

## 1. 1923 年関東地震での建物被害と沖積層厚との関係の再評価

Review of Experiential Relation between Building Damage Rate and Thickness of Alluvial Deposit during the 1923 Kanto Earthquake

技術支援課 小川 好、中山俊雄

### 1. はじめに

1923 年関東地震の被害から得られた教訓は、85 年以上を経た現在の耐震・地震防災にもつよい影響を残している。そのひとつが、この地震での建物被害と沖積層の層厚との関係である。この関係は、後に東京都防災会議地震部会の初代部会長となる河角 廣<sup>1)</sup>によって、1951 年に提案された。地震の被害が地盤の種類によって大きく異なることは、いくつかの地震被害からすでによく知られた事実であったこともあり、ほぼ同時期に制定された建築基準法の告示<sup>2)</sup>では、地盤の種類によって異なる設計震度が与えられており、特に沖積地盤は層厚 30m を境に二分する規定となっている。周知のように、地盤種別の考えは現行の耐震規定にも引き継がれている。

ところで、当然のことながら、地震被害と地盤との関係を明らかにするためには、できるだけ正確な被害分布と地質図が必要になる<sup>注 1)</sup>。河角の論文では、地質図として関東地震後に復興局によって実施された地質調査報告書<sup>4)</sup>が使われている。その後、より詳細な地盤図である東京地盤図<sup>5)</sup>が、2 章で解説することになる「できるだけ正確な地震被害分布」の作成にかかわった北澤五郎らによって作成されたことから、大崎順彦<sup>6)</sup>は被害と沖積層厚との関係を再度検証し、1962 年に公表している。

東京都内の沖積層の層序については、その後、数多くの地質調査ボーリングが実施、蓄積されるとともに、

注 1) しかし、河角が建物被害と地盤との関係を調査した時点では、このような条件がそろう都市は東京と横浜、名古屋にすぎなかった<sup>3)</sup>。

地盤図<sup>7)</sup>や地形分類図<sup>8)</sup>の形で沖積層の層厚分布は見直されており、河角や大崎が参照した当時の層厚分布とは異なっている部分もある。一方、東京都都市整備局が 5 年ごとに実施している地域危険度測定調査では、低地での地震動強度を沖積層厚にしたがって区分しているが、次回(第 7 回)ではこの地盤区分の見直しが予定されており、当センターで事前評価することになっている。

以上のような経緯から、この報告では、これまでに公表されている沖積の層厚分布図を比較するとともに、その違いが「地震時の建物被害と沖積層厚との関係」にどの程度影響するかを検討する。次に、現在までに収集されているボーリング資料をもとに、地盤の卓越周期と関東地震での地震動の主要な周期との関係を考察する。これに先立って、次章では関東地震での建物被害のデータがどのようにして記録されるに至ったかを、簡単にまとめることにする。

### 2. 関東地震での建物被害の記録

地震被害統計としては、河角、大崎の報告とも震災予防調査会報告第百号(甲)に掲載されている松澤武雄<sup>9)</sup>の報告をもとにしている。松澤の報告では、建物の被害率から震度分布を求めることが目的とされており、尺度として一般に広くいわたっている木造家屋が選ばれたものである。集計は府県と東京市内とに分けられており、府県については県庁に照会して集めた資料を、東京市 15 区については警視庁の資料を使用している。東京府の集計では荏原郡と豊多摩郡、北豊島郡、南足立郡、南葛飾郡、八王子市、南多摩郡、大

島、北多摩郡、西多摩郡について、町村別の全戸数<sup>注2)</sup>と全潰・半潰<sup>注3)</sup>家数、全潰・半潰百分率がのせられている。また、東京市内については、市内を焼失区域と非焼失区域とに分け、区内の町丁目別の全潰・半潰家数が建物様式の注記とともに掲載されている。このうち、沖積層厚との対比に利用されているのは、市内15区のデータである。

ここで疑問になるのが、どのようにして火災になる前の倒壊建物を調べたのかという点である。関東地震では東京市のほぼ半分の面積が焼失したが、焼失区域は主に沖積層が堆積する低地であった。例えば、代表的な低地の区である本所区と浅草区、深川区での焼失面積百分率は、それぞれ100%と95.2%、82.6%であった<sup>12)</sup>。

もうひとつの疑問は、調査主体がなぜ警視庁なのかという点である。これは、1919年に施行された市街地建築物法（適用区域は東京・京都・大阪・横浜・神戸・名古屋）の執行が、警視庁や府県の警察部によって行われたことによる<sup>13),注4)</sup>。このことは、関東地震での建物被害の情報に関しては、きわめて幸運に働いた。焼失区域内の調査では、地震直後の火災前短時間の間に、警戒や救助のために巡回した警察官に対して、報告書を依頼している。中には、焼失前にすでに調査が完了していた例もあった<sup>10)</sup>。調査の中心であった警視庁保安部建築課の北澤<sup>注5)</sup>は、震災の年に開かれた講演会で次のように述べている。「各警察署に、警視庁

---

注2)全潰・半潰百分率を計算するには、理想としては母数として町村別の総棟数が必要となる。松澤<sup>9)</sup>によれば総戸数の資料しか得られなかったため、住家と非住家の区分に努めたが、不明なものが多かったと述べている。

注3)当時の全潰は、平屋では屋根以下が潰れたもの、二階家では階下が潰れて二階がそのままのもの、または階上が潰れて階下はそのままのものであるとしている。また、半潰は潰れてはいなくても改築しなければ使用に耐えないものとなっている<sup>10,11)</sup>。全潰・半潰とも、現在の基準に照らすと、再建が必要という点から全壊に相当する。

注4)当時は、消防も「消防本署」という名称で警視庁に所属していた<sup>14)</sup>。

注5)北澤五郎は震災後に、震災予防調査会の囑託員となっている<sup>15)</sup>。

の建築課の人達が行って居ますから、其の人達に依頼をしまして震災の直ぐ後で負傷者の手当の為とか又は自分の受持区域内の状況視察の為とかで、其の受持の区域内を廻って居った巡查に聞いたり、又は其の付近に居った人の記憶とかを頼りに調べまして、出来る限りの調査をして貰ったのであります<sup>16)</sup>」もちろん、焼失しなかった区域に比べれば、調査精度は必ずしも高いとはいえず、北澤も「但し此調査がどれ程まで正確なものであるかと云ふことになると、チョット判断に苦しむのであります。先ず半分位間違っていると考えても、それでも大体的見当は附け得られるのではないかと考えて居るのであります<sup>16)</sup>」と話している。なお、山の手の焼けなかった部分の調査では、5、6人が1ヶ月ほどをかけて現地調査した結果であるとしている<sup>16)</sup>。

このように当時の状況を考えれば徹底した調査でも、被害率から震度分布を求めるという目的に対しては十分ではなかった。それは震災前の建物分布がわからないという点であり、松澤<sup>9)</sup>も「震災前ノ建物数ニツイテハ警視庁及市社会課ニ照会シタレドモ更ニ要領ヲ得ズ。百分率ヲ見出し得ナイノハ遺憾デアル」と慨嘆している。この結果、被害率を算定する過程で震災の数年前の統計を参照することからくる誤差を生むことになった。そうはいつても、関東地震での建物被害調査はその後の耐震工学の研究に大きく寄与することになる。警視庁の組織が調査に有利に働いたとはいえ、北澤五郎の貢献は高く評価されてよい。その証拠に、同じく市街地建築物法の適用区域にあった横浜では、このような徹底した被害調査は残されていない<sup>17)</sup>。

### 3. 建物被害と沖積層厚との関係

1951年に発表された河角の報告<sup>1)</sup>に掲載された、建物全壊率と沖積層厚との関係を図-1に引用する。河角は全潰率を算定する上で、北澤の報告をもとに全潰数と半潰数の和を真の全潰としている。また、母数である町丁目別の建物数としては、大正10年の「東京市各区町村別戸数及び人口<sup>18)</sup>」から総戸数を求めているが、この数値が建物の棟数であるかどうかは不明としている。なお、図中の右軸に示された $K$ は、物部の式から導かれた震度である。

河角はこの図から、沖積層の層厚が 25mを越すと震度が急に増すとしており、この層厚から全壊率も急増することになる。ただし、層厚が 40mのところでの観測数は 7 にすぎないのであまり信用できないかもしれないとも述べている。

大崎順彦の論文<sup>6)</sup>は河角の結果を発展させたもので、全潰数（被害率）の取り方と母数である町丁目別の建物数の出典は同一である。各町を代表する沖積層の層厚としては、町のエリアが複数の深度区分にまたがる時は面積比で平均深度を決めるとともに、台地が含まれるときは深度を 0mとしている。

次に、沖積層厚と被害率をそれぞれ 5mと 10%ごとの区間に区分し（表-1 参照）、沖積層厚と被害率は各区分での分散の逆数に比例した重みをつけた最小二乗法により近似関数を求めている。図-2 に解析結果を引用して示す。図中の破線は 95%信頼限界である。また、図中の点は河角によって与えられた、1944 年南海地震での被害率と沖積層厚の関係である。

大崎の結果でも、沖積層厚が 25mから 30mを越えると被害率は急激に上昇する。また、表-1 からも理解されるように、沖積層厚 39.5m以下のデータは 6 個、45.5m以下では 3 個と必ずしも多くないことから、信頼限界は広がる結果、予測される被害率の最大値は 100%になる。

以上の結果から、河角と大崎が沖積層厚を決定する際に利用した復興局の地盤図や東京地盤図と、それ以降に作成された地盤図とを比較する際に重要となるのは、東京低地では地表面がほぼ標高 0mであることが

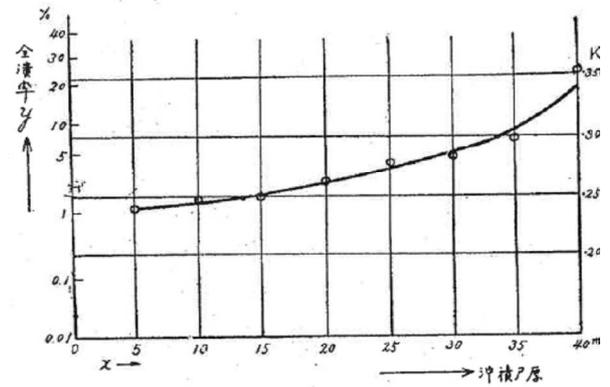


図-1 沖積層の厚さと被害及び震度  
(河角 廣の論文<sup>1)</sup>の図-3による)

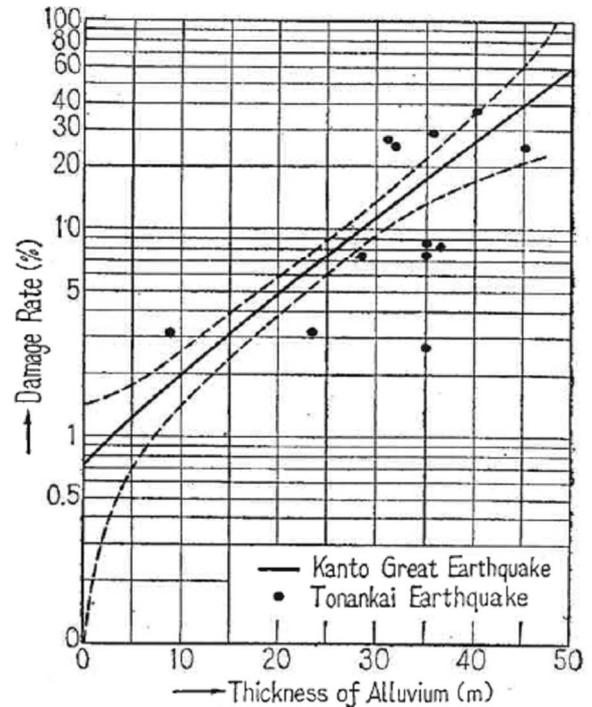


図-2 木造建物の被害率と沖積層厚との関係  
(大崎順彦の論文<sup>6)</sup>の図-5による)

表-1 木造建物の被害率と沖積層厚との関係でのデータの度数分布  
(大崎順彦の論文<sup>6)</sup>の表-1をもとに作成)

層厚	4.5m 以下	9.5m 以下	14.5m 以下	19.5m 以下	24.5m 以下	29.5m 以下	34.5m 以下	39.5m 以下	45.5m 以下	度数
被害率										
85%以上					1	1				2
85%以下						1				1
75%以下					2		1			3
65%以下				1	1	3		1		6
55%以下					1			1		2
45%以下	1	1	1			3	2		1	9
35%以下		2	4	2	4	3	8	1	1	25
25%以下	2	4	8	5	2	12	9			42
15%以下	13	20	19	8	19	27	12	1	1	120
5%以下	443	336	194	91	86	69	33	2		1,254
度数	459	363	226	107	116	119	65	6	3	1,464
平均	層厚	1.04	7.24	11.80	16.60	22.10	27.13	31.20	36.67	41.67
	被害率	0.84	1.36	2.71	3.42	6.17	9.26	10.95	26.00	26.00
分散	層厚	1.21	1.20	1.41	1.59	1.26	1.48	1.22	1.70	2.36
	被害率	2.86	4.16	6.45	8.08	14.78	15.67	13.25	22.86	13.37

ら、被害率が急増する-25mから-30mの等深線と、被害率がきわめて高く予測されるにもかかわらずサンプル数が少なかった-40m以深の分布ということになる。

実は、同じ関東地震での木造建物の被害と沖積層厚との関係についてでも、横浜での結果は層厚が40mより厚くなると被害の増え方が緩慢になり、東京での結果とは異なることが当時から指摘されていた<sup>19)</sup>。沖積層厚が40m以上の地域は東京の低地に広く分布することから、評価の結果は地域危険度の地盤区分にも大きく影響することになる。

#### 4. 地盤

ここでは、判定の基準となっている沖積層について検討する。現在、沖積層の研究がすすむにつれ、沖積層の定義も変更されてきている。地質学的には1万年前以降の時代を沖積世（完新世）と呼び、この時期に形成された地層を沖積層（完新統）と定義している。一方、最終氷期で最も海面の低下した時期（約1.8万年前）以降を後氷期とよび、この時期に形成された地層をチュウ積層（「沖積層」）と呼ぶこともある。地盤工学の分野では、その物性的特長から、沖積層を後者の意味であついている例が多い。

復興局の「東京及横浜地質調査報告書」<sup>4)</sup>（以下復興局報告書と呼ぶ）と東京地盤図<sup>5)</sup>では、沖積層の定義について明確な説明は書かれていないが、その調査目的や掘削方法から判断すると、地層の硬軟が沖積層と洪積層、第三紀層の判定基準に大きく影響を与えていると考えられる。

復興局報告書が扱う東京は、旧東京市（15区）域であり、その地域は、現在の山手線環状内の地域と台東・中央・港・江東区西部（横十間川まで）の範囲である。東京の下町低地の地下地質は沖積層と第三紀層

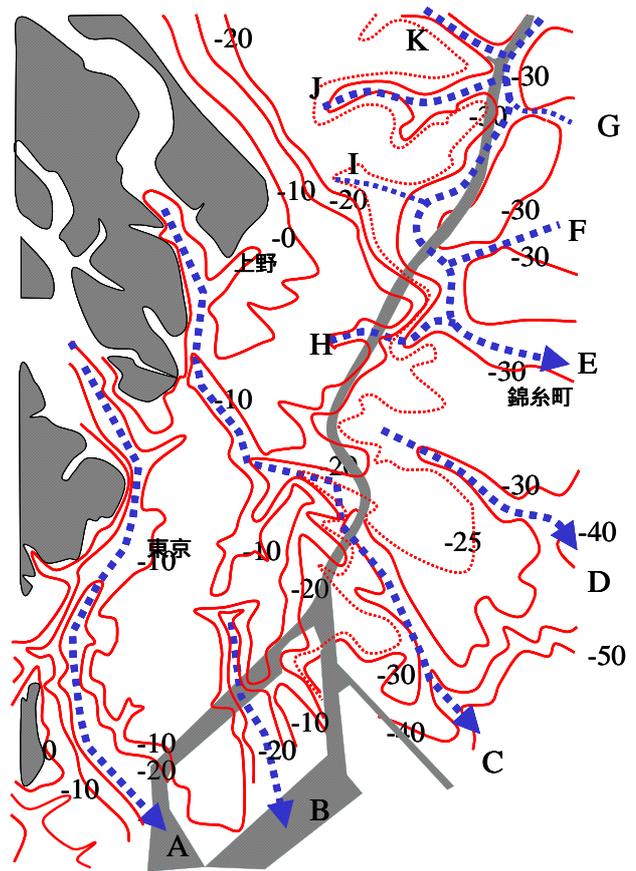


図-3 復興局の地盤図<sup>4)</sup>による沖積層基底等深線

から構成されるとし、沖積層を上部・中部・下部の3層に区分している（表-2参照）。上部層はさらに泥炭層、粘土・砂礫層、粘土質砂礫層の3つの層相に細分されている。中部層は主に粘土層からなり、隅田川沿岸に分布し、下部層は砂礫層からなる。下部の砂礫層は第三紀台地（このような表現がある）の周縁と台地渓谷に分布するとしている。第三紀台地は、東京都地盤地質図（1969）<sup>7)</sup>では埋没波食台と呼ばれているものである。

復興局報告書の3版 地表及地下地質図（第三紀）（2万分の1）には、沖積層基底等高線が示されている（図-3参照）。この等高線図からは、-10mと-25m

表-2 対象とした3つの地盤図の地層対比

	東京及横浜地質調査報告書	東京地盤図		東京23区地盤地質図	
		西縁地区	江東地区		
沖積層	埋土	現河川・海浜堆積物～崩壊土層		表土・埋土	
	上部	上部	上部有楽町層	墨田砂層	有楽町層上部
	1) 泥炭層				
	2) 粘土・砂・礫互層				
	3) 粘土質砂層				
中部	下部	下部有楽町層	墨田泥層	有楽町層下部	
4) 粘土層					
下部		丸の内礫層			
	5) 砂礫層				
	第三紀層			七号地層 埋没段丘礫層	

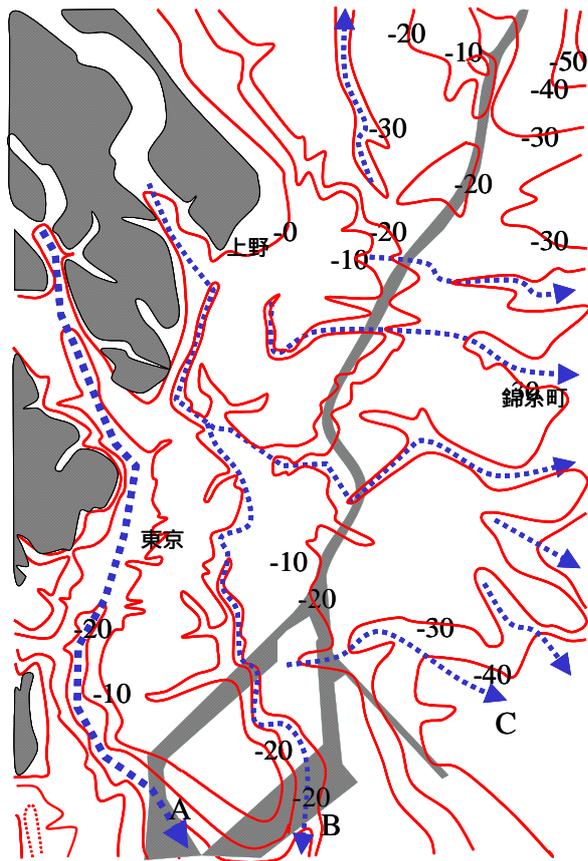


図-4 東京地盤図<sup>5)</sup>による沖積層基底等深線

~-30mの2つの平坦面が広く区分することが示されている。-25mから-30mの平坦面はさらに-25mと-30mの2つの平坦面と考えたほうがいいかもしれない。次にこれら平坦面を開析する谷(埋没谷)が示されている。この埋没谷は小支谷まで含めると以下の11の枝谷が認められる。

④日比谷谷、⑤明石町~晴海、⑥忍の池~秋葉原(昭和通り)~日本橋~深川~木場、⑦森下から扇橋、⑧隅田川沿い(堤通り~浅草~本状~亀戸)、⑨向島~京島、⑩白鬚橋~東向島、⑪蔵前~本所、⑫千束から浅草、⑬三ノ輪から白鬚橋)、⑭南千住から堤通りである。⑥から⑭の谷は⑤の枝谷として描かれている。

東京地盤図<sup>5)</sup>は23区全域を対象にしており、付図-1の東京地質図では沖積層基底等深線が縮尺3万分の1で示されている。沖積層(群)は下町累層の下部・上部として区分されている。沖積層の層相は隅田川以西と以東に区分して記載され、以西の下部層は下位の丸の内礫層と上位の下部有楽町に細分されている。隅田川以东では丸の内礫層は分布せず、下部層は墨田泥層とされ、下部有楽町層に対比されている。

沖積層基底等深線図では、荒川放水路河口で50m以

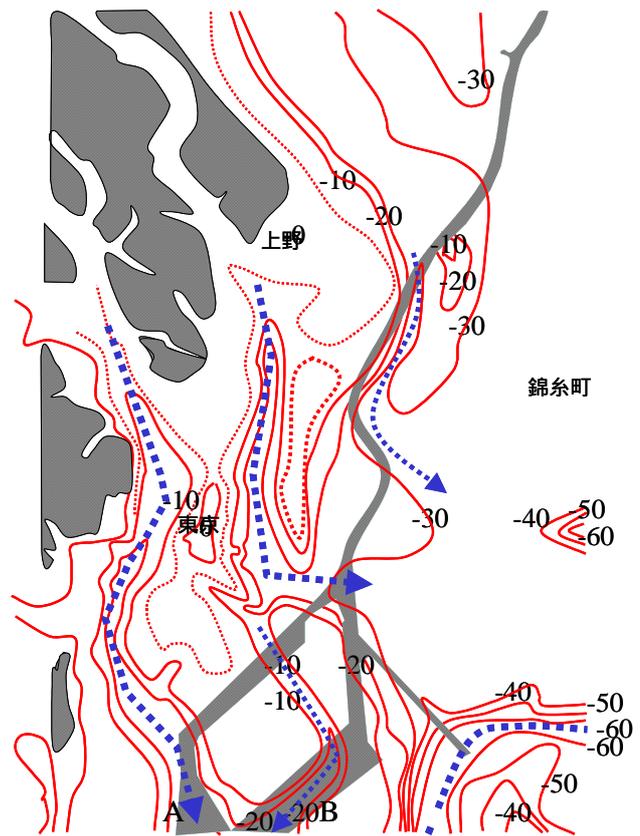


図-5 東京都地盤地質図<sup>7)</sup>による沖積層基底等深線

上の沖積層の厚さになる本谷(埋没谷)を発見、この本谷(埋没谷)は荒川と利根川が下町低地北部で合流南下し、谷底の東京礫層に達すると側方侵食をはじめ、礫層表面に幅広い谷(埋没谷)を形成したとしている。

大きな支谷としては、主谷に平行する小岩から荒川方水路にむかう谷と、浅草裏から三河島を経て江北橋東に至る北流する谷が描かれている。

武蔵野台地の小河川はその大部分が東流してこの荒川系河川に合流し、これら小河川(更新世の谷)を埋めて沖積層が堆積するとしている。

復興局報告書の調査域(旧東京市)には、平坦面である-10m面と-30m面が分布し、-10mから-20m間は急崖となっている。このうち、-10mの平坦面は立川段丘とされている。これら平坦地を開析する支谷としては、浜松町から日比谷にかけて沖積層厚20mの谷、豊住南から晴海・月島の中央部を経て入船町の西に連なる-20mの谷(これは広小路に連なっている)、掘留~浜町に連なる-20mの谷、竹町東~柳原南~厩橋南に連なる谷が示されている(図-4参照)。

この2つの地盤図を比較すると、-10m平坦面、-25から-30m面の分布域はほぼ共通している。この平坦

面を開析する谷（枝谷）については、復興局報告での④、⑤の谷は東京地盤図においても認定しているが、⑥については、その下流部の流路が異なっている。⑦とその枝谷である⑧から⑩の谷については、両者でその位置は微妙に異なってくる。これら谷の位置の違いは、調査対象域の違いとデータ量の違いから起きていると考えられる。

次に、これら地盤図と東京都地盤地質図（23区）と比較すると、次のことが指摘できる。

平坦面の分布域は、東京都地盤地質図（23区）においても、ほぼ同じ分布として示されている。

-10m平坦面は復興局報告書では第三紀台地とし、東京地盤図では立川段丘に比定しているが、東京都地盤地質図（23区）では、沖積世に形成された埋没波食台としている。

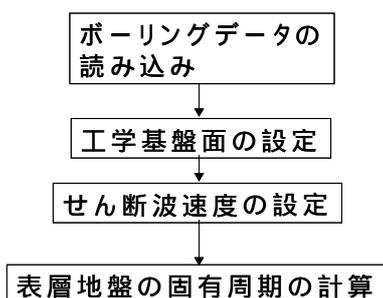
-20m～-30m平坦面については、東京都地盤地質図（23区）では立川面期の埋没段丘としている。

埋没谷については、復興局報告での④から⑩の谷は、東京都地盤地質図（23区）においても同様な谷の存在が示されているが、その他の谷については、描かれていない。

沖積層深度が-40m以深の地域については東京地盤図では本谷の一部として表現されているが、東京都地盤地質図（23区）にも同様に示されている。ただし、今回の調査地域を外れるが、本体の流路については、東京地盤図と東京都地盤地質図（23区）とは多少異なっている。

前節で述べた被害率が急増する層厚 25mから 30mの等深線で示される地域は、復興局報告書および東京地盤図では調査域の約半分の面積をしめ、40mを越える地域は、いずれの図でも調査地域の東南隅の一角を占めるに過ぎない。

図-5 卓越周期計算フロー



## 5. 地盤の卓越周期

当センターが所有するボーリングデータをもとに、地盤の卓越周期の算定を試みた。地盤の卓越周期の求める方法としては、図-5に示すフローに従った。

### 1) 工学基盤面の設定

「道路橋示方書・同解説V耐震設計編」<sup>20)</sup>に準拠し、粘土層の場合はN値25以上、砂質土層の場合はN値50以上の地層が4回以上連続するとき、その地層の上面深度とした。

土丹、岩盤、凝灰岩の地層があるときは、その上面深度とした。ただし、これら地層の上位にの条件の地層が存在するときは、の深度を採用した。

### 2) せん断波速度の設定

卓越周期の計算にあたり地層の分割の方法として、各地層ごとの平均N値を用いる方法と、各深度のN値ごとに地層を分割する方法の2通りの方法を採用した。

せん断波速度の算定は、道路橋示方書の式を採用した。

$$\text{粘性土} : V_s = 100N^{1/3}$$

$$\text{砂質土} : V_s = 80N^{1/3}$$

各地層を粘性土、砂質土の2タイプに分類する基準は表-3に基づいて行った。

### 3) 卓越周期の計算

表層地盤の卓越周期の算定は、道路橋示方書に準じた方法と、等価な炭層地盤に置換し、算定する方法で行った。

$$T = 4 \sum_i \frac{H_i}{V_{si}}$$

$$T = 4H/V_{eq}$$

表-3 土質名を粘性土と砂質土に分類する基準

土質名	土質タイプ
表土	砂質土
腐植土	粘性土
ローム	粘性土
粘土	粘性土
シルト	粘性土
細砂	砂質土
中砂・粗砂	砂質土
砂	砂質土
礫	砂質土
ヘドロ	粘性土

ここで 
$$V_{eq} = \sum_i H_i \cdot V_{si} / H$$

$T$  : 卓越周期

$H_i$  : 各層の層厚

$H$  : 表層地盤厚

$V_{si}$  : 各層のせん断速度

$V_{eq}$  : 表層地盤の等価 S 波速度

#### 4) 東京低地の地盤の卓越周期

上記の方法で求めた地盤の卓越周期を図-5 に示す。地盤の卓越周期と沖積層の厚さを比較すると、おおよそ以下のことが指摘できる。

- 0.4 秒以下の地盤は、台地と-10m平坦面（埋没波食台）をあわせた地域に対応する。
- 0.4 秒～0.8 秒の地盤は沖積層等深線の-10～-20 m間に対応する。
- 0.8 秒～1.2 秒の地盤は-30m平坦面にほぼ対応する。
- 1.2 秒以上の地盤は沖積層等深線の-40m以深の地盤に対応する。

#### 6. 関東地震でのゆれの推定

建物被害が地盤によって影響を受けるメカニズムは、一般に次のように考えられている。

地盤の表層が軟弱（S 波速度が遅い）ため、基盤から上昇してきた地震波（S 波）がこの層に捉えられ、増幅する<sup>注6)</sup>。

表層の層厚と S 波速度によって規定される卓越周期が、基盤から入射してきた地震波（S 波）の周期に一致すれば、共振して増幅する。

注6) 表層の S 波速度が著しく低い場合や、中間層に S 波速度の低い層がある場合には、地表の最大加速度が地中の値よりも小さくなることもある。しかし、このような場合でも、最大速度や最大変位は一般には地表で増幅する。

注7) 最大変位を記録したのは大森式地震計（倍率 1 倍）であり、主要動のはじめに両振幅 17cm で振り切れた。

注8) 今村は実際の最大振幅を推定するにあたって、震動性状が似ている余震との比較から南北動の方が東西動よりも大きいと考え、両者の組み合わせから 20cm に達していたとしている。

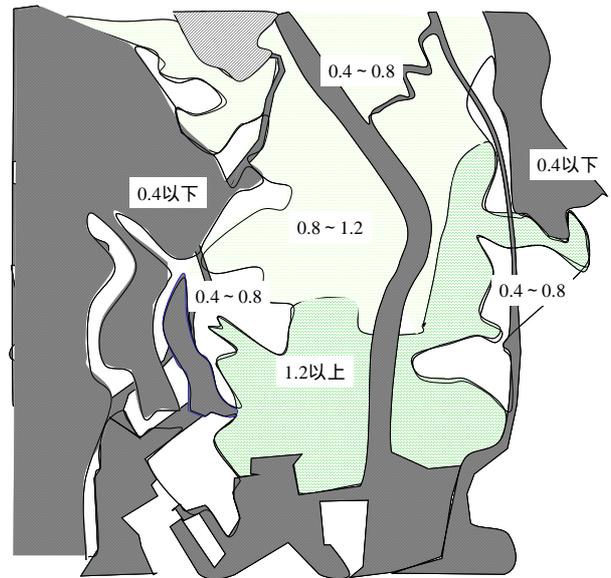


図-5 計算された地盤の卓越周期  
(ボーリング点での値を領域として平均している)

表層と入射地震動が共振した周期に、さらに建物の固有周期が一致すれば建物のゆれは著しく大きくなり、多くの被害が発生する。

それでは、関東地震のときのゆれはどのように記録されているのであろうか。東京では当時、本郷の東京帝国大学地震学教室と、麹町の中央气象台（地震計室は日本丸内）で地震観測が行われていた。それぞれ、種類のちがう数台の地震計が稼働していたが、いずれも固有周期の長い変位型地震計であった。もちろん、完全な地震記録は得られていないものの、前者については今村恒明<sup>21)</sup>によって、後者については中村左衛門太郎<sup>22)</sup>によって記載が残されている。今村によると、地震学教室に設置されていた地震計のうち、倍率が 5 倍以上の地震計は初期微動のはじめで描針が逸脱したのに対し、2 倍以下のものは初

注9) 地震動を周期  $T$  の正弦波と考えると、加速度  $A$  は

$$A = 4\pi^2 d / T^2$$

で表される。ここで  $d$  は変位の片振幅（両振幅の半分）である。

注10) 石本巳四雄<sup>23)</sup>は同じ波形に見られる小周期に注目し、これが 0.3 秒の周期であれば約 250gal の地震動が存在したことになり、関東地震での東京本郷の加速度は 300gal 程度であったと推定している。なお、石本は同書で、東京横浜の山の手での卓越周期を 0.3 秒としている。

期微動だけは記録できた<sup>注7)</sup>。中でも、今村式 2 倍強震計（水平動の固有周期 10 秒）は東西動、南北動とも主要動の 5 秒間は完全な記録があり、その後は東西動のみ動いていた。この地震計による初動継続時間は 12.4 秒、主要動の周期は 1.35 秒であった。また、両振幅が 8.86cm<sup>注8)</sup>であることから最大加速度は  $97\text{cm}/\text{sec}^2$  となり<sup>注9)</sup>、重力加速度の 10 分の 1 が最大加速度であると推定している<sup>注10)</sup>。

一方、中村によれば、東京で観測された初動継続時間は約 12 秒、固有周期が 2 秒の普通地震計（水平動の倍率は 5 倍）による主要動の周期は 1.2 秒であった。また、地震計が破損したときの振幅は東西動、南北動ともに 10cm であることから、最大加速度は  $200\text{cm}/\text{sec}^2$  としている。

なお、宇佐美龍夫<sup>12)</sup>による日本被害地震総覧では、東京で観測した周期は 1.2 秒、最大地動振幅は 14 ~ 20cm を採用している<sup>注11)</sup>（注 12）。

ボーリング柱状図から計算した地盤の卓越周期は、沖積層厚が 25m から 40m の範囲では、おおむね 0.8 秒から 1.2 秒となることがわかった。この周期は地盤を弾性と考えたときの値である。地盤は大きなゆれでは非線形的な性質が強く現れ、卓越周期も伸びることから、関東地震のような場合にはもう少し長周期になると考えてよい。基盤から入射してきた地震波の周期を 1.2 秒から 1.35 秒と考えると、関東地震では沖積層厚が 25m から 40m と厚くなる

にしたがって、共振することになる。それでは、この周期で木造建物が全壊すると考えてよいであろうか。

古典的な耐震工学の概念にしたがえば、その答えは否である。大崎<sup>26)</sup>によれば、木造建物の固有周期は戦前と戦後では大きく異なり、旧来の民家構造の周期は 0.3 秒から 0.5 秒であるのに対し、戦後の建物では 0.24 秒くらいのもが多い。沖積層と共振して増幅された地震動の周期を 1.2 秒程度と考えると、戦前の木造建物の周期が長いとしても共振すると考えるのには無理がある<sup>注13)</sup>。

これに対して、最近では違った考え方も提案されている。1995 年兵庫県南部地震以降、数多くの強震計が全国に設置され、震源域での記録を含むきわめて強い地震動が蓄積されてきている。これらの地震動には、観測点のそばで甚大な建物被害をもたらした記録もあるものの、ほとんど被害らしい被害も発生していないものもある。境ら<sup>28)</sup>はこれらの記録を分析した結果、大きな被害に対応する地震動の周期は 1.2 秒から 1.5 秒の間であるとしている<sup>注14)</sup>。

このような新たらしい知見を受け入れるとすれば、関東地震で沖積層厚が厚くなるにしたがって、木造建物の被害率も大きくなったという事実がうまく説明できる。また、被害が増大していく限界の周期は、関東地震に限定すれば 1.35 秒程度であり、境らの結果を受け入れれば 1.5 秒程度までということにな

注 11) 東京大学地震学教室（本郷）も中央気象台（旧江戸城本丸）も、どちらも台地（段丘）での観測である。

注 12) 関東地震の際に本郷で観測された強震記録は、のちに欠落部分の復元が試みられている。森岡<sup>24)</sup>は、ユース式円盤型地震計に記録された、起動から数回の短い中断がある 2 分間の記録を再現している。この地震計は固有周期 6 秒で倍率 1 倍、関東地震当時すでに日常観測には使用されていなかったものの良好に管理されていた。再現された地震動の応答スペクトルから読みとられるピークの周期は 0.2 秒と 0.45 秒、0.7 秒、8~9 秒、12~13 秒であり、今回の議論で対象としている 1 秒から 1.5 秒の周期は記録されていない。一方、今村式 2 倍強震計は横田ら<sup>25)</sup>によって飽和部分が再現されているが、やや

長周期地震動の解析を目的としており、あらかじめ 2 秒以下が除去されている。

注 13) ただし、沖積層が厚く堆積した地盤での建物被害を、定性的に説明している先進的な意見もあった。大崎<sup>27)</sup>は建物が被害を受けて部分的に変形すると長周期化することを静的実験で示し、この長周期化で被害が進行する結果、周期の長い地震動と強震して建物の損傷が進行すると説明している。

注 14) 建物に被害を与える地震動の周期は、従来から考えられていた建物固有周期の 4 倍程度になることは、ほぼ明らかになった<sup>29)</sup>。ただし、そのメカニズムについては、いまだに大崎（注 13）と同様、建物の損傷による長周期化という解釈が支配的意見のままである。

る。結果的に、沖積層の層厚が厚くなればなるほど被害が高くなるということは、おそらく考えなくてもよいのであり、層厚が 50m 程度からは被害はほぼ一定と考えてよいであろう。

## 7. まとめ

河角 廣によって提案され、大崎順彦によって再確認された関東地震での被害率と沖積層厚との関係は、現在の耐震工学や地震防災に強い影響を残している。表ら<sup>3)</sup>も指摘しているように、このような関係を導くには、できるだけ正確な被害調査と詳細な地質図が必要になる。このことは、経験則の正しさを再確認する作業にも同様にあてはまるであろう。被害調査については、最近になって武村<sup>30)</sup>による見直しが行われているのに対して、地盤に関しては、沖積層の堆積学的検討が進んでいるにもかかわらず、特に再検討されてはいなかった。また、なぜ沖積層が厚いところでは被害率が高かったのかという点についても、新たな検討は見られなかった。

本報告では、このような問題意識から復興局の作成した地盤図および東京地盤図と、東京都土木技術研究所が作成した地盤図とを比較した。次に、ボーリングデータをもとに地盤の卓越周期を計算するとともに、関東地震でのゆれの主要な周期と近年の地震で被害をうける周期帯の検討から、沖積層厚が増すにしたがって被害率が上昇するメカニズムの検討を試みた。この結果をまとめると、以下のようになる。

(1) 現在の地盤図に比べると、復興局の地盤図や東京地盤図には支谷が多く記載されるものの、埋没段丘面である約-30mの平坦面についてはあまり違いはない。

(2) 沖積層深度が-40m以深の埋没谷は、東京市 15 区の範囲では 3 地盤図ともほぼ同じ位置に分布し、その面積は狭い。ただし、この一致は東京市の範囲をはずれた本谷では認められず、本谷の位置と深度は異なっている。

(3) ボーリング資料から地盤の卓越周期を計算すると、周期が 0.8 秒から 1.2 秒の範囲は-30m平坦面にほぼ対応する。また、1.2 秒以上の地盤は沖積層等深線図の-40m以深の地盤に対応する。関東地震程度のゆれを想定すると、地盤の非線形性から卓越周期はこれよりやや長周期となる。

(4) 関東地震では地震計による完全な記録は取れなかったものの、当時推定された主要動の周期は 1.2 秒から 1.35 秒であった。

(5) 上記の(3)と(4)の関係から、関東地震では沖積層厚が 25mから 40mと増すにしたがってゆれは共振して大きくなったと推定できる。また、沖積層厚が 50m程度からは、ゆれの大きさはほぼ一定と考えてよいであろう。

(6) 地震動の周期が 1.2 秒から 1.35 秒程度で木造建物の被害が大きくなることは、近年の地震被害をもとにした知見とも矛盾しない。また、最近の地震でも被害を多く受ける木造建物には古い在来構造のものが多いことから、時代による木造建物の固有周期の違いもこの結論に大きく影響しないと推論される。なお、関東地震当時は、建物に甚大な被害を与える地震の周期は、1 秒から 1.5 秒と考えられていた<sup>31)</sup> ことは、興味ある事実である。

## 参考文献

- 1) 河角 廣 (1951): 東京の震害分布と地盤に就いて 附 試錐結果より見たる大阪の地盤, 建築雑誌, Vol.66, No.773, 8-15
- 2) 大崎順彦 (1973): 地域と地震・地盤と地震, 建築雑誌, Vol. 88, No.1067, 667-672
- 3) 表 俊一郎, 宮村撰三 (1951): 横濱市及び名古屋市の震害分布と地盤との関係, 建築雑誌, Vol. 66 No.773, 17-22

- 4) 復興局建築部 (1929) : 東京及横浜地質調査報告書
- 5) 東京地盤調査研究会 代表 北沢五郎 (1959) : 東京地盤図, 技報堂
- 6) OHSAKI Yorihiro (1962) : Earthquake Damage of Wooden Buildings and Depth of Alluvial Deposit, 日本建築学会論文集, 第 72 号, 29-32
- 7) 東京都土木技術研究所 (1969) : 東京都地盤地質図 (23 区), 東京都地質図集 2
- 8) 建設省国土地理院 (1980, 1981) : 土地条件図 (東京東北部, 東京東南部, 東京西北部, 東京西南部)
- 9) 松澤武雄 (1925) : 木造建築物ニヨル震害分布調査報告, 震災予防調査会報告第百号 (甲), 岩波書店, 163-260
- 10) 北沢五郎 (1926) : 木造被害調査報告, 震災予防調査会報告第百号 (丙上), 岩波書店, 1-16
- 11) 宇津徳治ほか (2001) : 地震の辞典 (第 2 版), 朝倉書店, 569
- 12) 宇佐美龍夫 (2003) : 最新版 日本被害地震総覧 [416]-2001, 東京大学出版会, 272-278
- 13) 東京百年史編集委員会 (1972) : 東京百年史, 東京都, 第 4 巻, 105
- 14) 東京消防庁のホームページ (<http://www.tfd.metro.tokyo.jp/libr/qa/>) の「消防雑学辞典」による (2009 年 8 月 3 日)
- 15) 今村明恒 (1925) : 関東大地震ニ関スル本会ノ調査事業概要, 震災予防調査会報告第百号 (甲), 岩波書店, 1-20
- 16) 北沢五郎 (1924) : 東京に於ける一般災害の概況, 震災に関する第四回講演会録, 建築雑誌, Vol. 38, No. 449, 595-600
- 17) 田中大作 (1926) : 横浜市ニ於ケル被害建築物調査報告, 震災予防調査会報告第百号 (丙下), 岩波書店, 379-401
- 18) 東京市調査課 (1922) : 東京市各区町別戸数及人口 (大正 10 年 12 月 31 日現在)
- 19) 金井 清 (1973) : 関東地震の建物被害について, 関東大地震 50 周年論文集, 東京大学地震研究所, 51-55
- 20) 日本道路協会 (1990) : 道路橋示方書 耐震設計編, 34
- 21) 今村明恒 (1925) : 関東大地震調査報告, 震災予防調査会報告第百号 (甲), 岩波書店, 21-65
- 22) 中村左衛門太郎 (1925) : 関東大震災調査報告, 震災予防調査会報告第百号 (甲), 岩波書店, 67-140
- 23) 石本巳四雄 (1935) : 地震とその研究, 古今書院, 102-115
- 24) MORIOKA Takaki (1980) : The Ground Motion of the Great Kwanto Earthquake of 1923, 日本建築学会論文集, 第 289 号, 79-91
- 25) 横田治彦, 片岡俊一, 田中貞二, 吉沢静代 (1989) : 1923 年関東地震のやや長周期地震動, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 401 号, 35-45
- 26) 大崎順彦 (1983) : 地震と建築, 岩波書店, 105
- 27) 文献 26 と同じ, 134-143
- 28) 境 有紀, 神野達夫, 瀧藤一起 (2004) : 震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度計算法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 585 号, 71-76
- 29) 境有紀, 瀧藤一起, 神野達夫 (2002) : 建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 555 号, 85-91
- 30) 武村雅之 (2003) : 1923 年関東地震による東京都中心部 (旧 15 区内) の詳細震度分布と表層地盤構造, 日本地震工学会論文集, 第 3 巻, 第 1 号, 1-36
- 31) 内藤多伸 (1923) : 建物の震動, 震災に関する第一回講演会録, 建築雑誌, Vol. 37, No. 447, 409-411