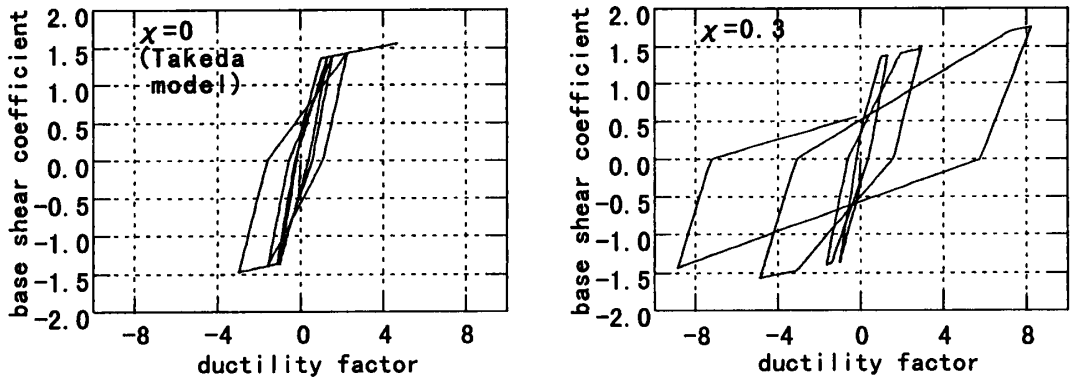
周期比が 0.25 の場合を例として，復元力モデルが Takeda モデルと耐力低下を考慮したモデルの場合（耐力低下率 0.3）の応答塑性率－応答ベースシア係数関係を比較して Fig.5 に示す．

繰り返し数8の場合を見ると，Takeda モデルの場合は，繰り返す度に最大応答変形を更

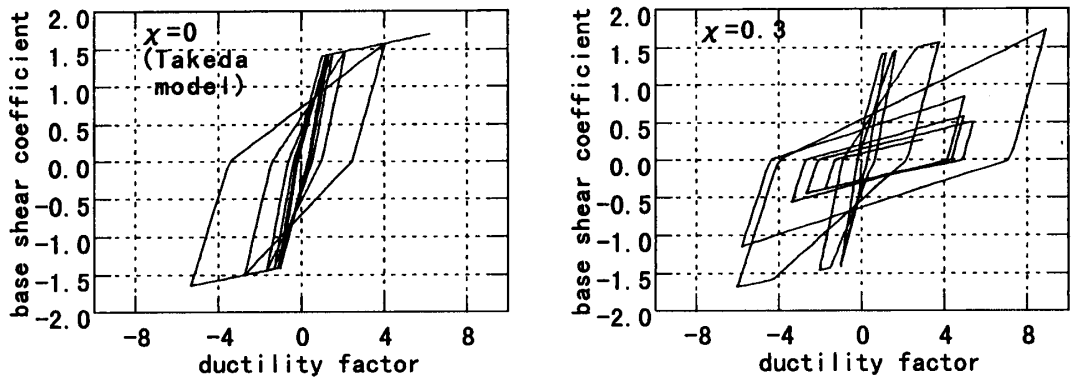
NII-Electronic Library Service



(1) cycles: 2



(2) cycles: 4



(3) cycles: 8

Fig. 5 Examples of relation between response ductility factor and base shear coefficient under the input of sine waves

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

新していくが，耐力低下を考慮したモデルでは５サイクル目からは，最大応答変形を更新していない．これは，５サイクル目の系の等価周期がサイン波の周期より長くなり，応答が小さくなるためである．

耐力低下率と塑性率増大率の関係を各繰り返し回数について Fig.6 に示す．系の周期比が 0.125, 0.25 と小さい場合，系の周期が伸びると応答が大きくなるため，耐力低下率が大きく，繰り返し数が多いほど塑性率増大率は大きくなっているが，周期比が 0.5, 1.0 と大きい場合は，耐力低下によって系の周期が伸びると応答が逆に小さくなるため最大値が更新されず，応答塑性率の耐力低下率による変化はない．

５．まとめ

鉄筋コンクリート構造が繰り返し大変形を受けた時の耐力低下を考慮した復元力特性モデルを開発し，これを用いた一自由度系の弾塑性地震応答解析およびサイン波応答解析を行って，繰り返しによる耐力低下が地震応答に与える影響について検討した．その結果，

・入力地震動の繰り返し回数が多く，系の周期が地震動の卓越周期の半分以下の時は，耐力低下によって地震応答は２倍から５倍以上となることがあるが，

・繰り返し回数の少ない地震動や繰り返し回数が多くても，地震動の卓越周期より系の周期が長い場合や両者が変わらない場合は，地震応答は変わらないか，逆に小さくなることがわかった．

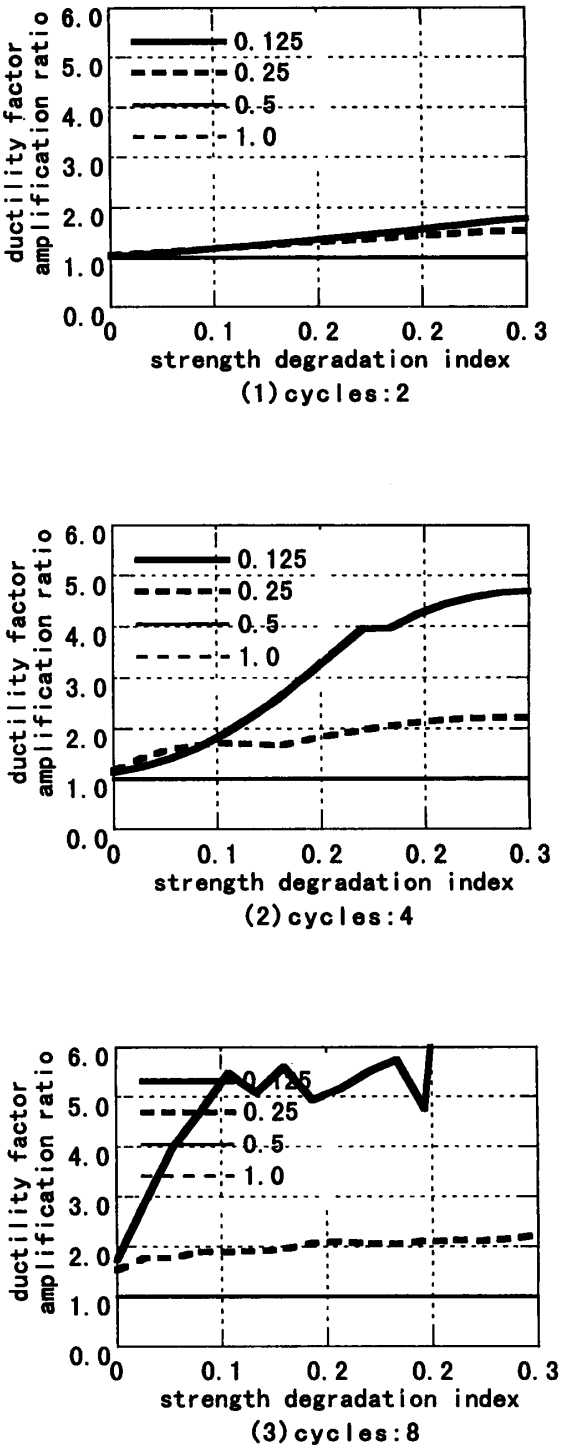


Fig.6 Relation between strength degradation index and ductility factor amplification ratio under the input of sine waves

参考文献

1) 例えば，藤野隆，野村設郎，衣笠秀行：曲げ破壊する柱部材の正負繰り返し載荷における破壊挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18, No.2, pp.737-742, 1996.6

2) Takeda, T., Sozen, M.A. and Nielsen, N.N. : Reinforce concrete response to simulated earthquakes, Journal of Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, pp.2557-73, Dec.1970

謝辞

1995 年兵庫県南部地震の強震記録は，大阪ガスより提供を受けた．

NII-Electronic Library Service