

図3 (P5参照)

下図：波形インバージョンにより求められた断層面内での地震モーメント解放量の空間分布。中図：反射波探査断面を参考にモデル化された震源断層周辺域の3次元地下構造。上図：3次元構造モデル（中図）とインバージョンによる震源過程（下図）を想定したとき震源断層の周辺の地震動の最大速度の分布。下図と中図に示される震源断層面A, B, C, D, Eは図1に対応している。

目次

| | |
|--|----|
| 地震研究所公開のお知らせ | 2 |
| 大加速度(速度)強震動の成因解明と強震動—地震被害との相互連関性に関する研究 | 3 |
| なぜ火山の火道を掘りたいか？ | 9 |
| ミッドウェイを訪ねて | 12 |
| 地震研究所共同利用・特定研究課題登録のお知らせ | 14 |
| 地震研究所構成員表 | 15 |
| 地震研の出来事 | 16 |
| New Staff | 17 |
| 編集後記 | 19 |

大加速度（速度）強震動の成因解明と 強震動—地震被害との相互連関性に関する研究

京都大学防災研究所 入倉孝次郎
東京大学地震研究所 境 有紀・工藤一嘉

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、住家の倒壊と火災などにより6千余名の死者と各種建造物の倒壊・破損などの未曾有の被害が発生しました。今後の地震に対する安全性確保がこれまで以上に強く社会から要請されています。

地震対策のために検討しなければならない地震動は、大局的には3つの要因の相乗効果として理解されます。つまり、震源での地震波動の生成メカニズムとその地殻内での伝播による変化、そして建造物や観測点のある地表付近の浅い地下構造に影響された結果です。強い地震動が入力し、建造物の応答がその耐力を越えると、建造物は破壊（倒壊）することになります。兵庫県南部地震は最近のもっとも甚大な被害をもたらした事例です。強震動の強さや性質を決めるのは先に述べた、震源・経路・サイト効果ですが、それぞれがさらに多くの要因によって支配されます。どの要因がどのように影響するかを正確に把握しなければ、適切な強震動予測につながりません。過去の経験を踏まえ、かつ地震動を正確に予測しなければ建造物の経済性を考慮した耐震設計が出来ない、あるいは都市の地震安全性を確保することが出来ません。震源や経路の特性については主として理学系の研究者が対象としており、サイト効果については理学と工学系の両者が研究対象としており、勿論建造物の耐震研究は工学者によって行われています。この共同研究は、それぞれが対象とする研究を深めると同時に、討議を通じて対象間のギャップをなくし、より総合的な強震動評価を目指しています。本年度は3年計画の最終年度にあたり、まとめを準備する段階ですが、これまで中心的な議論となった兵庫県南部地震の神戸周辺での地震動とその建造物への破壊力の評価について概略を紹介します。

2. 阪神・淡路大震災を引き起こした強震動

1995年兵庫県南部地震の時どうしてあのように大きな被害が引き起こされたかを考えるには、被害の元となった強震動がどのようなものだったのか知

る必要があります。これまでの大地震では大きな被害を受けたところで強震動はほとんど記録されておられません。地震動の強さは逆に被害の程度から評価されてきました。そのため、地震動と被害の関係は推量の域を出ませんでした。断層近傍でかつ被害地の周辺での強震動記録が得られたのは日本では今回が初めてです。

兵庫県南部地震以前にはデータの公開を前提とした公的機関による強震動観測は気象庁が各都道府県に1—2箇所程度（全国に約80箇所）配置している以外ほとんど行われておりませんでした。他の公的機関の強震データの利用は機関によってまちまちで、中には非公開のものもありました。その意味では、今回の地震でもデータ公開が約束されていた公的機関による阪神地域の強震記録は神戸海洋気象台1点のみといえます。耐震設計用の基礎資料として強震動観測の重要性はこれまでも指摘され、日本では国立の研究機関と民間会社の自主的な努力でほそぼそ観測が続けられてきました。しかし、データがあまり公開されないことや、観測点の配置は極端に大都市中心で、特に東京およびその周辺地域に集中しているなどの問題がありました。今回の地震は神戸という大都市の中心街を襲ったため、鉄道、電力、ガス、建設等の民間会社、および関震協という任意団体の設置していた強震計で記録が得られました（図1）。これらの強震動記録は今後の災害軽減対策を考えるための貴重なデータとして民間機関からも公開されております。

地震動の大きさは家屋や橋などの建造物上では建造物そのものの振動特性により増幅あるいは減幅されますのでここでは地表面地盤上で記録されたものを考えることにします。観測された強震動記録のなかで、最大加速度は神戸市葺合（FKA）での水平NS成分810cm/s/s（ガル）、最大速度は神戸市鷹取（TKT）での水平NS成分138cm/sです。これまでの地震で観測された強震動記録で最大加速度の大きいものは、日本では1993年江差沖地震（Mj 6.3）の時、震央から約20km離れた乙部町で水平成分

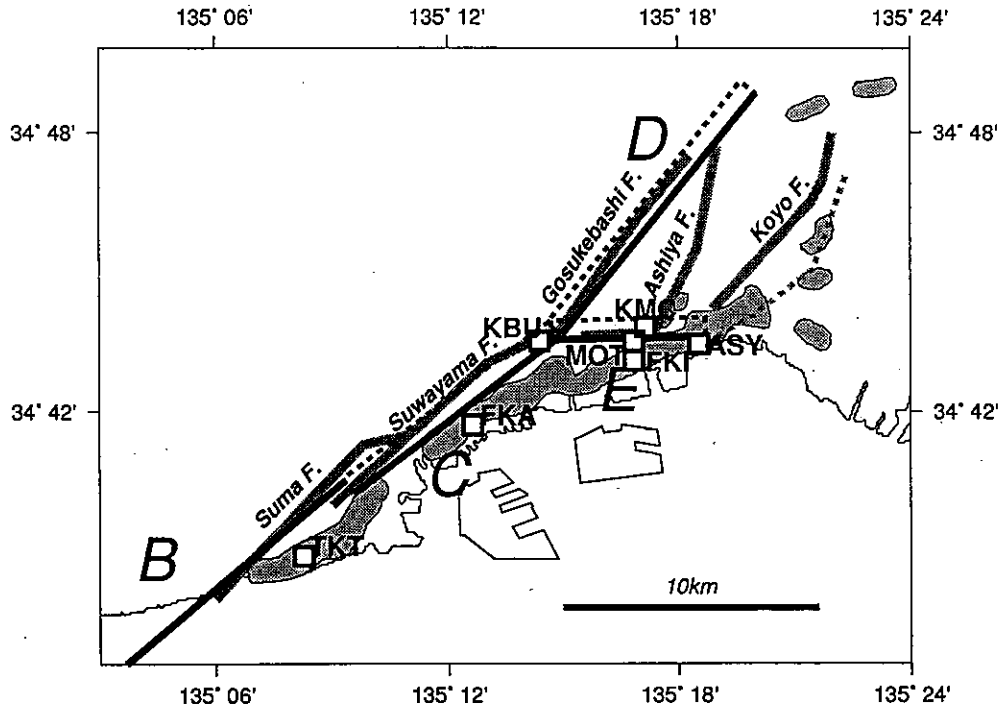


図1 震源近傍域での強震動観測点 (■) 分布。影部は気象庁が発表した震度7の領域。A, B, C, D, Eは波形インバージョンのためにモデル化された震源断層面の位置。

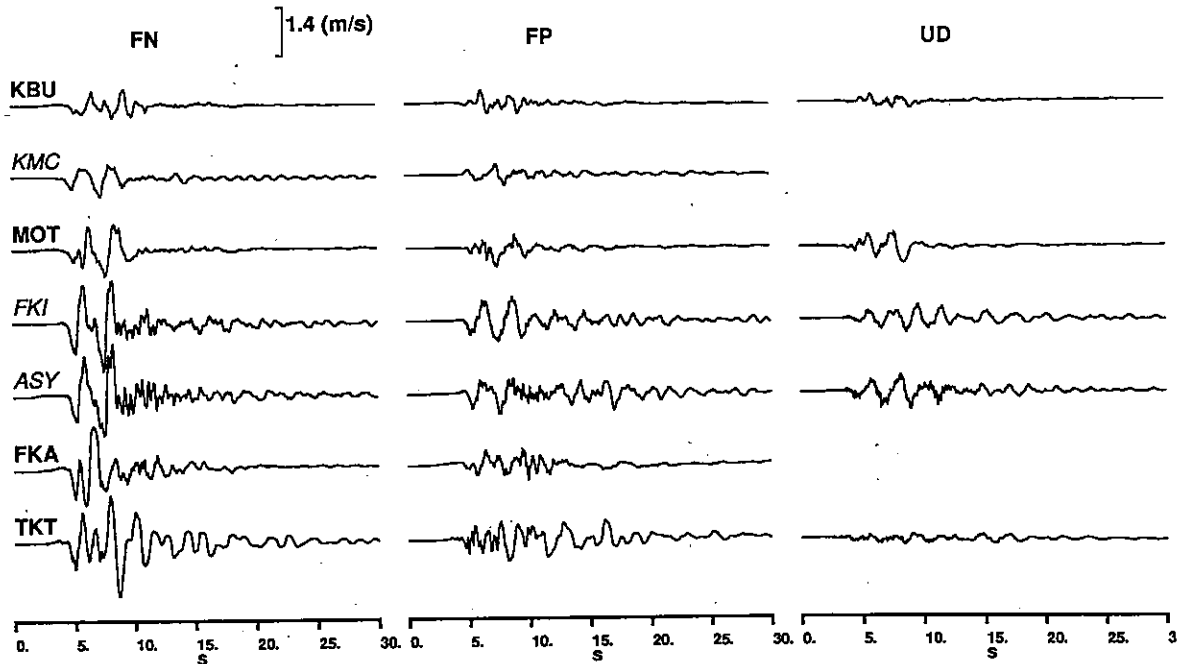


図2 震源断層近傍における速度記録。左：断層直交方向の水平動，中：断層平行方向の水平動，右：上下動。KBU (神戸大学) と KMC (神戸薬科大学) は岩盤上，TKT (JR鷹取駅)，FKA (大ガス葺合)，FKI (福池小)，ASY (芦屋精道小) は震度7の帯の中，MOT (本山第1小) は断層域と震度7の帯の中間に位置している。KBU, MOT, TKT, FKA の記録は本震の観測記録。KMC, FKI, ASY の記録は余震記録を経験的グリーン関数として合成された本震の記録。

1,562 cm/s/s, 1995年釧路沖地震 (Mj 7.8) の時、震源から約100kmの釧路気象台で水平920 cm/s/sなどが記録され、米国では1994年ノースリッジ地震 (Mw 6.6) のとき震央から南約6km離れたターサナ地点で水平成分1888 cm/s/sをはじめとして1g

(約980 cm/s/s) 程度を越えるものは何回も記録されております。最大速度については1994年ノースリッジ地震のとき震央から北約9km離れたリナルディ地点で水平成分170 cm/sが記録され、1992年ランダース地震 (Mw 7.2) では断層から約1km離

れたルセルナ地点で水平成分146cm/sが得られています。したがって、兵庫県南部地震のとき震源近傍域で記録された大加速度及び大速度の記録はこれまでのものに比べて驚くにはあたらない数値といえます。

構造物の設計用入力地震動の大きさの推定のためによく用いられる震源断層からの距離と最大加速度や最大速度の経験的關係式と比較してみますと、兵庫県南部地震のときに記録された強震動は経験式によく一致していることが分かります (Fukushima and Irikura, 1997)。しかしながら、兵庫県南部地震のとき強震動が記録された神戸市の鷹取や葺合の近傍地域の被害はこれまでの地震でより大きな最大加速度や最大速度を記録した地域と比較して明らかに大きかったと思われまます。このことから兵庫県南部地震が発生した地震動は極めて大きな破壊力を持っていたのではないかと考えられます。

そこで震源近傍での強震動の波形がどのようなものであったかを図2に示してみます。観測点KBUは神戸大学キャンパスにある観測用のトンネル内の岩盤露頭に置かれていたため、伝播経路やサイト近傍の複雑な表層構造の影響が少なく、断層破壊により生じた地震動を忠実に記録していると考えられます。TKTとFKAは先に述べた神戸市鷹取と葺合で、気象庁の発表した震度7の帯の中あるいはその帯の極近傍に位置しております。MOTは東灘区の本山第1小学校で震源断層と震度7の帯の中間に位置します。MOTでは観測された速度波形は一部飽和(40cm/s)していましたが、サーボ計の理論を基に復元されております (Kagawa et al., 1996)。地震被害の集中域の一つである神戸市東灘区では、地震直後に断層近傍の岩盤上や震度7の帯内に強震計を設置し、余震による強震動の観測が行われました (Iwata et al., 1996)。これらの臨時観測点では余震記録を経験的グリーン関数として用いて本震の強震動が合成されております (Kamae and Irikura, 1998)。ここでは観測記録が少ないのを補うため、岩盤上の観測点KMCおよび震度7の帯の中に位置するFKIとASYで余震記録を用いて合成された本震の波形もあわせ図2に示しております。

図2の左と中央は断層直交および断層平行な水平動、図の右は上下動、それぞれ速度記録です。どの観測点も断層直交方向の水平動は2つの大振幅のパルス状の震動を示していますが、断層に平行な水平動や上下動は相対的に小さくパルス状の波も顕著ではありません。このパルス波は断層面を破壊が進行

するときその前方方向にみられるもので、これまでもカルフォルニアの地震などで観測されております [Heaton et al. (1995), 額 額 (1995)]。地震動の形状と強さが断層破壊の伝播方向に依存して変化するこの現象は“指向性 (directivity)”と呼ばれるものです。この破壊伝播の前方方向の指向性はやや長周期 (ここでは1~2秒) に顕著に現れ、加速度記録では速度に比べてパルス波はそれほど明瞭にはみられません。このパルス波の周期は一般に断層面でのアスペリティーの大きさに依存します。Heaton 他 (1995) はこのパルス波が高層の建物や中低層の免震構造物の耐震性に重要な影響を及ぼすことを指摘しております。

兵庫県南部地震のときのパルス波は、断層近傍で被害の少なかったKBU, KMC, MOTでも顕著にみられますので、地震の被害は断層破壊の指向性効果のみでは説明できないこととなります。震度7の帯内にあるTKT, FKI, ASYの観測点では、パルス波が更に増幅され100cm/sを越える大振幅となっております。この大速度パルス波こそ、次章で示されるように阪神地域に大被害を引き起こす、まさにキラーパルスとなったのではないかと考えられます。

それではどうして震度7の帯で大振幅のキラーパルスが生じたのでしょうか。それを明らかにするには兵庫県南部地震の震源断層面でのすべり分布と断層面近傍の地下構造を考慮して強震動の生成過程のシミュレーションを行ってみる必要があります。ここでは震源断層として余震分布や測地データを基に図1のA, B, C, D, およびE面を仮定します。

震源をとり囲む観測点で得られた強震動記録を用いて線形波形インバージョンにより推定された本震のときの断層面でのすべり分布が図3 (表紙) の下図に示されます (Sekiguchi et al., 1998)。主要な破壊は3つのアスペリティー、発震点である明石海峡直下、淡路側の浅いところ、および神戸側やや深いところで生じ、いずれも右横ずれの動きが卓越しております。震源断層の近傍では、地質調査所や兵庫県など種々の機関によって反射法地震探査が行なわれ、図3 (表紙) の中図のように3次元構造がかなり詳細に分かってきました。この図から、震源となった断層面が盆地の端部に一致している様子が見られると思います。

震源断層でのすべり分布と断層周辺地域の地下構造を考慮して、シミュレートされた地震動の最大速度分布が図3 (表紙) の上図に示されます。ここで計算は3次元差分法で0から1Hzの周波数範囲を

対象としてなされたものです。振幅の大きい領域は神戸側では断層の南側、淡路側では断層の北側に帯状に連なっており、図1に示される被害の集中域の分布と良く対応しているようにみえます。この3次元構造による地震動のシミュレーションをスナップショットとして詳細に見ると、破壊伝播の指向性効果により形成された長周期パルス波が、盆地端部で回折し、堆積層を円錐波的に伝わる波とに別れ、断層から南に1~3km離れたところでこれらの波が重なり合い、さらに大きな振幅の震動となることが確認されます。すなわち、地震動のシミュレーション結果から、神戸地域の震度7の帯では、断層破壊の前方伝播効果と盆地端部効果(Kawase, 1996; Pitarka et al., 1996)の相乗作用によって大振幅のパルス波が形成され、そのパルス波が家屋や構造物に大被害を引き起こす源となったと考えられます。

3. 地震動の破壊力

前章で述べられたように、地震動の最大加速度や最大速度のような値だけでは、地震動の破壊力を表現できません。どんなに地震動の最大加速度や最大速度が大きくても構造物の被害が小さければ、防災という観点からは、その地震動は取るに足らないこととなります。つまり、地震動の破壊力は構造物の被害によって計られるべきで、そのためには地震動の情報に加えて、構造物の情報をインプットしなければなりません。その意味では、地震直後に発表される新しいシステムの気象庁震度も地震動の情報のみを基にしており、実際の被害との対応については今後のデータや解析を待たねば信頼出来るものとはならないといえます。

構造物を一自由度系という最も単純な形にモデル化し、1995年兵庫県南部地震と過去の被害地震の強震記録を用いて応答解析を行い、その地震応答を比較することによって1995年兵庫県南部地震の地震動の破壊力について検討しました。

応答解析に用いた強震記録を表1に示します。1995年兵庫県南部地震は、大阪ガス葺合供給所、神戸海洋気象台の2記録を、比較する対象として、

表1 応答解析に用いた強震記録

| ID | 記録地点 | 方向 | 地震名 | PGA* |
|-----|-----------|----|----------------------|------|
| FKA | 大阪ガス葺合供給所 | NS | 1995年兵庫県南部 | 802 |
| KBM | 神戸海洋気象台 | NS | 1995年兵庫県南部 | 818 |
| KSR | 釧路地方気象台 | EW | 1993年釧路沖 | 711 |
| SLM | Sylmar | EW | 1994 Northridge | 827 |
| SCT | SCT1 | EW | 1985 Mexico | 168 |
| ELC | El-Centro | NS | 1941 Imperial Valley | 342 |

*PGA: 地動最大加速度(cm/sec.²)

1993年釧路沖地震の釧路地方気象台、1994年ノースリッジ地震のシルマー、1985年メキシコ地震のSCTおよび1941年インペリアルバレー地震のエルセントロの4記録を用いました。ちなみに、釧路気象台やシルマーでは大加速度(1g弱)が観測されましたが、建物被害はそれほど大きくはありませんでした。一方、SCT(メキシコ)では最大加速度が0.17g程度ですが、大きな被害が発生しています。また、エルセントロの記録は建物の設計用地震動としてよく用いられるものです。

構造物を弾性とした場合の減衰定数5%の加速度スペクトルを図4に示します。1993年釧路沖地震の釧路地方気象台の記録(KSR)は、短周期に大きなパワーをもっているのに対して、1995年兵庫県南部地震の記録、特に葺合の記録(FKA)は1~2秒の長周期で非常に大きなパワーをもっていることがわかります。つまり、構造物を弾性と考えていたのでは、1993年釧路沖地震で短周期、即ち低層の建物などに最も大きな被害が生じているはずで、実際の被害を説明できません。そこで、構造物の復元力特性を弾塑性とし、鉄筋コンクリート造構造物を想定した履歴モデル(Takeda, et al., 1970)を用いて応答解析を行います。

そのスケルトンカーブを図5に示します。ス

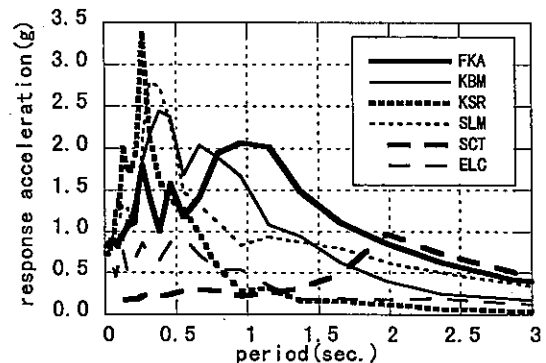


図4 各強震記録の弾性応答加速度スペクトル。

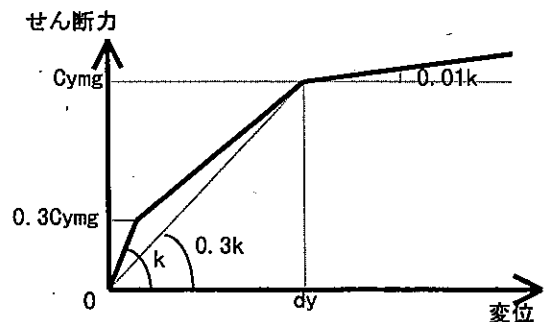


図5 履歴モデルのスケルトンカーブ。

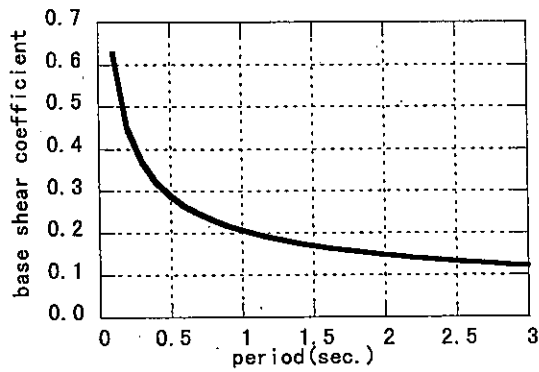


図6 鉄筋コンクリート造建物の強度分布。

ケルトンカーブの最初の折れ点はコンクリートのひび割れ、2回目の折れ点は鉄筋の降伏を表します。構造物の損傷即ち、地震動の破壊力を評価する地震応答として、ここでは構造物の応答変形を構造物の高さで規準化した応答変形角を用いました。構造物の実際の被害を評価するため、構造物の強度は、静岡県内の1615棟の鉄筋コンクリート造建物の調査結果（中埜，1988）を基にした強度分布を用いました（図6）。

応答変形角スペクトルを図7に示します。1995年兵庫県南部地震の地震動、特に葦合の記録（FKA）は他の記録に比べて非常に大きな破壊力をもっていることがわかり、実際の被害と対応しています。これは、建物の塑性化に伴う周期の伸びにより短周期の建物応答が大きくなり、弾性応答でパワーをもつ周期領域が短周期に移行することを意味しています。その結果、全ての周期、特に1秒以下の実際の構造物が多く含まれる周期領域で応答変形角は非常に大きな値となっていて、1995年兵庫県南部地震の地震動が非常に大きな破壊力をもつことがわかります。葦合の記録（FKA）の最大加速度は、1993年釧路沖地震の釧路地方気象台の記録（KSR）、1994年ノースリッジ地震のシルマーの記録（SLM）とほぼ同程度であることを考えると、その破壊力は単なる地動の最大加速度値で考えられるよりもはるかに大きいものであると言えます。

4. おわりに

阪神・淡路大震災をもたらした強震動とその構造物への破壊力を中心に、共同研究の重点課題をとり上げてみました。共同研究の主要課題の一つとしてサイト効果についても議論を深めています。大加速度・速度になる強震動の根元は震源にあることは言うまでもないことですが、2章で触れられたように、地盤・3次元地下構造が震源からの地震動を大きく

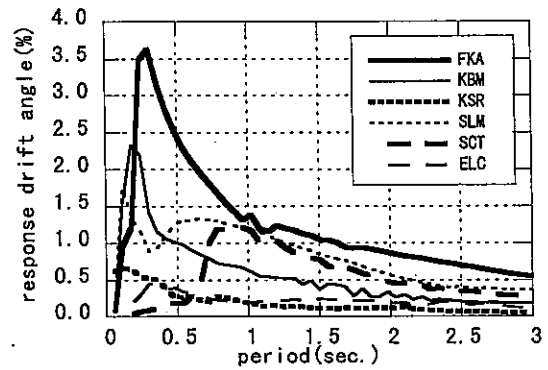


図7 各強震記録による弾塑性応答変形角スペクトル

増幅します。神戸市全体がKBU（神戸大学）あるいはKBM（神戸海洋気象台）のような地盤であったら今回のような大惨事にはならなかった筈です。釧路沖地震での大加速度も、気象台付近の表層によって増幅された結果です。1985年メキシコ地震で、メキシコ市の軟弱層上では建物を中心に大きな被害を受けましたが、それほど大きな加速度ではありませんでした。それでも地震動は、軟弱層を取り巻くごく近くの丘陵地に比べて最大加速度で約10倍、周期1秒以上では50倍もの増幅を受けております。ただし、3章で述べました建物の弾塑性モデルは日本の標準的建物を想定しており、外国の場合には各国の耐震規定に依存しますので被害とは直接結びつかない場合も有ります。このような地盤あるいはサイト効果が地震動の破壊力とどのように結びつくかはまだ十分な整理がされておられません。本年度は当初計画の最終年度にあたっており、どのような条件下（震源と地盤）で破壊力の強い地震動が発生するかを討議し整理したいと考えております。また、簡便な（弾塑性）応答計算で、より単純な破壊力の指標を見出そうと努力しております。

最後に、本稿は共同研究の分担者の方々の校閲を受けたものではなく、3人の著者の責任で記したものです。内容としては研究会での議論を参考にさせてもらいました。次年度にあらためてより包括的な報告をいたしたいと考えております。

参考文献

- Aguirre, J. and K. Irikura, 1997, Non-linearity, liquefaction, and velocity variation of soft soil layers in Port Island, Kobe, during the Hyogoken Nanbu earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 87, pp.1244-1258.
- Fukushima, Y. and K. Irikura, 1997, Attenuation characteristics of peak ground motions in the

- Hyogo-ken Nanbu earthquake, *J. Phys. Earth*, 45, 135-146.
- Heaton, H. Heaton, John F. Hall, David J. Wald, and Marvin W. Halling, 1995, Response of high-rise and base-isolated buildings to a hypothetical Mw 7.0 blind thrust earthquake, *Science*, 267, pp. 206-211.
- Iwata, T., K. Hatayama, H. Kawase, and K. Irikura, 1996, Site Amplification of ground motions during aftershocks of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake in severely damaged zone, *Journal of Physics of the Earth*, 44, 563-576.
- Kagawa T., K. Irikura, and I. Yokoi, 1996, Restoring Clipped Records of near-field strong ground motion during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, 18, 43-57.
- Kawase, H. : The cause of the damage belt in Kobe : "The basin edge effect", constructive interference of the direct S wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves, *Seis. Res. Lett.*, 67-5, pp. 25-34, 1996.
- 額瀨一起：カリフォルニアの被害地震と兵庫県南部地震，*科学*，Vol. 66, pp. 93-97, 1996.
- 中埜良昭：信頼性理論による鉄筋コンクリート造建築物の対震安全性に関する研究，*東京大学学位論文*，1988.
- Pitarka, A., K. Irikura, T. Iwata, and Takao Kagawa, 1996, Basin structure effects in the Kobe area inferred from the modeling of ground motions from two aftershocks of the January 17, 1995, Hyogo-ken Nanbu earthquake, *Journal of Physics of the Earth*, 44, 563-576, 1996.
- Pitarka, A., K. Irikura, T. Iwata, and H. Sekiguchi, 1998, Three-dimensional simulation of the near-fault ground motion for the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) , Japan, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 428-440.
- Sekiguchi, H., K. Irikura, and T. Iwata, 1998, Detailed source process of the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake using near-field strong motion data, submitted to *Proceedings of the 10th Japan Earthquake Engineering Symposium*.
- Takeda, T., M. A. Sozen, and N. N. Nielsen, Reinforce concrete response to simulated earthquakes, *Journ. Struct. Division, ASCE*, 96, No. ST5, 1970.