

機関番号：8 2 1 1 3

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：2 1 7 6 0 4 2 8

研究課題名（和文）基礎地盤系の非線形周波数応答依存性に関する実験的研究

研究課題名（英文）An experimental study on a lateral frequency dependence of the base foundation with non-linear deformation

研究代表者

壁谷澤 寿一（KABEYASAWA TOSHIKAZU）

独立行政法人 建築研究所 構造研究グループ 研究員

研究者番号：1 0 5 3 3 9 5 3

研究成果の概要（和文）：本研究では直接基礎建物の地盤ばね剛性を検証するため、既存 3 層鉄筋コンクリート校舎を対象とした直接基礎の水平載荷実験を行った。実験では基礎を含む校舎の一部を切り離し、鋼製錘を円弧子上に落下させて衝突させる動的載荷と基礎梁の間に配置した油圧ジャッキで基礎を押し切開く静的載荷の 2 種類で行った。実験結果について静的および動的作用外力に対する非線形性状を比較した。また、地盤調査結果および地盤建物相互作用モデルに基づいて地盤ばねの弾性理論剛性および等価粘性減衰を算定し、実験結果における等価粘性減衰が計算値を上回る結果が得られた。

研究成果の概要（英文）：Lateral loading test on spread foundation in an existing school building was conducted in April 2010. The school building was three-story reinforced concrete structure. A part of the building was separated through the foundation to the roof level, to which static or impact load was applied horizontally at the base foundation level. The static and dynamic relations of the lateral load and the relative displacement at the base level are compared and analyzed with interaction spring model based on another boring investigation on soil. The equivalent damping factor of the test result was larger than analytical estimate.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：建築耐震工学

科研費の分科・細目：建築構造・材料

キーワード：基礎入力逸散、錘衝突試験、地盤非線形性、地盤周波数依存性

## 1. 研究開始当初の背景

直接基礎の場合、あるいは杭基礎の場合でも、基礎まわりの地盤の強非線形性状は建物の地震動入力逸散性状に大きな影響を与える可能性があると考えられるが、これらは設計にとっては安全側の現象であることもあって、定量的に実態を把握した観測あるいは

実験研究は極めて限られており、したがって、地盤構造物系の解析モデルの検証も境界領域では必ずしも十分ではない。

2004 年新潟県中越地震において K-net 小千谷では極大の地震動が記録された。EW 方向に最大加速度 1314(gal)、加速度応答が最大 4G 以上、1 秒付近において 2G 相当であり、0.3

～1.0 秒の周期帯で設計用地震動を大幅に上回る。これが建物に入力された地震動であるとするとき非常に大きな応答塑性変形が算定され、標準的な水平耐力を保有する RC 構造物では概ね大破に近い甚大な被害が想定されうる。申請者らは本震直後に K-net 小千谷の南東約 150m に位置する小学校および近傍 Free field において余震観測を行った結果、K-net 観測余震、近傍 Free field 観測余震が概ね一致しており、建物 1 階観測余震では明らかな入力損失が認められた。小学校校舎は昭和 35 年に建設された鉄筋コンクリート造 3 階建てであるが、被災レベルは応急被災度判定で軽微または小破であった。余震観測データ、被害調査にもとづいて建物への入力低減効果によって実際の被害は自由地盤の地震動から推定される被害よりも大幅に軽減していた可能性が示された。ただし、被害調査結果と観測記録の差異については未だ理論的背景に基づいた解釈がなされていないのが現状である。

現在、地盤構造物系の解析、時刻歴応答計算、限界耐力計算などにおいては、入力地震は工学地盤の加速度応答スペクトルまたは時刻歴を与えて、地盤ばねの非線形性は等価剛性、等価減衰の線形応答で近似的にモデル化するのが一般的である。地盤ばねの非線形応答を弾塑性型の強非線形性状で直接モデル化できるかどうかは地震動レベル、地盤の周波数依存性や逸散減衰効果などからさらに検討する必要があるが、上記の研究では、少なくとも地盤の非線形化に先行して基礎地盤間の滑り応答が発生する場合には、建物応答そのものに周期依存性がなくなる可能性もある。地盤ばねが大きく非線形化する場合を想定した今後の相互作用効果の研究では地盤ばねの周波数依存性よりも静的非線形性状を第一義的に評価する手法が重要になると考えられる。

## 2. 研究の目的

近年の地震被害調査では、低層鉄筋コンクリート構造物の近傍表層地盤で観測された加速度を入力とした地震応答解析における最大応答変形と比較すると、軽微な損傷に留まっている例が多い。この原因の一つとして表層地盤と構造物に入力される加速度が異なっていることが考えられる。この現象は表層地盤と建物内観測加速度の比較によって検証可能であるが、(1)増幅された表層地盤の応答加速度と建物に入力される加速度が異なる現象、(2)上部構造から伝達される慣性力によって基礎近傍の軟弱地盤が非線形変形する現象を独立して評価することはできない。

本研究では低層鉄筋コンクリート構造物が被災するレベルの応答せん断力が基礎に

作用する時の地盤の非線形変形性状を検証することを目的として、2004 年新潟県中越余震において建物近傍地盤と基礎位置で異なるレベルの加速度記録が観測された既存鉄筋コンクリート造学校校舎の直接基礎に対して、水平載荷実験を計画実施した。

## 3. 研究の方法

実験対象区画の拡大平面図および立面図をそれぞれ図 1 および図 2 に示す。本校舎は 1970 年から 1974 年にかけて第 4 期にわたって建設されたコ型一体構造の鉄筋コンクリート造 3 階建て建物である。基礎形式は直接基礎である。基礎載荷実験は南棟と東棟が交差する階段室と教室に挟まれた連層耐震壁を含む 1×1 スパンの区画で行った。教室側は 3 階、階段室を含む区画はペントハウスを含む 4 階建てとなっている。実験対象区画は既存校舎からウォールソーを用いて、交差する各階床スラブ、梁(基礎梁を含む)、腰壁部分を全て切断し、実験対象区画以外から切り離すように計画した。実験対象区画の桁行方向スパン長さは 4.25(m)、梁間方向スパン長さは 7.25(m) である。各階の階高は 1F 4.25(m)、2F 3.6(m)、3F 3.7(m)、PF 2.7(m) である。(1 階床は階段室南側部分でのみ 0.45(m)下がっている)。実験対象区画の基礎については幅 4200 (mm)、せい 9200 (mm)と非常に水平面積の大きな直接基礎となっている。基礎を含めた試験体総重量は 2215(kN)であった(仕上げ重量を除く)。

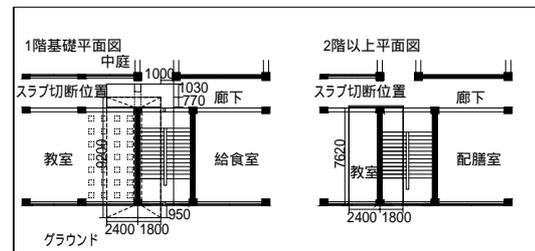


図 1 実験対象区画の拡大平面図

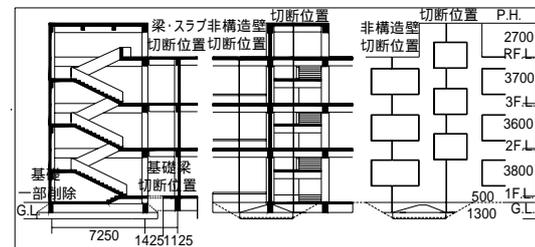


図 2 実験対象区画の立面図

衝突載荷実験は最大 10 (m) 程度の高さから鋼製錘を振り子上に落下させることで梁間方向の直接基礎側面に衝突させた。基礎載荷高さは 1 階床より -0.75(m) に位置とした。載荷実験方法を図 3 に示す。錘を支持する鉄骨

フレームは衝突時の反力が試験体に作用しないように、実験対象区画から切り離された校舎屋上床、梁側面、袖壁位置で支持されている。鋼製錘は鉄骨フレームからシャックル、ワイヤー、クレビスを介して4点吊りしており、錘吊り上げ時には錘側面から載荷発射装置を介して500(kN)トラッククレーンを用いて吊り上げた。錘は1(m)×1(m)×0.04(m)の錘板を50枚重ねて作製し、総質量は17(ton)である。

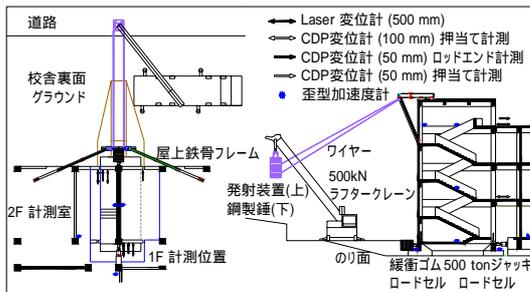


図3 衝突載荷および静的漸増載荷実験方法

本実験ではコンクリート基礎に鋼製錘を衝突させるため、衝突力は地震時に基礎に作用する慣性力に比べて非常に周期が短くなる。そこで、衝突作用力を地盤-建物連成系の固有振動数に対応させるため、衝撃力を緩衝させる天然ゴム(1(m)×1(m)×0.1(m)、数枚)を導入した。最大落下高さ(10(m)程度)および錘重量から衝突エネルギーを計算し、ゴムの最大変形時までの作用時間が建物周期(5(Hz))の1/4程度に対応するようにゴムの硬度(65)および総厚さ(1.2m)を決定した。静的水平載荷実験では実験対象区画の錘衝突位置の裏側(北側)から切り離れた校舎基礎を反力として梁間方向に片側単調載荷を行った。実験対象区画の北側基礎梁をスパン中央で1.2(m)切出し、5(MN)の油圧ジャッキおよびロードセルを挿入してその間隙部から梁端間の相対変形を拡大させて構造物基礎に静的外力を作用させた。載荷高さは錘衝突高さと一致させている。

#### 4. 研究成果

本実験は4月3日から21日までに載荷実験の準備作業を行い、4月22日から25日の期間に基礎載荷実験を行った。各加力実験における基礎最大応答変形、荷重およびせん断力係数を表1に示す。

衝突載荷実験(1回目)では最大変形0.69(mm)、最大荷重1794(kN)であった。基礎を含めた重量で除したせん断力係数は0.81であった。一方、静的載荷実験(1回目)では、最大変形0.56(mm)、最大荷重は1132(kN)であった。その後の衝突実験(3回目、4回目)では基礎せん断力係数が1.49、2.23を記録し、

地震時に上部構造から伝達されることが想定される慣性力よりも大きな値を示した。

表1 載荷実験における最大応答値

衝突載荷実験 最大計測値				静的載荷実験 最大計測値			
加振	変形 (mm)	荷重 (kN)	せん断 力係数	加振	変形 (mm)	荷重 (kN)	せん断 力係数
No1	0.69	1794	0.81	No1	0.56	1132	0.51
No2	1.28	2045	0.92	No2	2.86	3430	1.55
No3	1.79	3299	1.49	No3	300	4645	2.10
No4	5.78	4931	2.23	耐力低下	3180		1.44

表2 載荷実験における最大応答値

衝突 載荷実験	割線剛性 (kN/mm)	初期剛性 (kN/mm)	作用力 周期(s)
No.1	3147	5260	0.256
No.2	2378	6250	0.256
No.3	2244	7650	0.208
No.4	1321	9480	0.160
静的載荷 実験	割線剛性 (kN/mm)	初期剛性 (kN/mm)	
No.1	2311	3399	
No.2	1199	3565	
No.3	726	3489	

衝突載荷実験および静的載荷実験における原点と最大荷重点の割線剛性および作用力周期を表2に示す。なお、実験結果における作用力周期は最大荷重計測までの時間を1/4サイクル応答時間として算定した。衝突載荷実験における最大荷重点に対する割線剛性は作用外力の大きさに応じて徐々に低下しているが、最も非線形性状を示した載荷実験(4回目)における割線剛性であっても静的漸増載荷実験時の初期剛性よりも高い値を示している。これは静的作用力に対する地盤クリープ変形が含まれるためであると考えられる。衝突実験(4回目)では緩衝ゴムの枚数を減らしたため、周期が短くなったが、作用外力の周期は校舎固有周期(5~6(Hz))と概ね良好な対応関係を示している。

基礎載荷実験における水平力と水平変形の関係を図4に示す。これらの復元力特性においては荷重-変形関係に非線形性が見られたものの、基礎の水平変形は1.79(mm)、5.78(mm)と上部構造の応答変形レベルと比較すると非常に小さかった。衝突実験終了後に行った基礎の静的押し切り載荷実験では10(mm)程度変形した時点で最大基礎せん断力係数2.10を記録し、後に緩やかに耐力が低下した。除荷後に再載荷した水平耐力(基礎底面静摩擦係数)は1.44であった。衝突載荷実験における地盤ばね剛性は非常に大きく、非線形変形性状を含む割線剛性であって

も静的漸増荷重実験時の初期剛性よりも明らかに高い剛性が計測された。

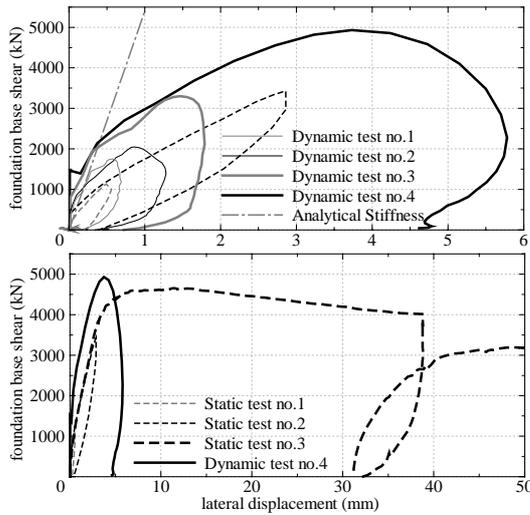


図4 基礎荷重実験における荷重 - 変形関係

表3 基礎近傍地盤調査結果

深度 (m)	土質名	区分	N 値
0.50	盛土	表層	1
0.80	粘土	表層	1
1.30	シルト	沖積世	1
1.75	細砂	沖積世	90+
2.35	砂礫	洪積世	90+

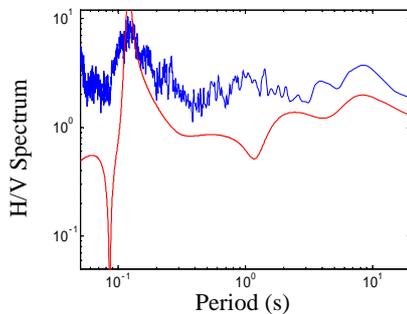


図5 基礎近傍地盤 H/V スペクトル

実験結果における直接基礎の動的水平加振結果に基づいて地盤ばねの剛性低下率  $G/G_0$ 、等価粘性減衰  $h_{eq}$  を算定した。既往の研究では同小学校建物に対する新潟県中越地震の実効入力を評価するため、2005年11月に小千谷小学校周辺のボーリング地盤調査および微動観測を行っている。これらの調査は校舎近傍合計5ヶ所で行われたが、そのうち観測点 No.2 は今回筆者らが荷重実験を行った基礎のごく近傍である。調査点では表3に示すように深度0.8(m)までは軟弱な盛土と粘土、深度1.75(m)まではシルト・細砂と非常に軟弱な地盤(N=1)で構成されているが、2.35m以深は砂礫(N>60)となっている。基礎

底面は深度1.35(m)の高さ位置にあり、基礎下には1.2(m)程度の軟弱層地盤を有していたと推定される。図5に示す微動観測の(H/V)スペクトルから推定される地盤の固有周期は0.12(s)であった。これはK-net小千谷観測点(0.28(s))やその他の微動観測点のH/Vスペクトルから得られる固有周期よりかなり小さく、表層地盤の層厚が極めて薄かったためであると考えられる。

本検討では標準貫入試験結果(N値90)から式(1)に示す今井らの回帰式を用いてせん断波速度を仮定し、( $V_s = 410(m/s)$ 、砂礫層)、式(2)を用いて剛基礎仮定における地盤ばねの弾性剛性を算定した。

$$V_s = 136 N^{0.246} (m/s), G_0 = \rho V_s^2 (kN/m^2) \quad (1)$$

$$K_0 = 8GR / (2 - \nu) (kN/m) = 5400 (kN/m) \quad (2)$$

$$G/G_0 = 1 / (1 + 12.4 \gamma^{0.75}), h_{eq} = 18.9 \gamma^{0.30} \quad (3)$$

ここで、 $\gamma$ :せん断ひずみ(%),  $\rho$ :単位体積重量( $kN/m^3$ ), R:基礎面積等価円半径(m),  $\nu$ :ポアソン比

上記から算定される理論弾性剛性( $K_0=5400(kN/m)$ )を図4に重ねて示す。表2に示した衝突実験結果(1回目)の初期弾性剛性( $K_0=5260(kN/m)$ )は理論剛性値と良好な対応関係を示し、水平変形0.34(mm)、理論弾性剛性で換算すると作用力が1800(kN)を超過した程度から明確な非線形応答性状を示している。また、衝突実験結果では1回目の荷重では0.6倍、4回目の荷重では0.25倍程度にまで割線剛性が低下している。

表3 等価粘性減衰の比較

加振	$G/G_0$	砂礫モデル		
		実験	heq	
No1	0.581	0.192	2.25E-04	0.061
No2	0.417	0.193	5.45E-04	0.079
No3	0.424	0.224	5.24E-04	0.078
No4	0.252	0.240	1.49E-03	0.107

実験対象区画は基礎深さ位置における近傍地盤の標準貫入試験結果は段丘堆積層の砂礫であり、地盤周期も非常に短い。一般に建物地盤連成系の固有周期よりも地盤周期が短い場合、逸散減衰がなく地盤ばねの履歴減衰は構成する基礎下地盤の粘性減衰に相当する。そこで、標準的な砂礫地盤モデルの  $G \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$  曲線(今津・福武モデル、式(3)参照)に基づいて、割線剛性の剛性低下率  $G/G_0$  に対応するせん断ひずみ および粘性減衰定数  $h_{eq}$  を算定し、実験結果と等価粘性減衰の比較を行った。

実験における復元力特性から得られた等価粘性減衰は剛性低下率および標準的な砂

礫モデルから推定された等価減衰定数よりも明らかに大きいものであった。各衝突載荷実験において両者を比較すると、概ね 13%程度実験結果の減衰定数が過大であった。これは直接基礎の側面や底面（割栗石）などが摩擦して減衰効果をもたらすなどとした、直接基礎周辺の実際の特性を反映した結果であると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 2 件)

壁谷澤寿一、壁谷澤寿海、金裕錫、細川洋治、既存鉄筋コンクリート建物直接基礎の衝突水平載荷実験、コンクリート工学年次論文集 Vol.33、日本コンクリート工学会、2011.7(査読有)

壁谷澤寿一、壁谷澤寿海、金裕錫、細川洋治、新潟中越地震で被災した鉄筋コンクリート造学校校舎の直接基礎の水平載荷実験、構造工学論文集 Vol.57B(2011年4月)日本建築学会、2011.4(査読有)

〔学会発表〕(計 3 件)

Toshikazu Kabeyasawa, Toshimi Kabeyasawa, Lateral loading test on spread foundation in an existing reinforced concrete school building, The Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Society, 2011.4, (Auckland, New Zealand)

壁谷澤 寿海、壁谷澤 寿一、金裕錫、細川洋治、既存 RC 学校校舎直接基礎の水平載荷実験・実験結果、地震工学シンポジウム、日本地震工学会、2010.11(つくば)

壁谷澤 寿一、壁谷澤 寿海、金裕錫、細川洋治、既存 RC 学校校舎直接基礎の水平載荷実験・実験結果、地震工学シンポジウム、日本地震工学会、2010.11(つくば)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

壁谷澤寿一 (KABEYASAWA TOSHIKAZU)

研究者番号：10533953